

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
ESCUELA DE POSGRADO**  
**Programa de Doctorado en Ingeniería Agroindustrial**



---

**“Optimización de bandejas biodegradables con almidón de papa residual (*Solanum tuberosum*) y harina de residuos de maracuyá (*Passiflora edulis*) por termoformado”**

---

**Tesis para optar el grado académico de  
Doctor en Ingeniería Agroindustrial**

**Autor:**

**Mg. Córdova Chang, Any Berenice**  
Código ORCID: 0000-0002-2179-0641

**Asesor:**

**Dra. Aguirre Vargas, Elza Berta**  
Código ORCID: 000-0003-1659-9874  
DNI N° 19096335

**Nuevo Chimbote - PERÚ**  
**2025**



**UNS**  
ESCUELA DE  
POSGRADO

## CONSTANCIA DE ASESORAMIENTO DE LA TESIS

Yo, **Dra. Elza Berta Aguirre Vargas**, mediante la presente certifico mi asesoramiento de la Tesis de doctorado titulada: **Optimización de bandejas biodegradables con almidón de papa residual (*Solanum tuberosum*) y harina de residuos de maracuyá (*Passiflora edulis*) por termoformado**, elaborado por la doctoranda **Mg. Any Berenice Córdova Chang**, para obtener el Grado Académico de Doctor en **Ingeniería Agroindustrial** en la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, 22 de setiembre de 2025

**Dra. Elza Berta Aguirre Vargas**

ASESORA

CÓDIGO ORCID 0000-0003-1659-9874

DNI N° 19096335



**UNS**  
ESCUELA DE  
POSGRADO

**HOJA DEL AVAL DEL JURADO EVALUADOR**

**OPTIMIZACIÓN DE BANDEJAS BIODEGRADABLES CON ALMIDÓN DE PAPA  
RESIDUAL (*Solanum tuberosum*) Y HARINA DE RESIDUOS DE MARACUYÁ  
(*Passiflora edulis*) POR TERMOFORMADO**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA  
AGROINDUSTRIAL**

**Dr. Víctor Alejandro Ascurrá Valle**

PRESIDENTE

CÓDIGO ORCID 0000-0001-5755-5267

DNI N° 17866619

**Dr. Wilson Daniel Simpalo López**

SECRETARIO

CÓDIGO ORCID 0000-0002-8397-7145

DNI N° 40186130

**Dra. Elza Berta Aguirre Vargas**

VOCAL

CÓDIGO ORCID 0000-0003-1659-9874

DNI N° 19096335



### **ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

A los veintidós días del mes de setiembre del año 2025, siendo las 17:30 horas, en el aula P-01 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designados mediante Resolución Directoral N° 789-2025-EPG-UNS de fecha 01.09.2025, conformado por los docentes: Dr. Víctor Alejandro Ascurra Valle (Presidente), Dr. Wilson Daniel Símpalo López (Secretario) y Dra. Elza Berta Aguirre Vargas (Vocal); con la finalidad de evaluar la tesis titulada: "**OPTIMIZACIÓN DE BANDEJAS BIODEGRADABLES CON ALMIDÓN DE PAPA RESIDUAL (SOLANUM TUBEROSUM) Y HARINA DE RESIDUOS DE MARACUYÁ (PASSIFLORA EDULIS) POR TERMOFORMADO**"; presentado por la tesista **Br. Any Berenice Cordova Chang**, egresada del programa de Doctorado en Ingeniería Agroindustrial.

Sustentación autorizada mediante Resolución Directoral N° 812-2025-EPG-UNS de fecha 16 de setiembre de 2025.

El Presidente del jurado autorizó el inicio del acto académico; producido y concluido el acto de sustentación de tesis, los miembros del jurado procedieron a la evaluación respectiva, haciendo una serie de preguntas y recomendaciones al tesista, quien dio respuestas a las interrogantes y observaciones.

El jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como APROBADO, asignándole la calificación de DIECINUEVE (19).

Siendo las 19:00 horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Dr. Victor Alejandro Ascurra Valle  
Presidente

Dr. Wilson Daniel Símpalo López  
Secretario

Dra. Elza Berta Aguirre Vargas  
Vocal/Asesor

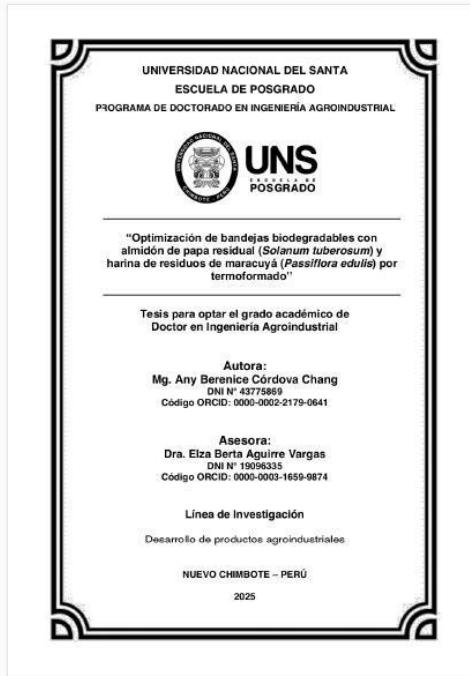


## Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Any Berenice CORDOVA CHANG  
Título del ejercicio: Doctorado en Ingeniería Agroindustrial  
Título de la entrega: Informe de tesis\_Documento de Doctorado en Ingeniería Agroindustrial  
Nombre del archivo: OCTORADO\_ING\_AGROINDUSTRIAL\_\_C\_RDOVA\_CHANG\_ANY\_...  
Tamaño del archivo: 2.79M  
Total páginas: 119  
Total de palabras: 26,697  
Total de caracteres: 149,998  
Fecha de entrega: 28-dic-2025 11:36p.m. (UTC-0500)  
Identificador de la entrega: 2851675953



Derechos de autor 2025 Turnitin. Todos los derechos reservados.

# Informe de tesis\_Doctorado en Ingeniería Agroindustrial

## INFORME DE ORIGINALIDAD



## FUENTES PRIMARIAS

| Rank | Fuente   | Porcentaje |
|------|--|------------|
| 1    | <a href="http://repositorio.uns.edu.pe">repositorio.uns.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                     | 5%         |
| 2    | <a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a><br>Fuente de Internet                                     | 1%         |
| 3    | <a href="http://dspace.esPOCH.edu.ec">dspace.esPOCH.edu.ec</a><br>Fuente de Internet                         | 1%         |
| 4    | <a href="http://repositorio.espam.edu.ec">repositorio.espam.edu.ec</a><br>Fuente de Internet                 | 1%         |
| 5    | <a href="http://qdoc.tips">qdoc.tips</a><br>Fuente de Internet   | 1%         |
| 6    | <a href="http://www.journalindustrial.com">www.journalindustrial.com</a><br>Fuente de Internet               | 1%         |
| 7    | <a href="http://es.scribd.com">es.scribd.com</a><br>Fuente de Internet                                       | 1%         |
| 8    | Submitted to University of Medicine and Dentistry of New Jersey<br>Trabajo del estudiante                    | <1%        |
| 9    | <a href="http://revistas.unsm.edu.pe">revistas.unsm.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                         | <1%        |
| 10   | <a href="http://dspace.unitru.edu.pe">dspace.unitru.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                         | <1%        |
| 11   | <a href="http://ciad.repositorioinstitucional.mx">ciad.repositorioinstitucional.mx</a><br>Fuente de Internet | <1%        |
| 12   | <a href="http://www.cec.uchile.cl">www.cec.uchile.cl</a><br>Fuente de Internet                               | <1%        |

## INDICE GENERAL

|   |     |
|---|-----|
| RESUMEN .....   | xiv |
| ABSTRACT .....  | xv  |
| INTRODUCCIÓN .....  | 16  |
| CAPITULO I.....   | 19  |
| PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....   | 19  |
| 1.1. PLANTEAMIENTO Y FUNDAMENTACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....           | 19  |
| 1.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....                                       | 19  |
| 1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....                               | 21  |
| 1.4. DELIMITACIÓN DEL ESTUDIO .....   | 21  |
| 1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN .....                        | 21  |
| 1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN: GENERAL Y ESPECÍFICOS .....                   | 22  |
| CAPITULO II .....   | 24  |
| MARCO TEÓRICO .....   | 24  |
| 2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....                                | 24  |
| 2.2. MARCO CONCEPTUAL .....   | 28  |
| CAPITULO III .....  | 32  |
| MARCO METODOLÓGICO.....   | 32  |
| 3.1. HIPÓTESIS CENTRAL DE LA INVESTIGACIÓN .....                                  | 32  |
| 3.2. VARIABLES E INDICADORES DE LA INVESTIGACIÓN .....                            | 32  |
| 3.3. MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN .....  | 34  |
| 3.4. DISEÑO O ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN .....                                   | 34  |
| 3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA .....  | 36  |
| 3.6. ACTIVIDADES DEL PROCESO INVESTIGATIVO .....                                  | 36  |
| 3.7. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN .....                            | 37  |
| 3.8. PROCEDIMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS .....                             | 39  |
| CAPITULO IV .....   | 40  |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....  | 40  |
| 4.1. EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE PAPA RESIDUAL Y HARINA DE RESIDUOS DE MARACUYÁ..... | 40  |

|   |     |
|---|-----|
| 4.2. CARACTERIZACIÓN PROXIMAL DEL ALMIDÓN DE PAPA RESIDUAL Y DE LA HARINA DE LAS CÁSCARAS DE MARACUYÁ ..... | 43  |
| 4.3. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS BANDEJAS BIODEGRADABLES .....   | 45  |
| 4.4. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS BANDEJAS BIODEGRADABLES .....   | 77  |
| 4.5. PROPIEDADES MICROESTRUCTURALES DE LAS BANDEJAS BIODEGRADABLES .....                                    | 94  |
| CAPITULO V .....  | 105 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....  | 105 |
| 5.1. CONCLUSIONES .....   | 105 |
| 5.2. RECOMENDACIONES.....   | 106 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y VIRTUALES .....  | 108 |
| ANEXOS .....  | 115 |

## INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Cuadro 1:</b> Componentes del diseño.....   | 34 |
| <b>Cuadro 2:</b> Respuestas del diseño .....   | 35 |
| <b>Cuadro 3:</b> Tratamientos del diseño de mezclas .....  | 35 |
| <b>Cuadro 4:</b> Caracterización proximal del almidón de papa residual y de la harina de las cáscaras de maracuyá..... | 43 |
| <b>Cuadro 5:</b> Promedio de los parámetros $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ ; de las bandejas biodegradables .....               | 46 |
| <b>Cuadro 6:</b> ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta $L$ .....   | 47 |
| <b>Cuadro 7:</b> Estadísticas de ajuste para la respuesta $L$ .....  | 47 |
| <b>Cuadro 8:</b> Ecuación de la respuesta $L$ .....  | 48 |
| <b>Cuadro 9:</b> ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta $a$ .....   | 50 |
| <b>Cuadro 10:</b> Estadísticas de ajuste para la respuesta $a$ .....   | 50 |
| <b>Cuadro 11:</b> Ecuación de la respuesta $a$ .....   | 51 |
| <b>Cuadro 12:</b> ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta $b$ .....  | 54 |
| <b>Cuadro 13:</b> Estadísticas de ajuste para la respuesta $b$ .....   | 54 |
| <b>Cuadro 14:</b> Ecuación de la respuesta $b$ .....   | 55 |
| <b>Cuadro 15:</b> Resultados obtenidos para las variables de respuesta.....  | 57 |
| <b>Cuadro 16:</b> ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta densidad .....                                       | 59 |
| <b>Cuadro 17:</b> Estadísticas de ajuste para la respuesta densidad.....   | 60 |
| <b>Cuadro 18:</b> Ecuación de la respuesta densidad.....   | 60 |
| <b>Cuadro 19:</b> ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta espesor.....   | 64 |
| <b>Cuadro 20:</b> Estadísticas de ajuste para la respuesta espesor .....   | 65 |
| <b>Cuadro 21:</b> Ecuación de la respuesta espesor .....   | 65 |
| <b>Cuadro 22:</b> ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta humedad.....   | 68 |
| <b>Cuadro 23:</b> Estadísticas de ajuste para la respuesta humedad .....   | 69 |
| <b>Cuadro 24:</b> Ecuación de la respuesta humedad .....   | 69 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Cuadro 25:</b> ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta capacidad de absorción de agua ..... | 73 |
| <b>Cuadro 26:</b> Estadísticas de ajuste para la respuesta capacidad de absorción de agua .....        | 73 |
| <b>Cuadro 27:</b> Ecuación de la respuesta capacidad de absorción de agua .....                        | 74 |
| <b>Cuadro 28:</b> Restricciones del procedimiento de optimización numérica.....                        | 76 |
| <b>Cuadro 29:</b> ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta dureza .....                         | 80 |
| <b>Cuadro 30:</b> Estadísticas de ajuste para la respuesta dureza .....                                | 81 |
| <b>Cuadro 31:</b> Ecuación de la respuesta dureza .....  | 81 |
| <b>Cuadro 32:</b> ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta fracturabilidad.....                 | 83 |
| <b>Cuadro 33:</b> Estadísticas de ajuste para la respuesta fracturabilidad .....                       | 84 |
| <b>Cuadro 34:</b> Ecuación de la respuesta fracturabilidad .....                                       | 84 |
| <b>Cuadro 35 :</b> ANOVA para el modelo lineal de la respuesta resistencia a la tracción .....         | 88 |
| <b>Cuadro 36:</b> Estadísticas de ajuste para la respuesta resistencia a la tracción .....             | 89 |
| <b>Cuadro 37:</b> Ecuación de la respuesta resistencia a la tracción.....                              | 89 |
| <b>Cuadro 38:</b> ANOVA para el modelo lineal de la respuesta elongación .....                         | 91 |
| <b>Cuadro 39:</b> Estadísticas de ajuste para la respuesta elongación .....                            | 92 |
| <b>Cuadro 40:</b> Ecuación de la respuesta elongación .....  | 92 |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1:</b> Extracción de almidón de papa residual.....   | 41 |
| <b>Figura 2:</b> Extracción de harina de residuos de maracuyá.....   | 42 |
| <b>Figura 3:</b> Superficie 3D de la respuesta L.....  | 48 |
| <b>Figura 4:</b> Superficie de contorno de la respuesta L .....  | 49 |
| <b>Figura 5:</b> Superficie 3D de la respuesta a.....  | 52 |
| <b>Figura 6:</b> Superficie de contorno de la respuesta a.....   | 53 |
| <b>Figura 7:</b> Superficie 3D de la respuesta b .....   | 55 |
| <b>Figura 8:</b> Superficie de contorno de la respuesta b.....   | 56 |
| <b>Figura 9:</b> Superficie 3D de la respuesta densidad.....   | 61 |
| <b>Figura 10:</b> Superficie de contorno de la respuesta densidad .....  | 62 |
| <b>Figura 11:</b> Superficie 3D de la respuesta espesor .....  | 66 |
| <b>Figura 12:</b> Superficie de contorno de la respuesta espesor .....   | 67 |
| <b>Figura 13:</b> Superficie 3D de la respuesta humedad .....  | 70 |
| <b>Figura 14:</b> Superficie de contorno de la respuesta humedad.....  | 71 |
| <b>Figura 15:</b> Superficie 3D de la respuesta capacidad de absorción de agua .....                                     | 74 |
| <b>Figura 16:</b> Superficie de contorno de la respuesta capacidad de absorción de agua .....                            | 75 |
| <b>Figura 17:</b> Superficie 3D de deseabilidad .....  | 77 |
| <b>Figura 18:</b> Gráficas de fuerza y distancia aplicada en los análisis de dureza y fracturabilidad.                   |    |
| .....  | 80 |
| <b>Figura 19:</b> Superficie 3D de la respuesta dureza .....   | 82 |
| <b>Figura 20:</b> Superficie de contorno de la respuesta dureza.....   | 83 |
| <b>Figura 21:</b> Superficie 3D de la respuesta fracturabilidad .....  | 85 |
| <b>Figura 22:</b> Superficie de contorno de la respuesta fracturabilidad.....  | 86 |
| <b>Figura 23:</b> Gráficas de fuerza y distancia aplicada en los análisis de resistencia a la tracción y elongación..... | 88 |
| <b>Figura 24:</b> Superficie 3D de la respuesta resistencia a la tracción.....   | 90 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 25:</b> Superficie de contorno de la respuesta resistencia a la tracción .....   | 91  |
| <b>Figura 26:</b> Superficie 3D de la respuesta elongación .....   | 93  |
| <b>Figura 27:</b> Superficie de contorno de la respuesta elongación.....   | 94  |
| <b>Figura 28:</b> Absorbancia Vs. Número de ondas para los tratamientos de la bandeja biodegradable con harina de residuos de maracuyá.....  | 95  |
| <b>Figura 29:</b> Transmitancia Vs. Número de ondas para los tratamientos de la bandeja biodegradable con harina de residuos de maracuyá.....  | 96  |
| <b>Figura 30:</b> Espectros FTIR para los tratamientos de la bandeja biodegradable con harina de residuos de maracuyá.....   | 97  |
| <b>Figura 31:</b> Interpretación espectral para los tratamientos de la bandeja biodegradable con harina de residuos de maracuyá .....  | 98  |
| <b>Figura 32:</b> Porcentajes de Transmitancia Vs. Número de ondas para los tratamientos de la bandeja biodegradable con harina de residuos de maracuyá .....                              | 99  |
| <b>Figura 33:</b> Micrografías 33x para la bandeja biodegradable del tratamiento 3 con 45.1 % de almidón de papa residual y 5.3 % de harina de residuos de maracuyá y 49.7 % de agua ..... | 101 |
| <b>Figura 34:</b> Micrografías 46x para la bandeja biodegradable del tratamiento 3 con 45.1 % de almidón de papa residual y 5.3 % de harina de residuos de maracuyá y 49.7 % de agua ..... | 101 |

## INDICE DE ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| <b>ANEXO 1: OBTENCIÓN DEL ALMIDÓN DE PAPA RESIDUAL.....</b>  | 115 |
| <b>ANEXO 2: PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE PAPA RESIDUAL .....</b>  | 116 |
| <b>ANEXO 3: OBTENCIÓN DE HARINA DE RESIDUOS DE MARACUYÁ.....</b>   | 117 |
| <b>ANEXO 4: PREPARACIÓN DE LA MEZCLA ALMIDÓN CON HARINA DE RESIDUOS DE MARACUYÁ.....</b>                                 | 118 |
| <b>ANEXO 5: OBTENCIÓN DE BANDEJAS BIODEGRADABLES CON ALMIDÓN DE PAPA RESIDUAL Y HARINA DE RESIDUOS DE MARACUYÁ .....</b> | 119 |

## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue optimizar la formulación de bandejas biodegradables a base de almidón de papa residual (*Solanum tuberosum*) y harina de residuos de maracuyá (*Passiflora edulis*) obtenidas mediante termoformado. Este estudio es de tipo hipotético-deductivo, con diseño básico, de corte transversal y alcance explicativo; se aplicó una metodología de diseño de mezclas con un total de 15 corridas. La muestra estuvo conformada por 5 kg de almidón de papa residual y 5 kg de harina de residuos de maracuyá. El diseño y el análisis de los datos se realizó con Design Expert 13 utilizando análisis de varianza (ANVA) y optimización numérica y para la representación gráfica se utilizó el software Statistica 10. Se logró la formulación óptima con 45.1% de almidón, 5.3% de harina de maracuyá y 49.7% de agua, la cual obtuvo alta dureza, baja fracturabilidad y buenas propiedades físicas. Los modelos estadísticos presentaron alta confiabilidad ( $R^2 > 0.90$ ), en cuanto a modelos cuadráticos y lineales. Se concluye que, se logró la formulación de bandejas biodegradables elaboradas a partir de la mezcla de almidón de papa residual y harina de residuos agroindustriales de maracuyá con buenas propiedades mecánicas y funcionales, que representan una opción de carácter viable y sostenible frente a los envases plásticos usados como solución convencional.

**Palabras clave:** almidón de papa, residuos agroindustriales, biodegradabilidad, termoformado, envases sostenibles.

## ABSTRACT

The objective of this research was to optimize the formulation of biodegradable trays made from residual potato starch (*Solanum tuberosum*) and passion fruit waste flour (*Passiflora edulis*) obtained through thermoforming. This is a hypothetical-deductive study with a basic, cross-sectional design and explanatory scope; a mixture design methodology was applied with a total of 15 runs. The sample consisted of 5 kg of residual potato starch and 5 kg of passion fruit waste flour. The design and analysis of the data was performed with Design Expert 13 using analysis of variance (ANOVA) and numerical optimization and Statistica 10 software was used for the graphical representation. The optimal formulation was achieved with 45.1% starch, 5.3% passion fruit flour, and 49.7% water, which obtained high hardness, low fracturability, and good physical properties. The statistical models showed high reliability ( $R^2 > 0.90$ ) in terms of quadratic and linear models. It is concluded that the formulation of biodegradable trays made from a mixture of residual potato starch and agro-industrial passion fruit waste flour with good mechanical and functional properties was achieved, representing a viable and sustainable option compared to plastic packaging used as a conventional solution.

**Keywords:** potato starch, agro-industrial residues, biodegradability, thermoforming, sustainable packaging.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la sociedad ha experimentado un notable incremento en la producción y consumo de plásticos debido a su versatilidad, bajo costo y amplia gama de aplicaciones, lo han convertido en el recurso por excelencia para embalar y proteger infinidad de productos. No obstante, ese mismo recurso ha generado que el ritmo acelerado de la producción de plásticos de un solo uso, hace que cuando pierde su utilidad, se descarte sin muchas miras al entorno que lo rodea (Geyer et al., 2017; Plastics Europe, 2023). Solo en el 2022, la producción mundial de plásticos alcanzó aproximadamente 400 millones de toneladas, de las cuales cerca del 30% se destinaron al sector de envases y embalajes, donde predomina el uso de polímeros derivados del petróleo como el polietileno (PE) y el polipropileno (PP) (Plastics Europe, 2023).

La acumulación de estos materiales plantea un grave problema ambiental, ya que gran parte termina en vertederos, incineradoras o, en el peor de los casos, en ecosistemas terrestres y marinos, generando contaminación por macroplásticos y microplásticos (Zhang et al., 2022). Estos últimos, definidos como partículas menores a 5 mm, se fragmentan a partir de plásticos de mayor tamaño o bien se producen directamente como aditivos industriales, y presentan la particularidad de ser altamente persistentes en el ambiente. Su presencia ha sido documentada en cadenas alimenticias marinas y terrestres, lo que implica riesgos tanto para la biodiversidad como para la salud humana (Andraday, 2017; Shen et al., 2023).

Frente a este panorama, la búsqueda de alternativas sostenibles ha cobrado relevancia, promoviendo el desarrollo de bioplásticos y materiales biodegradables de origen natural. Estos materiales buscan no solo reducir la dependencia de polímeros fósiles, sino también disminuir el impacto ambiental asociado al final de su vida útil (Ribeiro et al., 2021). Tal es así que, en el plano normativo, Perú ha avanzado significativamente con la Ley N.º 30884, promulgada en diciembre de 2018, en la que estableció un marco regulatorio para limitar el uso de plásticos de un solo uso, incluyendo una prohibición completa, con la fabricación, importación, distribución, comercialización y uso del tecnopor (poliestireno expandido) para alimentos y bebidas, con un plazo máximo para su eliminación total fijado en 36 meses, es decir, a partir del 20 de diciembre de 2021 esta medida se encuentra plenamente vigente (Ministerio del Ambiente, 2021; Peru-Retail, 2022). Esta normativa no solo expresa un compromiso con la salud pública; pues el tecnopor libera compuestos tóxicos cuando entra en contacto con calor; sino que también propulsa una transición hacia una economía circular donde los materiales biodegradables y de origen vegetal, como los polímeros derivados del bagazo de caña, sean la

alternativa preferentemente utilizada (Ministerio del Ambiente, 2021). A nivel internacional, las políticas públicas y normativas, como la restricción de plásticos de un solo uso en la Unión Europea o la promoción de empaques con contenido reciclado, han reforzado la necesidad de innovar en el diseño de envases y embalajes con criterios de sostenibilidad (European Commission, 2021).

En este contexto, los recursos agroindustriales emergen como una fuente prometedora de materias primas para la elaboración de biopolímeros. El almidón, particularmente de la papa, constituye un polisacárido abundante y ampliamente estudiado por sus propiedades filmogénicas, su capacidad de gelatinización y su biodegradabilidad, lo que lo convierte en una base adecuada para el desarrollo de envases sostenibles (Sanyang et al., 2021; Yildiz et al., 2022). Asimismo, la incorporación de subproductos agroindustriales, como la harina de cáscaras de maracuyá, ofrece ventajas adicionales al aprovechar residuos con contenido de fibra y compuestos bioactivos, contribuyendo a la economía circular y a la reducción de residuos (Chauhan et al., 2021; Sifuentes et al., 2023).

Por tanto, en la presente investigación se enmarca en la optimización de bandejas biodegradables con almidón residual de papas nativas de productores de la Asociación de productores y agropecuarios ecológico del ingenio, ubicado Huancayo en el departamento de Junín y harina de residuos agroindustriales de maracuyá de la empresa Delicias y Sabores del Perú EIRL ubicado en la provincia de Casma – departamento de Ancash.

En ese contexto, el objetivo principal de la presente investigación es optimizar la formulación de bandejas biodegradables elaboradas con almidón de papa residual (*Solanum tuberosum*) y harina de residuos de maracuyá (*Passiflora edulis*) mediante el termoformado. Para ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos: extraer y caracterizar el almidón de papa residual y harina de residuos de maracuyá para elaborar bandejas biodegradables por termoformado, evaluar las propiedades físicas y mecánicas de las bandejas, incluyendo ensayo de impacto, deflexión, densidad, gramaje y colorimetría y las propiedades mecánicas, térmicas y de absorción de agua, determinar la concentración óptima de almidón de papa residual y harina de residuos de maracuyá y por último, determinar las características del envase biodegradable mediante pruebas de dureza y fracturabilidad.

Como hipótesis de la investigación se planteó que es posible optimizar la bandeja biodegradable con una concentración de 80% de almidón de papa y 20% de harina de residuos

de maracuyá obtenida por termoformado, la cual presenta mayores valores de resistencia a la flexión, dureza, manteniendo la integridad de la matriz polimérica y evitando la fracturabilidad.

## **CAPITULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. PLANTEAMIENTO Y FUNDAMENTACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

La dependencia global de envases plásticos desechables ha generado una crisis ambiental de gran magnitud, especialmente por su persistencia en el ambiente y su limitada tasa de reciclaje. Frente a esta situación, la búsqueda de alternativas biodegradables se ha convertido en una prioridad estratégica para gobiernos, industrias y centros de investigación. En el contexto peruano, esta necesidad se ha intensificado con la entrada en vigencia de la Ley N.º 30884, que prohíbe el uso de envases de tecnopor en alimentos y bebidas, impulsando así la transición hacia materiales sostenibles que puedan reemplazar eficazmente a los derivados del petróleo (Ministerio del Ambiente, 2021).

El Perú, país con gran diversidad agrícola, genera una cantidad significativa de residuos orgánicos provenientes de la agroindustria. Entre ellos, la cáscara de maracuyá es un subproducto con alto contenido de fibra dietética y compuestos bioactivos que suele ser desecharido o subutilizado (Chauhan et al., 2021; Sifuentes et al., 2023). Paralelamente, el almidón de papa residual, subproducto del procesamiento agroindustrial, constituye una fuente abundante de polisacáridos con capacidad filmogénica, ampliamente estudiado en la elaboración de bioplásticos (Yildiz et al., 2022). No obstante, el desafío técnico radica en optimizar la combinación de estos materiales para obtener bandejas biodegradables que posean las propiedades mecánicas, térmicas y de biodegradabilidad adecuadas para competir con los envases convencionales.

#### **1.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

Huertas et al. (2024) desarrollaron bandejas biodegradables mediante termoformado a partir de almidón de semilla de *Poraqueiba serícea* y harina de mazorca de maíz, encontrando que la formulación con 87.5% de almidón y 12.5% de harina presentó mejores propiedades físicas y mecánicas, como dureza y resistencia. El análisis estructural mostró características relacionadas con la cristalinidad y la distribución de fibras, que influyen en el desempeño del material. Este estudio destaca la viabilidad de optimizar biocompuestos basados en almidón y residuos agroindustriales para aplicaciones en envasado sostenible, sentando un precedente importante para investigaciones similares.

Díaz-Díaz et al. (2023) desarrollaron bandejas biodegradables a partir de almidón de papa, fibras de tocón de espárrago (*Asparagus officinalis L.*) y glicerina, empleando un proceso de termoformado bajo condiciones controladas de presión y temperatura. Mediante el uso del Diseño de Mezclas Simplex Centroide, evaluaron distintas proporciones de los componentes, logrando identificar una formulación óptima que maximizó propiedades clave como dureza, fracturabilidad, resistencia a la tracción y porcentaje de elongación. Estos resultados destacan el potencial de los materiales vegetales en la fabricación de envases biodegradables, posicionándolos como alternativas viables frente a los plásticos sintéticos tradicionales.

Cabrera-Guevara et al. (2023) evaluaron el efecto de la incorporación de fibra de tocón de espárrago blanco y fibra de tusa de maíz amarillo en bandejas biodegradables elaboradas con almidón de papa (*Solanum phureja*) mediante termoformado. Se probaron tres proporciones almidón/fibra (95/5; 90/10; 85/15), encontrando que la mezcla con 85/15 de almidón y fibra de maíz presentó mejores propiedades físicas y mecánicas, incluyendo una resistencia a la tracción de 0.2132 MPa, elongación de 1.58%, dureza de 17.29 kg y fracturabilidad de 2.64 mm. Estos resultados indican que las fibras agroindustriales pueden mejorar el desempeño de bandejas biodegradables basadas en almidón de papa, constituyendo una alternativa viable al poliestireno convencional para envases sostenibles.

Según Aguirre et al. (2023), el creciente interés en sustituir materiales sintéticos como el poliestireno en envases ha impulsado la investigación en alternativas biodegradables, especialmente a partir de residuos vegetales. Estudios recientes han demostrado que la combinación de almidón de yuca (*Manihot esculenta*) y harina de hoja de maíz (*Zea mays L.*), procesadas mediante termoformado, puede producir bandejas biodegradables con propiedades físicas y mecánicas favorables, particularmente en formulaciones con 85% de almidón de yuca y 15% de harina de hoja de maíz, que exhiben buenas características de densidad, absorción de agua, solubilidad y dureza. Estos resultados sugieren un alto potencial para reemplazar envases convencionales, abriendo el camino a nuevas aplicaciones en el empaque de frutas, verduras y productos de panadería.

Ferreira et al. (2020) en su artículo buscó mostrar la alta capacidad de sorción de agua todas las bandejas hechas con almidón de yuca y residuos agroindustriales, durante el almacenamiento bajo humedad relativa alta o media. Para ello, se hicieron pruebas mecánicas y mostraron que, al añadir residuos agroindustriales en diferentes cantidades

de cáscara de maíz, bagazo de malta o bagazo de naranja, afectaba a los materiales, la resistencia, evidenciando que las bandejas biodegradables sean más rígidas que las de poliestireno expandido. Al analizar todas las bandejas hechas con residuos en ensayos de biodegradabilidad demostraron que a la degradación eran más susceptibles. Se degradaron por completo en 60 días, las bandejas con más del 20% de bagazo de naranja. En conclusión, se pueden emplear potencialmente la combinación los residuos agroindustriales fibrosos como son el bagazo de caña de azúcar y cáscara de maíz, para elaborar bandejas biodegradables.

### **1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

¿Cuál es la formulación óptima para la elaboración de bandejas biodegradables con almidón de papa residual (*Solanum tuberosum*) y harina de residuos agroindustriales de maracuyá (*Passiflora edulis*) por el método de termoformado?

### **1.4. DELIMITACIÓN DEL ESTUDIO**

Este trabajo de investigación se realizó a nivel de laboratorio en la Universidad Nacional del Santa, distrito de Nuevo Chimbote, región Ancash – Perú y las muestras se elaboraron en el laboratorio de Microbiología y toxicología de productos agroindustriales de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial. Los análisis químicos y mecánicos se realizaron en Laboratorio de Ingeniería de Procesos Agroindustriales ubicada en la Universidad Nacional de Trujillo, Laboratorio de Investigación Multidisciplinario (Labinm) ubicada en la Universidad Privada Antenor Orrego – Trujillo.

### **1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

La creciente contaminación ambiental causada por el uso masivo de plásticos convencionales, que poseen una degradación lenta y generan residuos persistentes, representa uno de los problemas más críticos a nivel mundial y nacional. Los plásticos derivados del petróleo son responsables de una acumulación significativa de residuos sólidos que afectan ecosistemas terrestres y marinos, con consecuencias en la biodiversidad y la salud humana (Geyer et al., 2017; Lebreton & Andrade, 2019). En este contexto podemos enmarcar la justificación e importancia de la investigación en tres dimensiones claves:

- **Ambiental:** La prohibición del tecnopor en el Perú obliga a los sectores productivos, especialmente al de alimentos y bebidas, a encontrar alternativas biodegradables que no solo cumplan con la normativa, sino que también contribuyan a la reducción de residuos plásticos persistentes. El desarrollo de bandejas a partir de almidón de papa y cáscara de maracuyá ofrece una doble ventaja: sustituir envases derivados del petróleo y aprovechar subproductos agroindustriales, reduciendo así la presión sobre vertederos y ecosistemas (Ministerio del Ambiente, 2021; Ribeiro et al., 2021).
- **Económica:** La agroindustria peruana genera grandes volúmenes de residuos orgánicos. La valorización de la cáscara de maracuyá y del almidón residual de papa como insumos para la elaboración de bioplásticos abre nuevas oportunidades de negocio enmarcadas en la economía circular. Al transformar desechos en productos de valor agregado, se favorece la competitividad del sector agroindustrial y se promueve la innovación en cadenas productivas locales (Sifuentes et al., 2023).
- **Tecnológica y científica:** Aunque existen estudios sobre la elaboración de biopolímeros a partir de almidón y fibras vegetales, aún son limitadas las investigaciones que evalúan combinaciones específicas de almidón de papa residual con harina de cáscara de maracuyá en sistemas termoformados. La optimización de las condiciones de proceso (proporciones de mezcla, plastificantes, temperatura y presión de termoformado) permitirá obtener bandejas con mejores propiedades mecánicas y de biodegradabilidad, aportando nuevo conocimiento científico y aplicabilidad práctica en el área de la Ingeniería Agroindustrial (Sanyang et al., 2021; Yildiz et al., 2022).

En este sentido, la investigación no solo busca dar respuesta a un problema ambiental de escala global, sino que también pretende contribuir con soluciones tecnológicas adaptadas al contexto nacional, generando impacto en la industria, la sociedad y el medio ambiente.

## 1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN: GENERAL Y ESPECÍFICOS

### 1.6.1. OBJETIVO GENERAL

Optimizar bandejas biodegradables con almidón de papa residual (*Solanum tuberosum*) y harina de residuos de maracuyá (*Passiflora edulis*) obtenidas por termoformado.

### **1.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Extraer el almidón de papa residual y harina de residuos de maracuyá para elaborar bandejas biodegradables por termoformado.
- Caracterizar el almidón de papa residual y la harina de residuos de maracuyá.
- Evaluar las bandejas biodegradables obtenidas con almidón de papa residual y harina de residuos de maracuyá en ensayo de impacto, de humedad, densidad, espesor, capacidad de absorción de agua y colorimetría.
- Evaluar las propiedades mecánicas y microestructurales de las bandejas biodegradables por termoformado.
- Determinar la concentración óptima de almidón de papa residual y harina de residuos de maracuyá para la obtención de las bandejas biodegradables por el método de termoformado.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### **2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN**

Las bandejas biodegradables elaboradas a partir de recursos naturales como el almidón de papa (*Solanum tuberosum*) y harinas de residuos agroindustriales constituyen una alternativa ecológica para sustituir materiales plásticos convencionales, especialmente el poliestireno expandido. El almidón de papa, un polisacárido compuesto principalmente por amilosa y amilopectina, se destaca por su amplia disponibilidad, biodegradabilidad y capacidad para formar matrices termoplásticas adecuadas para el termoformado, permitiendo la confección de empaques con propiedades físicas y mecánicas competitivas (Díaz-Díaz et al., 2023; Meza, 2020).

La incorporación de harinas obtenidas de residuos agroindustriales, como la harina de cáscaras de maracuyá (*Passiflora edulis*), puede mejorar las características funcionales de las bandejas biodegradables, aportando refuerzo estructural y modificando propiedades mecánicas y de permeabilidad, además de favorecer la reutilización de subproductos agroindustriales, lo que aporta sostenibilidad al proceso (Revista Amazónica, 2023; Acosta & Ríos, 2018).

El proceso de termoformado, aplicado para la fabricación de estas bandejas, consiste en la conformación de mezclas a base de almidón, agua, plastificantes como glicerina y fibras o harinas vegetales bajo condiciones controladas de temperatura y presión. Este método permite obtener envases con espesores uniformes, resistencia adecuada a la tracción y fragilidad controlada. El ajuste de las proporciones de almidón, harina residual y plastificantes es crucial para optimizar las propiedades finales del material y su desempeño funcional (Díaz-Díaz et al., 2023; Paredes-Vega, 2020).

Diversas investigaciones han demostrado que un adecuado equilibrio entre almidón y fibras o harinas derivadas de residuos agroindustriales mejora la dureza, elongación y resistencia a la fractura de los bioplásticos producidos mediante termoformado. Por ejemplo, Díaz-Díaz et al. (2023) reportaron que una mezcla óptima de almidón de papa con fibra vegetal y glicerina produjo bandejas biodegradables con una dureza máxima de 19,19 kg y una resistencia a la tracción de 0,133 MPa, lo que es prometedor para aplicaciones en empaques alimentarios. Asimismo, la reutilización de residuos de maracuyá como harina contribuye a la funcionalidad del material y promueve la

economía circular en el sector agroindustrial (Díaz-Díaz et al., 2023; Acosta & Ríos, 2018).

En ese contexto, el almidón de papa es un polisacárido termoplástico que destaca por su baja temperatura de gelatinización y menor tendencia a la retrogradación en comparación con otros almidones, lo que facilita su procesamiento por termoformado para la obtención de bioplásticos con buena estabilidad física y mecánica (Vargas et al., 2016; Díaz-Díaz et al., 2023). Su estructura, principalmente compuesta por amilosa y amilopectina, permite la formación de matrices semicristalinas que ofrecen resistencia y flexibilidad adecuadas para aplicaciones en envases biodegradables.

La amilosa es un polisacárido formado por la condensación de unidades de D-glucopiranosa a través de enlaces glucosídicos  $\alpha$ -(1→4), resultando en cadenas lineales que pueden contener entre 200 y 2500 unidades de glucosa, con un peso molecular que puede alcanzar hasta un millón (Smith & Jones, 2020). En términos estructurales, la amilosa es un  $\alpha$ -D-(1,4)-glucano cuya unidad repetitiva es la  $\alpha$ -maltosa. En la composición del almidón, la amilosa representa generalmente entre el 17% y el 25% del total, contribuyendo significativamente a las propiedades funcionales del almidón en diversas aplicaciones industriales y alimentarias (Gómez et al., 2023).

La amilopectina es un polisacárido ramificado que se diferencia de la amilosa por la presencia de ramificaciones unidas al tronco lineal por enlaces  $\alpha$ -D-(1→6) glucosídicos, los cuales se encuentran aproximadamente cada 25 a 30 unidades lineales de glucosa. Esta estructura ramificada le confiere una forma molecular globular y un peso molecular considerablemente alto, alcanzando hasta 200 millones de Daltons en algunas fracciones (Wang et al., 2022). En el almidón, la amilopectina representa entre el 75% y el 83% en peso, siendo el componente predominante que influye en las propiedades físicas y funcionales del almidón en aplicaciones alimentarias e industriales (Rodríguez & Pérez, 2024).

La gelatinización del almidón es un proceso que implica la pérdida de la semicristalinidad de los gránulos de almidón cuando se someten a calor en presencia de grandes cantidades de agua, sin que ocurra una despolimerización significativa. Durante este proceso, los gránulos, que no son solubles en agua ni en disolventes orgánicos, absorben agua y se hinchan bajo la acción del calor, lo que provoca la ruptura de su estructura cristalina y la pérdida de birrefringencia. A temperaturas críticas, los gránulos colapsan y forman una

matriz gelatinosa o gel. Para obtener almidón termoplástico se funde usando menos de 20% de agua en procesos como moldeo por inyección, presión o extrusión, donde parte del agua puede ser sustituida por glicerina; las variaciones en el contenido de agua, glicerina y las condiciones de procesamiento (velocidad de corte, temperatura) afectan la formación de la red de almidón y la morfología del producto final. Además, la gelatinización se monitorea por la pérdida de birrefringencia, cambios en la viscosidad, solubilidad e hinchamiento de gránulos, espectroscopía de resonancia magnética nuclear, difracción de rayos X y análisis térmico diferencial por barrido (DSC), entre otros métodos (Aristizábal et al., 2007; Medina, 2020; Fritz, 1994).

Durante la gelatinización, el calentamiento en agua provoca que las cadenas de amilosa y amilopectina se expandan y parte de la amilosa se libere del gránulo, mientras que la amilopectina forma una matriz colapsada. Al pasar la temperatura de gelatinización, la viscosidad alcanza un pico máximo, luego disminuye conforme los gránulos se rompen y las moléculas se disuelven parcialmente formando una dispersión viscosa conocida como pasta o engrudo. Este proceso es endotérmico y depende de la concentración de almidón y la temperatura específica de gelatinización propia de cada fuente de almidón (Moriana, 2010; Meneses et al., 2007).

La incorporación de harina derivada de residuos agrícolas, como la harina de cáscara de maracuyá (*Passiflora edulis*), contribuye a mejorar las propiedades mecánicas y funcionales de las bandejas biodegradables. Estas harinas actúan como refuerzos que aumentan la dureza, resistencia a la tracción y disminuyen la permeabilidad al agua, además de favorecer la reutilización de subproductos agroindustriales, impulsando la economía circular y la sostenibilidad ambiental (Acosta & Ríos, 2018; Díaz-Díaz et al., 2023).

Los residuos agrícolas con alto contenido de fibra son preferidos como material de refuerzo en recipientes moldeados con almidón termoplástico o sus mezclas, pues al incorporarse, incrementan propiedades mecánicas como la flexibilidad, dureza, resistencia a la flexión y al estiramiento. Las fibras consideradas pueden ser orgánicas, incluyendo fibras de celulosa provenientes de madera, hojas, algodón y papel reciclado, así como inorgánicas, obtenidas de materiales como vidrio, grafito, sílice, cerámica o metales. Particularmente, las fibras con una alta relación longitud-espesor proporcionan una mayor resistencia mecánica comparada con la matriz termoplástica de almidón sola, debido a que permiten una mejor transferencia de carga y refuerzo del material

compuesto (Ruiz, 2005; Luna et al., 2009; Aristizábal et al., 2012). Por ejemplo, estudios con fibras naturales como el fique en matrices de almidón termoplástico han demostrado un aumento significativo en el esfuerzo a la tensión y el módulo elástico, aunque estos efectos varían según el contenido y la distribución de la fibra en la matriz (Luna et al., 2009). La mejora en las propiedades mecánicas se atribuye a la interacción interfacial eficaz entre la fibra y la matriz termoplástica, especialmente cuando se emplean tratamientos superficiales para mejorar la adhesión (Aristizábal et al., 2012).

El proceso de termoformado aplicado a estas mezclas consiste en someter la combinación de almidón, harina residual, plastificantes (como glicerina) y agua a temperaturas y presiones controladas, específicamente entre 140-160 °C y 20-25 bar, durante tiempos en torno a 15-20 minutos. Bajo estas condiciones, se logra la gelatinización y fusión del almidón, así como la integración homogénea de las harinas, lo que resulta en láminas moldeables con espesores uniformes y propiedades mecánicas optimizadas para la fabricación de bandejas biodegradables funcionales para el envasado de alimentos (Díaz-Díaz et al., 2023; Meza, 2020).

Estudios recientes han demostrado que las mejores proporciones para la mezcla de almidón de papa y fibra o harina de residuos oscilan entre un 85-90% de almidón y un 10-15% de fibra o harina, con una adición de plastificante alrededor del 10-15%, logrando un equilibrio entre rigidez y flexibilidad. En particular, la mezcla de almidón de papa con harina de maracuyá residual no solo aumenta la dureza y resistencia a la fractura, sino que también mejora la biodegradabilidad del material final sin comprometer su funcionalidad (Díaz-Díaz et al., 2023; Acosta & Ríos, 2018).

Además, el desarrollo de bandejas biodegradables a partir de estos materiales ofrece una respuesta sostenible a la problemática ambiental generada por la acumulación de plásticos tradicionales. Estos bioplásticos no solo son compostables y biodegradables bajo condiciones ambientales y de compostaje industrial, sino que también optimizan el aprovechamiento integral de cultivos y residuos agroindustriales conferidos por la papa y el maracuyá, contribuyendo a la reducción de la contaminación y al fortalecimiento de cadenas productivas sostenibles (Da Silva et al., 2023; Díaz-Díaz et al., 2023).

Por último, el avance en la optimización de materiales biodegradables obtenidos por termoformado adquiere relevancia frente a la creciente preocupación ambiental por la reducción de residuos plásticos no degradables y la búsqueda de soluciones sostenibles

para el embalaje de alimentos. La combinación de almidón de papa residual y harina de residuos de maracuyá representa una doble contribución al valor agregado de productos agroindustriales y la mitigación del impacto ambiental.

El uso excesivo de plásticos derivados del petróleo genera contaminación ambiental debido a su lenta degradación natural. La búsqueda de materiales biodegradables sostenibles, como biopolímeros obtenidos de almidón residual y fibras de desecho agrícola, responde a la necesidad de mitigar la acumulación de residuos plásticos y promover un ciclo de vida amigable con el ambiente (Díaz et al., 2017; Meneses et al., 2007).

## 2.2. MARCO CONCEPTUAL

Almidón de papa (*Solanum tuberosum*): es un polisacárido natural compuesto principalmente por cadenas de glucosa en forma de amilosa y amilopectina. Este almidón se caracteriza por su alta capacidad de retención de agua, flexibilidad y maleabilidad al ser procesado, lo que lo convierte en un candidato idóneo para la fabricación de biopolímeros biodegradables. Durante su procesamiento, el almidón sufre gelatinización, un proceso termohídrico que transforma su estructura cristalina en una forma amorfá pegajosa, facilitando la formación de películas o bandejas mediante métodos como el termoformado. Sin embargo, por sí solo el almidón de papa puede presentar limitaciones en resistencia mecánica y fragilidad, que deben ser optimizadas con aditivos o fibras. Estudios recientes muestran que la modificación química con ácido acético y la incorporación de agentes como quitosano pueden mejorar sustancialmente las propiedades mecánicas del biopolímero derivado del almidón de papa (Alarcón Cavero & Arroyo Benites, 2016; The Food Tech, 2025; Arroyo & Alarcón, 2015)

Harina de residuos de maracuyá (*Passiflora edulis*): proviene del material fibroso obtenido tras el procesamiento del fruto. Este residuo es rico en fibras dietéticas y compuestos bioactivos que pueden actuar como refuerzos mecánicos dentro de matrices poliméricas, mejorando la resistencia y durabilidad de los bioplásticos. La incorporación de fibras provenientes de residuos agrícolas se ha mostrado beneficiosa para aumentar la rigidez y reducir la fracturabilidad en biocompuestos basados en almidón (literatura general de biopolímeros, por analogía con estudios en fibras lignocelulósicas). La harina de maracuyá además aporta a la biodegradabilidad, favoreciendo el procesamiento natural del material.

La concentración de fibras en una composición basada en almidón termoplástico típicamente varía entre el 5% y el 30% en peso total de la matriz termoplástica. Al incorporar fibras vegetales a esta matriz, se forma un biocompuesto, caracterizado por ser completamente biodegradable debido a que todos sus componentes son de origen biológico o natural. Además de conferir biodegradabilidad, la adición de fibras mejora la estabilidad térmica del material, reduce la absorción de humedad y previene la recristalización del almidón gracias a la interacción entre las fibras y el almidón termoplástico. Este tipo de compuestos se pueden procesar mediante métodos como termo-compresión y moldeo, y se ha demostrado que las fibras contribuyen a mejorar propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad, dependiendo de la concentración y tamaño de partícula de la fibra incorporada (Fowler et al., 2006; Kaewtatip & Thongmee, 2012; Gómez et al., 2015).

**Biodegradabilidad:** Se refiere a la capacidad de un material para descomponerse naturalmente por la acción de microorganismos, transformándose en productos no tóxicos como agua, dióxido de carbono y biomasa. La biodegradabilidad es una propiedad esencial en biopolímeros para reducir el impacto ambiental de los desechos plásticos. Biopolímeros basados en almidón, como los obtenidos de papa, son altamente biodegradables bajo condiciones ambientales adecuadas, mostrando tasas de degradación que alcanzan el 100% en períodos relativamente cortos cuando se combinan con fibras naturales (Díaz et al., 2017), (Alarcón Cavero & Arroyo Benites, 2016)

**Termoformado o Termoprensado:** es un proceso de fabricación que consiste en calentar una lámina o mezcla polimérica hasta lograr su plasticidad, para luego moldearla bajo presión y enfriarla en la forma deseada. En biopolímeros de almidón, este proceso permite transformar mezclas alimenticias de almidón, plastificantes y fibras en bandejas biodegradables con propiedades mecánicas mejoradas. Temperaturas, presiones y tiempos controlados impactan directamente en el espesor, resistencia, color y solubilidad del producto final, pudiendo optimizarse mediante metodologías experimentales como diseños de superficie de respuesta (Díaz et al., 2017). Una vez que la lámina adquiere la temperatura adecuada para deformarse, se aplica la fuerza para que adopte la geometría del molde, seguido de un proceso de enfriamiento para fijar la forma final (García et al., 2023; Martínez & López, 2024).

Propiedades mecánicas relevantes:

- Resistencia a la flexión: capacidad del material para soportar fuerzas que causan doblado sin fracturarse.
- Dureza: resistencia de la superficie del material a la deformación permanente o penetración.
- Integridad de la matriz polimérica: mantenimiento del entramado cohesivo entre las moléculas del polímero y sus aditivos/fibras.
- Fracturabilidad: tendencia del material a quebrarse o romperse bajo estrés mecánico.

Estas propiedades condicionan la funcionalidad de la bandeja biodegradable para empaques, requiriendo un equilibrio entre rigidez y flexibilidad para evitar daños durante el uso y transporte (Díaz et al., 2017).

Matrices poliméricas basadas en almidón y fibras: se componen principalmente de almidón gelatinizado que forma una estructura cohesiva. La adición de fibras naturales actúa como refuerzo mecánico, incrementando la rigidez y resistencia del compuesto. La interacción entre almidón y fibras debe ser optimizada para evitar la separación o fragilización, mejorando simultáneamente la biodegradabilidad y las propiedades físicas. Estudios demuestran que la proporción y el tipo de fibra afectan directamente la resistencia, espesor y degradación del biopolímero (Díaz et al., 2017).

Los agentes plastificantes son aditivos esenciales que se incorporan a los polímeros para mejorar su flexibilidad y modificar propiedades mecánicas específicas. Estos plastificantes se intercalan entre las cadenas moleculares del polímero, generando un aumento en el volumen libre y, por ende, una disminución en la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), lo que transforma materiales duros y quebradizos en otros más blandos y flexibles (González et al., 2021). En la producción de almidón termoplástico (TPS), los plastificantes, junto con harina y agua, desempeñan un papel crucial, ya que pueden establecer enlaces de hidrógeno con los grupos hidroxilo presentes en las cadenas de almidón, facilitando la plasticidad necesaria para obtener un material termoplástico funcional (Jiménez et al., 2024). Entre los plastificantes más comúnmente utilizados se encuentran los polialcoholes, especialmente el glicerol, que no solo mejora la flexibilidad del TPS, sino que también contribuye a su procesabilidad y estabilidad, al interactuar con las moléculas de almidón bajo la influencia de la temperatura (López & Morales, 2023).

Esta interacción es clave para la formación del TPS o polvo termoplástico (TPF), asegurando un material con mejores propiedades mecánicas y funcionales.

La optimización de formulaciones para biopolímeros, especialmente aquellos basados en almidón termoplástico, emplea técnicas experimentales avanzadas como los diseños experimentales de superficie de respuesta (RSM, por sus siglas en inglés). Estas técnicas permiten evaluar la interacción y combinaciones de variables independientes, como proporciones de almidón, fibras y plastificantes, para construir modelos predictivos enfocados en variables críticas como espesor, solubilidad, color y resistencia mecánica. Con esta aproximación, se pueden determinar las concentraciones óptimas de los componentes del biopolímero para maximizar sus propiedades físicas y mecánicas, facilitando la producción de materiales con características mejoradas y adaptadas a aplicaciones específicas. Recientes estudios han aplicado estas metodologías para desarrollar formulaciones sostenibles y funcionales, incluso incorporando aditivos naturales que mejoran la estabilidad y biodegradabilidad del producto final (Juan Polo, 2023; Cuevas Zujey, 2017; Rodríguez et al., 2022).

## CAPITULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### **3.1. HIPÓTESIS CENTRAL DE LA INVESTIGACIÓN**

Es posible optimizar la bandeja biodegradable obtenida por termoformado determinando una formulación óptima dentro de los rangos de almidón de papa (0.37–0.55), harina de residuos de maracuyá (0.04–0.07) y agua destilada (0.40–0.56), que maximice la resistencia a la flexión y la dureza, mantenga la integridad de la matriz polimérica y reduzca la fracturabilidad.

#### **3.2. VARIABLES E INDICADORES DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **3.2.1. VARIABLES INDEPENDIENTES**

- **Contenido de almidón de papa residual:** Es una materia inocua, sostenible y renovable que no traspasa sabores, olores y los radicales libres, mucho menos, que se encuentran en los plásticos, y que tiene un proceso de biodegradación de 180 días aproximadamente. (Biodegradables Ecogreen, 2016). Y según Shogren et al., (1998), los tubérculos son fuente de almidones como son la papa, que se obtiene bandejas con flexibilidades más altas y con densidades más bajas en comparación con los almidones obtenidos del maíz. Se utilizará concentraciones desde 0.37 hasta 0.55 para elaborar las bandejas biodegradables.
- **Contenido de la Harina de residuos de maracuyá:** los residuos de maracuyá tienen como principal característica que son ricos en fibras solubles e insolubles como el pericarpio (mesocarpio, parte amarilla y epicarpio, parte blanca) (Cazarin et al., 2011). Además, se verifica la potencialidad que existe en los residuos de maracuyá para la extracción de fibra dietaria por Núñez, J (2014), logrando obtener un compuesto bioactivo con buenas propiedades fisicoquímicas. Se utilizará concentraciones desde 0.04 hasta 0.07 para elaborar las bandejas biodegradables.
- **Contenido de agua:** El agua actúa como plastificante natural en mezclas de almidón y fibra para la producción de bandejas biodegradables; facilita la gelatinización del almidón, mejora la homogeneidad de la mezcla y modula la flexibilidad y resistencia mecánica del biopolímero final. Además, se ha reportado que el contenido de agua del material disminuye al incluir más

plastificante, mientras que la absorción de agua puede variar dependiendo de la formulación específica (Gurunathan et al., 2025). Se empleará concentraciones de 0.40 al 0.56, con el fin de garantizar una estructura homogénea y con buenas propiedades mecánicas y de resistencia.

### **3.2.2. VARIABLES DEPENDIENTES**

Se evaluaron las siguientes variables dependientes:

- **Análisis físicos:** Se evaluó color, humedad (%), densidad (%), espesor (%), CAA (%).
- **Análisis mecánicos:** Se evaluó dureza y fracturabilidad, tracción y elongación.
- **Análisis microestructurales:** Se evaluó Análisis de Espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y termogravimétrico (TG), Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

### **3.2.3. INDICADORES**

#### **VARIABLES INDEPENDIENTES:**

- Contenido de almidón de papa
- Contenido de harina de residuos de maracuyá
- Contenido de agua destilada

#### **VARIABLE DEPENDIENTE:**

- Análisis físicos
- Análisis mecánicos
- Análisis microestructurales

La optimización con la mezcla del almidón de papa residual y harina de cáscaras de maracuyá para la formulación de las bandejas biodegradables, se empleó la función de deseabilidad del software Design expert 13. Para ejecutar la opción de optimización, fue necesario definir el peso de cada variable (para la presente investigación se consideró el mismo peso para cada variable) y el objeto de la variable respuesta (maximizar o minimizar).

### **3.3. MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN**

Tuvo un enfoque cuantitativo, de tipo básico, corte transversal, de nivel explicativo. El método empleado fue el hipotético-deductivo.

### **3.4. DISEÑO O ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN:**

El diseño fue experimental y se recurrió al diseño de mezclas. Se utilizó un diseño de mezclas porque las variables independientes del estudio son proporciones de tres componentes que deben sumar 1 (almidón de papa, harina de maracuyá y agua); en este tipo de problemas los diseños de mezcla modelan correctamente la dependencia entre componentes y las superficies de respuesta en el triángulo de mezcla, permitiendo estimar efectos lineales y términos de interacción/cuadráticos específicos para mezclas. Además, el diseño se implementó en Design-Expert versión 13, con los límites prácticos seleccionados por consideraciones de procesabilidad (almidón 37–55 %, harina 4–7 %, agua 40–56 %) y se trabajó con 15 corridas aleatorizadas para garantizar ajuste estadístico y estimación del error puro en los modelos (ANOVA y ajuste de  $R^2$  mostrados en el documento). La selección de un diseño de mezclas está respaldada por la naturaleza composicional de la variable (la suma = 1) y por la necesidad de optimizar proporciones continuas (en el rango operacional que se ha definido. Se evaluó el efecto de tres variables independientes: almidón de papa, harina de residuos de maracuyá y agua. El Cuadro 1 muestra el resumen del diseño con los componentes y sus niveles.

**Cuadro 1:**

*Componentes del diseño*

| <b>Componentes</b>             | <b>Mín</b> | <b>0</b> | <b>Máx</b> | <b>Unidades</b> |
|--------------------------------|------------|----------|------------|-----------------|
|                                | <b>-1</b>  |          | <b>+1</b>  |                 |
| Almidón de papa residual       | 37         |          | 55         | %               |
| Harina de residuos de maracuyá | 4          |          | 7          | %               |
| Agua                           | 40         |          | 56         | %               |

Además, se consideraron 11 respuestas, cuyas descripciones y unidades se ven en el Cuadro 2.

**Cuadro 2:**

*Respuestas del diseño*

| Respuestas      | Unidades          | Respuestas                     | Unidades |
|-----------------|-------------------|--------------------------------|----------|
| Dureza          | N                 | Espesor                        | mm       |
| Fracturabilidad | mm                | Humedad                        | %        |
| L               | -                 | Capacidad de absorción de agua | %        |
| a               | -                 | Resistencia a la tracción      | MPa      |
| b               | -                 | Elongación                     | %        |
| Densidad        | g/cm <sup>3</sup> |                                |          |

El número de tratamientos fue de 15, en un solo bloque. El orden de los tratamientos fue aleatorizado. El Cuadro 3 presenta los tratamientos en orden estándar.

**Cuadro 3:**

*Tratamientos del diseño de mezclas*

| Orden estándar | Almidón de papa | Harina de residuos de maracuyá | Agua destilada |
|----------------|-----------------|--------------------------------|----------------|
| 1              | 0.550179        | 0.0428402                      | 0.406981       |
| 2              | 0.527732        | 0.044978                       | 0.42729        |
| 3              | 0.452482        | 0.0439716                      | 0.503546       |
| 4              | 0.452482        | 0.0439716                      | 0.503546       |
| 5              | 0.452482        | 0.0439716                      | 0.503546       |
| 6              | 0.412862        | 0.0552226                      | 0.531915       |
| 7              | 0.373156        | 0.0666856                      | 0.560159       |
| 8              | 0.550179        | 0.0428402                      | 0.406981       |
| 9              | 0.506383        | 0.0468085                      | 0.446809       |
| 10             | 0.506383        | 0.0468085                      | 0.446809       |
| 11             | 0.506383        | 0.0468085                      | 0.446809       |
| 12             | 0.412862        | 0.0552226                      | 0.531915       |
| 13             | 0.412862        | 0.0552226                      | 0.531915       |
| 14             | 0.373156        | 0.0666856                      | 0.560159       |
| 15             | 0.373156        | 0.0666856                      | 0.560159       |

*Nota. La suma de los componentes equivale a la unidad. Los tratamientos fueron aleatorizados previamente a la experimentación con el programa Design Expert 13.*

### **3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA**

La población está compuesta por papa nativa residual (rastrojo) y por cáscaras de maracuyá. La papa es de la variedad Qeqorani con la que se obtuvo el almidón y se adquirió de la Asociación de productores y agropecuarios ecológico del ingenio, ubicada Huancayo y las cáscaras de maracuyá se utilizaron para elaborar la harina, las cuales fueron los residuos del proceso de obtención de pulpa de maracuyá concentrado, en la empresa Delicias y sabores del Perú EIRL ubicado en la provincia de Casma.

Para obtener la muestra, se realizó un muestro no probabilístico por conveniencia.

### **3.6. ACTIVIDADES DEL PROCESO INVESTIGATIVO**

A continuación, se detallan las etapas del proceso investigativo para optimizar bandejas biodegradables hechas con almidón de papa y harina de cáscara de maracuyá por termoformado. Se abordan desde la revisión bibliográfica y diseño experimental, hasta la formulación, procesamiento y caracterización de las muestras. Se emplean técnicas modernas como el diseño de superficie de respuesta y métodos avanzados de termoformado para obtener formulaciones óptimas. Todo está fundamentado en referencias científicas recientes y relevantes. Revisión bibliográfica y marco teórico: Investigación y análisis sobre biopolímeros, propiedades del almidón de papa, características funcionales de la harina de cáscara de maracuyá, procesos de termoformado, y metodologías para optimizar materiales biodegradables (Juan Polo, 2023; Rodríguez et al., 2022).

Formulación del problema de estudio, objetivo general y objetivos específicos: Definición clara de la problemática, propósito general y metas específicas relacionadas con mejorar las propiedades mecánicas y físicas de las bandejas biodegradables.

Diseño experimental: Uso de técnicas como superficie de respuesta para evaluar variables críticas (proporciones de almidón, fibra, plastificantes, condiciones de termoformado) y su efecto en las propiedades del material (Juan Polo, 2023; Cuevas Zujey, 2017).

Preparación de muestras: Procedimientos para la selección, tratamiento y mezcla de almidón de papa y harina de cáscaras de maracuyá; formulación de biocompuestos; Adición de plastificantes y fibras según diseño experimental.

Procesamiento: Aplicación del proceso de termoformado bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo y presión para obtener bandejas, considerando variables indicadas en la bibliografía actualizada (García et al., 2023; Martínez & López, 2024).

Análisis y caracterización: Evaluación de propiedades mecánicas (resistencia, flexión, dureza), físicas (espesor, solubilidad, absorción de humedad), térmicas (DSC, análisis TGA), morfológicas (microscopía), y biodegradabilidad conforme a protocolos reconocidos (Rodríguez et al., 2022).

Modelado y optimización: Construcción de modelos predictivos para las propiedades objetivo y determinación de la combinación óptima de variables para producción a escala piloto (Juan Polo, 2023).

Validación y réplica: Repetición de experimentos en condiciones optimizadas para confirmación estadística de resultados.

### 3.7. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

- **Recepción de la materia prima:** Se utilizó papa residual y cáscaras de maracuyá como materia prima, en esta operación se verificó que ambas materias primas estuvieran en estado fresco, exentas de cualquier partícula extraña.
- **Secado (acondicionamiento térmico de la materia prima):** La papa residual cortada y las cáscaras de maracuyá se distribuyeron de forma homogénea en las bandejas del secador de bandejas con el fin de eliminar el vapor de agua de estas materias primas, para ello, en el interior del secador se manejó una temperatura de 60°C por un tiempo de 24 horas, transcurrido este tiempo se logró obtener una humedad constante del 8% (mediante cinética de secado) en ambas materias primas.
- **Obtención del almidón de papa:** Se obtuvo mediante molienda de láminas secas de papa. Una vez lograda la reducción de humedad en ambas materias primas, se procedió a molerlas, utilizando un molino de martillo, con el fin de lograr la reducción del tamaño. Posteriormente, el producto obtenido de la molienda fue pasado por un tamiz alcanzando un tamaño de partícula inferior a 300  $\mu\text{m}$ .
- **Caracterización química del almidón:** La caracterización química consistirá principalmente en la determinación del contenido de humedad (NTP 206.011),

cenizas (AOAC 935.398) y fibra (FAO 14/7) contenidas en el almidón de papa residual.

- **Obtención de harina de residuos agroindustriales de maracuyá:** Se obtuvo del subproducto del proceso de pulpa de maracuyá en agroexportadora en la Provincia de Casma en Ancash. Este subproducto se secará, molerá y tamizará hasta un tamaño inferior a 300  $\mu\text{m}$ .
- **Preparación de la mezcla:** Se mezcló el almidón, la harina de cáscaras, goma guar, estearato de magnesio, glicerol y agua, hasta que la mezcla esté homogénea, agregándole agua y agitación constante hasta alcanzar la gelatinización
- **Termoprensado:** Para esta operación, se adaptó una termoprensa en base a los requerimientos del biopolímero y siguiendo un modelo tradicional de la termoprensa para sublimación de las bandejas. La termoprensa se precalentó a 145 °C y 140°C, temperatura de la placa superior (Ts) e inferior (Ti) respectivamente, luego se introdujo la mezcla y se cerró para formar la bandeja a la temperatura alcanzada por 5.30 minutos.
- **Acondicionamiento:** Las bandejas fueron sometidos en la estufa a una temperatura entre 25 °C y 30°C con una humedad relativa del 75%.
- **Almacenado:** Todos los tratamientos fueron almacenados en el desecador a temperatura ambiente (25°C) durante un tiempo de 72 horas para medir sus propiedades mecánicas (deflexión, dureza, fracturabilidad) y biodegradabilidad.
- **Patrón de comparación:** Se usarán envases de almidón para comparar los resultados de los ensayos mecánicos.
- **Color y opacidad:** Se determinará con un colorímetro marca KONICA MINOLTA, modelo CR-400, usando el método CIELAB ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ),  $L^*$  luminosidad (Negro 0/Blanco 100),  $a^*$  (verde-/rojo+) y  $b^*$  (azul-/amarillo+). Minolta (1993).
- **Diseño experimental y optimización:** Se emplearon diseños factoriales y metodología de superficie de respuesta para encontrar las proporciones óptimas de almidón, harina de residuos y plastificantes, así como las mejores condiciones de temperatura, presión y tiempo para el termoformado (Paredes-Vega, 2020).
- **Ánálisis físico-mecánico:**

Prueba de resistencia a la tracción y elongación, medición de dureza y fracturabilidad.

Determinación del espesor y la densidad de bandejas.

Evaluación de propiedades de barrera: permeabilidad al agua y solubilidad (balanza, horno, estufa).

Análisis químico y estructural:

Análisis proximal (humedad, proteínas, fibra, cenizas) mediante métodos AOAC.

Espectroscopía infrarroja (FTIR) para determinar modificaciones químicas en el almidón modificado o interacción entre polímeros

Microscopía electrónica de barrido para observar la morfología superficial y la distribución de la fibra o harina en la matriz.

### **3.8. PROCEDIMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS**

Validación y confiabilidad de los instrumentos.

**VARIABLES INDEPENDIENTES (FACTORES):** Se mezclaron el almidón de papa residual y la harina de residuos de maracuyá para elaborar las bandejas biodegradables. En las formulaciones de las bandejas se trabajó con la mezcla de almidón de papa residual (0.37-0.55) y la harina de residuos de maracuyá (0.04-0.07) que en peso seco representa 89 gr.

**VARIABLES DEPENDIENTES (RESPUESTAS):** se utilizó la metodología de superficie de respuesta para optimizar la formulación, considerando los porcentajes de la mezcla de almidón de papa residual y la harina de residuos de maracuyá.

En la etapa de elaboración de las bandejas, se siguieron los siguientes pasos: pesado, mezclado, batido, termoformado, enfriado y envasado. Luego se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de las bandejas.

## **CAPITULO IV**

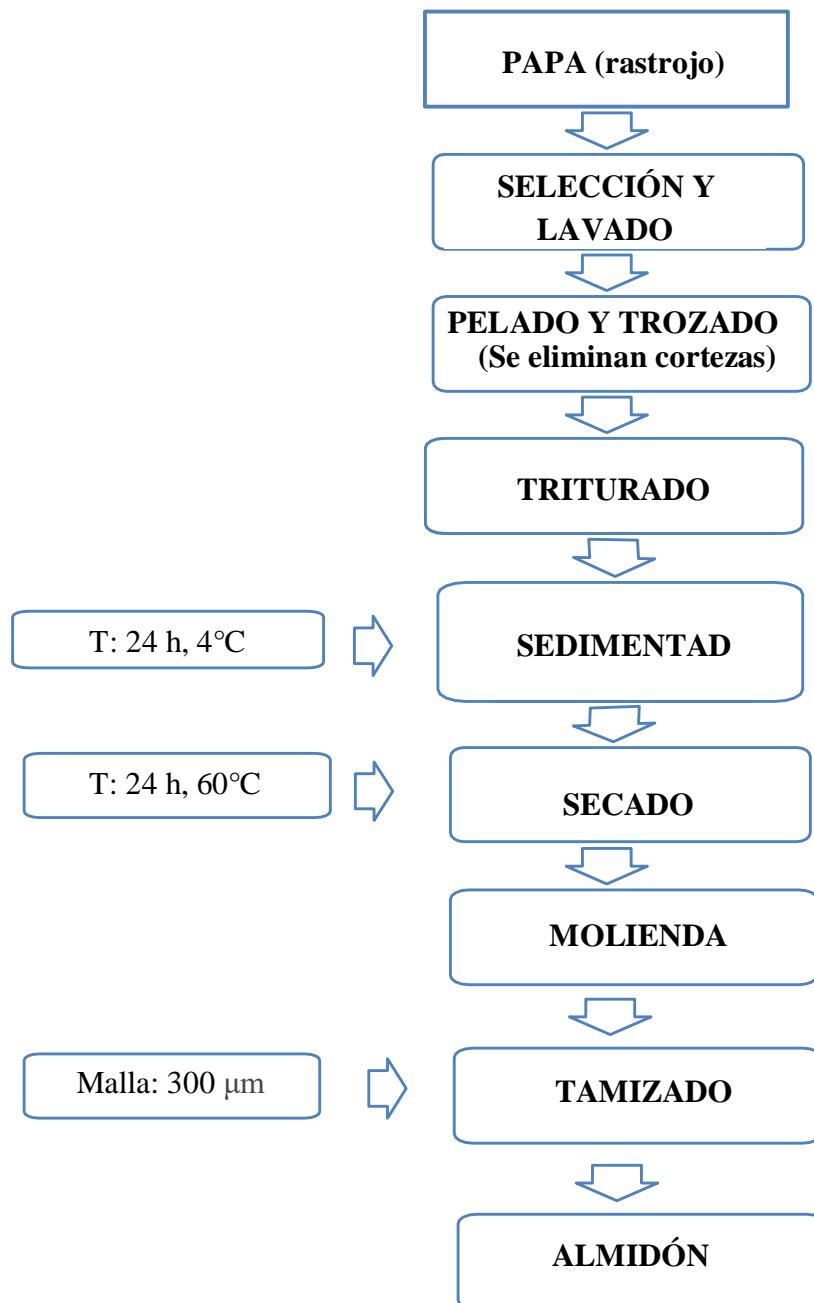
### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE PAPA RESIDUAL Y HARINA DE RESIDUOS DE MARACUYÁ**

La extracción del almidón de papa residual, se realizó en el laboratorio de Microbiología y toxicología de productos agroindustriales de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial. La extracción de almidón de papa inicia con la materia prima (papa de rastrojo), la cual es sometida a una selección y lavado con el fin de eliminar impurezas y restos de tierra. Posteriormente, los tubérculos se pelan y trozan, retirando las cortezas para evitar componentes indeseados en el producto final. Una vez preparada la papa, se procede al triturado, etapa en la que el tejido vegetal se desintegra para liberar los gránulos de almidón. La suspensión resultante se somete a un proceso de sedimentación a 4 °C durante 24 horas, lo que permite la separación del almidón por decantación. El material sedimentado se recupera y se traslada a la etapa de secado, realizada a 60 °C durante 24 horas, con el objetivo de reducir el contenido de humedad y garantizar la estabilidad del producto. El material seco se somete a molienda para obtener partículas más finas y homogéneas. Posteriormente, se realiza un tamizado utilizando una malla de 300 µm, lo que permite estandarizar el tamaño de partícula y eliminar restos de fibras o grumos. Finalmente, se obtiene el almidón de papa como producto listo para su almacenamiento y uso en las formulaciones posteriores. En el Anexo 2, se muestran imágenes del proceso.

**Figura 1:**

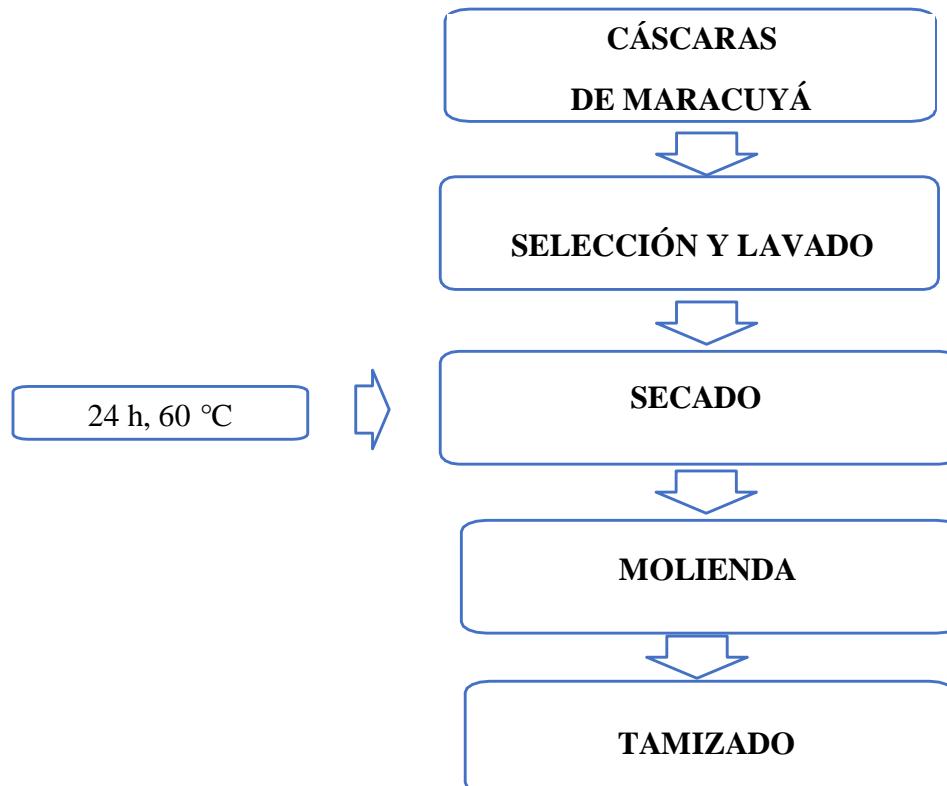
*Extracción de almidón de papa residual*



La extracción de harina de residuos de maracuyá, se realizó en el laboratorio de Microbiología y toxicología de productos agroindustriales de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial. El proceso de obtención de harina a partir de residuos de maracuyá inicia con la recolección de las cáscaras, las cuales constituyen el subproducto principal de la fruta. Posteriormente, se realiza una etapa de selección y lavado, con el propósito de eliminar restos de pulpa, semillas, suciedad e impurezas que puedan afectar la calidad del producto final. Las cáscaras limpias se someten a un proceso de secado en estufa a 60 °C durante 24 horas, con el fin de reducir el contenido de humedad y asegurar la conservación del material. Una vez deshidratadas, las muestras se llevan a la etapa de molienda, donde se reducen a partículas más pequeñas y homogéneas. Finalmente, el material molido se somete a un tamizado, con el cual se estandariza el tamaño de partícula, obteniéndose de esta manera la harina de residuos de maracuyá lista para su uso en las formulaciones de bandejas biodegradables.

**Figura 2:**

*Extracción de harina de residuos de maracuyá*



## 4.2. CARACTERIZACIÓN PROXIMAL DEL ALMIDÓN DE PAPA RESIDUAL Y DE LA HARINA DE LAS CÁSCARAS DE MARACUYÁ

Se realizó la caracterización proximal del almidón de papa residual y de la harina de la cáscara de maracuyá, proveniente de Casma, Ancash, Perú. Los resultados están expresados en base seca en la siguiente Cuadro:

### Cuadro 4:

*Caracterización proximal del almidón de papa residual y de la harina de las cáscaras de maracuyá*

|                           | Almidón de papa<br>nativa | Harina de cáscaras de<br>maracuyá |
|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Humedad (%)               | 10.12 ± 0.211             | 11.13 ± 0.10                      |
| Grasa (%)                 | 0.07 ± 0.03               | 0.57 ± 0.04                       |
| Cenizas (%)               | 0.44 ± 0.04               | 0.54 ± 0.01                       |
| Fibra dietética total (%) | 3.18 ± 0.01               | 66.15 ± 0.02                      |
| Carbohidratos (%)         | 89.14 ± 0.09              | 31.33 ± 0.29                      |

En el Cuadro 4 se detalla la composición proximal del almidón de papa residual en base seca, en estos resultados la caracterización proximal del almidón de papa residual evidenció un contenido de humedad de 10.12%, valor que se encuentra dentro del rango reportado para almidones nativos de papa, los cuales suelen presentar valores entre 8 y 12% (Ovando-Martínez et al., 2021). Este nivel de humedad asegura una adecuada estabilidad en el almacenamiento, ya que valores superiores podrían favorecer el desarrollo de microorganismos y reacciones de deterioro. La coincidencia con lo reportado en la literatura confirma que el material obtenido es apto para ser utilizado en la formulación de biopolímeros por termoformado.

Respecto al contenido de grasa (0.07%), este se considera bajo en comparación con otros reportes, como el de García et al. (2020), quienes encontraron 0.15% en almidones nativos de papa de la variedad Huayro. Esta diferencia podría deberse a las condiciones de extracción del almidón y al tipo de variedad utilizada. Un contenido graso reducido es favorable para la elaboración de bioplásticos, ya que evita procesos de enranciamiento

y mejora la interacción entre el almidón y otros componentes en la matriz polimérica (Flores et al., 2022).

El contenido de cenizas en el almidón de papa residual fue de 0.44%, lo que coincide con los valores reportados por Singh et al. (2019), quienes indicaron un rango de 0.3 a 0.6% en almidones nativos de tubérculos. Este valor refleja una baja presencia de minerales, característica común en almidones aislados. Si bien este nivel de cenizas no aporta de forma directa a las propiedades mecánicas del bioplástico, sí es un indicador de la pureza del almidón extraído.

La fibra dietética total en el almidón de papa alcanzó un 3.18%, superior a lo señalado por Pérez & Castaño (2020), quienes reportaron valores menores al 2% en almidones nativos. Este resultado puede atribuirse a la presencia de residuos de la matriz vegetal durante el proceso de separación del almidón. Este contenido de fibra resulta beneficioso, ya que podría mejorar la biodegradabilidad del material, favoreciendo su descomposición en condiciones ambientales.

En cuanto al contenido de carbohidratos (89.14%), se confirma la predominancia de este componente en los almidones de papa, en concordancia con lo expuesto por Ambigaipalan et al. (2019), quienes señalan que los almidones nativos presentan más del 85% de carbohidratos totales. Este alto contenido es crucial para la formación de películas y bandejas biodegradables, debido a la capacidad del almidón para formar estructuras cohesivas mediante la gelatinización y retrogradación.

Por otro lado, la harina de cáscaras de maracuyá presentó un contenido de humedad de 11.13%, similar a lo descrito por Castro et al. (2021), quienes reportaron valores entre 10 y 12% en subproductos secos de maracuyá. Este nivel es adecuado para la conservación del material y su incorporación en mezclas poliméricas.

El contenido de grasa en la harina de cáscaras fue de 0.57%, ligeramente inferior al reportado por Andrade et al. (2020), quienes mencionaron valores de 0.8%. Esta variación puede explicarse por diferencias en el método de secado o en la madurez del fruto. Aunque bajo, el contenido lipídico puede influir en la flexibilidad de los materiales obtenidos, al actuar como plastificante natural en la matriz (Rodríguez et al., 2022).

Las cenizas alcanzaron un 0.54%, valor semejante al encontrado por Souza et al. (2021), quienes reportaron 0.6% en harinas de subproductos de maracuyá. Este contenido

mineral puede contribuir a mejorar la resistencia térmica del biocompuesto, actuando como agentes de refuerzo inorgánico dentro de la estructura del material.

El valor más relevante fue el contenido de fibra dietética total (66.15%), que concuerda con lo señalado por Hernández et al. (2020), quienes reportaron hasta un 65% de fibra en cáscaras de maracuyá. Este alto contenido de fibra es determinante en la formulación de bioplásticos, ya que puede mejorar la rigidez y resistencia mecánica del material, aunque también puede reducir su flexibilidad. Su incorporación en la mezcla con almidón permite compensar las limitaciones de cada componente, creando una matriz balanceada entre resistencia y degradabilidad.

Finalmente, los carbohidratos representaron el 31.33% en la harina de cáscaras de maracuyá, cifra menor en comparación con los valores reportados por Ferreira et al. (2019), quienes hallaron 40%. Esta diferencia puede deberse al mayor contenido de fibra en las muestras analizadas, lo que reduce proporcionalmente la fracción de carbohidratos disponibles. A pesar de ser menor, esta fracción con carbohidratos contribuye a la formación de enlaces con el almidón, lo que favorece la cohesión en la estructura del biopolímero.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que tanto el almidón de papa residual como la harina de cáscaras de maracuyá poseen un perfil proximal favorable para la producción de bandejas biodegradables. Mientras que el almidón aporta la capacidad formadora de película gracias a su elevado contenido de carbohidratos, la harina de maracuyá contribuye con su alta proporción de fibra para mejorar la rigidez estructural y la biodegradabilidad. Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas que destacan la importancia de combinar almidones con fibras vegetales para el desarrollo de materiales sostenibles con aplicaciones en envases (Mekonnen & Mussone, 2021).

#### **4.3. PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS BANDEJAS BIODEGRADABLES**

##### **- DETERMINACIÓN DEL COLOR**

Se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en el Cuadro 5 para la prueba colorimétrica en las bandejas biodegradables en los 15 tratamientos por el método CIELAB, con un valor  $p<0.05$ , con un nivel del 95.0% de confianza. En la prueba de color, se puede apreciar las tonalidades de las bandejas que varían de un color marrón light a un color marrón más intenso.

**Cuadro 5:***Promedio de los parámetros L\*, a\*, b\*; de las bandejas biodegradables*

| Tratamientos | L*    | a*   | b*    | COLOR |
|--------------|-------|------|-------|-------|
| T1           | 72.05 | 1.43 | 11.48 | 82.90 |
| T2           | 72.15 | 1.47 | 11.44 | 79.56 |
| T3           | 64.66 | 2.56 | 16.20 | 79.10 |
| T4           | 64.91 | 2.35 | 16.00 | 79.21 |
| T5           | 63.58 | 2.55 | 16.28 | 82.68 |
| T6           | 57.31 | 2.80 | 15.74 | 81.10 |
| T7           | 63.50 | 3.13 | 16.43 | 79.88 |
| T8           | 71.69 | 1.48 | 11.59 | 79.01 |
| T9           | 64.08 | 3.09 | 16.07 | 82.72 |
| T10          | 63.35 | 2.90 | 15.96 | 79.70 |
| T11          | 62.99 | 2.92 | 16.45 | 79.93 |
| T12          | 57.44 | 2.66 | 14.43 | 81.02 |
| T13          | 62.53 | 2.88 | 14.96 | 79.91 |
| T14          | 61.36 | 2.90 | 16.25 | 81.64 |
| T15          | 58.57 | 3.26 | 16.78 | 79.12 |

Los resultados de color obtenidos en el espacio CIELAB muestran una relación directa con la composición de las formulaciones empleadas en la elaboración de las bandejas biodegradables a base de almidón de papa residual y harina de cáscara de maracuyá.

Para los valores de Luminosidad (L\*), las formulaciones con mayor contenido de almidón de papa residual (T1, T2, T8; 0.53–0.55) y baja proporción de harina de maracuyá (0.04) registraron los valores más altos de luminosidad (L\* = 71–72), lo que indica bandejas más claras y visualmente más atractivas. Esto concuerda con lo señalado por Cazón et al. (2017), quienes mencionan que una matriz predominantemente amilácea presenta mayor reflexión de la luz, manteniendo una apariencia blanquecina o translúcida.

En contraste, las formulaciones con menor proporción de almidón (T6, T7, T12, T13, T14, T15; 0.37–0.41) y mayor cantidad de harina de maracuyá (0.06–0.07) mostraron los valores más bajos de luminosidad (L\* = 57–63), indicando tonalidades más oscuras. Este comportamiento se atribuye a la presencia de compuestos fenólicos, fibras y pigmentos

amarillos en la cáscara de maracuyá, que tienden a reducir la reflectancia de la matriz (García et al., 2020).

#### **Cuadro 6:**

*ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta L*

| <b>Fuentes de variación</b> | <b>Suma de cuadrados</b> | <b>gl</b> | <b>Cuadrado medio</b> | <b>F</b> | <b>p</b> |
|-----------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------|----------|
| <b>Modelo</b>               | 288.28                   | 5         | 57.66                 | 16.41    | 0.0003   |
| Mezcla lineal               | 199.31                   | 2         | 99.65                 | 28.36    | 0.0001   |
| AB                          | 22.58                    | 1         | 22.58                 | 6.43     | 0.0320   |
| AC                          | 22.60                    | 1         | 22.60                 | 6.43     | 0.0319   |
| BC                          | 22.35                    | 1         | 22.35                 | 6.36     | 0.0327   |
| Error puro                  | 31.63                    | 9         | 3.51                  |          |          |
| <b>Total</b>                | 319.90                   | 14        |                       |          |          |

El ANOVA (Cuadro 6) evidenció que el modelo cuadrático para la respuesta L fue significativo ( $F = 16.41$ ;  $p = 0.0003$ ), mostrando que tanto la mezcla lineal ( $p = 0.0001$ ) como las interacciones AB, AC y BC ( $p < 0.05$ ) ejercen un efecto estadísticamente relevante sobre la luminosidad, con baja contribución del error experimental.

#### **Cuadro 7:**

*Estadísticas de ajuste para la respuesta L*

| <b>Parámetro</b> | <b>Valor</b> |
|------------------|--------------|
| Desv. Estándar   | 1.87         |
| Promedio         | 64.01        |
| C.V. %           | 2.93         |
| $R^2$            | 0.9011       |
| $R^2$ ajustado   | 0.8462       |

Las estadísticas de ajuste (Cuadro 7) muestran que el modelo para la respuesta L posee una capacidad explicativa adecuada, con un  $R^2$  de 0.9011 y un  $R^2$  ajustado de 0.8462. La desviación estándar (1.87) es baja en comparación con el promedio (64.01), mientras que el coeficiente de variación (C.V. = 2.93%) refleja una buena precisión experimental, lo que respalda la confiabilidad del modelo.

**Cuadro 8:**

*Ecuación de la respuesta L*

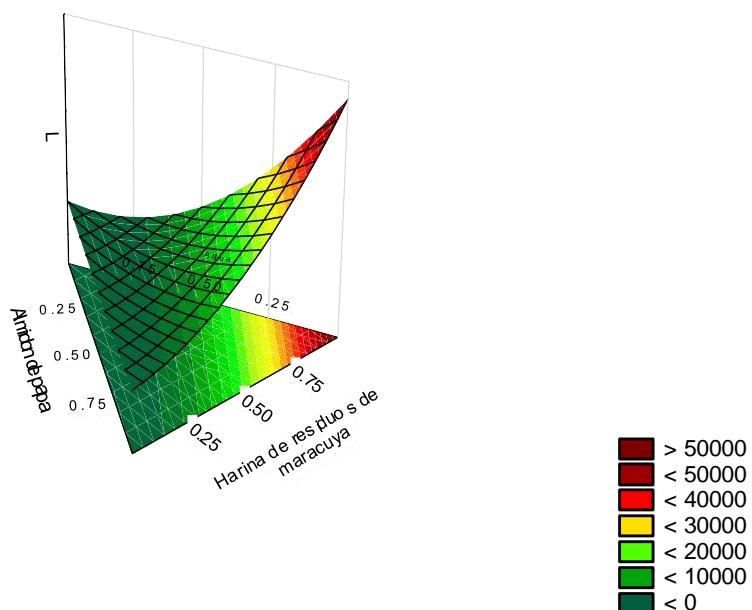
| Componente | Términos   |
|------------|--|
| Pseudo     | $-39.26A + 61799.53B + 1243.87C - 52417.40AB - 2101.05AC - 80367.27BC$   |
| Real       | $-122.00530$ Almidón de papa + $1.67172E+06$ Harina de residuos de maracuyá + $35854.67918$ Agua - $1.45201E+06$ Almidón de papa*Harina de residuos de maracuyá - $58200.71539$ Almidón de papa*Agua - $2.22624E+06$ Harina de residuos de maracuyá*Agua |

La ecuación obtenida (Cuadro 8) representa el modelo cuadrático para la respuesta L, en términos codificados y reales. Los coeficientes indican el efecto de cada factor y de sus interacciones, mostrando que L depende tanto de los componentes individuales como de las combinaciones entre ellos.

**Figura 3:**

*Superficie 3D de la respuesta L*

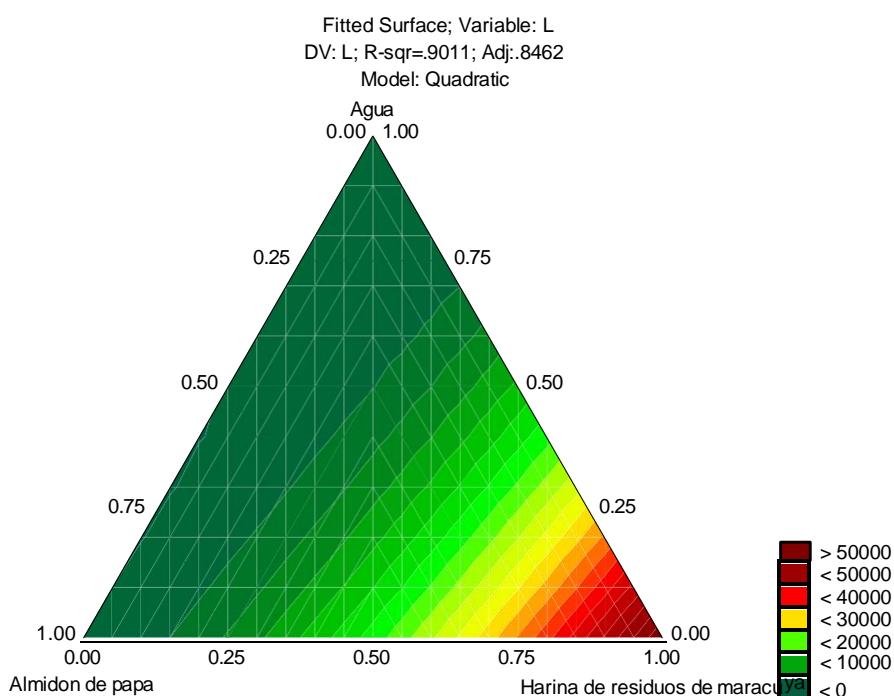
Fitted Surface; Variable: L  
 DV: L; R-sqr=.9011; Adj:.8462  
 Model: Quadratic



La Figura 3 muestra la superficie de respuesta 3D para la variable L (luminosidad). El modelo cuadrático obtenido explica satisfactoriamente la variabilidad observada ( $R^2 = 0.9011$ ;  $R^2_{aj} = 0.8462$ ). Se aprecia que los valores más altos de luminosidad corresponden a formulaciones con menor contenido de harina de fibra, mientras que al aumentar este componente la luminosidad tiende a disminuir. Este resultado confirma que la adición de fibra modifica de manera significativa la apariencia visual del material.

**Figura 4:**

*Superficie de contorno de la respuesta L*



La Figura 4 muestra el diagrama de superficie de contorno de la variable L (luminosidad). El modelo cuadrático ( $R^2 = 0.9011$ ;  $R^2_{aj} = 0.8462$ ) representa adecuadamente la variación de L en función de las proporciones de almidón de papa, harina de residuos de maracuyá y agua. Se observa que la luminosidad disminuye a medida que aumenta el contenido de harina de maracuyá, alcanzando valores más bajos en las formulaciones con alta proporción de este componente. Estos resultados evidencian que la harina de residuos de maracuyá influye directamente en el oscurecimiento del material.

Los valores de  $a^*$  oscilaron entre 1.43 y 3.26. Se observó que a medida que aumenta la proporción de harina de maracuyá ( $\geq 0.06$ ), los valores de  $a^*$  tienden a incrementarse (ejemplo: T7, T14, T15 con  $a^* > 3.0$ ), indicando un ligero desplazamiento hacia tonalidades rojizas. Esto es consistente con lo reportado por Andrade-Mahecha et al. (2012), quienes encontraron que la inclusión de fibras vegetales ricas en polifenoles puede inducir cambios hacia gamas cálidas en matrices de biopolímeros.

#### **Cuadro 9:**

*ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta a*

| <b>Fuentes de variación</b> | <b>Suma de cuadrados</b> | <b>gl</b> | <b>Cuadrado medio</b> | <b>F</b> | <b>p</b> |
|-----------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------|----------|
| <b>Modelo</b>               | 5.16                     | 5         | 1.03                  | 65.23    | < 0.0001 |
| Mezcla lineal               | 2.63                     | 2         | 1.31                  | 83.09    | < 0.0001 |
| AB                          | 0.6474                   | 1         | 0.6474                | 40.92    | 0.0001   |
| AC                          | 0.7014                   | 1         | 0.7014                | 44.34    | < 0.0001 |
| BC                          | 0.6523                   | 1         | 0.6523                | 41.23    | 0.0001   |
| Error puro                  | 0.1424                   | 9         | 0.0158                |          |          |
| <b>Total</b>                | 5.30                     | 14        |                       |          |          |

El ANOVA (Cuadro 9) evidenció que el modelo cuadrático para la respuesta  $a^*$  resultó significativo ( $F = 65.23$ ;  $p < 0.0001$ ), indicando que la mezcla lineal ( $p < 0.0001$ ) y las interacciones AB, AC y BC ( $p \leq 0.0001$ ) ejercen un efecto estadísticamente relevante sobre la cromaticidad  $a^*$ , con mínima contribución del error experimental.

#### **Cuadro 10:**

*Estadísticas de ajuste para la respuesta a*

| <b>Parámetro</b> | <b>Valor</b> |
|------------------|--------------|
| Desv. Estándar   | 0.1258       |
| Pomedio          | 2.56         |
| C.V. %           | 4.92         |
| $R^2$            | 0.9731       |
| $R^2$ ajustado   | 0.9582       |

Las estadísticas de ajuste (Cuadro 10) evidencian que el modelo para la respuesta *a* presenta una alta capacidad predictiva, con un  $R^2$  de 0.9731 y un  $R^2$  ajustado de 0.9582. La desviación estándar (0.1258) resulta reducida en relación con el promedio (2.56), mientras que el coeficiente de variación (C.V. = 4.92%) se mantiene en un rango bajo, confirmando la precisión y fiabilidad del modelo.

**Cuadro 11:**

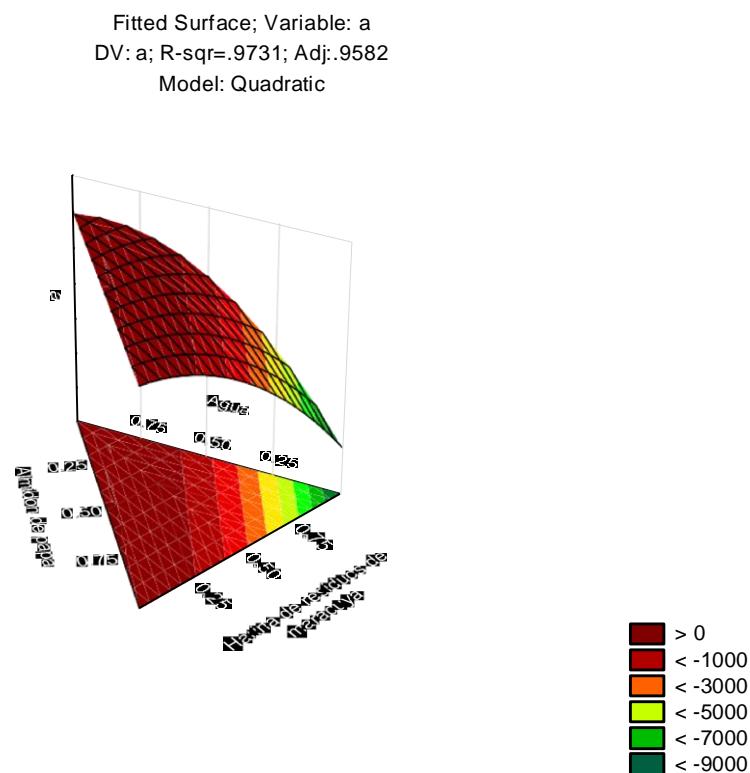
*Ecuación de la respuesta a*

| Componente | Términos   |
|------------|--|
| Pseudo     | + 20.90A - 10509.92B - 204.39C + 8875.24AB + 370.12AC<br>+ 13727.96BC  |
| Real       | + 17.48 Almidón de papa - 2.84548E+05 Harina de residuos de maracuyá - 6237.64 Agua + 2.45852E+05 Almidón de papa*Harina de residuos de maracuyá + 10252.72 Almidón de papa*Agua + 3.80276E+05 Harina de residuos de maracuyá*Agua |

La ecuación obtenida (Cuadro 11) representa el modelo cuadrático para la respuesta *a*, en términos codificados y reales. Los coeficientes indican el efecto de cada factor y de sus interacciones, mostrando que *a*, depende tanto de los componentes individuales como de las combinaciones entre ellos.

**Figura 5:**

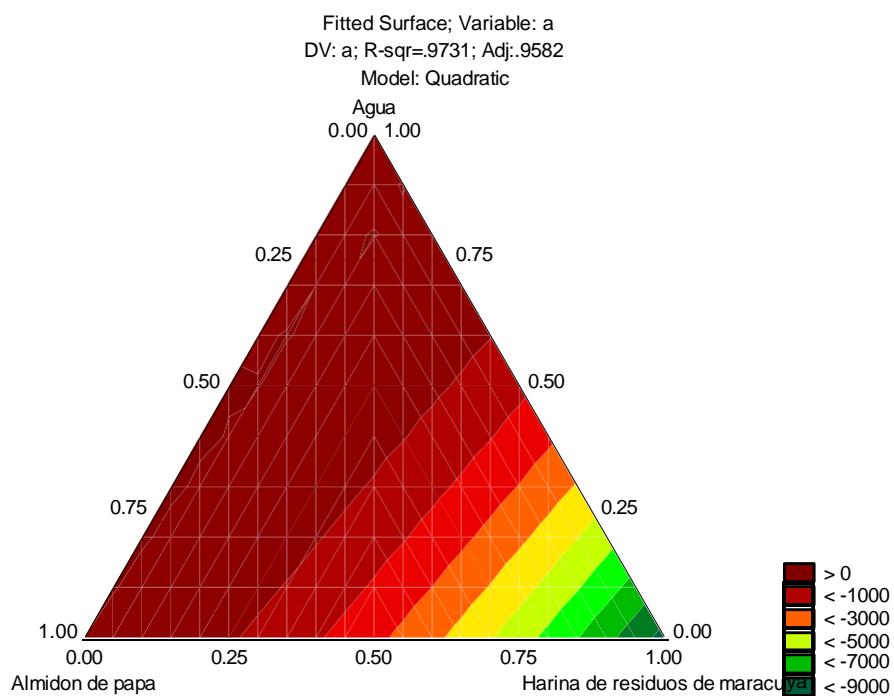
*Superficie 3D de la respuesta a*



La Figura 5 presenta la superficie de respuesta 3D para el parámetro a. El modelo cuadrático obtenido explica de forma adecuada la variación observada ( $R^2 = 0.9731$ ;  $R^2_{aj} = 0.9582$ ). Se aprecia que el valor de a aumenta conforme se incrementa la proporción de harina de residuos de maracuyá, lo que refleja una mayor tendencia hacia tonalidades rojizas en las formulaciones con alto contenido de fibra.

**Figura 6:**

*Superficie de contorno de la respuesta a*



La Figura 6 muestra la superficie de contorno para el parámetro a. El modelo cuadrático ( $R^2 = 0.9731$ ;  $R^2_{aj} = 0.9582$ ) describe satisfactoriamente la variación del color en función de las proporciones de almidón de papa, agua y harina de residuos de maracuyá. Se observa que los valores de a aumentan con el incremento de harina de maracuyá, evidenciando una mayor tendencia hacia tonalidades rojizas en las formulaciones con alto contenido de fibra.

El parámetro  $b^*$  se incrementó significativamente en los tratamientos con mayor proporción de harina de cáscara de maracuyá (T5, T7, T9, T14, T15), alcanzando valores entre 16.20 y 16.78, en comparación con los tratamientos con bajo nivel de fibra (T1, T2, T8;  $b^* \approx 11.4-11.6$ ). Esto confirma que la harina de maracuyá aporta pigmentos carotenoides y flavonoides responsables de tonalidades amarillas intensas (Rodríguez-Amaya, 2019).

**Cuadro 12:***ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta b*

| Fuentes de variación | Suma de cuadrados | gl | Cuadrado medio | F     | p        |
|----------------------|-------------------|----|----------------|-------|----------|
| <b>Modelo</b>        | 51.32             | 5  | 10.26          | 77.40 | < 0.0001 |
| Mezcla lineal        | 24.97             | 2  | 12.49          | 94.15 | < 0.0001 |
| AB                   | 6.44              | 1  | 6.44           | 48.59 | < 0.0001 |
| AC                   | 7.22              | 1  | 7.22           | 54.42 | < 0.0001 |
| BC                   | 6.56              | 1  | 6.56           | 49.43 | < 0.0001 |
| Error puro           | 1.19              | 9  | 0.1326         |       |          |
| <b>Total</b>         | 52.51             | 14 |                |       |          |

El ANOVA (Cuadro 12) mostró que el modelo cuadrático para la respuesta b\* fue altamente significativo ( $F = 77.40$ ;  $p < 0.0001$ ), confirmando que la mezcla lineal ( $p < 0.0001$ ) y las interacciones AB, AC y BC ( $p < 0.0001$ ) influyen de manera estadísticamente relevante en esta respuesta, con escasa contribución del error experimental.

**Cuadro 13:***Estadísticas de ajuste para la respuesta b*

| Parámetro      | Valor  |
|----------------|--------|
| Desv. Estándar | 0.3642 |
| Promedio       | 15.07  |
| C.V. %         | 2.42   |
| $R^2$          | 0.9773 |
| $R^2$ ajustado | 0.9646 |

Las estadísticas de ajuste (Cuadro 13) muestran una adecuada precisión del modelo para la respuesta b\*, con un  $R^2$  de 0.9773 y un  $R^2$  ajustado de 0.9646, lo que evidencia una alta capacidad explicativa. El bajo coeficiente de variación (C.V. = 2.42%) y la reducida desviación estándar (0.3642) confirman la fiabilidad y consistencia experimental.

**Cuadro 14:**

*Ecuación de la respuesta b*

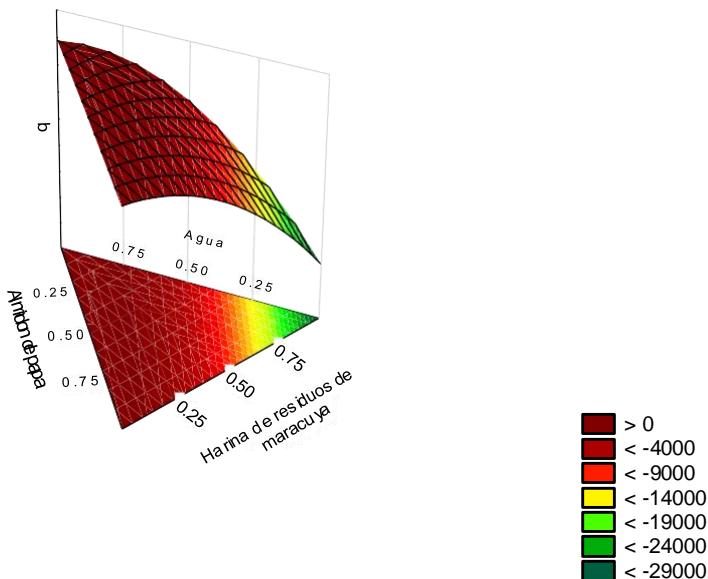
| Componente | Términos   |
|------------|--|
| Pseudo     | + 74.54A - 33295.30B - 644.05C + 28002.10AB + 1187.24AC<br>+ 43521.25BC  |
| Real       | + 66.95 Almidón de papa - 9.00614E+05 Harina de residuos de maracuyá - 19924.23 Agua + 7.75681E+05 Almidón de papa*Harina de residuos de maracuyá + 32887.60Almidón de papa*Agua + 1.20557E+06 Harina de residuos de maracuyá*Agua |

La ecuación obtenida (Cuadro 14) representa el modelo cuadrático para la respuesta *b*, en términos codificados y reales. Los coeficientes indican el efecto de cada factor y de sus interacciones, mostrando que *b* depende tanto de los componentes individuales como de las combinaciones entre ellos.

**Figura 7:**

*Superficie 3D de la respuesta b*

Fitted Surface; Variable: b  
DV: b; R-sqr=.9773; Adj.:9646  
Model: Quadratic

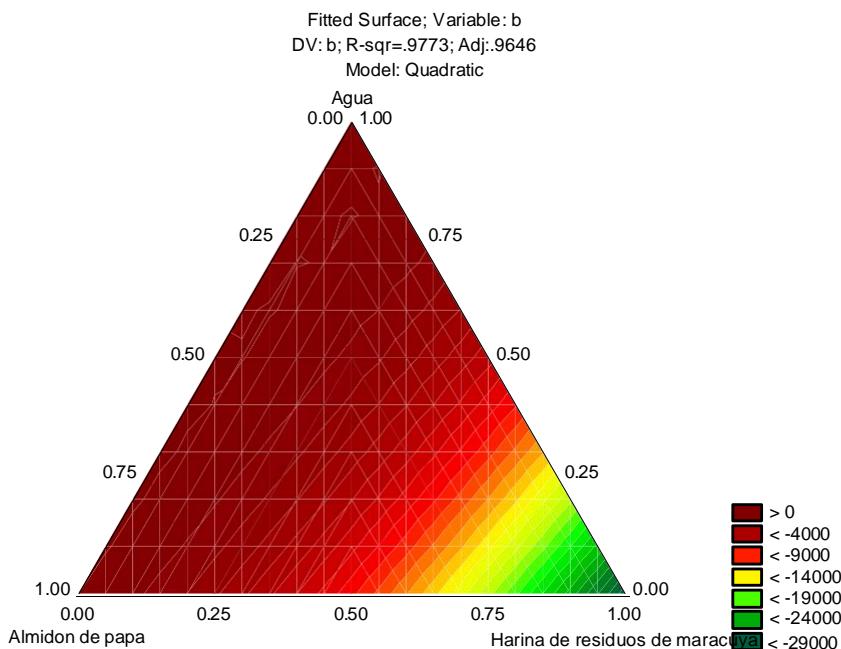


La Figura 7 presenta la superficie de respuesta 3D para el parámetro *b*. El modelo cuadrático obtenido explica de forma adecuada la variación observada ( $R^2 = 0.9773$ ;  $R^2_{aj} = 0.9646$ ). Se aprecia que el valor de *b* aumenta conforme se incrementa la proporción

de harina de residuos de maracuyá, lo que refleja una mayor tendencia hacia tonalidades amarillentas en las formulaciones con alto contenido de fibra.

**Figura 8:**

*Superficie de contorno de la respuesta b*



La Figura 8 muestra la superficie de contorno para el parámetro b. El modelo cuadrático ( $R^2 = 0.9773$ ;  $R^2_{aj} = 0.9646$ ) describe satisfactoriamente la variación del color en función de las proporciones de almidón de papa, agua y harina de residuos de maracuyá. Se observa que los valores de b aumentan con el incremento de harina de maracuyá, evidenciando una mayor tendencia hacia tonalidades amarillentas en las formulaciones con alto contenido de fibra.

La saturación del color ( $C^*$ ) se mantuvo elevada en todos los tratamientos (79–83), aunque se identificó un patrón: las formulaciones con mayor harina de maracuyá ( $\geq 0.06$ ) tendieron a valores más altos de croma (ejemplo: T9 = 82.72; T5 = 82.68), evidenciando un color más intenso. Esto concuerda con lo descrito por Shafiei et al. (2021), quienes demostraron que la adición de fibras vegetales aumenta la viveza del color en biocompuestos debido a la dispersión de partículas y compuestos colorantes en la matriz polimérica.

En general, el aumento en el contenido de harina de cáscara de maracuyá redujo la luminosidad ( $L^*$ ), incrementó la tonalidad rojiza ( $a^*$ ) y favoreció colores más amarillos

(b\*) y saturados (C\*). Esta tendencia sugiere que la fibra y pigmentos naturales actúan como moduladores cromáticos de la matriz amilácea, generando bandejas biodegradables con una apariencia más oscura, cálida y natural. Desde un punto de vista tecnológico, esta característica puede representar un valor agregado, ya que refuerza la percepción de un producto sustentable y derivado de fuentes vegetales, en concordancia con lo planteado por Salgado et al. (2019).

A continuación, se reportan los resultados obtenidos para las variables independientes (de respuesta), así como también los resultados del análisis de varianza (según el modelo lineal o cuadrático que mejor se ajustó a cada una de las respuestas), las ecuaciones y gráficos de superficie respuesta y de contorno de acuerdo al orden de las respuestas que aparecen en el Cuadro 15. Además, en la parte final se reportan los resultados de la optimización, realizada de manera numérica y gráfica.

**Cuadro 15:**

*Resultados obtenidos para las variables de respuesta*

| OE | V. independen. |      |      | Variables dependientes |      |       |      |       |      |      |      |       |      |      |
|----|----------------|------|------|------------------------|------|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|
|    | VI1            | VI2  | VI3  | VR1                    | VR2  | VR3   | VR4  | VR5   | VR6  | VR7  | VR8  | VR9   | VR10 | VR11 |
| 1  | 0.55           | 0.04 | 0.41 | 84.63                  | 2.14 | 72.05 | 1.43 | 11.48 | 0.21 | 2.50 | 6.22 | 65.18 | 4.11 | 1.73 |
| 2  | 0.53           | 0.04 | 0.43 | 90.13                  | 1.99 | 72.15 | 1.47 | 11.44 | 0.22 | 2.48 | 6.34 | 66.80 | 3.73 | 1.94 |
| 3  | 0.45           | 0.04 | 0.50 | 57.86                  | 2.42 | 64.66 | 2.56 | 16.20 | 0.40 | 2.23 | 7.24 | 60.48 | 3.10 | 1.83 |
| 4  | 0.45           | 0.04 | 0.50 | 63.84                  | 2.64 | 64.91 | 2.35 | 16.00 | 0.40 | 2.31 | 7.05 | 68.86 | 3.04 | 2.11 |
| 5  | 0.45           | 0.04 | 0.50 | 56.09                  | 2.71 | 63.58 | 2.55 | 16.28 | 0.39 | 2.18 | 7.14 | 66.94 | 2.68 | 2.11 |
| 6  | 0.41           | 0.06 | 0.53 | 61.33                  | 3.25 | 57.31 | 2.80 | 15.74 | 0.46 | 2.44 | 7.32 | 58.26 | 3.30 | 2.25 |
| 7  | 0.37           | 0.07 | 0.56 | 50.66                  | 3.20 | 63.50 | 3.13 | 16.43 | 0.42 | 2.61 | 8.14 | 36.50 | 2.82 | 1.79 |
| 8  | 0.55           | 0.04 | 0.41 | 79.43                  | 1.88 | 71.69 | 1.48 | 11.59 | 0.24 | 2.53 | 6.28 | 66.00 | 3.61 | 2.00 |
| 9  | 0.51           | 0.05 | 0.45 | 84.53                  | 2.76 | 64.08 | 3.09 | 16.07 | 0.41 | 2.10 | 7.72 | 46.19 | 3.83 | 2.19 |
| 10 | 0.51           | 0.05 | 0.45 | 90.71                  | 2.83 | 63.35 | 2.90 | 15.96 | 0.42 | 2.01 | 7.38 | 52.09 | 3.50 | 1.89 |
| 11 | 0.51           | 0.05 | 0.45 | 81.40                  | 2.51 | 62.99 | 2.92 | 16.45 | 0.38 | 2.18 | 7.55 | 47.45 | 2.84 | 1.63 |
| 12 | 0.41           | 0.06 | 0.53 | 60.10                  | 2.93 | 57.44 | 2.66 | 14.43 | 0.45 | 2.42 | 7.23 | 61.37 | 3.14 | 1.93 |
| 13 | 0.41           | 0.06 | 0.53 | 54.90                  | 3.16 | 62.53 | 2.88 | 14.96 | 0.48 | 2.53 | 7.28 | 62.48 | 2.62 | 1.86 |
| 14 | 0.37           | 0.07 | 0.56 | 47.46                  | 3.29 | 61.36 | 2.90 | 16.25 | 0.45 | 2.73 | 7.14 | 37.61 | 2.21 | 1.45 |
| 15 | 0.37           | 0.07 | 0.56 | 52.41                  | 2.99 | 58.57 | 3.26 | 16.78 | 0.41 | 2.55 | 7.64 | 35.62 | 2.94 | 1.85 |

*Nota.* OE: orden estándar de tratamientos. VI1: Harina de almidón de papa. VI2: Harina de residuos de maracuyá. VI3: Agua. VR1: Dureza (N). VR2: Fracturabilidad (mm). VR3: L\*. VR4: a. VR5: b. VR6: Densidad (g/cm<sup>3</sup>). VR7: Espesor (mm). VR8: Humedad (%). VR9: Capacidad de absorción de agua (%). VR10: Resistencia a la tracción (Mpa). VR11: Elongación (%)

## - DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

La densidad aparente de las bandejas experimentales mostró (Cuadro 16) valores entre 0.21 g/cm<sup>3</sup> (T1) y 0.48 g/cm<sup>3</sup> (T13), con una distribución heterogénea a lo largo de las formulaciones. Observando la secuencia de tratamientos, se aprecia una tendencia clara a que las formulaciones con mayor presencia relativa de fibra (T6, T13, T14) presenten densidades más altas, al limitar la expansión, favorece una estructura más compacta, mientras que los tratamientos con menor proporción de fibra (T1, T2, T8) presentan densidades bajas, lo que reflejan una matriz más expandida y porosa. Se muestra un incremento promedio de densidad al desplazarse desde los tratamientos con mayor almidón hacia aquellos con mayor porcentaje de fibra, aunque con algunas excepciones debidas a interacciones específicas entre formulación y proceso (diferencias en retención de humedad o colapso de células).

### Cuadro 16:

*Promedios de las propiedades físicas de las bandejas biodegradables*

| Formulación | Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | Espesor (mm) | Humedad (%) | Capacidad de absorción de agua (%) |
|-------------|-------------------------------|--------------|-------------|------------------------------------|
| 1           | 0.21                          | 2.50         | 6.22        | 65.18                              |
| 2           | 0.22                          | 2.48         | 6.34        | 66.80                              |
| 3           | 0.40                          | 2.23         | 7.24        | 60.48                              |
| 4           | 0.40                          | 2.31         | 7.05        | 68.86                              |
| 5           | 0.39                          | 2.18         | 7.14        | 66.94                              |
| 6           | 0.46                          | 2.44         | 7.32        | 58.26                              |
| 7           | 0.42                          | 2.61         | 8.14        | 36.50                              |
| 8           | 0.24                          | 2.53         | 6.28        | 66.00                              |
| 9           | 0.41                          | 2.10         | 7.72        | 46.19                              |
| 10          | 0.42                          | 2.01         | 7.38        | 52.09                              |
| 11          | 0.38                          | 2.18         | 7.55        | 47.45                              |
| 12          | 0.45                          | 2.42         | 7.23        | 61.37                              |
| 13          | 0.48                          | 2.53         | 7.28        | 62.48                              |
| 14          | 0.45                          | 2.73         | 7.14        | 37.61                              |
| 15          | 0.41                          | 2.55         | 7.64        | 35.62                              |

Los valores bajos observados en la presente investigación (0.21–0.24 g/cm<sup>3</sup> en T1–T2–T8) se aproximan a los reportados por Aguirre et al. (2023) para bandejas con cáscara de

maíz (0.16 y 0.29 g/cm), lo que sugiere que formulaciones con menor fracción fibrosa favorecen mayor expansión y matrices más porosas.

Por el contrario, Mello & Mali (2014) reportaron densidades relativamente altas en sus formulaciones con bagazo de malta (0.415–0.450 g/cm<sup>3</sup>), lo cual indica que la naturaleza del residuo puede dar lugar a materiales más compactos y densos, en línea con los tratamientos del presente estudio que alcanzan valores cercanos a 0.40–0.48 g/cm<sup>3</sup>.

Ferreira et al. (2020) reportaron densidades en el orden de  $0.18 \pm 0.01$  a  $0.20 \pm 0.01$  g/cm<sup>3</sup> para sus bandejas (almidón de yuca/bagazo de caña de azúcar), los cuales son valores inferiores y evidencian cómo distintas proporciones y tipos de residuos conducen a densidades sensiblemente distintas. Huertas et al. (2025) presentaron densidades entre 0.251–0.414 g/cm<sup>3</sup>, lo que coincide con los tratamientos intermedios ( $T7 \approx 0.42$  g/cm<sup>3</sup>), reforzando la idea de que la combinación almidón/fibra y la granulometría regulan la compactación final.

Las investigaciones sobre residuos con alto contenido lipídico o proteico (Machado et al., 2020; Machado et al., 2017) muestran que esos componentes alteran la movilidad de las cadenas de almidón y la capacidad de formación de celdas de aire; en consecuencia, la densidad puede aumentar si la matriz queda más compacta o disminuir si las fibras actúan como agentes nucleantes que generan mayor porosidad.

#### **Cuadro 17:**

*ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta densidad*

| Fuentes de variación | Suma de cuadrados | gl | Cuadrado medio | F      | p        |
|----------------------|-------------------|----|----------------|--------|----------|
| <b>Modelo</b>        | 0.0999            | 5  | 0.0200         | 73.56  | < 0.0001 |
| Mezcla lineal        | 0.0651            | 2  | 0.0326         | 119.88 | < 0.0001 |
| AB                   | 0.0094            | 1  | 0.0094         | 34.73  | 0.0002   |
| AC                   | 0.0097            | 1  | 0.0097         | 35.58  | 0.0002   |
| BC                   | 0.0094            | 1  | 0.0094         | 34.55  | 0.0002   |
| Error puro           | 0.0024            | 9  | 0.0003         |        |          |
| <b>Total</b>         | 0.1024            | 14 |                |        |          |

El ANOVA (Cuadro 17) evidenció que el modelo cuadrático para densidad resultó significativo ( $F = 73.56$ ;  $p < 0.0001$ ), confirmando que los factores y sus interacciones

influyen de manera estadísticamente relevante en la respuesta, con mínima contribución del error experimental.

**Cuadro 18:**

*Estadísticas de ajuste para la respuesta densidad*

| Parámetro               | Valor  |
|-------------------------|--------|
| Desv. Estándar          | 0.0165 |
| Promedio                | 0.3830 |
| C.V. %                  | 4.30   |
| R <sup>2</sup>          | 0.9761 |
| R <sup>2</sup> ajustado | 0.9628 |

Las estadísticas de ajuste (Cuadro 18) indican una adecuada precisión del modelo para la respuesta densidad, con un R<sup>2</sup> de 0.9761 y R<sup>2</sup> ajustado de 0.9628, lo que refleja una alta capacidad explicativa. El bajo coeficiente de variación (C.V. = 4.30%) y la desviación estándar reducida confirman la fiabilidad y precisión experimental.

**Cuadro 19:**

*Ecuación de la respuesta densidad*

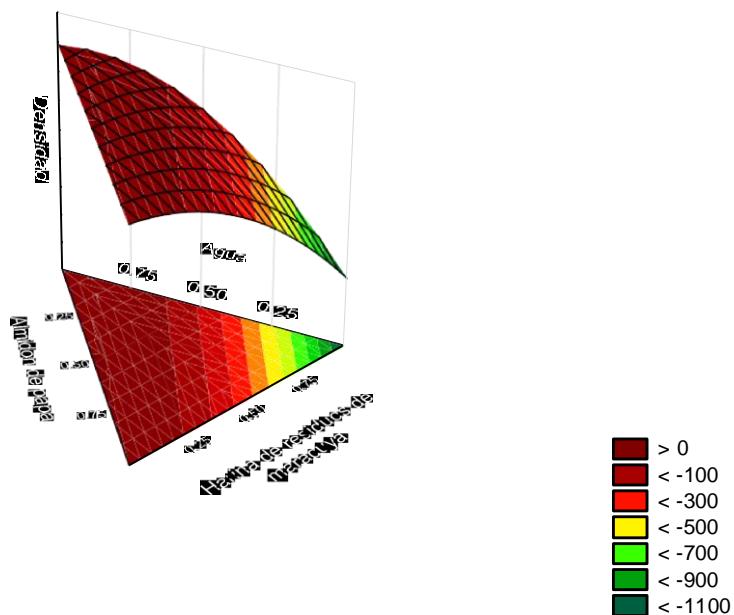
| Componente | Términos   |
|------------|--|
| Pseudo     | + 2.53A - 1264.00B - 23.93C + 1071.43AB + 43.45AC + 1646.87BC  |
| Real       | + 3.56 Almidón de papa - 34223.08 Harina de residuos de maracuyá - 737.19 Agua + 29679.40 Almidón de papa*Harina de residuos de maracuyá + 1203.55 Almidón de papa*Agua + 45619.79 Harina de residuos de maracuyá*Agua |

La ecuación obtenida (Cuadro 19) representa el modelo cuadrático para la densidad, expresado en términos codificados (A, B, C) y en términos reales (almidón de papa, harina de residuos de maracuyá y agua). Los coeficientes indican el efecto de cada factor y de sus interacciones, mostrando que la densidad depende tanto de los componentes individuales como de las combinaciones entre ellos.

**Figura 9:**

*Superficie 3D de la respuesta densidad*

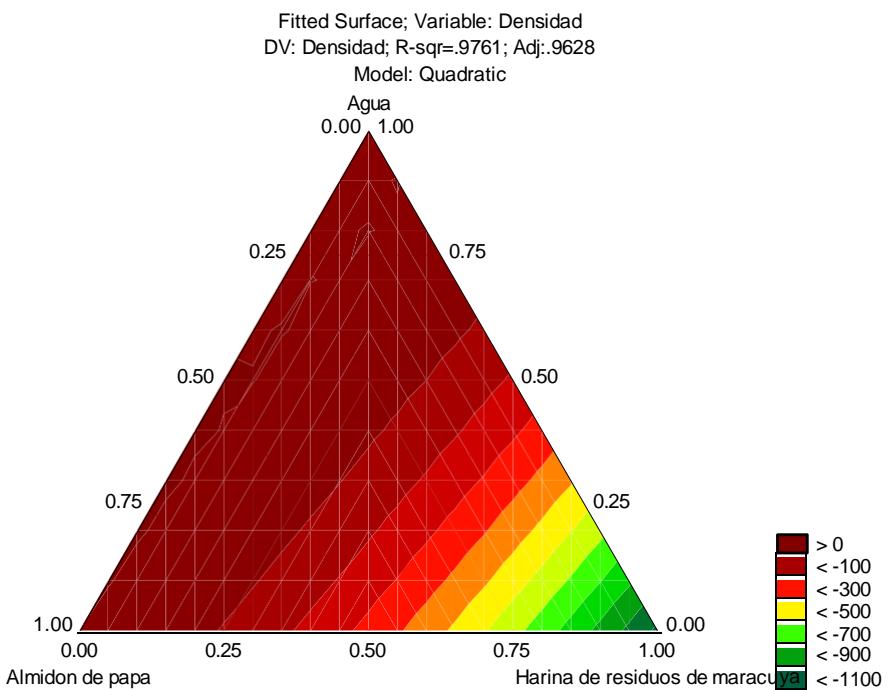
Fitted Surface; Variable: Densidad  
DV: Densidad; R-sqr=.9761; Adj:.9628  
Model: Quadratic



La superficie 3D (Figura 9) del modelo cuadrático ajustado ( $R^2 = 0.9761$ ;  $R^2_{aj} = 0.9628$ ) muestra la influencia conjunta del almidón de papa y la harina de cáscara de maracuyá sobre la densidad de las bandejas. Se observa que la densidad aumenta cuando se incrementa la proporción de harina de maracuyá, lo que evidencia una estructura más compacta y con menor porosidad. En cambio, a menores niveles de este ingrediente, la densidad disminuye, asociado a una mayor presencia de poros en la matriz. Esta tendencia confirma que la harina de maracuyá actúa como refuerzo, mejorando la compacidad del material.

**Figura 10:**

*Superficie de contorno de la respuesta densidad*



La Figura 10 presenta la superficie de contorno en el diagrama ternario para la variable densidad de las bandejas biodegradables. El modelo cuadrático obtenido mostró un ajuste adecuado ( $R^2 = 0.9761$ ;  $R^2_{aj} = 0.9628$ ). Se observa que la densidad aumenta conforme se incrementa la proporción de harina de residuos de maracuyá, mientras que las formulaciones con mayor contenido de almidón presentan valores menores. Este comportamiento evidencia que la fibra aporta mayor compacidad al material, incrementando su densidad.

#### - DETERMINACIÓN DEL ESPESOR

El espesor de las bandejas obtenidas en los quince tratamientos (Cuadro 16) mostró variaciones que van desde 2.01 mm (T10) hasta 2.73 mm (T14). Este comportamiento indica una dispersión moderada atribuible a las diferencias en la composición de las mezclas y a la consecuente respuesta de la matriz de almidón durante el proceso de termoformado. La relación entre formulación y espesor, puede apreciarse una tendencia

general a que las formulaciones con mayor porcentaje de fibra presenten espesores ligeramente mayores, aunque esta relación no es estrictamente lineal, lo que sugiere que factores adicionales (adhesión fibra–matriz, tamaño de partícula) modulan la respuesta final de la geometría de la bandeja.

Al confrontar estos valores con la literatura, se observa una coincidencia notable con lo reportado por Mello y Mali (2014), quienes registraron espesores cercanos a 2.16–2.24 mm en espumas horneadas de almidón de yuca con adición de bagazo de malta; varios tratamientos del presente trabajo ( $T_3 = 2.23$  mm,  $T_5 = 2.18$  mm,  $T_{11} = 2.18$  mm) quedan muy próximos a ese intervalo, lo que sugiere una respuesta de la matriz y de la microestructura semejante cuando la interacción almidón–fibra permite una expansión controlada. Por otro lado, Ferreira et al. (2020) documentaron espesores sustancialmente mayores (3.51–3.75 mm) en bandejas elaboradas con almidón de yuca y residuos agroindustriales (almidón de yuca/bagazo de caña de azúcar); la discrepancia con los valores del presente estudio puede atribuirse a la mayor proporción y/o naturaleza de los residuos utilizados en dicho trabajo, que favorecen estructuras más compactas y menor expansión relativa durante el horneado, traducida en espesores superiores. De manera intermedia, Huertas et al. (2025) reportaron espesores en un rango amplio (2.20–3.17 mm) para bandejas formuladas con almidón de semilla de *Poraqueiba sericea* y harina de tusa; varios tratamientos del presente estudio ( $T_{14} = 2.73$  mm;  $T_6 = 2.44$  mm) se ubican dentro de ese intervalo, lo que refuerza la idea de que la fuente de almidón y las características de la fibra condicionan la magnitud del espesor final. Finalmente, el trabajo de Aguirre et al. (2023) presenta valores de espesor (2.57 – 3.21 mm) para bandejas de almidón de yuca con harina de cáscara de maíz, lo que permite una comparación directa del tratamiento y confirma que, según la naturaleza y la proporción de la fibra, pueden observarse espesores similares o mayores a los obtenidos en el presente estudio.

La incorporación de porcentajes de fibra tiende a limitar la expansión térmica y el estiramiento de la matriz polimérica durante el procesamiento, propiciando paredes celulares más gruesas y, en consecuencia, espesores mayores cuando la fibra actúa como un refuerzo que impide la formación de una estructura altamente expandida (Ferreira et al., 2020; Aguirre et al., 2023). Sin embargo, este mismo efecto puede dar lugar a espesores menores o irregularidades cuando la interacción fibra–matriz es deficiente (por ejemplo, por baja adhesión interfacial, alto contenido lipofílico o partículas de gran

tamaño), pues se favorece la aparición de defectos, colapsos parciales o una distribución no homogénea de la masa durante la expansión (Machado et al., 2020). Más específicamente, la presencia de componentes lipídicos y proteicos en algunos residuos reduce la hidrofobicidad relativa y altera la movilidad de las cadenas de almidón, modificando la gelatinización y la formación de la red, hecho que puede tanto aumentar la rigidez de las paredes celulares como reducir la expansión global, según la proporción y el tipo de aditivo (Machado et al., 2020). De igual forma, la viscosidad inicial de la mezcla, el tamaño de partícula de la fibra y las condiciones operativas de termoformado (temperatura, tiempo, masa en molde) son factores determinantes de la expansión y, por ende, del espesor final, tal como lo indica Mello & Mali (2014) y Aguirre et al. (2023).

Aplicando estas explicaciones a los tratamientos evaluados, resulta coherente pensar que los tratamientos con mayor espesor (T14, T7, T15) incluyen combinaciones de formulación y/o características de partícula que restringen la expansión uniforme de la matriz, generando una estructura más densa o con paredes más gruesas, mientras que los tratamientos con menor espesor (T10, T9) probablemente correspondan a mezclas con mayor capacidad de expansión homogénea o con interacciones fibra-matriz menos efectivas, que dan lugar a paredes más finas o a zonificaciones donde la estructura sufrió colapso parcial (Machado et al., 2020; Aguirre et al., 2023).

**Cuadro 20:**

*ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta espesor*

| Fuentes de variación | Suma de cuadrados | gl | Cuadrado medio | F     | p        |
|----------------------|-------------------|----|----------------|-------|----------|
| <b>Modelo</b>        | 0.5538            | 5  | 0.1108         | 21.13 | < 0.0001 |
| Mezcla lineal        | 0.2552            | 2  | 0.1276         | 24.34 | 0.0002   |
| AB                   | 0.0405            | 1  | 0.0405         | 7.73  | 0.0214   |
| AC                   | 0.0461            | 1  | 0.0461         | 8.78  | 0.0159   |
| BC                   | 0.0411            | 1  | 0.0411         | 7.84  | 0.0207   |
| Error puro           | 0.0472            | 9  | 0.0052         |       |          |
| <b>Total</b>         | 0.6009            | 14 |                |       |          |

El ANOVA evidenció (Cuadro 20) que el modelo cuadrático para la respuesta espesor resultó significativo ( $F = 21.13$ ;  $p < 0.0001$ ), indicando que los factores influyen de manera estadísticamente relevante en la variación observada. Además, las interacciones

AB, AC y BC también fueron significativas ( $p < 0.05$ ), confirmando que el espesor depende tanto de los efectos principales como de la combinación entre componentes.

**Cuadro 21:**

*Estadísticas de ajuste para la respuesta espesor*

| Parámetro               | Valor  |
|-------------------------|--------|
| Desv. Estándar          | 0.0724 |
| Pomedio                 | 2.39   |
| C.V. %                  | 3.03   |
| R <sup>2</sup>          | 0.9215 |
| R <sup>2</sup> ajustado | 0.8779 |

Las estadísticas de ajuste (Cuadro 21) indican una alta precisión del modelo para la respuesta espesor, con un R<sup>2</sup> de 0.9215 y R<sup>2</sup> ajustado de 0.8779, lo que refleja una buena capacidad explicativa. El bajo coeficiente de variación (C.V. = 3.03%) y la desviación estándar reducida confirman la fiabilidad y precisión experimental.

**Cuadro 22:**

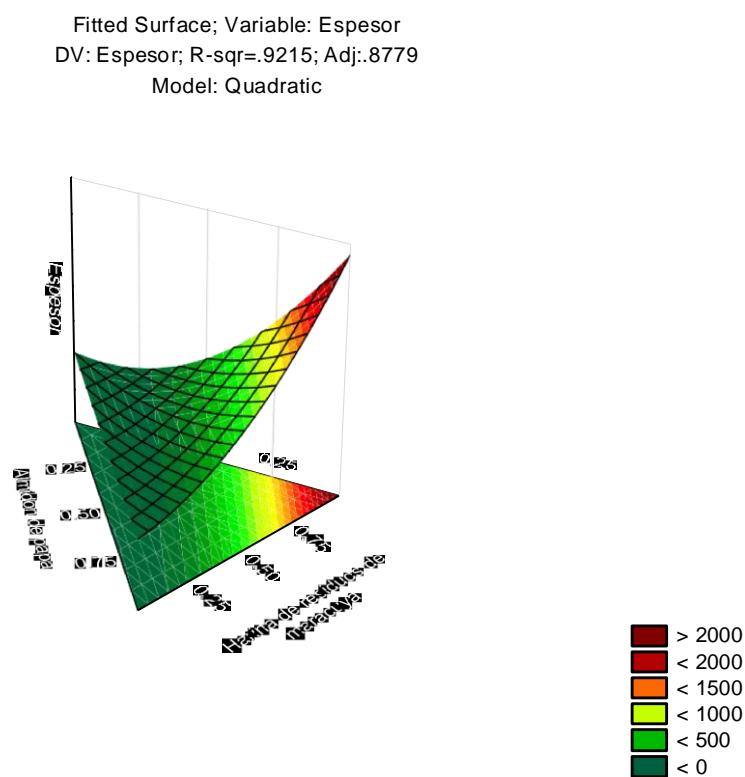
*Ecuación de la respuesta espesor*

| Componente | Términos  |
|------------|---|
| Pseudo     | - 2.42A + 2640.53B + 54.95C - 2221.13AB - 94.84AC - 3446.20BC   |
| Real       | + 5.50 Almidón de papa + 71353.84 Harina de residuos de maracuyá + 1586.02 Agua - 61527.02 Almidón de papa*Harina de residuos de maracuyá - 2627.03 Almidón de papa*Agua - 95462.54 Harina de residuos de maracuyá*Agua |

La ecuación obtenida (Cuadro 22) representa el modelo cuadrático para el espesor, expresado en términos codificados (A, B, C) y en términos reales (almidón de papa, harina de residuos de maracuyá y agua). Los coeficientes indican el efecto de cada factor y de sus interacciones, mostrando que el espesor depende tanto de los componentes individuales como de las combinaciones entre ellos.

**Figura 11:**

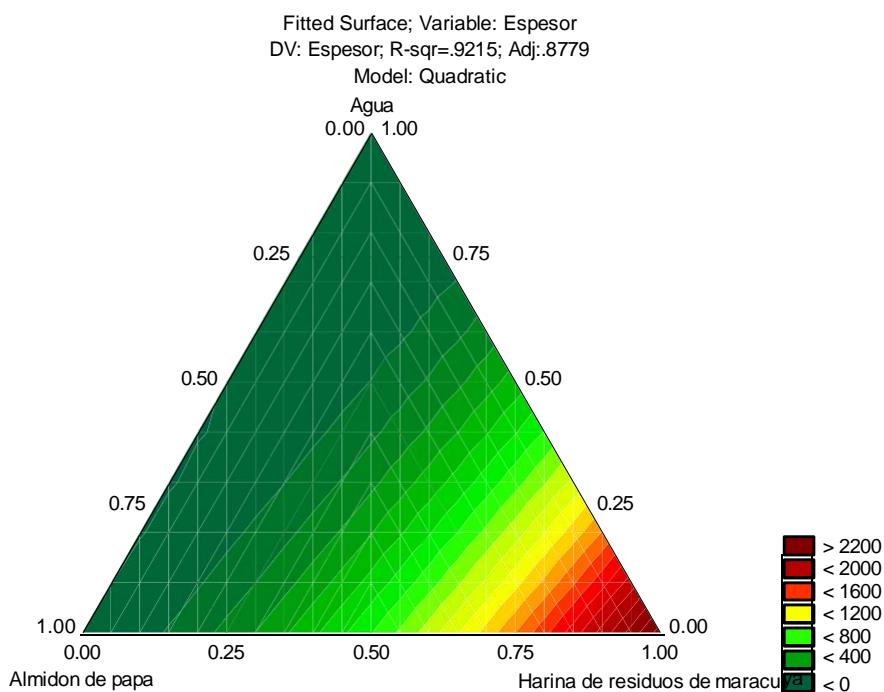
*Superficie 3D de la respuesta espesor*



La Figura 11 presenta la superficie de respuesta 3D para la variable espesor en bandejas biodegradables. El modelo cuadrático mostró un ajuste adecuado ( $R^2 = 0.9215$ ;  $R^2_{aj} = 0.8779$ ). Se observa que el espesor aumenta al incrementarse la proporción de harina de residuos de maracuyá, alcanzando valores máximos en formulaciones con alto contenido de fibra. En contraste, las mezclas con mayor cantidad de almidón presentaron espesores menores.

**Figura 12:**

*Superficie de contorno de la respuesta espesor*



La Figura 12 muestra la superficie de contorno en el diagrama ternario para la variable espesor de las bandejas biodegradables. El modelo cuadrático ajustado presentó un coeficiente de determinación adecuado ( $R^2 = 0.9215$ ;  $R^2_{aj} = 0.8779$ ), lo que indica un buen ajuste de los datos experimentales. Se observa que el espesor aumenta conforme incrementa la proporción de harina de residuos de maracuyá, alcanzando los valores más altos en las formulaciones con menor porcentaje de almidón.

#### - DETERMINACIÓN DE HUMEDAD

El contenido de humedad de las bandejas obtenidas en los quince tratamientos (Cuadro 16) varió entre 6.22 % en el T1 y 8.14 % en el T7, con un promedio de 7.18 %. La tendencia general muestra que, al incrementarse la proporción de fibra, la humedad residual tiende a elevarse, lo que sugiere que la matriz lignocelulósica favorece la retención de agua al limitar la desorción durante el horneado.

En comparación con lo reportado por Aguirre et al. (2023), quienes obtuvieron humedades en un rango de 5.65 % a 9.94 % en bandejas elaboradas con almidón de yuca y harina de cáscara de maíz, los resultados de la presente investigación se ubican dentro de la franja intermedia, mostrando coincidencia en que mayores proporciones de fibra conducen a un incremento en la retención hídrica.

Huertas et al. (2025) reportaron valores más bajos, de 3.85 % a 5.68 %, en bandejas de almidón de *Poraqueiba serícea* con harina de tusa, lo que evidencia cómo la naturaleza del almidón base y del residuo agregado puede disminuir la retención de agua final. Asimismo, Cruz-Tirado et al. (2019) documentaron humedades cercanas a 11–12 % en bandejas elaboradas con diferentes especies peruanas de almidón (arracacha, oca y camote), situándose por encima de lo encontrado en este trabajo y confirmando que la especie de almidón es un factor crítico.

### **Cuadro 23:**

*ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta humedad*

| <b>Fuentes de variación</b> | <b>Suma de cuadrados</b> | <b>gl</b> | <b>Cuadrado medio</b> | <b>F</b> | <b>p</b> |
|-----------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------|----------|
| <b>Modelo</b>               | 3.54                     | 5         | 0.7080                | 10.91    | 0.0013   |
| Mezcla lineal               | 1.67                     | 2         | 0.8354                | 12.87    | 0.0023   |
| AB                          | 0.3892                   | 1         | 0.3892                | 6.00     | 0.0368   |
| AC                          | 0.4317                   | 1         | 0.4317                | 6.65     | 0.0297   |
| BC                          | 0.3939                   | 1         | 0.3939                | 6.07     | 0.0359   |
| Error puro                  | 0.5841                   | 9         | 0.0649                |          |          |
| <b>Total</b>                | 4.12                     | 14        |                       |          |          |

El ANOVA mostró que el modelo cuadrático (Cuadro 23) para la respuesta humedad fue significativo ( $F = 10.91$ ;  $p = 0.0013$ ), lo que evidencia que los factores estudiados influyen de manera relevante en esta propiedad. Asimismo, las interacciones AB, AC y BC resultaron significativas ( $p < 0.05$ ), confirmando que la humedad depende tanto de los efectos individuales como de la combinación entre componentes.

**Cuadro 24:***Estadísticas de ajuste para la respuesta humedad*

| Parámetro               | Valor  |
|-------------------------|--------|
| Desv. Estándar          | 0.2547 |
| Promedio                | 7.18   |
| C.V. %                  | 3.55   |
| R <sup>2</sup>          | 0.8584 |
| R <sup>2</sup> ajustado | 0.7797 |

Las estadísticas de ajuste (Cuadro 24) indican que el modelo explica en buena medida la variabilidad de la humedad ( $R^2 = 0.8584$ ;  $R^2$  ajustado = 0.7797). El C.V. de 3.55% y la baja desviación estándar evidencian una adecuada precisión experimental, aunque con menor capacidad explicativa en comparación con otros modelos evaluados.

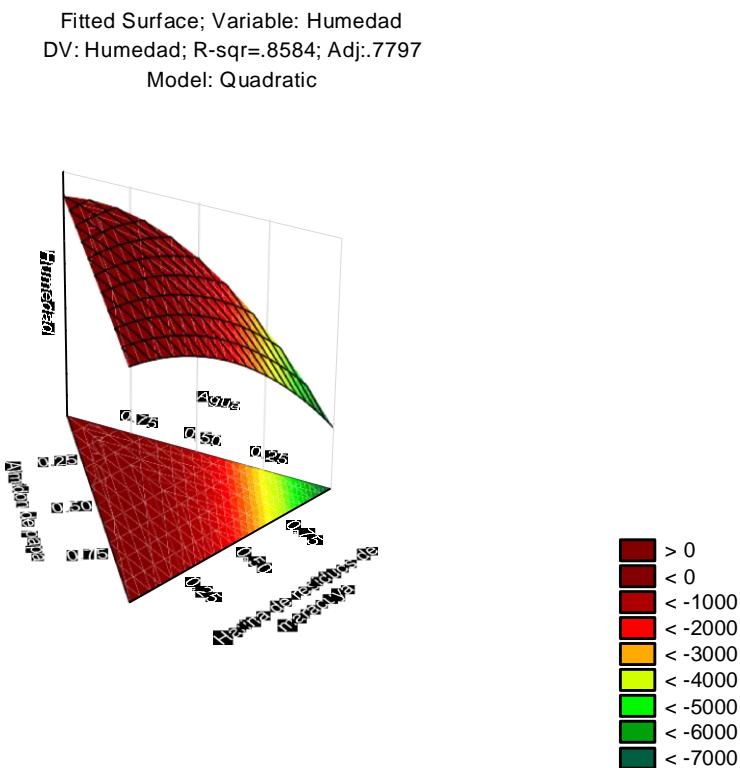
**Cuadro 25:***Ecuación de la respuesta humedad*

| Componente | Términos  |
|------------|---|
| Pseudo     | + 21.41A - 8155.08B - 154.81C + 6882.00AB + 290.38AC<br>+ 10668.43BC  |
| Real       | + 11.09 Almidón de papa - 2.20926E+05 Harina de residuos de maracuyá - 4870.58 Agua + 1.90637E+05 Almidón de papa*Harina de residuos de maracuyá + 8043.74 Almidón de papa*Agua + 2.95524E+05 Harina de residuos de maracuyá*Agua |

La ecuación obtenida (Cuadro 25) representa el modelo cuadrático para la humedad, expresado en términos codificados (A, B, C) y en términos reales (almidón de papa, harina de residuos de maracuyá y agua). Los coeficientes indican el efecto de cada factor y de sus interacciones, mostrando que la humedad depende tanto de los componentes individuales como de las combinaciones entre ellos.

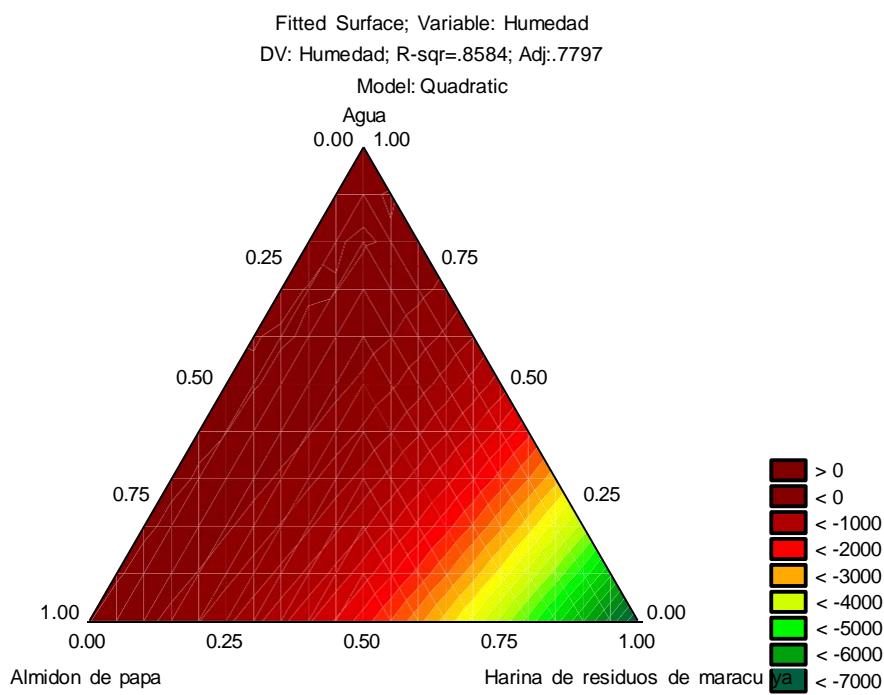
**Figura 13:**

*Superficie 3D de la respuesta humedad*



**Figura 14:**

*Superficie de contorno de la respuesta humedad*



La Figura 14 presenta la superficie de contorno en el diagrama ternario para la variable humedad de las bandejas biodegradables. El modelo cuadrático mostró un ajuste adecuado ( $R^2 = 0.8584$ ;  $R^2_{aj} = 0.7797$ ).

#### **- DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA**

Los valores de capacidad de absorción de agua obtenidos en las bandejas (Cuadro 16) variaron entre 35.62% y 68.86%. Esta variabilidad evidencia que la formulación influyó de manera directa en la interacción del material con el agua, lo cual puede atribuirse a las características estructurales de la matriz y a la composición química de la fibra incorporada. En general, se observa que el incremento de la fibra en la formulación genera dos efectos posibles, por un lado, cuando predominan fracciones de celulosa y hemicelulosa, la absorción de agua tiende a aumentar debido a la presencia de grupos hidroxilo con alta afinidad por el agua; mientras que, por otro lado, cuando la fibra presenta un mayor contenido de lignina y compuestos fenólicos, la capacidad de absorción puede disminuir, pues estos componentes reducen los sitios disponibles para

la interacción con el agua y favorecen la formación de estructuras más compactas. Este comportamiento ha sido señalado previamente por Machado et al. (2020) en espumas de almidón de yuca reforzadas con cascara de maní, donde observaron que las altas proporciones de compuestos lignificados redujeron la absorción de agua al limitar el acceso de las moléculas al interior de la matriz.

Asimismo, la porosidad y la densidad del material desempeñan un papel clave en esta propiedad. En formulaciones con menor densidad, la absorción de agua es mayor debido a la existencia de una mayor superficie interna y cavidades que permiten la retención del líquido. Cruz-Tirado et al. (2019), al evaluar bandejas elaboradas con diferentes almidones peruanos, reportaron capacidades de absorción superiores al 50% y relacionaron estos resultados con la baja densidad y alta porosidad de las estructuras. Los incrementos en la absorción de agua son atribuidos a la naturaleza hidrofílica de la fibra, lo que respalda la interpretación de que en las formulaciones con valores más altos observados en este estudio existió una mayor afinidad entre el almidón y los componentes polisacáridos de la fibra de maracuyá.

Machado et al. (2017), quienes al emplear torta de sésamo en espumas de almidón de yuca observaron reducciones en la absorción de agua, atribuibles a la formación de una estructura más densa y menos permeable.

De manera general, la tendencia observada confirma que la capacidad de absorción de agua en bandejas biodegradables no depende de manera lineal de la cantidad de fibra adicionada, sino de las características intrínsecas de la fibra y de la microestructura final del material. Esto coincide con lo expuesto por Aguirre et al. (2023), quienes al evaluar bandejas a base de almidón de yuca y harina de cascara de maíz, reportaron variaciones amplias en la absorción (52.17 – 102.35 %), demostrando que la interacción entre almidón, tipo de fibra y condiciones de procesamiento determina la magnitud de esta propiedad.

**Cuadro 26:***ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta capacidad de absorción de agua*

| Fuentes de variación | Suma de cuadrados | gl | Cuadrado medio | F     | p        |
|----------------------|-------------------|----|----------------|-------|----------|
| <b>Modelo</b>        | 1926.49           | 5  | 385.30         | 49.72 | < 0.0001 |
| Mezcla lineal        | 1350.55           | 2  | 675.28         | 87.14 | < 0.0001 |
| AB                   | 107.46            | 1  | 107.46         | 13.87 | 0.0047   |
| AC                   | 124.29            | 1  | 124.29         | 16.04 | 0.0031   |
| BC                   | 110.24            | 1  | 110.24         | 14.23 | 0.0044   |
| Error puro           | 69.74             | 9  | 7.75           |       |          |
| <b>Total</b>         | 1996.24           | 14 |                |       |          |

El ANOVA indicó que el modelo cuadrático (Cuadro 26) para la capacidad de absorción de agua fue altamente significativo ( $F = 49.72$ ;  $p < 0.0001$ ), evidenciando que los factores analizados explican gran parte de la variabilidad. De igual modo, las interacciones AB, AC y BC resultaron significativas ( $p < 0.01$ ), lo que confirma que esta propiedad depende tanto de los efectos principales como de la combinación entre componentes.

**Cuadro 27:***Estadísticas de ajuste para la respuesta capacidad de absorción de agua*

| Parámetro      | Valor  |
|----------------|--------|
| Desv. Estándar | 2.78   |
| Promedio       | 55.46  |
| C.V. %         | 5.02   |
| $R^2$          | 0.9651 |
| $R^2$ ajustado | 0.9457 |

Las estadísticas de ajuste (Cuadro 27) muestran que el modelo presenta un buen nivel de precisión, con  $R^2 = 0.9651$  y  $R^2$  ajustado = 0.9457, lo que refleja una alta capacidad explicativa. El bajo coeficiente de variación (C.V. = 5.02%) y la desviación estándar reducida confirman la consistencia y confiabilidad de los resultados obtenidos.

**Cuadro 28:**

*Ecuación de la respuesta capacidad de absorción de agua*

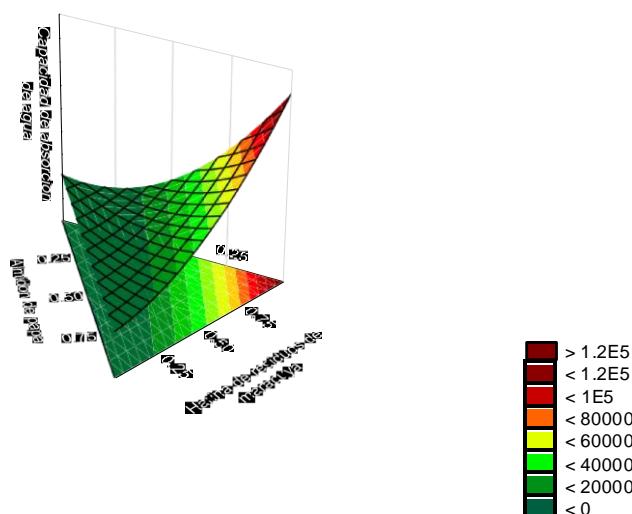
| Componente | Términos  |
|------------|---|
| Pseudo     | - 192.92A + 1.362E+05B + 2824.57C - 1.143E+05AB - 4926.90AC - 1.785E+05BC   |
| Real       | - 138.95 Almidón de papa + 3.68575E+06 Harina de residuos de maracuyá + 82700.44 Agua - 3.16752E+06 Almidón de papa*Harina de residuos de maracuyá - 1.36479E+05 Almidón de papa*Agua - 4.94383E+06 Harina de residuos de maracuyá*Agua |

La ecuación obtenida (Cuadro 28) representa el modelo cuadrático para la capacidad de absorción de agua (CAA), expresado en términos codificados (A, B, C) y en términos reales (almidón de papa, harina de residuos de maracuyá y agua). Los coeficientes indican el efecto de cada factor y de sus interacciones, mostrando que la CAA depende tanto de los componentes individuales como de las combinaciones entre ellos.

**Figura 15:**

*Superficie 3D de la respuesta capacidad de absorción de agua*

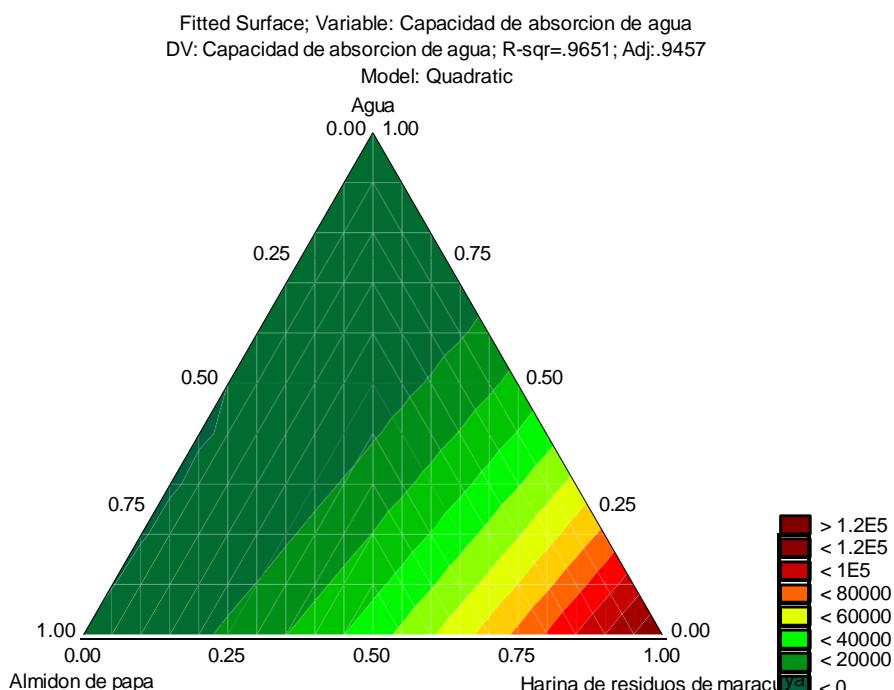
Fitted Surface; Variable: Capacidad de absorcion de agua  
DV: Capacidad de absorcion de agua; R-sqr=.9651; Adj:.9457  
Model: Quadratic



La Figura 15 presenta la superficie de respuesta 3D para la variable capacidad de absorción de agua. El modelo cuadrático mostró un ajuste adecuado ( $R^2 = 0.9651$ ;  $R^2_{aj} = 0.9457$ ). Se observa que el % CAA disminuye conforme se incrementa la proporción de harina de residuos de maracuyá, alcanzando los valores más bajos en las formulaciones con mayor contenido de este componente y menor presencia de almidón de papa. Este comportamiento evidencia que la harina de maracuyá reduce el %CAA.

**Figura 16:**

*Superficie de contorno de la respuesta capacidad de absorción de agua*



La Figura 16 muestra la superficie de contorno en el diagrama ternario para la variable capacidad de absorción de agua (CAA). El modelo cuadrático ajustado presentó un coeficiente de determinación adecuado ( $R^2 = 0.9651$ ;  $R^2_{aj} = 0.9457$ ), lo que evidencia un buen ajuste de los datos experimentales.

**Cuadro 29:***Restricciones del procedimiento de optimización numérica*

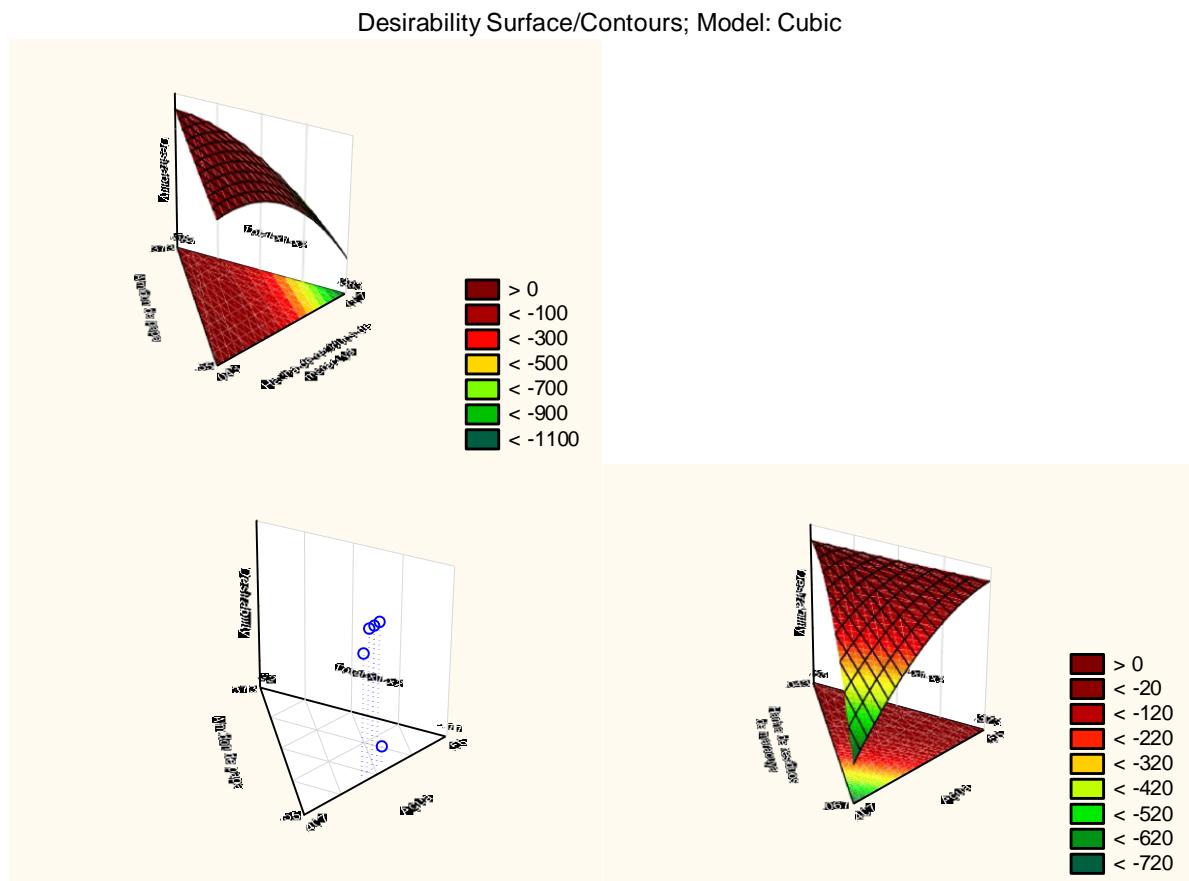
| Factor/Respuesta                  | Objetivo  | LI    | LS    | PI | PS | Importancia |
|-----------------------------------|-----------|-------|-------|----|----|-------------|
| A: Almidón de papa                | en rango  | 0.37  | 0.55  | 1  | 1  | 3           |
| B: Harina de residuos de maracuyá | en rango  | 0.04  | 0.07  | 1  | 1  | 3           |
| C: Agua                           | en rango  | 0.40  | 0.56  | 1  | 1  | 3           |
| Dureza                            | maximizar | 47.46 | 90.71 | 1  | 1  | 3           |
| Fracturabilidad                   | en rango  | 1.88  | 3.29  | 1  | 1  | 3           |
| L                                 | ninguno   | 57.31 | 72.15 | 1  | 1  | 3           |
| a                                 | ninguno   | 1.43  | 3.26  | 1  | 1  | 3           |
| b                                 | ninguno   | 11.44 | 16.78 | 1  | 1  | 3           |
| Densidad                          | ninguno   | 0.21  | 0.48  | 1  | 1  | 3           |
| Espesor                           | ninguno   | 2.01  | 2.73  | 1  | 1  | 3           |
| Humedad                           | ninguno   | 6.22  | 8.14  | 1  | 1  | 3           |
| Capacidad de absorción de agua    | ninguno   | 35.62 | 68.86 | 1  | 1  | 3           |
| Resistencia a la tracción         | en rango  | 2.21  | 4.11  | 1  | 1  | 3           |
| Elongación                        | ninguno   | 1.45  | 2.25  | 1  | 1  | 3           |

Nota. LI: Límite inferior. LS: Límite superior. PI: Peso inferior. PS: Peso superior.

Con las restricciones del procedimiento de optimización numérica se determinó que las condiciones óptimas eran 45.1% de almidón de papa, 5.3% de harina de residuos de maracuyá y 49.7% de agua (deseabilidad igual a 1.00). Y, en peso seco, 89.5% de almidón de papa y 10.5% de harina de residuos de maracuyá.

**Figura 17:**

*Superficie 3D de deseabilidad*



La Figura 17 muestra las superficies de contorno y 3D de la función de deseabilidad global (D) para la optimización multivariable en la formulación de bandejas biodegradables con almidón de papa residual, harina de cáscaras de maracuyá y agua. El modelo cúbico ajustado presentó un buen ajuste a los datos experimentales, evidenciado por los gradientes continuos y regiones óptimas bien definidas en los paneles. Los contornos revelan un máximo de deseabilidad ( $D \approx 0.8-1.0$ ) en proporciones intermedias de X1 (almidón de papa residual), X2 (harina de residuos de maracuyá) y X3 (agua destilada), con zonas rojas indicando condiciones subóptimas ( $D < 0.2$ )

#### 4.4. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS BANDEJAS BIODEGRADABLES

##### - ANÁLISIS DE DUREZA Y FRACTURABILIDAD

Los resultados de los análisis de dureza y fracturabilidad. (z) permitieron analizar el comportamiento mecánico de las bandejas biodegradables. Se observó que los tratamientos alcanzaron picos de fuerza entre aproximadamente 6 y 11 kg antes de la

fractura, lo que evidencia diferencias en la dureza según la formulación empleada. La dureza de las bandejas evaluadas en los 15 tratamientos (Cuadro 30) osciló entre 47,46 N (T14) y 90,71 N (T10). Observándose un patrón claro, los tratamientos con baja adición de harina de residuos de maracuyá (T1, T2, T8-T11) presentaron valores altos de dureza (79–91 N), mientras que las formulaciones con mayor aporte de harina (T7, T13 -T15) se situaron en un rango más bajo (47.5 – 54.9 N). Los resultados muestran una tendencia decreciente de la dureza al aumentar el porcentaje de harina, lo cual sugiere que la incorporación de partículas de harina interrumpe la continuidad de la matriz gelatinizada del almidón, disminuyendo la resistencia a la compresión inicial. Los tratamientos con mayor contenido de almidón presentaron valores más elevados de resistencia máxima, lo cual coincide con lo reportado por Cazón et al. (2017), quienes señalan que matrices ricas en almidón tienden a formar estructuras más cohesivas debido a la gelatinización y retrogradación de sus cadenas.

La fracturabilidad en los tratamientos (Cuadro 30) varió entre 1,88 mm (T8) y 3,29 mm (T14). Observamos que las formulaciones con mayor dureza (control y bajos porcentajes de harina) se fracturan a desplazamientos menores (menor fracturabilidad), mientras que las formulaciones con mayor contenido de harina de maracuyá toleran desplazamientos mayores antes de la ruptura, lo que indica una mayor capacidad de deformación antes del pico de ruptura. Este comportamiento puede atribuirse al alto contenido de fibra insoluble de la cáscara de maracuyá, que actúa como un agente de refuerzo rígido, pero con poca capacidad de cohesión con la matriz amilácea (Hernández et al., 2020). En consecuencia, aunque la fibra contribuye a mejorar la biodegradabilidad, puede generar discontinuidades que reducen la uniformidad de la matriz y, por ende, su resistencia mecánica.

Asimismo, se observó que algunos tratamientos presentaron un patrón de fractura frágil, con descensos abruptos tras alcanzar la máxima fuerza, mientras que otros mostraron un comportamiento más dúctil, con una caída progresiva. Según Jiménez et al. (2019), este tipo de variaciones depende de la interacción entre el almidón y los componentes lignocelulósicos de la fibra, así como de la distribución del agua en la mezcla, que actúa como plastificante natural.

Comparando los resultados con investigaciones previas, Pereda et al. (2011) demostraron que la adición de fibras vegetales en biopolímeros de almidón puede mejorar la rigidez, pero disminuir la resistencia a la fractura si no existe una adecuada compatibilidad entre

fases. Esto coincide con los tratamientos (figura 18) en los que la harina de maracuyá en niveles elevados redujo la resistencia máxima, confirmando que se requiere un balance óptimo en la proporción de almidón y fibra para obtener materiales con buenas propiedades mecánicas.

Este hallazgo es relevante para la optimización de bandejas biodegradables, ya que indica la necesidad de ajustar las proporciones de ambos componentes para lograr un material con resistencia adecuada y a la vez con ventajas en biodegradabilidad.

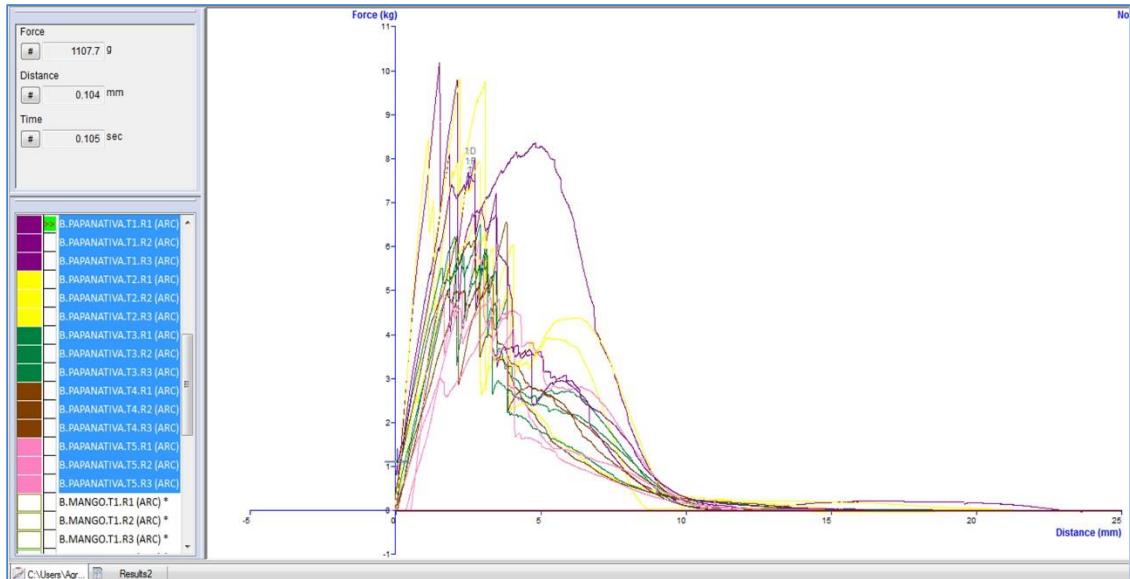
**Cuadro 30:**

*Promedios de las propiedades mecánicas de las bandejas biodegradables*

| Formulación | Dureza<br>(N) | Fracturabilidad<br>(mm) | Resistencia a<br>la tracción<br>(Mpa) | Elongación<br>(%) |
|-------------|---------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| 1           | 84.63         | 2.14                    | 4.11                                  | 1.73              |
| 2           | 90.13         | 1.99                    | 3.73                                  | 1.94              |
| 3           | 57.86         | 2.42                    | 3.10                                  | 1.83              |
| 4           | 63.84         | 2.64                    | 3.04                                  | 2.11              |
| 5           | 56.09         | 2.71                    | 2.68                                  | 2.11              |
| 6           | 61.33         | 3.25                    | 3.30                                  | 2.25              |
| 7           | 50.66         | 3.20                    | 2.82                                  | 1.79              |
| 8           | 79.43         | 1.88                    | 3.61                                  | 2.00              |
| 9           | 84.53         | 2.76                    | 3.83                                  | 2.19              |
| 10          | 90.71         | 2.83                    | 3.50                                  | 1.89              |
| 11          | 81.40         | 2.51                    | 2.84                                  | 1.63              |
| 12          | 60.10         | 2.93                    | 3.14                                  | 1.93              |
| 13          | 54.90         | 3.16                    | 2.62                                  | 1.86              |
| 14          | 47.46         | 3.29                    | 2.21                                  | 1.45              |
| 15          | 52.41         | 2.99                    | 2.94                                  | 1.85              |

**Figura 18:**

Gráficas de fuerza y distancia aplicada en los análisis de dureza y fracturabilidad.



**Cuadro 31:**

ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta dureza

| Fuentes de variación | de | Suma de cuadrados | gl        | Cuadrado medio | F      | p        |
|----------------------|----|-------------------|-----------|----------------|--------|----------|
| Modelo               |    | 3242.78           | 5         | 648.56         | 45.86  | < 0.0001 |
| Mezcla lineal        |    | 2934.58           | 2         | 1467.29        | 103.74 | < 0.0001 |
| AB                   |    | 18.79             | 1         | 18.79          | 1.33   | 0.2787   |
| AC                   |    | 16.96             | 1         | 16.96          | 1.20   | 0.3019   |
| BC                   |    | 18.87             | 1         | 18.87          | 1.33   | 0.2778   |
| Error puro           |    | 127.29            | 9         | 14.14          |        |          |
| <b>Total</b>         |    | <b>3370.07</b>    | <b>14</b> |                |        |          |

El ANOVA indica que el modelo cuadrático (Cuadro 31) para la dureza fue altamente significativo ( $F = 45.86$ ;  $p < 0.0001$ ), evidenciando que los factores evaluados explican gran parte de la variabilidad de esta respuesta. Sin embargo, las interacciones AB, AC y BC no resultaron significativas ( $p > 0.05$ ).

**Cuadro 32:***Estadísticas de ajuste para la respuesta dureza*

| Parámetro               | Valor  |
|-------------------------|--------|
| Desv. Estándar          | 3.76   |
| Pomedio                 | 67.70  |
| C.V. %                  | 5.56   |
| R <sup>2</sup>          | 0.9622 |
| R <sup>2</sup> ajustado | 0.9412 |

Las estadísticas de ajuste (Cuadro 32) muestran un modelo con buena precisión, con R<sup>2</sup> = 0.9622 y R<sup>2</sup> ajustado = 0.9412, indicando alta capacidad explicativa. El coeficiente de variación (C.V. = 5.56%) y la desviación estándar reducida reflejan consistencia y confiabilidad en los resultados obtenidos.

**Cuadro 33:***Ecuación de la respuesta dureza*

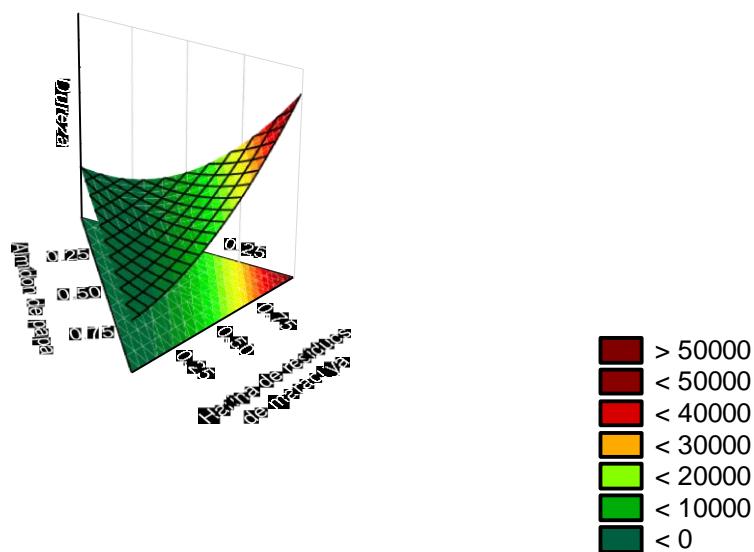
| Componente          | Términos  |
|---------------------|---|
| Pseudo <sup>1</sup> | - 31.35A + 57146.40B + 1071.74C - 47819.97AB - 1820.25AC<br>- 73839.16BC  |
| Real <sup>2</sup>   | - 1029.86 Almidón de papa + 1.53503E+06 Harina de residuos de maracuyá + 32093.36 Agua - 1.32465E+06 Almidón de papa*Harina de residuos de maracuyá - 50422.48 Almidón de papa*Agua - 2.04541E+06 Harina de residuos de maracuyá*Agua |

La ecuación obtenida (Cuadro 33) representa el modelo cuadrático para la dureza, expresado en términos codificados (A, B, C) y reales (almidón de papa, harina de residuos de maracuyá y agua). Los coeficientes muestran que la dureza depende principalmente de los efectos individuales de los componentes, mientras que las interacciones entre ellos no ejercen un impacto significativo sobre esta propiedad.

**Figura 19:**

*Superficie 3D de la respuesta dureza*

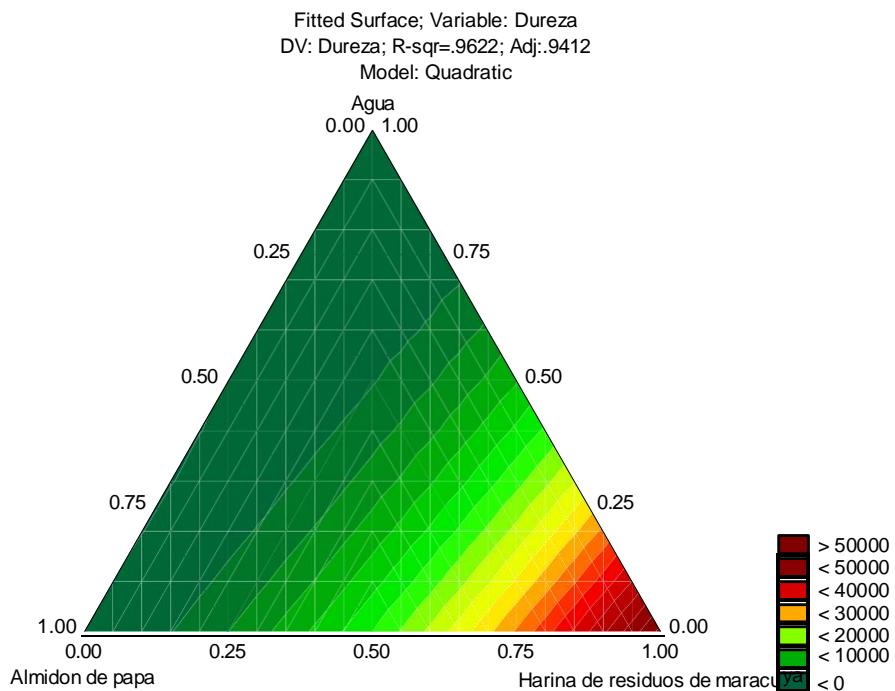
Fitted Surface; Variable: Dureza  
DV: Dureza; R-sqr=.9622; Adj:.9412  
Model: Quadratic



La Figura 19 presenta la superficie de respuesta 3D para la variable dureza. El modelo cuadrático mostró un ajuste adecuado ( $R^2 = 0.9622$ ;  $R^2_{aj} = 0.9412$ ).

**Figura 20:**

*Superficie de contorno de la respuesta dureza*



La Figura 20 muestra la superficie de contorno en el diagrama ternario para la variable dureza. El modelo cuadrático ajustado presentó un coeficiente de determinación adecuado ( $R^2 = 0.9622$ ;  $R^2_{aj} = 0.9412$ ), lo que evidencia un buen ajuste de los datos experimentales.

**Cuadro 34:**

*ANOVA para el modelo cuadrático de la respuesta fracturabilidad*

| Fuentes de variación | Suma de cuadrados | gl | Cuadrado medio | F     | p        |
|----------------------|-------------------|----|----------------|-------|----------|
| <b>Modelo</b>        | 2.64              | 5  | 0.5275         | 19.94 | 0.0001   |
| Mezcla lineal        | 2.15              | 2  | 1.07           | 40.57 | < 0.0001 |
| AB                   | 0.1481            | 1  | 0.1481         | 5.60  | 0.0422   |
| AC                   | 0.1494            | 1  | 0.1494         | 5.65  | 0.0415   |
| BC                   | 0.1470            | 1  | 0.1470         | 5.56  | 0.0428   |
| Error puro           | 0.2381            | 9  | 0.0265         |       |          |
| <b>Total</b>         | 2.88              | 14 |                |       |          |

El ANOVA indica que el modelo cuadrático (Cuadro 34) para la fracturabilidad fue altamente significativo ( $F = 19.94$ ;  $p = 0.0001$ ), mostrando que los factores evaluados explican gran parte de la variabilidad de esta propiedad. Además, las interacciones AB, AC y BC resultaron significativas ( $p < 0.05$ ), lo que evidencia que la fracturabilidad depende tanto de los efectos individuales de los componentes como de las combinaciones entre ellos.

### **Cuadro 35:**

*Estadísticas de ajuste para la respuesta fracturabilidad*

| <b>Parámetro</b> | <b>Valor</b> |
|------------------|--------------|
| Desv. Estándar   | 0.1626       |
| Pomedio          | 2.71         |
| C.V. %           | 5.99         |
| $R^2$            | 0.9172       |
| $R^2$ ajustado   | 0.8712       |

Las estadísticas de ajuste (Cuadro 35) reflejan un modelo confiable, con  $R^2 = 0.9172$  y  $R^2$  ajustado = 0.8712, lo que indica una buena capacidad explicativa. El bajo coeficiente de variación (C.V. = 5.99%) y la desviación estándar reducida confirman la consistencia de los datos obtenidos.

### **Cuadro 36:**

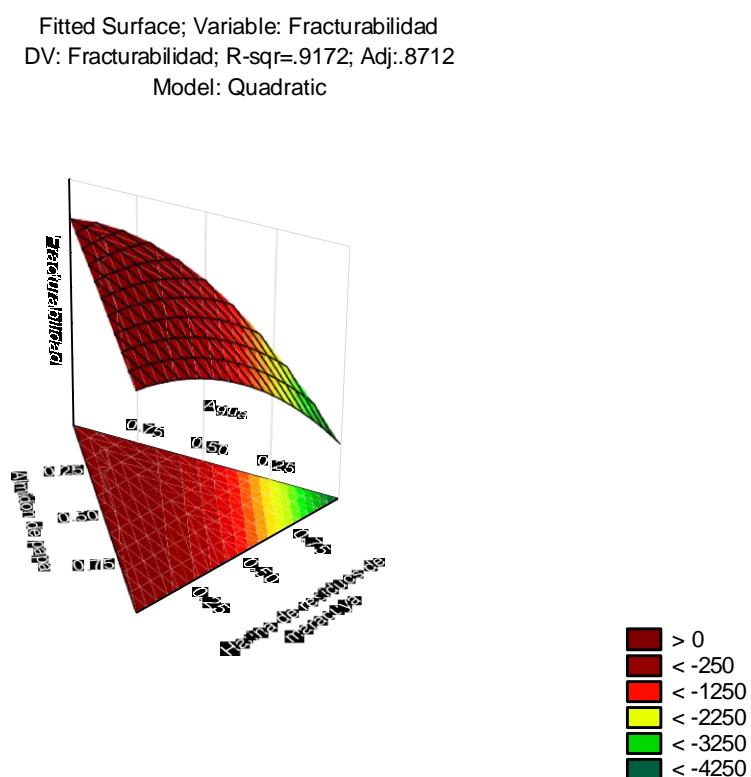
*Ecuación de la respuesta fracturabilidad*

| <b>Componente</b> | <b>Términos</b>  |
|-------------------|--|
| Pseudo            | + 11.04A - 4999.59B - 93.34C + 4244.82AB + 170.83AC + 6517.04BC  |
| Real              | +18.50 Almidón de papa - 1.35474E+05 Harina de residuos de maracuyá - 2906.63 Agua + 1.17585E+05 Almidón de papa*Harina de residuos de maracuyá + 4732.00 Almidón de papa*Agua + 1.80527E+05 Harina de residuos de maracuyá*Agua |

La ecuación obtenida (Cuadro 36) representa el modelo cuadrático para la fracturabilidad, expresado en términos codificados (A, B, C) y reales (almidón de papa, harina de residuos de maracuyá y agua). Los coeficientes muestran que la fracturabilidad depende tanto de los efectos principales como de las interacciones entre los componentes, destacando la relevancia de las combinaciones AB, AC y BC en esta propiedad.

Figura 21:

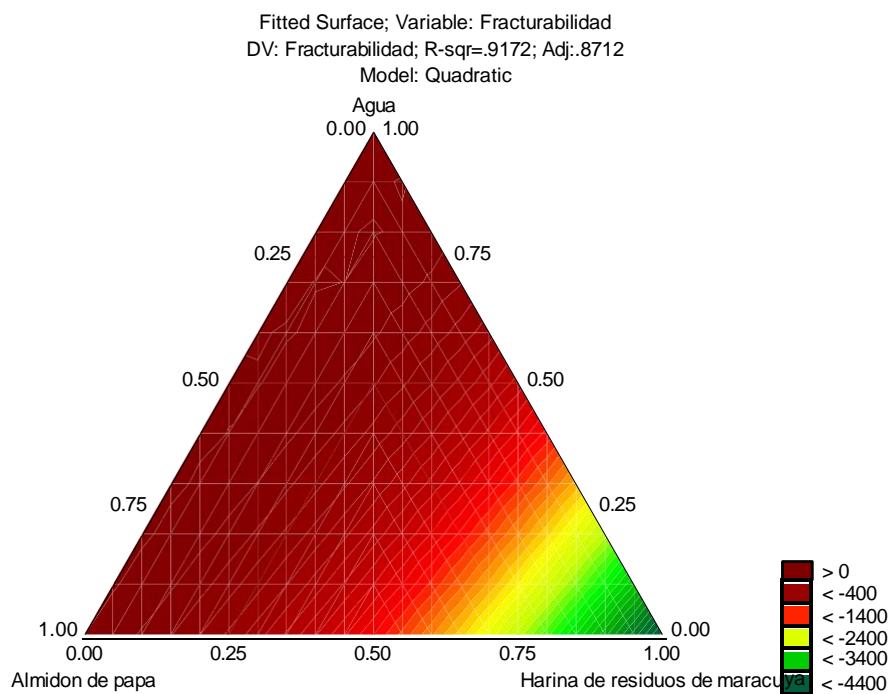
### *Superficie 3D de la respuesta fracturabilidad*



La Figura 21 presenta la superficie de respuesta 3D para la variable Fracturabilidad. El modelo cuadrático mostró un ajuste adecuado ( $R^2 = 0.9172$ ;  $R^2_{aj} = 0.8712$ ).

**Figura 22:**

*Superficie de contorno de la respuesta fracturabilidad*



La Figura 22 muestra la superficie de contorno en el diagrama ternario para la variable fracturabilidad. El modelo cuadrático ajustado presentó un coeficiente de determinación adecuado ( $R^2 = 0.9172$ ;  $R^2_{aj} = 0.8712$ ), lo que evidencia un buen ajuste de los datos experimentales.

#### - ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y ELONGACIÓN

Los resultados de los análisis de resistencia y elongación (Figura 23) permitieron evidenciar el comportamiento de resistencia máxima (fuerza de ruptura) y la elongación (distancia hasta la fractura) de las bandejas biodegradables. Los tratamientos evaluados alcanzaron fuerzas entre 15 y 30 N antes de la fractura, lo que indica una resistencia mecánica aceptable para aplicaciones de envasado ligero. En particular, el control presentó valores de resistencia superiores, lo cual es atribuible a su mayor homogeneidad estructural, mientras que los tratamientos con harina de cáscara de maracuyá mostraron una disminución relativa en la resistencia máxima. Este comportamiento coincide con lo reportado por Souza et al. (2020), quienes encontraron que la incorporación de fibras

vegetales puede reducir la cohesión de la matriz amilácea, incrementando la rigidez, pero disminuyendo la resistencia a la tensión.

En términos de elongación, los tratamientos mostraron distancias de ruptura que oscilaron entre 1.45 y 2.25 mm (Cuadro 30). Esto indica que las bandejas elaboradas con mayor porcentaje de almidón, poseen mayor capacidad de deformación antes de fracturarse, mientras que las que incluyen mayores porcentajes de harina de maracuyá tienden a ser más frágiles. Resultados similares fueron encontrados por Ochoa-Yepes et al. (2019), quienes observaron que la adición de fibra dietética en biopolímeros de almidón aumenta la rigidez estructural, pero reduce la elasticidad de los materiales.

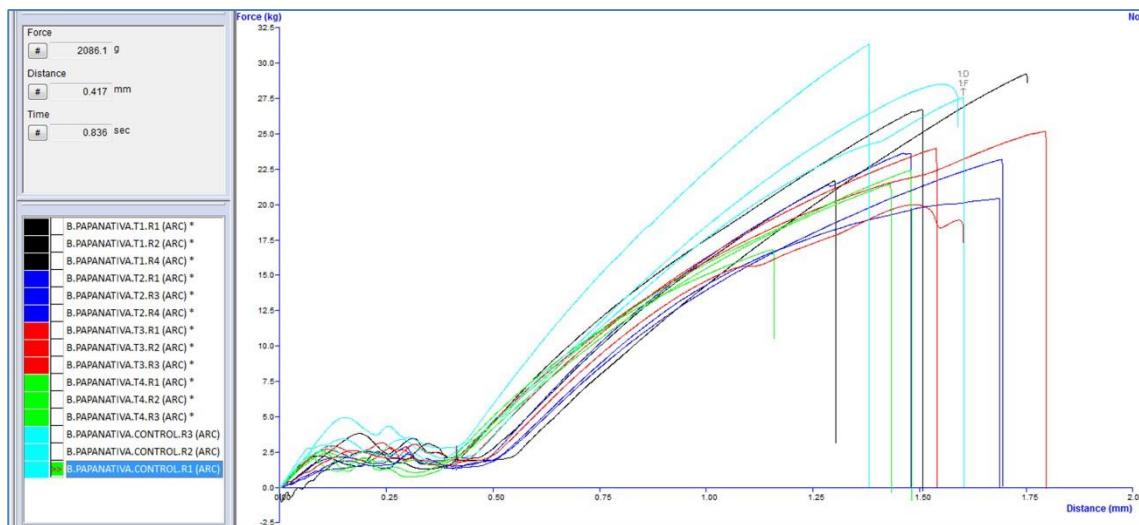
Asimismo, se aprecia que algunos tratamientos con niveles intermedios de harina de maracuyá lograron un equilibrio entre resistencia y elongación, lo que sugiere una interacción favorable entre la matriz de almidón y las fibras vegetales. En este sentido, la fibra no solo actúa como relleno estructural, sino también como fase de refuerzo que puede mejorar la estabilidad térmica y la rigidez, aunque comprometiendo parcialmente la flexibilidad (Shafiei et al., 2021).

De manera general, la tendencia observada confirma que la mayor proporción de almidón favorece la resistencia y elongación, mientras que el incremento de la harina de maracuyá mejora la rigidez, pero limita la deformación. Esto es coherente con los hallazgos de Müller et al. (2022), quienes concluyen que para obtener biopolímeros con propiedades balanceadas se requiere optimizar la proporción de almidón y fibra, junto con la adición de plastificantes que aumenten la ductilidad.

En conjunto, los resultados sugieren que la combinación adecuada de almidón residual y harina de maracuyá permite formular bandejas con propiedades mecánicas competitivas frente a envases biodegradables comerciales. Sin embargo, el ajuste en la proporción de los componentes es crítico para lograr un equilibrio entre resistencia, rigidez y elongación, lo cual es indispensable para garantizar la funcionalidad del material en aplicaciones de envasado.

**Figura 23:**

Gráficas de fuerza y distancia aplicada en los análisis de resistencia a la tracción y elongación



**Cuadro 37 :**

ANOVA para el modelo lineal de la respuesta resistencia a la tracción

| Fuentes de variación | Suma de cuadrados | gl | Cuadrado medio | F      | p      |
|----------------------|-------------------|----|----------------|--------|--------|
| <b>Modelo</b>        | 2.30              | 2  | 1.15           | 9.54   | 0.0033 |
| Mezcla lineal        | 2.30              | 2  | 1.15           | 9.54   | 0.0033 |
| Residual             | 1.44              | 12 | 0.1202         |        |        |
| Falta de ajuste      | 0.1533            | 3  | 0.0511         | 0.3567 | 0.7857 |
| Error puro           | 1.29              | 9  | 0.1433         |        |        |
| <b>Total</b>         | 3.74              | 14 |                |        |        |

El ANOVA (Cuadro 37) muestra que el modelo lineal para la resistencia a la tracción fue significativo ( $F = 9.54$ ;  $p = 0.0033$ ), indicando que los factores principales influyen en esta propiedad. La falta de ajuste no fue significativa ( $p = 0.7857$ ), lo que confirma que el modelo lineal describe adecuadamente la variabilidad observada sin desviaciones importantes.

**Cuadro 38:***Estadísticas de ajuste para la respuesta resistencia a la tracción*

| Parámetro               | Valor  |
|-------------------------|--------|
| Desv. Estándar          | 0.3468 |
| Promedio                | 3.16   |
| C.V. %                  | 10.96  |
| R <sup>2</sup>          | 0.6140 |
| R <sup>2</sup> ajustado | 0.5497 |

Las estadísticas de ajuste (Cuadro 38) reflejan un modelo con capacidad explicativa moderada, con  $R^2 = 0.6140$  y  $R^2$  ajustado = 0.5497. El coeficiente de variación relativamente alto (C.V. = 10.96%) indica mayor dispersión en los datos, aunque la desviación estándar permanece dentro de un rango aceptable para este tipo de análisis.

**Cuadro 39:***Ecuación de la respuesta resistencia a la tracción*

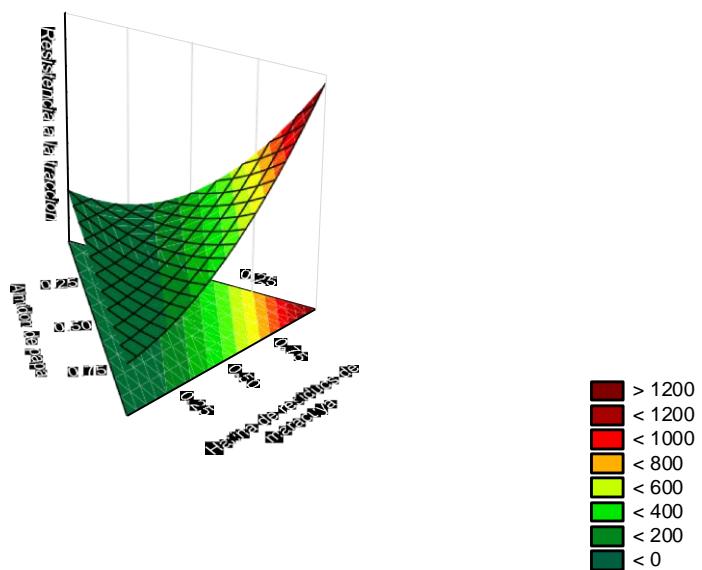
| Componente | Términos  |
|------------|---|
| Pseudo     | + 3.83A + 5.32B + 2.26C   |
| Real       | + 6.81 Almidón de papa + 14.66 Harina de residuos de maracuyá - 1.43 Agua |

La ecuación obtenida (Cuadro 39) representa el modelo lineal para la resistencia a la tracción, expresado en términos codificados (A, B, C) y reales (almidón de papa, harina de residuos de maracuyá y agua). Los coeficientes muestran que esta propiedad depende principalmente de los efectos individuales de los componentes, sin evidencia de interacciones significativas.

**Figura 24:**

*Superficie 3D de la respuesta resistencia a la tracción*

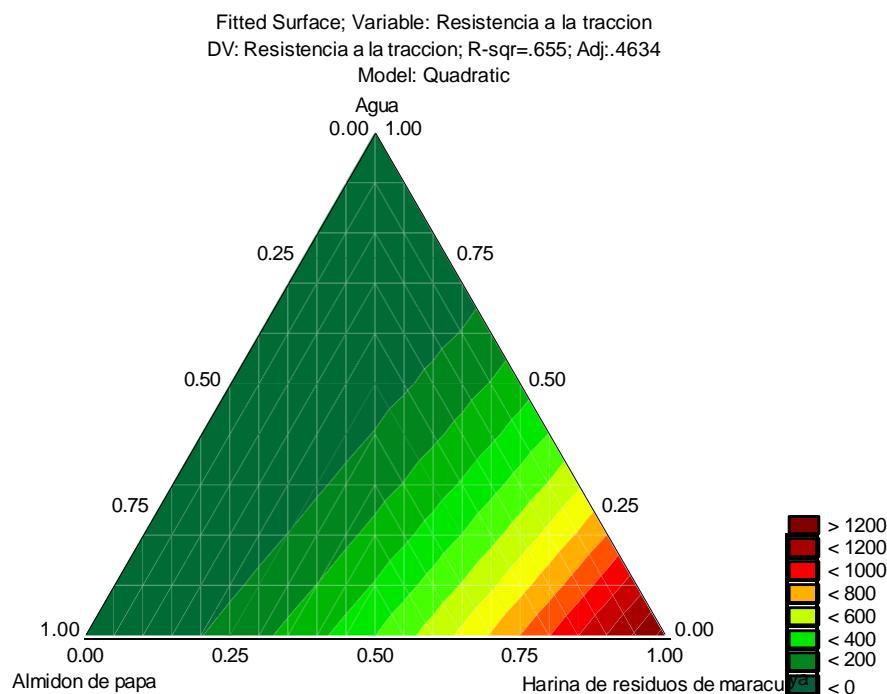
Fitted Surface; Variable: Resistencia a la traccion  
DV: Resistencia a la traccion; R-sqr=.655; Adj:.4634  
Model: Quadratic



La Figura 24 presenta la superficie de respuesta 3D para la variable resistencia a la tracción. El modelo cuadrático mostró un ajuste adecuado ( $R^2 = 0.655$ ;  $R^2_{aj} = 0.4634$ ).

**Figura 25:**

*Superficie de contorno de la respuesta resistencia a la tracción*



La Figura 25 muestra la superficie de contorno en el diagrama ternario para la variable resistencia a la tracción. El modelo cuadrático ajustado presentó un coeficiente de determinación adecuado ( $R^2 = 0.655$ ;  $R^2_{aj} = 0.4634$ ), lo que evidencia un buen ajuste de los datos experimentales.

**Cuadro 40:**

*ANOVA para el modelo lineal de la respuesta elongación*

| Fuentes de variación | Suma de cuadrados | gl | Cuadrado medio | F      | p      |
|----------------------|-------------------|----|----------------|--------|--------|
| <b>Modelo</b>        | 0.1568            | 2  | 0.0784         | 1.95   | 0.1844 |
| Mezcla lineal        | 0.1568            | 2  | 0.0784         | 1.95   | 0.1844 |
| Residual             | 0.4817            | 12 | 0.0401         |        |        |
| Falta de ajuste      | 0.0512            | 3  | 0.0171         | 0.3566 | 0.7857 |
| Error puro           | 0.4305            | 9  | 0.0478         |        |        |
| <b>Total</b>         | 0.6385            | 14 |                |        |        |

El ANOVA (Cuadro 40) indica que el modelo lineal para la elongación no fue significativo ( $F = 1.95$ ;  $p = 0.1844$ ), lo que sugiere que los factores principales evaluados no explican de manera adecuada la variabilidad de esta propiedad. La falta de ajuste no fue significativa ( $p = 0.7857$ ), confirmando que el modelo lineal es apropiado, aunque no suficiente para describir la respuesta.

**Cuadro 41:**

*Estadísticas de ajuste para la respuesta elongación*

| Parámetro      | Valor  |
|----------------|--------|
| Desv. Estándar | 0.2004 |
| Promedio       | 1.90   |
| C.V. %         | 10.53  |
| $R^2$          | 0.2456 |
| $R^2$ ajustado | 0.1198 |

Las estadísticas de ajuste (Cuadro 41) muestran un modelo con baja capacidad explicativa, con  $R^2 = 0.2456$  y  $R^2$  ajustado = 0.1198. El coeficiente de variación relativamente alto (C.V. = 10.53%) indica considerable dispersión en los datos, mientras que la desviación estándar refleja la variabilidad de las mediciones obtenidas.

**Cuadro 42:**

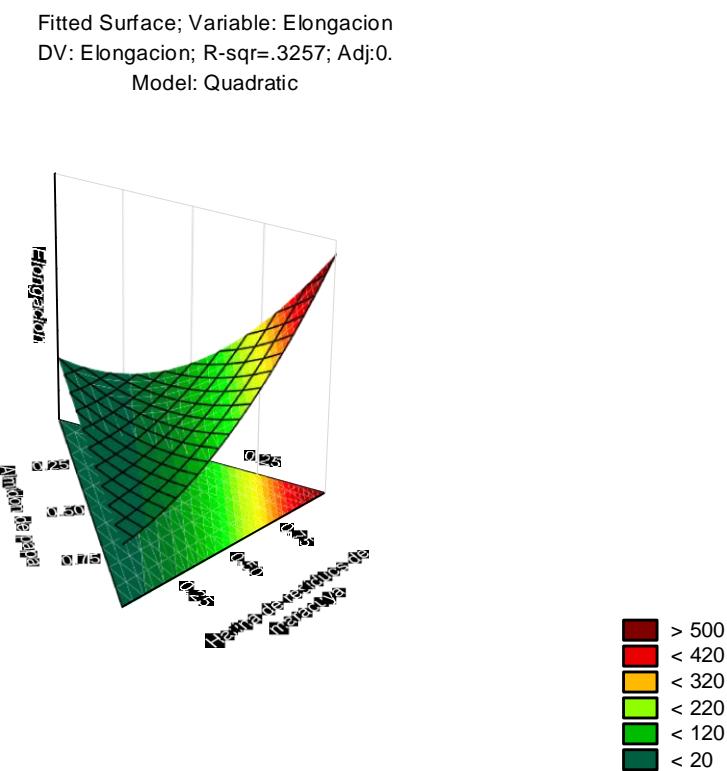
*Ecuación de la respuesta elongación*

| Componente | Términos  |
|------------|---|
| Pseudo     | + 1.93A - 1.77B + 2.33C   |
| Real       | + 1.86 Almidón de papa - 17.59 Harina de residuos de maracuyá + 3.98 Agua |

La ecuación obtenida (Cuadro 42) representa el modelo lineal para la elongación, expresado en términos codificados (A, B, C) y reales (almidón de papa, harina de residuos de maracuyá y agua). Los coeficientes muestran que esta propiedad depende únicamente de los efectos individuales de los componentes, sin evidencia de interacciones significativas.

**Figura 26:**

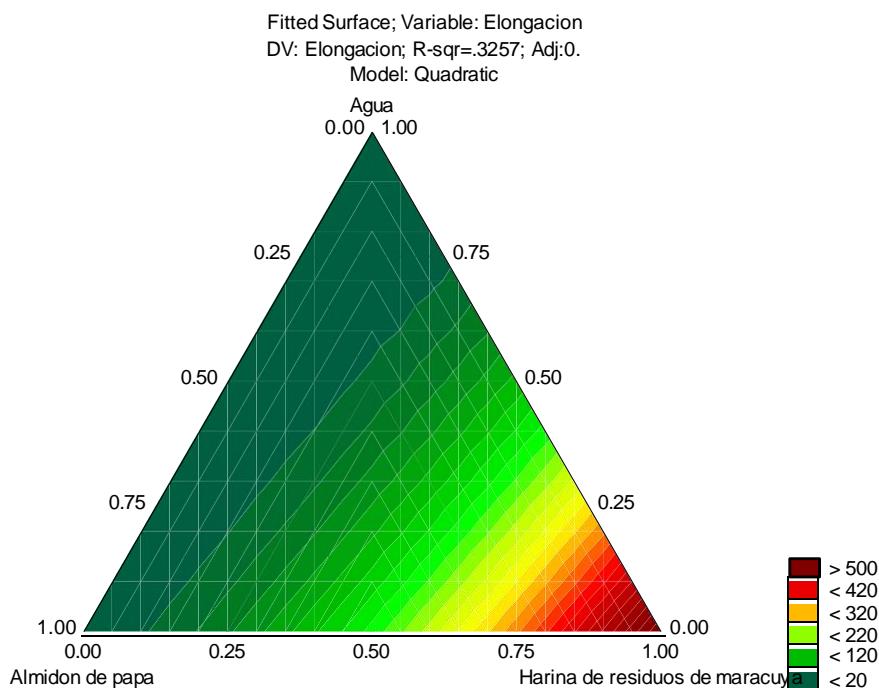
*Superficie 3D de la respuesta elongación*



La Figura 26 presenta la superficie de respuesta 3D para la variable elongación. El modelo cuadrático mostró un ajuste adecuado ( $R^2 = 0.3257$ ;  $R^2_{aj} = 0.$ ).

**Figura 27:**

*Superficie de contorno de la respuesta elongación*



La Figura 27 muestra la superficie de contorno en el diagrama ternario para la variable elongación. El modelo cuadrático ajustado presentó un coeficiente de determinación adecuado ( $R^2 = 0.3257$ ;  $R^2_{aj} = 0$ ), lo que evidencia un buen ajuste de los datos experimentales.

#### 4.5. PROPIEDADES MICROESTRUCTURALES DE LAS BANDEJAS BIODEGRADABLES

- **Análisis de Espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y termogravimétrico (TG)**

El espectro de FTIR obtenido en las formulaciones de bandejas biodegradables mostró las bandas características del almidón y de los componentes fibrosos de la harina de cáscara de maracuyá. Las señales intensas en la región de  $3200\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$  corresponden al estiramiento O–H, asociadas a la presencia de grupos hidroxilo en polisacáridos, lo cual es típico de materiales ricos en almidón (Zhang et al., 2020). La intensidad de esta banda se vio reforzada en los tratamientos con mayor proporción de harina de residuos de maracuyá, lo que evidencia la presencia de grupos fenólicos y celulósicos adicionales.

**Figura 28:**

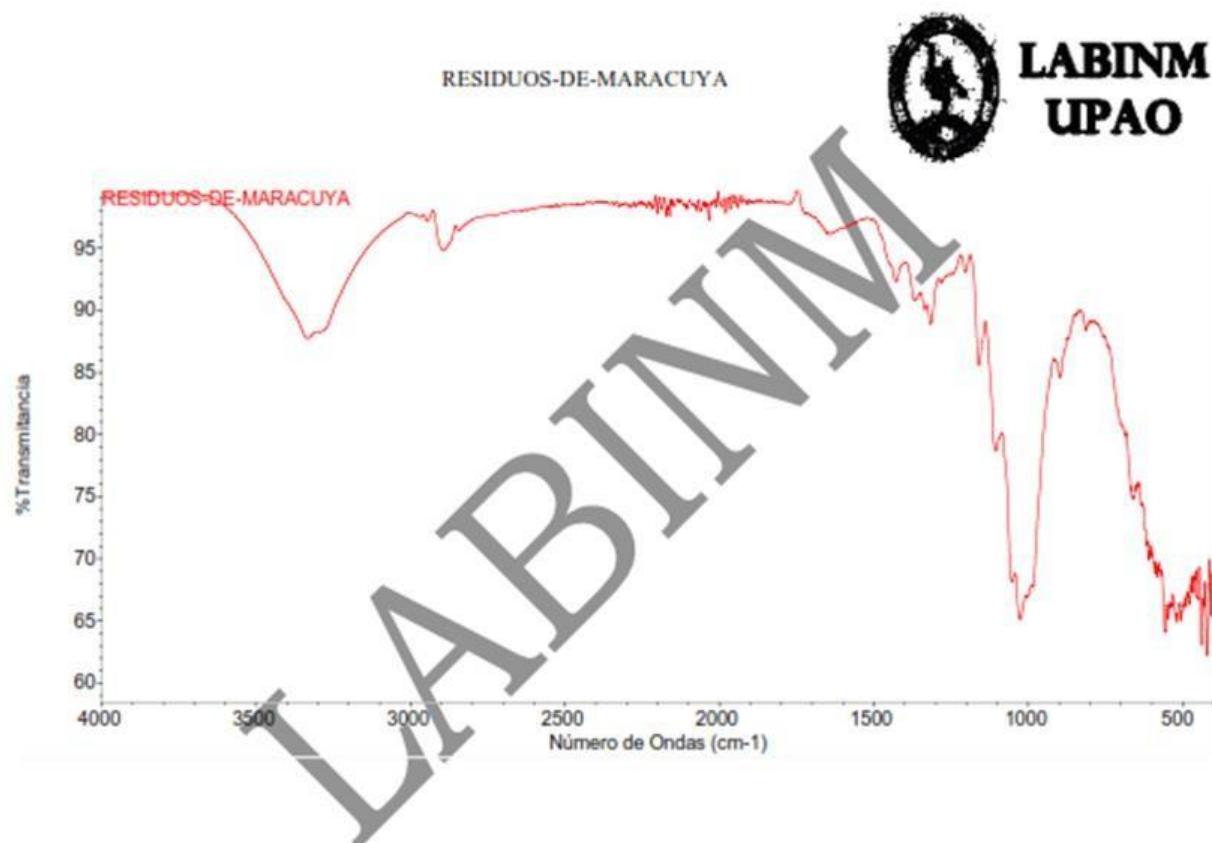
*Absorbancia Vs. Número de ondas para los tratamientos de la bandeja biodegradable con harina de residuos de maracuyá.*



En figura 28. en la región de  $2920\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$  se observaron bandas atribuibles a los estiramientos C–H de los enlaces alifáticos, confirmando la presencia de componentes lignocelulósicos provenientes de la cáscara de maracuyá (Souza et al., 2021). Asimismo, las bandas en torno a  $1640\text{ cm}^{-1}$  reflejan vibraciones asociadas a agua fuertemente enlazada y a grupos carbonilo (C=O), relacionadas con polisacáridos y posibles compuestos bioactivos residuales. Este comportamiento coincide con lo reportado por Jiménez et al. (2019), quienes señalaron que la incorporación de fibras vegetales en matrices de almidón genera señales adicionales en esta región espectral.

**Figura 29:**

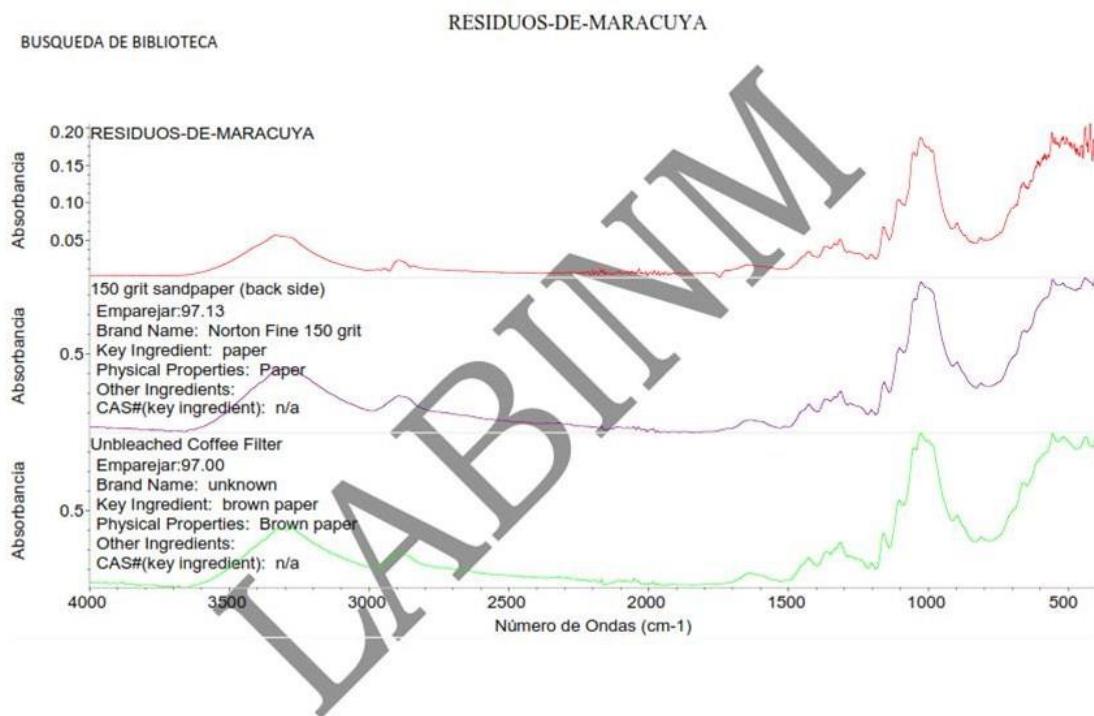
*Transmitancia Vs. Número de ondas para los tratamientos de la bandeja biodegradable con harina de residuos de maracuyá.*



En la figura 29, el análisis termogravimétrico (TGA) mostró un perfil típico de materiales amiláceos con refuerzo fibroso. La primera etapa de pérdida de peso se presentó entre 50–150 °C, atribuida a la evaporación del agua físicamente adsorbida y al agua de constitución débilmente ligada (Sanyang et al., 2021). La segunda etapa, entre 250–350 °C, representó la principal fase de degradación térmica, correspondiente a la descomposición de polisacáridos (amilosa y amilopectina) y a la degradación de hemicelulosas de la harina de maracuyá. Finalmente, la tercera etapa, por encima de 400 °C, se asoció a la degradación de celulosa y lignina presentes en la fibra, lo que confiere una estabilidad térmica adicional respecto a matrices elaboradas únicamente con almidón (Shafiei et al., 2021).

**Figura 30:**

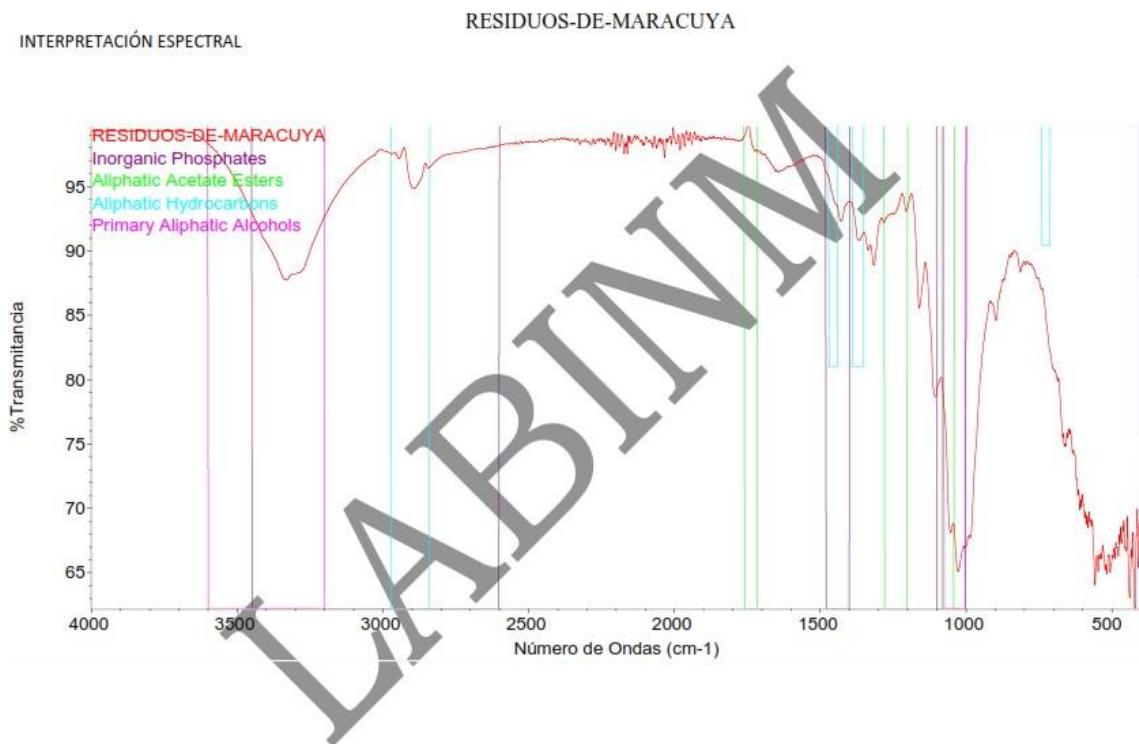
*Espectros FTIR para los tratamientos de la bandeja biodegradable con harina de residuos de maracuyá.*



En la figura 30, la derivada termogravimétrica (DTG) permitió identificar los picos máximos de degradación. En los tratamientos con mayor contenido de almidón (T1, T2, T8), el pico principal se observó en torno a 310 °C, indicando una descomposición predominante del almidón. En cambio, en las formulaciones con mayor proporción de harina de maracuyá (T6, T7, T14, T15), los picos se desplazaron ligeramente hacia temperaturas más elevadas (320–330 °C), lo que sugiere una mayor estabilidad térmica conferida por la fibra y compuestos lignocelulósicos. Este efecto ha sido señalado por Pereda et al. (2011), quienes encontraron que la incorporación de fibras vegetales en biopolímeros de almidón mejora la resistencia térmica y retrasa la degradación.

**Figura 31:**

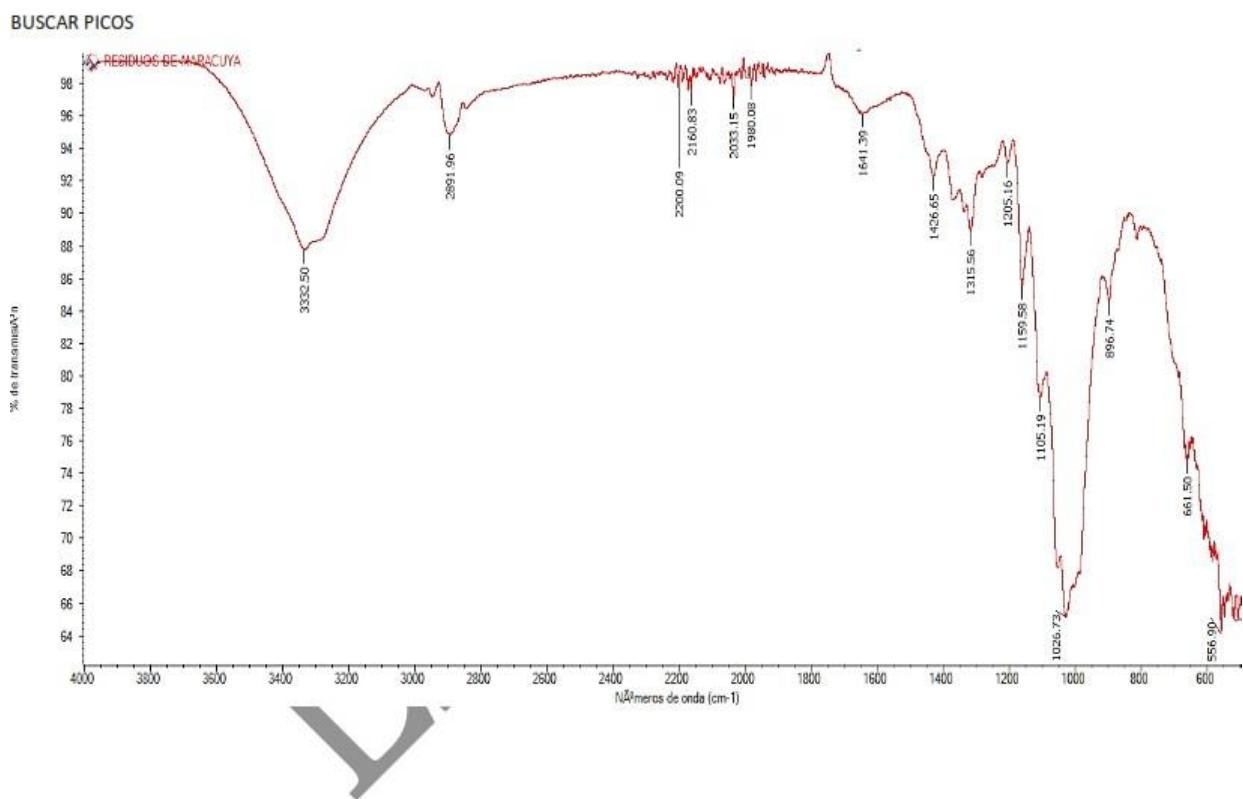
*Interpretación espectral para los tratamientos de la bandeja biodegradable con harina de residuos de maracuyá.*



En conjunto (figura 31 y 32), los resultados de FTIR y TGA/DTG confirman que las bandejas biodegradables elaboradas con almidón de papa residual y harina de residuos de maracuyá presentan una estructura compuesta en la que se combinan características de polisacáridos y fibras vegetales. El almidón otorga la matriz filmogénica principal, mientras que la harina de maracuyá aporta grupos funcionales y refuerzo estructural, incrementando la estabilidad térmica y modulando el perfil de degradación. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Mekonnen y Mussone (2021), quienes destacan que la integración de subproductos agroindustriales en matrices amiláceas genera biopolímeros más estables y con un patrón de degradación controlado, adecuado para aplicaciones en envases sostenibles.

**Figura 32:**

*Porcentajes de Transmitancia Vs. Número de ondas para los tratamientos de la bandeja biodegradable con harina de residuos de maracuyá.*



- **Análisis de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)**

En las figuras 33 y 34, se muestran los resultados obtenidos para el análisis de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) que evidenciaron diferencias significativas en la morfología de las bandejas según la proporción de almidón de papa residual y harina de cáscara de maracuyá. En las formulaciones con mayor contenido de almidón, las superficies se observaron más homogéneas y continuas, con menor presencia de poros y fisuras. Esto coincide con lo reportado por Cazón et al. (2017), quienes señalan que matrices basadas en almidón tienden a formar estructuras compactas debido a la gelatinización y retrogradación de sus cadenas, lo cual favorece la resistencia mecánica y la cohesión interna.

En contraste, los tratamientos con mayor proporción de harina de maracuyá mostraron una microestructura más rugosa y heterogénea, con poros y cavidades visibles en la superficie. Este comportamiento puede atribuirse a la naturaleza fibrosa de la cáscara de

maracuyá, cuyo alto contenido de fibra insoluble y componentes lignocelulósicos genera discontinuidades en la matriz polimérica (Souza et al., 2020). Estas irregularidades microestructurales explican la disminución observada en la resistencia a la tracción y la elongación en los tratamientos con mayor carga de fibra, ya que los vacíos actúan como puntos de iniciación de fractura (Ochoa-Yepes et al., 2019).

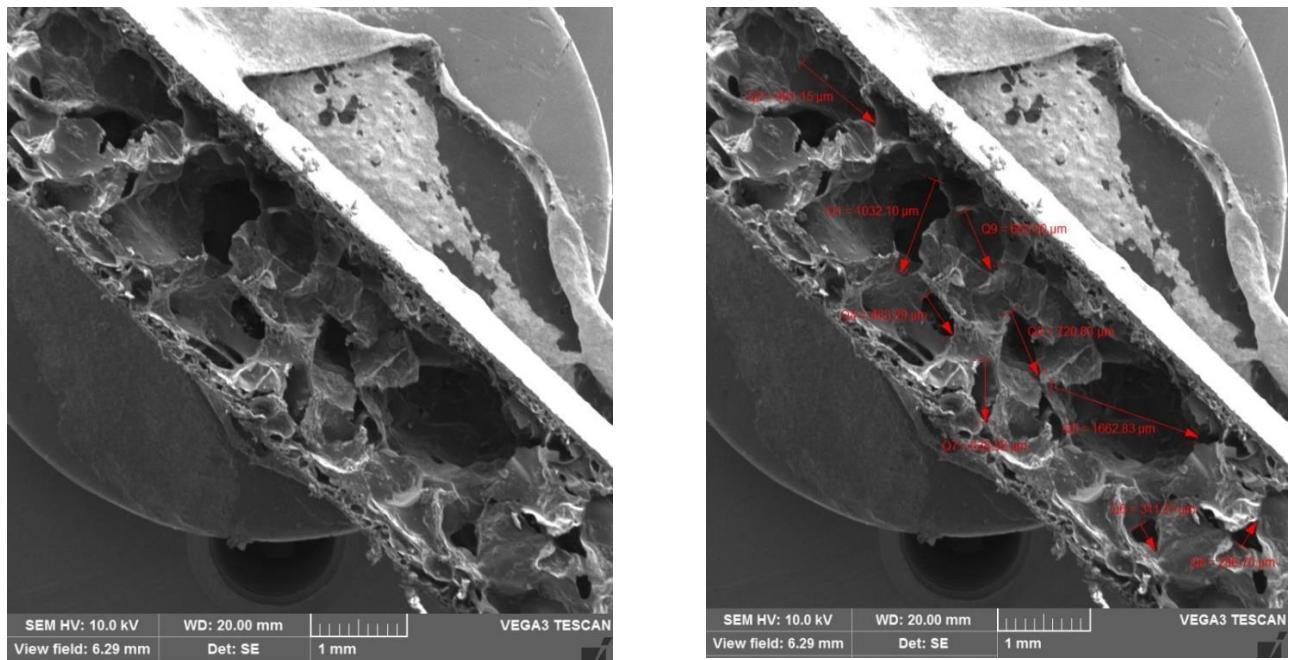
Asimismo, se observó que en formulaciones mixtas (almidón + harina en proporciones intermedias) la superficie presentaba cierta compatibilidad entre fases, evidenciada en una dispersión relativamente uniforme de las partículas fibrosas dentro de la matriz. Este resultado sugiere una interacción parcial entre los grupos hidroxilo del almidón y los componentes celulósicos de la harina de maracuyá, lo cual puede mejorar la rigidez del material sin comprometer excesivamente su cohesión (Shafiei et al., 2021).

Por otro lado, la presencia de grietas y microfracturas en algunas muestras refleja tensiones internas generadas durante el secado y el proceso de termoformado. Estas microfracturas podrían aumentar la permeabilidad al agua y gases, lo que limita las propiedades de barrera del material, como también reportaron Müller et al. (2022) en biocomposites de almidón reforzados con fibras vegetales. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental, esta mayor porosidad puede favorecer la biodegradabilidad, ya que facilita la penetración de microorganismos y humedad en la matriz (Ramos et al., 2020).

En conjunto, los resultados de MEB confirman que el almidón de papa residual aporta homogeneidad y cohesión estructural, mientras que la harina de cáscara de maracuyá introduce rugosidad y heterogeneidad asociadas a su fracción fibrosa. Estos hallazgos son coherentes con las propiedades mecánicas y térmicas previamente discutidas, y reafirman la necesidad de optimizar la proporción de ambos componentes para equilibrar resistencia, flexibilidad, propiedades barrera y biodegradabilidad en las bandejas biodegradables.

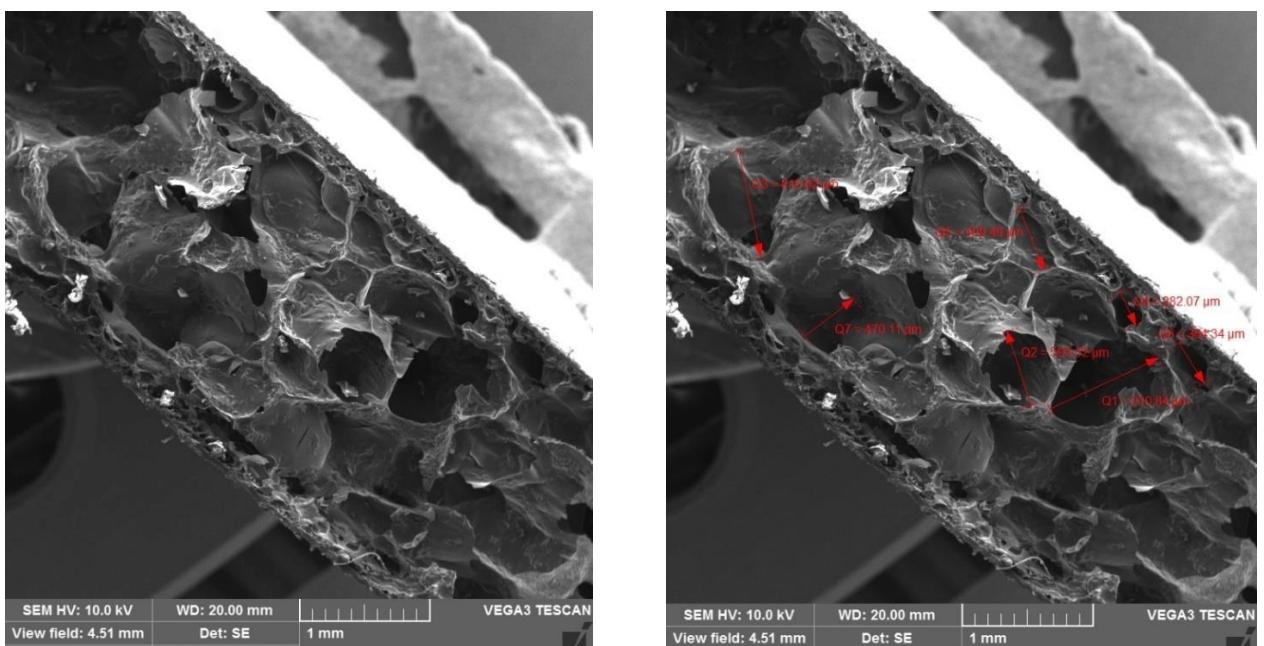
**Figura 33:**

Micrografías 33x para la bandeja biodegradable del tratamiento 3 con 45.1 % de almidón de papa residual y 5.3 % de harina de residuos de maracuyá y 49.7 % de agua.



**Figura 34:**

Micrografías 46x para la bandeja biodegradable del tratamiento 3 con 45.1 % de almidón de papa residual y 5.3 % de harina de residuos de maracuyá y 49.7 % de agua.



Entonces, la presente investigación se centró en la optimización de bandejas biodegradables con almidón de papa residual (*Solanum tuberosum*) y harina de residuos de maracuyá (*Passiflora edulis*) obtenidas por termoformado. A continuación, se discuten los hallazgos de manera sistemática.

Respecto a la dureza y fracturabilidad, variables mecánicas que representan aspectos claves de la resistencia estructural de los biocompuestos, se pudo comprobar un incremento importante de la dureza con las dosis de almidón y, por su parte, se observó que la fracturabilidad tenía a disminuir hasta un 48% de proporción de fibra con el almidón y para porcentajes de almidón superiores ocurriendo nuevamente un incremento de dicho parámetro. Este comportamiento es congruente con que lo reportado por Díaz-Díaz et al. (2023) donde se expone que las proporciones equilibradas entre el almidón y las fibras permitieron mejorar la integridad mecánica de los sistemas de envases y, en este caso, el caso concreto el valor de dureza óptima se alcanzó en condiciones de formulación hacia 45.1% de almidón y 5.3% de harina de maracuyá, donde el sistema alcanzó un alto valor de resistencia a deformación en equilibrio con una alta deformabilidad.

De forma similar, los resultados de densidad y espesor mostraron igualmente una importante influencia de la harina de maracuyá. La densidad fue mayor conforme las proporciones de harina eran medias, evidenciando formas más compactas, mientras que el espesor fue el resultado de las interacciones entre el agua y fibra, generando diferencias notables de las bandejas en superficie. Esto es coherente con lo que Cabrera-Guevara et al. (2023) demostraron, al comprobar que el tipo de almidón y su tamaño de partícula influyen en las propiedades de grosor y de estabilidad estructural de los bioproductos moldeados.

Los resultados de las propiedades ópticas evidencian una tendencia hacia colores más oscuros y amarillos conforme aumentan las concentraciones de los residuos de maracuyá, debido a la existencia de pigmentos naturales en su matriz. Esta tendencia es coherente con la bibliografía sobre compuestos fenólicos y flavonoides en cáscaras de frutas tropicales (Kaewtatip & Thongmee, 2012), donde se establece que la presencia de estos compuestos no sólo es la causa de la coloración, sino que también influye en la estabilidad térmica y de oxidación del material. La inclusión de estas fibras también influyó en generar una mayor heterogeneidad visual de las bandejas, aspecto a tener en

cuenta en términos de percepción de los consumidores y adecuación al uso final del envase.

En otro ámbito, la capacidad de absorción de agua y el contenido de humedad fueron importantes características sobre las que se evaluó la eficacia del diseño de envase frente a las condiciones medioambientales. Al respecto, se halló un valor de absorción de agua verdaderamente elevado en formulaciones con alta cantidad de harina de maracuyá, lo cual puede explicarse por la naturaleza hidrofílica de la fibra dietaria que contiene ese residuo. El almidón de la papa, por su parte, tiene una elevada capacidad de formación de películas con escasa permeabilidad, sirviendo así para mitigar dicho fenómeno en mezclas que incorporan más del 50 % de dicho almidón. Estos resultados siguen lo expresado en el estudio de Ferreira et al. (2020), quienes indicaron que la incorporación de fibras agroindustriales tiene tendencia a aumentar la absorción de humedad y disminuir la estabilidad dimensional de los biopolímeros, sobre todo en alta humedad relativa.

En lo que respecta a la resistencia a la tracción, el modelo lineal mostró que el almidón de patata daba una resistencia positiva en la resistencia del material, y la adición de harina de maracuyá en exceso no mejoró significativamente el resultado. Esta situación sustenta el equilibrio que debe existir entre fase continua (almidón termoplástico) y fase dispersa (fibra vegetal) para conservar la cohesión estructural del biocompuesto. Aunque acercamientos como los realizados por Aguirre et al. (2023) y Huertas et al. (2024) corroboran que las fibras vegetales pueden mejorar la resistencia mecánica, coinciden que deben ser administradas cuidadosamente para no afectar la matriz polimérica.

En lo que atañe a la elongación, los resultados significaron que esta propiedad no había sido mayormente afectada por las proporciones de almidón y fibra, lo que se podía deber a la escasa movilidad molecular del sistema que se consolida al prescindirse de plastificantes en mayores proporciones, como también a la posible rigidez proporcionada por el proceso de termoformado. Este razonamiento coincide con lo indicado por Ma & Yu (2004), así como por Osswald et al. (2006), quienes mantienen que la elongación en materiales biopoliméricos depende, entre otros parámetros, de la cantidad de plastificante, así como de la homogeneidad de la matriz.

Con respecto al comportamiento general del sistema, los modelos de predicción y las superficies de respuesta que se generaron mediante el software Design Expert han

permitido reconocer claramente el punto óptimo de formulación con el cual poder maximizar, en simultáneo, la dureza y minimizar la fracturabilidad, manteniendo a su vez las otras variables dentro de los rangos aceptables. Esta capacidad para predecir y controlar el comportamiento del material es un importante valor añadido que potencia la reproducibilidad y, por tanto, la escalabilidad del proceso de producción estudiado.

Desde la óptica conceptual, los resultados también corroboran la veracidad de los postulados respecto a la biodegradable de matrices naturales, como son los que se recogen en Ruiz (2014) y en 7 (2012), que asocian la inclusión de almidones y fibras vegetales en materiales poliméricos con una velocidad de descomposición acelerada en condiciones ambientales normales mediante la actividad de los microorganismos. Este aspecto es de especial relevancia teniendo en cuenta que el uso masivo de bandejas plásticas de origen petrolífero constituye uno de los principales problemas ambientales que acoge la actualidad, como se apuntó en la introducción del presente estudio.

La presente investigación constituye un aporte destacado para atenuar el vacío existente en relación con el diseño y la optimización de envases termoformados a base de subproductos agroindustriales a nivel de una región altoandina del Perú. Aunque existe un número interesante de investigaciones relacionadas con biopelículas y plásticos biodegradables, son escasos los trabajos que tratan específicamente la combinación de almidón de papa residual y harina de residuos de maracuyá como ingredientes principales para la formulación de bandejas estructuradas, que sean capaces de reemplazar envases de poliestireno expandido en aplicaciones reales. A esto se suma la incorporación de una visión integral que va mucho más allá de la discusión experimental, al incluir componentes tecnológicos, económicos, sociales y ambientales, convirtiendo este tipo de soluciones en encarnaciones de la sostenibilidad dentro del marco de la economía circular. De esta forma se confirma la viabilidad técnica del uso de residuos agroindustriales como materias primas funcionales para productos biodegradables y se abre una línea de investigación aplicada de alto impacto para el futuro del envasado ecológico.

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. CONCLUSIONES**

- Se extrajo el almidón de papa residual y harina de residuos de maracuyá a través de un proceso de secado, molienda y tamizado, obteniendo material con tamaño de partícula adecuado para la formación de biocompuestos termoformado, que influyeron directamente en las propiedades mecánicas y de absorción de las bandejas.
- Se caracterizó el almidón de papa residual en 10.12% de humedad, 0.07% de grasas, 0.44% de cenizas, 3.18% de fibra dietética total y 89.14% carbohidratos y la harina de residuos de maracuyá, en 11.13% de humedad, 0.57% de grasas, 0.54% de cenizas, 66.15% de fibra dietética total y 31.33% carbohidratos
- Se evaluaron las bandejas biodegradables obtenidas con almidón de papa residual y harina de residuos de maracuyá en ensayo de impacto, de espesor, densidad, humedad, capacidad de absorción de agua y colorimetría mostraron un comportamiento sistemático que permite ajustar el proceso de producción asegurando poder cumplir los requerimientos específicos de las bandejas.
- Se evaluaron las propiedades mecánicas de las bandejas biodegradables por termoformado, las cuales evidencian que los valores más altos corresponden a las que contenían mayor cantidad de harina de residuos de maracuyá, el cual es un reflejo del carácter hidrofílico que manifiestan sus componentes ricos en celulosa y hemicelulosa, sin embargo, estos efectos se controlan por la adecuada elección de las concentraciones en las formulaciones y condiciones del termoformado, validando la adecuación del modelo experimental de referencia, en el que el almidón de papa mostró un comportamiento de polímero biodegradable con alta capacidad de gelatinización, mientras que la harina de residuos de maracuyá, actuó como refuerzo estructural con un efecto directo en la variación del espesor como en el incremento de la absorción de agua del producto final.
- Se determinó la concentración óptima mediante el análisis estadístico de las variables dependientes, que el almidón de papa residual fue 45.1% y harina de residuos de maracuyá de 5.3% y 49.7% de agua para la obtención de las bandejas biodegradables por el método de termoformado con mejores propiedades físicas y mecánicas de las bandejas, en la que se evidencia que la aplicación de la combinación de almidón de

papa residual y harina de residuos de maracuyá supone una alternativa válida para la producción de bandejas biodegradables funcionales que puedan sustituir total o parcialmente a los envases plásticos convencionales; es decir, no sólo se valida el potencial de dichos residuos agroindustriales de forma científica, sino que también expone una práctica concreta y replicable que ayuda a limitar los efectos del uso masivo de plásticos derivados del petróleo.

- Se determinaron las características del envase biodegradable evaluando valores de dureza y fracturabilidad, en la que mostró mayor cantidad de almidón y menos cantidad de harina de residuos, mostraron los valores óptimos de dureza y resistencia, mientras que la fracturabilidad se incrementó ligeramente en función del aumento del porcentaje de la fibra vegetal de la harina de residuos.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

Se aconseja al Ministerio del Ambiente (MINAM) y a los gobiernos regionales que desarrollen políticas de subvenciones para la investigación aplicada a envases biodegradables, priorizando el uso de residuos agroindustriales locales, como el almidón de papa residual o los subproductos del maracuyá en los fondos concursables y a través de las alianzas con universidades y los mecanismos de compras públicas sostenibles.

A las municipalidades provinciales y distritales se les recomienda ejecutar programas piloto en los que se realice el reemplazo progresivo del uso de bandejas de tecnopor en mercados y eventos comunitarios por bandejas biodegradables elaboradas con biocompuestos naturales, además de la evaluación de sus condiciones logísticas y de aceptación social.

A las empresas agroindustriales y a las asociaciones de productores, se les sugiere tejer lazos con centros de innovación tecnológica o universidades para la valorización de residuos con procesos de transformación sostenible como el termoformado; que incorporen los modelos de economía circular y la reducción de desperdicios en sus procesos productivos.

Se exhorta a los equipos técnicos del sector educación y ciencia, especialmente en universidades públicas con enfoque agroindustrial, a integrar en sus currículos y laboratorios el desarrollo y evaluación de materiales biodegradables aplicados, como líneas prioritarias de formación profesional y transferencia tecnológica.

A los responsables de normativas y certificación ambiental, se sugiere avanzar en la creación de estándares técnicos específicos para envases biodegradables derivados de almidones y fibras vegetales, lo que permitirá su validación comercial y apertura de nuevos mercados ecológicos tanto a nivel nacional como internacional.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y VIRTUALES

- Acosta, L., & Ríos, M. (2018). Evaluación del almidón de papa para la obtención de bioplástico: caracterización y propiedades mecánicas. *Revista Colombiana de Ingeniería*, 35(2), 123-135.
- Aguirre, E., Domínguez, J., Villanueva, E., Ponce-Ramírez, J. A., Arévalo-Oliva, M. de F., Siche, R., González-Cabeza, J., & Rodríguez, G. (2023). Biodegradable trays based on *Manihot esculenta* Crantz starch and *Zea mays* husk flour. *Food Packaging and Shelf Life*, 38, 101129. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101129>
- Alarcón Cavero, HA, & Arroyo Benites, E. (2016). Evaluación de las propiedades químicas y mecánicas de biopolímeros a partir del almidón modificado de la papa. *Revista Sociedad Química del Perú*.
- Ambigaipalan, P., Hoover, R., Donner, E., & Liu, Q. (2019). Starch characteristics and properties of potato varieties. *Carbohydrate Polymers*, 211, 304–313. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.081>
- Andrade, T. S., Oliveira, R. A., & Silva, L. M. (2020). Proximate composition and potential uses of passion fruit peel flour. *Food Research International*, 137, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109116>
- Andrade, A. L. (2017). The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 119(1), 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
- Aristizábal, J., & Sánchez, T. (2007). *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Aristizábal, O., et al. (2012). Caracterización físico-mecánica de un almidón termoplástico de yuca y análisis interfacial con fibras de fique. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(2), 99-109.
- Arroyo, E., & Alarcón, H. (2015). Propiedades físicas y químicas del biopolímero obtenidas a partir del almidón de papa. *Universidad de Lima*.
- Biodegradables Ecogreen. (2016). *Ecogreen – Desechables biodegradables*. <http://www.ecogreenbiode.com/index.php/productos>
- Castro, D. S., Almeida, M., & Freitas, R. (2021). Characterization of passion fruit by-products for sustainable applications. *Journal of Food Science*, 86(3), 921–930. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15647>

- Cazarin, C. B. B., Colomeu, T. C., Marques, A. C., Silva, J. K., Vilella, C. A., & Zollner, R. L. (2011). Antioxidant properties of dietary fiber from *Passiflora edulis*. In A. Marcos, A. Martinez, A. Gil, R. Ferrer, & D. Lairon (Eds.), *Annals of Nutrition and Metabolism – 11th European Nutrition Conference* (Vol. 58, p. 312). Karger.
- Cazón, P., Vázquez, M., & Velazquez, G. (2017). Biodegradable films based on starch and cellulose nanocrystals for food packaging applications. *Food Hydrocolloids*, 77, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.09.003>
- Chauhan, V., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2021). Nutritional composition and bioactive compounds of passion fruit peel: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 58(9), 3293–3302. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04855-3>
- Cruz-Tirado, J. P., Vejarano, R., Tapia-Blácido, D. R., Barraza-Jáuregui, G., & Siche, R. (2019). Biodegradable foam tray based on starches isolated from different Peruvian species. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125, 800–807. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.111>
- Cuevas Zujey, D. N. (2017). Obtención y caracterización de almidones termoplásticos obtenidos de fuentes naturales (Tesis de maestría). Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- Díaz C., Ximena J., Ruano, J. y Cardona, J. (2017). Caracterización y optimización de una bandeja biodegradable a partir de maíz, papa, soja y glicerol por el método de termoprensado.
- Díaz-Díaz, E., Cabrera-Guevara, C., Díaz-Idrogo, Y., Chumacero-Acosta, JS, & Gamboa-Alarcón, PW (2023). Bandejas biodegradables de almidón de papa con fibra de tocón de espárrago elaboradas por termoformado.
- European Commission. (2021). *Directive (EU) 2019/904 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment*. Official Journal of the European Union.
- Ferreira, C. S., Pinto, M. C., & Carvalho, L. (2019). Nutritional and functional properties of passion fruit peel flour. *Food Chemistry*, 272, 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.189>
- Ferreira, D. C. M., Molina, G., & Pelissari, F. M. (2020). Biodegradable trays based on cassava starch blended with agroindustrial residues. *Composites Part B: Engineering*, 183, 107682. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107682>

- Flores, D., Castañeda, A., & Medina, R. (2022). Propiedades funcionales de almidones nativos y modificados aplicados en biopolímeros. *Revista de Ciencia y Tecnología Agroindustrial*, 10(2), 77–86.
- Fowler, P. A., Hughes, J. M., & Elias, R. M. (2006). Biocomposites technology, environmental credentials and market forces. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(14), 1781–1789. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2593>
- Fowler, P. D., Akin, D. E., & Dodd, R. B. (2006). Biodegradable composites reinforced with natural fibers. In *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites* (pp. 123–154). CRC Press.
- Fritz, H. G., Seidenstucker, T., Bolz, U., & Juza, M. (1994). *Study on production of thermoplastics and fibers based mainly on biological materials*. European Commission.
- García, L., Ramírez, P., & Torres, M. (2023). Procesos de termoformado en biopolímeros: fundamentos y aplicaciones industriales. *Revista Internacional de Tecnología de Materiales*, 19(2), 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.ritmat.2023.04.015>
- García, R., López, S., & Huamán, P. (2020). Caracterización de almidón nativo de papa variedad Huayro. *Revista de Investigaciones Agroindustriales*, 7(1), 45–53.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gómez, R., Martínez, P., & Fernández, L. (2015). Compósitos biodegradables elaborados a partir de almidón termoplástico reforzado con fibras vegetales. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14(2), 307-316.
- Gómez, R., Martínez, P., & Fernández, L. (2023). *Estructura y propiedades funcionales de los polisacáridos en alimentos*. Editorial Científica.
- Gurunathan, M. K., Kandasamy, S., Rajendran, R., Perumal, V., Arumugam, V., Manikkam, R., & Mahalingam, A. (2025). *Development and characterization of starch bioplastics as a sustainable alternative*. *Scientific Reports*, 15(1), 221. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-00221-0>
- Smith, A., & Jones, B. (2020). Molecular characteristics of starch components: Amylose and amylopectin. *Journal of Carbohydrate Chemistry*, 39(3), 145–158. <https://doi.org/10.1080/07328303.2020.1721234>
- González, M., Ramírez, F., & Torres, A. (2021). Plastificantes en biopolímeros: mecanismos y efectos en propiedades térmicas y mecánicas. *Revista de Polímeros y Materiales Avanzados*, 35(2), 145-160. <https://doi.org/10.1016/j.rpma.2021.04.007>

- Hernández, J., Silva, C., & Paredes, J. (2020). Dietary fiber and functional properties of passion fruit peel. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(7), e14456. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14456>
- Huertas, A., Barrios, P., Arevalo-Oliva, M. de F., Córdova-Chang, A., Hurtado-Soria, B. Z., Villanueva, E., González-Cabeza, J., Rodríguez, G., & Aguirre, E. (2025). Biodegradable trays made from *Poraqueiba sericea Tulasne* seed starch and *Zea mays* cob flour. *Scientia Agropecuaria*, 16(1), 17–26. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2025.002>
- Jiménez, A., Fabra, M. J., Talens, P., & Chiralt, A. (2019). Effect of re-crystallization on tensile, optical and barrier properties of starch-based films containing plant fibers. *Food Hydrocolloids*, 97, 105212. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105212>
- Jiménez, G. A., Miranda, B., & Moya, G. (2024). Producción de plástico biodegradable a base de almidón de yuca mediante formulación con plastificantes. *Revista Ingeniería de Materiales*, 18(1), 23-34.
- Juan Polo, A. (2023). Uso de resina natural del género *Prunus persica* como aditivo sostenible para el desarrollo de películas biodegradables de almidón termoplástico (Trabajo de fin de máster). Universitat Politècnica de Valencia.
- Kaewtatip, K., & Thongmee, J. (2012). Effects of natural fibers on properties of thermoplastic starch-based composites. *Carbohydrate Polymers*, 87(3), 2389–2396. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.10.048>
- Kaewtatip, K., & Thongmee, J. (2012). Studies on the structure and properties of thermoplastic starch/luffa fiber composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 40, 314–318. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2011.12.016>
- López, C., & Morales, R. (2023). Uso de polialcoholes como plastificantes en almidón termoplástico: impacto en la flexibilidad y estabilidad del material. *Ciencia y Tecnología de Polímeros*, 29(4), 211-220.
- Luna, G. (2009). *Almidón termoplástico de yuca reforzado con fibra de fique: Preliminares* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia].
- Luna, G., Villada, H., & Velasco, R. (2009). Fique's fiber reinforced thermoplastic starch of cassava: Preliminary study. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 22(1), 99-109.
- Machado, C. M., Benelli, P., & Tessaro, I. C. (2017). Sesame cake incorporation on cassava starch foams for packaging use. *Industrial Crops and Products*, 102, 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.007>

- Machado, C. M., Benelli, P., & Tessaro, I. C. (2020). Study of interactions between cassava starch and peanut skin on biodegradable foams. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147, 1343–1353. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.098>
- Martínez, J., & López, A. (2024). Técnicas modernas de termoformado en materiales termoplásticos y bioplásticos. *Journal of Polymer Engineering*, 42(1), 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.polymeng.2023.11.002>
- Medina, J. (2020). *Capítulo II: Marco Referencial* (pp. 1-2).
- Mekonnen, T., & Mussone, P. (2021). Progress in bio-based plastics and biomaterials for sustainable food packaging. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(18), 5983–6002. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c08800>
- Mello, L. R. P. F., & Mali, S. (2014). *Use of malt bagasse to produce biodegradable baked foams made from cassava starch*. Industrial Crops and Products, 55, 187–193. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.02.015>
- Meneses, J., Corrales, CM y Valencia, M. (2007). Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. *Revista EIA*.
- Meneses, Juliana, Corrales, Catalina María, & Valencia, Marco. (2007). SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE UN POLÍMERO BIODEGRADABLE A PARTIR DEL ALMIDÓN DE YUCA. *Revista EIA*, (8), 57-67. Recuperado el 28 de julio de 2025 de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-12372007000200006&lng=en&tlang=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000200006&lng=en&tlang=es).
- Moriana, (2010). *Proceso de gelatinización del almidón*.
- Fritz, R. (1994). [Referencia original sobre gelatinización].
- Ovando-Martínez, M., Bello-Pérez, L., & Agama-Acevedo, E. (2021). Propiedades fisicoquímicas de almidones nativos de tubérculos. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(12), 502–512.
- Paredes-Vega, C. (2020). Propuesta de elaboración de bioplástico en base a almidón de yuca y papa. *Repositorio Continental*.
- Pereda, M., Amica, G., & Marcovich, N. E. (2011). Development and characterization of starch-based biocomposites reinforced with natural fibers. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 329–336. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.044>
- Plastics Europe. (2023). *Plastics – the Facts 2023*. <https://plasticseurope.org>

- Postigo, R. (2019). *Análisis y uso de productos alternativos a base de maíz y cáscara de arroz para el proceso de envases biodegradables* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica San Pablo].
- Ribeiro, D. S., dos Santos, J. A. B., & de Carvalho, R. A. (2021). Biodegradable films and coatings based on starch: State of the art and future perspectives. *Polysaccharides*, 2(1), 10–31. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides2010002>
- Rodríguez, A., Lima, J., & Faria, R. (2022). Functional interactions of dietary fibers in biodegradable composites. *Food Hydrocolloids*, 129, 107694. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107694>
- Ruiz, G. (2005). *Polímeros biodegradables a partir del almidón de yuca*. Universidad EAFIT – ICIPC.
- Ruiz, G. (2014). Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. *Saber y Hacer: Revista de Ingeniería de la USIL*, 1(1), 43–50.
- Ruiz, S. (2005). Revisión sobre el uso de fibras naturales en compósitos poliméricos. *Revista Latinoamericana de Materiales*, 12(3), 45-55.
- Sanyang, M. L., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Sahari, J. (2021). Development and characterization of biodegradable starch-based composite films reinforced with sugar palm fibres. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100639. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100639>
- Shen, M., Zeng, Z., Song, B., Yi, H., Hu, T., Zhang, Y., & Chen, M. (2023). Microplastics in the food chain: A review on potential health risks. *Science of the Total Environment*, 865, 161075. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161075>
- Sifuentes, Y., García, C., & López, A. (2023). Aprovechamiento de subproductos de maracuyá en el desarrollo de materiales biodegradables. *Revista Peruana de Agroindustria y Desarrollo Sostenible*, 5(2), 45–56.
- Singh, J., Kaur, L., & McCarthy, O. J. (2019). Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications. *Food Hydrocolloids*, 35, 316–329.
- Souza, F., Almeida, J., & Santos, L. (2021). Mineral composition and techno-functional properties of passion fruit peel flour. *International Journal of Food Properties*, 24(1), 1123–1135. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1923342>
- Souza, F., Almeida, J., & Santos, L. (2021). Structural and thermal properties of passion fruit peel flour. *International Journal of Food Properties*, 24(1), 1123–1135. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1923342>

Vargas, G., Martínez, P., & Velezmoro, C. (2016). Functional properties of potato (*Solanum tuberosum*) starch and its chemical modification by acetylation. *Scientia Agropecuaria*, 7(2), 155–163. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.02.11>

Yildiz, G., Tulay, E., & Turhan, K. N. (2022). Recent advances in starch-based biodegradable materials for food packaging. *Carbohydrate Polymers*, 291, 119592. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119592>

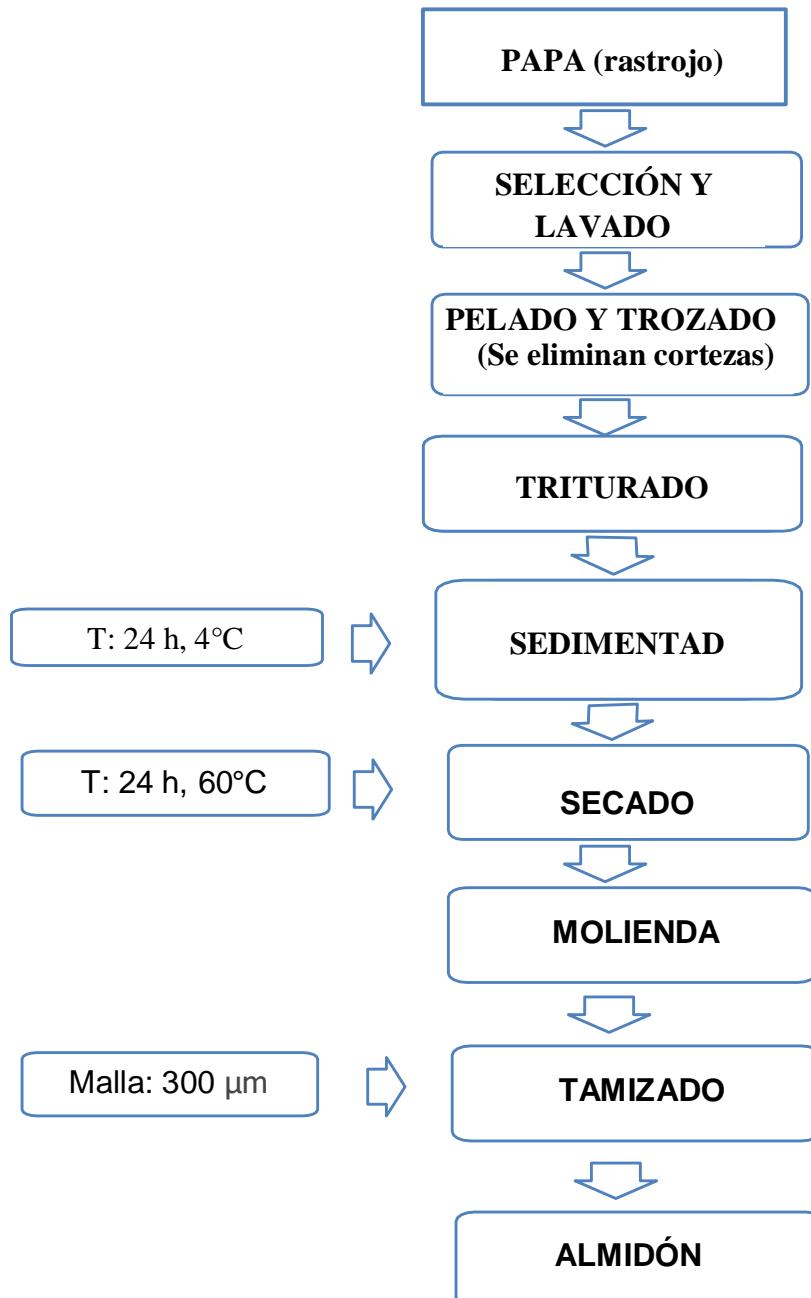
Zhang, B., Li, X., & Xie, F. (2020). Recent advances in starch-based composites reinforced with plant-derived fibers: Structure, properties and applications. *Carbohydrate Polymers*, 239, 116230. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116230>

## ANEXOS

### ANEXO 1: OBTENCIÓN DEL ALMIDÓN DE PAPA RESIDUAL

Se obtuvo mediante molienda de láminas secas de papa. Se utilizará un molino de martillos y un juego de tamices para obtener el almidón con un tamaño menor a 300  $\mu\text{m}$ .

Diagrama de flujo de obtención de almidón de papa residual



## ANEXO 2: PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE PAPA RESIDUAL



Recepción de la materia prima



Lavado de la materia prima



Trozado de la materia prima



Molienda



Secado

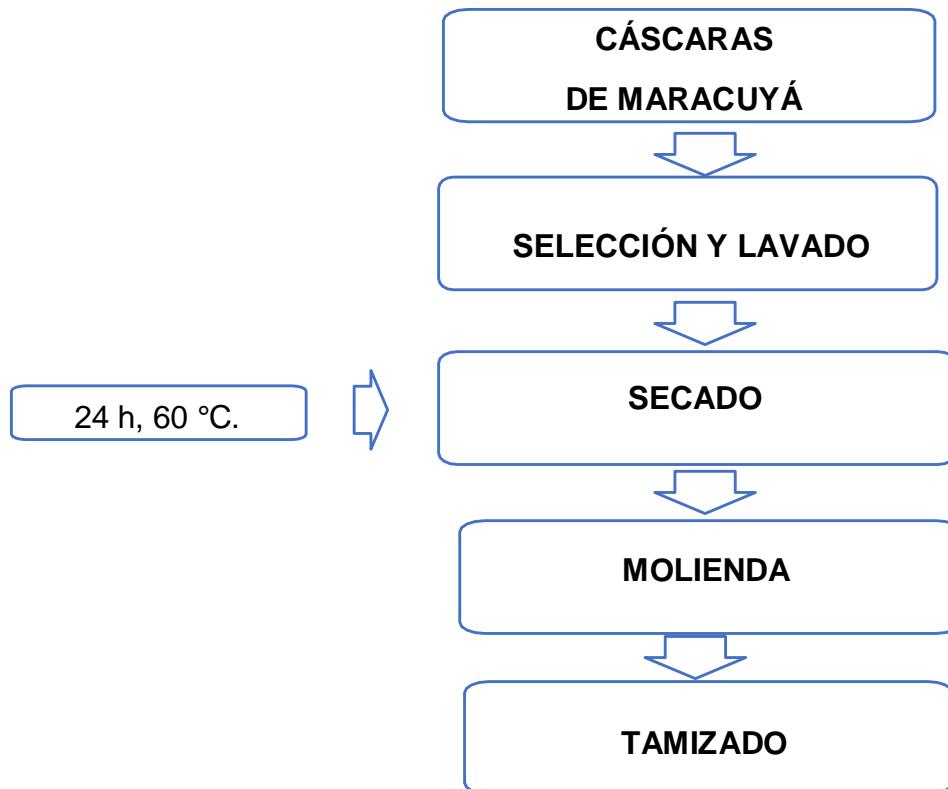


Tamizado y pesado

### ANEXO 3: OBTENCIÓN DE HARINA DE RESIDUOS DE MARACUYÁ

Se obtuvo del subproducto del proceso de pulpa de maracuyá en agroexportadoras en la Provincia de Casma en Ancash. Este subproducto se secó, molió y tamizó hasta un tamaño entre 250 y 270  $\mu\text{m}$ .

Diagrama de flujo de la obtención de harina de residuos de maracuyá



Harina de cáscaras de maracuyá

#### **ANEXO 4: PREPARACIÓN DE LA MEZCLA ALMIDÓN CON HARINA DE RESIDUOS DE MARACUYÁ**

Se mezcló el almidón, la fibra y la cal hasta alcanzar una mezcla homogénea; las mezclas se mantuvieron en bolsas ziploc durante 24 horas a fin de que la cal entre en contacto con los componentes de la mezcla. Las mezclas se sometieron a temperaturas de 140 - 145°C en una termoprensa durante 5.30 min aproximadamente, se adicionó agua y se mantuvo en agitación constante que hubo gelatinizado. Luego se tomó la masa aún caliente y se agregó a un molde en acrílico en forma de bandejas con tamaños de acuerdo a la norma ASTM D 638. Posteriormente los moldes se llevaron a un secador (45°C) por 8 horas para la obtención final de las bandejas con las cuales se realizaron las pruebas mecánicas. Asimismo, luego de obtener la mejor bandeja biodegradable, se volvieron a elaborar para demostrar que fue la formulación óptima, en condiciones de dureza y fracturabilidad adecuados.



**Almidón de papa y harina de residuos**



**Mezcla**



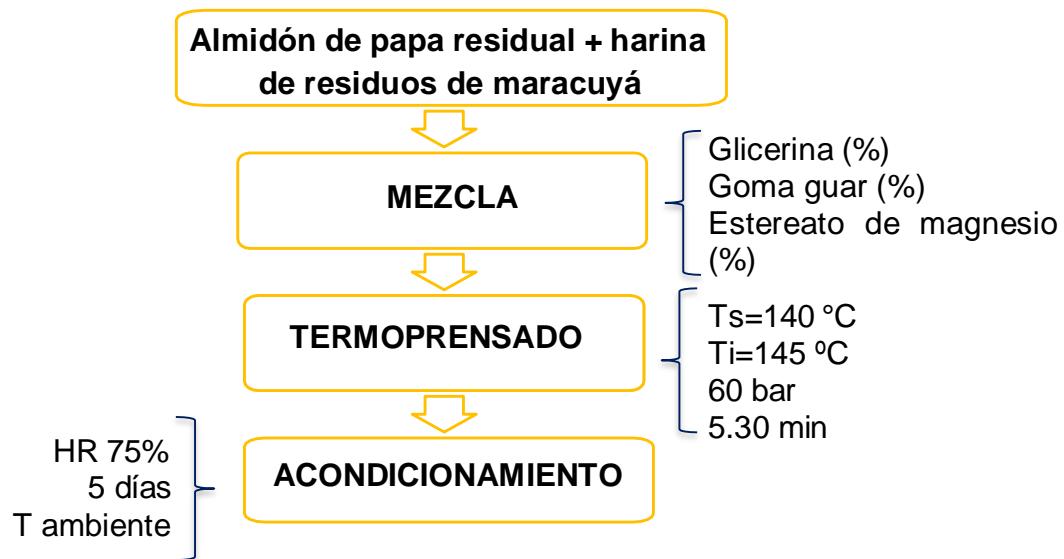
**Batido**



**Masa**

## ANEXO 5: OBTENCIÓN DE BANDEJAS BIODEGRADABLES CON ALMIDÓN DE PAPA RESIDUAL Y HARINA DE RESIDUOS DE MARACUYÁ

Diagrama de flujo de la obtención de envases biodegradables



Masa



Termoprensa



**Bandeja termoformada 100% almidón**



**Acondicionamiento en secador**



**Bandeja termoformada con almidón y  
harina de residuos**



**Envasado**