

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**



**“EFECTO DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN EN LAS  
CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS Y FUNCIONALES DE  
ALMIDÓN DE CAÑIHUA (*Chenopodium pallidicaule* Aellen)”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**YEFERSON MARTEL ARANDA**

**LIMA – PERÚ**

**2023**

---

**La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación  
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual de la UNALM)**

## Document Information

|                          |   |
|--------------------------|---|
| <b>Analyzed document</b> | DOCUMENTO DE TESIS-EXTRACCION ALMIDON CAÑIHUA-YEFERSON MARTEL ARANDA.pdf (D143262151) |
| <b>Submitted</b>         | 8/25/2022 6:36:00 PM  |
| <b>Submitted by</b>      | Indira Milagros Betalleluz Pallardel  |
| <b>Submitter email</b>   | ibp@lamolina.edu.pe   |
| <b>Similarity</b>        | 1%  |
| <b>Analysis address</b>  | ibp.unalm@analysis.arkund.com   |

## Sources included in the report

|           |  |  |
|-----------|--|--|
| <b>SA</b> | <b>Universidad Nacional Agraria La Molina / Tesis Marquez - Final.docx</b><br>Document Tesis Marquez - Final.docx (D128660480)<br>Submitted by: pmartinezt@lamolina.edu.pe<br>Receiver: pmartinezt.unalm@analysis.arkund.com                                   |  <b>5</b>   |
| <b>SA</b> | <b>Libro-Almidón de banano.pdf</b><br>Document Libro-Almidón de banano.pdf (D18199035)   |  <b>2</b> |
| <b>W</b>  | URL: <a href="http://www.fao.org/3/a1028s/a1028s.pdf">http://www.fao.org/3/a1028s/a1028s.pdf</a><br>Fetched: 8/25/2022 6:36:00 PM  |  <b>1</b> |
| <b>SA</b> | <b>Universidad Nacional Agraria La Molina / Documento de Tesis - GUTIERREZ CASTILLO...docx</b><br>Document Documento de Tesis - GUTIERREZ CASTILLO...docx (D134843933)<br>Submitted by: cencina@lamolina.edu.pe<br>Receiver: cencina.unalm@analysis.arkund.com |  <b>2</b> |
| <b>SA</b> | <b>TESIS CONCLUIDO 21-12.docx 1.docx para el antiplagio.docx</b><br>Document TESIS CONCLUIDO 21-12.docx 1.docx para el antiplagio.docx (D48595690)   |  <b>1</b> |
| <b>SA</b> | <b>PROYECTO DE TESIS REFIMAL IMPRIMIR .docx</b><br>Document PROYECTO DE TESIS REFIMAL IMPRIMIR .docx (D57824941)   |  <b>1</b> |
| <b>SA</b> | <b>Lisbeth Manzanillas_Trabajo de Titulación V3_22-09-2017.docx</b><br>Document Lisbeth Manzanillas_Trabajo de Titulación V3_22-09-2017.docx (D31224480)   |  <b>1</b> |

## Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS "EFECTO DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS Y FUNCIONALES DE ALMIDÓN DE CAÑIHUA (Chenopodium pallidicaule Aellen)"

TESIS

PARA OPTAR EL

TÍTULO DE INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS YEFERSON MARTEL ARANDA LIMA – PERÚ 2022 La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación (Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**“EFECTO DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN EN LAS CARACTERÍSTICAS  
FISICOQUÍMICAS Y FUNCIONALES DE ALMIDÓN DE CAÑIHUA**

**(*Chenopodium pallidicaule* Aellen)”**

Presentado por:

YEFERSON MARTEL ARANDA

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

---

Ritva Repo de Carrasco, PhD.

PRESIDENTE

---

Laura Linares García, PhD.

MIEMBRO

---

Dr. Edwin Baldeón Chamorro

MIEMBRO

---

Dra. Indira Betalleluz Pallardel

ASESORA

---

Jenny Valdez Arana, PhD.

CO-ASESORA

Lima – Perú

2023

## **Dedicatoria**

*Dedicada a mis padres Rosa Aranda y Elmer Martel por ser los grandes amores de mi vida, siempre confiar y apoyarme en todo mi proceso personal y profesional.*

*A mis hermanos Katherine, Angelina y Miguel Ángel por ser parte fundamental en todo en mi crecimiento personal.*

*A mi sobrino Yahir, quien alegra el hogar con su presencia.*

## **Agradecimientos**

Especial agradecimiento a mi asesora Dra. Indira Betalleluz Pallardel por su guía, confianza, paciencia, enseñanza y apoyo incondicional en la presente investigación. A la PhD. Jenny Valdez Arana, co-asesora por sus oportunas recomendaciones y correcciones a mi trabajo. También agradezco a mi amiga Sandra Pari Choque y al Ing. Alejandro Saito por su apoyo en todo momento durante la elaboración de la presente investigación

Agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) por el financiamiento al **PROYECTO N° 136-2020- FONDECYT**.

---

**Abreviaturas estándar y símbolos para unidades**

---

| <b>Símbolo</b> | <b>Nombre</b>                      | <b>Unidad</b> |
|----------------|------------------------------------|---------------|
| PH             | Poder de hinchamiento              | g/g           |
| S              | Solubilidad                        | %             |
| CAA            | Capacidad de absorción de agua     | g/g           |
| CAO            | Capacidad de absorción de aceite   | g/g           |
| %T             | Porcentaje de transmitancia        | %T            |
| %S             | Porcentaje de sinéresis            | %S            |
| To             | Temperatura de inicio              | °C            |
| Tp             | Temperatura pico                   | °C            |
| Tc             | Temperatura de conclusión          | °C            |
| $\Delta H$     | Entalpía específica                | J/g           |
| VP             | Viscosidad pico                    | cP            |
| VM             | Viscosidad mínima                  | cP            |
| VF             | Viscosidad final                   | cP            |
| BD             | <i>Breakdown</i>                   | cP            |
| SB             | <i>Setback</i>                     | cP            |
| tP             | Tiempo pico                        | min           |
| TP             | Temperatura de pasta               | °C            |
| $\eta$         | Índice de comportamiento reológico |               |
| K              | Índice de consistencia             | Pa.sn         |
| G'             | Módulo de almacenamiento           | Pa            |
| G''            | Módulo de pérdida                  | Pa            |
| $\sigma$       | Esfuerzo cortante                  | Pa            |
| $\sigma_0$     | Umbral de fluencia                 | Pa            |

---

## RESUMEN

La cañihua es un pseudocereal nativo del altiplano andino que, aún con iguales o mejores propiedades nutricionales y funcionales que la quinua o el amaranto, ha recibido poca atención. Además de sobresalir por su contenido y calidad proteica, la cañihua también posee un alto contenido de almidón, distinguiéndose de las fuentes comerciales por su tamaño de gránulo muy pequeño (0,5 – 1,5  $\mu\text{m}$ ) que le confiere propiedades singulares. Para poder estudiar la potencial funcionalidad del almidón de cañihua, es necesario seleccionar un método de extracción, que además de presentar alto rendimiento y pureza, no altere sus propiedades funcionales. Por el alto contenido de proteínas, grasa y fibra en este grano, se recomienda métodos de extracción con solventes alcalinos, no obstante, no se sabe el efecto que puedan producir en sus propiedades funcionales. Por lo mencionado, la presente investigación tuvo como objetivo estudiar el efecto de tres métodos de extracción de almidón de cañihua de la variedad Illpa INIA en el rendimiento, pureza y en sus propiedades físico-químicas y funcionales: a) M1: bajo remojo acuoso/12 h con posteriores lavados con solución NaOH al 0,25 por ciento, b) M2: remojo en solución NaOH al 0,25 por ciento/12 h con posteriores lavados con agua y c) M3: extracción bajo remojo acuoso/12h con posteriores lavados con agua, en comparación con el almidón de maíz (control). Los resultados obtenidos fueron analizados estadísticamente utilizando el diseño completamente al azar (DCA) y posteriormente una comparación de medias utilizando la prueba LSD Tukey. Los métodos alcalinos (M1 y M2) presentaron altos rendimientos comparados con el método acuoso. El tratamiento M1 obtuvo el mayor rendimiento (37,06 por ciento), seguido de M2 (35,34 por ciento) y M3 (26,39 por ciento). Los almidones de cañihua obtenidos bajo los tres métodos de extracción presentaron bajo contenido de grasa (0 – 0,20 por ciento), proteína (0,78 – 1,56 por ciento), fibra cruda (0 – 0,02 por ciento), amilosa (10,54 – 15,60 por ciento) y altos valores de luminosidad e índice de blancura, lo que indicó el alto grado de pureza. El tratamiento con mayor exposición al medio alcalino (M2) produjo cambios en la mayoría de las propiedades funcionales, presentando menor solubilidad a 95 °C (12,9; 11,2 y 12,2 por ciento para M1, M2 y M3, respectivamente), menor poder de hinchamiento (13,8; 11,8 y 13,3 por ciento para M1, M2 y M3, respectivamente), mayor sinéresis en refrigeración (8,9; 21,3 y 9,5 por ciento para M1, M2 y M3, respectivamente). En sus propiedades de formación de pasta presentó menor viscosidad pico, mínima, final y mayor *setback*. Sus geles presentaron un comportamiento no newtoniano, tipo pseudoplastico y fueron más duros. Los tres tratamientos no mostraron diferencias

significativas en sus propiedades térmicas ( $T_p$ ,  $T_o$ ,  $T_c$  y  $\Delta H$  de gelatinización). Los resultados demostraron que una exposición prolongada a medios alcalinos produce cambios importantes en las propiedades funcionales del almidón que afectarían su potencial uso agroindustrial. Finalmente, el almidón de cañihua resaltó con respecto al almidón de maíz, por su menor contenido de amilosa, menor claridad, mayor blancura, menor sinéresis, menores temperaturas y energía de gelatinización, mayor viscosidad máxima y menor tendencia a la retrogradación, menor dureza lo que lo distingue como una fuente potencial con propiedades singulares.

**Palabras clave:** Almidón de cañihua, kañawa, método de extracción, propiedades fisicoquímicas y funcionales, cereal andino.

## ABSTRACT

Cañihua is a pseudocereal native to the Andean highlands that, even with equal or better nutritional and functional properties than quinoa or amaranth, has received little attention. In addition to standing out for its protein content and quality, cañihua also has a high starch content, distinguishing itself from commercial sources due to its very small granule size (0,5 – 1,5  $\mu\text{m}$ ), which gives it unique properties. In order to study the potential functionality of cañihua starch, it is necessary to select an extraction method that, in addition to presenting high yield and purity, does not alter its functional properties. Due to the high content of protein, fat and fiber in this grain, extraction methods with alkaline solvents are recommended; however, the effect they may produce on its functional properties is not known. Due to the aforementioned, the objective of this research was to study the effect of three extraction methods of cañihua starch of the Illpa INIA variety on yield, purity, and its physical-chemical and functional properties: a) M1: under aqueous soaking/ 12 h with subsequent washings with 0,25 percent NaOH solution, b) M2: soaking in 0,25 percent NaOH solution/12h with subsequent washings with water and c) M3: extraction under aqueous soaking/12h with subsequent washings with water, compared to cornstarch (control). The results obtained were statistically analyzed using the completely randomized design (DCA) and later a comparison of means using the LSD Tukey test. The alkaline methods (M1 and M2) presented high yields compared to the aqueous method. Treatment M1 obtained the highest yield (37,06 percent), followed by M2 (35,34 percent) and M3 (26,39 percent). The cañihua starches obtained under the three extraction methods presented low content of fat (0 – 0,20 percent), protein (0,78 – 1,56 percent), crude fiber (0 – 0,02 percent), amylose (10,54 – 15,60 percent) and high values of luminosity and whiteness index, which indicated the high degree of purity. The treatment with greater exposure to the alkaline medium (M2) produced changes in most of the functional properties, presenting lower solubility at 95 °C (12,9; 11,2 and 12,2 percent for M1, M2 and M3, respectively), lower swelling power (13,8; 11,8 and 13.3 percent for M1, M2 and M3, respectively), greater syneresis in refrigeration (8,9; 21,3 and 9,5 percent for M1, M2 and M3, respectively). In its paste formation properties, it presented lower peak, minimum, and final viscosity and higher setback. Their gels presented a non-Newtonian, pseudoplastic type behavior and were harder. The three treatments did not show significant differences in their thermal properties ( $T_p$ ,  $T_o$ ,  $T_c$  and  $\Delta H$  of gelatinization). The results showed that prolonged exposure to alkaline media produces important changes in the functional properties of starch that would affect its

potential agro-industrial use. Finally, cañihua starch stood out with respect to corn starch, due to its lower amylose content, less clarity, greater whiteness, less syneresis, lower temperatures and gelatinization energy, higher maximum viscosity and less tendency to retrogradation, lower hardness lo that distinguishes it as a potential source with unique properties. The results show that prolonged exposure to alkaline media produces important changes in the functional properties of starch that would affect its potential agro-industrial use. Finally, cañihua starch stands out with respect to corn starch, due to its lower amylose content, lower clarity, higher whiteness, lower syneresis, lower temperatures and gelatinization energy, higher maximum viscosity and lower tendency to retrogradation, lower hardness that distinguishes it as a potential source with unique properties.

**Keywords:** Cañihua starch, kañawa, extraction method, physicochemical and functional properties, Andean cereal.

# ÍNDICE GENERAL

## RESUMEN

## *ABSTRACT*

|   |           |
|---|-----------|
| <b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>II. REVISIÓN DE LA LITERATURA .....</b>  | <b>3</b>  |
| 2.1. CAÑIHUA .....  | 3         |
| 2.1.1. GENERALIDADES DE LA CAÑIHUA.....   | 3         |
| 2.1.2. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA.....  | 4         |
| 2.1.3. VARIEDADES DE CAÑIHUA .....  | 4         |
| 2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y NUTRICIONAL.....   | 5         |
| 2.3. ALMIDÓN .....  | 9         |
| 2.3.1. AMILOSA .....  | 9         |
| 2.3.2. AMILOPECTINA .....   | 10        |
| 2.4. EXTRACCION DE ALMIDÓN .....  | 11        |
| 2.4.1. ETAPAS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN.....   | 12        |
| 2.4.2. FACTORES QUE AFECTAN LA EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN.....   | 16        |
| 2.4.3. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN .....   | 18        |
| 2.5. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y FUNCIONALES DEL ALMIDÓN .....   | 21        |
| 2.5.1. CONTENIDO DE AMILOSA Y AMILOPECTINA.....   | 21        |
| 2.5.2. TEMPERATURA DE GELATINIZACIÓN .....  | 24        |
| 2.5.3. PROPIEDADES DE HIDRATACIÓN: PODER DE HINCHAMIENTO,<br>SOLUBILIDAD Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA ..... | 25        |
| 2.5.4. RETROGRADACIÓN.....  | 26        |
| 2.5.5. CLARIDAD DE GELES .....  | 27        |
| 2.5.6. PROPIEDADES REOLÓGICAS .....   | 28        |
| <b>III. METODOLOGÍA .....</b>   | <b>32</b> |
| 3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN .....   | 32        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 3.2.       | MATERIA PRIMA .....                                       | 32        |
| 3.3.       | MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS .....                     | 32        |
| 3.3.1.     | MATERIALES .....  | 32        |
| 3.3.2.     | EQUIPOS.....  | 33        |
| 3.3.3.     | REACTIVOS .....   | 34        |
| 3.4.       | MÉTODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....                            | 35        |
| 3.4.1.     | MÉTODO 1: REMOJO ACUOSO Y LAVADO ALCALINO .....           | 35        |
| 3.4.2.     | MÉTODO 2: REMOJO ALCALINO Y LAVADO ACUOSO .....           | 41        |
| 3.4.3.     | MÉTODO 3: REMOJO Y LAVADO ACUOSO.....                     | 47        |
| 3.5.       | MÉTODO DE ANÁLISIS .....                                  | 53        |
| 3.5.1.     | RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN.....                            | 53        |
| 3.5.2.     | CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA.....                        | 54        |
| 3.5.3.     | CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL.....                            | 55        |
| 3.6.       | METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....                            | 59        |
| 3.6.1.     | DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....          | 60        |
| <b>IV.</b> | <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>                       | <b>62</b> |
| 4.1.       | EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE CAÑIHUA VARIEDAD ILLPA-INIA..... | 62        |
| 4.2.       | CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA.....                        | 68        |
| 4.2.1.     | ANÁLISIS PROXIMAL .....                                   | 68        |
| 4.2.2.     | DETERMINACIÓN DE AMILOSA.....                             | 72        |
| 4.2.3.     | EVALUACIÓN DE COLOR.....                                  | 75        |
| 4.3.       | CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL.....                            | 76        |
| 4.3.1.     | PROPIEDADES DE HIDRATACIÓN .....                          | 76        |
| 4.3.2.     | CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ACEITE (CAO).....               | 84        |
| 4.3.4.     | CLARIDAD DE GELES .....                                   | 88        |
| 4.3.5.     | PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS GELES DE ALMIDÓN .....        | 92        |
| 4.3.6.     | PROPIEDADES REOLÓGICAS .....                              | 95        |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| <b>V. CONCLUSIONES.....</b>     | <b>111</b> |
| <b>VI. RECOMENDACIONES.....</b> | <b>114</b> |
| <b>VII. BIBLIOGRAFÍA.....</b>   | <b>115</b> |
| <b>VIII. ANEXOS.....</b>        | <b>135</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1: Principales características de las variedades mejoradas de cañihua.....   | 5   |
| Tabla 2: Composición química de la cañihua, quinua y trigo (g/100 g materia seca).....   | 6   |
| Tabla 3: Contenido de aminoácidos (g aminoácido/16 g de nitrógeno) de cañihua en comparación de otros granos .....               | 7   |
| Tabla 4: Ácidos grasos insaturados (%) presentes en aceite de cañihua y quinua. ....   | 8   |
| Tabla 5: Contenido de azúcares en cañihua y quinua (g/100 g materia seca).....   | 8   |
| Tabla 6: Propiedades fisicoquímicas de amilosa y amilopectina .....  | 23  |
| Tabla 7: Propiedades del Análisis de Perfil de Textura.....  | 30  |
| Tabla 8: Metodología Experimental .....  | 61  |
| Tabla 9: Rendimiento de extracción de almidón de cañihua variedad Illpa-INIA .....   | 64  |
| Tabla 10: Análisis proximal de almidón y grano entero de cañihua variedad Illpa INIA...  | 71  |
| Tabla 11: Contenido de amilosa y amilopectina de los almidones nativos .....   | 71  |
| Tabla 12: Parámetros de color de los almidones .....   | 75  |
| Tabla 13: Capacidad de absorción de agua (g/g) de almidones nativos .....  | 77  |
| Tabla 14: Poder de hinchamiento (g/g) de almidones nativos.....  | 79  |
| Tabla 15: Solubilidad (%) de almidones nativos.....  | 81  |
| Tabla 16: Capacidad de absorción de aceite (CAO) de los almidones nativos .....  | 84  |
| Tabla 17: Sinéresis (%) de geles de almidón nativo.....  | 86  |
| Tabla 18: Transmitancias de los geles de almidón nativo .....  | 89  |
| Tabla 19: Parámetros de gelatinización de los almidones nativos .....  | 92  |
| Tabla 20: Propiedades de formación de pasta de almidones nativos .....   | 96  |
| Tabla 21: Parámetros de la ecuación de Herschel-Bulkley que describen el comportamiento de flujo de los geles de almidón .....   | 101 |
| Tabla 22: Parámetros de la ecuación de ley de potencia que describen las propiedades viscoelásticas de los geles de almidón..... | 104 |
| Tabla 23: Parámetros del análisis de perfil de textura de los geles de almidón .....   | 108 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |     |
|--|-----|
| Figura 1: Estructura del gránulo de almidón y la disposición de sus componentes .....                        | 11  |
| Figura 2: Esquema para la extracción de almidón de diversas fuentes vegetales .....                          | 13  |
| Figura 3: Sedimentación de los componentes del grano post centrifugación.....                                | 15  |
| Figura 4: Gelatinización del almidón .....   | 24  |
| Figura 5: Curva de perfil de textura instrumental.....   | 31  |
| Figura 6: Diagrama de flujo del método de extracción 1 para la obtención de almidón de cañihua.....          | 37  |
| Figura 7: Diagrama de flujo del método de extracción 2 para la obtención de almidón de cañihua.....          | 45  |
| Figura 8: Diagrama de flujo del método de extracción 3 para la obtención de almidón de cañihua.....          | 49  |
| Figura 9: Capacidad de absorción de agua de los almidones en función a la temperatura de los almidones ..... | 78  |
| Figura 10: Poder de hinchamiento en función a la temperatura de los almidones .....                          | 80  |
| Figura 11: Solubilidad (%) en función a la temperatura de los almidones.....                                 | 82  |
| Figura 12: Sinéresis (%) en función a la temperatura de los geles de almidón.....                            | 87  |
| Figura 13: Porcentaje de transmitancia en función al tiempo de almacenamiento de los geles de almidón .....  | 90  |
| Figura 14: Termogramas de los geles de almidón.....  | 93  |
| Figura 15: Curvas de formación de pasta de almidones nativos .....   | 95  |
| Figura 16: Curva de comportamiento de flujo de los geles de almidón .....                                    | 100 |
| Figura 17: Barrido de amplitud de los geles de almidones nativos .....                                       | 103 |
| Figura 18: Barrido de frecuencia de los geles de almidones nativos .....                                     | 105 |
| Figura 19: Análisis de perfil de textura de los geles de almidón.....  | 107 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| ANEXO 1: DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AMILOSA .....  | 135 |
| ANEXO 2: ANOVA Y LSD PARA EL RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN .....  | 137 |
| ANEXO 3: ANOVA Y LSD PARA EL ANÁLISIS PROXIMAL .....   | 138 |
| ANEXO 4: ANOVA Y LSD PARA EL PORCENTAJE DE AMILOSA .....   | 142 |
| ANEXO 5: ANOVA Y LSD PARA EL PORCENTAJE DE AMILOPECTINA .....  | 143 |
| ANEXO 6: ANOVA Y LSD PARA LOS PARÁMETROS DE COLOR .....  | 144 |
| ANEXO 7: ANOVA Y LSD PARA LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA .  | 148 |
| ANEXO 8: ANOVA Y LSD PARA EL PODER DE HINCHAMIENTO .....   | 152 |
| ANEXO 9: ANOVA Y LSD PARA LA SOLUBILIDAD .....   | 156 |
| ANEXO 10: ANOVA Y LSD PARA LA SINÉRESIS .....  | 160 |
| ANEXO 11: ANOVA Y LSD PARA CLARIDAD DE GELES .....   | 164 |
| ANEXO 12: ANOVA Y LSD PARA LAS PROPIEDADES TÉRMICAS.....   | 169 |
| ANEXO 13: ANOVA Y LSD PARA LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS (PROPIEDADES DE FORMACIÓN DE PASTA) .....                  | 173 |
| ANEXO 14: ANOVA Y LSD PARA LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS (COMPORTAMIENTO DE FLUJO) .....                            | 179 |
| ANEXO 15: ANOVA Y LSD PARA LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS (PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS – BARRIDO DE FRECUENCIA) ..... | 182 |
| ANEXO 16: ANOVA Y LSD PARA LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS (ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA) .....                      | 184 |

## I. INTRODUCCIÓN

La cañihua es un pseudocereal nativo que crece en el altiplano andino, entre heladas y sequías donde pocos cultivos soportan estas condiciones, pertenece a la familia Amaranthaceae, al igual que la quinua, con la que comparten propiedades como su alto valor nutricional, especialmente en el contenido y calidad de su proteína. No obstante, a pesar de su potencial, su consumo e industrialización es limitado, por lo que hasta la actualidad se lo considera un cultivo subexplotado y marginado.

Este grano andino se muestra como un cultivo potencial, no sólo para su uso directo como alimento, sino como materia prima para la obtención de otros productos con mayor valor agregado que exploten la cantidad y calidad de sus componentes más importantes como su proteína y almidón. Las investigaciones de Steffolani *et al.* (2013), Perez-Rea y Antezana-Gomez (2018) y Fuentes *et al.* (2018) destacan, además de su alto contenido de almidón (30 - 50 por ciento), el tamaño de sus gránulos, que son aún más pequeños que la quinua y el amaranto. Asimismo, se ha reportado contenidos de amilosa bajos entre 10,7 y 17,4 por ciento (Steffolani *et al.*, 2013). Estas propiedades lo señalan como un buen candidato para la estabilización de emulsiones de tipo *pickering* (Altuna *et al.*, 2018). Otras investigaciones han atribuido a los gránulos pequeños una fácil digestibilidad y es una propiedad deseable en la formulación de film biodegradables, para el encapsulamiento de sabores y en las formulaciones cosméticas como polvos faciales y en sistemas de dispersión aerosol.

A pesar de los avances realizados en el estudio de este pseudocereal, aún se necesita mayor investigación y difusión para fortalecer su expansión. Es así que, esta investigación aporta al escaso conocimiento, profundizando en su potencialidad como fuente de almidón y abordando como primera etapa el efecto de los métodos de extracción de almidón en las propiedades fisicoquímicas y funcionales. Además, de contribuir presentando una alternativa de industrialización con un producto con gran aplicación no sólo en el sector alimentario sino en otros como el farmacéutico que pueda beneficiar indirectamente a los consumidores, agricultores y a la respectiva región, ya que promovería el trabajo, comercio y posibles inversiones privadas en un futuro.

El primer paso para evaluar el potencial de una fuente de almidón es seleccionar el método de extracción bajo condiciones ideales que provoquen mínimos cambios estructurales, máxima recuperación, pureza y costos bajos (Han y Hamaker, 2002). A diferencia de la separación del almidón de raíces y tubérculos que es un proceso más sencillo, la extracción de almidón de cereales es más difícil debido al menor contenido de humedad, las interacciones proteína-almidón, la solubilidad de sus proteínas, así como a las características morfológicas de sus gránulos como su diámetro pequeño. Por lo tanto, para solubilizar las fracciones de proteínas y recuperar el almidón son requeridas etapas adicionales como tratamientos alcalinos, enzimáticos o maceración ácida, además de etapas de centrifugación a alta velocidad. El método más ampliamente usado con este fin es el método alcalino que resulta en un bajo contenido residual de proteínas y alto rendimiento. Existen diferentes métodos alcalinos propuestos los cuáles resultan en diferentes rendimientos y calidad de los almidones. Asimismo, existen reportes que indican que este método puede provocar modificaciones en las propiedades funcionales del almidón dependiendo de la concentración y tiempo de exposición a estos medios.

Por lo tanto, esta investigación tuvo como objetivo general: evaluar el efecto del método de extracción en sus propiedades fisicoquímicas y funcionales.

Los objetivos específicos fueron:

- Evaluar el rendimiento de extracción y la pureza de los almidones obtenidos con diferentes métodos de extracción.
- Determinar las características fisicoquímicas (composición proximal, contenido de amilosa – amilopectina y evaluación del color) y funcionales (capacidad de absorción de agua, poder de hinchamiento, solubilidad, capacidad de absorción de aceite, sinéresis y claridad de geles) de los almidones obtenidos.
- Determinar las propiedades térmicas: temperatura inicial ( $T_o$ ), temperatura pico ( $T_p$ ) y temperatura final ( $T_f$ ); así como la entalpía ( $\Delta H$ ) de gelatinización.
- Determinar las propiedades reológicas: comportamiento del flujo de los geles de almidón, sus propiedades viscoelásticas (módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y módulo de pérdida ( $G''$ )) y el análisis de perfil de textura (TPA).

## II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1. CAÑIHUA

#### 2.1.1. GENERALIDADES DE LA CAÑIHUA

La cañihua (*Chenopodium pallidicaule*) es un grano notablemente nutritivo de las tierras altas de los Andes. Su contenido de proteína y calidad es excepcional y también es rico en micronutrientes como hierro y calcio. Se cultiva en altiplanos andinos a más de 4000 m.s.n.m. Para las personas que viven de la agricultura de subsistencia en el altiplano, la cañihua es extremadamente importante como fuente principal de calorías y proteínas de buena calidad. Es una planta resistente que florece en suelos pobres y rocosos y puede sobrevivir a las heladas y la sequía (Repo-Carrasco *et al.*, 2009).

A diferencia de la quinua que contiene saponinas de sabor amargo, la cañihua puede usarse directamente como alimento sin lavar. Aunque se pensó que no contenía saponinas, (Rastrelli *et al.*, 1996) encontraron siete saponinas triterpénicas en semillas de cañihua; sin embargo, el contenido es muy bajo y las saponinas no le dan al producto un sabor amargo. Además, la cañihua es relativamente rica en aceite que contiene principalmente ácidos grasos insaturados y el contenido de tocoferoles en el aceite de cañihua es más alto que la del aceite de maíz (Repo-Carrasco *et al.*, 2003).

### **2.1.2. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA**

Según Prudencio y Vargas (2018), la cañihua está ubicada dentro de la sección Chenopodia y tiene la siguiente clasificación taxonómica:

- Nombre botánico: *Chenopodium pallidicaule* Aellen
- Reino: Vegetal
- División: Fanerogama
- Clase: Angiosperma
- Sub clase: Dicotiledonia
- Orden: Centrospermales
- Familia: Amaranthaceae
- Género: *Chenopodium*
- Especie: *Chenopodium pallidicaule*

### **2.1.3. VARIEDADES DE CAÑIHUA**

La cañihua tiene una amplia variabilidad genética, pues presenta una tasa de autofecundación del 64 y 89 por ciento la cual se observa en los diferentes colores de las plantas y semillas. Debido a ello, el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) ha logrado obtener variedades mejoradas. Ramis, Cupi e Illpa INIA, consideradas como las primeras obtenidas mediante los métodos de mejoramiento por selección individual (panoja surco) y estudios de estabilidad de rendimiento (Apaza, 2010).

A continuación, en la Tabla 1, se detallan las características de estas variedades mejoradas de cañihua.

**Tabla 1: Principales características de las variedades mejoradas de cañihua**

| <b>Características</b>    | <b>Variedad</b>        |                  |              |
|---------------------------|------------------------|------------------|--------------|
|                           | <b>Illpa INIA 4006</b> | <b>Cupi</b>      | <b>Ramis</b> |
| Habitud de crecimiento    | Saiwa                  | Saiwa            | Saiwa        |
| Altura de la planta       | 67 cm                  | 60 cm            | 52 cm        |
| Diámetro de tallo         | 5,0 mm                 | 4,0 mm           | 4,5 mm       |
| Color de tallo y hojas    | Anaranjado             | Púrpura pálida   | Púrpura      |
| Color de estrías          | Rojo                   | Púrpura pálida   | Púrpura      |
| Forma de la lámina foliar | Ancha ovada            | Ancha ovada      | Ancha ovada  |
| Aspecto del perigonio     | Cerrado                | Cerrado          | Semiabierto  |
| Color del perigonio       | Crema suave            | Gris crema suave | Gris oscuro  |
| Color del epidermo        | Café claro             | Café claro       | Café oscuro  |
| Diámetro del grano        | 1,0 a 1,1 mm           | 1,0 a 1,1 mm     | 1,1 a 1,2 mm |

FUENTE: Apaza (2010)

## **2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y NUTRICIONAL**

La cañihua se caracteriza por su elevado contenido de proteína de alto valor biológico, en comparación a otros granos. Además de ello, posee ácidos grasos poliinsaturados (42,6 por ciento) como el  $\omega$ -6 (ácido linoleico). Su alto contenido de fibra dietética, es una de las características que favorece a la salud de las personas, pues ayuda a la reducción de problemas digestivos y reducción de colesterol en la sangre. También concentra grandes proporciones de calcio, magnesio, sodio, fósforo, hierro, zinc, vitamina E y complejo vitamínico B; por lo que los nutricionistas la comparan con la leche (Apaza, 2010).

Por otro lado, contiene un buen nivel de compuestos fenólicos totales, que presentan cualidades bioactivas de alta capacidad antioxidante (Bartolo, 2013). En la Tabla 2 se muestra la composición química de los granos de cañihua, en comparación con otros granos como la quinua y el trigo.

**Tabla 2: Composición química de la cañihua, quinua y trigo (g/100 g materia seca)**

|               | <b>Cañihua</b> | <b>Quinua</b> | <b>Trigo</b> |
|---------------|----------------|---------------|--------------|
| Proteínas     | 18,8           | 14,4          | 16,0         |
| Lípidos       | 7,6            | 6,0           | 2,9          |
| Carbohidratos | 63,4           | 72,6          | 74,1         |
| Fibra         | 6,1            | 4,0           | 2,6          |
| Ceniza        | 4,1            | 2,9           | 1,8          |

FUENTE: Repo-Carrasco *et al.* (2013)

#### **a. Proteínas**

Los granos de cañihua presentan un alto contenido de proteínas, comparado con otros granos, que varía entre 15 a 19 por ciento (Repo-Carrasco & Encina, 2008). Las proteínas de la cañihua pertenecen principalmente al grupo de la albúmina y globulina, pues esta representa el 45 por ciento de la fracción proteica total, el 23 por ciento pertenece a las prolaminas y el 32 por ciento restante a las globulinas y proteínas insolubles (Repo-Carrasco *et al.*, 2003).

Las proteínas basan su importancia en la calidad, los granos de cañihua poseen una composición equilibrada de aminoácidos, siendo particularmente rica en lisina (5 – 6 por ciento), isoleucina y triptófano (Tabla 3), asimismo, tiene una composición equilibrada de aminoácidos esenciales similar a la composición de la caseína de la leche.

**Tabla 3: Contenido de aminoácidos (g aminoácido/16 g de nitrógeno) de cañihua en comparación de otros granos**

| Aminoácido      | Cañihua | Quinoa | Trigo |
|-----------------|---------|--------|-------|
| Ácido aspártico | 7,9     | 7,8    | 4,7   |
| Treonina        | 3,3     | 3,4    | 2,9   |
| Serina          | 3,9     | 3,9    | 4,6   |
| Ácido glutámico | 13,6    | 13,2   | 31,3  |
| Prolina         | 3,2     | 3,4    | 10,4  |
| Glicina         | 5,2     | 5,0    | 6,1   |
| Alanina         | 4,1     | 4,1    | 3,5   |
| Valina          | 4,2     | 4,2    | 4,6   |
| Isoleucina      | 3,4     | 3,4    | 4,3   |
| Leucina         | 6,1     | 6,1    | 6,7   |
| Tirosina        | 2,3     | 2,5    | 3,7   |
| Fenilalanina    | 3,7     | 3,7    | 4,9   |
| Lisina          | 5,3     | 5,6    | 2,8   |
| Histidina       | 2,7     | 2,7    | 2,0   |
| Arginina        | 8,3     | 8,1    | 4,8   |
| Metionina       | 3,0     | 3,1    | 1,3   |
| Cistina         | 1,6     | 1,7    | 2,2   |
| Triptófano      | 0,9     | 1,1    | 1,2   |
| % N del grano   | 2,51    | 2,05   | 2,24  |
| % proteína      | 15,7    | 12,8   | 14,0  |

FUENTE: Repo-Carrasco *et al.* (2013)

## **b. Lípidos**

Los granos de cañihua son relativamente ricos en lípidos, contiene alrededor de siete por ciento. El aceite del grano de cañihua posee alto contenido en ácidos grasos insaturados, como el linoleico (Omega 6), oleico (Omega 9) y linolénico (Omega 3), expresados como porcentaje de ácidos grasos insaturados presentes en ácidos grasos totales (Tabla 4), además de poseer tocoferoles. Como se sabe, estos ácidos no pueden ser sintetizados por el organismo humano y es necesaria consumirlo en nuestra dieta para el crecimiento y el desarrollo, así como para mantener una buena salud y bajar el colesterol en la sangre (Apaza, 2010).

**Tabla 4: Ácidos grasos insaturados (%) presentes en aceite de cañihua y quinua.**

| Ácido graso insaturado     | Aceite de cañihua | Aceite de quinua |
|----------------------------|-------------------|------------------|
| Omega 6 (ácido linoleico)  | 42,59             | 50,24            |
| Omega 9 (ácido oleico)     | 42,59             | 26,04            |
| Omega 3 (ácido linolénico) | 6,01              | 4,77             |

FUENTE: Repo-Carrasco *et al.* (2003)

### c. Carbohidratos y fibra

El almidón es el carbohidrato más importante en todos los granos, aproximadamente en la cañihua, el contenido de almidón es de 63 – 66 por ciento (Repo-Carrasco *et al.*, 2003). A diferencia de otros granos, el almidón de la cañihua no ha sido estudiado tan ampliamente. Según Perez-Rea y Antezana-Gomez (2018), las semillas de cañihua contienen aproximadamente el 51 por ciento de almidón (en materia seca). Además del almidón, los granos de cañihua poseen azúcares libres en pequeñas cantidades, como glucosa, sacarosa y maltosa (Tabla 5). Repo-Carrasco *et al.* (2003) mencionan que la cañihua también posee un alto contenido de fibra dietética, especialmente la fracción insoluble, alrededor del 3,5 por ciento. Asimismo, Ligarda (2007) citado por Apaza (2010), reportó que el salvado de cañihua de la variedad Cupi, Ramis e Illpa INIA, tuvo un elevado contenido de fibra dietaria total (12,92 por ciento), especialmente de fibra insoluble (3,49 por ciento), fibra soluble con un elevado contenido de pentosanos (16,41 por ciento).

**Tabla 5: Contenido de azúcares en cañihua y quinua (g/100 g materia seca)**

|          | Cañihua | Quinua |
|----------|---------|--------|
| Glucosa  | 1,80    | 1,70   |
| Fructosa | 0,40    | 0,20   |
| Sacarosa | 2,60    | 2,90   |
| Maltosa  | 1,70    | 1,40   |

FUENTE: Repo-Carrasco *et al.* (2003)

#### **d. Minerales**

Los granos de cañihua poseen altas cantidades de hierro, calcio y fósforo. Según Repo-Carrasco *et al.* (2003), la cañihua posee 110 mg/100g de calcio, 15 mg/100 g de hierro y 375 mg/100 g de fósforo. Siempre que estos micronutrientes se encuentren en su forma biodisponible, serán cantidades suficientes para una dieta humana equilibrada (Vega-Gálvez *et al.*, 2010).

### **2.3. ALMIDÓN**

EL almidón es el carbohidrato de reserva más importante en los vegetales, encontrándose en diferentes órganos como semillas, frutos, tubérculos y raíces (Jobling, 2004). Este polisacárido se utiliza en la industria alimentaria como agente espesante, estabilizante, gelificante, formador de película, encapsulante, higroscópico, entre otros (Martínez *et al.*, 2019).

Es clasificado como un homopolisacárido donde su unidad básica es la glucosa. Éste es considerado como un biopolímero, constituido por dos principales componentes: amilosa y amilopectina. La estructura y la composición de los gránulos varía dependiendo de la fuente vegetal, así como sus propiedades fisicoquímicas y funcionales. Por ejemplo, los almidones de cereales poseen gránulos más pequeños y un mayor contenido de proteínas y lípidos en comparación a los almidones de tubérculos (Jobling, 2004).

El almidón es uno de los componentes principales de los granos andinos, se han reportado contenidos basados en materia seca entre 54 a 67 por ciento para la quinua, entre 55-64 por ciento para el amaranto y 51 por ciento para la cañihua, lo cual los señala como fuentes importantes de este polímero (Perez-Rea y Antezana-Gomez, 2018).

#### **2.3.1. AMILOSA**

La amilosa es esencialmente un polímero lineal. Se encuentra principalmente como cadenas lineales de aproximadamente 840 a 22,000 unidades de residuos de  $\alpha$ -D-glucopiranosil o

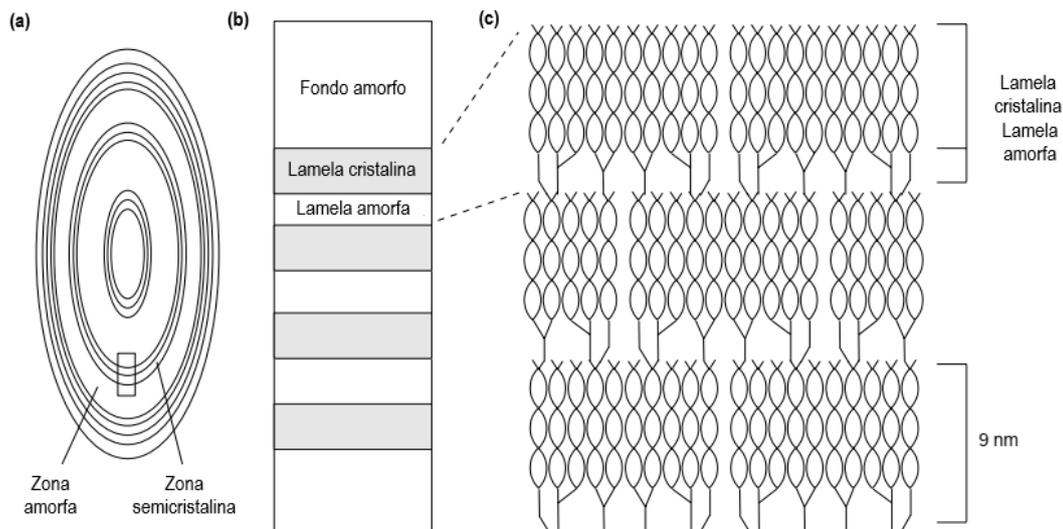
unidos por enlaces  $\alpha$ -(1-4) (peso molecular alrededor de 136 9 000 a  $3,5 \times 10^6$ ). Sin embargo, el número de unidades de anhidroglucosa varía bastante según la especie vegetal y la etapa de desarrollo. Algunas de las moléculas de amilosa están ramificadas en pequeña medida ( $\alpha$ -1-6-D glucopiranosas; una por 170 a 500 unidades de glucosilo) (Sjöo y Nilsson, 2018).

### **2.3.2. AMILOPECTINA**

La amilopectina es el componente ramificado donde las unidades de glucosa también están unidas por enlaces  $\alpha$ - (1-4) en las secciones lineales, y por enlaces  $\alpha$ - (1-6) en los puntos de ramificación. Según Matignon y Tecante (2017), la amilopectina está representado por un 94 – 96 por ciento de enlaces  $\alpha$  (1-4) y un 4-6 por ciento con enlaces  $\alpha$  (1-6).

La amilopectina es responsable de la lamela cristalina de almidón, aunque sus puntos de ramificación son parte del almidón amorfo. La presencia de regiones amorfas y cristalinas en los gránulos de almidón confiere a este biopolímero una entidad semicristalina. La cristalinidad de los gránulos de almidón depende de la fuente vegetal y se encuentra entre 15 y 45 por ciento. Los puntos de ramificación en el interior de la amilopectina hacen posible que las cadenas cortas lineales se empaqueten de manera eficiente en forma de doble hélices paralelas al lado izquierdo, la cual forma la base del granulo de almidón semicristalino (Jobling, 2004). En la Figura 1, se muestra el esquema de la estructura del granulo de almidón, donde se muestra la alternancia de las zonas amorfas y semicristalinas (9 nm de grosor aproximadamente), donde los anillos de crecimiento se forman a partir de los pares de estas zonas. Cada lámina cristalina consiste en grupos de cadenas paralelas de glucano enlazadas  $\alpha$ 1-4 y empaquetadas de forma helicoidal. Se considera que las zonas amorfas contienen amilopectina en un estado menos ordenado junto con la amilosa (Jobling, 2004).

Según Matignon y Tecante (2017), se han logrado avances significativos para dilucidar la estructura de los anillos de crecimiento cristalinos, sin embargo, los amorfos son aún poco conocidos. Asimismo, dichos autores mencionan que estos últimos podrían afectar profundamente a la funcionalidad del almidón y poseer un orden molecular distinto de acuerdo al tipo de almidón.



**Figura 1: Estructura del gránulo de almidón y la disposición de sus componentes**

FUENTE: Jobling (2004)

La ubicación exacta de la amilosa dentro del gránulo es aún incierta, se cree que se encuentra predominantemente en las regiones amorfas, menos cristalinas. En almidones de trigo, se ha observado amilosa en algunos anillos de crecimiento, conocidos como amorfos y se cree que podría estar presente en parte como complejos amilosa/lípidos (Matignon y Tecante, 2017).

## 2.4. EXTRACCION DE ALMIDÓN

La extracción de almidón en la industria alimentaria se realiza mediante diversos métodos, que muestran distintas eficiencias de extracción, características fisicoquímicas y propiedades funcionales. Las condiciones ideales de extracción provocan cambios estructurales mínimos o nulos en los componentes extraídos. En el caso del almidón, no se desea dañar su fase cristalina ni despolimerizar (lee *et al.*, 2007). Para garantizar excelentes resultados en la caracterización fisicoquímica y funcional, el almidón obtenido debe ser de una gran pureza (>96 por ciento (p/p) de almidón) y estar exenta de otros compuestos vegetales como proteínas, fibra (soluble e insoluble) y lípidos. Estas impurezas, especialmente las gomas solubles, las proteínas y los lípidos, influyen en las propiedades del almidón, conduciendo una falsa caracterización. Es por ello que el método y el proceso (protocolo) a utilizar en el aislamiento es muy importante, debiendo cumplirse al pie de la letra y llevar a cabo un

proceso estandarizado. En la Figura 2 se presenta un flujo general para la extracción de almidón, haciendo énfasis en consideraciones específicas que requieren las diferentes fuentes vegetales. Debido a la insolubilidad de los gránulos de almidón en agua y su alta densidad, la mayoría de protocolos de extracción de almidón a nivel laboratorio han utilizado agua para lavar el almidón y la centrifugación para separarlo del resto de componentes de la fuente vegetal (Hoover y Ratnayake, 2005).

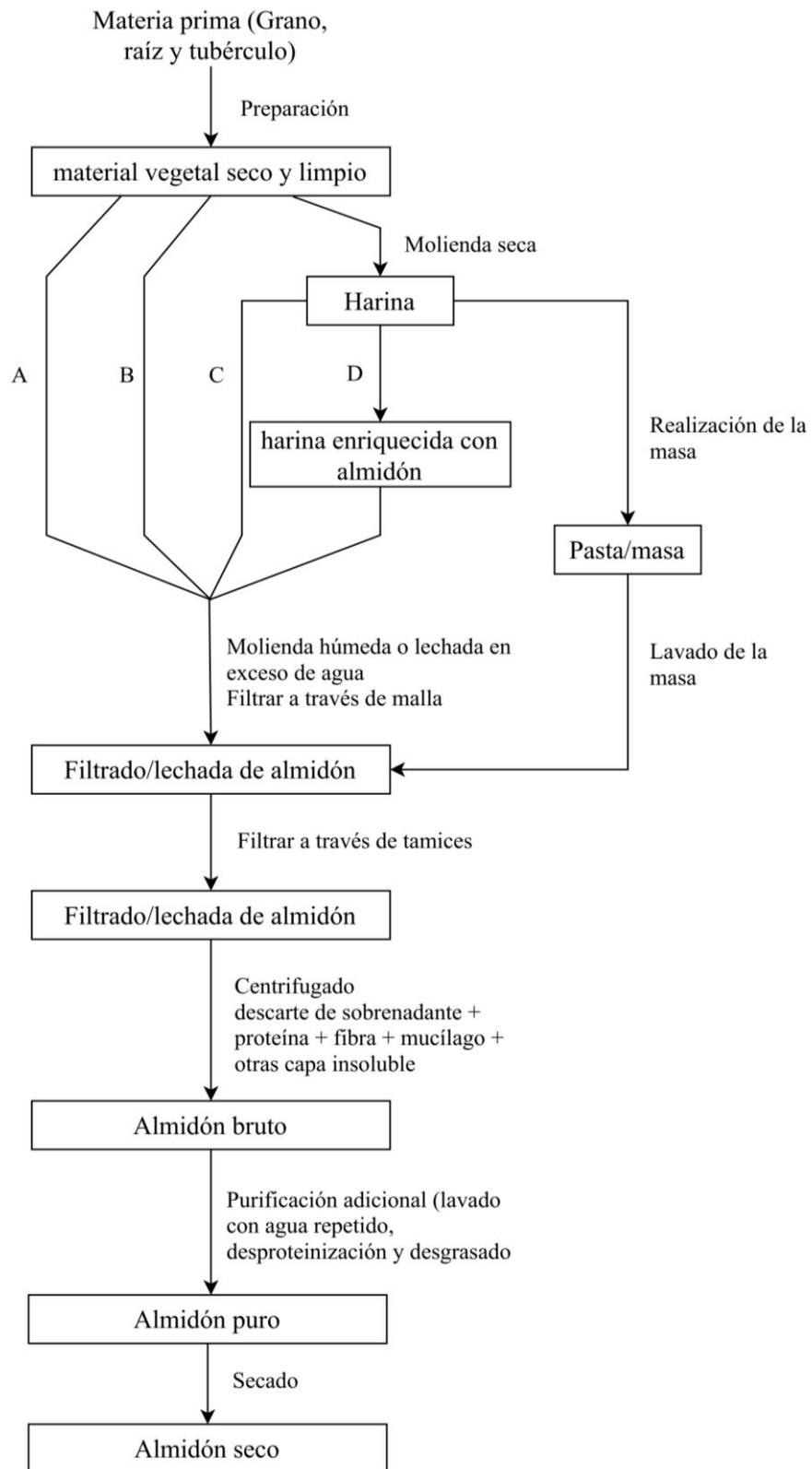
Los cereales son la principal fuente utilizada para el aislamiento y extracción del almidón. Su purificación es más difícil que la de otras fuentes botánicas, lo que probablemente se deba al menor contenido de humedad de los granos. Además, la mayor parte del almidón que se encuentra en los cereales está fuertemente asociado con la matriz proteica y, por lo tanto, la molienda del endospermo inflige inevitablemente daño físico a los gránulos (El Halal *et al.*, 2019).

#### **2.4.1. ETAPAS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN**

Existen diversas etapas, y modificaciones de estas, para la extracción y posterior aislamiento del almidón. Sin embargo, las principales etapas u operaciones unitarias son la preparación de la materia prima, la filtración, centrifugación y aislamiento o purificación del almidón. A continuación, se describen estas etapas, teniendo en cuenta las diferencias y consideraciones según la fuente vegetal a usar.

##### **a. REPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA**

La materia prima debe estar limpia de contaminantes como piedras, tierra, semillas en mal estado y residuos vegetales extraños (tallos, hojas, palillos, etc.). Para eliminar la mayoría de estos contaminantes se pueden utilizar cribas metálicas y sistemas de aspiración de aire. Las partículas de tierra que se adhieren al material vegetal pueden eliminarse mediante el lavado con agua. Sin embargo, el material lavado debe secarse (si se va a moler en seco para convertirlo en harina) hasta un contenido de humedad del 10 por ciento, ya que niveles de humedad más altos pueden provocar problemas durante la molienda en seco y el almacenamiento (Vasanthan, 2001).



**Figura 2: Esquema para la extracción de almidón de diversas fuentes vegetales**

FUENTE: Hoover y Ratnayake (2005)

El secado debe realizarse gradualmente a bajas temperaturas, ya que se ha demostrado que las altas temperaturas (>40°C) alteran las propiedades fisicoquímicas del almidón nativo. Los granos (cereales y leguminosas) se suelen descascarillar, para el caso de cereales de pequeño tamaño (cañihua y quinua), se realiza el descascarillado mediante un raspado en mallas metálicas, mediante una licuadora descascarilladora o de forma manual (frotado). Para tubérculos, raíces y ñames se realiza un pelado a mano (sin dañar ni perder la pulpa) y se cortan en cubos antes de la extracción del almidón. El remojo ablanda los materiales vegetales duros, especialmente los granos (por ejemplo, la cañihua), y facilita la molienda en húmedo, minimizando así el daño de los gránulos de almidón. El tiempo de remojo oscila entre 4 y 16 horas, dependiendo de la dureza del material vegetal. El remojo o la molienda en seco son pasos innecesarios en el aislamiento del almidón del tubérculo, la raíz y el ñame porque son materiales vegetales más blandos con un alto contenido de humedad (Hoover y Ratnayake, 2005).

#### **b. FILTRACIÓN**

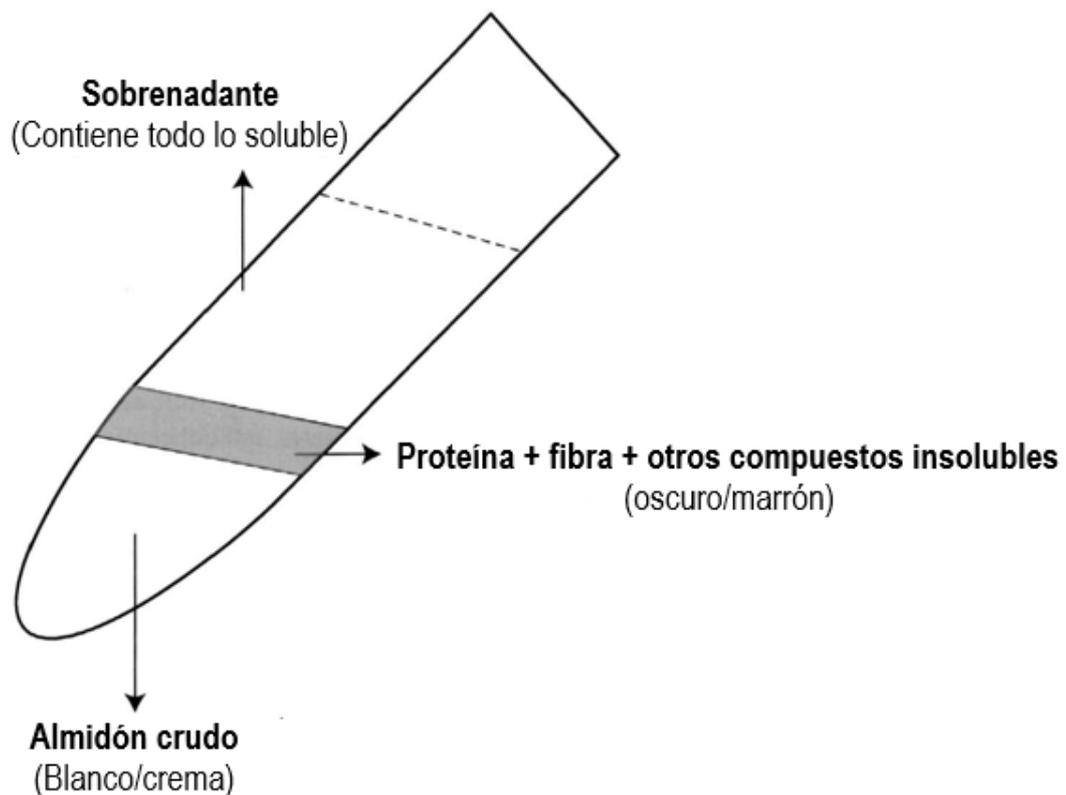
Este proceso se realiza mediante el uso de mallas, telas tocuyo, filtros, tamices, etc. El objetivo de la primera filtración es separarla de partículas grandes de fibra insolubles en agua. Durante esta etapa, el almidón se lava rociando agua sobre el residuo. La falta de lechosidad del filtrado, es un indicador de un correcto lavado. Mientras más se realice el proceso de filtración del residuo (retenido), mejor será la recuperación del almidón. El filtrado resultante, que contiene fibras medianas y pequeñas, se somete a una nueva filtración. Comúnmente se utiliza una serie de tamices (250; 175; 125 y/o 75 mesh). El proceso de filtración produce un filtrado lechoso rico en almidón, pero que contiene otros componentes vegetales, como gomas o mucílagos, proteínas y partículas de fibra fina, que pueden separarse por centrifugación (Hoover y Ratnayake, 2005).

#### **c. CENTRIFUGACIÓN**

Esta es una de las etapas más importantes en el proceso de obtención de almidón, pues lo separa de las proteínas (solubles e insolubles), fibras finas y otros compuestos de goma o

mucilago. Generalmente se realiza de 2000 a 8000 x g durante 15 a 30 min y formándose tres capas o fases en el tubo de centrifuga (Figura 3), al finalizar el proceso. La primera es el sedimento de almidón (capa blanca / crema) en el fondo del tubo de centrifuga (Vasanthan, 2001).

Los compuestos contaminantes insolubles en agua como las proteínas, fibras finas y otros compuestos insolubles, forman la segunda capa (marrón), encima del sedimento de almidón. Esta capa de contaminantes generalmente se elimina manualmente raspando con una espátula, teniendo cuidado de no raspar nada de la capa de almidón. La tercera capa o fase está compuesta por el sobrenadante (parte líquida) que está conformada por todos los compuestos solubles (Hoover y Ratnayake, 2005).



**Figura 3: Sedimentación de los componentes del grano post centrifugación**

FUENTE: Hoover y Ratnayake (2005)

#### **e. AISLAMIENTO DEL ALMIDÓN**

El aislamiento o purificación obtenido luego de los procesos de centrifugación, es un proceso o serie de procesos para separarlo de componentes contaminantes (proteínas y lípidos) que pudieron haber quedado adheridos a la superficie del granulo. El contenido de nitrógeno, luego del análisis proximal, obtenido de los almidones extraídos se debe a las proteínas, los lípidos que contienen colina, etanolamina y serina; y las proteínas situadas en la superficie y en el interior de los gránulos de almidón. Los tubérculos y las raíces contienen muy poca cantidad de proteínas (<3,0 por ciento, p/p, peso seco) y lípidos (<1 por ciento, p/p, peso seco) a comparación con los granos de cereales y las legumbres, lo que minimiza la contaminación del almidón por estos componentes durante el aislamiento. El lavado se realiza con tolueno o álcali acuoso para una adecuada purificación. Sin embargo, el lavado repetido con álcali acuoso es muy recomendable para los almidones de cereales y legumbres. Este proceso se realiza agitando enérgicamente el almidón y el álcali, centrifugándolo y desechando el sobrenadante. Se ha encontrado que los lípidos asociados con el almidón aislado se encuentran tanto en la superficie como en el interior de los gránulos. Los lípidos superficiales suelen ser lípidos no relacionados con el almidón que se absorben en la capa superficial de los gránulos de almidón durante el aislamiento. Un exceso de contaminación por lípidos no relacionados con el almidón altera las propiedades fisicoquímicas de los gránulos de almidón y debe eliminarse mediante el lavado con una mezcla de disolventes como el cloroformo/metanol soluble (Hoover y Ratnayake, 2005).

#### **2.4.2. FACTORES QUE AFECTAN LA EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN**

La extracción del almidón en cereales depende de diversos factores como el contenido de almidón, el tamaño, el peso y la edad del grano. La recuperación de almidón tiende a disminuir con la edad del grano. La separación del almidón de la proteína se vuelve más difícil con la edad, el aumento de la humedad de la cosecha, la alta temperatura de secado del grano y el aumento de los niveles de daño del almidón. Principalmente, el método de extracción usado se ve influenciado por dos factores: la solubilidad de la proteína y las interacciones de proteína – almidón.

## **a. SOLUBILIDAD DE LA PROTEÍNA**

La solubilidad de las proteínas refleja el equilibrio entre las interacciones proteína-disolvente (hidrófila) y proteína-proteína (hidrófoba) (Wang *et al.*, 2017). Termodinámicamente, la solubilidad es la disociación simultánea de las moléculas de proteína y las moléculas de disolvente (Eltayeb *et al.*, 2011).

Diversas proteínas se desnaturalizan mediante el uso de disolventes orgánicos (por ej. Alcohol, acetona, metanol) a bajas temperaturas (de refrigeración), las cuales precipitan bajando su constante dieléctrica, el cual favorece la interacción proteína – proteína (Damián, 2008). Según Osborne, citado por El Halal *et al.* (2019), la clasificación de las proteínas se encuentra en función a su extracción y solubilidad del disolvente aplicado. Las albúminas son solubles en agua, las globulinas en sales acuosas diluidas, las prolaminas en la mezcla de alcohol y agua, y las glutelinas en ácidos o álcalis. Los cereales contienen principalmente a las prolaminas, a excepción de la avena y el arroz, aunque también pueden poseer pequeñas cantidades de globulinas. Los granos de arroz contienen principalmente proteínas de tipo glutelina y la avena globulinas. Asimismo, la cañihua y la quinua poseen principalmente proteínas del tipo albuminas y globulinas (Apaza, 2010).

## **b. INTERACCIONES PROTEÍNA – ALMIDÓN**

Las interacciones proteína-almidón pueden ocurrir de dos formas: las proteínas asociadas con la superficie del gránulo y las proteínas presentes dentro del gránulo (proteínas intrínsecas). Una interacción débil proteína-almidón restringe la adhesión de las moléculas de almidón a la matriz proteica, facilitando la separación durante la molienda (El Halal *et al.*, 2019).

Este factor cambia con la cantidad de humedad y la temperatura de procesamiento y acondicionamiento del grano. Por ejemplo, las interacciones proteína-almidón pueden estimular un aumento de la viscosidad al superar la temperatura de gelatinización del almidón en el trigo y el maíz (Paliwal *et al.*, 2018). Esta interacción es de naturaleza

puramente electrostática debido a que los cuerpos proteicos están cargados negativamente y los gránulos de almidón están cargados positivamente (Wang *et al.*, 2017).

Asimismo, la formación de mezclas de proteína y almidón restringe la hinchazón de los gránulos de almidón, inhibiendo su absorción de agua, lo que resulta en una lixiviación limitada de almidón durante la cocción (Saleh, 2017). Las proteínas también afectan el comportamiento de pegado del almidón al influir en las reacciones térmicas, el comportamiento de la red de gel y la migración de moléculas de agua. Sobre la base de los efectos de la proteína en los comportamientos de pegado, la atención reciente se ha centrado en mejorar la textura del gel de arroz al eliminar su proteína. Las interacciones entre el almidón y las proteínas hidrolizadas también regulan los comportamientos reológicos del almidón y alteran la estructura del gel de almidón (Ding *et al.*, 2020).

### **2.4.3. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN**

La extracción de almidón puede empezar con el grano intacto del cereal o con su harina. La extracción de almidón del grano intacto comienza con una maceración, seguida de la molienda gruesa para crear una suspensión gruesa o lechada, que se somete a una desgerminación para eliminar el germen y los lípidos asociados, seguida de una molienda fina, cribado y posterior separación centrífuga de la proteína del almidón, la fibra y el agua (Manthey, 2016).

El grano se puede moler en seco y la harina se descarga en una corriente de agua para formar una suspensión, siguiendo posteriormente, por pasos descritos anteriormente. Las semillas muy pequeñas a menudo se muelen primero en seco y luego se desgrasan, ya que eliminar el germen durante la molienda húmeda es difícil debido a su pequeño tamaño. Durante la maceración, los granos se sumergen en una solución acuosa tibia (40-55 °C) de dióxido de azufre durante 24-48 h. En el grano de cereal, el almidón almacenado en el endospermo suele estar incrustado en una matriz proteica. Debido a ello se suele utilizar soluciones con Metabisulfito al 0,2 por ciento; ácido láctico al 0,5 por ciento e hidróxido de sodio al 0.2 por ciento p/p, con el objetivo de ayudar a dispersar la matriz de proteína que rodea los gránulos de almidón, para facilitar su liberación (Manthey, 2016).

Los procesos industriales de extracción de almidón a menudo utilizan lavado a contracorriente para conservar agua y reducir la cantidad de aguas residuales. El lavado a contracorriente es el proceso en el que se introduce agua limpia en el sistema en el último paso de lavado. El agua contiene 0,05 por ciento de dióxido de azufre para controlar los microorganismos. El agua de lavado posterior fluye hacia atrás a través del sistema de extracción comenzando con el lavado con almidón y terminando como agua de maceración.

#### **a. MÉTODO HÚMEDO**

Este método consiste en sumergir los granos de cereales en agua o solución (para evitar la oxidación), con el objetivo de ablandar el tejido antes de la molienda (por ejemplo, ácido cítrico, bisulfito de sodio, etc.). Los granos se maceran entre 8 y 10 h. Posteriormente, los granos y la solución de remojo se muelen para obtener una solución de almidón que se tamiza en diferentes tamaños de malla. El residuo de las mallas se lava con agua corriente hasta que el agua esté libre de residuos aparentes de almidón. La solución de almidón se almacena durante algunas horas para obtener la sedimentación del almidón. Se retira el sobrenadante (agua) y se centrifuga el sedimento para recuperar el almidón húmedo, que finalmente se seca en un horno convencional a 40 – 45 °C durante 24 h (Agama-Acevedo *et al.*, 2019).

#### **b. MÉTODO SECO**

Este proceso implica un tamizado y clasificación por aire para la separación de los componentes del grano (proteínas, almidón y fibra), pero se obtiene una menor eficiencia en comparación con la molienda en húmedo. La molienda en seco produce la separación de las capas externas del grano (germen y pericarpio) del endospermo almidonado. La recuperación de almidón del proceso de molienda en seco no es razonable a pesar de que se utilizan la molienda fina de los granos y la clasificación por aire. Si se comparan ambos procesos de molienda, la molienda húmeda produce un rendimiento y una calidad de almidón comercialmente satisfactorios; sin embargo, otras variables como el costo de la mano de obra, los residuos, etc., deben considerarse en el proceso de molienda húmeda (Agama-Acevedo *et al.*, 2019).

### c. MÉTODO ALCALINO

Este método consiste en la utilización de soluciones alcalinas para solubilizar la proteína, lo que permite la obtención de almidón puro de los granos o harinas. Se pueden usar diferentes agentes alcalinos, como detergentes e hidróxido de sodio como solventes de extracción. Las preocupaciones sobre la eliminación de efluentes surgen del uso de este tipo de medios de extracción. Del mismo modo, el uso de condiciones de extracción alcalinas podría inducir un deterioro en la calidad de los aislados de almidón (Diaz *et al.*, 2016).

Esta técnica de extracción alcalina proporciona un alto rendimiento y pureza, pero el almidón extraído con álcali tiene una temperatura de pegado más baja y una viscosidad de pegado más alta que el método húmedo, tal vez porque la eliminación de lípidos por el hidróxido de sodio favorece el hinchamiento del almidón. gránulos durante la extracción. Además, el sodio residual también contribuye a un aumento de la viscosidad de la pasta (lee *et al.*, 2007).

Diversos estudios mencionan la influencia de las condiciones alcalinas sobre el almidón extraído. El primero es el contenido de proteína extraída junto al almidón. Según Mistry *et al.* (1992), para el caso del maíz, los almidones extraídos a bajas concentraciones de álcali y alta temperatura tienen los contenidos de proteína más bajos. A altas concentraciones de álcali, temperatura y tiempo no tuvieron un efecto significativo sobre el contenido de proteínas de los almidones.

Asimismo, Kringel *et al.* (2020) mencionan que, el remojo alcalino requiere una alta concentración de compuestos para lixiviar la proteína, lo que en consecuencia promueve el daño de los gránulos y un rendimiento reducido de almidón. Una alternativa ante esta situación, es el uso de enzimas para reducir este efecto de obtención de altas concentraciones de álcali. Un estudio realizado es el de Villarreal *et al.* (2013), quienes aislaron almidón de amaranto de grano entero y harina usando el método alcalino solo y el método alcalino combinado con digestión con proteasa. Estos métodos implicaron sucesivas etapas de remojo en una solución de NaOH 0,25 por ciento para el método alcalino y 0,05 por ciento en la digestión con proteasas, molienda húmeda de fracción fibrosa, hidrólisis enzimática y centrifugación de múltiples etapas. El rendimiento y la recuperación de almidón con el

método alcalino con digestión de proteasas fueron un 116,7 por ciento (en el grano entero de amaranto) y un 123,6 por ciento (en la harina amaranto) más altos en comparación con el método alcalino solo. Esto demostró que el método alcalino combinado con la digestión con proteasas promovió un aumento en el rendimiento de almidón y la tasa de recuperación.

De la misma manera, el contenido de sodio para la obtención de almidones de grado alimentario es importante considerar. Mistry *et al.* (1992), mencionan que los almidones extraídos con bajo contenido de álcali tenían casi el doble del contenido de sodio y los almidones extraídos con alto contenido de álcali tenían entre cuatro y seis veces el contenido de sodio del almidón comercial, para el maíz.

Por otro lado, el tamaño de partícula es otro factor en el momento de la extracción. Villarreal *et al.* (2013), mencionan que la molienda de los granos de amaranto aumentó significativamente el rendimiento y la recuperación de almidón y redujo los tiempos de remojo en comparación con los reportados por otros autores. Asimismo, González-Cruz *et al.* (2018), en su extracción con etanol al 96 por ciento de frijol arroz (*Vigna umbellata*) obtuvo un almidón agrupado con otros componentes, modificando el tamaño de las partículas.

Todos los procedimientos de extracción presentan ventajas y desventajas. Los tratamientos alcalinos generan efluentes indeseables, los tratamientos enzimáticos requieren un tiempo mayor (más de 24 h) para la eliminación de proteínas, fibras y la liberación de almidón, lo que aumenta los costos y requiere el uso de agentes antimicrobianos debido al riesgo de fermentación / degradación del almidón. Estas consideraciones deben tenerse en cuenta antes de elegir un método de aislamiento para la extracción de almidón.

## **2.5. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y FUNCIONALES DEL ALMIDÓN**

### **2.5.1. CONTENIDO DE AMILOSA Y AMILOPECTINA**

Las propiedades funcionales y reológicas de los almidones dependen en gran medida de la relación amilosa/amilopectina, biopolímeros de diferente estructura molecular que

constituyen casi la totalidad del gránulo. En los distintos cultivos amiláceos esta relación suele ser constante, si bien cambia de una variedad a otra dentro de la especie y también entre plantas de la misma variedad (Aristizábal y Sánchez, 2007). Asimismo, las propiedades físicas y químicas se explican por dos factores, en la estructura de la amilosa y amilopectina y la proporción variable en que esta se encuentra (Peña, 2017).

Según Kheto *et al.* (2022), diversos estudios en quinua, mostraron un mayor poder de hinchamiento y viscosidad debido a la mayor disponibilidad de amilopectina y el contenido de amilosa condujo a una mayor turbidez. Se ha informado que la amilopectina de quinua tiene una distribución de longitud de cadena única como amilopectina cerosa, con un promedio de 317 ramificaciones y un grado de polimerización promedio de 6700 unidades de glucano por fracción. También se observó que la amilopectina en el almidón de quinua contiene un gran número de cadenas cortas (8 a 12 unidades) y un menor número de cadenas más largas (13 a 20 unidades) con menor grado de polimerización. En la Tabla 6 se muestran las propiedades fisicoquímicas de la amilosa y amilopectina.

Generalmente, los almidones "normales" están constituidos por 25-30 por ciento de amilosa y 70- 75 por ciento de amilopectina. Sin embargo, hay algunos almidones que muestran un alto contenido de amilopectina (98 – 99 por ciento), llamado "ceroso"; y otros con alto contenido de amilosa (50 – 70 por ciento) (Perez y Bertoft, 2010).

En cuanto a la determinación de amilosa aparente, la afinidad por el yodo de la solución de un almidón desgrasado y el color azul derivado del complejo de yodo de amilosa son los dos métodos comúnmente utilizados. Los resultados obtenidos de estos métodos, sin embargo, se ven afectados por la presencia de lípidos y la estructura de la amilopectina, ya que las largas cadenas ramificadas de la amilopectina también pueden formar complejos con el yodo y dar mayor afinidad por el yodo y el color azul. Los complejos de amilosa con lípidos reducen su capacidad de complejo yodado (Jay- Lin, 2009).

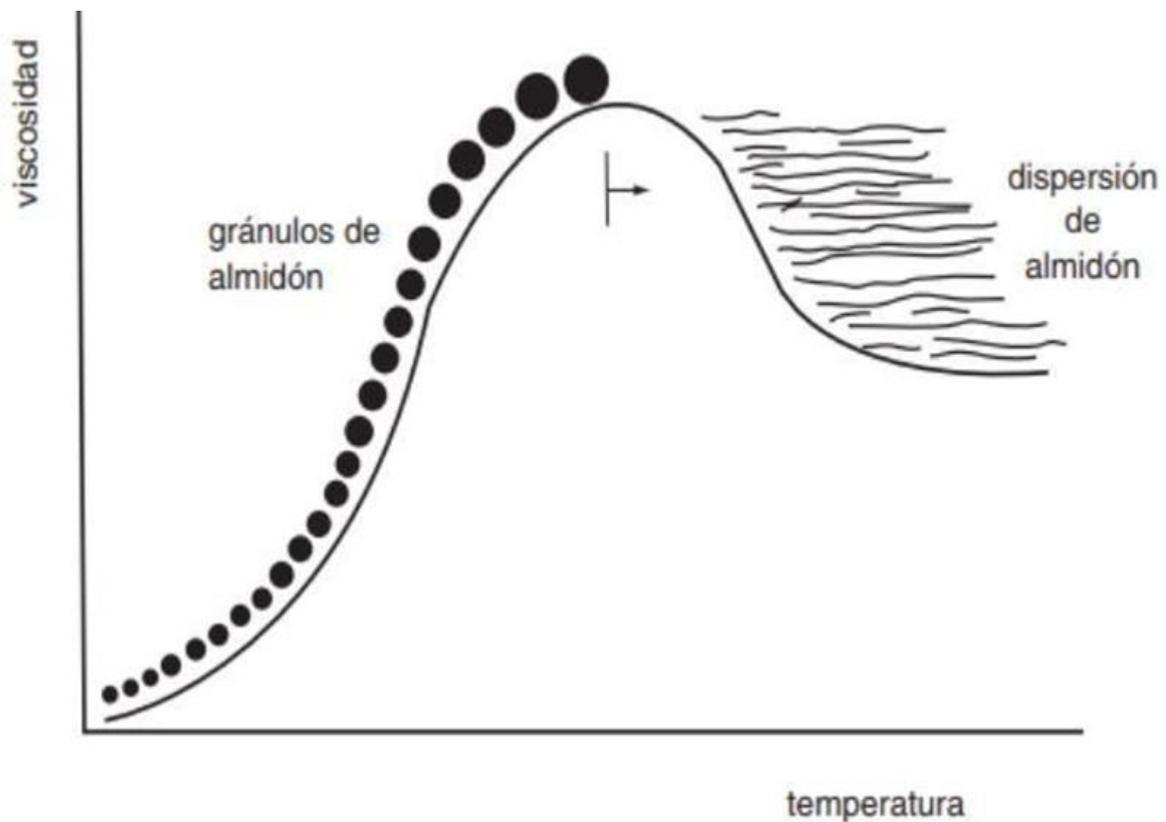
**Tabla 6: Propiedades fisicoquímicas de amilosa y amilopectina**

| <b>Propiedad</b>                            | <b>Amilosa</b>                                     | <b>Amilopectina</b>                                |
|---|--|--|
| Estructura molecular/ramificaciones         | Principalmente Lineal/principalmente $\alpha$ -1-4 | Altamente ramificada/ $\alpha$ -1-4; $\alpha$ -1-6 |
| Peso molecular                              | 105-106 Da   | 107-109 Da   |
| Yodo unión/color                            | 20 %/azul-negro                                    | <1 %/rojo-púrpura                                  |
| Digestibilidad por $\beta$ -Amilasa         | 100%   | Aprox. 60 %  |
| Dilatación en soluciones Acuosa             | Inestable  | Estable  |
| Solubilidad                                 | Baja/apenas soluble                                | Alta   |
| Temperatura de Gelatinización               | Baja   | Alta   |
| Temperatura de fusión                       | Baja   | Alta   |
| Complejo amilosa-lípido                     | Cantidad muy alta                                  | No   |
| Formación de gel                            | Firme, irreversible                                | Suave, reversible                                  |
| Films                                       | Coherente  | No forma fácilmente                                |
| Viscosidad                                  | Baja   | Alta   |
| Espesante                                   | Pobre  | Bueno  |
| Estabilidad al Cizallamiento                | Relativamente estable                              | Inestable  |
| Fuerzas adhesivas                           | Débil  | Fuerte   |
| Estabilidad decongelación<br>Descongelación | Inestable  | Estable  |
| Tasa de retrogradación                      | Alta   | Baja   |

FUENTE: Schirmer *et al.* (2015)

## 2.5.2. TEMPERATURA DE GELATINIZACIÓN

La gelatinización se produce cuando se calienta con exceso de agua presente en el sistema, lo que determina su procesamiento térmico. El agua se distribuye principalmente en la región amorfa de los gránulos de almidón. Después de calentar a una temperatura específica, los gránulos de almidón perderán la estructura cristalina y se volverán amorfos, lo que se reflejará en la desaparición de la cruz de Malta (Yongfeng y Jay-Lin, 2018). En la Figura 4 se muestra el proceso de gelatinización de los gránulos de almidón con el aumento de la temperatura.



**Figura 4: Gelatinización del almidón**

FUENTE: Badui (2006)

La gelatinización es un paso obligatorio antes del consumo de productos amiláceos, pero también esta propiedad proporciona la funcionalidad en diversos productos en los que se utiliza almidón como ingrediente. Este fenómeno implica diversos cambios en los gránulos

como pérdida de la birrefringencia, el hinchamiento, la solubilización y el aumento de la viscosidad. En la actualidad, el uso de la calorimetría de barrido diferencial permite determinar el rango de temperatura de gelatinización y la entalpía involucrada (Agama-Acevedo *et al.*, 2019).

La temperatura de gelatinización es uno de los parámetros más importantes durante la gelatinización. La comprensión del proceso de gelatinización ha aumentado considerablemente en las últimas dos décadas. Esto se debe en parte a un mayor conocimiento de la estructura del gránulo, y también debido a numerosas investigaciones del proceso de gelatinización utilizando aplicaciones de varias técnicas. Se han utilizado varios métodos para estudiar la física de la gelatinización, incluida la calorimetría de barrido diferencial (DSC), la difracción de rayos X, la espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN), la espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), la microscopía óptica, la microscopía electrónica y la reometría (Liu *et al.*, 2002).

### **2.5.3. PROPIEDADES DE HIDRATACIÓN: PODER DE HINCHAMIENTO, SOLUBILIDAD Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA**

A temperatura de ambiente, los gránulos de almidón pueden absorber hasta un 30 por ciento de su peso en exceso de agua sin hinchazón notable. Sin embargo, durante el calentamiento, los gránulos de almidón absorben mucha más agua y se hinchan. El hinchamiento y la posterior solubilización de amilosa y amilopectina son los cambios estructurales más importantes durante y después de la gelatinización de los gránulos de almidón. Cuando el almidón se calienta en exceso de agua la estructura cristalina se altera debido a la rotura de enlaces de hidrógeno, y las moléculas de agua se vinculan por enlaces de hidrógeno a los grupos hidroxilo expuestas de amilosa y amilopectina. Esto provoca un aumento en el hinchamiento de los gránulos y la solubilidad (Hoover 2001).

La hinchazón generalmente comienza a una temperatura correspondiente a la temperatura de inicio ( $T_0$ ) de la transición endotérmica DSC y continúa muy por encima de la temperatura de conclusión ( $T_c$ ). Diferentes almidones muestran diferentes comportamientos de hinchamiento, tanto en términos de los volúmenes de gel finales obtenidos como en la

respuesta de temperatura. Los almidones de patata y tapioca dan volúmenes de gel muy grandes, en comparación con sus homólogos de cereales. La hinchazón parece ser principalmente una propiedad de las moléculas de amilopectina intactas; las variedades ceras dan los mayores volúmenes de gel cuando se comparan los almidones que difieren en el contenido de amilosa (Costas, 2009).

Según Costas (2009), el aumento de cizallamiento aumenta la hinchazón, mientras que los lípidos granulares en almidones de cereales parecen inhibir la hinchazón. Para algunos almidones (por ejemplo, papa y maíz), la hinchazón ocurre en un grado similar en todas las direcciones del gránulo, mientras que, para almidón de trigo, centeno y cebada, hay expansión preferencial en una dirección, lo que resulta en un plegamiento múltiple de los gránulos.

El hinchamiento de los gránulos de almidón también está acompañado por la lixiviación de las moléculas de almidón de los gránulos. Este material es principalmente amilosa, aunque la amilopectina también puede solubilizarse dependiendo de la naturaleza del almidón y la gravedad de las condiciones de cizallamiento térmico empleadas. El peso molecular de la amilosa solubilizada aumenta al aumentar la temperatura. Además, la lixiviación de la amilosa es un requisito para la verdadera formación de gel (Costas, 2009).

#### **2.5.4. RETROGRADACIÓN**

Los gránulos de almidón, cuando se calientan en exceso de agua, experimentan una fase de transición orden-desorden llamada gelatinización. Al enfriarse, las cadenas de almidón (amilosa y amilopectina) interactúan en la pasta gelatinizada, lo que lleva a la formación de una estructura más ordenada denominada "retrogradación". Esta propiedad va acompañada de aumentos en el grado de cristalinidad y firmeza del gel, sinéresis y la aparición de un patrón de rayos X de tipo "B" (Tiwari *et al.*, 2020).

En la fase inicial de la retrogradación, dos o más cadenas de amilosa pueden formar un simple punto de unión el cual puede desarrollarse posteriormente en regiones más extensivamente ordenadas. Finalmente, bajo condiciones favorables, aparece un orden

cristalino (Martínez, 2007). El cambio de un estado amorfo a un estado cristalino, trae como consecuencia un aumento en la viscosidad de la pasta de almidón, en la fase de enfriamiento. Al envejecer, el gel de almidón formado, perderá su capacidad de retención de agua, provocando un aumento de firmeza y rigidez en un proceso para recuperar un orden cristalino. Estos cambios afectarán negativamente la textura de un alimento rico en almidón (Perez-Rea y Antezana-Gomez, 2018).

Los geles de almidón de cereales normalmente tienden a tener una mayor tendencia a la retrogradación que la de los almidones de tubérculos y raíces por el hinchamiento limitado de los gránulos de almidón que proporciona una gran proximidad entre las cadenas de almidón para una retrogradación potenciada. Se han empleado diferentes métodos para reducir la tasa de retrogradación del almidón en los productos alimenticios, que incluyen la adición de derivados químicos al almidón, como la hidroxipropilación y la acetilación; adición de agentes complejantes (por ejemplo, monoglicéridos, lecitinas y estearoil lactilato de sodio) para formar un complejo helicoidal de inclusión con amilosa y cadenas ramificadas largas de amilopectina, e hidrólisis de almidón por enzimas amilolíticas (por ejemplo,  $\alpha$ - y  $\beta$ -amilasas) para reducir la longitud de las cadenas de glucano (Yongfeng y Jay-Lin, 2018).

#### **2.5.5. CLARIDAD DE GELES**

La claridad indica el grado de transparencia de las pastas y está directamente relacionada con el estado de dispersión de los solutos y con la tendencia a la retrogradación de los almidones. La capacidad de estas pastas para transmitir la luz cuando son sometidos al paso de un haz radiante mide su claridad (Arzapalo y Huamán, 2014). Es por ello que la transmitancia se usa para indicar la claridad de la pasta de almidón (Jan, Panesar, Rana, *et al.*, 2017). Una transmitancia de luz más alta implica un gel más transparente, que es función de la cantidad de gránulos hinchados del almidón en el gel, que refractan la luz (Singh *et al.*, 2006).

La transparencia u opacidad presentada por las pastas de almidón influyen directamente sobre las características de brillantez y opacidad del color de los productos en los que se empleen como espesantes (Hernández-Medina, 2008).

## **2.5.6. PROPIEDADES REOLÓGICAS**

La propiedad reológica de un material se define como la deformación y los comportamientos de flujo que responden a un estrés. En la caracterización de la propiedad reológica del almidón, la viscosidad es un parámetro importante porque el almidón a menudo se utiliza como espesante en diferentes aplicaciones. La viscosidad mide la resistencia de un fluido o semilíquido a fluir cuando se aplica un esfuerzo cortante (Tabilo-Munizaga y Barbosa-Canovas, 2005).

Las propiedades reológicas de las pastas y geles de almidón son complejas y dependen de una variedad de factores, incluido el origen botánico, tamaño de gránulos de almidón, relación amilosa a amilopectina, concentración de almidón, las condiciones de pegado (por ejemplo, temperatura, velocidad de cizallamiento y velocidad de calentamiento) y las condiciones de almacenamiento (temperatura y tiempo) (Yongfeng y Jay-Lin, 2018).

### **a. PROPIEDADES DE FORMACION DE PASTA**

Cuando el almidón gelatinizado se calienta continuamente en exceso de agua con agitación constante, los gránulos de almidón se hinchan para proporcionar viscosidad, la amilosa se lixivia hacia fuera de los gránulos hinchados, y las moléculas de almidón finalmente se dispersan en el medio acuoso. El desarrollo de la viscosidad en este proceso se conoce como la propiedad de formación de pasta del almidón. Esta propiedad se determina comúnmente usando una amilografía, como el amilógrafo Brabender y el viscoanizador rápido (RVA) (Yongfeng y Jay-Lin, 2018).

Así mismo Ai y Jane (2015), mencionan que la amilosa especialmente en presencia de lípidos polares, tiende a restringir la hinchazón de los gránulos de almidón durante la cocción. El complejo amilosa-lípido (CAL) formado en el almidón mejora las interrelaciones entre las moléculas de amilosa y amilosa, que restringe el hinchamiento de los gránulos. Por lo tanto, CAL eleva la temperatura de formación de pasta, reduce la viscosidad máxima y da como resultado una apariencia opaca de la pasta de almidón. Entre todos los almidones de cereales normales, el almidón de trigo tiene la temperatura de formación de pasta más alta y

la viscosidad máxima mínima debido a la gran concentración de fosfolípidos.

## **b. FORMACIÓN DEL GEL**

Se han usado diferentes métodos para caracterizar la propiedad reológica de un gel de almidón. Los métodos más frecuentemente utilizados incluyen: (1) determinación de la resistencia del gel de almidón usando un analizador de textura, que proporciona una medición de "punto único"; (2) análisis de módulo dinámico del gel de almidón usando un reómetro dinámico, que permite la evaluación continua del gel de almidón a diversas temperaturas y velocidades de corte. Un reómetro dinámico puede evaluar el módulo de almacenamiento ( $G'$ ), el módulo de pérdida ( $G''$ ) y la tangente de pérdida ( $\tan \delta = G'' / G'$ ) de un gel de almidón.  $G'$  mide la energía de deformación recuperada por ciclo de deformación, que representa el comportamiento elástico del gel;  $G''$  mide la energía disipada en forma de calor por ciclo de deformación, que representa el comportamiento viscoso. Un pequeño  $\tan \delta$  ( $G'$  es mucho más grande que  $G''$ ) indica que la deformación es esencialmente recuperable y el gel de almidón es rígido, comportándose más como un sólido; mientras que un  $\tan \delta$  grande ( $G''$  es mucho más pequeño que  $G'$ ) refleja que la energía utilizada para deformar el gel se disipa viscosamente y el gel de almidón es menos rígido, comportándose más como un líquido (Tabilo-Munizaga y Barbosa-Canovas, 2005).

La formación de un gel de almidón a partir de una pasta es el resultado de las interacciones entre las moléculas de amilosa y amilopectina en los gránulos y la formación de redes para retener el agua en los gránulos hinchados. El desarrollo a corto plazo de la resistencia o rigidez del gel de almidón después de la cocción es principalmente el resultado de la gelificación de la amilosa. El almidón nativo con mayor contenido de amilosa tiende a desarrollar un gel más fuerte a un ritmo más rápido. La resistencia o la rigidez de un gel de almidón continúa aumentando durante el almacenamiento, que es el resultado de la recristalización de la amilopectina (Tabilo-Munizaga y Barbosa-Canovas, 2005).

**c. ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA (TPA)**

La textura de los alimentos es una característica multiparamétrica que únicamente los humanos pueden percibir y definir. Debido a ello, es muy difícil imitar el procesamiento oral completo del alimento y diversos métodos reflejan de forma imperfecta los atributos de textura percibidos por el ser humano. Es importante comprender las relaciones internas entre todos estos atributos texturales y encontrar los principales atributos que rigen la aceptación del consumidor. El perfil de textura es el análisis sensorial del complejo de textura de un alimento en términos de sus características geométricas, mecánicas, de grasa y humedad, en el grado de cada una de ellas presente y el orden en que aparecen desde el primer bocado hasta la masticación completa (Li y Gilbert, 2018). En la Tabla 7, se muestra una clasificación en término de categorías por característica multiparamétrica de la textura, clasificándola en propiedades primarias y secundarias.

**Tabla 7: Propiedades del Análisis de Perfil de Textura**

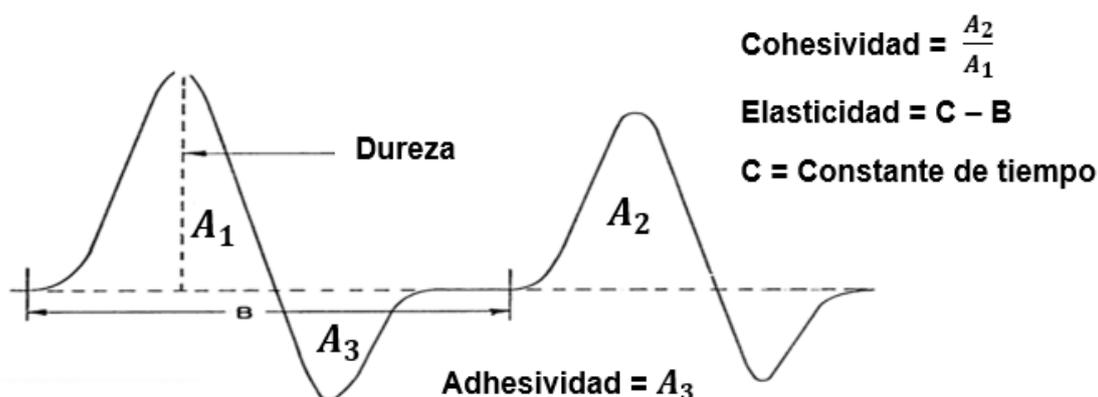
| <b>Propiedades primarias</b> |  |   |
|------------------------------|--|---|
| <b>Atributo</b>              | <b>Física</b>  | <b>Sensorial</b>  |
| Dureza                       | Fuerza necesaria para alcanzar una determinada   | Fuerza necesaria para comprimir una sustancia entre los molares (en el caso de los sólidos) o entre la lengua y el paladar (en el caso de los semisólidos). |
| Cohesividad                  | Grado en que se puede deformar un material antes de que se rompa.  | Grado en el que una sustancia se comprime entre dientes antes de que se rompa   |
| Viscosidad                   | Tasa de flujo por unidad de fuerza   | Fuerza necesaria para retirar un líquido de una cuchara sobre la lengua.  |
| Elasticidad                  | Velocidad a la que un material deformado vuelve a su condición no deformada después de que se elimina la fuerza deformante   | Grado en el que un producto vuelve a su forma original una vez que ha sido presionado entre los dientes   |
| Adhesividad                  | Trabajo necesario para vencer las fuerzas de atracción entre la superficie del alimento y la superficie de los otros materiales con los que el alimento entra en contacto. | Fuerza necesaria para eliminar el material que se adhiere a la boca (generalmente el paladar) durante el proceso de alimentación normal.                    |

«Continuación».

| <b>Propiedades secundarias</b> |  |  |
|--------------------------------|--|--|
| Fracturabilidad                | Fuerza con la que se fractura un material: producto de alto grado de dureza y bajo grado de cohesión.  | Fuerza necesaria para que una muestra se desmorone, agriete o rompa.   |
| Masticabilidad                 | Energía necesaria para masticar un alimento sólido a un estado listo para tragar: un producto de dureza, cohesión y elasticidad.                             | Tiempo necesario para masticar la muestra, a una tasa constante de aplicación de fuerza, para reducirla a una consistencia adecuada para la deglución. |
| Gomosidad                      | Energía necesaria para desintegrar un alimento semisólido a un estado listo para la deglución: un producto de bajo grado de dureza y alto grado de cohesión. | Densidad que persiste durante la masticación; energía requerida para desintegrar un alimento semisólido a un estado listo para tragar                  |

FUENTE: Szczesniak (2002)

El método instrumental del TPA, consiste en la aplicación de fuerzas de compresión de la muestra de ensayo al menos dos veces, cuantificando los parámetros a partir de curvas de fuerza – deformación, elaborándose perfiles de textura. En la Figura 5, se muestra la curva de perfil de textura instrumental obtenido mediante un texturómetro general de alimentos, donde se muestra los diferentes parámetros obtenidos luego de los dos ciclos aplicados.



**Figura 5: Curva de perfil de textura instrumental**

FUENTE: Szczesniak (2002)

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN**

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Ingeniería, Laboratorio de Investigación y Laboratorio de Análisis Fisicoquímico de Alimentos de la Facultad de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú.

#### **3.2. MATERIA PRIMA**

Se utilizó granos de cañihua de la variedad Illpa – INIA, procedentes del Instituto Nacional de Innovación Agraria de la Estación Experimental Agropecuaria Illpa - Puno (Carretera Puno-Juliaca, km 24) a 3 835 m.s.n.m., distrito de Atuncolla, provincia de Puno, región Puno, Perú.

Para el tratamiento control se utilizó almidón de maíz de la marca “Negrita”.

#### **3.3. MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS**

##### **3.3.1. MATERIALES**

- Baguetas de vidrio.
- Beakers de 100; 250 y 500 mL.
- Bolsas Ziploc de polietileno.
- Bombilla de succión.
- Campanas desecadoras con silicagel.
- Cuchara espátula de acero inoxidable.
- Fiola volumétrica de vidrio de 250 y 1000 mL.

- Magnetos.
- Micropipetas de 100  $\mu$ l.
- Pipetas volumétricas de 1 mL.
- Recipientes de plástico.
- Placas Petri.
- Probetas de 100; 250 y 500 mL.
- Tamices de número de malla: 120; 270; 325 y 400 mesh.
- Tela muselina.
- Tubos de ensayo de plástico de 50 y 100 mL.
- Tubos falcon para centrífuga de 50 ml.

### **3.3.2. EQUIPOS**

- Agitador magnético (MR Hei-Tec. Heidolph. Germany).
- Agitador Vortex (Wizard. VELP® Scientific, USA).
- Balanza analítica. (Explorer OHAUS® Corporation, USA).
- Baño de agua con agitación. (GLF 1083, Germany).
- Centrífuga (Rotofix 32. HETTICH, Germany).
- Colorímetro (Konica Minolta, CR – 410, Japón).
- Espectrofotómetro (UNICO UV 2100, USA).
- Estufa de aire caliente (MEMMERT®, Germany).
- Texturómetro (Instron ®, modelo 3365, EE.UU).
- Licuadora (Oster®, modelo BLSTKAG-BPB, México).
- Molino de cuchillas (Retsch, GRINDOMIX GM 200, Alemania).

- Multicalorímetro Diferencial de Barrido-MCDSC. (TA Instruments, USA).
- Rapid Visco Analyser – RVA (Perten Instruments, Australia).
- Refrigeradora, Congeladora (GENERAL ELECTRIC®. China).
- Reómetro híbrido - DHR3 Discovery (TA Instruments. USA). Usado con placa Peltier y geometría tipo Plato (SST ST XHATCH).
- Potenciómetro HI 98127 (pHep®4) (HANNA Instruments, USA).

### 3.3.3. REACTIVOS

- Aceite de soya (Sao, Perú).
- Ácido clorhídrico fumante 37 por ciento (Merck®. Germany).
- Agua destilada (~ pH = 7).
- Agua desionizada (~ pH = 7).
- Amilopectina de almidón de papa (Sigma-Aldrich®, USA)
- Amilosa de papa Tipo III, esencialmente libre de amilopectina (Sigma-Aldrich®, USA).
- Dimetilsulfóxido 99% (DMSO) (Sigma-Aldrich®, USA)
- Hidróxido de sodio A.C.S. (Fermont®. México).
- Yodo resublimado U.S.P. (I2) (Fermont®, México).
- Yoduro de potasio (KI) (Merck®, Alemania).

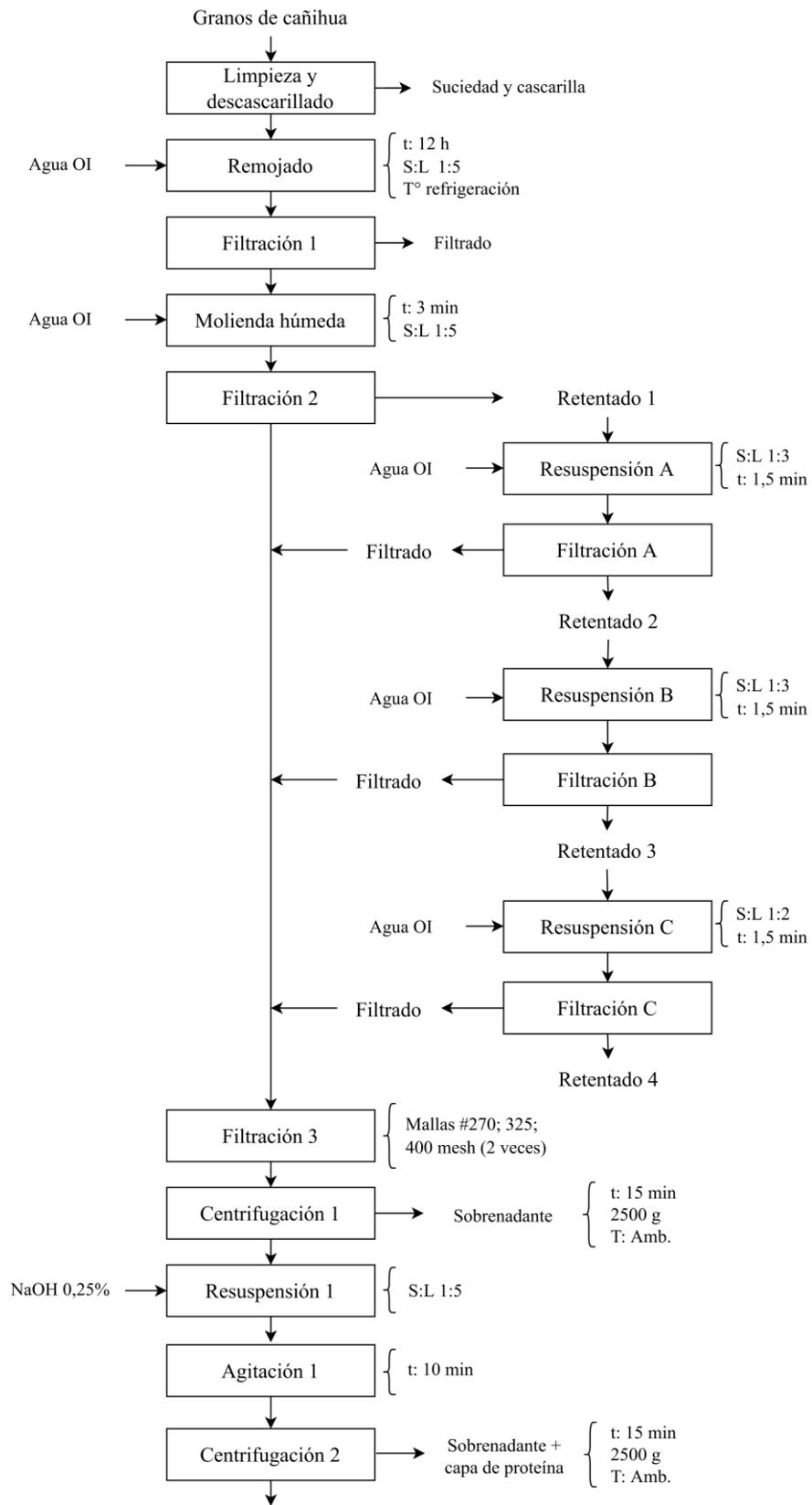
### 3.4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se realizaron tres métodos de extracción para la obtención de almidón de cañihua. A continuación, se describen cada una de las operaciones unitarias y su respectivo flujo de operaciones.

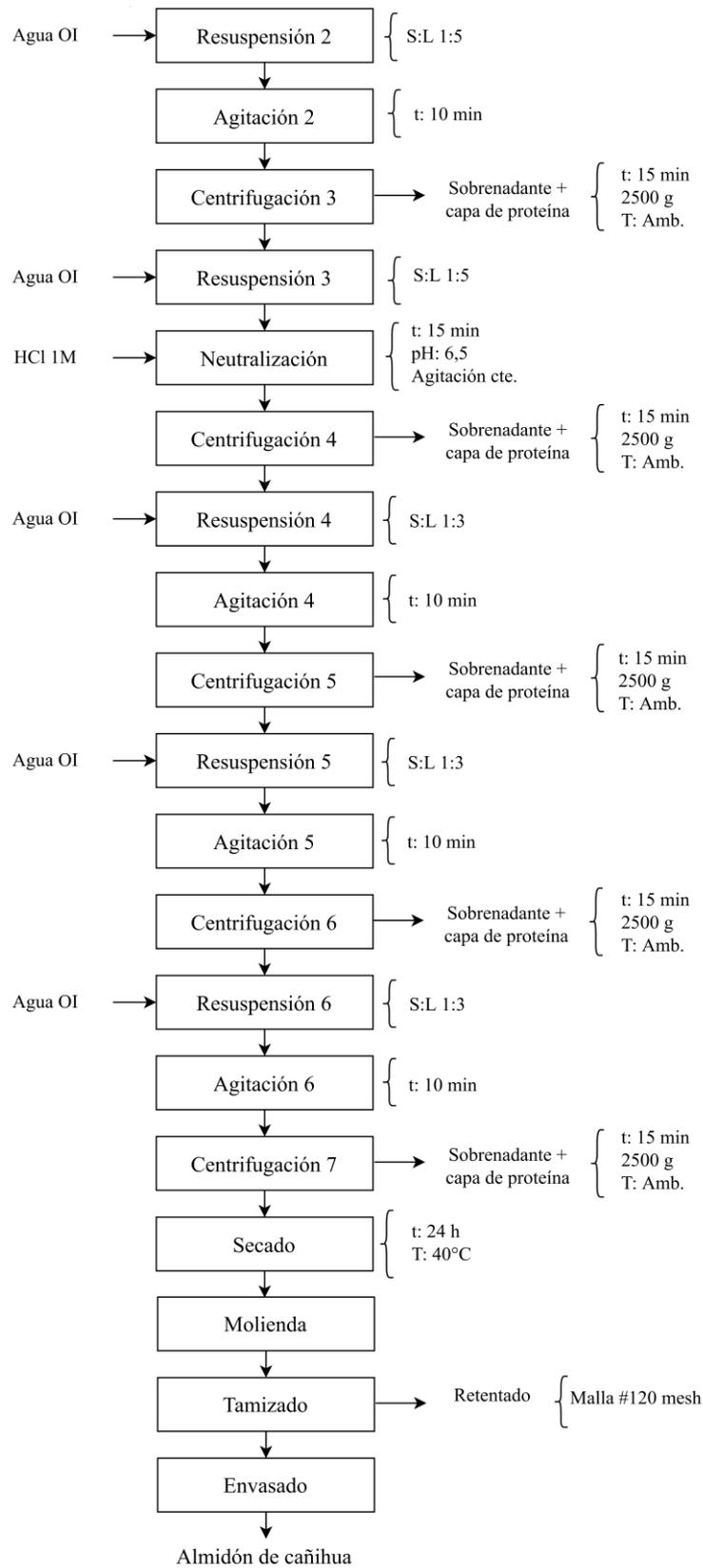
#### 3.4.1. MÉTODO 1: REMOJO ACUOSO Y LAVADO ALCALINO

Se usó la metodología de extracción de almidón descrita por Steffolani *et al.* (2013), con algunas modificaciones. El flujo de operaciones se presenta en la Figura 6 y se detalla a continuación:

- **Limpieza y descascarillado:** Los granos de cañihua se limpiaron y separaron de la materia sólida extraña (piedras, tallo, hojas, etc.) y posteriormente se procedió al descascarillado en un molino de cuchillas a una velocidad de 2500 rpm durante 3 min. Posteriormente, se procedió a separar la cáscara del grano mediante el uso de un tamiz de 30 mesh.
- **Remojo:** Los granos limpios y descascarillados se remojaron en agua tratada por ósmosis inversa (OI) en relación cañihua – agua de 1:5 durante 12 horas a 4°C.
- **Filtración 1:** Se retiró los granos del agua de remojo, mediante el uso de una tela muselina, luego se procedió al pesado.
- **Molienda húmeda:** Los granos pesados se colocaron en una licuadora marca Oster y se le agregó la diferencia de agua OI para llegar al peso obtenido en el remojo, luego se procedió al licuado a velocidad 2 por 3 min, realizando una parada al minuto y medio, para colocar los granos de cañihua que se encontraron en las paredes de la licuadora, con la solución licuada.
- **Filtración 2:** El licuado se filtró mediante el uso de tres telas muselina, obteniendo un filtrado y el retenido (fibra con almidón).



«Continuación».



**Figura 6: Diagrama de flujo del método de extracción 1 para la obtención de almidón de cañihua**

- **Resuspensión A:** El retenido de la etapa anterior, se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:4, luego se agitó manualmente hasta obtener una suspensión visualmente homogénea.
- **Filtración A:** La suspensión se filtró mediante el uso de tres telas muselina, obteniendo un filtrado (que pasa al filtrado 3 posterior) y un segundo retenido (fibra con almidón).
- **Resuspensión B:** El segundo retenido de la etapa anterior, se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:3, luego se agitó manualmente hasta obtener una suspensión visualmente homogénea.
- **Filtración B:** La suspensión se filtró mediante el uso de tres telas muselina, obteniendo un filtrado (que pasa a la filtración 3 posterior) y un tercer retenido (fibra con almidón).
- **Resuspensión C:** El tercer retenido de la etapa anterior, se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:3, luego se agitó manualmente hasta obtener una suspensión visualmente homogénea.
- **Filtración C:** La suspensión se filtró mediante el uso de tres telas muselina, obteniendo un filtrado (que pasa a la filtración 3 posterior) y un cuarto retenido (fibra con almidón), este último fue desechado.
- **Filtración 3:** Los filtrados obtenidos de la filtración 2, A y B, se colocaron en un recipiente, se revolvieron y se procedió al filtrado. Esta solución obtenida se pasó a través de tres tamices, en el siguiente orden, 270, 325 y 400 mesh, este último se pasó dos veces.
- **Centrifugación 1:** El filtrado obtenido, de la etapa anterior, se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante obtenido se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.

- **Resuspensión 1:** El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó solución de NaOH al 0,25 por ciento en relación 1:5 y se dispersó manualmente.
- **Agitación 1:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 2:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante y la capa superior marrón (proteína solubilizada) se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 2:** El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:5 y se dispersó manualmente.
- **Agitación 2:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 3:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante y la capa delgada superior marrón (proteína solubilizada) se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 3:** El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:5 y se dispersó manualmente.
- **Neutralización:** Se neutralizó la solución adicionando solución de HCl 1 M hasta llegar a un pH de 6,5 aproximadamente y se agitó por 15 min.
- **Centrifugación 4:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 4:** En esta etapa se realiza el primer lavado del almidón. El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:3 y se dispersó manualmente.

- **Agitación 4:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 5:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 5:** En esta etapa se realiza el segundo lavado del almidón. El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:3 y se dispersó manualmente.
- **Agitación 5:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 6:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura de ambiente. Luego, el sobrenadante se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 6:** En esta etapa se realiza el tercer y último lavado del almidón. El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:3 y se dispersó manualmente.
- **Agitación 6:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 7:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante se descartó y el sedimento se colocó en una rejilla de aluminio con papel de aluminio.
- **Secado:** Se colocó en una estufa a 40°C durante 24 h.

- **Molienda:** Luego del secado, el almidón se molió manualmente en un mortero, hasta lograr un tamaño de partícula lo más fino posible para que pase mediante un tamiz de 120 mesh.
- **Tamizado:** Finalmente, el almidón se tamizó a través de un tamiz de 120 mesh, para lograr un polvo fino y proceder a determinar las características fisicoquímicas y funcionales.
- **Envasado:** El producto obtenido se colocó en bolsas Ziploc y se almacenó en el interior de la campana desecadora.

### 3.4.2. MÉTODO 2: REMOJO ALCALINO Y LAVADO ACUOSO

Se usó la metodología de extracción de almidón descrita por Fuentes *et al.* (2018), con algunas modificaciones. El flujo de operaciones se presenta en la Figura 7 y se detallan a continuación:

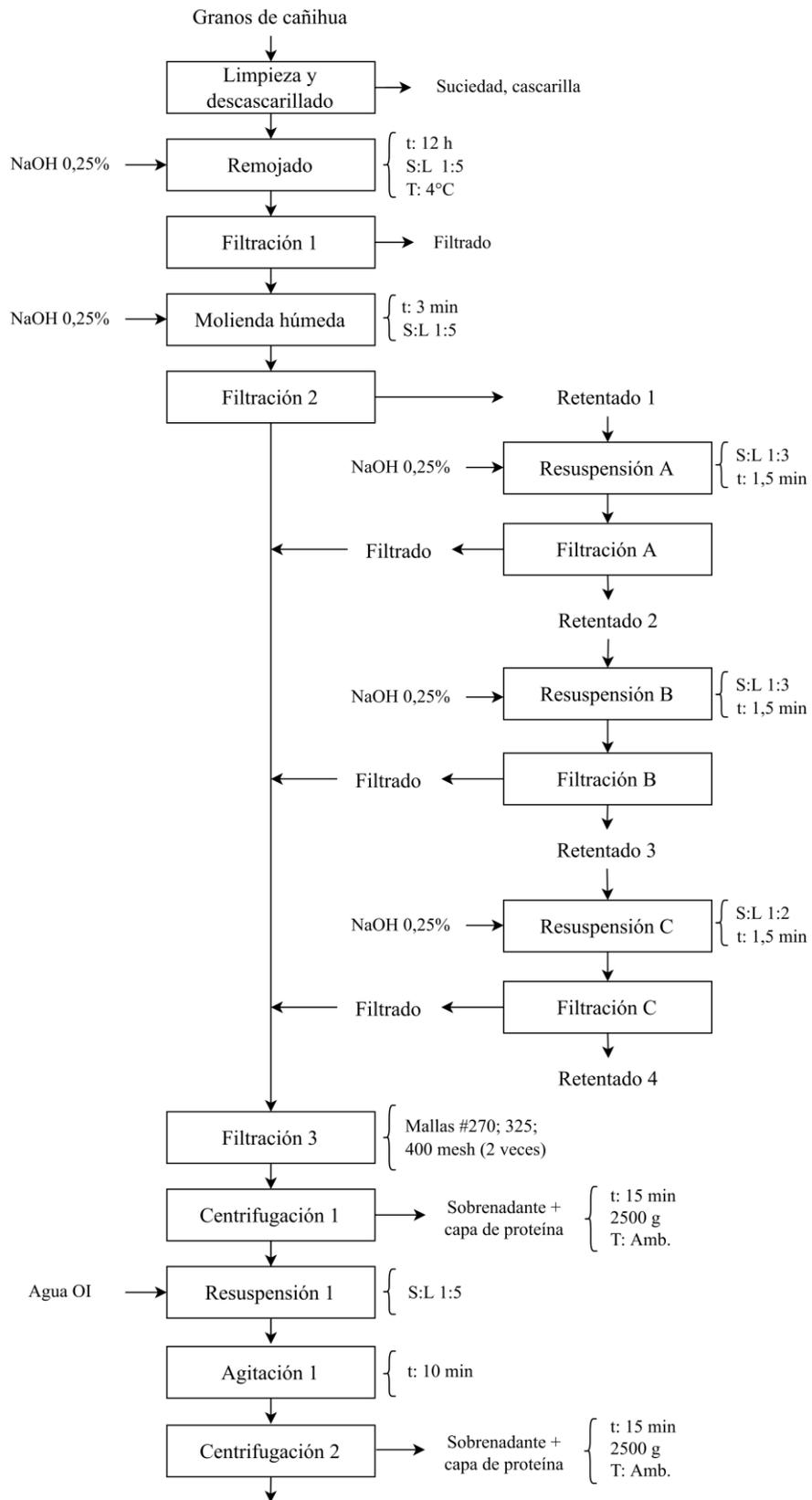
- **Limpieza y descascarillado:** Los granos de cañihua se limpiaron y separaron de la materia sólida extraña (piedras, tallo, hojas, etc.) y posteriormente se procedió al descascarillado en un molino de cuchillas a una velocidad de 2500 rpm durante 3 min. Posteriormente, se procedió a separar la cáscara del grano mediante el uso de un tamiz de 30 mesh.
- **Remojo:** Los granos limpios y descascarillados se remojaron en una solución de NaOH al 0,25 por ciento en relación cañihua – solvente de 1:5 durante 12 horas a 4°C.
- **Filtración 1:** Se retiró los granos del hidróxido de remojo, mediante el uso de una tela muselina, luego se procedió al pesado.
- **Molienda húmeda:** Los granos pesados se colocaron en una licuadora y se le agregó la diferencia de solución de NaOH 0,25 por ciento para llegar al peso obtenido en el remojado, luego se procedió al licuado a una velocidad de 2 durante 3 min, realizando

una parada al minuto y medio, para colocar los granos de cañihua que se encontraron en las paredes de la licuadora, con la solución licuada.

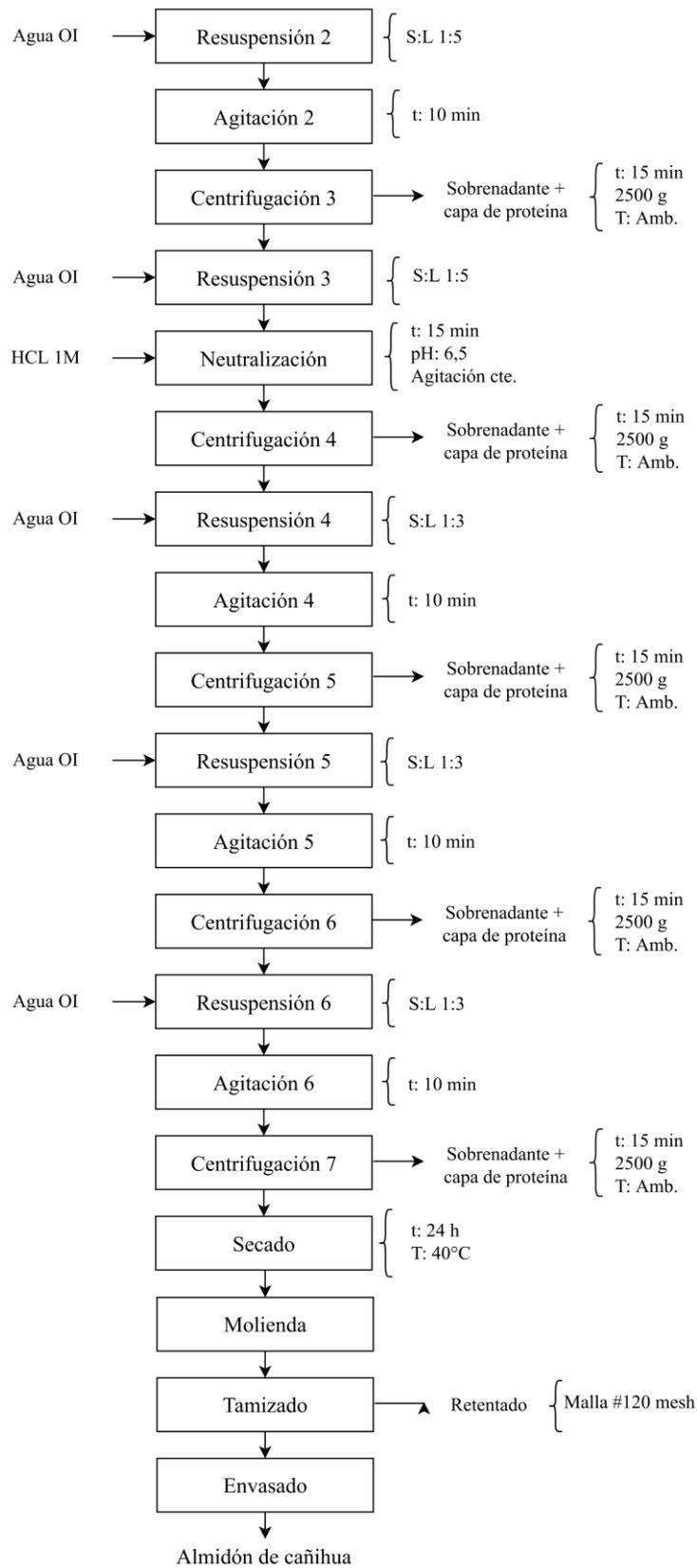
- **Filtración 2:** El licuado se filtró mediante el uso de tres telas muselina, obteniendo un filtrado y el retenido (fibra con almidón).
- **Resuspensión A:** El retenido de la etapa anterior, se colocó en un recipiente y se le agregó solución de NaOH 0,25 por ciento en relación 1:4, luego se agitó manualmente hasta obtener una suspensión visualmente homogénea.
- **Filtración A:** La suspensión se filtró mediante el uso de tres telas muselina, obteniendo un filtrado (que pasa al filtrado 3) y un segundo retenido (fibra con almidón).
- **Resuspensión B:** El segundo retenido de la etapa anterior, se colocó en un recipiente y se le agregó solución de NaOH 0,25 por ciento en relación 1:3, luego se agitó manualmente hasta obtener una suspensión visualmente homogénea.
- **Filtración B:** La suspensión se filtró mediante el uso de tres telas muselina, obteniendo un filtrado (que pasa a la filtración 3 posterior) y un tercer retenido (fibra con almidón).
- **Resuspensión C:** El tercer retenido de la etapa anterior, se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:3, luego se agitó manualmente hasta obtener una suspensión visualmente homogénea.
- **Filtración C:** La suspensión se filtró mediante el uso de tres telas muselina, obteniendo un filtrado (que pasa a la filtración 3 posterior) y un cuarto retenido (fibra con almidón), este último fue desechado.
- **Filtración 3:** Los filtrados obtenidos de la filtración 2, A y B, se colocaron en un recipiente, se revolviaron y se procedió al filtrado. Esta solución obtenida se pasó a

través de tres tamices, en el siguiente orden, 270, 325 y 400 mesh, en esta última se pasó dos veces.

- **Centrifugación 1:** El filtrado obtenido, de la etapa anterior, se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante y la capa superior marrón (proteína solubilizada) se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 1:** El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua tratada por ósmosis inversa (OI) en relación 1:5 y se dispersó manualmente.
- **Agitación 1:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 2:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante y la capa superior se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 2:** El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:5 y se dispersó manualmente.
- **Agitación 2:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 3:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante y la capa delgada superior marrón (proteína solubilizada) se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 3:** El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:5 y se dispersó manualmente.
- **Neutralización:** Se neutralizó la solución adicionando solución de HCl 1 M hasta llegar a un pH de 6,5 aproximadamente y se agitó por 15 min en un agitador magnético.



«Continuación».



**Figura 7: Diagrama de flujo del método de extracción 2 para la obtención de almidón de cañihua**

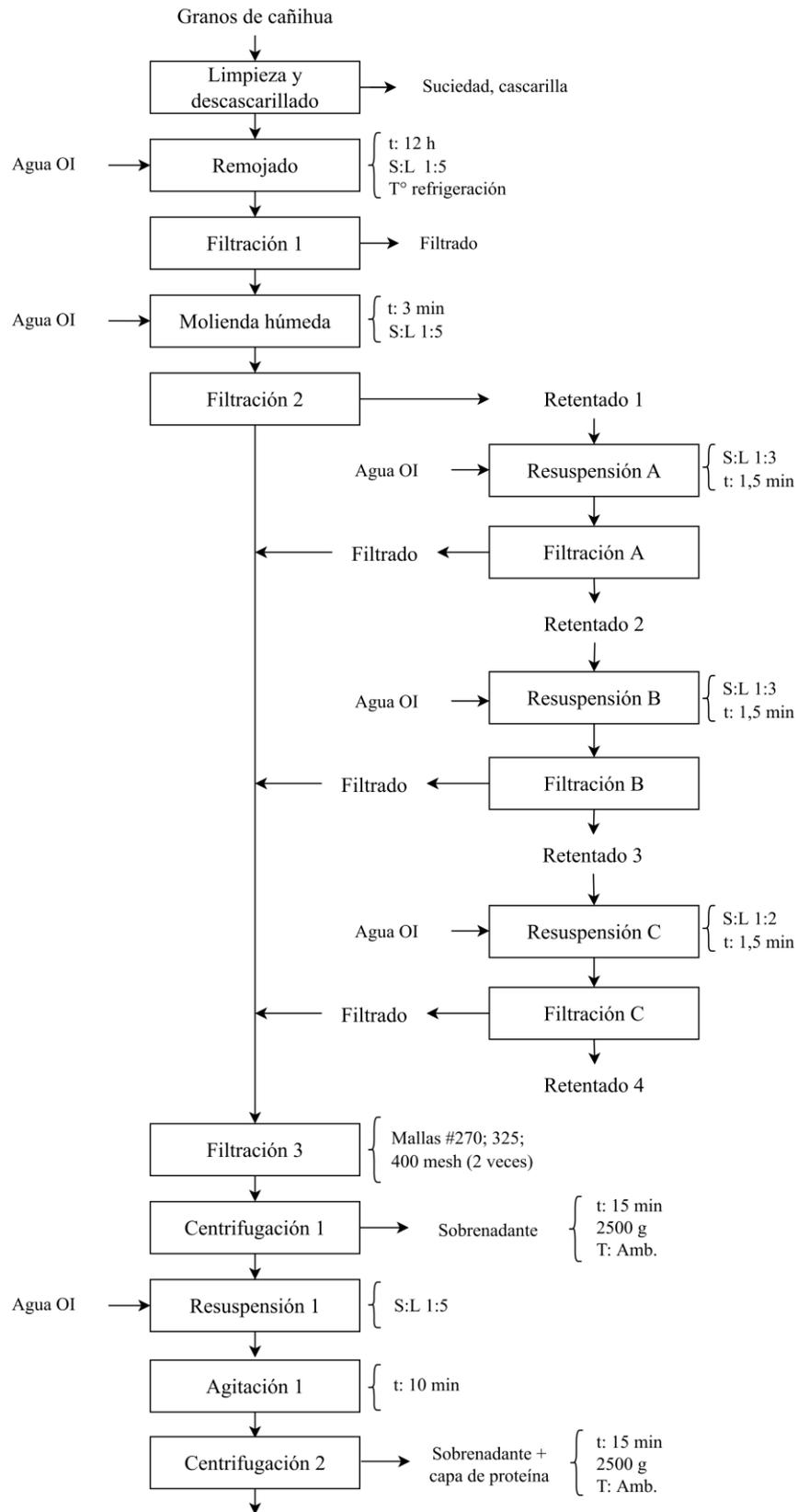
- **Centrifugación 4:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 4:** En esta etapa se realiza el primer lavado del almidón. El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:3 y se dispersó manualmente.
- **Agitación 4:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 5:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 5:** En esta etapa se realiza el segundo lavado del almidón. El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:3 y se dispersó manualmente.
- **Agitación 5:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 6:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 6:** En esta etapa se realiza el tercer y último lavado del almidón. El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:3 y se dispersó manualmente.
- **Agitación 6:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.

- **Centrifugación 7:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante se descartó y el sedimento se colocó en una rejilla de aluminio con papel de aluminio.
- **Secado:** Se colocó en una estufa a 40°C durante 24 h.
- **Molienda:** Luego del secado, el almidón se molió manualmente en un mortero, hasta lograr un tamaño de partícula lo más fino posible para que pase mediante un tamiz de 120 mesh.
- **Tamizado:** Finalmente, el almidón se tamizó a través de un tamiz de 120 mesh, para lograr un polvo fino y proceder a realizar las características fisicoquímicas y funcionales.
- **Envasado:** El producto obtenido se colocó en bolsas Ziploc y se almacenó en el interior de la campana desecadora.

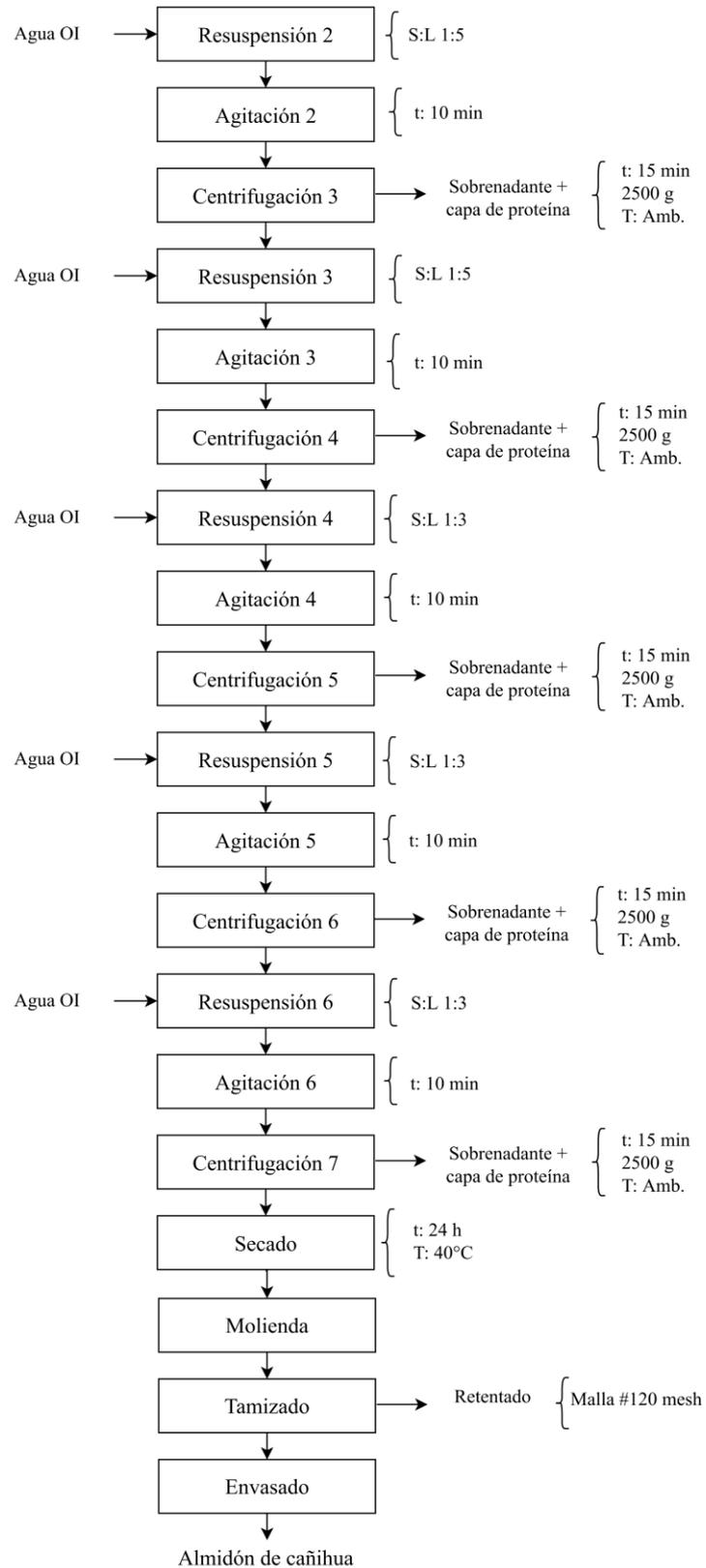
### 3.4.3. MÉTODO 3: REMOJO Y LAVADO ACUOSO

El tercer método de extracción fue un control bajo una extracción acuosa. El flujo de operaciones se presenta en la Figura 8 y se detalla a continuación:

- **Limpeza y descascarillado:** Los granos de cañihua se limpiaron y separaron de la materia sólida extraña (piedras, tallo, hojas, etc.) y posteriormente se procedió al descascarillado en un molino de cuchillas a una velocidad de 2500 rpm durante 3 min. Posteriormente, se procedió a separar la cáscara del grano mediante el uso de un tamiz de 30 mesh.
- **Remojo:** Los granos limpios y descascarillados se remojaron en agua tratada por ósmosis inversa (OI) en relación cañihua – agua de 1:5 durante 12 horas a 4°C.
- **Filtración 1:** Se retiró los granos del agua de remojo, mediante el uso de una tela muselina, luego se procedió al pesado.



«Continuación».



**Figura 8: Diagrama de flujo del método de extracción 3 para la obtención de almidón de cañihua**

- **Molienda húmeda:** Los granos pesados se colocaron en una licuadora y se le agregó la diferencia de agua OI para llegar al peso obtenido en el remojado, luego se procedió al licuado a una velocidad de 2 por 3 min, realizando una parada al minuto y medio, para colocar los granos de cañihua que se encontraron en las paredes de la licuadora, con la solución licuada.
- **Filtración 2:** El licuado se filtró mediante el uso de tres telas muselina, obteniendo un filtrado y el retenido (fibra con almidón).
- **Resuspensión A:** El retenido de la etapa anterior, se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:4, luego se agitó manualmente hasta obtener una suspensión visualmente homogénea.
- **Filtración A:** La suspensión se filtró mediante el uso de tres telas muselina, obteniendo un filtrado (que pasa al filtrado 3 posterior) y un segundo retenido (fibra con almidón).
- **Resuspensión B:** El segundo retenido de la etapa anterior, se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:3, luego se agitó manualmente hasta obtener una suspensión visualmente homogénea.
- **Filtración B:** La suspensión se filtró mediante el uso de tres telas muselina, obteniendo un filtrado (que pasa a la filtración 3 posterior) y un tercer retenido (fibra con almidón). Este último, pasó por el mismo procedimiento de la resuspensión y Filtración B, con la diferencia que el último retenido se desechó.
- **Resuspensión C:** El tercer retenido de la etapa anterior, se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:3, luego se agitó manualmente hasta obtener una suspensión visualmente homogénea.

- **Filtración C:** La suspensión se filtró mediante el uso de tres telas muselina, obteniendo un filtrado (que pasa a la filtración 3 posterior) y un cuarto retenido (fibra con almidón), este último fue desechado.
- **Filtración 3:** Los filtrados obtenidos de la filtración 2, A y B, se colocaron en un recipiente, se revolviaron y se procedió al filtrado. Esta solución obtenida se pasó a través de tres tamices, en el siguiente orden, 270, 325 y 400 mesh, en esta última se pasó dos veces.
- **Centrifugación 1:** El filtrado obtenido, de la etapa anterior, se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura de refrigeración (4°C). Luego, el sobrenadante obtenido se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 1:** El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:5 y se dispersó manualmente.
- **Agitación 1:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 2:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante y la capa superior marrón (proteína solubilizada con almidón) se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 2:** El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:5 y se dispersó manualmente.
- **Agitación 2:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 3:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante y la capa delgada superior marrón (proteína solubilizada con almidón) se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.

- **Resuspensión 3:** El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:5 y se dispersó manualmente.
- **Agitación 3:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 4:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 4:** El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:3 y se dispersó manualmente.
- **Agitación 4:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 5:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante se descartó y el sedimento pasó a la siguiente etapa.
- **Resuspensión 5:** El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:3 y se dispersó manualmente.
- **Agitación 5:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 6:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante se descartó y el sedimento se colocó en una rejilla de aluminio con papel de aluminio.
- **Resuspensión 6:** En esta etapa se realiza el tercer y último lavado del almidón. El sedimento obtenido se colocó en un recipiente y se le agregó agua OI en relación 1:3 y se dispersó manualmente.

- **Agitación 6:** La dispersión obtenida se agitó durante 10 min. Esta operación se realizó en un agitador magnético.
- **Centrifugación 7:** La dispersión se centrifugó a 2500 x g durante 15 min a temperatura ambiente. Luego, el sobrenadante se descartó y el sedimento se colocó en una rejilla de aluminio con papel de aluminio.
- **Secado:** Se colocó en una estufa a 40°C durante 24 h.
- **Molienda:** Luego del secado, el almidón se molió manualmente en un mortero, hasta lograr un tamaño de partícula lo más fino posible para que pase mediante un tamiz de 120 mesh.
- **Tamizado:** Finalmente, el almidón se tamizó a través de un tamiz de 120 mesh, para lograr un polvo fino y proceder a realizar las características fisicoquímicas y funcionales.
- **Envasado:** El producto obtenido se colocó en bolsas Ziploc y se almacenó en el interior de la campana desecadora.

### 3.5. MÉTODO DE ANÁLISIS

#### 3.5.1. RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN

Se realizó el cálculo del rendimiento de la extracción mediante la siguiente ecuación:

$$\%R = \frac{\text{Peso total del almidón extraído (b.s.)(g)}}{\text{Peso de los granos de cañihua descascarillado (b.s.)(g)}} * 100$$

### 3.5.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA

#### a. ANÁLISIS PROXIMAL

La determinación del análisis proximal se realizó de acuerdo con los métodos oficiales descritos por la AOAC (2016). Se determinó humedad; cenizas; proteína bruta, grasa bruta, fibra bruta y carbohidratos por diferencia.

#### b. DETERMINACIÓN DE AMILOSA

Para la prueba de determinación de amilosa, se siguió la metodología descrita por Oh *et al.* (2008). Para ello, se disolvió 20 mg b.s. de almidón en 8 mL de dimetil sulfóxido (DMSO) al 90 por ciento en un tubo con tapón de rosca de 10 mL. El tubo se agitó vigorosamente por 2 min para luego ser colocado en un baño de agua a 85 °C durante 15 min agitándolo cada 2 min. El tubo se enfrió a temperatura ambiente por 30 min, y el contenido se diluyó con agua a 25 mL en un matraz volumétrico. Posteriormente, se extrajo 1 mL de la fiola y se depositó en otra fiola de 50 mL, se adicionó 5 mL de solución de yodo (preparado mezclando 0,0315 g I<sub>2</sub> resublimado más 0,1079 g de KI y aforados en 100 mL con agua destilada), se aforó a 50 mL con agua destilada y se leyó a una absorbancia de 600 nm (Anexo 1). El contenido de amilosa se calculó a partir de una curva estándar preparada utilizando una mezcla de amilosa de papa pura y amilopectina, la cual se muestra a continuación:

$$\text{Absorbancia} = 0.0035 * (\% \text{Amilosa}) + 0.0624$$

#### c. DETERMINACIÓN DE COLOR

La prueba de determinación de color se llevó a cabo utilizando el Espectrocolorímetro modelo CM – 5 (Konica Minolta®), el cual fue calibrado previamente, usando iluminante D65. La medición de color fue determinada en el espacio de color CIELAB (L\*, a\*, b\*). Donde el parámetro L\* representa la medición de la luminosidad (0 = negro, 100 = blanco), mientras que los atributos de color a\* (rojo (+) / verde (-)) y b\* (amarillo (+) / azul (-)),

representan la cromaticidad. Asimismo, se determinó el Índice de blancura (IB) con los parámetros obtenidos, utilizando la siguiente ecuación descrita por Singh *et al.* (2014):

$$IB = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$$

### 3.5.3. CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL

#### a. PROPIEDADES DE HIDRATACIÓN: CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA (CAA), SOLUBILIDAD (S) Y PODER DE HINCHAMIENTO (PH)

La capacidad de absorción de agua, solubilidad y poder de hinchamiento fueron calculadas siguiendo el procedimiento descrito por López – Fernández *et al.* (2021), con algunas modificaciones. Se preparó en tubos de centrífuga de 50 ml una suspensión de almidón al 1 por ciento (p/v), homogenizando 0,3 g (b.s.) en 30 ml de agua, agitado en vórtex por 15 s y calentado en Baño María a temperaturas de 65, 75, 85 y 95° C por 30 min, con agitación en vórtex cada 5 min. Posteriormente las muestras fueron centrifugadas a 3000 x g por 15 min. Se pesó el precipitado, y el sobrenadante en su totalidad fue secado en estufa a 105°C hasta peso constante. El poder de hinchamiento (g/g), la solubilidad (%) y la capacidad de absorción de agua (g/g) se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$PH = \frac{\text{Peso de la pasta del sedimento (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)} * (1 - S)(g)}$$

$$S (\%) = \frac{\text{Peso del sobrenadante seco (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} * 100$$

$$CAA = \frac{\text{Peso de la pasta del sedimento (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}}$$

## **b. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ACEITE (CAO)**

La capacidad de absorción de aceite fue calculada siguiendo el procedimiento descrito por Jan *et al.* (2015), con algunas modificaciones. Se preparó en tubos de centrifuga de 50 ml una suspensión de almidón al 1 por ciento (p/v), homogenizando 0,3 g (b.s.) en 30 ml de aceite, agitado en vórtex por 1 hora, en ciclos de parada de 10 min. Posteriormente, las muestras fueron centrifugadas a 3000 g por 15 min. Se descartó el sobrenadante y se dejó escurrir el aceite de cada tubo hasta que dejen de caer gotas. Finalmente, se pesó el precipitado y se procedió al cálculo de la capacidad de absorción de aceite (g/g) mediante la siguiente ecuación:

$$CAO = \frac{\text{Peso de la pasta del sedimento (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}}$$

## **c. SINÉRESIS**

La sinéresis en refrigeración se determinó siguiendo el procedimiento descrito por Singh *et al.* (2006), con algunas modificaciones. Se preparó una suspensión al 5 por ciento en base seca (p/p) y calentado a 90° C por 30 min en un Baño María con agitación constante, luego se enfrió el gel a temperatura ambiente. El gel fue distribuido en tubos de centrifuga de 50 ml pesando 20 g en cada uno, y almacenados a 4° C. Los tubos fueron retirados a los días 1, 3, 5 y 7 y centrifugados a 3200 g por 15 min, la sinéresis fue expresada como los gramos de agua liberada respecto a la masa inicial de gel en el tubo liberado posterior a la centrifugación. La sinéresis se calculó con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Sinéresis} = \frac{\text{Agua separada (g)}}{\text{Peso total de la muestra (g)}} * 100$$

#### **d. CLARIDAD DE GEL**

La claridad o turbidez fue determinado siguiente el procedimiento descrito por Jan *et al.* (2017b), con algunas modificaciones. Se preparó una suspensión al 1 por ciento (p/p) y se calentó en baño María a 90° C por 1 hora, con una agitación constante en los primeros 5 min, y posteriormente agitados cada 5 min. El gel fue distribuido en tubos Falcon de 15 ml. La claridad fue determinada como el porcentaje de transmitancia a 640 nm (utilizando agua destilada como blanco), a los días 0, 1, 2, 3 y 4 días de almacenamiento a 4° C.

#### **e. PROPIEDADES TÉRMICAS**

Las propiedades térmicas (entalpía de gelatinización y temperaturas de gelatinización de inicio, pico y culminación) se determinaron por Calorimetría de Barrido Diferencial (TA-Instruments) utilizando el procedimiento descrito por Martínez *et al.* (2021), ejecutando un barrido de 25 a 115° C a una velocidad de 2 °C/min y una relación almidón: agua de 1:3. Las propiedades térmicas fueron calculadas en el programa NanoAnalyze Data Analysis v 3.11.0 (TA Instruments, 2020).

#### **f. PROPIEDADES REOLÓGICAS**

Las propiedades reológicas evaluadas fueron las siguientes:

- **FORMACIÓN DE PASTA**

El perfil de pasta se ejecutó en un equipo RVA (Perten Instruments, Australia) a una concentración del 12 por ciento, siguiendo el procedimiento de la AACC (1999), considera una agitación inicial a 960 rpm por 10 s, mantenimiento a 50° C por 1 min, calentamiento desde 50 a 95° C a una tasa de 12° C/min (3,7 min), mantenimiento a 95° C por 2,5 min, enfriamiento de 95 a 50° C a una tasa de 11,8 °C/min (3,4 min) y mantenimiento a 50° C por 2 min. Se determinó los parámetros temperatura de pasta, viscosidad pico (VP), tiempo pico (Pt), viscosidad mínima (VM), viscosidad final (VF), *breakdown* y *setback* utilizando el programa ThermoCline v. 3.17 (Perten Instruments, 2011).

- **COMPORTAMIENTO REOLÓGICO**

Las mediciones de las propiedades reológicas fueron determinadas mediante el uso del Reómetro Híbrido (DHR3 Discovery. TA Instruments, EE.UU.), empleando un sistema de geometría plato – plato liso de 40 mm de diámetro. El tamaño del *gap* fue establecido a 1 mm. Cada evaluación reológica se realizó con muestras nuevas, a temperatura constante de 25°C controlado por un sistema Peltier.

Para la realización de cada muestra, se siguió la metodología utilizada por Kong *et al.* (2010), con algunas modificaciones. Se preparó dispersiones de 5 por ciento (p/p) para el comportamiento de flujo y 4 por ciento (p/p) para las propiedades viscoelásticas, las cuales fueron calentadas a 90°C durante 30 min con agitación constante. Posteriormente, fueron enfriadas a en baño de agua fría hasta llegar a una temperatura de 25°C y finalmente se colocó 2 mL en la placa Peltier. Cada muestra se mantuvo en reposo durante 5 min previo a la realización de los experimentos.

- **COMPORTAMIENTO DE FLUJO**

Se siguió la metodología descrita por Kong *et al.* (2010). Las muestras fueron sometidas a un cizallamiento a 300 s<sup>-1</sup> durante 10 min para evitar cualquier tixotropía (datos no mostrados). Posteriormente, sobre la misma muestra se llevaron a cabo las pruebas de cizallamiento en estado estacionario, en el intervalo de velocidad de cizallamiento (K) de 0,01 a 100 s<sup>-1</sup> y de 100 a 0,01 s<sup>-1</sup>. Las curvas de flujo resultantes son descritas por el modelo de ley de Herschel-Bulkley:

$$\sigma = \sigma_o + K\gamma^\eta$$

Donde:  $\sigma$  es el esfuerzo cortante (Pa),  $\sigma_o$  es el umbral de fluencia (Pa),  $\gamma$  es la velocidad de cizalla (s<sup>-1</sup>), K es el coeficiente de consistencia (Pa.s<sup>n</sup>) y  $\eta$  es el índice de comportamiento de flujo (adimensional).

Se siguió la metodología descrita por López *et al.* (2010), con algunas modificaciones. Primero, se realizó un barrido de amplitud (0,1–100 Pa) para determinar la región de

viscoelasticidad lineal a una frecuencia constante de 1 Hz. Posteriormente, se realizó un barrido de frecuencias a una deformación constante (0,1 Pa) y en el rango de 0,01–10 Hz. Los módulos viscoelásticos que se determinaron fueron los siguientes: G' (módulo de almacenamiento), G'' (módulo de pérdida) y n\*(viscosidad compleja) en función de la frecuencia oscilatoria. Las curvas resultantes fueron modelados a la ecuación de la ley de la potencia:

$$G' = k' \times \omega^{n'}$$

$$G'' = k'' \times \omega^{n''}$$

Donde: G' es el módulo de almacenamiento (Pa), G'' es el módulo de pérdida (Pa),  $\omega$  es la frecuencia (Hz) y k', k'', n' y n'' son constantes determinadas experimentalmente.

- **ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA (TPA)**

Se siguió la metodología descrita por Sandhu y Singh (2007), con algunas modificaciones. Se utilizó el gel obtenido al finalizar el análisis de perfil de pasta en el equipo RVA. Este fue trasvasado a tubos de centrifuga (capacidad de 50 ml y 29 mm de diámetro) y puesto en refrigeración a 4° C por 24 h. Posteriormente, el gel fue desmoldado y cortado con una longitud de 30 mm, puesto en el equipo texturómetro (Instron, Modelo 3365, USA) y comprimido en dos ciclos utilizando un cabezal de 5 cm de diámetro hasta una profundidad de 10 mm a una velocidad de 0,5 mm/s. Se registró el perfil de textura a partir del cual se determinó la dureza, adhesividad, elasticidad, cohesividad, masticabilidad y gomosidad del gel de almidón.

### **3.6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

En la presente investigación del tipo experimental se realizó la evaluación de tres métodos de extracción de almidón, a fin de establecer si existen diferencias significativas en sus propiedades fisicoquímicas y funcionales. El esquema experimental se muestra en la Tabla 8. En la primera etapa se realizó la extracción del almidón de cañihua, por los tres métodos de extracción (tratamientos) de la variedad Illpa-INIA, los cuales fueron M1, M2 y M3. La

segunda etapa consistió en la caracterización fisicoquímica y funcional de los almidones nativos de cañihua (M1, M2 y M3) y el tratamiento control (almidón de maíz). Se realizaron tres repeticiones por análisis de cada tratamiento. Finalmente, en la tercera etapa, se evaluaron estadísticamente las variables de respuesta de la caracterización del almidón de cada tratamiento a fin de determinar si existen diferencias significativas.

### **3.6.1. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

En la presente investigación se aplicó el Diseño Completamente al Azar (DCA), en el cual los tratamientos fueron los métodos de extracción y el control (variable independiente) y los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica y funcional fueron las variables dependientes (Tabla 8).

Los resultados fueron expresados como la media y desviación estándar. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para comparar los tratamientos (M1, M2, M3 y control) y test de comparación múltiple de Tukey para establecer diferencias entre las medias de las variables de respuesta de los tratamientos aplicados. El nivel de significancia para el estadístico fue de 95 por ciento. Se utilizó el programa estadístico MINITAB versión 19.1.1.0 para el análisis mencionado.

**Tabla 8: Metodología Experimental**

| Etapa 1                       | Etapa 2   | Etapa 3  |
|-------------------------------|---|--|
| <b>Extracción del almidón</b> | <b>Caracterización fisicoquímica y funcional</b>  | <b>Obtención de las variables de respuesta y análisis estadístico</b>  |
|                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis proximal</li> <li>- Contenido de amilosa</li> <li>- Color</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- % Humedad, lípidos, proteína, ceniza, fibra y carbohidratos.</li> <li>- Contenido de amilosa, contenido de amilopectina</li> <li>- L* (luminosidad), a* (indicador de color (+) rojo/ (-) verde), b* (indicador de color (+) amarillo/ (-) azul) y IB (índice de blancura).</li> </ul>  |
| <b>Tratamientos:</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Propiedades de hidratación</li> <li>- Capacidad de absorción de aceite</li> <li>- Claridad de los geles</li> <li>- Sinéresis</li> </ul>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- PH (poder de hinchamiento), %S (solubilidad), CAA (capacidad de absorción de agua)</li> <li>- CAO (capacidad de absorción de aceite).</li> <li>- % T (porcentaje de transmitancia).</li> <li>- % S (porcentaje de sinéresis).</li> </ul>  |
| - Método 1 (M1)               |   |  |
| - Método 2 (M2)               |   |  |
| - Método 3 (M3)               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Propiedades térmicas</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- T<sub>o</sub> (temperatura de inicio), T<sub>p</sub> (temperatura pico), T<sub>c</sub> (temperatura de conclusión) y ΔH (entalpía de gelatinización).</li> </ul>  |
| - Almidón de maíz (Control)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Propiedades de formación de pasta</li> <li>- Comportamiento de flujo</li> <li>- Propiedades viscoelásticas</li> <li>- Análisis de perfil de textura (TPA)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- VP (viscosidad pico), VM (viscosidad mínima), VF (viscosidad final), BD (<i>breakdown</i>), SB (<i>setback</i>), tP (tiempo pico) y TP (temperatura de pasta).</li> <li>- Índice de comportamiento del flujo (η), índice de consistencia (K).</li> <li>- Barrido de amplitud y frecuencia: G' (módulo de almacenamiento) y G'' (módulo de pérdida)</li> <li>- Dureza, adhesividad, cohesividad, elasticidad, gomosidad y masticabilidad.</li> </ul> |
|                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Caracterización funcional</li> <li>- Caracterización fisicoquímica</li> <li>- Propiedades reológicas</li> </ul>  |  |

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE CAÑIHUA VARIEDAD ILLPA-INIA

El proceso de extracción del almidón consistió de una serie de etapas, las cuales fueron descritas en la metodología experimental. Cada etapa tuvo como objetivo principal el aislamiento y purificación del almidón del resto de sus componentes. El Halal *et al.* (2019) señalan que es necesario extraer almidón de alta calidad con menor cantidad de contenido de cenizas, lípidos y proteínas antes de investigar su estructura y propiedades fisicoquímicas. Por lo tanto, la selección de un método de extracción apropiado es uno de los pasos críticos y está influenciado principalmente por la solubilidad de la proteína, el nivel de interacción proteína-almidón y las características de los gránulos de almidón.

Un método apropiado es aquel que permite obtener un producto puro con un daño mínimo a la estructura nativa de los gránulos, con una recuperación máxima y un costo bajo (Jan *et al.*, 2017b). Correia y Beirao-da-Costa (2012) y Villarreal *et al.* (2013) añaden la importancia de la menor cantidad de efluentes generado a partir de la aplicación de una serie de etapas interrelacionadas que permitan eliminar la fracción no amilácea, sin afectar la estructura nativa del gránulo, tener mínima incidencia en sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas, y evitar dotarlo de toxicidades asociadas.

Para la extracción del almidón, dependiendo de la fuente se puede emplear agua como solvente, así como soluciones de reactivos como metabisulfito de sodio e hidróxido de sodio en bajas concentraciones. Sin embargo, estos reactivos tienen baja toxicidad y se eliminan fácilmente al lavarlos con agua. Los sucesivos lavados con agua se realizan para eliminar los residuos y mejorar la purificación; estos métodos garantizan la seguridad alimentaria de los almidones, apropiados para varios usos, así como en la industria alimentaria (Kringel *et al.*, 2020).

La extracción acuosa es la más común, no promueve cambios en las características estructurales de los gránulos. Además, permite la extracción de almidón sin el uso de

productos químicos. Con ello, se mantiene la esencia orgánica de la materia prima, sin generación de residuos contaminantes (Bet *et al.*, 2019). Sin embargo, los contenidos de proteína y lípidos residual pueden variar dependiendo de la fuente, lo cual puede interferir con su aplicación (Santos *et al.*, 2022).

La separación del almidón de raíces y tubérculos es más fácil en comparación con la extracción de granos de leguminosas y cereales debido a que las raíces y tubérculos contienen gránulos de almidón más grandes que se separan fácilmente por sedimentación. Adicionalmente los tubérculos presentan muy poco contenido de proteína y grasa lo cual facilita el aislamiento del su almidón por lo cual una extracción acuosa es apropiada. Por el contrario, en el caso de los almidones que provienen de legumbres, como los frijoles, los guisantes, las lentejas y los pseudocereales, incluidos el amaranto y la quinua, contienen un alto contenido de proteínas y gránulos de almidón muy pequeños, lo que dificulta la extracción del almidón. Por lo tanto, se requieren métodos más complejos para solubilizar fracciones de proteína y recuperar el almidón, como tratamientos alcalinos, enzimáticos y/o maceración ácida, además de etapas de centrifugación a alta velocidad. Si estos pasos se realizan incorrectamente, se obtienen almidones de baja pureza con bajos rendimientos (Kringel *et al.*, 2020).

Por estas razones, diferentes investigaciones han ensayado medios alcalinos para extraer almidón de cereales demostrando su efectividad frente a extracciones acuosas presentando mayores rendimientos y pureza. Barboza Pires *et al.* (2021), Jan *et al.* (2017b) entre otros han demostrado la efectividad de soluciones de hidróxido de sodio y señalan que el aumento de la concentración de álcali hasta 0,25 por ciento incrementa el rendimiento de almidón tanto partiendo de los granos como de la harina. Sin embargo, un mayor aumento en la concentración de álcali (0,30 por ciento) disminuye el rendimiento y el valor del color con un aumento en la proteína residual del almidón.

Por estas razones, en la presente investigación se estudió el proceso de extracción de almidón de cañihua de la variedad Illpa-INIA bajo tres diferentes métodos: dos con exposición a solución de NaOH con diferentes tiempos (M1 y M2) y un tercero bajo extracción acuosa (M3). En la Tabla 9 se muestran los rendimientos obtenidos por los tres métodos de extracción de almidón de cañihua de la variedad Illpa-INIA.

**Tabla 9: Rendimiento de extracción de almidón de cañihua variedad Illpa-INIA**

| <b>Tratamiento</b> | <b>Rendimiento (%)</b>    |
|--------------------|---------------------------|
| <b>M1</b>          | 37,06 ± 0,39 <sup>a</sup> |
| <b>M2</b>          | 35,34 ± 0,25 <sup>b</sup> |
| <b>M3</b>          | 26,39 ± 0,89 <sup>c</sup> |

Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ )

Estadísticamente, todos los métodos presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), lo cual refleja que el método utilizado en cada tratamiento influyó en el rendimiento de extracción (Anexo 2). Como se observa, M1 fue el que obtuvo el mayor rendimiento el cual fue de 37,06 por ciento, seguido por M2 y M3, que obtuvieron 35,34 y 26,39 por ciento, respectivamente.

Existe poca información en cuanto a la extracción de almidón de cañihua, autores como Perez-Rea y Antezana-Gomez (2018), mencionan que la cañihua contiene un 50 por ciento de almidón en base seca. Ramos (2014) reportó un rendimiento en almidón de cañihua menor e igual a 31,10 por ciento, bajo un método que incluye una etapa de remojo con una solución de ácido láctico 0,55 por ciento y de SO<sub>2</sub> 0,2 por ciento. Debido a ello se comparó con granos de cereales similares a la cañihua. Maza (2020), reportó rendimientos entre 26,77 y 33,78 por ciento para almidones de quinua de distintas variedades, usando el método similar al almidón obtenido por M1. Estos valores son menores pero cercanos a los obtenidos por los métodos M1 y M2.

Por otro lado, Arzapalo *et al.* (2013), reportaron rendimientos de 18,95; 26,71 y 30,62 para las variedades de quinua negra collana, pasankalla roja y blanca Junín, respectivamente. Cabe mencionar que estos autores utilizaron un remojo de 6 h con bisulfito de sodio, previa a la extracción. Estos resultados, se asemejan al almidón obtenido por M3, que fue remojado solo con agua tratada por ósmosis inversa. Gonzales (2018), reportó para la extracción de almidón de ataco (*Amaranthus quitensis* L.), previamente molidos y convertidos en harina, rendimientos de 20 por ciento para el método alcalino y un 13 por ciento para el método húmedo. Jan *et al.* (2017b) indican que la molienda previa favorece la liberación máxima de proteína en una solución alcalina porque hay un contacto efectivo entre la proteína y el álcali.

Los resultados obtenidos por los autores mencionados anteriormente, demuestran que, el método de extracción alcalino, como el método empleado en la presente investigación, presentan mayor rendimiento en la extracción. Kringel *et al.* (2020) señalan que tamaños pequeños de los gránulos de almidón como los de la quinua hace difícil el proceso de separación basado únicamente en métodos gravimétricos o tamaño de partículas causando más impurezas y bajos rendimientos.

Ramírez-López (2020), menciona que la utilización de soluciones de NaOH mejora la solubilización de proteínas, debido a la ionización de los grupos carboxilo y la desprotonación de los grupos amina, favoreciendo la lixiviación de este biopolímero y consecuentemente la reducción de su contenido en el almidón. Asimismo, Valenzuela *et al.* (2013) observaron que el uso de solución alcalina en la extracción de almidón de quinua afectó la estructura de las proteínas en cuanto a carga eléctrica y grado de desnaturalización, favoreciendo su separación del resto de componentes.

Para Wijesinghe y Gunathilake (2020), la concentración de álcali afecta significativamente el rendimiento de almidón, una menor concentración de álcali da como resultado un menor rendimiento debido a la menor solubilidad y dispersabilidad de las proteínas glutelinas presentes en el cereal. Sin embargo, se debe considerar la concentración a utilizar debido a que se cree que un tratamiento mediante el uso de productos químicos como el hidróxido de sodio (NaOH) además de eliminar eficazmente la proteína circundante y superficial de los gránulos de almidón podría alterar la superficie de los gránulos de almidón (Uthumporn *et al.*, 2012), sin embargo investigaciones como las realizadas por Chen y Jane (1994) informaron que el almidón tratado con solución de NaOH no mostró una degradación notable de las moléculas de almidón.

En otras investigaciones de extracción de almidones de cereales que comparten características similares a la cañihua se señala que para obtener altos rendimientos y pureza la centrifugación es un paso importante, ya que tiene como objetivo la separación de las moléculas de proteína o grasa (Correira *et al.*, 2012). La sedimentación de proteínas y fibras muy finas junto con el almidón, además del pequeño tamaño de los gránulos, dificulta la extracción del almidón, generando pérdidas y bajo rendimiento. Para aumentar el rendimiento y la purificación durante la extracción se utilizan tratamientos con NaOH o

enzimáticos; sin embargo, esto puede generar mayores costos para la remoción de estos componentes, mayor tiempo para la extracción completa y causar cambios en las propiedades del almidón nativo (Villarreal *et al.*, 2013).

En el tratamiento M1, se observó claramente la separación de la proteína luego de la dispersión con una solución de NaOH al 0,25 por ciento y posterior centrifugación. Esta poseía una textura blanda y de coloración marrón, en comparación con el precipitado de almidón, que tenía una textura más compacta y un color blanquecino, claramente diferenciable. En el almidón extraído por el tratamiento M2, la cañihua estuvo en remojo por 12 h con una solución de NaOH al 0, 25 por ciento, donde permaneció en contacto por este periodo de tiempo y donde pudo haber extraído previamente una mayor cantidad de proteínas, evidenciándose en su inferior rendimiento, en comparación con M1, que se mantuvo en remojo por el mismo tiempo con agua tratada por ósmosis inversa. Según Jan *et al.* (2017b) el uso de álcali podría promover una gelatinización parcial en los gránulos de almidón, aumentando la viscosidad de la suspensión y reduciendo la recuperación del almidón por centrifugación, lo que podría explicar que el método 2 tuvo un rendimiento ligeramente menor al método 1.

En cuanto a M3, este mostró rendimientos de extracción más bajos en comparación a M1 y M2, esto se pudo deber a diversos factores. El primer factor fue el uso de álcali en el lavado del almidón de M1 y M2, lo cual permitió la solubilización de cuerpos proteicos distribuidos entre los gránulos de almidón, haciendo más eficiente la separación de proteínas del almidón por centrifugación (Palacios-Fonseca *et al.*, 2013); mientras en el método 3 la sedimentación de proteína adherida a los gránulos de almidón hace más difícil la separación del almidón, generando menores rendimientos (Bet *et al.*, 2019). Otro factor a considerar, fue experimental, debido a que este método se realizó solamente con agua tratada por ósmosis inversa y se observó en el momento de la extracción, una débil separación de la proteína de la cañihua con el agua, arrastrando así el almidón en su interior. Esto se pudo evidenciar experimentalmente, donde en todas las etapas, la parte superior del precipitado, tenía un color crema y una textura más cremosa, que evidentemente no era puramente proteína, en comparación al obtenido por M1 y M2. Según Ortega (2008), los gránulos pequeños de almidón se quedan atrapados en la proteína que luego es descartada, por lo que indica adicionar etapas de centrifugación al proceso, para purificar por separado el sobrenadante

(que lleva parte de almidón) y el almidón (que contiene proteínas), para obtener un mayor rendimiento.

Además, la separación de la capa superior después de la centrifugación correspondiente a la fracción proteica, al ser manual y respondiendo a un criterio diferente de textura y color, conllevó una mayor dificultad en su separación y pérdida de almidón. Asimismo, se debe considerar que la proteína de la cañihua posee diferentes proporciones que tienen distinta solubilidad, al no utilizar un disolvente alcalino, como el NaOH y solo agua tratada por ósmosis inversa, las fracciones proteicas como la albúmina, globulina y glutelina (solubles en NaOH), pudieron haber quedado e intervenir en la extracción. Asimismo, Daiuto *et al.* (2005) mencionan que las bajas tasas de extracción encontradas para los tratamientos con agua, pueden explicarse principalmente por las grandes pérdidas de almidón en la fase acuosa. Estas pérdidas pueden ser causadas por la presencia de polisacáridos no amiláceos (NSP, por sus siglas en inglés) soluble en agua viscosa que transportó gránulos de almidón al agua.

En otro estudio trabajando con quinua se demostró que la extracción con remojo alcalino es más efectiva que la extracción acuosa (Jan *et al.*, 2017b). El mismo estudio indica que incrementar la concentración más de 0,25 por ciento (0,30 por ciento) decrece el rendimiento, el color e incrementa el contenido de proteína residual en el almidón.

En cuanto a las proteínas, su eliminación fue un paso crítico e importante que afectó positivamente el rendimiento del proceso de extracción y la pureza del almidón. Estas se encuentran asociadas a los gránulos de almidón siendo un componente importante que afecta la extracción del almidón. Según Lee *et al.* (2007), las proteínas se adhieren a la superficie del almidón y son relativamente difíciles de eliminar. Cardoso *et al.* (2007) mencionan que las proteínas residuales obtenidas en el almidón resultante, se conocen como proteínas asociadas a gránulos de almidón (SGAP, por sus siglas en inglés) que se encuentran dentro y sobre la superficie de los gránulos. Las SGAP pueden influir en las propiedades de pegado del almidón al reducir la viscosidad de las pastas resultantes. No obstante, algunos SGAP, confieren rigidez a los gránulos gelatinizados hinchados y, a su vez, reducen la desintegración del almidón provocada por el cizallamiento, es por ello la importancia de su separación en la extracción (Verma *et al.*, 2021).

## 4.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA

### 4.2.1. ANÁLISIS PROXIMAL

Los resultados del análisis proximal de los almidones nativos y grano entero de cañihua de la variedad Illpa – INIA, se muestran en la Tabla 10. En general, los almidones de cañihua Illpa – INIA, presentaron bajo contenido proteico (0,78 – 1,56 por ciento), graso (0,00 – 0,20 por ciento), de cenizas (0,23 – 0,64 por ciento) y fibra cruda (0,00 – 0,02 por ciento), además de un alto contenido de carbohidratos (98,21 – 98,69 por ciento) (Anexo 3). Resultados similares fueron reportados por Steffolani *et al.* (2013) y Ramírez-López (2016). Según Wani *et al.* (2016), una menor proporción de lípidos, cenizas y contenido de proteínas, y alto proporción de carbohidratos indica que los almidones son de alta pureza tras los procesos de extracción.

La composición proximal del grano de cañihua demuestra la riqueza de este grano en proteína (17,19 por ciento b.s.), fibra (4,53 por ciento b.s.) y grasa (8,72 por ciento b.s.), componentes cuya presencia hacen complejo el proceso de purificación del almidón. En ecotipos de Perú el contenido de proteína varía entre 13,3 a 18,3 por ciento (Repo-Carrasco *et al.*, 2010). Pérez *et al.*, (2016) indican que la cañihua tiene los más altos contenidos de fibra dietaria que los cereales comunes como trigo, centeno y cebada. Asimismo, es especialmente rico en lípidos con valores entre 7 a 11 por ciento (Repo-Carrasco *et al.*, 2010; Steffolani *et al.*, 2013).

La humedad resultó en un rango de 12,33 a 12,88 por ciento para los almidones. Estos resultados fueron favorables, ya que Díaz (2016) indica que la humedad de los almidones de cereales debe encontrarse por debajo del 15 por ciento. Para Ojo *et al.* (2017), este rango también es óptimo para la estabilidad del almacenamiento, debido a que pueden resistir el crecimiento microbiano. Los resultados obtenidos fueron superiores a los reportados por Steffolani *et al.* (2013) (7,92 – 8,70 por ciento) y Ramírez-López (2016) (10,93 por ciento).

Con respecto al contenido de proteínas, M1 y M2 obtuvieron un valor de 0,79 y 0,78 por ciento, respectivamente y M3 obtuvo un valor más alto de 1,56 por ciento. Esto se explica debido a que según Lim *et al.* (1999), las soluciones alcalinas como las de NaOH, destruyen

las estructuras proteicas oligoméricas y las transforman en formas solubles. Esto concuerda ya que M1 y M2 se extrajeron con el uso de solvente de NaOH al 0,25 por ciento. Fuentes *et al.* (2018) reportaron valores de 0,59; 0,63 y 0,15 por ciento para el almidón de cañihua, quinua y amaranto respectivamente. Por su parte Steffolani *et al.* (2013) informan valores entre 1,55 a 2,74 por ciento para diferentes ecotipos de cañihua. Ramírez-López (2016) reportó un valor de 3,72 por ciento de proteína para almidón de cañihua de la variedad Illpa.

Según Moorthy (2002) la proteína es uno de los componentes que disminuyen la pureza, su presencia afecta el sabor y aroma del almidón, asimismo pueden tener efecto sobre la carga superficial del gránulo, lo cual influye directamente en la velocidad de hidratación, la velocidad de hinchamiento, y la gelatinización de este durante la extracción, este componente se pierde en el agua de extracción como proteína soluble junto con aminoácidos, azúcares y sales.

Los gránulos de almidón en los granos de cereales están fuertemente asociados con la matriz proteica. Por lo tanto, los reactivos químicos se utilizan ampliamente para solubilizar las proteínas y liberar el almidón. La elección del reactivo adecuado depende de la solubilidad de la proteína; sin embargo, algunas metodologías que no se basan en este principio comprometen el rendimiento de extracción, así como la integridad granular y la funcionalidad del almidón. Además de la elección del reactivo apropiado, también se deben considerar sus concentraciones y el tiempo de exposición para evitar dañar los gránulos de almidón (El Halal *et al.*, 2019).

Cardoso *et al.* (2007) señalan que la albúmina, la globulina y la glutelina presentan alta solubilidad en soluciones de NaOH por lo que se extraen con facilidad en este medio, mientras que la prolamina tiene escasa solubilidad en este medio. Pérez *et al.* (2016) reportan que la proteína de cañihua contiene 17,4 – 26,7 de albumina, 19,3 – 24,3 de globulina, 4,2 – 6,0 de prolamina, 9,3 – 11,4 glutelina y 31,5 – 47,2 glutelina insoluble.

En cuanto al contenido de grasas, según Kasturi *et al.* (2013), su presencia en el almidón afecta en gran medida sus propiedades, por lo que, se debe prestar atención a su eliminación a lo largo del proceso de extracción. En general todos los tratamientos presentaron bajo contenido (0,00 – 0,20 por ciento), donde M2 y M3 bajo el método empleado no se detectó

presencia de contenido graso. Según Hidalgo y Micho (2016), esto es bueno ya que la presencia de lípidos, desde el punto de vista de la calidad del almidón, tiene un efecto negativo marcado en las propiedades físicas y funcionales de los almidones, dado que, éstos disminuyen la capacidad de hinchamiento, la solubilidad, la capacidad de retención de agua y claridad, además de ser causantes de la formación de sabores indeseables durante el almacenamiento debido a su rancidez. Asimismo, Díaz (2015) menciona que la presencia de grasas o lípidos no es deseable en los almidones debido a que influye en sus propiedades funcionales, al evitar su unión con las moléculas de agua. Steffolani *et al.* (2013) informan valores entre 1,94 a 2,87 por ciento para diferentes ecotipos de cañihua y Ramírez-López (2016) reportó 1,14 por ciento de grasa para almidón variedad Illpa. Ji *et al.* (2004) indican que posiblemente, algunas diferencias observadas entre la composición proximal de almidón de cañihua podrían deberse a las diferencias entre los métodos de extracción utilizados. Alcázar-Alay y Meireles (2015) resaltan la capacidad del NaOH utilizado en la extracción alcalina para emulsionar o saponificar los compuestos lipídicos, facilitando su posterior eliminación durante el proceso de extracción.

La ceniza es el residuo inorgánico que queda después de la eliminación del agua y la materia orgánica mediante el calentamiento en presencia de agentes oxidantes. Este representa una medida de la cantidad total de minerales que contiene un alimento. Para los almidones de cañihua, los valores obtenidos resultaron bajos (0,23 – 0,64 por ciento), mayores contenidos fueron reportados por Steffolani *et al.* (2013) (0,97 – 1,76 por ciento) y Ramírez-López (2016) (1,95 por ciento) ) y un contenido menor por Ramos (2014) (0,3 por ciento). Según Wijesinghe y Gunathilake (2020), un bajo contenido en cenizas es un indicador de la buena calidad de los almidones, debido a que un alto contenido en minerales retarda el crecimiento de ciertos microorganismos. Además, estos investigadores señalan que en los almidones de cereales el contenido de cenizas es significativamente menor en comparación a otras fuentes vegetales como los tubérculos. Además, Hoover *et al.* (2002) mencionan que el mayor contenido de cenizas en el almidón es el resultado de la presencia del material comúnmente denominado "fibra fina". Este término se designa a un material altamente hidratado que se origina en las estructuras de la pared celular que normalmente rodean los gránulos de almidón. Un mayor contenido de cenizas indica el menor rendimiento del almidón debido al mayor contenido de fibra fina. En general, las cenizas del almidón están compuestas principalmente por fósforo, sodio, potasio, magnesio y calcio.

**Tabla 10: Análisis proximal de almidón y grano entero de cañihua variedad Illpa INIA**

| <b>Tratamiento</b>  | <b>Humedad</b>            | <b>Proteínas<br/>% (b.s)</b> | <b>Grasas %<br/>(b.s)</b> | <b>Fibra cruda<br/>% (b.s)</b> | <b>Ceniza<br/>% (b.s)</b> | <b>Carbohidratos<br/>% (b.s)</b> |
|---------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| <b>M1</b>           | 12,80 ± 0,08 <sup>a</sup> | 0,79 ± 0,00 <sup>a</sup>     | 0,20 ± 0,28               | 0,02 ± 0,03                    | 0,30 ± 0,13 <sup>b</sup>  | 98,69 ± 0,11 <sup>a</sup>        |
| <b>M2</b>           | 12,50 ± 0,05 <sup>b</sup> | 0,78 ± 0,00 <sup>a</sup>     | N. d.                     | N. d.                          | 0,64 ± 0,02 <sup>a</sup>  | 98,57 ± 0,02 <sup>a</sup>        |
| <b>M3</b>           | 12,33 ± 0,03 <sup>b</sup> | 1,56 ± 0,00 <sup>b</sup>     | N. d.                     | N. d.                          | 0,23 ± 0,04 <sup>b</sup>  | 98,21 ± 0,04 <sup>a</sup>        |
| <b>Control</b>      | 11,00 ± 0,01 <sup>b</sup> | 1,44 ± 0,00 <sup>b</sup>     | N. d.                     | N. d.                          | 1,12 ± 0,02 <sup>b</sup>  | 97,44 ± 0,02 <sup>a</sup>        |
| <b>Grano entero</b> | 12,77 ± 0,05              | 17,19 ± 0,15                 | 8,72 ± 0,26               | 4,53 ± 0,18                    | 2,80 ± 0,03               | 66,75 ± 0,62                     |

Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ )

N.d.: No detectado

Se ha reportado que la diferencia en los contenidos de ceniza está relacionada con el proceso, en el caso de tratamientos alcalinos, es sabido que la difusión de iones en los gránulos de almidón depende del tiempo lo que significa que estos tratamientos permiten la entrada de iones de sodio en los gránulos de almidón, y luego un posible residuo de álcali está presente en estas muestras (Palacios-Fonseca *et al.*, 2013). Esto podría explicar la presencia de mayor contenido de ceniza en el tratamiento M2 el que incluye una etapa de remojo en este tipo de solvente por 12 horas.

Por otro lado, en cuanto a la fibra cruda, los valores fueron muy reducidos y en algunos tratamientos se detectó bajo el método empleado (0 – 0,02 por ciento), esto debido al proceso de extracción y aislamiento del almidón, además que el grano de cañihua presentó una baja cantidad de este compuesto. Valores más altos fueron reportados por Steffolani *et al.* (2013) (0,96 – 1,8 por ciento) y Ramos (2014) (0,23 por ciento).

El contenido de carbohidratos se determinó por diferencia, los valores resultaron altos y oscilaron entre 98,21 y 98,69 por ciento, no existiendo diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en los tratamientos. Estos valores fueron superiores a los obtenidos por Ramírez-López (2016) (83,94 por ciento) y Steffolani *et al.* (2013) (82,62 – 84,98 por ciento).

#### **4.2.2. DETERMINACIÓN DE AMILOSA**

Los almidones de diversas fuentes botánicas difieren en las cantidades de amilosa y amilopectina, influyendo en sus propiedades funcionales y fisicoquímicas. Según Assad-Bustillos *et al.* (2014), la determinación de la proporción de amilosa y amilopectina es importante, ya que, afectan las propiedades fisicoquímicas y funcionales como el poder de hinchamiento, solubilidad y capacidad de absorción de agua, así como, las propiedades de pegado, térmicas y retrogradación. Asimismo, Lindeboom (2005), indica que el contenido de amilosa es considerado uno de los factores que más influye en la retrogradación del almidón, con un nivel más alto de amilosa que resulta en mayor asociación de moléculas de almidón y mayor grado de retrogradación.

Diversos estudios han demostrado que los métodos colorimétricos (basados en la formación de complejos de amilosa-yodo) se encuentran influenciados por la longitud de la cadena de

amilopectina, por ejemplo, el almidón de papa a diferencia del almidón de cereales, contiene ramas externas de amilopectina más largas, pudiendo unirse al yodo y causar una sobreestimación del contenido de amilosa (Hoover y Ratnayake, 2001). Específicamente en pseudocereales con similares características que la cañihua, Bender y Schönlechner (2021), mencionan que, los almidones de quinua y amaranto se caracterizan por presentar una mayor proporción de cadenas cortas.

Según el protocolo de determinación de amilosa por el método de afinidad con yodo, las muestras se deben desengrasar, sin embargo, esta etapa no se realizó, por lo que los valores obtenidos son contenidos de amilosa aparente. Según Copeland *et al.* (2009), los complejos de exclusión con lípidos se forman principalmente con la fracción de amilosa del almidón, por lo que la relación amilosa - amilopectina es un factor importante que produce variabilidad en la capacidad de los almidones naturales para formar complejos con lípidos. Asimismo, mencionan que la amilosa complejada con lípidos se encuentra en los gránulos de almidón de cereales nativos. Sin embargo, como los almidones de cereales contienen aproximadamente uno por ciento de lípidos, y sólo del 15 al 55 por ciento de la fracción de amilosa forma complejos con lípidos. Como lo muestra el análisis proximal (Tabla 10), todos los tratamientos obtuvieron contenido graso bajo (0,00 a 0,20 por ciento) y por lo mencionado por líneas anteriores sobre la longitud de la cadena de amilopectina en cereales, este factor se considera de menor influencia en los resultados posteriores. En la Tabla 11, se muestran los resultados obtenidos del contenido de amilosa de los almidones nativos de cañihua y el tratamiento control.

**Tabla 11: Contenido de amilosa y amilopectina de los almidones nativos**

| <b>Tratamiento</b> | <b>% Amilosa</b>          | <b>% Amilopectina</b>     |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>M1</b>          | 15,23 ± 0,40 <sup>b</sup> | 84,78 ± 0,40 <sup>b</sup> |
| <b>M2</b>          | 10,54 ± 0,61 <sup>c</sup> | 89,46 ± 0,61 <sup>c</sup> |
| <b>M3</b>          | 15,60 ± 0,00 <sup>b</sup> | 84,35 ± 0,60 <sup>b</sup> |
| <b>Control</b>     | 20,91 ± 0,40 <sup>a</sup> | 79,09 ± 0,40 <sup>a</sup> |

Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ )

Estadísticamente, el tratamiento M2 resultó significativamente menor ( $p < 0,05$ ), en comparación a M1, M3 y el tratamiento control (Anexo 4 y Anexo 5). Según Nadiha *et al.* (2010), la reducción del contenido aparente de amilosa de los almidones tratados con álcali (NaOH) podría deberse a la ruptura de la región amorfa que contiene las cadenas de amilosa, afectando más esta región que la región de amilopectina. Asimismo, Wang *et al.* (2012), mencionan que, esta disminución se le atribuye a la lixiviación de amilosa de los gránulos, por efecto del álcali, aunque cabe la posibilidad que también se hayan perdido algunas moléculas solubles de amilopectina. Lai *et al.* (2004), mencionan que los iones en la solución alcalina se difunden en la región amorfa de los gránulos ricas en amilosa, rompiendo los enlaces intermoleculares, ocasionando que los gránulos se hinchen en un mayor grado, con una exudación concurrentemente mayor de amilosa. Esto podría explicar el mayor valor obtenido por M2, en comparación con M1 y M3, ya que tuvo una mayor exposición (12 h) en solución de NaOH 0,25 por ciento.

Los valores reportados en la presente investigación se encuentran dentro del rango reportado por Steffolani *et al.* (2013) (10,70 – 17,44 por ciento) y Ramírez-López (2016) (11,85 por ciento), y mayores a los obtenidos por Luna-Mercado y Repo-Carrasco (2020) (6,48 por ciento). Comparando con otros granos, Maza (2020), reportó valores entre 19,3 y 20,8 por ciento para almidones de quinua de diversos ecotipos y Singh *et al.* (2021), para los granos de *Chenopodium album* reportaron valores entre 14,74 y 16,49 por ciento de amilosa. Estos valores son superiores a los obtenidos experimentalmente, sin embargo, como se mencionó anteriormente y analizando los resultados de los diferentes autores, los valores varían y son inferiores del 20 por ciento.

Según Chen *et al.* (2022), en general, los almidones se clasifican, de acuerdo al contenido de amilosa, en ceroso (0–5 por ciento), almidón con muy bajo contenido de amilosa (5–12 por ciento), almidón con bajo contenido de amilosa (12–20 por ciento) y almidón con alto contenido de amilosa (>25 por ciento). De acuerdo a esta clasificación, el tratamiento M1 y M3, se encuentran dentro de los almidones con bajo contenido de amilosa y el tratamiento M2, como muy bajo contenido de amilosa y el tratamiento control como alto contenido de amilosa.

### 4.2.3. EVALUACIÓN DE COLOR

La característica de color en el almidón es importante debido a que pueden decidir el éxito de las aplicaciones como ingrediente funcional en diferentes productos alimentarios (Kale *et al.*, 2017). Pues, parte de la pigmentación del almidón se traslada al producto final, lo que reduce su calidad y a aceptabilidad de los consumidores (Díaz *et al.*, 2016). En la Tabla 12, se muestran los promedios de los parámetros de color L\*, a\*, b\* y el índice de blancura (IB) calculado, de almidón de cañihua Illpa – INIA.

**Tabla 12: Parámetros de color de los almidones**

| Tratamiento    | L*                         | a*                        | b*                       | IB                        |
|----------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| <b>M1</b>      | 96,56 ± 0,03 <sup>b</sup>  | 0,42 ± 0,01 <sup>b</sup>  | 1,60 ± 0,02 <sup>b</sup> | 96,18 ± 0,01 <sup>c</sup> |
| <b>M2</b>      | 96,49 ± 0,11 <sup>bc</sup> | 0,49 ± 0,02 <sup>a</sup>  | 1,61 ± 0,04 <sup>b</sup> | 96,11 ± 0,06 <sup>c</sup> |
| <b>M3</b>      | 96,40 ± 0,04 <sup>c</sup>  | 0,49 ± 0,01 <sup>a</sup>  | 1,94 ± 0,01 <sup>a</sup> | 95,88 ± 0,02 <sup>b</sup> |
| <b>Control</b> | 98,62 ± 0,02 <sup>a</sup>  | -1,21 ± 0,01 <sup>c</sup> | 5,12 ± 0,03 <sup>a</sup> | 94,56 ± 0,01 <sup>a</sup> |

Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ )

Con respecto a la luminosidad, el tratamiento control presentó un valor significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) en comparación con los otros tratamientos, siendo M1 (96,56) el que presentó el mayor valor en comparación a M2 (96,49) y M3 (96,40), respectivamente (Anexo 6). Asimismo, los resultados mostraron que todos los tratamientos obtuvieron valores superiores a 90, lo que según Jan *et al.* (2016), muestra una blancura satisfactoria para la pureza del almidón.

En cuanto a los parámetros a\* y b\*, los tratamientos M1, M2 y M3 presentaron valores positivos y cercanos a cero, lo que indica que presentan una ligera tonalidad amarilla - roja, en comparación al tratamiento control, donde resultó con valores negativos, presentando una ligera e imperceptible tendencia al color azul - roja. Según Sánchez (2004), cuando los parámetros a\* y b\* tienden a valores cercanos a cero, la muestra evaluada posee una tendencia al color blanco. Asimismo, Díaz *et al.* (2016), indican que, bajos valores de b\*, también se asocian con una mayor pureza y calidad del almidón. Los valores cercanos a cero y positivos de los tratamientos M1, M2 y M3, se podrían deber a que tendrían menos

pigmento amarillo y débil contenido residual de proteínas y lípidos. Lo mencionado por dichos autores coincide con los resultados obtenidos en el análisis proximal (Tabla 10), donde los valores de contenido graso y proteico resultaron bajos.

Para el índice de blancura (IB), los tratamientos M1(96,18) y M2 (96,11) resultaron significativamente mayores ( $p < 0,05$ ) con respecto a M3 (95,88) y el tratamiento control (94,56). Según Kale *et al.* (2017), un aumento de la blancura podría atribuirse a la pureza del método de extracción aplicado, debido a la máxima eliminación de proteínas y otros compuestos. Como se explicó anteriormente, el tratamiento M3, solo constó de un remojo y extracción acuosa, en comparación con M1 y M2, donde hubo aplicación de solución de NaOH al 0,25 por ciento para la extracción de la proteína, sustentando así la mayor pureza en la extracción, por ende, también una mayor blancura del almidón. A pesar de estas diferencias suscitadas, todos los tratamientos presentaron valores por encima de 90, lo que indica, según Boudries *et al.* (2009), una blancura satisfactoria para la pureza del almidón. Además, dichos autores también mencionan que un alto grado de blancura del almidón aislado puede proporcionar muchas oportunidades de aplicaciones alimentarias e industriales.

### **4.3. CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL**

#### **4.3.1. PROPIEDADES DE HIDRATACIÓN**

Las propiedades de hidratación (capacidad de absorción de agua, poder de hinchamiento y solubilidad) de los almidones se evalúan para comprender las interacciones entre las moléculas de agua y las cadenas de almidón en las regiones cristalinas y amorfas durante el calentamiento, así como la naturaleza de los enlaces intragranulares (Abegunde *et al.*, 2013), siendo indicativos de los enlaces asociativos que existen dentro del gránulo de almidón (Calzetta, 1999). Estas propiedades fueron evaluadas a 65, 75, 85 y 95 °C.

##### **a. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AGUA (CAA)**

Los resultados de la capacidad de absorción de agua (CAA) de los almidones de cañihua y el control se muestran en la Tabla 13. Según Prazeres *et al.* (2020), esta propiedad, indica la cantidad de agua que el gránulo de almidón es capaz de absorber y generalmente depende

de la estructura molecular, las regiones cristalinas y amorfas dentro del almidón y la distribución de tamaño de los gránulos.

Cai *et al.* (2014), mencionan que cuando el almidón se calienta en suficiente agua, se rompen los enlaces de hidrógeno que estabilizan la estructura de las dobles hélices en los cristalitos y se reemplazan por enlaces de hidrógeno con agua, el gránulo de almidón se hincha y su volumen aumenta.

**Tabla 13: Capacidad de absorción de agua (g/g) de almidones nativos**

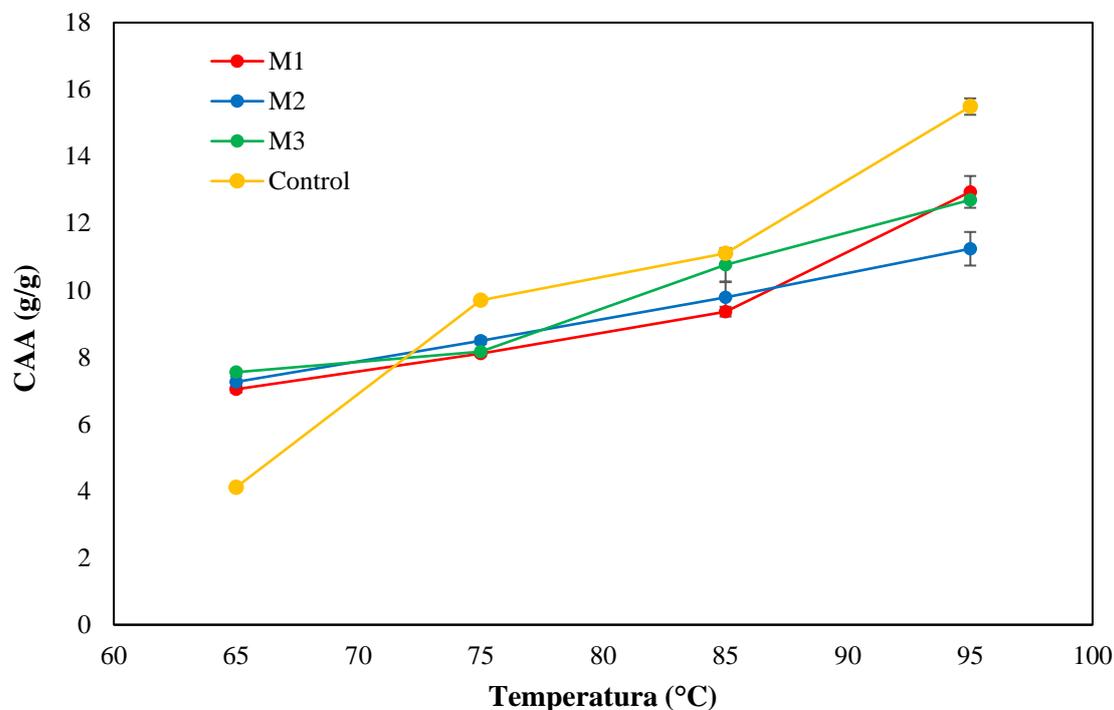
| Tratamiento    | Temperaturas (°C)        |                          |                           |                           |
|----------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                | 65                       | 75                       | 85                        | 95                        |
| <b>M1</b>      | 7,04 ± 0,10 <sup>b</sup> | 8,11 ± 0,08 <sup>c</sup> | 9,36 ± 0,15 <sup>b</sup>  | 12,94 ± 0,48 <sup>b</sup> |
| <b>M2</b>      | 7,26 ± 0,17 <sup>b</sup> | 8,49 ± 0,10 <sup>b</sup> | 9,79 ± 0,45 <sup>b</sup>  | 11,24 ± 0,50 <sup>c</sup> |
| <b>M3</b>      | 7,55 ± 0,03 <sup>a</sup> | 8,16 ± 0,05 <sup>c</sup> | 10,76 ± 0,50 <sup>a</sup> | 12,70 ± 0,06 <sup>b</sup> |
| <b>Control</b> | 4,11 ± 0,01 <sup>c</sup> | 9,70 ± 0,09 <sup>a</sup> | 11,10 ± 0,10 <sup>a</sup> | 15,49 ± 0,25 <sup>a</sup> |

Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ )

Estadísticamente, se obtuvo que los métodos de extracción tuvieron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con respecto al tratamiento control. Además, los tratamientos tuvieron un comportamiento distinto conforme aumentaba la temperatura del proceso. En la Figura 9, se muestra gráficamente la tendencia de los resultados de CAA en función a la temperatura. Se observa que, a 65°C, el tratamiento control tuvo menor CAA que el resto de tratamientos, y a partir de los 75°C en adelante, este fue estadísticamente mayor ( $p < 0,05$ ). A 85°C el tratamiento M3 no presentó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con el control. A 95°C los tratamientos M1 y M3 no presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), presentando mayor CAA que M2 (Anexo 7).

El hinchamiento es principalmente una propiedad de la amilopectina, mientras que la amilosa tiende a inhibirlo (Cai *et al.*, 2014). Esto concuerda con los resultados obtenidos en el contenido de amilosa (Tabla 11), donde el tratamiento M2 obtuvo un valor bajo, debido a que este fue tratado con solución de NaOH 0,25 por ciento, el cual pudo haber degradado parte de la amilosa del almidón de cañihua. Sin embargo, esta tendencia solo se pudo

observar hasta los 75°C, en adelante M3 y M1 fueron los que obtuvieron mayores resultados en cuando a CAA.



**Figura 9: Capacidad de absorción de agua de los almidones en función a la temperatura de los almidones**

#### **b. PODER DE HINCHAMIENTO (PH)**

Con respecto al poder de hinchamiento (PH), Kaur *et al.* (2007), mencionan que, esta propiedad indica la capacidad del almidón para hidratarse bajo condiciones de cocción específicas. El inicio del hinchamiento es un indicador del grado de retención de agua de los gránulos durante el calentamiento. Asimismo, Robles (2012), menciona que, el PH permite analizar el incremento del tamaño de gránulo por efecto de la expansión relacionándose con la CAA de cada gránulo. Los resultados se muestran en la Tabla 14.

Estadísticamente, el tratamiento control presentó diferencias significativamente ( $p < 0,05$ ) de PH con respecto a los tratamientos M1, M2 y M3 (Anexo 8). En la Figura 10, se muestra gráficamente la tendencia del PH con respecto a las temperaturas de calentamiento. A 65°C, el tratamiento control resultó significativamente menor ( $p < 0,05$ ). Sin embargo, a partir de

los 75°C, resultó significativamente mayor ( $p < 0,05$ ). A 85°C el tratamiento M3 resultó con mayor PH, a comparación con M1 y M2 y, a 95°C, los tratamientos M1 y M3 fueron significativamente ( $p < 0,05$ ) mayores que M2. Similar comportamiento fue reportado por Jan *et al.* (2017b) comparando esta funcionalidad entre geles de almidón de maíz y quinua y le atribuyen la diferencia a la carga negativa de los grupos fosfato presentes en el almidón de maíz.

**Tabla 14: Poder de hinchamiento (g/g) de almidones nativos**

| Tratamiento    | Temperaturas (°C)        |                           |                           |                           |
|----------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                | 65                       | 75                        | 85                        | 95                        |
| <b>M1</b>      | 7,22 ± 0,09 <sup>b</sup> | 8,37 ± 0,09 <sup>c</sup>  | 9,76 ± 0,13 <sup>c</sup>  | 13,81 ± 0,49 <sup>b</sup> |
| <b>M2</b>      | 7,53 ± 0,19 <sup>a</sup> | 8,82 ± 0,10 <sup>b</sup>  | 10,17 ± 0,48 <sup>c</sup> | 11,83 ± 0,51 <sup>c</sup> |
| <b>M3</b>      | 7,81 ± 0,05 <sup>a</sup> | 8,40 ± 0,06 <sup>c</sup>  | 11,19 ± 0,53 <sup>b</sup> | 13,31 ± 0,07 <sup>b</sup> |
| <b>Control</b> | 4,18 ± 0,02 <sup>c</sup> | 10,33 ± 0,05 <sup>a</sup> | 12,26 ± 0,19 <sup>a</sup> | 18,86 ± 0,42 <sup>a</sup> |

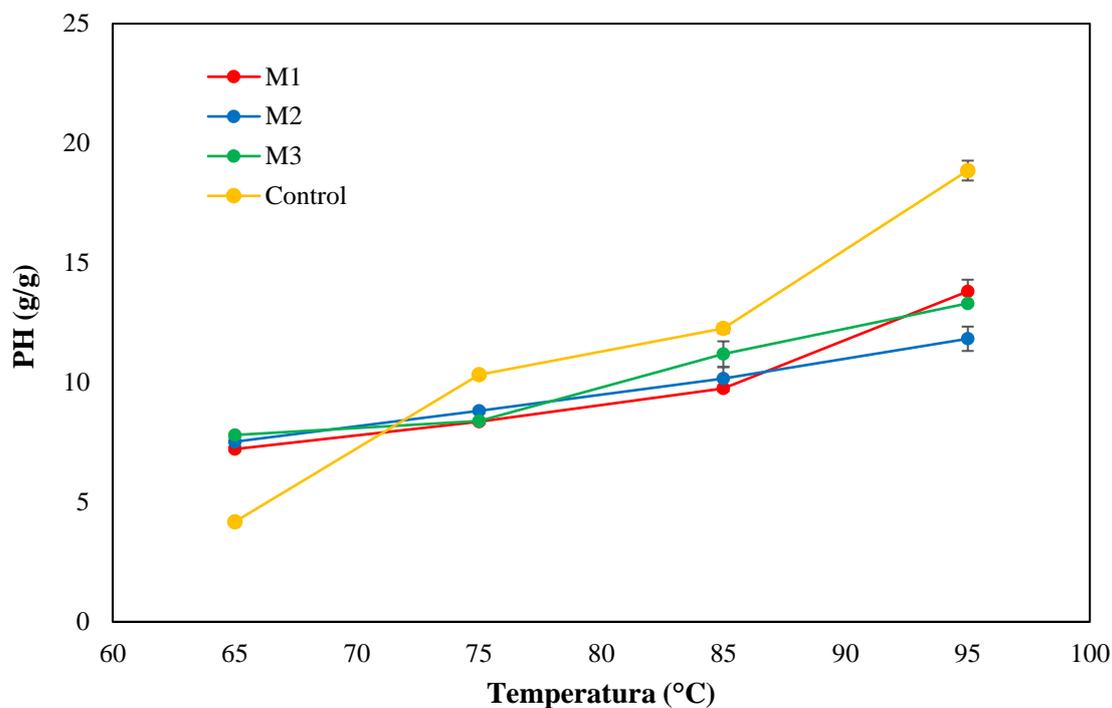
Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ )

Cai *et al.* (2014), indican en su investigación del efecto del tratamiento alcalino de almidón de arroz, un aumento del PH del almidón tratado con NaOH 0,4 por ciento, debido a la degradación de la estructura de la amilosa con este álcali. Sin embargo, en los resultados obtenidos, solo a 75°C, M2 resultó significativamente mayor a M1 y M3. Además, estos resultados mostraron que, si bien el PH de M2 aumentó numéricamente, en comparación al resto de tratamiento, a 95°C resultó significativamente menor.

Los valores obtenidos fueron similares a los obtenidos por Ramírez-López (2016), quien reportó un rango de 7,82 – 9,18 g/g a temperaturas de 60 – 90°C, respectivamente. Maza (2020), reportó valores que van de 7,28 a 16,26 g/g a temperaturas de 65 y 95°C, para almidón de quinua, quien menciona también que estos valores guardan relación con los obtenidos por otros autores que también evaluaron almidón de quinua. Asimismo, se indica que el poder de hinchamiento, está relacionada con el contenido de amilopectina, mientras que la amilosa actúa como inhibidor del hinchamiento en presencia de lípidos. Por su parte Li y Zhu (2016) indican que no sólo depende del contenido de amilosa, sino que también está relacionado por la temperatura de gelatinización, la red micelar, el tamaño del gránulo,

la organización supramolecular de los componentes del almidón y la estructura molecular de la amilopectina. Estos factores podrían explicar las diferencias en cuanto a los resultados obtenidos.

Por lo contrario, Karim *et al.* (2007), indican que el contenido de amilosa no se correlaciona con el poder de hinchamiento, esto debido a la complejidad del almidón, añaden que el poder de hinchamiento no puede ser expresado como una función simple del contenido de amilosa. La diversidad del poder de hinchamiento entre los almidones también podría atribuirse a la variación de los componentes de menor importancia, como por ejemplo el contenido de micronutrientes en su interior.



**Figura 10: Poder de hinchamiento en función a la temperatura de los almidones**

**c. SOLUBILIDAD (S)**

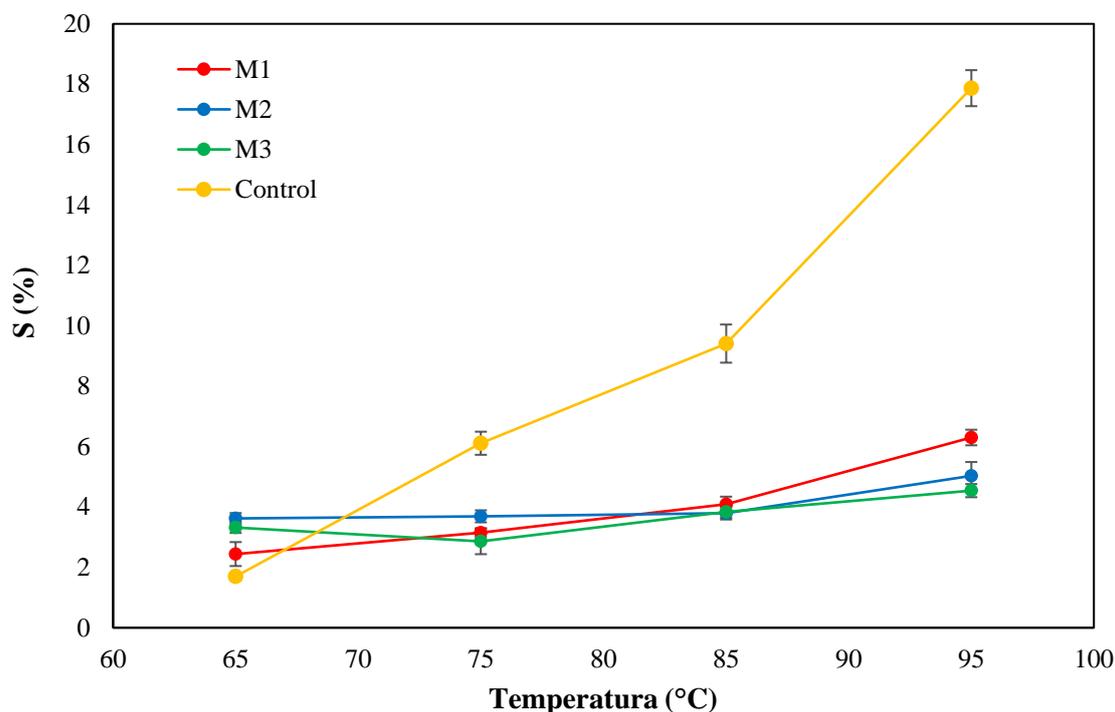
En cuanto a la solubilidad (S), esta propiedad indica la capacidad que tienen los sólidos de almidón para dispersarse en solución acuosa, durante el proceso de hinchamiento (Falade y Christopher, 2015). A diferencia de la CAA, el PH y el porcentaje de solubilidad proporcionan evidencia de la magnitud de las interacciones entre las cadenas de almidón dentro de las regiones amorfa y cristalina. (Wani *et al.*, 2016). Los resultados se muestran en la Tabla 15.

**Tabla 15: Solubilidad (%) de almidones nativos**

| Tratamiento    | Temperaturas (°C)        |                           |                          |                           |
|----------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
|                | 65                       | 75                        | 85                       | 95                        |
| <b>M1</b>      | 2,44 ± 0,40 <sup>b</sup> | 3,15 ± 0,15 <sup>bc</sup> | 4,09 ± 0,25 <sup>b</sup> | 6,30 ± 0,80 <sup>b</sup>  |
| <b>M2</b>      | 3,62 ± 0,18 <sup>a</sup> | 3,69 ± 0,20 <sup>b</sup>  | 3,79 ± 0,21 <sup>b</sup> | 5,03 ± 0,46 <sup>c</sup>  |
| <b>M3</b>      | 3,32 ± 0,18 <sup>a</sup> | 2,86 ± 0,42 <sup>c</sup>  | 3,84 ± 0,20 <sup>b</sup> | 4,54 ± 0,22 <sup>c</sup>  |
| <b>Control</b> | 1,70 ± 0,12 <sup>c</sup> | 6,11 ± 0,38 <sup>a</sup>  | 9,41 ± 0,63 <sup>a</sup> | 17,87 ± 0,60 <sup>a</sup> |

Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ )

Al igual que la CAA y el PH, la solubilidad siguió la misma tendencia. Estadísticamente, el tratamiento control resultó significativamente menor ( $p < 0,05$ ) a 65°C y mayor a partir de los 75°C en adelante. A 85°C los tratamientos M1, M2 y M3 no presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Finalmente, a 95°C, los tratamientos M2 y M3 fueron significativamente menores ( $p < 0,05$ ) que M1 (Anexo 9).



**Figura 11: Solubilidad (%) en función a la temperatura de los almidones**

En la Figura 11 se muestra gráficamente como varía la solubilidad con respecto a la temperatura. Como ya se mencionó anteriormente, el tratamiento control resultó con diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con respecto al resto de tratamientos, además de presentar los valores más altos. Ahora, en cuanto a los almidones de cañihua Illpa – INIA extraídos por tres métodos, M1 pasó de ser significativamente menor ( $p < 0,05$ ) a 65°C, a ser significativamente mayor a 95°C. Con respecto a M2, inicio a 65°C, con el valor más alto (3,62 g/g), y a medida que aumentó la temperatura, esta también siguió aumentando. M3, obtuvo los resultados con poca escalabilidad y con una tendencia no marcada. Esto se pudo deber a que según Castanha *et al.* (2019), a bajas temperaturas la solubilidad no varía en gran medida, debido al hecho de que los gránulos de almidones nativos se encuentran intactos, pues los enlaces glicosídicos de las moléculas aún no sufrieron daño térmico, y sus grupos hidroxilo no fueron reemplazados por grupos electronegativos, encontrándose fuertemente enlazados entre ellos, lo cual dificulta su solubilidad en agua.

Ramírez-López (2016), reportó valores de solubilidad que van de 4,51 a 8,77 g/g a temperaturas de 60-90 °C. Por otro lado, Maza (2020), reportó valores que van de 2,82 a 6,15 g/g a temperaturas de 65 y 95°C, para almidón de quinua, estos valores son similares a los obtenidos en laboratorio, para M1. Perez-Rea y Antezana-Gomez (2018), mencionan que las variaciones pueden deberse a las diferentes condiciones experimentales del método. Un tiempo de mantenimiento prolongado aumenta la solubilidad, y si el tratamiento mecánico es severo, esto también cambiará la naturaleza del solubilizante.

En general, las propiedades de hidratación para todas las muestras tuvieron una relación directa con el aumento de la temperatura, presentando una pendiente positiva. Según Wani *et al.* (2016), a temperaturas bajas (ambiente), las interacciones de las cadenas de amilosa y amilopectina con el agua siguen siendo débiles. Sin embargo, cuando se eleva la temperatura, las moléculas obtienen suficiente energía térmica que debilita los enlaces de hidrógeno intermoleculares y aumenta la interacción y la afinidad hacia el agua, quedando más sitios hidrofílicos expuestos al agua para su interacción mediante enlaces de hidrógeno. Además, Hernández-Medina *et al.* (2008) mencionan que hay una ruptura de los puentes de hidrógeno intermoleculares de las zonas amorfas, por lo que se da una absorción irreversible y progresiva del agua. Como resultado, los gránulos de almidón comienzan a integrarse con el agua. Esto explicaría la solubilidad del almidón a altas temperaturas.

Sin embargo, a pesar de ello, los tratamientos presentaron diferencias de los almidones extraídos de cañihua Illpa – INIA (tratamientos M1, M2 y M3), con el tratamiento control. Según Hedayati y Niakousari (2018) la cantidad de amilosa es un factor importante que influye en las propiedades de hidratación. Pues la amilosa tiende a inhibir el hinchamiento del almidón, es por ello que el tratamiento control fue significativamente menor ( $p < 0,05$ ) a 65°C, debido a que contiene mayor proporción de amilosa (Tabla 11). Durante el calentamiento, la lixiviación de la amilosa facilita la percolación del agua en los gránulos de almidón, mejorando su absorción. Esto coincide con los resultados obtenidos pues, a medida que aumentó la temperatura (75 – 95°C), el tratamiento control fue significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que el resto de tratamientos, pues al tener mayor contenido de amilosa, estas se lixiviaron con el calentamiento y ayudando a su PH y CAA.

### 4.3.2. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ACEITE (CAO)

Esta propiedad funcional es de suma importancia en la industria debido a la interacción de la estructura en los alimentos, especialmente en la retención del sabor, la mejora de la palatabilidad y la extensión de la vida útil, particularmente en productos de panadería o cárnicos (Adebowale y Lawal, 2004). Por su parte Adebowale *et al.* (2006), indican que la capacidad de absorción de aceite (CAO) del almidón revela su potencial emulsionante. Falade y Okafor (2013) añaden que es una característica deseable en productos como la mayonesa y que está relacionado con la cantidad de aceite que puede ser retenido por una muestra durante el procesamiento, por ejemplo, cómo reaccionarán las muestras durante la fritura. En la Tabla 16 se muestran los resultados obtenidos de la capacidad de absorción de aceite de los almidones de cañihua variedad Illpa-INIA obtenidos por tres métodos de extracción y del tratamiento control.

**Tabla 16: Capacidad de absorción de aceite (CAO) de los almidones nativos**

| Tratamiento | Capacidad de absorción de aceite (g/g) |
|-------------|--|
| M1          | 2,82 ± 0,03 <sup>a</sup>               |
| M2          | 2,49 ± 0,07 <sup>b</sup>               |
| M3          | 2,63 ± 0,05 <sup>c</sup>               |
| Control     | 2,15 ± 0,07 <sup>d</sup>               |

Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ )

Como se muestra en la Tabla 16, el tratamiento M1 obtuvo el mayor valor (2,82 g/g), seguido de M3 (2,63 p/p), M2 (2,49 p/p) y el tratamiento control (2,15 g/g), respectivamente. Estadísticamente, hubo diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en los almidones obtenidos. Estos resultados son similares a los reportados por Singh *et al.* (2015), quienes obtuvieron valores entre 2,22 y 2,25 por ciento (g/g) para almidones de *Chenopodium album*.

Según Sirivongpaisal (2008), un alto valor de esta propiedad podría deberse a un mayor contenido de proteínas y grasas que pueden atrapar el aceite, sin embargo, la hidrofobicidad de las proteínas también juega un papel importante en la absorción de aceite, ya que el almidón podría ser más hidrófilo. Para Zarski *et al.* (2020), esta propiedad disminuye con el aumento de la amorfidad del material. Por su parte, Babu y Parimalavalli (2012), indican

que los niveles más altos de proteínas podrían ser responsables de los altos enlaces de hidrógeno y la alta repulsión electrostática, condiciones que facilitan la unión y el atrapamiento de agua, haciéndolos más hidrófilos. El principal componente químico que afecta la capacidad de absorción del aceite es la proteína, que se compone de partes hidrófilas e hidrófobas. Las cadenas laterales de aminoácidos no polares pueden formar interacciones hidrófobas con cadenas de hidrocarburos de lípidos. Esto concuerda con los resultados obtenidos según el método de extracción aplicado, ya que en M2 se extrajo la mayor cantidad de proteínas (según su composición proximal), debido al tratamiento con NaOH 0,25 por ciento, sustentando este resultado, en comparación a M3, el cual se extrajo con agua, exhibiendo una mayor interacción de las proteínas con el aceite. En el caso de M1, quien obtuvo el mayor valor de esta propiedad, si bien tuvo una menor cantidad de proteínas (al igual que M2), también resultó con una mayor cantidad de grasa, por lo que este factor influyó, haciendo que absorba aceite, según los autores quienes lo indican líneas anteriores. Singh *et al.* (2015), mencionan que estas diferencias en los valores de CAO de los almidones podrían deberse a la accesibilidad de los sitios hidrófobos dentro de las moléculas de almidón.

Jan *et al.* (2017b) resaltaron la capacidad del almidón de quinua de unirse a los lípidos de mejor manera que el almidón de maíz lo que podría deberse a los diferentes lados no polares que podrían unirse a las cadenas laterales de hidrocarburos del aceite.

Por otro lado, hay diferentes factores que pueden influir en los resultados obtenidos, Repo-Carrasco *et al.* (2009), mencionan que otro factor importante a considerar es la cantidad de fibra que contiene el almidón, debido a que la fibra tiene una alta absorción de aceite. Asimismo, se debe considerar el tipo de aceite a usar ya que según Sangokunle *et al.* (2020), el almidón retiene de manera diferente según la variedad de aceite usado en el método, también a las condiciones de procesamiento, la exposición variada del residuo apolar de almidón al aceite, la afinidad del almidón y el aceite. En esta investigación se trabajó con aceite de soja todos los tratamientos y un único protocolo metodológico, por lo que este factor se mantuvo constante en la evaluación del CAO.

### 4.3.3. SINÉRESIS

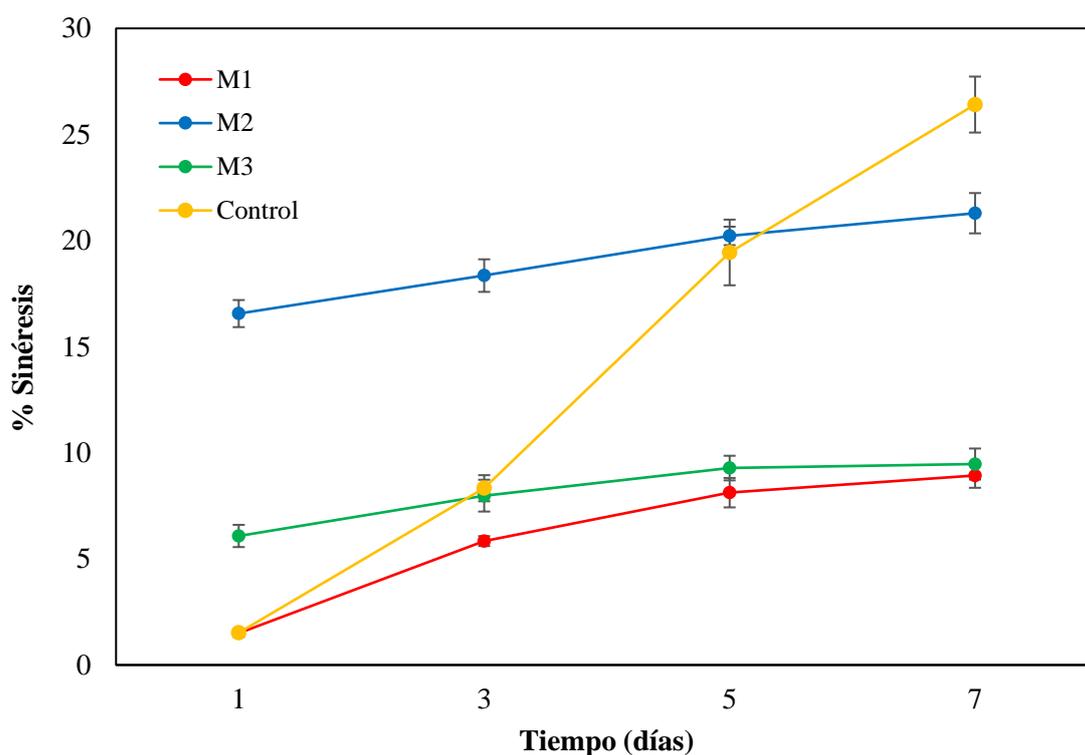
La sinéresis es un índice del grado de retrogradación del almidón a baja temperatura, siendo una propiedad no deseada para su uso en las industrias alimentarias y no alimentarias (Wang *et al.*, 2010). Los resultados de la evaluación de sinéresis de geles de almidón de cañihua Illpa-INIA y el tratamiento control se muestran en la Tabla 17. Estos fueron determinados como porcentaje de sinéresis (%) a los 0; 3; 5 y 7 días de almacenamiento bajo refrigeración.

**Tabla 17: Sinéresis (%) de geles de almidón nativo**

| Tratamiento    | Tiempo (días)             |                           |                           |                           |
|----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                | 1                         | 3                         | 5                         | 7                         |
| <b>M1</b>      | 1,50 ± 0,08 <sup>c</sup>  | 5,84 ± 0,23 <sup>c</sup>  | 8,12 ± 0,69 <sup>b</sup>  | 8,93 ± 0,58 <sup>c</sup>  |
| <b>M2</b>      | 16,46 ± 0,28 <sup>a</sup> | 18,35 ± 0,77 <sup>a</sup> | 20,22 ± 0,43 <sup>a</sup> | 21,29 ± 0,95 <sup>b</sup> |
| <b>M3</b>      | 6,08 ± 0,52 <sup>b</sup>  | 7,98 ± 0,75 <sup>b</sup>  | 9,28 ± 0,58 <sup>b</sup>  | 9,47 ± 0,73 <sup>c</sup>  |
| <b>Control</b> | 1,52 ± 0,15 <sup>c</sup>  | 8,33 ± 0,62 <sup>b</sup>  | 19,44 ± 1,55 <sup>a</sup> | 26,41 ± 1,32 <sup>a</sup> |

Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ )

Estadísticamente, en el día 1 de almacenamiento el tratamiento M2 resultó significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) (16,46 por ciento), seguido de M3 (6,08 por ciento) y, M1 (1,50 por ciento) y el control (1,52 por ciento) (quienes no presentaron diferencias significativas) (Anexo 10). Al tercer día de almacenamiento, el tratamiento M2 se mantuvo significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) (18,35 por ciento), al igual que M3 (7,98 por ciento) el cual se mantuvo en segundo lugar, no presentando diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con el control, que aumento más su sinéresis y el tratamiento M1 (5,84 por ciento) mantuvo la menor sinéresis, sin embargo, también aumento al igual que todos los tratamientos. El quinto día de almacenamiento, M2 (20,22 por ciento) y el control (19,44 por ciento) resultaron significativamente mayores ( $p < 0,05$ ), seguido de M3 (9,28 por ciento) y M1 (8,12 por ciento), quienes no presentaron diferencias significativas. Al séptimo y último día de almacenamiento, el tratamiento control fue el que resultó significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) (26,41 por ciento), seguido de M2 (21,29 por ciento) y más por debajo M3 (9,47 por ciento) y M1 (8,93 por ciento).



**Figura 12: Sinéresis (%) en función a la temperatura de los gels de almidón**

En general, el porcentaje de sinéresis de todos los tratamientos aumentó con el tiempo de almacenamiento en refrigeración, tal y como se observa gráficamente en la Figura 12. Asimismo, los tratamientos M1 y M3, presentaron valores muy bajos, lo cual indica una alta resistencia a la sinéresis, mientras que el tratamiento M2, presentó valores más elevados, reflejando una baja estabilidad.

Maza (2020), reportó valores entre 25,08 a 27,21 por ciento para cinco variedades de quinua. Por su parte, Valdez *et al.* (2019), reportaron valores de sinéresis de almidones de tres variedades de quinua de 35,46 por ciento (variedad pasankalla), 48,53 por ciento (variedad Blanca de Hualhuas) y 57,49 por ciento (variedad Rosada de Huancayo), todas medidas a 72 h de refrigeración. Como se aprecia, dichos valores son muy superiores a los obtenidos por M1 y M3, pero más cercanos a los obtenidos por M2. Valdez *et al.* (2019) mencionan que estas variaciones en cuanto a los resultados obtenidos se deben al contenido de amilopectina y tamaño de gránulo, mientras mayor sea este contenido y más pequeño el gránulo mostrará mayor firmeza y por lo tanto menor sinéresis.

La sinéresis del gel está directamente relacionada con el contenido de amilosa presente en el almidón, ya que las cadenas de amilosa en mayor cantidad aportan al almidón un mayor número de cadenas ramificadas que inhiben la capacidad de la amilosa para formar dobles hélices largas, con lo cual, limita el desarrollo de agregados estables (Oliveira *et al.*, 2021).

La retrogradación del almidón suele ir acompañada de una serie de cambios físicos además de la exudación de agua (sinéresis), como un aumento de la viscosidad, y turbidez de las pastas, formación de gel y un mayor grado de cristalinidad con la aparición de polimorfos cristalinos de tipo B (Hoover *et al.*, 2010).

Gani *et al.* (2013), demostraron que una menor viscosidad de SB (*setback*) está relacionada con una menor sinéresis y, en consecuencia, con una menor tendencia a la retrogradación. Esto último es corroborado con los resultados de SB obtenidos en las propiedades de pasta, ya que M2 obtuvo el mayor valor de SB (1880 cP), resultando también con el mayor porcentaje de sinéresis (21,29 por ciento), en comparación a M1 y M3, quienes tuvieron valores muy bajos de porcentaje de sinéresis. Asimismo, Hernández-Medina *et al.* (2008) señalan que los almidones de baja sinéresis, como en el caso de M1 y M3, se pueden utilizar en productos, como rellenos para pasteles, alimentos para bebés y sopas. Mientras tanto, aquellos con mayor sinéresis, como M2, se pueden usar en alimentos que requieren almacenamiento en refrigeración y necesitan un poco de exudación de humedad para proporcionar una apariencia fresca, como pudines o salsas.

#### **4.3.4. CLARIDAD DE GELES**

La claridad de una pasta de almidón se encuentra estrechamente relacionada con la cantidad de luz que puede penetrar el material, que se puede medir cuantitativamente como el porcentaje de transmitancia de luz (%T) mediante el uso de un espectrofotómetro (Craig *et al.*, 1989).

Esta propiedad da una idea de la retrogradación de los geles de almidón bajo almacenamiento refrigerado, que en última instancia afecta a su transparencia. Este fenómeno implica una serie de cambios que conducen al desarrollo de la turbidez durante el almacenamiento a baja temperatura (Wani *et al.*, 2016). Torruco-Uco y Betancur-Ancona (2007), mencionan que la

claridad es un parámetro fundamental para determinar la aplicación de los almidones en productos alimenticios debido a que pueden dar brillantez u opacidad al producto final.

La agregación de cadenas de amilosa y/o amilopectina reducen la transmisión de la luz. Varios estudios han demostrado que hay un rápido aumento en la turbidez de las dispersiones de almidón gelatinizado durante la primera etapa de almacenamiento, para luego permanece mayormente sin cambios o aumenta lentamente después de un almacenamiento de 48 o 72 h. El rápido aumento de la turbidez durante las primeras 24 h refleja la formación de redes resultantes principalmente de interacciones entre cadenas de amilosa que fueron lixiviados de los gránulos durante la gelatinización. (Wang *et al.*, 2015). Este comportamiento se muestra claramente en el control (almidón de maíz).

Los resultados de la evaluación de la claridad de geles de almidón de cañihua Illpa-INIA y del tratamiento control, se muestran en la Tabla 18. Estos fueron determinados como porcentaje de transmitancia (%) desde las cero horas hasta los cuatro días posteriores y almacenados en refrigeración a 4°C.

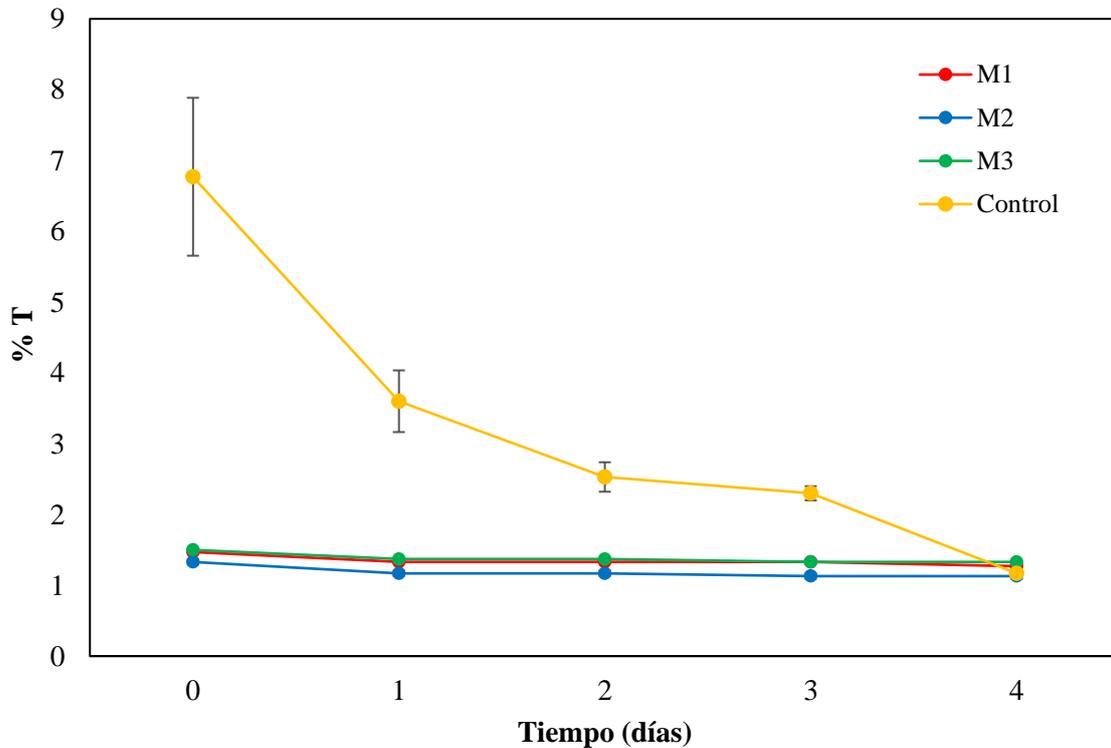
**Tabla 18: Transmitancias de los geles de almidón nativo**

| Tratamiento    | Transmitancias a 650 nm  |                          |                          |                          |                           |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
|                | Día 0                    | Día 1                    | Día 2                    | Día 3                    | Día 4                     |
| <b>M1</b>      | 1,47 ± 0,06 <sup>b</sup> | 1,33 ± 0,06 <sup>b</sup> | 1,33 ± 0,06 <sup>b</sup> | 1,33 ± 0,06 <sup>b</sup> | 1,27 ± 0,06 <sup>bc</sup> |
| <b>M2</b>      | 1,33 ± 0,06 <sup>b</sup> | 1,17 ± 0,06 <sup>b</sup> | 1,17 ± 0,06 <sup>b</sup> | 1,13 ± 0,06 <sup>c</sup> | 1,13 ± 0,06 <sup>c</sup>  |
| <b>M3</b>      | 1,50 ± 0,10 <sup>b</sup> | 1,37 ± 0,06 <sup>b</sup> | 1,37 ± 0,06 <sup>b</sup> | 1,33 ± 0,06 <sup>b</sup> | 1,33 ± 0,06 <sup>b</sup>  |
| <b>Control</b> | 6,77 ± 1,12 <sup>a</sup> | 3,60 ± 0,44 <sup>a</sup> | 2,53 ± 0,21 <sup>a</sup> | 2,30 ± 0,10 <sup>a</sup> | 1,77 ± 0,06 <sup>a</sup>  |

Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ )

Estadísticamente, en el día 0 (sin almacenamiento), el tratamiento control resultó significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) (6,77 por ciento), mientras que los tratamientos M1, M2 y M3 no presentaron diferencias significativas (Anexo 11). Este comportamiento es similar a lo reportado por Jan *et al.* (2015) quienes encontraron que los geles de almidón de maíz presentan mayor transmitancia (9,84 – 5,93 por ciento) que los geles de almidón de quinua

(3,73 – 3,36 por ciento). Al día 1 (24h de almacenamiento), todos los valores de transmitancia disminuyeron, sin embargo, el tratamiento control se mantuvo significativamente mayor ( $p < 0,05$ ). El día 2 (48h de almacenamiento), los tratamientos M1, M2 y M3 se mantuvieron con los mismos valores y el control disminuyó, pero permaneció como mayor (2,53 por ciento). En el día 3 (72h de almacenamiento), el tratamiento M1 siguió manteniendo el valor (1,33 por ciento), mientras que los tratamientos M2 (1,13 por ciento), M3 (1,33 por ciento) y el control (2,30 por ciento), disminuyeron su porcentaje de transmitancia. Finalmente, en el día 4 (96h de almacenamiento), los tratamientos M2 y M3 mantuvieron sus valores, mientras que el tratamiento M1 y el control disminuyeron, este último a pesar de dicha disminución se mantuvo como significativamente mayor ( $p < 0,05$ ).



**Figura 13: Porcentaje de transmitancia en función al tiempo de almacenamiento de los geles de almidón**

En la Figura 13, se muestra gráficamente la disminución del %T de los geles de almidones. Como se observa, todos los tratamientos disminuyeron su %T con el tiempo de almacenamiento, notándose más en el tratamiento control. En cuanto a los tratamientos M1, M2 y M3, los valores de %T resultaron bajos en general. Este fenómeno es explicado por

Vargas (2015), quien indica que el almacenamiento en frío da lugar a la retrogradación de la amilosa y a las ramificaciones de la amilopectina presentes en un gel de almidón, dando como resultado la formación de cristales de amilosa y amilopectina que son compuestos insolubles, los cuales provocan la disminución de la claridad del gel. Para Neeraj *et al.* (2021), esta disminución de la transmitancia de la luz también puede atribuirse a la interacción entre las cadenas de amilosa y amilopectina lixiviadas, lo que resulta en el desarrollo de zonas de función, que reflejan o dispersan una cantidad significativa de luz.

La claridad de los geles de almidón es un parámetro importante para su uso como espesante, geles transparentes son recomendados en rellenos de frutas para postres y los geles opacos como los de cañihua encuentran aplicación en aderezos de ensaladas por ejemplo (Jan *et al.*, 2017b).

Otros autores señalan que esta propiedad también está relacionada con el tamaño del granulo, la relación amilosa/amilopectina y el poder de hinchamiento influyendo en el sabor y aceptación de los alimentos a los que se incorpora el almidón como ingrediente (Wang *et al.*, 2015).

Los valores obtenidos, son similares a los de Maza (2020), quien reportó para cuatro días de almacenamiento del gel de almidón de quinua, valores entre 1,83 y 2,07 (%T) (0 h) hasta 1,57 y 2,53 (%T) (72 h). Singh *et al.* (2006), indican que una transmitancia de luz más alta implica un gel más transparente, que es función de la cantidad de gránulos hinchados del almidón en el gel que refractan la luz. Asimismo, Aristizábal *et al.* (2007), mencionan que transmitancias menores a 40 por ciento indican que las pastas de almidón son consideradas opacas o turbias, mientras que aquellas con transmitancias superiores a 40 por ciento son consideradas claras o transparentes, por lo que el gel de almidón de cañihua M1, M2 y M3, se encuentran en la categoría de opacas o turbias. Además, Meaño *et al.* (2014), argumentan que las transparencias presentadas por las pastas de almidón tienen una influencia directa sobre las características de opacidad y brillantez del color de los productos en los que se empleen como espesantes.

#### 4.3.5. PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS GELES DE ALMIDÓN

La evaluación de las propiedades térmicas de gelatinización de los almidones de cañihua se realizaron mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC). En la Tabla 19 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros  $T_o$  (temperatura de inicio),  $T_p$  (temperatura pico),  $T_c$  (temperatura de conclusión) y  $\Delta H$  (entalpía específica) para cada método de extracción del almidón de cañihua. Tovar (2008), indica que los resultados obtenidos empleando DSC brindan información acerca del orden-desorden de las moléculas dentro del sistema. Asimismo, Zhang *et al.* (2014) mencionan que las temperaturas de transición de gelatinización ( $T_o$ ,  $T_p$  y  $T_c$ ) indican la estabilidad al calor de los cristalitas, mientras que el valor de la entalpía específica ( $\Delta H$ ) está asociada con la cantidad de orden molecular y cristalinidad.

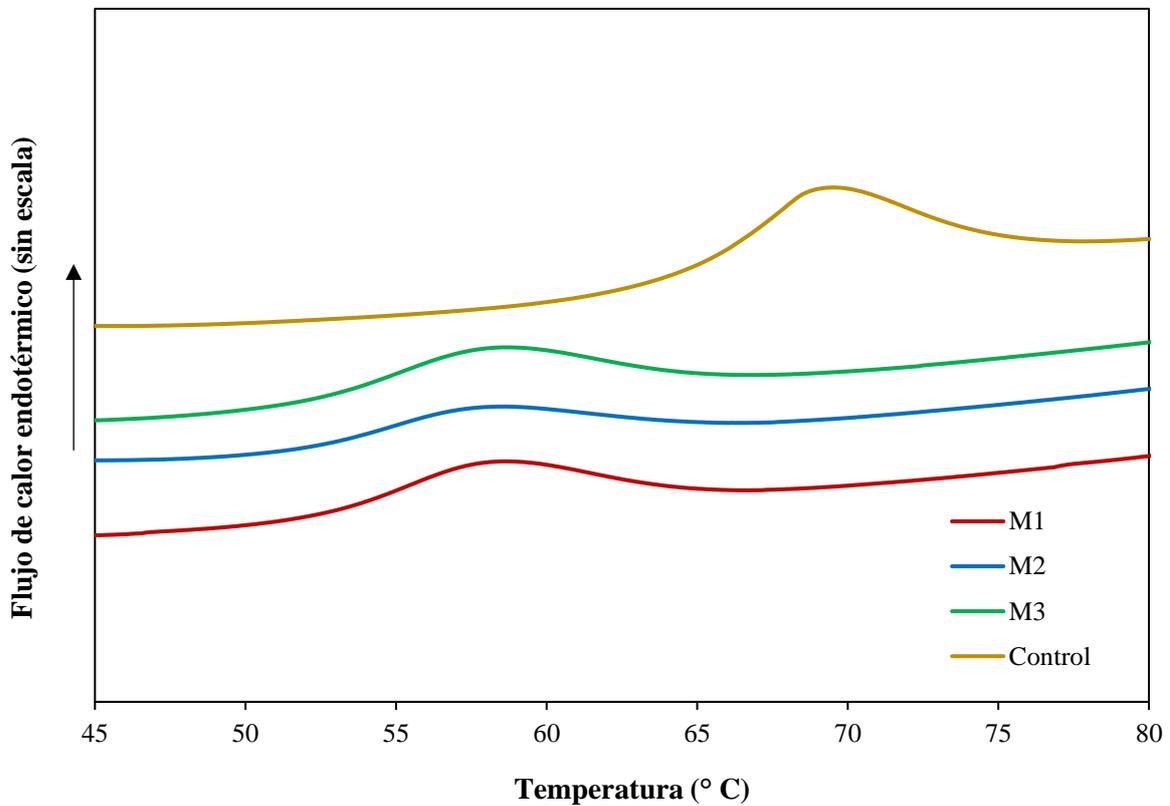
**Tabla 19: Parámetros de gelatinización de los almidones nativos**

| Tratamiento    | $T_o$ (°C)                | $T_p$ (°C)                | $T_c$ (°C)                | $\Delta H$ (J/g)          |
|----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>M1</b>      | 52,28 ± 0,21 <sup>b</sup> | 58,27 ± 0,19 <sup>b</sup> | 65,34 ± 0,29 <sup>b</sup> | 7,28 ± 0,70 <sup>b</sup>  |
| <b>M2</b>      | 51,83 ± 0,16 <sup>b</sup> | 57,84 ± 0,14 <sup>b</sup> | 65,59 ± 0,48 <sup>b</sup> | 5,25 ± 1,17 <sup>b</sup>  |
| <b>M3</b>      | 51,83 ± 0,15 <sup>b</sup> | 58,30 ± 0,14 <sup>b</sup> | 65,56 ± 0,25 <sup>b</sup> | 7,64 ± 0,19 <sup>b</sup>  |
| <b>Control</b> | 63,69 ± 0,06 <sup>a</sup> | 69,24 ± 0,24 <sup>a</sup> | 76,31 ± 0,38 <sup>a</sup> | 11,76 ± 0,98 <sup>a</sup> |

Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ )

Estadísticamente, los resultados obtenidos de los parámetros en todos los métodos de extracción resultaron no significativos ( $p < 0,05$ ) y significativamente menores ( $p < 0,05$ ) que el tratamiento control (almidón de maíz) (Anexo 12). La temperatura de inicio ( $T_o$ ) de gelatinización fue de 52,28°C para M1 y 51,83°C para M2 y M3. En cuanto a la temperatura pico ( $T_p$ ), M1, M2 y M3 mostraron valores similares, los cuales fueron 58,27; 57,84 y 58,30°C, respectivamente. La misma tendencia se obtuvo con la temperatura de conclusión ( $T_c$ ), las cuales resultaron 65,30; 65,59 y 65,56°C, respectivamente. Los resultados obtenidos fueron similares a los reportados por Steffolani *et al.* (2013) ( $T_o$  de 58-59 ° C y  $T_p$  de 66 ° C) y Fuentes *et al.* (2018) ( $T_o$ ,  $T_p$  y  $T_c$  de 49,8; 57,5 y 65,5°C, respectivamente) para almidón de cañihua.

Comparando con cereales y granos similares a la cañihua, Maza (2020), reportó que los valores de  $T_o$ ,  $T_p$  y  $T_c$  de los almidones de quinua variaron de 52,12 a 52,35°C, de 56,01 a 58,13°C y de 62,68 a 65,51°C, respectivamente. Asimismo, Villareal *et al.* (2013), reportaron valores de  $T_o$  y  $T_c$  de 69,22 y 73,97°C, respectivamente, para almidón de granos de amaranto extraídos por el método alcalino. Los valores reportados por Villareal *et al.* y Steffolani *et al.*, se alejan a los reportados en la Tabla 19, según Ojeda (2008) y Xu *et al.* (2013), estas diferencias se pueden deber a la variedad en el contenido de amilosa, el tamaño, la forma, la distribución de fracciones de almidón y contenido de amilosa, asimismo por el pH, la presencia de sales y factores instrumentales y humanos como las preparaciones de las muestras, variaciones en los métodos usados y protocolos experimentales.



**Figura 14: Termogramas de los geles de almidón**

En la Figura 14 se muestran los termogramas de los tres métodos de extracción de los almidones nativos de cañihua. La  $T_o$  indica el inicio del hinchamiento del gránulo de almidón por el ingreso de agua, probablemente en las estructuras amorfas, mientras que  $T_p$ , representa la transición de fase del almidón de estructura granular ordenado a un estado de

desorden al azar, es decir, una transición desde el estado cristalino a un gel, durante la gelatinización del almidón (Liu *et al.*, 2007).

Como se observa, los tres métodos siguen un patrón similar en la curva en cuanto a los valores de  $T_o$ ,  $T_p$  y  $T_c$ . Según Falade y Christopher (2015) los termogramas que presentan un único proceso endotérmico bien definido indican que los almidones tuvieron un perfil de comportamiento térmico similar.

Los valores obtenidos por los tres métodos fueron menores a las temperaturas del control (almidón de maíz) con 63,69, 69,24 y 76,32 °C para  $T_o$ ,  $T_p$  y  $T_c$  respectivamente. Asimismo, el control presentó mayor entalpía de gelatinización (11,76 J/g) frente a los tres tratamientos (5,25-7,64 J/g). Se ha señalado que la mayor temperatura de gelatinización indica una mayor estabilidad de los cristales de almidón, lo que significa que se requiere más calentamiento para hinchar los gránulos (Zhang *et al.*, 2019). El almidón de maíz (control) no sólo tiene más alta temperatura de gelatinización sino también mayor entalpía de gelatinización 11,76 J/kg frente a 5,25 – 7,64 para los tratamientos con cañihua.

La entalpía específica  $\Delta H$ , es una medida general de la cristalinidad y es un indicador de la pérdida de orden molecular (Steffolani *et al.*, 2013). Para el almidón de cañihua evaluado, resultó 7,28, 5,25 y 7,64 J/g para los métodos M1, M2 y M3, respectivamente. Estos valores son cercanos a los reportados por Steffolani *et al.* (2013) ( $\Delta H$  de 7,1 J/g) comparándolo con M1 y M3. Asimismo, Maza (2020), reportó valores de  $\Delta H$  entre 7,84 y 8,60 J/g para almidón de quinua y Li y Zhu (2016) valores entre 10,3 y 15,0 J/g, también para quinua. Sin embargo, M2, obtuvo un valor por debajo de M1, M3, el control y al reportado por dichos autores. Esto se debería a que según Villareal *et al.* (2013) esta propiedad está relacionada con el efecto desestabilizador de las zonas amorfas (regiones ramificadas) que absorben agua antes que las zonas cristalinas (ricas en amilopectina).

La presencia del álcali utilizado en M2, quien estuvo más expuesto a NaOH (usado en el remojo y extracción) podría haber afectado los dominios cristalinos, convirtiéndolo en el almidón más amorfo y, por lo tanto, pudo haber ayudado a que la fusión de los cristallitos se produzca en un rango de temperaturas más estrecho, por lo que se requirió menores energías para poder desestabilizar sus áreas amorfas y cristalinas.

#### 4.3.6. PROPIEDADES REOLÓGICAS

##### a. PROPIEDADES DE FORMACIÓN DE PASTA

Las propiedades de formación de pasta son útiles para la obtención de información de su comportamiento funcional durante los periodos de calentamiento y enfriamiento del almidón, lo cual es común durante el procesamiento de productos amiláceos o en aquellos donde el almidón se agrega como ingrediente (Rulahnia y Khatkar, 2020). Cuando el almidón gelatinizado se calienta continuamente en agua en exceso con agitación constante, los gránulos de almidón se hinchan para proporcionar un aumento en la viscosidad, la amilosa se filtra fuera de los gránulos hinchados y finalmente, las moléculas de almidón se dispersan en el medio acuoso. El desarrollo de la viscosidad en este proceso se conoce como propiedad de pasta del almidón. Esta propiedad se determinó en el Rapid Visco-Analyzer (RVA). En la Tabla 20 se muestran los perfiles de pasta analizados mediante un RVA, de los almidones de cañihua de la variedad Illpa-INIA obtenidos por tres métodos de extracción (M1, M2 y M3).

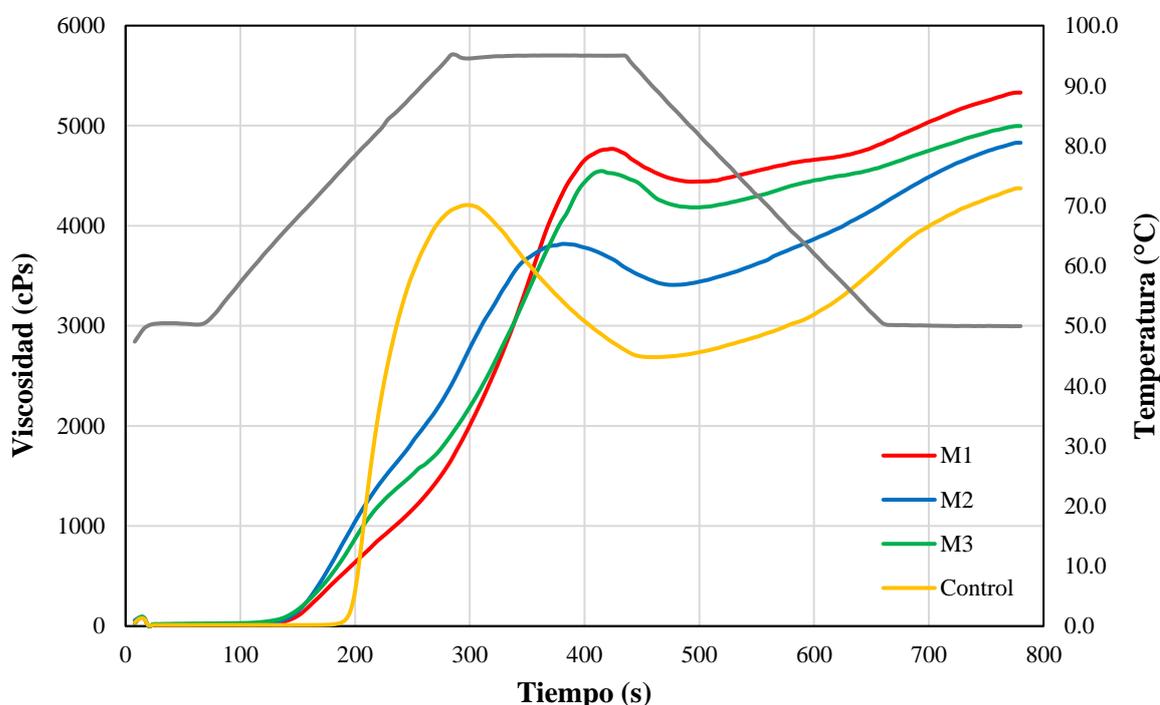


Figura 15: Curvas de formación de pasta de almidones nativos

**Tabla 20: Propiedades de formación de pasta de almidones nativos**

| <b>Tratamiento</b> | <b>VP<br/>(cP)</b>           | <b>VM<br/>(cP)</b>            | <b>BD<br/>(cP)</b>           | <b>VF<br/>(cP)</b>           | <b>SB<br/>(cP)</b>            | <b>tP<br/>(min)</b>      | <b>TP<br/>(°C)</b>        |
|--------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| <b>M1</b>          | 4853,33 ± 74,27 <sup>a</sup> | 4517,33 ± 106,50 <sup>a</sup> | 336,00 ± 97,25 <sup>b</sup>  | 5396,00 ± 74,96 <sup>a</sup> | 878,67 ± 133,36 <sup>c</sup>  | 7,02 ± 0,08 <sup>a</sup> | 66,10 ± 0,00 <sup>a</sup> |
| <b>M2</b>          | 3889,00 ± 61,51 <sup>d</sup> | 3548,33 ± 120,82 <sup>c</sup> | 340,67 ± 59,65 <sup>b</sup>  | 4820,00 ± 20,07 <sup>c</sup> | 1271,67 ± 130,78 <sup>b</sup> | 6,58 ± 0,22 <sup>b</sup> | 67,75 ± 0,00 <sup>a</sup> |
| <b>M3</b>          | 4596,00 ± 47,70 <sup>b</sup> | 4217,67 ± 70,78 <sup>b</sup>  | 378,33 ± 46,69 <sup>b</sup>  | 5010,00 ± 25,12 <sup>b</sup> | 792,33 ± 88,16 <sup>c</sup>   | 6,97 ± 0,14 <sup>a</sup> | 65,45 ± 0,00 <sup>a</sup> |
| <b>Control</b>     | 4185,67 ± 22,81 <sup>c</sup> | 2668,67 ± 17,78 <sup>d</sup>  | 1517,00 ± 20,52 <sup>a</sup> | 4362,33 ± 16,07 <sup>d</sup> | 1693,67 ± 9,29 <sup>a</sup>   | 4,93 ± 0,00 <sup>c</sup> | 76,75 ± 0,00 <sup>b</sup> |

Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ ).

VP = Viscosidad pico

VM = Viscosidad mínima

VF = Viscosidad Final

BD = *Breakdown*

SB = *Setback*

tP = Tiempo pico

TP = Temperatura de pasta

En la Figura 15, se observa el perfil de viscosidad del almidón de cañihua obtenido por los tratamientos M1, M2 y M3, así como el perfil del tratamiento control. Estos perfiles muestran la variación de la viscosidad con respecto al tiempo de calentamiento de las muestras de los geles de almidón. La forma de la curva de formación de pasta difirió según el método de extracción usado, siendo M1 y M3 distintos a M2 y el control. El tratamiento M1 obtuvo la viscosidad máxima (VP), la viscosidad mínima (VM) y la viscosidad final (VF) más alta, mientras que el tratamiento M2 presentó valores mucho más bajos de VP, VM y VF en comparación al resto de tratamientos (Anexo 3).

Se observa también diferentes etapas a lo largo del tiempo. La primera etapa fue la de calentamiento, en donde la viscosidad aumentó gradualmente hasta un valor máximo (viscosidad pico (VP)). En esta etapa, las moléculas de amilosa empiezan a lixiviarse de los gránulos de almidón y a alinearse, debido a que las suspensiones de almidón se someten a altas temperaturas y esfuerzos de cizallamiento mecánico que rompen aún más los gránulos de almidón, lo cual provoca el aumento de la viscosidad de la pasta resultante hasta llegar al pico máximo (VP). Los tratamientos M1 y M3 presentaron una VP mayor que los almidones M2 y el Control. Según Casarrubias-Castillo *et al.* (2012) un pico de viscosidad mayor indica la facilidad de los gránulos para hincharse libremente antes de romperse. La capacidad de los almidones para resistir el calentamiento a altas temperaturas y el esfuerzo cortante es un factor importante en muchos procesos. Los altos valores de descomposición están asociados con altos picos de viscosidad, que, a su vez, están relacionados con el grado de hinchamiento de los gránulos de almidón durante el calentamiento.

Los gránulos de almidón con una alta capacidad de hinchamiento dan como resultado un pico de viscosidad más alto (Ragae *et al.*, 2006). Ai y Jane (2018), mencionan que la amilopeptina es el componente principal responsable del poder de hinchamiento del almidón y el posterior desarrollo de la viscosidad, por lo que el almidón céreo generalmente exhibe un pico de viscosidad más alto que los almidones normales y con alto contenido de amilosa. Esto último, se observa en la Figura 15, donde los almidones de cañihua (M1, M2 y M3), obtuvieron un pico mayor que el tratamiento control. La viscosidad máxima a menudo se correlaciona con la calidad del producto final y también proporciona una indicación de la carga viscosa que probablemente encontrará en procesos de mezclados (Ragae *et al.*, 2006).

En cuanto al tiempo pico (tP), estadísticamente, M1 y M3 no presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), y resultaron mayores que M2 (6,58 min) y el tratamiento control (4,93 min), los cuales necesitaron menos tiempo para alcanzar la viscosidad máxima. Esto podría deberse a la menor tasa de absorción e hinchamiento de los gránulos de almidón. Los valores obtenidos son superiores a los reportados por Steffolani *et al.* (2013) (tP de 4,67 – 5,43 min) para almidones de diferentes ecotipos de cañihua e inferiores al reportado por Ramos (2014) (tP de 10,00 min) y Ramírez-López (2016) (tP de 10,50 min) para almidón de cañihua de la variedad Illpa.

Luego de alcanzar el pico máximo de viscosidad (VP), esta cae hasta alcanzar una viscosidad mínima (VM), este fenómeno ocurre debido a la ruptura de los gránulos hinchados a alta temperatura (Karwasra *et al.*, 2017). Estadísticamente, todos los tratamientos presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), donde M2 presenta el menor valor seguido de los tratamientos M3 y M1.

La diferencia entre las viscosidades, da como resultado el parámetro *breakdown* (BD), el cual, según Ramos (2014), indica la resistencia a la ruptura por cizallamiento de los geles de almidón. Estadísticamente, los tratamientos M1, M2 y M3 no presentan diferencias significativas, pero resultaron significativamente menores ( $p < 0,05$ ) al tratamiento control. Para Ragae *et al.* (2006), altos valores de BD están asociados con altos picos de viscosidad, y a su vez, están relacionados con el grado de hinchamiento de los gránulos de almidón durante el calentamiento. Además, Singh *et al.* (2013) indican que los almidones que se hinchan en un alto grado también muestran altos valores de BD y una baja estabilidad térmica, presentando una disminución significativa de la viscosidad luego de alcanzar el valor máximo. Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango reportado por Steffolani *et al.* (2013) (BD de 234-673 cP) para almidones de diferentes ecotipos de cañihua, inferiores al reportado por Ramos (2014) (BD de 521,70 cP) y superiores al reportado por Ramírez-López (2016) (BD de 215,50 cP) para almidón de cañihua de la variedad Illpa. En general, los tratamientos M1, M2 y M3, presentaron bajos valores lo que, según Perez-Rea y Antezana-Gomez (2018), indica que este almidón es muy resistente al cizallamiento mecánico durante la cocción.

El *setback* (SB) representa el aumento de la viscosidad, resultante del reordenamiento de las moléculas de amilosa, que se han desprendido de los gránulos de almidón hinchados durante el enfriamiento, y se utiliza generalmente como medida de la capacidad de gelificación o de la tendencia a la retrogradación del almidón (Zhang *et al.*, 2018). Según Mali *et al.* (2003), esto último se debe a una reorganización de las cadenas lineales lixiviadas durante las etapas de calentamiento, y mayor número de zonas de unión durante la formación de la pasta y, por tanto, una red que retiene más agua. Asimismo, Ragaee *et al.* (2006) indican que, durante el enfriamiento, la reasociación entre moléculas de almidón, especialmente amilosa, dará como resultado la formación de una estructura de gel y, por lo tanto, la viscosidad aumentará hasta una viscosidad final (VF).

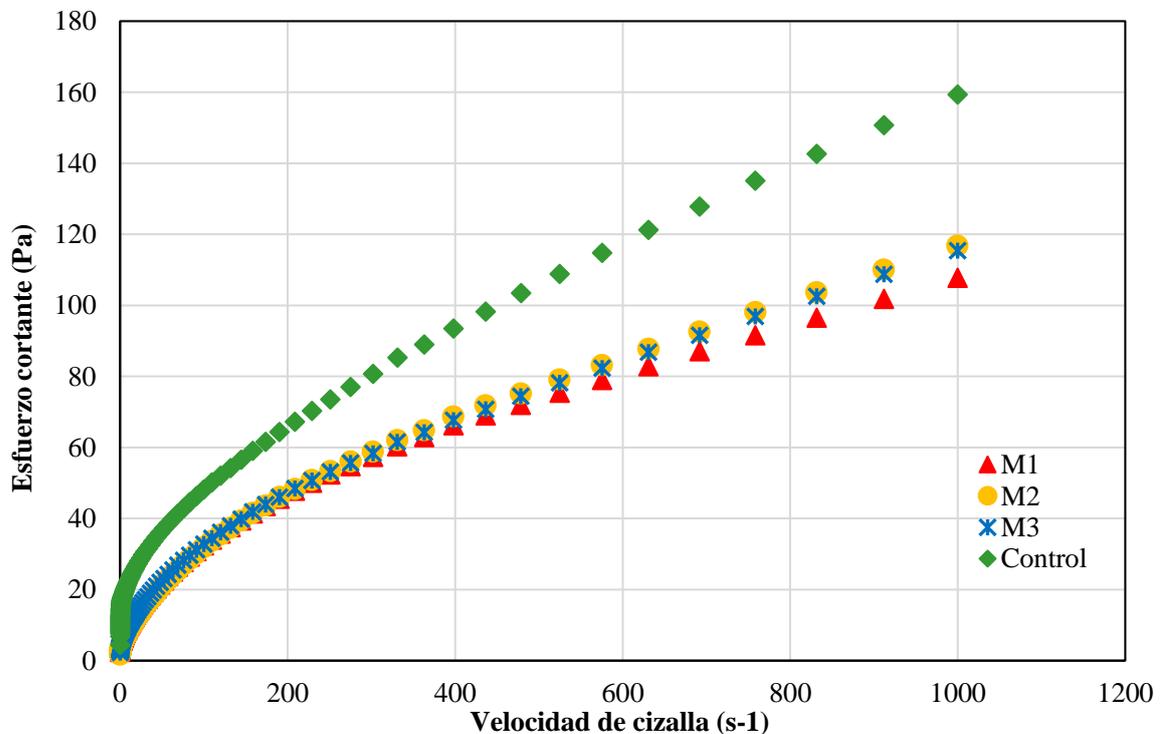
Los valores de retroceso bajos indican una tasa baja de retrogradación y sinéresis del almidón. Estadísticamente, el tratamiento control (1693,67 cP) resultó significativamente mayor ( $p < 0,05$ ). En cuanto a los almidones de cañihua, el tratamiento M2 (1271,67 cP) resultó significativamente mayor ( $p < 0,05$ ), seguido de M1 (878,67 cP) y M3 (792,33 cP), quienes no presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Ramírez-López (2020), menciona que esto indica poca capacidad de reordenamiento de las cadenas de amilosa presentes, debido a la interferencia de otros tipos de moléculas presentes. Según Yu *et al.* (2015), la presencia de enlaces de azufre en las proteínas impide la incorporación de moléculas de agua a la estructura del almidón, lo que dificulta la retrogradación. En ausencia de estructuras proteicas, los gránulos de almidón son más frágiles, favoreciendo la liberación del contenido granular interno, lo que favorece la modificación de su viscosidad. Esto concuerda con el método de extracción usado, ya que M2 se obtuvo por tratamiento con remojo en solución de NaOH al 0,25 por ciento, por lo que, como se mencionó anteriormente, extrajo más proteínas y por lo tanto tuvo una menor interferencia, por lo que el valor de su *setback* pudo resultar mayor.

En cuanto a la viscosidad final (VF) esta indica la estabilidad de la pasta cocida y enfriada, aumentando al enfriarse debido a la agregación de las moléculas de amilosa (Zhang *et al.*, 2018). Estadísticamente, todos los tratamientos presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Donde, el tratamiento M1 resultó significativamente mayor ( $p < 0,05$ ), y en general todos los tratamientos en estudio presentan una viscosidad final mayor al control.

Con respecto a la temperatura de pasta (TP), M2 obtuvo el mayor valor (67,65 °C), lo que según Karwasra *et al.* (2017), indican que estos almidones tienen una ligera mayor resistencia a la ruptura e hinchamiento para iniciar la formación de la pasta en comparación a M1 (66,10°C) y M3 (65,45°C). Ramírez-López (2020), obtuvo un perfil de viscosidades similar, sin embargo, los valores de los parámetros (PV de 5034 cP; TV de 3268 cP; BD de 1766 cP, FV de 5609 cP y *setback* de 2341 cP) fueron mayores a los reportados en la Tabla 20. Por su parte, Fuentes *et al.* (2018) reportaron una TP de 50,7 °C y una VP de 1376 Cp.

## b. COMPORTAMIENTO DE FLUJO

Las curvas de comportamiento de flujo de las pastas de almidón de cañihua y el tratamiento control, se muestran en la Figura 16, donde se puede observar un comportamiento pseudoplástico de adelgazamiento por cizallamiento, similar a los reportados por la quinua (Maza, 2020) y amaranto (Kong *et al.*, 2010), donde la viscosidad aparente del gel disminuye conforme aumenta la velocidad de corte. En comparación con la ley de potencia, el modelo de Herschel-Bulkley dio un mejor ajuste para todas las muestras con un coeficiente de determinación más alto ( $R^2$ ). Por lo tanto, se utilizó el modelo de Herschel-Bulkley para describir el comportamiento de la curva de flujo de las muestras de almidón.



**Figura 16: Curva de comportamiento de flujo de los gels de almidón**

El coeficiente de consistencia (K), el índice de comportamiento de flujo (n), umbral de fluencia ( $\sigma_0$ ) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de todos los almidones se describieron adecuadamente mediante la ecuación de la ley de Herschel-Bulkley ( $R^2 > 0,99$ ) (Tabla 21).

**Tabla 21: Parámetros de la ecuación de Herschel-Bulkley que describen el comportamiento de flujo de los geles de almidón**

| Método de extracción | $\sigma_0$ (Pa)           | K (Pa.s <sup>n</sup> )    | $\eta$                    | $R^2$       |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| M1                   | 1,69 ± 0,32 <sup>ab</sup> | 2,45 ± 0,05 <sup>a</sup>  | 0,54 ± 0,00 <sup>c</sup>  | 1,00 ± 0,00 |
| M2                   | 1,12 ± 0,13 <sup>b</sup>  | 2,08 ± 0,05 <sup>b</sup>  | 0,58 ± 0,00 <sup>ab</sup> | 1,00 ± 0,00 |
| M3                   | 2,13 ± 0,04 <sup>a</sup>  | 2,20 ± 0,10 <sup>ab</sup> | 0,57 ± 0,01 <sup>b</sup>  | 1,00 ± 0,00 |
| Control              | 1,16 ± 0,05 <sup>b</sup>  | 2,40 ± 0,14 <sup>ab</sup> | 0,59 ± 0,00 <sup>a</sup>  | 1,00 ± 0,00 |

Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ )

Estadísticamente, el valor de umbral de fluencia ( $\sigma_0$ ) (mínimo esfuerzo para iniciar el flujo), para el tratamiento M2, resultó significativamente ( $p < 0,05$ ) más bajo en comparación al tratamiento M3. Asimismo, el tratamiento M1, no presenta diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con los tratamientos M2 y M3 (Anexo 14). Según Kong *et al.* (2010), valores altos del umbral de fluencia, indican que los geles de almidón requirieron un mayor esfuerzo para iniciar el flujo debido a que hay una estructura reticulada u otra interactiva en un material que debe descomponerse antes de que el flujo pueda ocurrir a una tasa apreciable. Además, menciona que las moléculas de amilosa contribuyen a la formación inicial de la pasta e influyen en el comportamiento de corte constante de los almidones de diferentes cultivares. Esto coincide con los resultados obtenidos en la determinación de amilosa, donde M1 y M3 fueron significativamente más altos en comparación a M2, influyendo en un menor umbral de fluencia.

En cuanto al coeficiente de consistencia (K), según Abu-Jdayil *et al.* (2004), este nos da una medida de la viscosidad de cizallamiento y estabilidad. Estadísticamente, el tratamiento M1 obtuvo el valor más alto ( $p < 0,05$ ) que el tratamiento M2, pero no presentó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), con el tratamiento M3. Wen *et al.* (2020), menciona que generalmente los almidones con alto contenido de amilosa presentan los valores de K más altos. Esto coincide, con los resultados obtenidos del contenido de amilosa, donde M3 y M1

tuvieron un mayor contenido, por lo que su umbral de fluencia resultó mayor. Maza (2021), reportó valor de K entre 5,31 a 6,30 y valores de n que varían de 0,49 a 0,52 para almidones de distintas variedades de quinua.

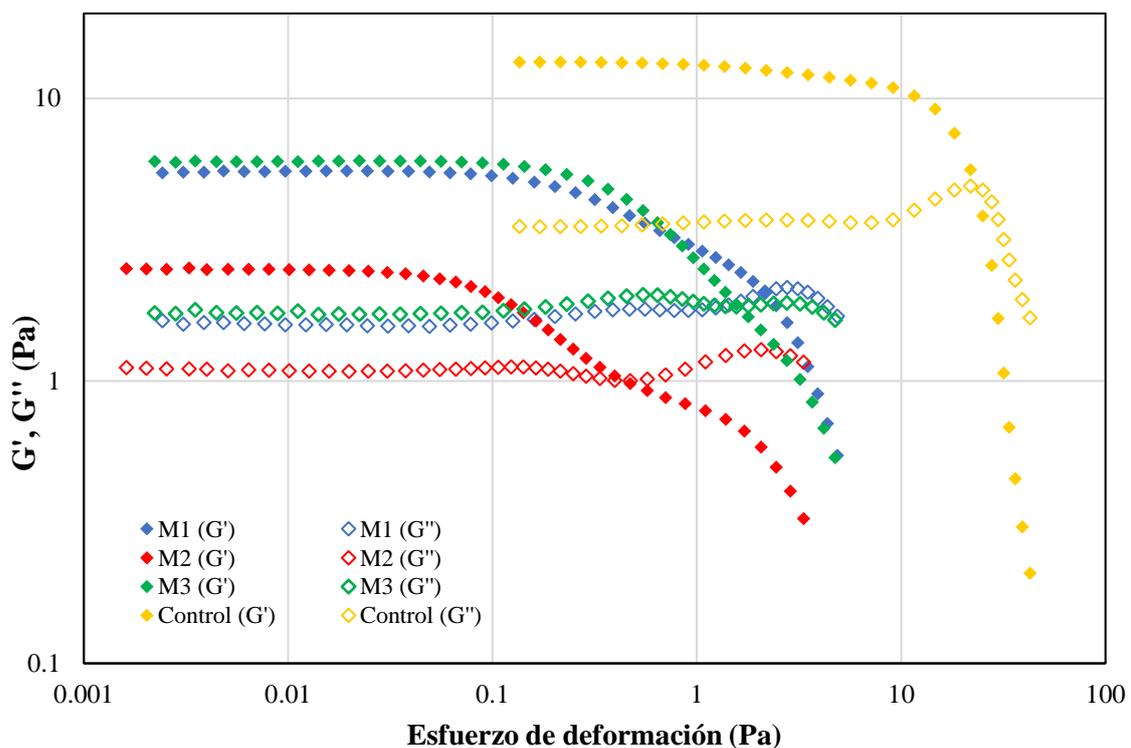
El índice  $\eta$  representa una similitud con el comportamiento de los fluidos newtonianos que tiene una relación lineal entre la velocidad de corte y la tensión (Wen *et al.*, 2020). Asimismo, Al-Malah (2000), menciona que los valores de  $\eta$  menores que la unidad significan que la sustancia exhibe un comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento, mientras que un valor mayor que la unidad significa que la sustancia exhibe un comportamiento de espesamiento por cizallamiento. Estadísticamente, el tratamiento M1 resultó significativamente ( $p < 0,05$ ) más bajo en comparación al resto, lo que indica, un comportamiento de flujo más pseudoplástico que newtoniano. Los tratamientos M2 y M3 no presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), sin embargo, al igual que M1, su comportamiento de flujo es más afín al pseudoplástico. Para Velásquez-Barreto y Velezmoro (2018), este comportamiento pseudoplástico que experimentan las pastas de almidón puede estar relacionado al mecanismo de rompimiento de la estructura de la pasta de almidón durante el cizallamiento, debido a que la velocidad de rompimiento de la pasta de almidón es mayor que el reordenamiento de las moléculas de almidón a altas velocidades de cizalla.

### **c. PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS**

Los parámetros evaluados para definir el comportamiento viscoelástico de los geles de almidón fueron los módulos  $G'$  y  $G''$ . El primero es el módulo de almacenamiento ( $G'$ ), que mide la energía almacenada y posteriormente liberada por ciclo de deformación por unidad de volumen y es la propiedad que se relaciona con los eventos de naturaleza elástica, mientras que el segundo, el módulo de pérdida ( $G''$ ), es una medida de la energía disipada como calor por ciclo de deformación por unidad de volumen y es la propiedad que se relaciona con los eventos moleculares de naturaleza viscosa (Gunasekaran y Ak, 2000). A continuación, se muestra la evaluación del barrido de amplitud, con el cual se definió la región viscoelástica lineal, para su posterior evaluación del comportamiento de los módulos con la variación de la frecuencia.

- **Barrido de Amplitud**

Según Villanueva *et al.* (2010), las pruebas de barrido de amplitud permiten establecer la región viscoelástica lineal y encontrar la dependencia de los módulos  $G'$  y  $G''$  sobre la amplitud de deformación. Asimismo, Yousefi, y Razavi (2015), indican que se puede utilizar para definir la resistencia estructural del material y distinguir geles fuertes y débiles, donde un gel fuerte permanece más tiempo en la región viscoelástica lineal, donde los módulos viscoelásticos pueden ser lineales en una mayor deformación, en comparación con un gel débil. Hesarinejad *et al.* (2014), mencionan que, en general, el valor de la deformación en el límite de la región viscoelástica es inferior a 0,1 para geles de biopolímeros coloidales y superior a 1 para geles de biopolímero natural.



**Figura 17: Barrido de amplitud de los geles de almidones nativos**

Como se observa en la Figura 17, al aplicar el rango de deformación a las muestras de geles de almidón, se obtuvieron dos regiones diferentes, la primera es la región viscoelástica lineal, donde los módulos  $G'$  y  $G''$  permanecieron casi constantes, y la región no lineal, donde  $G'$

y  $G''$  empiezan a disminuir. Según Yousefi, y Razavi (2015), al aumentar la deformación, la región lineal llegó a un punto donde  $G'$  comienza a disminuir bruscamente, esta es conocida como deformación crítica, que está asociada con la deformabilidad de las muestras de gel de almidón.

- **Barrido de frecuencia**

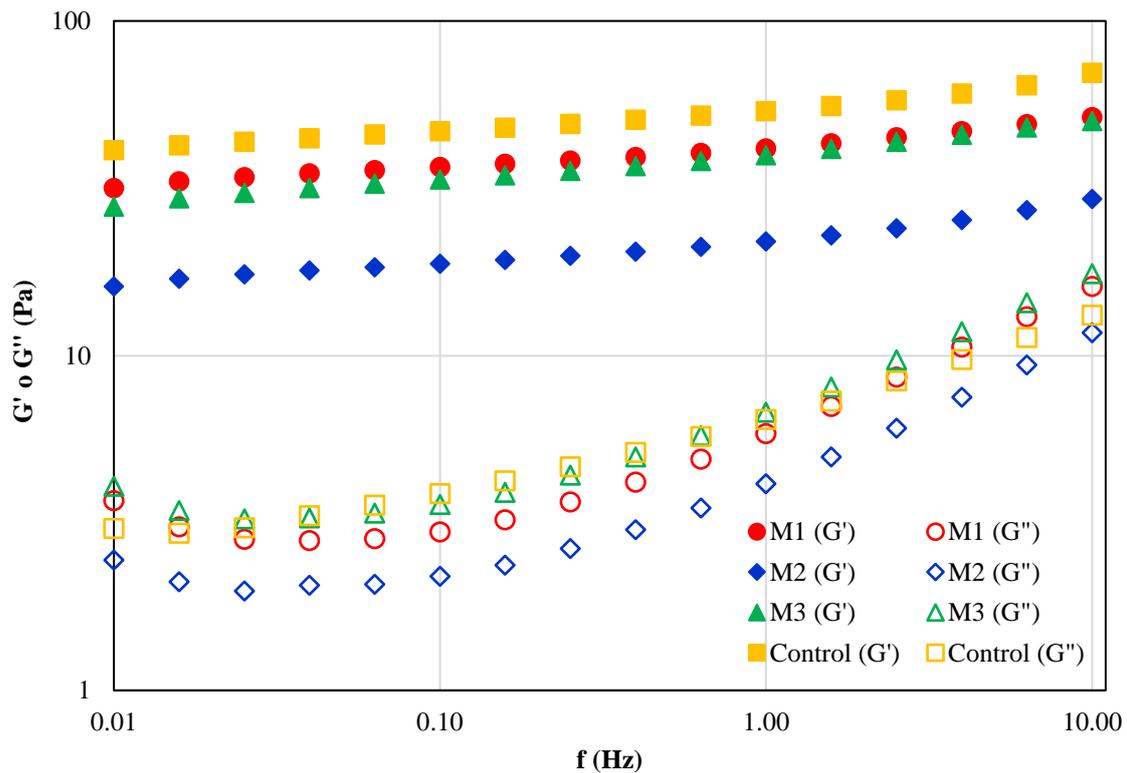
En la Tabla 22, se muestra los parámetros de las propiedades viscoelásticas de los almidones de la variedad Illpa – INIA, que se modelaron mejor a la ecuación de la ley de la potencia, debido a los altos valores de  $R^2$  ( $> 0,98$ ) para todos los tratamientos. Los módulos viscoelásticos ( $G'$  y  $G''$ ) fueron analizados en el rango de frecuencia de 0,01 a 10,00 Hz (Figura 17).

**Tabla 22: Parámetros de la ecuación de ley de potencia que describen las propiedades viscoelásticas de los geles de almidón**

| Método         | G'                        |                          |                | G''                       |                          |                |
|----------------|---------------------------|--------------------------|----------------|---------------------------|--------------------------|----------------|
|                | K' (Pa.s <sup>n</sup> )   | n'                       | R <sup>2</sup> | K'' (Pa.s <sup>n</sup> )  | n''                      | R <sup>2</sup> |
| <b>M1</b>      | 37,77 ± 0,93 <sup>b</sup> | 0,06 ± 0,00 <sup>a</sup> | 0,98           | 4,21 ± 0,07 <sup>b</sup>  | 0,25 ± 0,00 <sup>a</sup> | 0,83           |
| <b>M2</b>      | 19,68 ± 0,02 <sup>c</sup> | 0,08 ± 0,01 <sup>a</sup> | 0,96           | 3,00 ± 0,09 <sup>c</sup>  | 0,25 ± 0,01 <sup>a</sup> | 0,86           |
| <b>M3</b>      | 34,93 ± 1,11 <sup>b</sup> | 0,08 ± 0,00 <sup>a</sup> | 0,99           | 4,87 ± 0,03 <sup>a</sup>  | 0,24 ± 0,00 <sup>a</sup> | 0,86           |
| <b>Control</b> | 48,68 ± 1,46 <sup>a</sup> | 0,07 ± 0,00 <sup>a</sup> | 0,97           | 4,58 ± 0,29 <sup>ab</sup> | 0,22 ± 0,01 <sup>a</sup> | 0,97           |

Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ )

Estadísticamente, los parámetros  $n'$  y  $n''$  no presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para todos los tratamientos. En cuanto al parámetro  $K'$ , el tratamiento M2 (19,68 Pa.s<sup>n</sup>), resultó significativamente más bajo ( $p < 0,05$ ) que M1 (37,77 Pa.s<sup>n</sup>) y M3 (34,93 Pa.s<sup>n</sup>). Para el parámetro  $K''$ , los tratamientos M1 (4,21 Pa.s<sup>n</sup>), M2 (3,00 Pa.s<sup>n</sup>) y M3 (4,87 Pa.s<sup>n</sup>), presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), sin embargo, el control (4,58 Pa.s<sup>n</sup>) no presentó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) con M1 y M3 (Anexo 15).



**Figura 18: Barrido de frecuencia de los geles de almidones nativos**

En la Figura 18, se muestra gráficamente la variación de  $G'$  y  $G''$  con respecto a la frecuencia angular en el rango aplicado. Como se observa, los valores de  $G'$  resultaron más altos que los de  $G''$  en todo el rango de frecuencia, según Oh *et al.* (2010), todos los tratamientos exhibieron un comportamiento similar a un gel débil debido a que presentaron pendientes positivas y valores de  $G'$  resultaron mucho mayores que las de  $G''$ . Además, Jan *et al.* (2017a), indican que estos geles poseen un comportamiento más elástico que viscoso. Sin embargo, a medida que aumentaba la frecuencia, la separación entre ellos se hizo más estrecha, lo que según Assad-Bustillos *et al.* (2014) es una característica del comportamiento de tipo sólido. Además, Li y Zhu (2018) mencionan que al no haber cruce entre los módulos ( $G'$  y  $G''$ ), el carácter de gel domina en todo el rango de frecuencia principalmente debido al reordenamiento de los componentes de amilosa, ya que la amilosa lixiviada se fija mediante enlaces de hidrógeno al enfriarse, lo que restringe el movimiento de las moléculas o partículas.

Para Yousefi, y Razavi (2015), esta tendencia, mostrada por todos los tratamientos de geles de almidón de cañihua, indica que se comportan más como un sólido y por lo tanto las

deformaciones serán esencialmente elásticas y recuperables. Asimismo, dichos autores, mencionan que este comportamiento también se ha observado en geles de almidón de papa y camote hidroxipropilado, almidones de maíz nativos y fosforilados, y almidón de arroz.

Por un lado, en cuanto al parámetro  $n$ , Peña (2017), indica que representa la susceptibilidad de los módulos  $G'$  y  $G''$  a los cambios en función a la frecuencia angular y Steffe (1996) menciona que representan la velocidad de variación de los módulos con la frecuencia. Gráficamente (Figura 18), se pudo observar tal dependencia de  $n$ , donde el módulo  $G'$  mostró más dependencia de la frecuencia angular que el módulo  $G''$ . Los valores presentados de este parámetro son similares a los reportados por Maza (2021) para almidones de quinua, en cuanto a  $n'$  (0,03 – 0,04), e inferiores en cuanto a los valores de  $n''$  (0,36 – 0,42).

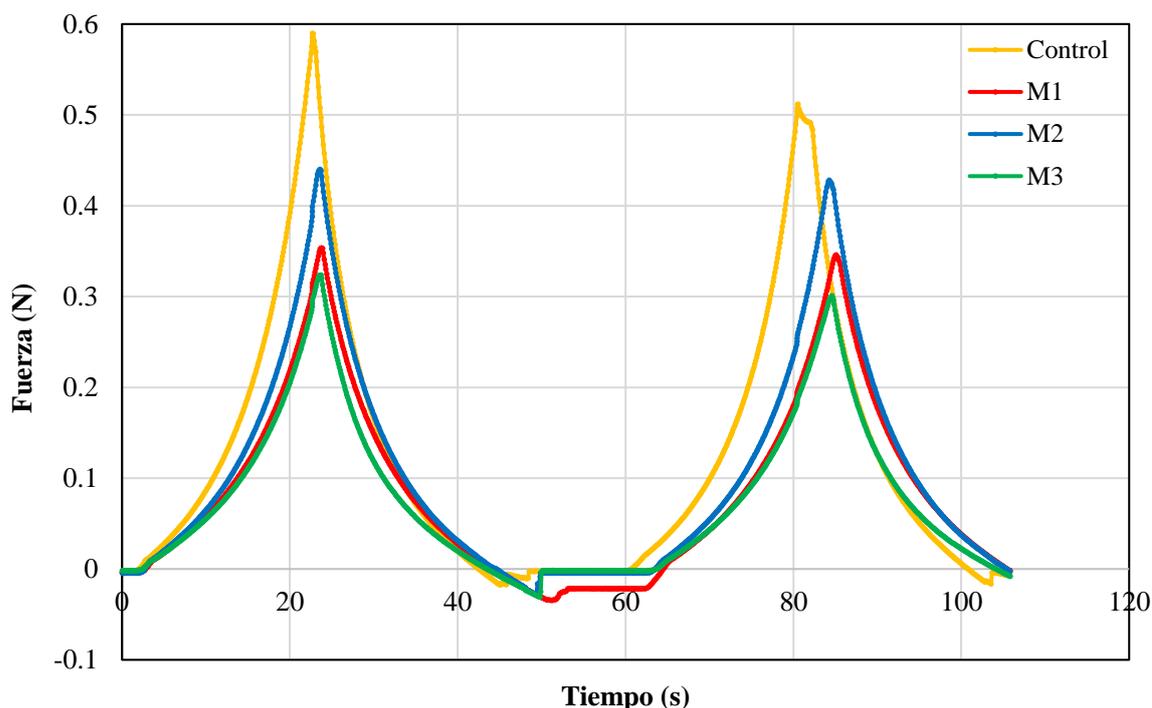
Por otro lado, el parámetro  $K$ , según Steffe (1996), representa la magnitud de  $G$  a una frecuencia dada. Al igual que  $n$ , se puede observar que lo mencionado por dicho autor, se cumple experimentalmente, pues siendo  $G'$  mayor que  $G''$  los valores de  $K$  cumplen con la regla ( $K'$  mayor que  $K''$ ).

Asimismo, según Kong *et al.* (2010), el contenido de amilosa se correlaciona de manera positiva con el módulo  $G'$  y  $G''$  donde se observó que los almidones de arroz con bajo contenido de amilosa habían reducido los valores de  $G'$  y  $G''$ . Por su parte, Singh *et al.* (2003), indican que los módulos  $G'$  y  $G''$  se ven afectados por el contenido de amilosa. Para almidones de papa con alto contenido de amilosa, los valores  $G'$  resultaron más altos (Shewmaker *et al.*, 1994 citados por Singh *et al.*, 2003). Por su parte, dichos autores, informaron que al aumentar el contenido de amilosa en almidones de fuentes cerosas (bajo contenido de amilosa), el valor del módulo  $G'$  aumento. Además, reportaron que los almidones de arroz y maíz cerosos (bajo contenido de amilosa) presentaron  $G'$  y  $G''$  más bajos en comparación a los almidones normales de arroz y maíz. En los resultados obtenidos, se observó esta tendencia, pues el contenido de amilosa en M1 y M3 fueron significativamente mayores ( $p < 0,05$ ) que el tratamiento M2, por lo que presentó los valores más bajos de  $G'$  y  $G''$ , en comparación a M1 y M3. En contraste, Maza (2021), informó que los módulos  $G'$  y  $G''$  no presentaron relación con el contenido de amilosa para geles de almidón de quinua.

#### d. ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA

El análisis de perfil de textura (TPA) es una prueba que simula la acción de la masticación de la boca humana en la cual una muestra se somete a una deformación por compresión (primera mordida) seguida de una relajación y una segunda deformación (segunda mordida) (Mishra y Rai, 2006). En esta prueba se registró la fuerza a lo largo del tiempo y a partir de ello se obtuvo seis parámetros, cuyos valores se presentan en la Tabla 23.

En la Figura 19, se muestra el análisis de perfil de textura aplicados a los geles de almidón de cañihua Illpa – INIA y el tratamiento control. Como se observa, se produjeron dos picos, donde cada uno representa un ciclo de deformación aplicado (primera y segunda mordida). El segundo pico resultó más pequeño en comparación al primero en todos los tratamientos. Según Rosenthal (2010), esto es debido a que hay un cierto debilitamiento de la estructura interna al aplicar el segundo ciclo.



**Figura 19: Análisis de perfil de textura de los geles de almidón**

**Tabla 23: Parámetros del análisis de perfil de textura de los geles de almidón**

| <b>Tratamiento</b> | <b>Dureza<br/>(gf)</b>     | <b>Adhesividad<br/>(gf-mm)</b> | <b>Cohesividad</b>       | <b>Elasticidad</b>       | <b>Gomosidad<br/>(gf)</b>   | <b>Masticabilidad<br/>(gf)</b> |
|--------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| <b>M1</b>          | 358,12 ± 2,69 <sup>c</sup> | 23,96 ± 0,72 <sup>b</sup>      | 0,97 ± 0,01 <sup>a</sup> | 0,88 ± 0,00 <sup>a</sup> | 348,54 ± 6,96 <sup>a</sup>  | 305,41 ± 5,41 <sup>a</sup>     |
| <b>M2</b>          | 445,08 ± 6,94 <sup>b</sup> | 35,18 ± 0,72 <sup>b</sup>      | 1,08 ± 0,07 <sup>a</sup> | 0,89 ± 0,02 <sup>a</sup> | 481,61 ± 40,86 <sup>b</sup> | 429,18 ± 47,85 <sup>b</sup>    |
| <b>M3</b>          | 325,80 ± 7,58 <sup>d</sup> | 55,57 ± 6,49 <sup>a</sup>      | 1,00 ± 0,06 <sup>a</sup> | 0,90 ± 0,02 <sup>a</sup> | 327,07 ± 13,11 <sup>a</sup> | 293,52 ± 4,40 <sup>a</sup>     |
| <b>Control</b>     | 598,45 ± 4,86 <sup>a</sup> | 29,57 ± 5,77 <sup>b</sup>      | 0,92 ± 0,04 <sup>a</sup> | 0,91 ± 0,01 <sup>a</sup> | 547,50 ± 17,18 <sup>b</sup> | 499,10 ± 19,01 <sup>b</sup>    |

Las letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la LSD de Tukey ( $p < 0,05$ )

En general, Sukhija *et al.* (2015), mencionan que las propiedades mecánicas de los geles de almidón dependen de las características reológicas de la matriz de amilosa, de la fracción de volumen, de las interacciones entre la fase dispersa y la continua de la matriz y de la rigidez de los gránulos de almidón gelatinizados, que a su vez dependen del contenido de amilosa y de la estructura de la amilopectina.

La dureza del gel de almidón se le atribuye al poder de hinchamiento de los geles de almidón (Hedayati y Niakousari, 2018). Estadísticamente, el tratamiento control resultó significativamente más duro ( $p < 0,05$ ). Dentro de los almidones de cañihua, el tratamiento M2 resultó con una dureza significativamente alta en comparación a M1 y M3, respectivamente (Anexo 16). Estos resultados se encuentran dentro del rango obtenido por Wu *et al.* (2017) (201 – 900 gf) para almidones de quinua y superiores a los reportados por Jan *et al.* (2015) (35,57 – 46,73 gf) y para almidones de *Chenopodium album*.

Así mismo se ha reportado resultados similares donde geles de almidón de quinua presentaron una menor dureza comparado con geles de almidón de maíz atribuyéndole a su mayor contenido de amilosa de este último y además al bajo *setback* de los geles de almidón de quinua (Jan *et al.*, 2017a). Del mismo modo y como se discutió anteriormente, los geles de almidón de cañihua presentan menor *setback* que los de almidón de maíz.

Rulahnia y Khatkar (2020) mencionan que la dureza del gel de almidón es causada principalmente por la retrogradación, que se encuentra asociada con la sinéresis del agua y la cristalización de la amilopectina, lo que conduce a geles más duros. Asimismo, demostraron que los almidones que tienen geles más duros tienden a tener un mayor contenido de amilosa y cadenas de amilopectina más largas. Por su parte, Steffolani *et al.* (2013) indican que la dureza del almidón se correlaciona positivamente con el contenido de amilosa. Esto concuerda con los resultados obtenidos, ya que, el tratamiento control tuvo el mayor contenido de amilosa y dureza.

Para la adhesividad, esta indica el trabajo necesario para superar las fuerzas de atracción entra la superficie alimenticia y otra (Szczesniak, 2002). Estadísticamente, el tratamiento M3, resultó significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) en comparación al resto de tratamientos incluido el control, siendo el tratamiento M1, el menos adhesivo en general. Jan *et al.* (2015),

mencionan que la adhesividad al igual que la dureza, se ve influenciada por el contenido de amilosa y al origen biológico de los almidones. Además, Zhang *et al.* (2018), mencionan que las diferencias significativas en el TPA entre los almidones pueden deberse a los diferentes contenidos de amilosa, purezas de almidón y estructura de amilosa y amilopectina.

En cuanto a la cohesividad, este parámetro indica la capacidad de una muestra para soportar la deformación (Ren *et al.*, 2020). La lixiviación de las cadenas de amilosa fuera de los gránulos y su reasociación desempeñan el papel principal en la formación de un gel de almidón cohesivo (Hedayati y Niakousari, 2018). Estadísticamente, todos los tratamientos no presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). En promedio, el tratamiento M2 ( $1,08 \pm 0,06$ ) presentó mayor cohesividad que el resto y el tratamiento control fue el menos adhesivo ( $0,92 \pm 0,04$ ).

La elasticidad es un indicador de la capacidad de los productos alimentarios en volver a la condición no deformada luego de la aplicación de una fuerza (Hedayati y Niakousari, 2018). Si una muestra vuelve a su altura original después de la eliminación de las fuerzas de compresión, tiene una alta elasticidad. Los resultados almidones obtenidos por los tres métodos de extracción, mostraron altos valores de elasticidad ( $0,88 - 0,91$ ), y estadísticamente no presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

Las variaciones en los valores de gomosidad y masticabilidad mostraron una tendencia similar a la de la dureza, debido al elevado peso relativo de la dureza en el cálculo de estos parámetros texturales (Hedayati y Niakousari, 2018). Estadísticamente el control y M2 resultaron significativamente mayores ( $p < 0,05$ ), en comparación a los tratamientos M1 y M3.

## V. CONCLUSIONES

1. Los métodos de extracción que emplearon solución alcalina como medio de extracción (M1 y M2) presentaron mayores rendimientos con respecto al método acuoso M3 (26,39 por ciento). El mayor rendimiento se obtuvo con el tratamiento M1 que implicó remojo acuoso y lavados con solución de hidróxido de sodio al 0,25 por ciento (37,06 por ciento). Un mayor tiempo de exposición en la solución de hidróxido de sodio (M2) redujo el rendimiento de extracción (35,34 por ciento).
2. Los almidones de cañihua obtenidos bajo los tres métodos de extracción resultaron con bajos contenidos de proteínas (0,78 – 1,56 por ciento), grasas (0,00 - 0,20 por ciento), cenizas (0,23 - 0,64 por ciento), fibra cruda (0,00-0,02 por ciento) y alta cantidad de carbohidratos (>0,98 por ciento).
3. El contenido de amilosa de los tratamientos M1 y M3, estadísticamente, resultaron significativamente mayores que el tratamiento M2, evidenciando efecto del remojo alcalino. Estos valores resultaron significativamente menores que el almidón de maíz (control). Además, los almidones de cañihua M1 y M3 fueron categorizados como bajo contenido de amilosa y el tratamiento M2 como almidón con muy bajo contenido de amilosa.
4. En la evaluación de color, los almidones de cañihua presentaron altos valores de luminosidad (96,49 – 96,56) e índice de blancura (>90), lo que indicó una elevada pureza de los almidones extraídos. La extracción acuosa (M3) se diferencia por un mayor contenido de proteína (1,56 por ciento) y menor índice de blancura (94,56 por ciento).

5. El tratamiento M1 presentó los mayores valores de capacidad de absorción de agua (12,94 g/g), poder de hinchamiento (13,81 g/g) y solubilidad (6,30 g/g). El almidón de maíz a 95 °C presentó valores más altos en estas propiedades: 15,49, 18,86, 17,87 g/g respectivamente. La capacidad de absorción de agua, el poder de hinchamiento y la solubilidad aumentaron con el aumento de la temperatura.
6. La capacidad de absorción de aceite mostró la influencia de las proteínas y lípidos en los resultados, donde M1 obtuvo el mayor valor (2,82 p/p), seguido de M3 (2,63 p/p) y finalmente M2 (2,49 p/p). El almidón de maíz presentó el valor más bajo (2,15 p/p).
7. Todos los tratamientos presentaron valores bajos de transmitancia, que los clasifica como geles opacos o turbios, con ligera tendencia a su disminución con el tiempo, pasando de 1,47 a 1,27 para M1, 1,33 a 1,13 para M2 y 1,50 a 1,33 para M3 después de 4 días a 4 °C, en ese mismo tiempo el almidón de maíz varió de 6,77 a 1,77.
8. Los tratamientos M1 y M3 presentaron los más bajos valores de sinéresis después de 7 días de almacenamiento en refrigeración (8,93 y 9,47 por ciento respectivamente), lo cual los hace aplicativo para productos que requieran almacenamiento en refrigeración (productos de repostería) por su alta estabilidad. Los valores más altos se presentaron en el tratamiento M2 (21,29 por ciento) y el control (26,41 por ciento).
9. Los tratamientos no presentaron diferencias entre los valores de temperatura inicial ( $T_o$ ), temperatura pico ( $T_p$ ) y temperatura de conclusión ( $T_c$ ); así como la entalpía ( $\Delta H$ ) de gelatinización, encontrándose en el intervalo de 51,83 – 52,28 °C, 57,84 – 58,30 °C, 64,34 – 65,59 °C y 5,25 – 7,64 J/g respectivamente. El tratamiento control presentó mayores valores de  $T_o$ ,  $T_p$ ,  $T_c$  y  $\Delta H$  (63,69 °C, 69,24 °C, 76,31 °C y 11,76 J/g, respectivamente).
10. Dentro de las propiedades de formación de pasta sobresale los altos valores de la viscosidad pico en los tratamientos M1 y M3 (4853,33 y 4596,00 cP, respectivamente) en comparación al tratamiento M2 (3889,00 cP). Asimismo, M2

presentó un mayor *setback* (1271,67 cP), en comparación a M1 (878,67 cP) y M3 (792,33 cP). El almidón de maíz (control) presenta una viscosidad pico de 4185,67 cP y un mayor valor *setback* (1693,67 cP) que los tratamientos.

11. Los almidones presentaron un comportamiento pseudoplástico con un buen ajuste al modelo de Herschel-Bulkley y las propiedades viscoelásticas resultaron con predominio elástico sobre el viscoso en todos los tratamientos.
12. Los resultados del Perfil de textura revelaron que los geles de almidón de cañihua de los tratamientos M1 (353,5 gf) y M3 323,30 gf) tuvieron menor dureza que el tratamiento M2 (439,31 gf) y el control (593,97 gf). No existió diferencias en las propiedades de cohesividad, elasticidad, gomosidad y masticabilidad.
13. El método de tratamiento de extracción tiene un efecto significativo en las propiedades fisicoquímicas y funcionales de los almidones de cañihua. El método alcalino presentó mayores rendimientos y mayor grado de pureza, no obstante, un mayor tiempo de exposición tiene un efecto sobre estas propiedades. El almidón de cañihua resaltó con respecto al almidón de maíz, por su menor contenido de amilosa, menor claridad, mayor blancura, menor sinéresis, menores temperaturas y energía de gelatinización, mayor viscosidad máxima y menor tendencia a la retrogradación.
14. Por sus propiedades fisicoquímicas y funcionales de los almidones de cañihua M1 y M3, tienen potencial aplicación industrial en postres refrigerados, natillas, pudines y rellenos de pasteles que requieren almacenamiento a baja temperatura y en productos con alta opacidad (salsas), además de ser un potencial estabilizante y emulsionante.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Optimizar el proceso de extracción seleccionado a fin de disminuir la emisión de efluentes acuosos alcalinos considerando factores como: número de lavados, proporción de solución alcalina, concentración de soda.
- Estudiar el diseño de sistemas de separación del almidón de los otros componentes; proteínas, grasas y fibras ( por ejemplo: uso de ciclones, tamices etc).
- Estudiar un proceso de extracción multipropósito que recupere el almidón y la proteína de cañihua para un aprovechamiento más integral de este cereal.
- Estudiar métodos de extracción más amigables con la naturaleza que emplee tecnologías como el uso de ultrasonido y/o enzimáticos que eliminen o reduzcan la producción de efluentes alcalinos.
- Estudiar la aplicación del almidón de cañihua como sustituto graso o estabilizador de emulsiones.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abegunde, O., Mu, T., Chen, J., & Deng, F. (2013). Physicochemical characterization of sweet potato starches popularly used in Chinese starch industry. *Food Hydrocolloids*, 33, 169-177. doi: 10.1016/j.foodhyd.2013.03.005
- Abu-Jdayil, B., Mohameed, H. A., & Eassa, A. (2004). Rheology of wheat starch–milk–sugar systems: effect of starch concentration, sugar type and concentration, and milk fat content. *Journal of Food Engineering*, 64(2), 207–212. doi:10.1016/j.jfoodeng.2003.09.034
- Adebowale, K. O., & Lawal, O. S. (2004). Comparative study of the functional properties of bambarra groundnut (*Voandzeia subterranean*), jack bean (*Canavalia ensiformis*) and mucuna bean (*Mucuna pruriens*) flours. *Food Research International*, 37(4), 355-365. doi: 10.1016/j.foodres.2004.01.009
- Adebowale, K. O., Afolabi, T. A., & Olu-Owolabi, B. I. (2006). Functional, physicochemical and retrogradation properties of sword bean (*Canavalia gladiata*) acetylated and oxidized starches. *Carbohydrate Polymers*, 65(1), 93–101. doi: 10.1016/j.carbpol.2005.12.032
- Agama-Acevedo, E., Flores-Silva, P. C., & Bello-Perez, L. A. (2019). Cereal Starch Production for Food Applications. *Starches for Food Application*, 71–102. doi:10.1016/b978-0-12-809440-2.00003-4
- Ai, Y., & Jane, J. (2015). Gelatinization and rheological properties of starch. *Starch - Stärke*, 67(3-4), 213–224. doi:10.1002/star.201400201
- Ai, Y., & Jane, J. (2018). Understanding Starch Structure and Functionality. *Starch in Food*, 151–178. doi:10.1016/b978-0-08-100868-3.00003-2

- Alcázar-Alay, S. C., & Meireles, M. A. A. (2015). Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. *Food Science and Technology*, 35, 215-236. doi: 10.1590/1678-457X.6749
- Al-Malah, K. (2000). Effect of glucose concentration on the rheological properties of wheat-starch dispersions. *Food Hydrocolloids*, 14(5), 491–496. doi:10.1016/s0268-005x(00)00029-1
- Altuna, L.; Herrera, M. L. & Foresti, M. L. (2018). Synthesis and characterization of octenyl succinic anhydride modified starches for food applications. A review of recent literature. *Food Hydrocolloids*, 80: 97-110. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.01.032
- Apaza, V. (2010). Manejo y Mejoramiento de Cañihua. Editorial Altiplano E.I.R.L. Puno – Perú. Recuperado de [http://www.nuscommunity.org/uploads/tx\\_news/Libro\\_Manejo\\_y\\_Mejoramiento\\_Ka%C3%Blwa.pdf](http://www.nuscommunity.org/uploads/tx_news/Libro_Manejo_y_Mejoramiento_Ka%C3%Blwa.pdf)
- Aristizábal, J., Sánchez, T., & Lorío, D. M. (2007). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, pp. 134. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a1028s/a1028s.pdf>
- Arzapalo Quinto, D., Huamán Córdor, K., Quispe Solano, M., & Espinoza Silva, C. (2015). Extracción y caracterización del almidón de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) negra collana, pasankalla roja y blanca junín. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 81(1), 44-54.
- Assad-Bustillos, M., Ramírez-Gilly, M., Tecante, A., & Chaires-Martínez, L. (2014). Physicochemical, functional, thermal and rheological characterization of starch from huauzontle seeds (*Chenopodium berlandieri* spp. nuttalliae). *Agrociencia*, 48(8), 789-803.
- Babu, A. S., & Parimalavalli, R. (2012). Functional and chemical properties of starch isolated from tubers. *International Journal of Agricultural and Food Science*, 2(3), 77-80.

- Bartolo, D. E. (2013). Propiedades nutricionales y antioxidantes de la cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen). *Revista de Investigación Universitaria*, 2(1).
- Bet, C.D., de Oliveira, C.S., Colman, T.A.D. (2019). Aqueous extraction of organic amaranth starch and their by-products. *J Therm Anal Calorim* 138, 2733–2749. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08374-7>
- Bindar, Y., & Efan, A. (2013). Sodium hydroxide (NaOH) concentration and steeping time duration effects on starch production from dry-milled low quality rice IR 64 grade 3 flour using alkaline-protease enzyme digestion method. *International Food Research Journal*, 20(3), 1353.
- Boudries, N., Belhaneche, N., Nadjemi, B., Deroanne, C., Mathlouthi, M., Roger, B., & Sindic, M. (2009). Physicochemical and functional properties of starches from sorghum cultivated in the Sahara of Algeria. *Carbohydrate Polymers*, 78(3), 475–480. doi:10.1016/j.carbpol.2009.05.010
- Bender, D., & Schönlechner, R. (2021). Recent developments and knowledge in pseudocereals including technological aspects. *Acta Alimentaria*, 50(4), 583-609. doi.: 10.1556/066.2021.00136
- Cai, J., Yang, Y., Man, J., Huang, J., Wang, Z., Zhang, C., ... Wei, C. (2014). Structural and functional properties of alkali-treated high-amylose rice starch. *Food Chemistry*, 145, 245–253. doi:10.1016/j.foodchem.2013.08.059
- Calzetta Resio, A. N. (1999). Almidón de amaranto: Obtención y evaluación de sus características fisicoquímicas (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales). Recuperado de: [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis\\_n3242\\_CalzettaResio.pdf](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n3242_CalzettaResio.pdf)
- Cardoso, M. B., Putaux, J.-L., Samios, D., & da Silveira, N. P. (2007). Influence of alkali concentration on the deproteinization and/or gelatinization of rice starch. *Carbohydrate Polymers*, 70(2), 160–165. doi:10.1016/j.carbpol.2007.03.014

- Casarrubias-Castillo, M., Méndez-Montevalvo, G., Rodríguez-Ambriz, S., Sánchez-Rivera, M., & Bello-Pérez, L. (2012). Diferencias estructurales y reológicas entre almidones de frutas y cereales. *Agrociencia* 46:455-466. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/262633297\\_Diferencias\\_estructurales\\_y\\_reologicas\\_entre\\_almidones\\_de\\_frutas\\_y\\_cereales](https://www.researchgate.net/publication/262633297_Diferencias_estructurales_y_reologicas_entre_almidones_de_frutas_y_cereales)
- Castanha, N., Nascimento, D., Lopes, R. & Duarte, P.E. (2019). Properties and possible applications of ozone-modified potato starch. *Food Research International*, 116, 1192-1201. doi: 10.1016/j.foodres.2018.09.064
- Chen J, Jane J (1994). Properties of granular cold-water-soluble starches prepared by alcoholic-alkaline treatments. *Cereal Chem* 71(6), 623–626. Recuperado de: [https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1994/Documents/71\\_623.pdf](https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1994/Documents/71_623.pdf)
- Chen, N., Wang, Q., Wang, M. X., Li, N. Y., Briones, A. V., Cassani, L., ... & Sun, J. Y. (2022). Characterization of the physicochemical, thermal and rheological properties of cashew kernel starch. *Food Chemistry: X*, 15, 100432. doi.: 10.1016/j.fochx.2022.100432
- Correia, P. R., & Beirão-da-Costa, M. L. (2012). Starch isolation from chestnut and acorn flours through alkaline and enzymatic methods. *Food and Bioproducts Processing*, 90(2), 309–316. doi:10.1016/j.fbp.2011.06.005
- Copeland, L., Blazek, J., Salman, H., & Tang, M. C. (2009). Form and functionality of starch. *Food hydrocolloids*, 23(6), 1527-1534. doi: doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.09.016
- Craig, S. S., Maningat, C. C., Seib, P. A., & Hosney, R. C. (1989). Starch paste clarity. *Cereal chemistry*, 66(3), 173-182. Recuperado de: [https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1989/Documents/66\\_173.pdf](https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1989/Documents/66_173.pdf) /UNALM/4607/cuba-canales-alejandra.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Daiuto, E., Cereda, M., Sarmiento, S., & Vilpoux, O. (2005). Effects of extraction methods on yam (*Dioscorea alata*) starch characteristics. *Starch-Stärke*, 57(3-4), 153-160. doi: 10.1002/star.200400324

- Devi, Amita; Sindhu, Ritu; Khatkar, B. S. (2018). Morphological, pasting, and textural characterization of starches and their sub fractions of good and poor cookie making wheat varieties. *Journal of Food Science and Technology*, (), -. doi:10.1007/s13197-018-3544-9
- Diaz, A.; Dini, C.; Vina, S. & García, M. (2016). Starch extraction process coupled to protein recovery from leguminous tuberous roots (*Pachyrhizus ahipa*). *Carbohydrate Polymers*, 152(5), 231-240. doi:10.1016/j.carbpol.2016.07.004
- Díaz, Y. (2015). Determinación de las propiedades físicas, químicas,tecnofuncionales y la estabilidad en congelación/descongelación de cuatro variedades de *solanum tuberosum* ssp. Andigenum (papa nativa) (Tesis para obtener el título de ingeniero agroindustrial, Universidad Nacional José Maria Arguedas). Recuperada de: <http://repositorio.unajma.edu.pe/bitstream/handle/123456789/213/19-2015-EPIADiaz Barrera -Determinación de propiedades de variedades de papa nativa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>"
- Ding, Y., Cheng, J., Lin, Q., Wang, Q., Wang, J., & Yu, G. (2020). Effects of endogenous proteins and lipids on structural, thermal, rheological, and pasting properties and digestibility of adlay seed (*Coix lacryma-jobi* L.) starch. *Food Hydrocolloids*, 106254. doi:10.1016/j.foodhyd.2020.106254
- El Halal, S. L. M., Kringel, D. H., Zavareze, E. D. R., & Dias, A. R. G. (2019). Methods for extracting cereal starches from different sources: A review. *Starch-Stärke*, 71(11-12), 1900128. doi:10.1002/star.201900128
- Eltayeb, A; Ali, A; Abou, A; Abu, F. (2011). Chemical composition and functional properties of flour and protein isolate extracted from Bambara groundnut (*Vigna subterranean*). *African Journal of Food Science* 5(2), 82-90.
- Falade, K., & Christopher, A. (2015). Physical, functional, pasting and thermal properties of flours and starches of six Nigerian rice cultivars. *Food Hydrocolloids* 44: 478-490. doi: 10.1016/j.foodhyd.2014.10.005

- Falade, K. O., & Okafor, C. A. (2013). Physicochemical properties of five cocoyam (*Colocasia esculenta* and *Xanthosoma sagittifolium*) starches. *Food Hydrocolloids*, *30*(1), 173–181. doi:10.1016/j.foodhyd.2012.05.006
- Fuentes, C., Perez-Rea, D., Bergenståhl, B., Carballo, S., Sjöo, M., & Nilsson, L. (2018). Physicochemical and structural properties of starch from five Andean crops grown in Bolivia. *International Journal of Biological Macromolecules*. doi:10.1016/j.ijbiomac.2018.12.120
- Gani, A., Wani, S. M., Masoodi, F. A., & Salim, R. (2013). Characterization of rice starches extracted from Indian cultivars. *Food science and technology international*, *19*(2), 143-152. doi: 10.1177/1082013212442189
- González García, J. C. (2018). Análisis comparativo de los métodos húmedo y alcalino en la extracción de almidón de semillas de *Amaranthus quitensis* L. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, *21*(41), 35-44. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/304894308.pdf>
- González-Cruz, L.; Montañez-Soto, J. L.; Conde Barajas, E.; Negrete, M. D. L. L. X.; Flores-Morales, A. & Bernardino-Nicanor, A. (2018). Spectroscopic, calorimetric and structural analyses of the effects of hydrothermal treatment of rice beans and the extraction solvent on starch characteristics. *International journal of biological macromolecules*, *107*, 965-972. doi:10.1016/j.ijbiomac.2017.09.074
- Gunasekaran, S., & Ak, M. M. (2000). Dynamic oscillatory shear testing of foods—selected applications. *Trends in Food Science & Technology*, *11*(3), 115-127. doi: 10.1016/S0924-2244(00)00058-3
- Han, X. Z. & Hamaker, B. R. (2002). Partial leaching of granule-associated proteins from rice starch during alkaline extraction and subsequent gelatinization. *Starch-Stärke*: *54*(10), 454-460. doi:10.1002/1521-379X(200210)54:10<454::AID-STAR454>3.0.CO;2-M

- Hedayati, S., & Niakousari, M. (2018). Microstructure, pasting and textural properties of wheat starch-corn starch citrate composites. *Food Hydrocolloids*, 81, 1–5. doi:10.1016/j.foodhyd.2018.02.024
- Hernández-Medina, M., Torruco-Uco, J. G., Chel-Guerrero, L., & Betancur-Ancona, D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Food Science and Technology*, 28, 718-726. doi:10.1590/S0101-20612008000300031
- Hesarinejad, M. A., Koocheki, A., & Razavi, S. M. A. (2014). Dynamic rheological properties of *Lepidium perfoliatum* seed gum: Effect of concentration, temperature and heating/cooling rate. *Food Hydrocolloids*, 35, 583–589. doi:10.1016/j.foodhyd.2013.07.017
- Hidalgo, A., & Micho, N. (2016). Modificación química de almidón nativo de maca (*Lepidium Peruvianum*) en sus características (Tesis de Ingeniería). Universidad Nacional del Centro del Perú, Tarma, Perú. Recuperado de <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/4767>"
- Hoover, R., & Ratnayake, W. S. (2002). Starch characteristics of black bean, chick pea, lentil, navy bean and pinto bean cultivars grown in Canada. *Food Chem.* 78:489–498. doi: 10.1016/S0308-8146(02)00163-2
- Hoover, R., & Ratnayake, W. S. (2001). Determination of Total Amylose Content of Starch. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 00(1), E2.3.1–E2.3.5. doi:10.1002/0471142913.fae0203s00
- Hoover, R., & Ratnayake, W. S. (2005). Handbook of food analytical chemistry: water, proteins, enzymes, lipids, and carbohydrates. Determination of Total Amylose Content of Starch, 689-691.
- Hoover, R., Hughes, T., Chung, H. J., & Liu, Q. (2010). Composition, molecular structure, properties, and modification of pulse starches: A review. *Food research international*, 43(2), 399-413. doi:10.1016/j.foodres.2009.09.001

- Jan, K. N., Panesar, P. S., Rana, J. C., & Singh, S. (2017a). Structural, thermal and rheological properties of starches isolated from Indian quinoa varieties. *International Journal of Biological Macromolecules*, *102*, 315–322. doi:10.1016/j.ijbiomac.2017.04.027
- Jan, K. N., Panesar, P., & Singh, S. (2017b). Process standardization for isolation of quinoa starch and its characterization in comparison with other starches. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *11(4)*, 1919–1927. doi: 10.1007/s11694-017-9574-6
- Jan, R., Saxena, D. C., & Singh, S. (2015). Physico-chemical and textural property of starch isolated from Chenopodium (*Chenopodium album*) grains. *Cogent Food & Agriculture*, *1(1)*. doi:10.1080/23311932.2015.1095052
- Jan, R., Saxena, D. C., & Singh, S. (2016). Pasting, thermal, morphological, rheological and structural characteristics of Chenopodium (*Chenopodium album*) starch. *LWT - Food Science and Technology*, *66*, 267–274. doi:10.1016/j.lwt.2015.10.040
- Jobling, S. (2004). Improving starch for food and industrial applications. *Current Opinion in Plant Biology*, *7(2)*, 210–218. doi:10.1016/j.pbi.2003.12.001
- Kale, R. V., Shere, D. M., Sontakke, M. D., & Gadhe, K. S. (2017). Effect of isolation methods on physicochemical and functional properties of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) starch. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *6(4)*, 223-227. doi: 10.22271/phyto
- Karim, A. A., Toon, L. C., Lee, V. P. L., Ong, W. Y., Fazilah, A., & Noda, T. (2007). Effects of phosphorus contents on the gelatinization and retrogradation of potato starch. *Journal of food science*, *72(2)*, C132-C138. doi: 10.1111/j.1750-3841.2006.00251.x.
- Karwasra, B., Singh, B., & Kaur, M. (2017). Rheological and structural properties of starches from different Indian wheat cultivars and their relationships. *International Journal of Food Properties*, *20(1)*, 1093-1106. doi: https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1328439

- Kasturi, P., & Bordenave, N. (2013). Oat Starch. *Oats Nutrition and Technology*, 95–121. doi:10.1002/9781118354100.ch5
- Kaur, L., Singh, J., McCarthy, O., & Singh, H. (2007). Physico-chemical, rheological and structural properties of fractionated potato starches. *Journal of Food Engineering*, 82:383-394. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.02.059
- Kong, X., Kasapis, S., Bertoft, E., & Corke, H. (2010). Rheological properties of starches from grain amaranth and their relationship to starch structure. *Starch/Starke*, 62(6), 302–308. doi: 10.1002/star.20090023"
- Kringel, D. H.; El Halal, S. L. M.; Zavareze, E. D. R. & Dias, A. R. G. (2020). Methods for the Extraction of Roots, Tubers, Pulses, Pseudocereals, and Other Unconventional Starches Sources: A Review. *Starch-Stärke*, 72, 11-12. doi:10.1002/star.201900234
- Lai, L. N., Karim, A. A., Norziah, M. H., & Seow, C. C. (2004). Effects of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and NaOH on pasting properties of selected native cereal starches. *Journal of Food Science*, 69, 249–256. doi: 10.1111/j.1365-2621.2004.tb06324.x
- Lee, H. C., Htoon, A. K., & Paterson, J. L. (2007). Alkaline extraction of starch from Australian lentil cultivars Matilda and Digger optimised for starch yield and starch and protein quality. *Food chemistry*, 102(3), 551-559. doi:10.1016/j.foodchem.2006.03.042
- Li, G., & Zhu, F. (2016). Physicochemical properties of quinoa flour as affected by starch interactions. *Food Chemistry*, 221, 1560–1568. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.10.137
- Li, G., & Zhu, F. (2018). Rheological properties in relation to molecular structure of quinoa starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 114, 767–775. doi:10.1016/j.ijbiomac.2018.03.039
- Lindeboom, N. (2005). Studies on the characterization, biosynthesis and isolation of starch and protein from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) (Doctoral dissertation).

- Liu, Q., Tarn, R., Lynch, D., & Skjodt, N. M. (2007). Physicochemical properties of dry matter and starch from potatoes grown in Canada. *Food Chemistry*, *105*(3), 897-907. doi: 10.1016/j.foodres.2014.01.034
- López, O. V., Zaritzky, N. E., & García, M. A. (2010). Physicochemical characterization of chemically modified corn starches related to rheological behavior, retrogradation and film forming capacity. *Journal of food engineering*, *100*(1), 160-168. doi:10.1016/j.jfoodeng.2010.03.041
- López-Fernández, M. P., Rodríguez, S. D., Favre, L. C., Busch, V. M., & del Pilar Buera, M. (2021). Physicochemical, thermal and rheological properties of isolated Argentina quinoa starch. *LWT*, *135*, 110113. doi:10.1016/j.lwt.2020.110113
- Luna-Mercado, G. I., & Repo-Carrasco-Valencia, R. (2020). Gluten-free bread applications: Thermo-mechanical and techno-functional characterization of Kañiwa flour. *Cereal Chemistry*, *98*(3), 474–481. doi:10.1002/cche.10386
- Mali, S., Ferrero, C., Redigonda, V., Beleia, A. P., Grossmann, M. V. E., & Zaritzky, N. E. (2003). Influence of pH and hydrocolloids addition on yam (*Dioscorea alata*) starch pastes stability. *LWT-Food Science and Technology*, *36*(5), 475-481. doi: 10.1016/j.foodres.2014.01.034
- Manthey, F. A. (2016). Starch: sources and processing.
- Matignon, A., & Tecante, A. (2017). Starch retrogradation: From starch components to cereal products. *Food Hydrocolloids*, *68*, 43–52. doi:10.1016/j.foodhyd.2016.10.032
- Maza Idone, N. N. (2020). Extracción y caracterización fisicoquímica y tecnofuncional de carbohidratos tipo almidón de cinco variedades de Quinoa (Tesis para obtener el título de Ingeniero en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperada de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/4465/maza-idone-nohely-noemi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Meaño Correa, N., Ciarfella Pérez, A. T., & Dorta Villegas, A. M. (2014). Evaluación de las propiedades químicas y funcionales del almidón nativo de ñame congo (*Dioscorea*

bulbifera L.) para predecir sus posibles usos tecnológicos. *Saber*, 26(2), 182-188.  
Recuperado de:  
[http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S131501622014000200011  
&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S131501622014000200011&lng=es&tlng=es).

Mishra, S., & Rai, T. (2006). Morphology and functional properties of corn, potato and tapioca starches. *Food Hydrocolloids*, 20(5), 557–566.  
doi:10.1016/j.foodhyd.2005.01.001

Mistry, A. H. & Eckhoff, S. R. (1992). Characteristics of alkali-extracted starch obtained from corn flour. *Cereal chemistry*, 69(3), 296-303. Recuperado de  
[https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1992/Documents/69\\_296.pdf](https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1992/Documents/69_296.pdf)

Moorthy, S. (2002). Physicochemical and Functional Properties of Tropical Tuber Starches: A Review. *Starch/Stärke*, (54), 559-592. doi: [https://doi.org/10.1002/1521-379X\(200212\)54:12<559::AID-STAR2222559>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/1521-379X(200212)54:12<559::AID-STAR2222559>3.0.CO;2-F)

Nadiha, M. N., Fazilah, A., Bhat, R., & Karim, A. A. (2010). Comparative susceptibilities of sago, potato and corn starches to alkali treatment. *Food Chemistry*, 121(4), 1053-1059. doi: [doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.01.048](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.01.048)

Neeraj, Siddiqui, S., Dalal, N., Srivastva, A., & Pathera, A. K. (2021). Physicochemical, morphological, functional, and pasting properties of potato starch as a function of extraction methods. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(3), 2805–2820. doi:10.1007/s11694-021-00862-5

Oh, J.-H., Kim, M.-J., & Yoo, B. (2010). Dynamic rheological properties of rice flour-starch blends. *Starch - Stärke*, 62(6), 321–325. doi:10.1002/star.200900217

Oh, E. J., Choi, S. J., Lee, S. J., Kim, C. H., & Moon, T. W. (2008). Modification of granular corn starch with 4- $\alpha$ -glucanotransferase from *Thermotoga maritima*: Effects on structural and physical properties. *Journal of Food Science*, 73(3), C158-C166.  
doi:10.1111/j.1750-3841.2007.00655.x

- Ojeda, M. (2008). Comparación de Algunas Propiedades Físicas y Composición Química del Almidón de Piñón (*Araucaria araucana*), Papa (*Solanum tuberosum*) y Maíz (*Zea mays* L.) (Tesis para obtener el título de ingeniero en alimentos, Universidad Austral de Chile). Recuperada de: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/fao.39c/doc/fao.39c.pdf>
- Ojo, M. O., Ariaahu, C. C., & Chinma, E. C. (2017). Proximate, functional and pasting properties of cassava starch and mushroom (*Pleurotus pulmonarius*) flour blends. *American Journal of Food Science and Technology*, 5(1), 11-18. doi: 10.12691/ajfst-5-1-3
- Oliveira, A. R., Ribeiro, A. E. C., Gondim, Í. C., dos Santos, E. A., de Oliveira, É. R., Coutinho, G. S. M., ... & Caliari, M. (2021). Isolation and characterization of yam (*Dioscorea alata* L.) starch from Brazil. *LWT*, 149, 111843. doi: 10.1016/j.lwt.2021.111843
- Ortega, M. (2008). Propiedades viscoelásticas y reológicas estacionarias de suspensión de almidón nativo de quinoa (Tesis para obtener el título de magister en ciencias de los alimentos, Universidad de Chile). Recuperada de: [http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2008/qf-ortega\\_m/pdfAmont/qf-ortega\\_m.pdf](http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2008/qf-ortega_m/pdfAmont/qf-ortega_m.pdf)
- Palacios-Fonseca, A. J., Castro-Rosas, J., Gómez-Aldapa, C. A., Tovar-Benítez, T., Millán-Malo, B. M., Del Real, A., & Rodríguez-García, M. E. (2013). Effect of the alkaline and acid treatments on the physicochemical properties of corn starch. *CyTA-Journal of Food*, 11(sup1), 67-74. doi: 10.1080/19476337.2012.761651
- Paliwal, J., Thakur, S., & Erkinbaev, C. (2018). Protein-Starch Interactions in Cereal Grains and Pulses. Reference Module in Food Science. doi:10.1016/b978-0-08-100596-5.22349-4
- Park, J.-H., Lee, Y.-J., Lim, J.-G., Jeon, J.-H., & Yoon, K.-S. (2021). Effect of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Starch and Seeds on the Physicochemical and Textural and Sensory Properties of Chicken Meatballs during Frozen Storage. *Foods*, 10(7), 1601. doi:10.3390/foods10071601

- Pérez-Rea, D. & Antezana-Gomez, R. (2018). Starch in food: structure, function and applications. Chapter 12: The Functionality of Pseudocereal Starches. Second edition. *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*. 918 p. doi:10.1016/B978-0-08-100868-3.00012-3
- Pérez, G.T., Steffolani, M.E., León, A.E. (2016). Cañahua: An Ancient Grain for New Foods. In: Kristbergsson, K., Ötles, S. (eds) *Functional Properties of Traditional Foods. Integrating Food Science and Engineering Knowledge Into the Food Chain*, vol 12. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7662-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7662-8_9)
- Peña, E. (2017). Extracción y caracterización fisicoquímica y funcional de almidones de cinco variedades de papas nativas procedentes de Ilave (Puno) (Tesis para obtener el título de ingeniero en industrias alimentarias, Universidad Nacional Agraria la Molina). Recuperada de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2655/Q02-P45-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Prazeres, K. G. M. d., Andrade, I. H. P., Camilloto, G. P., & Cruz, R. S. (2020). Physicochemical and functional properties of mangalô bean (*Lablab purpureus* L.) starch. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 125706. doi:10.1016/j.colsurfa.2020.125706
- Prudencio, V., & Vargas, M. (2018). Compilación de estudios sobre la cañahua en Bolivia. La paz, Bolivia: Instituto Interamericano de cooperacion para la agricultura. Recuperado de: <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/7918/BVE19040219e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ragae, S., & Abdel-Aal, E.-S. M. (2006). Pasting properties of starch and protein in selected cereals and quality of their food products. *Food Chemistry*, 95(1), 9–18. doi:10.1016/j.foodchem.2004.12.012
- Ramírez-López, S. (2016). Amido e farinha de cañihua (*Chenopodium pallidicaule*): extração, caracterização e desenvolvimento de filmes biodegradáveis (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). Recuperado de:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74133/tde-12082016-104942/publico/ME8836622COR.pdf>

Ramírez-López, S. (2020). Modificação do amido de cañihua (*Chenopodium pallidicaule*) para aplicação como estabilizante em emulsão Pickering (Tesis doctoral, Universidade de São Paulo). Recuperado de: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74133/tde-12042021-194615/publico/DO8836622COR.pdf>

Ramos, P. (2014). Extracción y caracterización de almidón de quinua, cañihua y *Mirabilis jalapa*. Recuperado de: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/128118/000846538\\_20151209.pdf?sequence=1](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/128118/000846538_20151209.pdf?sequence=1)

Ren, N., Ma, Z., Xu, J., & Hu, X. (2020). Insights into the supramolecular structure and techno-functional properties of starch isolated from oat rice kernels subjected to different processing treatments. *Food Chemistry*, 126464. doi:10.1016/j.foodchem.2020.126464

Repo-Carrasco, R., Espinoza, C., & Jacobsen, S. E. (2003). Nutritional value and use of the Andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). *Food reviews international*, 19(1-2), 179-189. doi: 10.1081/FRI-120018884

Repo-Carrasco-Valencia, R., de La Cruz, A. A., Alvarez, J. C. I., & Kallio, H. (2009). Chemical and Functional Characterization of Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) Grain, Extrudate and Bran. *Plant foods for human nutrition*, 64(2), 94-101. doi: 10.1007/s11130-009-0109-0

Repo-Carrasco-Valencia, R. A., Encina, C. R., Binaghi, M. J., Greco, C. B., & Ronayne de Ferrer, P. A. (2010). Effects of roasting and boiling of quinoa, kiwicha and kañiwa on composition and availability of minerals in vitro. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(12), 2068-2073. doi: 10.1002/jsfa.4053

Robles, M. del P. (2012). Relación entre algunas propiedades fisicoquímicas y térmicas de gelatinización y retrogradación en almidón de papa nativa de Chiloé (Tesis para

obtener el título de ingeniero en alimentos, Universidad Austral de Chile).  
Recuperada de: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2012/far666r/doc/far666r.pdf>

Rosell, C. M., Cortez, G., & Repo-Carrasco, R. (2009). Breadmaking Use of Andean Crops Quinoa, Kañiwa, Kiwicha, and Tarwi. *Cereal Chemistry Journal*, 86(4), 386–392. doi:10.1094/cchem-86-4-0386

Rosenthal, A. J. (2010). Texture profile analysis - how important are the parameters?. *Journal of Texture Studies*, 41(5), 672–684. doi:10.1111/j.1745-4603.2010.00248.x

Rulahnia, K., & Khatkar, B. S. (2020). Isolation and Characterization of Starch from Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Int. J. Innov. Res. Adv. Stud*, 7, 1-6.

Saleh, M. I. (2017). Protein-starch matrix microstructure during rice flour pastes formation. *Journal of Cereal Science*, 74, 183–186. doi:10.1016/j.jcs.2017.02.005

Sánchez, M. (2004). Modificación por oxidación del almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.) y su caracterización parcial. (Tesis para obtener el grado de Maestro en ciencia de desarrollo de productos bióticos, Instituto Politécnico Nacional). Recuperado de: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/7300/Mirna%20Mara%20Snchez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Sandhu, K., & Singh, N. (2007). Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties. *Food Chemistry*, 101(4), 1499–1507. doi:10.1016/j.foodchem.2006.01.060

Sangokunle, O. O., Sathe, S. K., & Singh, P. (2020). Purified starches from 18 pulses have markedly different morphology, oil absorption and water absorption capacities, swelling power, and turbidity. *Starch-Stärke*, 72(11-12), 20. doi:10.1002/star.202000022

Santos, S.d.J.L., Pires, M.B., Amante, E.R. (2022). Isolation and characterization of starch from purple yam (*Dioscorea trifida*). *J Food Sci Technol* 59, 715–723 <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05066-9>

- Singh, N., Kaur, L., Singh, K., Kaur, J., & Nishinari, K. (2006). Relationships between physicochemical, morphological, thermal, rheological properties of rice starches. *Food Hydrocolloids*, 20, 532–542. doi: 10.1016/j.foodhyd.2005.05.003
- Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Singh Sodhi, N., & Singh Gill, B. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, 81(2), 219–231. doi:10.1016/s0308-8146(02)00416-8
- Singh, R., Singh, S., & Saxena, D. C. (2021). Studies on standardization of alcohol aided starch extraction process from *Chenopodium album* and its characterization. *Journal of Food Measurement and Characterization*. doi:10.1007/s11694-021-01105-3
- Singh, N., Kaur, S., Kaur, A., Isono, N., Ichihashi, Y., Noda, T., & Rana, J. C. (2014). Structural, thermal, and rheological properties of *Amaranthus hypochondriacus* and *Amaranthus caudatus* starches. *Starch-Stärke*, 66(5-6), 457-467. doi.:10.1002/star.201300157
- Srivongpaisal, P. (2008). Structure and functional properties of starch and flour from bambarra groundnut. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 30. Recuperado de <http://rdo.psu.ac.th/sjst/journal/30-Suppl-1/0125-3395-30-S1-51-56.pdf>
- Steffe, J. (1996). *Rheological methods in food process engineering*. Michigan, US: Editorial Freeman Press. Recuperado de <http://phariyadi.staff.ipb.ac.id/files/2013/02/STEFFE-Rheology-Book.pdf>
- Steffolani, M. E., León, A. E., & Pérez, G. T. (2013). Study of the physicochemical and functional characterization of quinoa and kañiwa starches. *Starch-Stärke*, 65(11-12), 976-983. doi:10.1002/star.201200286
- Sukhija, S., Singh, S., & Riar, C. S. (2015). Isolation of starches from different tubers and study of their physicochemical, thermal, rheological and morphological characteristics. *Starch - Stärke*, 68(1-2), 160–168. doi:10.1002/star.201500186
- Szczesniak, A.S. (2002). Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference*, 13(4), 215-225. doi: 10.1016/S0950-3293(01)00039-8

- Torruco-Uco, J., & Betancur-Ancona, D. (2007). Physicochemical and functional properties of makal (*Xanthosoma yucatanensis*) starch. *Food Chemistry*, *101*(4), 1319-1326. doi: 10.1016/j.foodchem.2006.03.047
- Tovar, T. (2008). Caracterización morfológica y térmica del almidón de maíz (*Zea mays* L) obtenido por diferentes métodos de aislamiento (Tesis para obtener el título de licenciado en química de alimentos, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo). Recuperada de: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/508/Caracterizacion%20morfologica%20y%20termica%20almidon%20de%20maiz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Uthumporn, U., Shariffa, Y. N., Fazilah, A., & Karim, A. A. (2012). Effects of NaOH treatment of cereal starch granules on the extent of granular starch hydrolysis. *Colloid and Polymer Science*, *290*(15), 1481–1491. doi:10.1007/s00396-012-2674-2
- Valdez-Arana, J.-C., Eugenia Steffolani, M., Repo-Carrasco-Valencia, R., Teresa Pérez, G., & Condezo-Hoyos, L. (2019). Physicochemical and functional properties of isolated starch and their correlation with flour from the Andean Peruvian quinoa varieties. *International Journal of Biological Macromolecules*. doi:10.1016/j.ijbiomac.2019.10.067
- Valenzuela, C., Abugoch, L., Tapia, C., & Gamboa, A. (2013). Effect of alkaline extraction on the structure of the protein of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and its influence on film formation. *International journal of food science & technology*, *48*(4), 843-849. doi:10.1111/ijfs.12035
- Vargas, G. (2015). Síntesis y caracterización de un almidón modificado de papa (*Solanum tuberosum*), (Var. Única) para su aplicación en un helado Soft (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Lima, Perú. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2179/Q02-V373T.pdf;sequence=1>

- Vasanthan, T. (2001). Overview of Laboratory Isolation of Starch from Plant Materials. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 00(1), E2.1.1–E2.1.6. doi:10.1002/0471142913.fae0201s00
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., & Martínez, E. A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.), an ancient Andean grain: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90, 2541–2547. doi: 10.1002/jsfa.4158
- Velásquez-Barreto, F. F., & Velezmoro, C. (2018). Propiedades reológicas y viscoelásticas de almidones de tubérculos andinos. *Scientia Agropecuaria*, 9(2), 189-197.
- Verma, D. K., & Srivastav, P. P. (2021). Isolation, modification, and characterization of rice starch with emphasis on functional properties and industrial application: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–28. doi:10.1080/10408398.2021.1903383 0
- Villanueva, M., De Lamo, B., Harasym, J., & Ronda, F. (2018). Microwave radiation and protein addition modulate hydration, pasting and gel rheological characteristics of rice and potato starches. *Carbohydrate polymers*, 201, 374-381. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.08.052
- Villarreal, M. E., Ribotta, P. D., & Iturriaga, L. B. (2013). Comparing methods for extracting amaranthus starch and the properties of the isolated starches. *LWT-Food Science and Technology*, 51(2), 441-447. doi: 10.1016/j.lwt.2012.11.009
- Wang, L., Xie, B., Shi, J., Xue, S., Deng, Q., Wei, Y., & Tian, B. (2010). Physicochemical properties and structure of starches from Chinese rice cultivars. *Food Hydrocolloids*, 24(2-3), 208–216. doi:10.1016/j.foodhyd.2009.09.007
- Wang, S., & Copeland, L. (2012). Effect of alkali treatment on structure and function of pea starch granules. *Food Chemistry*, 135(3), 1635-1642. doi: 10.1016/j.foodchem.2012.06.003

- Wang, S., Li, C., Copeland, L., Niu, Q. and Wang, S. (2015), Starch Retrogradation: A Comprehensive Review. *COMPREHENSIVE REVIEWS IN FOOD SCIENCE AND FOOD SAFETY*, 14: 568-585. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12143>
- Wang, X., Appels, R., Zhang, X., Diepeveen, D., Torok, K., Tomoskozi, S., ... & Islam, S. (2017). Protein interactions during flour mixing using wheat flour with altered starch. *Food chemistry*, 231, 247-257. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.03.115
- Wani, I. A., Sogi, D. S., Hamdani, A. M., Gani, A., Bhat, N. A., & Shah, A. (2016). Isolation, composition, and physicochemical properties of starch from legumes: A review. *Starch - Stärke*, 68(9-10), 834–845. doi:10.1002/star.201600007
- Webster, FH (1996). Avena. En *Calidad de grano de cereales* (págs. 179-203). Springer, Dordrecht.
- Wen, Y., Yao, T., Xu, Y., Corke, H., & Sui, Z. (2020). Pasting, thermal and rheological properties of octenylsuccinylate modified starches from diverse small granule starches differing in amylose content. *Journal of Cereal Science*, 103030. doi:10.1016/j.jcs.2020.103030
- Wijesinghe, H. D. K. C., & Gunathilake, K. D. P. P. (2020). Characterization and comparison of alkali extracted starches from selected cereals and tubers. *Asian Plant Research Journal*, 1-12. doi: 10.9734/aprj/2020/v5i130096
- Wu, G., Morris, C. F., & Murphy, K. M. (2017). Quinoa Starch Characteristics and Their Correlations with the Texture Profile Analysis (TPA) of Cooked Quinoa. *Journal of Food Science*, 82(10), 2387–2395. doi:10.1111/1750-3841.13848
- Xu, Y., Grizzard, C., Sismour, E. N., Bhardwaj, H. L., & Li, Z. (2013). Resistant starch content, molecular structure and physicochemical properties of starches in Virginia-grown corn, potato and mungbean. *Journal of Cereals and Oilseeds*, 4(1), 10-18.
- Yousefi, A. R., & Razavi, S. M. A. (2015). Dynamic rheological properties of wheat starch gels as affected by chemical modification and concentration. *Starch - Stärke*, 67(7-8), 567–576. doi:10.1002/star.201500005

- Yu, S., Zhang, Y., Li, H., Wang, Y., Gong, C., Liu, . . . Koppaparapu, N. (2015). Effect of freeze-thawing treatment on the microstructure and thermal properties of non-waxy corn starch granule. *Starch/Stärke*, 67, 989-1001. doi: <https://doi.org/10.1002/star.201500109>
- Zarski, A., Bajer, K., Raszewska-Kaczor, A., Rogacz, D., Zarska, S., & Kapusniak, J. (2020). From high oleic vegetable oils to hydrophobic starch derivatives: II. Physicochemical, processing and environmental properties. *Carbohydrate Polymers*, 116499. doi:10.1016/j.carbpol.2020.116499
- Zhang, Y., Hu, M., Zhu, K., Wu, G., & Tan, L. (2018). Functional properties and utilization of *Artocarpus heterophyllus* Lam seed starch from new species in China. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 1395–1405. doi:10.1016/j.ijbiomac.2017.10.001
- Zhang, B; Zhao, Y; Li, X; Zhang, P; Li, L; Xie, F; Chen, L. (2014). Effects of amylose and phosphate monoester on aggregation structures of heat-moisture treated potato starches. *Carbohydrate Polymers* 103, 228-233. doi: 10.1016/j.carbpol.2013.12.055
- Zhang, Wang, Qian, Wang, Zhang, Chang, ... Ma. (2019). Influences of Extraction Methods on Physicochemical and Functional Characteristics of Three New Bulbil Starches from *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun. *Molecules*, 24(12), 2232. doi:10.3390/molecules24122232
- Zhou, Jiang; Tong, Jin; Su, Xingguang; Ren, Lili (2016). Hydrophobic starch nanocrystals preparations through crosslinking modification using citric acid. *International Journal of Biological Macromolecules*, 91, 1186–1193. doi:10.1016/j.ijbiomac.2016.06.082

## VIII. ANEXOS

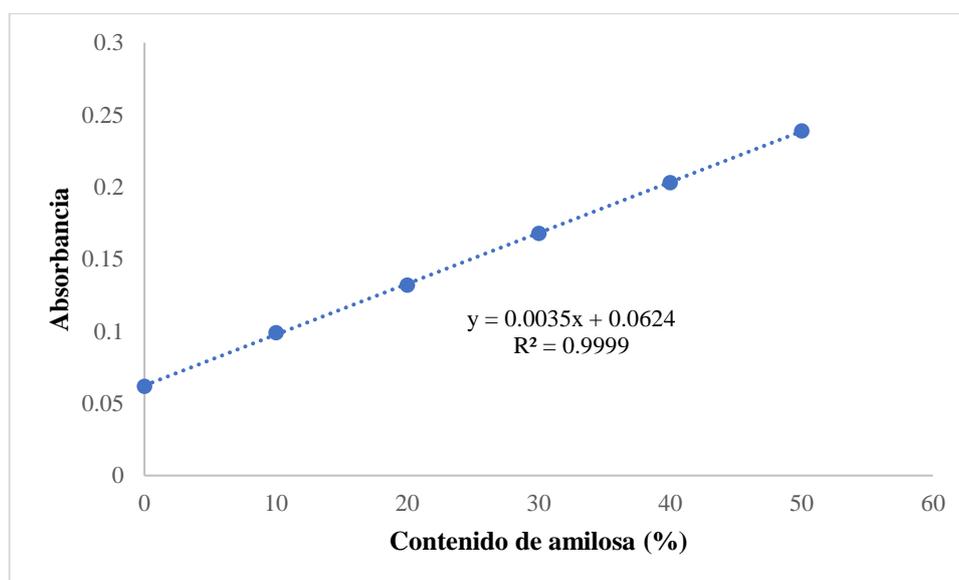
### ANEXO 1: DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AMILOSA

#### ANEXO 1.1: PREPARACIÓN DE CURVA ESTANDAR

- En dos tubos de ensayo de vidrio se pesó por separado 20 mg de amilosa y 20 mg de amilopectina.
- A cada tubo se adicionó 8 ml de DMSO al 90 por ciento (v/v) y se agitó por 2 min en Vórtex (1000 rpm, cuidando que la agitación no haga que el líquido toque la tapa del tubo).
- Los tubos fueron colocados en Baño María a 85° C por 15 min, agitando los tubos en vórtex cada 3 min.
- Los tubos se retiraron del Baño María y dejaron enfriar por 30 min a temperatura ambiente.
- El contenido de cada tubo fue trasladado a diferentes fioles de 25 ml y completado el volumen con agua destilada (concentración: 0.8 mg/ml).
- De cada fiola se extrajeron los volúmenes mostrados en la siguiente tabla. Dichas cantidades fueron depositadas en fioles de 50 ml (se requirió de 6 fioles de 50 ml)
- Inmediatamente se agregó 5 ml de solución de Yodo (preparado mezclando 0.0315 g I<sub>2</sub> resublimado más 0.1079 g de KI y aforados en 100 ml con agua destilada), se agitó vigorosamente y se aforó a 50 ml con agua destilada. La absorbancia de estas soluciones se midió a 600 nm.
- El blanco para cerar el espectrofotómetro se hizo: en una fiola de 25 ml se depositó 8 ml de DSMO 90 por ciento, se aforó con agua destilada. De esta fiola se extrajo 1 ml y se depositó en una fiola de 50 ml, se agregó 5 ml de solución de Yodo y se aforó a 50 ml con agua destilada.

**Tabla A.1: Resultados de mediciones de absorbancia**

| V amilosa (ml) | V amilopectina (ml) | Amilosa (%) | Abs   |
|----------------|---------------------|-------------|-------|
| 0              | 1                   | 0           | 0.062 |
| 0.1            | 0.9                 | 10          | 0.099 |
| 0.2            | 0.8                 | 20          | 0.132 |
| 0.3            | 0.7                 | 30          | 0.168 |
| 0.4            | 0.6                 | 40          | 0.203 |
| 0.5            | 0.5                 | 50          | 0.239 |



**Figura A.1: Contenido de amilosa (%) respecto a la absorbancia**

## **ANEXO 1.2.: DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AMILOSA**

Se procedió como en la preparación de la curva estándar, utilizando 20 mg (en base seca, se requiere conocer la humedad de la muestra) de la muestra de almidón, el cual se depositó en un tubo de ensayo con tapa, se agregó 8 ml DMSO 90 por ciento, agitó en Vórtex por 2 min, se calentó en baño María a 85° C por 15 min, y se dejó enfriar. El contenido del tubo se depositó en una fiola de 25 ml (lavando el tubo varias veces con agua destilada y depositando el agua de lavado en la fiola de 25 ml para arrastrar todo el contenido de la muestra). De la fiola se extrajo 1 ml y se depositó en una fiola de 50 ml, se adicionó 5 ml de solución de yodo, se aforó a 50 ml con agua destilada y se procedió a la lectura de la absorbancia a 600 nm.

## ANEXO 2: ANOVA Y LSD PARA EL RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN

**Tabla A.2: ANOVA para el rendimiento de extracción de almidón**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 2  | 196,910           | 98,4549        | 293,05  | 0,000   |
| Error  | 6  | 2,016             | 0,3360         |         |         |
| Total  | 8  | 198,926           |                |         |         |

### Pruebas de Múltiple Rangos para el rendimiento de extracción de almidón

#### Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%         | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -1,720                   | 0,473            | (-3,172; -0,268)  | -3,63   | 0,025            |
| Método 3 - Método 1   | -10,670                  | 0,473            | (-12,122; -9,218) | -22,55  | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -8,950                   | 0,473            | (-10,402; -7,498) | -18,91  | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 97,80%*

#### Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Método 1 | 3 | 37,060 | A          |
| Método 2 | 3 | 35,340 | B          |
| Método 3 | 3 | 26,390 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

### ANEXO 3: ANOVA Y LSD PARA EL ANÁLISIS PROXIMAL

**Tabla B.1: ANOVA para la determinación de humedad**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 3,79265           | 1,26422        | 527,53  | 0,000   |
| Error  | 4  | 0,00959           | 0,00240        |         |         |
| Total  | 7  | 3,80224           |                |         |         |

#### Pruebas de Múltiple Rangos para la determinación de humedad

##### Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%          | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,3049                  | 0,0490           | (-0,5043; -0,1055) | -6,23   | 0,012            |
| Método 3 - Método 1   | -0,4692                  | 0,0490           | (-0,6686; -0,2698) | -9,58   | 0,002            |
| Control - Método 1    | -1,7999                  | 0,0490           | (-1,9993; -1,6005) | -36,77  | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -0,1643                  | 0,0490           | (-0,3637; 0,0350)  | -3,36   | 0,090            |
| Control - Método 2    | -1,4950                  | 0,0490           | (-1,6944; -1,2956) | -30,54  | 0,000            |
| Control - Método 3    | -1,3307                  | 0,0490           | (-1,5300; -1,1313) | -27,18  | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 97,80%*

##### Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Método 1 | 2 | 12,7999 | A          |
| Método 2 | 2 | 12,4950 | B          |
| Método 3 | 2 | 12,3307 | B          |
| Control  | 2 | 11,0000 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla B.2: ANOVA para la determinación de proteínas**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F   | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|-----------|---------|
| Factor | 3  | 1,04070           | 0,346901       | 582809,78 | 0,000   |
| Error  | 4  | 0,00000           | 0,000001       |           |         |
| Total  | 7  | 1,04071           |                |           |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la determinación de proteínas**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%              | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,002270                | 0,000772         | (-0,00541; 0,00087)    | -2,94   | 0,131            |
| Método 3 - Método 1   | 0,777495                 | 0,000772         | (0,774353; 0,780638)   | 1007,76 | 0,000            |
| Control - Método 1    | 0,651977                 | 0,000772         | (0,648834; 0,655119)   | 845,07  | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 0,779766                 | 0,000772         | (0,776623; 0,782908)   | 1010,71 | 0,000            |
| Control - Método 2    | 0,654247                 | 0,000772         | (0,651105; 0,657389)   | 848,01  | 0,000            |
| Control - Método 3    | -0,125519                | 0,000772         | (-0,128661; -0,122377) | -162,69 | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 97,80%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media    | Agrupación |
|----------|---|----------|------------|
| Método 3 | 2 | 1,56372  | A          |
| Control  | 2 | 1,43820  | B          |
| Método 1 | 2 | 0,786226 | C          |
| Método 2 | 2 | 0,783955 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla B.3: ANOVA para la determinación de grasa**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 2  | 0.03853           | 0.01927        | 1.00    | 0.465   |
| Error  | 3  | 0.05780           | 0.01927        |         |         |
| Total  | 5  | 0.09633           |                |         |         |

**Tabla B.4: ANOVA para la determinación de cenizas**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 1,00912           | 0,336375       | 65,21   | 0,001   |
| Error  | 4  | 0,02063           | 0,005158       |         |         |
| Total  | 7  | 1,02976           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la determinación de cenizas**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%          | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 0,3419                   | 0,0718           | (0,0493; 0,6344)   | 4,76    | 0,030            |
| Método 3 - Método 1   | -0,0756                  | 0,0718           | (-0,3682; 0,2169)  | -1,05   | 0,732            |
| Control - Método 1    | 0,8241                   | 0,0718           | (0,5316; 1,1167)   | 11,47   | 0,001            |
| Método 3 - Método 2   | -0,4175                  | 0,0718           | (-0,7100; -0,1250) | -5,81   | 0,015            |
| Control - Método 2    | 0,4823                   | 0,0718           | (0,1897; 0,7748)   | 6,71    | 0,009            |
| Control - Método 3    | 0,8998                   | 0,0718           | (0,6072; 1,1923)   | 12,53   | 0,001            |

*Nivel de confianza individual = 97,80%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 2 | 1,1250 | A          |
| Método 2 | 2 | 0,6427 | B          |
| Método 1 | 2 | 0,3009 | C          |
| Método 3 | 2 | 0,2252 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla B.5: ANOVA para la determinación de carbohidratos**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 1,92260           | 0,640868       | 168,76  | 0,000   |
| Error  | 4  | 0,01519           | 0,003798       |         |         |
| Total  | 7  | 1,93779           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la determinación de carbohidratos**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%          | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,1216                  | 0,0616           | (-0,3726; 0,1294)  | -1,97   | 0,330            |
| Método 3 - Método 1   | -0,4839                  | 0,0616           | (-0,7349; -0,2329) | -7,85   | 0,005            |
| Control - Método 1    | -1,2567                  | 0,0616           | (-1,5077; -1,0057) | -20,39  | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -0,3623                  | 0,0616           | (-0,6133; -0,1113) | -5,88   | 0,014            |
| Control - Método 2    | -1,1351                  | 0,0616           | (-1,3861; -0,8841) | -18,42  | 0,000            |
| Control - Método 3    | -0,7728                  | 0,0616           | (-1,0238; -0,5219) | -12,54  | 0,001            |

*Nivel de confianza individual = 97,80%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Método 1 | 2 | 98,6949 | A          |
| Método 2 | 2 | 98,5733 | A          |
| Método 3 | 2 | 98,2110 | B          |
| Control  | 2 | 97,4382 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

## ANEXO 4: ANOVA Y LSD PARA EL PORCENTAJE DE AMILOSA

**Tabla C: ANOVA para el porcentaje de amilosa por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 107,884           | 35,9614        | 136,96  | 0,000   |
| Error  | 4  | 1,050             | 0,2626         |         |         |
| Total  | 7  | 108,935           |                |         |         |

### Pruebas de Múltiple Rangos para el porcentaje de amilosa por tratamiento

#### Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%        | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -4,685                   | 0,512            | (-6,772; -2,598) | -9,14   | 0,003            |
| Método 3 - Método 1   | 0,430                    | 0,512            | (-1,657; 2,517)  | 0,84    | 0,835            |
| Control - Método 1    | 5,685                    | 0,512            | (3,598; 7,772)   | 11,09   | 0,001            |
| Método 3 - Método 2   | 5,115                    | 0,512            | (3,028; 7,202)   | 9,98    | 0,002            |
| Control - Método 2    | 10,370                   | 0,512            | (8,283; 12,457)  | 20,24   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 5,255                    | 0,512            | (3,168; 7,342)   | 10,26   | 0,002            |

*Nivel de confianza individual = 98,48%*

#### Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 2 | 20,910 | A          |
| Método 3 | 2 | 15,655 | B          |
| Método 1 | 2 | 15,225 | B          |
| Método 2 | 2 | 10,540 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

## ANEXO 5: ANOVA Y LSD PARA EL PORCENTAJE DE AMILOPECTINA

**Tabla D: ANOVA para el porcentaje de amilopectina por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 107,884           | 35,9614        | 136,96  | 0,000   |
| Error  | 4  | 1,050             | 0,2626         |         |         |
| Total  | 7  | 108,935           |                |         |         |

### Pruebas de Múltiple Rangos para el porcentaje de amilopectina por tratamiento

#### Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%         | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 4,685                    | 0,512            | (2,598; 6,772)    | 9,14    | 0,003            |
| Método 3 - Método 1   | -0,430                   | 0,512            | (-2,517; 1,657)   | -0,84   | 0,835            |
| Control - Método 1    | -5,685                   | 0,512            | (-7,772; -3,598)  | -11,09  | 0,001            |
| Método 3 - Método 2   | -5,115                   | 0,512            | (-7,202; -3,028)  | -9,98   | 0,002            |
| Control - Método 2    | -10,370                  | 0,512            | (-12,457; -8,283) | -20,24  | 0,000            |
| Control - Método 3    | -5,255                   | 0,512            | (-7,342; -3,168)  | -10,26  | 0,002            |

*Nivel de confianza individual = 98,48%*

#### Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Método 2 | 2 | 89,460 | A          |
| Método 1 | 2 | 84,775 | B          |
| Método 3 | 2 | 84,345 | B          |
| Control  | 2 | 79,090 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

## ANEXO 6: ANOVA Y LSD PARA LOS PARÁMETROS DE COLOR

**Tabla E.1: ANOVA para L\* por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 10,2805           | 3,42682        | 965,30  | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,0284            | 0,00355        |         |         |
| Total  | 11 | 10,3089           |                |         |         |

### Pruebas de Múltiple Rangos para L\* por tratamiento

#### Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%          | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,0667                  | 0,0486           | (-0,2225; 0,0892)  | -1,37   | 0,549            |
| Método 3 - Método 1   | -0,1633                  | 0,0486           | (-0,3192; -0,0075) | -3,36   | 0,040            |
| Control - Método 1    | 2,0567                   | 0,0486           | (1,9008; 2,2125)   | 42,28   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -0,0967                  | 0,0486           | (-0,2525; 0,0592)  | -1,99   | 0,269            |
| Control - Método 2    | 2,1233                   | 0,0486           | (1,9675; 2,2792)   | 43,65   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 2,2200                   | 0,0486           | (2,0642; 2,3758)   | 45,63   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

#### Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Control  | 3 | 98,6167 | A          |
| Método 1 | 3 | 96,5600 | B          |
| Método 2 | 3 | 96,4933 | B C        |
| Método 3 | 3 | 96,3967 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla E.2: ANOVA para a\* por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F  | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|----------|---------|
| Factor | 3  | 6,35282           | 2,11761        | 15882,06 | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,00107           | 0,00013        |          |         |
| Total  | 11 | 6,35389           |                |          |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para a\* por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%          | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 0,07667                  | 0,00943          | (0,0465; 0,1069)   | 8,13    | 0,000            |
| Método 3 - Método 1   | 0,07000                  | 0,00943          | (0,0398; 0,1002)   | 7,42    | 0,000            |
| Control - Método 1    | -1,63000                 | 0,00943          | (-1,6602; -1,5998) | -172,89 | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -0,00667                 | 0,00943          | (-0,0369; 0,0235)  | -0,71   | 0,892            |
| Control - Método 2    | -1,70667                 | 0,00943          | (-1,7369; -1,6765) | -181,02 | 0,000            |
| Control - Método 3    | -1,70000                 | 0,00943          | (-1,7302; -1,6698) | -180,31 | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media    | Agrupación |
|----------|---|----------|------------|
| Método 2 | 3 | 0,4933   | A          |
| Método 3 | 3 | 0,48667  | A          |
| Método 1 | 3 | 0,41667  | B          |
| Control  | 3 | -1,21333 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla E.3: ANOVA para el IB por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 5,19993           | 1,73331        | 471,28  | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,02942           | 0,00368        |         |         |
| Total  | 11 | 5,22935           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para el IB por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%          | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,0735                  | 0,0495           | (-0,2321; 0,0852)  | -1,48   | 0,489            |
| Método 3 - Método 1   | -0,3046                  | 0,0495           | (-0,4632; -0,1459) | -6,15   | 0,001            |
| Control - Método 1    | -1,6239                  | 0,0495           | (-1,7825; -1,4653) | -32,80  | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -0,2311                  | 0,0495           | (-0,3897; -0,0725) | -4,67   | 0,007            |
| Control - Método 2    | -1,5505                  | 0,0495           | (-1,7091; -1,3918) | -31,31  | 0,000            |
| Control - Método 3    | -1,3194                  | 0,0495           | (-1,4780; -1,1607) | -26,64  | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Método 1 | 3 | 96,1833 | A          |
| Método 2 | 3 | 96,1098 | A          |
| Método 3 | 3 | 95,8787 | B          |
| Control  | 3 | 94,5594 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla E.4: ANOVA para b\* por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F  | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|----------|---------|
| Factor | 3  | 26,2856           | 8,76187        | 13479,81 | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,0052            | 0,00065        |          |         |
| Total  | 11 | 26,2908           |                |          |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para b\* por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%       | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 0,0100                   | 0,0208           | (-0,057; 0,077) | 0,48    | 0,961            |
| Método 3 - Método 1   | 0,3400                   | 0,0208           | (0,273; 0,407)  | 16,33   | 0,000            |
| Control - Método 1    | 3,5200                   | 0,0208           | (3,453; 3,587)  | 169,10  | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 0,3300                   | 0,0208           | (0,263; 0,397)  | 15,85   | 0,000            |
| Control - Método 2    | 3,5100                   | 0,0208           | (3,443; 3,577)  | 168,61  | 0,000            |
| Control - Método 3    | 3,1800                   | 0,0208           | (3,113; 3,247)  | 152,76  | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Control  | 3 | 5,1200  | A          |
| Método 3 | 3 | 1,94000 | B          |
| Método 2 | 3 | 1,6100  | C          |
| Método 1 | 3 | 1,6000  | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

## ANEXO 7: ANOVA Y LSD PARA LA CAPACIDAD DE ABOSORCIÓN DE AGUA

**Tabla F.1: ANOVA para la CAA a 65°C por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 23,0692           | 7,68973        | 808,95  | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,0760            | 0,00951        |         |         |
| Total  | 11 | 23,1452           |                |         |         |

### Pruebas de Múltiple Rangos para la CAA a 65°C por tratamiento

#### Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%          | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 0,2185                   | 0,0796           | (-0,0365; 0,4735)  | 2,75    | 0,095            |
| Método 3 - Método 1   | 0,5114                   | 0,0796           | (0,2564; 0,7663)   | 6,42    | 0,001            |
| Control - Método 1    | -2,9312                  | 0,0796           | (-3,1862; -2,6762) | -36,82  | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 0,2928                   | 0,0796           | (0,0378; 0,5478)   | 3,68    | 0,026            |
| Control - Método 2    | -3,1497                  | 0,0796           | (-3,4047; -2,8947) | -39,57  | 0,000            |
| Control - Método 3    | -3,4426                  | 0,0796           | (-3,6975; -3,1876) | -43,24  | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

#### Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Método 1 | 2 | 2,4542 | A          |
| Control  | 2 | 2,4043 | A B        |
| Método 3 | 2 | 2,1953 | A B        |
| Método 2 | 2 | 2,0810 | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla F.2: ANOVA para la CAA a 75°C por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 4,94383           | 1,64794        | 254,60  | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,05178           | 0,00647        |         |         |
| Total  | 11 | 4,99561           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la CAA a 75°C por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%          | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 0,3806                   | 0,0657           | (0,1701; 0,5910)   | 5,79    | 0,002            |
| Método 3 - Método 1   | 0,0531                   | 0,0657           | (-0,1573; 0,2635)  | 0,81    | 0,849            |
| Control - Método 1    | 1,5882                   | 0,0657           | (1,3777; 1,7986)   | 24,18   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -0,3274                  | 0,0657           | (-0,5378; -0,1170) | -4,98   | 0,005            |
| Control - Método 2    | 1,2076                   | 0,0657           | (0,9972; 1,4180)   | 18,38   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 1,5350                   | 0,0657           | (1,3246; 1,7455)   | 23,37   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 3 | 9,6983 | A          |
| Método 2 | 3 | 8,4907 | B          |
| Método 3 | 3 | 8,1633 | C          |
| Método 1 | 3 | 8,1102 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla F.3: ANOVA para la CAA a 85°C por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 5,9820            | 1,9940         | 16,48   | 0,001   |
| Error  | 8  | 0,9679            | 0,1210         |         |         |
| Total  | 11 | 6,9499            |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la CAA a 85°C por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%       | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 0,428                    | 0,284            | (-0,482; 1,337) | 1,51    | 0,477            |
| Método 3 - Método 1   | 1,398                    | 0,284            | (0,488; 2,307)  | 4,92    | 0,005            |
| Control - Método 1    | 1,745                    | 0,284            | (0,835; 2,654)  | 6,14    | 0,001            |
| Método 3 - Método 2   | 0,970                    | 0,284            | (0,060; 1,880)  | 3,42    | 0,037            |
| Control - Método 2    | 1,317                    | 0,284            | (0,407; 2,227)  | 4,64    | 0,007            |
| Control - Método 3    | 0,347                    | 0,284            | (-0,563; 1,257) | 1,22    | 0,631            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 85%**

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Control  | 3 | 11,1037 | A          |
| Método 3 | 3 | 10,757  | A          |
| Método 2 | 3 | 9,787   | B          |
| Método 1 | 3 | 9,3590  | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla F.4: ANOVA para la CAA a 95°C por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 28,037            | 9,3458         | 68,90   | 0,000   |
| Error  | 8  | 1,085             | 0,1356         |         |         |
| Total  | 11 | 29,123            |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la CAA a 95°C por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%        | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -1,701                   | 0,301            | (-2,665; -0,738) | -5,66   | 0,002            |
| Método 3 - Método 1   | -0,240                   | 0,301            | (-1,203; 0,723)  | -0,80   | 0,853            |
| Control - Método 1    | 2,546                    | 0,301            | (1,583; 3,510)   | 8,47    | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 1,461                    | 0,301            | (0,498; 2,425)   | 4,86    | 0,006            |
| Control - Método 2    | 4,248                    | 0,301            | (3,285; 5,211)   | 14,13   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 2,787                    | 0,301            | (1,823; 3,750)   | 9,27    | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 85%**

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Control  | 3 | 15,488  | A          |
| Método 1 | 3 | 12,942  | B          |
| Método 3 | 3 | 12,7014 | B          |
| Método 2 | 3 | 11,240  | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

## ANEXO 8: ANOVA Y LSD PARA EL PODER DE HINCHAMIENTO

**Tabla G.1: ANOVA para el PH a 65°C por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 25,6280           | 8,54266        | 741,89  | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,0921            | 0,01151        |         |         |
| Total  | 11 | 25,7201           |                |         |         |

### Pruebas de Múltiple Rangos para el PH a 65°C por tratamiento

#### Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%          | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 0,3155                   | 0,0876           | (0,0349; 0,5962)   | 3,60    | 0,029            |
| Método 3 - Método 1   | 0,5948                   | 0,0876           | (0,3142; 0,8755)   | 6,79    | 0,001            |
| Control - Método 1    | -3,0363                  | 0,0876           | (-3,3170; -2,7557) | -34,65  | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 0,2793                   | 0,0876           | (-0,0013; 0,5600)  | 3,19    | 0,051            |
| Control - Método 2    | -3,3518                  | 0,0876           | (-3,6325; -3,0712) | -38,26  | 0,000            |
| Control - Método 3    | -3,6311                  | 0,0876           | (-3,9118; -3,3505) | -41,44  | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

#### Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Método 3 | 3 | 7,8105 | A          |
| Método 2 | 3 | 7,531  | A          |
| Método 1 | 3 | 7,2156 | B          |
| Control  | 3 | 4,1793 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla G.2: ANOVA para el PH a 75°C por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 7,64553           | 2,54851        | 406,91  | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,05010           | 0,00626        |         |         |
| Total  | 11 | 7,69564           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para el PH a 75°C por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%          | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 0,4419                   | 0,0646           | (0,2349; 0,6488)   | 6,84    | 0,001            |
| Método 3 - Método 1   | 0,0297                   | 0,0646           | (-0,1773; 0,2367)  | 0,46    | 0,966            |
| Control - Método 1    | 1,9559                   | 0,0646           | (1,7489; 2,1629)   | 30,27   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -0,4122                  | 0,0646           | (-0,6191; -0,2052) | -6,38   | 0,001            |
| Control - Método 2    | 1,5140                   | 0,0646           | (1,3071; 1,7210)   | 23,43   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 1,9262                   | 0,0646           | (1,7192; 2,1332)   | 29,81   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Control  | 3 | 10,3297 | A          |
| Método 2 | 3 | 8,8156  | B          |
| Método 3 | 3 | 8,4035  | C          |
| Método 1 | 3 | 8,3738  | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla G.3: ANOVA para el PH a 85°C por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 11,243            | 3,7477         | 26,59   | 0,000   |
| Error  | 8  | 1,127             | 0,1409         |         |         |
| Total  | 11 | 12,371            |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para el PH a 85°C por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%       | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 0,414                    | 0,307            | (-0,568; 1,396) | 1,35    | 0,560            |
| Método 3 - Método 1   | 1,430                    | 0,307            | (0,448; 2,411)  | 4,66    | 0,007            |
| Control - Método 1    | 2,500                    | 0,307            | (1,518; 3,482)  | 8,16    | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 1,015                    | 0,307            | (0,034; 1,997)  | 3,31    | 0,043            |
| Control - Método 2    | 2,086                    | 0,307            | (1,104; 3,068)  | 6,80    | 0,001            |
| Control - Método 3    | 1,070                    | 0,307            | (0,088; 2,052)  | 3,49    | 0,033            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 3 | 12,257 | A          |
| Método 3 | 3 | 11,187 | B          |
| Método 2 | 3 | 10,172 | C          |
| Método 1 | 3 | 9,7575 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla G.4: ANOVA para el PH a 95°C por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 84,039            | 28,0131        | 165,87  | 0,000   |
| Error  | 8  | 1,351             | 0,1689         |         |         |
| Total  | 11 | 85,390            |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para el PH a 95°C por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%       | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 0,414                    | 0,307            | (-0,568; 1,396) | 1,35    | 0,560            |
| Método 3 - Método 1   | 1,430                    | 0,307            | (0,448; 2,411)  | 4,66    | 0,007            |
| Control - Método 1    | 2,500                    | 0,307            | (1,518; 3,482)  | 8,16    | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 1,015                    | 0,307            | (0,034; 1,997)  | 3,31    | 0,043            |
| Control - Método 2    | 2,086                    | 0,307            | (1,104; 3,068)  | 6,80    | 0,001            |
| Control - Método 3    | 1,070                    | 0,307            | (0,088; 2,052)  | 3,49    | 0,033            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Control  | 3 | 18,861  | A          |
| Método 1 | 3 | 13,812  | B          |
| Método 3 | 3 | 13,3058 | B          |
| Método 2 | 3 | 11,835  | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

## ANEXO 9: ANOVA Y LSD PARA LA SOLUBILIDAD

**Tabla H.1: ANOVA para la solubilidad a 65°C por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 6,8599            | 2,28662        | 38,77   | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,4719            | 0,05899        |         |         |
| Total  | 11 | 7,3317            |                |         |         |

### Pruebas de Múltiple Rangos para la solubilidad a 65°C por tratamiento

#### Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%        | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 1,183                    | 0,198            | (0,548; 1,818)   | 5,96    | 0,002            |
| Método 3 - Método 1   | 0,882                    | 0,198            | (0,247; 1,517)   | 4,45    | 0,009            |
| Control - Método 1    | -0,740                   | 0,198            | (-1,376; -0,105) | -3,73   | 0,024            |
| Método 3 - Método 2   | -0,300                   | 0,198            | (-0,936; 0,335)  | -1,51   | 0,472            |
| Control - Método 2    | -1,923                   | 0,198            | (-2,558; -1,288) | -9,70   | 0,000            |
| Control - Método 3    | -1,623                   | 0,198            | (-2,258; -0,987) | -8,18   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

#### Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Método 2 | 3 | 3,623  | A          |
| Método 3 | 3 | 3,323  | A          |
| Método 1 | 3 | 2,441  | B          |
| Control  | 3 | 1,7003 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla H.2: ANOVA para la solubilidad a 75°C por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 19,7855           | 6,59516        | 68,20   | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,7737            | 0,09671        |         |         |
| Total  | 11 | 20,5592           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la solubilidad a 75°C por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%        | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 0,539                    | 0,254            | (-0,275; 1,352)  | 2,12    | 0,225            |
| Método 3 - Método 1   | -0,290                   | 0,254            | (-1,103; 0,524)  | -1,14   | 0,676            |
| Control - Método 1    | 2,968                    | 0,254            | (2,154; 3,781)   | 11,69   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -0,829                   | 0,254            | (-1,642; -0,015) | -3,26   | 0,046            |
| Control - Método 2    | 2,429                    | 0,254            | (1,616; 3,242)   | 9,57    | 0,000            |
| Control - Método 3    | 3,258                    | 0,254            | (2,444; 4,071)   | 12,83   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 3 | 6,115  | A          |
| Método 2 | 3 | 3,686  | B          |
| Método 1 | 3 | 3,1469 | B          |
| Método 3 | 3 | 2,857  | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla H.3: ANOVA para la solubilidad a 85°C por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 68,217            | 22,7389        | 167,19  | 0,000   |
| Error  | 8  | 1,088             | 0,1360         |         |         |
| Total  | 11 | 69,305            |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la solubilidad a 85°C por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%       | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,298                   | 0,301            | (-1,263; 0,666) | -0,99   | 0,759            |
| Método 3 - Método 1   | -0,243                   | 0,301            | (-1,208; 0,721) | -0,81   | 0,849            |
| Control - Método 1    | 5,320                    | 0,301            | (4,355; 6,284)  | 17,67   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 0,055                    | 0,301            | (-0,910; 1,019) | 0,18    | 0,998            |
| Control - Método 2    | 5,618                    | 0,301            | (4,653; 6,582)  | 18,66   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 5,563                    | 0,301            | (4,598; 6,527)  | 18,47   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media | Agrupación |
|----------|---|-------|------------|
| Control  | 3 | 9,406 | A          |
| Método 1 | 3 | 4,087 | B          |
| Método 3 | 3 | 3,843 | B          |
| Método 2 | 3 | 3,789 | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla H.4: ANOVA para la solubilidad a 95°C por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 361,156           | 120,385        | 708,23  | 0,000   |
| Error  | 8  | 1,360             | 0,170          |         |         |
| Total  | 11 | 362,516           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la solubilidad a 95°C por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%        | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -1,276                   | 0,337            | (-2,354; -0,197) | -3,79   | 0,022            |
| Método 3 - Método 1   | -1,762                   | 0,337            | (-2,841; -0,684) | -5,23   | 0,003            |
| Control - Método 1    | 11,569                   | 0,337            | (10,491; 12,648) | 34,37   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -0,486                   | 0,337            | (-1,565; 0,592)  | -1,45   | 0,509            |
| Control - Método 2    | 12,845                   | 0,337            | (11,767; 13,923) | 38,16   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 13,331                   | 0,337            | (12,253; 14,410) | 39,60   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 3 | 17,874 | A          |
| Método 1 | 3 | 6,305  | B          |
| Método 3 | 3 | 5,029  | C          |
| Método 2 | 3 | 4,543  | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

## ANEXO 10: ANOVA Y LSD PARA LA SINÉRESIS

**Tabla I.1: ANOVA para la sinéresis día 1 por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 447,384           | 149,128        | 1567,60 | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,761             | 0,095          |         |         |
| Total  | 11 | 448,145           |                |         |         |

### Pruebas de Múltiple Rangos para la sinéresis día 1 por tratamiento

#### Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%          | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 14,961                   | 0,252            | (14,154; 15,768)   | 59,41   | 0,000            |
| Método 3 - Método 1   | 4,580                    | 0,252            | (3,773; 5,387)     | 18,19   | 0,000            |
| Control - Método 1    | 0,022                    | 0,252            | (-0,785; 0,829)    | 0,09    | 1,000            |
| Método 3 - Método 2   | -10,381                  | 0,252            | (-11,188; -9,574)  | -41,22  | 0,000            |
| Control - Método 2    | -14,939                  | 0,252            | (-15,745; -14,132) | -59,32  | 0,000            |
| Control - Método 3    | -4,558                   | 0,252            | (-5,365; -3,751)   | -18,10  | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

#### Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Método 2 | 3 | 16,461 | A          |
| Método 3 | 3 | 6,080  | B          |
| Control  | 3 | 1,5223 | C          |
| Método 1 | 3 | 1,5001 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla I.2: ANOVA para la sinéresis día 3 por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 281,549           | 93,8498        | 236,69  | 0,000   |
| Error  | 8  | 3,172             | 0,3965         |         |         |
| Total  | 11 | 284,721           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la sinéresis día 3 por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%         | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 12,513                   | 0,514            | (10,866; 14,160)  | 24,34   | 0,000            |
| Método 3 - Método 1   | 2,144                    | 0,514            | (0,497; 3,791)    | 4,17    | 0,013            |
| Control - Método 1    | 2,495                    | 0,514            | (0,848; 4,142)    | 4,85    | 0,006            |
| Método 3 - Método 2   | -10,369                  | 0,514            | (-12,016; -8,722) | -20,17  | 0,000            |
| Control - Método 2    | -10,018                  | 0,514            | (-11,665; -8,371) | -19,48  | 0,000            |
| Control - Método 3    | 0,351                    | 0,514            | (-1,296; 1,998)   | 0,68    | 0,901            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Método 2 | 3 | 18,350 | A          |
| Control  | 3 | 8,332  | B          |
| Método 3 | 3 | 7,980  | B          |
| Método 1 | 3 | 5,837  | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla I.3: ANOVA para la sinéresis día 5 por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 374,686           | 124,895        | 146,89  | 0,000   |
| Error  | 8  | 6,802             | 0,850          |         |         |
| Total  | 11 | 381,488           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la sinéresis día 5 por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%         | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 12,101                   | 0,753            | (9,689; 14,512)   | 16,07   | 0,000            |
| Método 3 - Método 1   | 1,155                    | 0,753            | (-1,257; 3,567)   | 1,53    | 0,463            |
| Control - Método 1    | 11,318                   | 0,753            | (8,907; 13,730)   | 15,03   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -10,946                  | 0,753            | (-13,357; -8,534) | -14,54  | 0,000            |
| Control - Método 2    | -0,782                   | 0,753            | (-3,194; 1,629)   | -1,04   | 0,733            |
| Control - Método 3    | 10,163                   | 0,753            | (7,752; 12,575)   | 13,50   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Método 2 | 3 | 20,224 | A          |
| Control  | 3 | 19,442 | A          |
| Método 3 | 3 | 9,278  | B          |
| Método 1 | 3 | 8,123  | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla I.4: ANOVA para la sinéresis día 7 por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 683,900           | 227,967        | 259,77  | 0,000   |
| Error  | 8  | 7,020             | 0,878          |         |         |
| Total  | 11 | 690,920           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la sinéresis día 7 por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%         | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 12,361                   | 0,765            | (9,911; 14,811)   | 16,16   | 0,000            |
| Método 3 - Método 1   | 0,544                    | 0,765            | (-1,906; 2,994)   | 0,71    | 0,890            |
| Control - Método 1    | 17,487                   | 0,765            | (15,037; 19,937)  | 22,86   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -11,817                  | 0,765            | (-14,267; -9,367) | -15,45  | 0,000            |
| Control - Método 2    | 5,126                    | 0,765            | (2,676; 7,576)    | 6,70    | 0,001            |
| Control - Método 3    | 16,943                   | 0,765            | (14,493; 19,393)  | 22,15   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 3 | 26,414 | A          |
| Método 2 | 3 | 21,289 | B          |
| Método 3 | 3 | 9,471  | C          |
| Método 1 | 3 | 8,927  | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes*

## ANEXO 11: ANOVA Y LSD PARA CLARIDAD DE GELES

**Tabla J.1: ANOVA para claridad de geles día 0 por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 64,047            | 21,3489        | 67,77   | 0,000   |
| Error  | 8  | 2,520             | 0,3150         |         |         |
| Total  | 11 | 66,567            |                |         |         |

### Pruebas de Múltiple Rangos para claridad de geles día 0 por tratamiento

#### Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%       | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,133                   | 0,458            | (-1,601; 1,335) | -0,29   | 0,991            |
| Método 3 - Método 1   | 0,033                    | 0,458            | (-1,435; 1,501) | 0,07    | 1,000            |
| Control - Método 1    | 5,300                    | 0,458            | (3,832; 6,768)  | 11,57   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 0,167                    | 0,458            | (-1,301; 1,635) | 0,36    | 0,982            |
| Control - Método 2    | 5,433                    | 0,458            | (3,965; 6,901)  | 11,86   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 5,267                    | 0,458            | (3,799; 6,735)  | 11,49   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

#### Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 3 | 6,767  | A          |
| Método 3 | 3 | 1,5000 | B          |
| Método 1 | 3 | 1,4667 | B          |
| Método 2 | 3 | 1,3333 | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla J.2: ANOVA para claridad de geles día 1 por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 12,0867           | 4,02889        | 80,58   | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,4000            | 0,05000        |         |         |
| Total  | 11 | 12,4867           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para claridad de geles día 1 por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%       | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,167                   | 0,183            | (-0,751; 0,418) | -0,91   | 0,799            |
| Método 3 - Método 1   | 0,033                    | 0,183            | (-0,551; 0,618) | 0,18    | 0,998            |
| Control - Método 1    | 2,267                    | 0,183            | (1,682; 2,851)  | 12,42   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 0,200                    | 0,183            | (-0,385; 0,785) | 1,10    | 0,702            |
| Control - Método 2    | 2,433                    | 0,183            | (1,849; 3,018)  | 13,33   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 2,233                    | 0,183            | (1,649; 2,818)  | 12,23   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 3 | 3,600  | A          |
| Método 3 | 3 | 1,3667 | B          |
| Método 1 | 3 | 1,3333 | B          |
| Método 2 | 3 | 1,1667 | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla J.3: ANOVA para claridad de geles día 2 por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 3,5533            | 1,18444        | 88,83   | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,1067            | 0,01333        |         |         |
| Total  | 11 | 3,6600            |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para claridad de geles día 2 por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%         | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,1667                  | 0,0943           | (-0,4687; 0,1353) | -1,77   | 0,353            |
| Método 3 - Método 1   | 0,0333                   | 0,0943           | (-0,2687; 0,3353) | 0,35    | 0,984            |
| Control - Método 1    | 1,2000                   | 0,0943           | (0,8980; 1,5020)  | 12,73   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 0,2000                   | 0,0943           | (-0,1020; 0,5020) | 2,12    | 0,225            |
| Control - Método 2    | 1,3667                   | 0,0943           | (1,0647; 1,6687)  | 14,50   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 1,1667                   | 0,0943           | (0,8647; 1,4687)  | 12,37   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 3 | 2,533  | A          |
| Método 3 | 3 | 1,3667 | B          |
| Método 1 | 3 | 1,3333 | B          |
| Método 2 | 3 | 1,1667 | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla J.4: ANOVA para claridad de geles día 3 por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 2,48250           | 0,827500       | 165,50  | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,04000           | 0,005000       |         |         |
| Total  | 11 | 2,52250           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para claridad de geles día 3 por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%          | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,2000                  | 0,0577           | (-0,3849; -0,0151) | -3,46   | 0,035            |
| Método 3 - Método 1   | 0,0000                   | 0,0577           | (-0,1849; 0,1849)  | 0,00    | 1,000            |
| Control - Método 1    | 0,9667                   | 0,0577           | (0,7817; 1,1516)   | 16,74   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 0,2000                   | 0,0577           | (0,0151; 0,3849)   | 3,46    | 0,035            |
| Control - Método 2    | 1,1667                   | 0,0577           | (0,9817; 1,3516)   | 20,21   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 0,9667                   | 0,0577           | (0,7817; 1,1516)   | 16,74   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 3 | 2,3000 | A          |
| Método 3 | 3 | 1,3333 | B          |
| Método 1 | 3 | 1,3333 | B          |
| Método 2 | 3 | 1,1333 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla J.5: ANOVA para claridad de geles día 4 por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 0,67583           | 0,225278       | 67,58   | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,02667           | 0,003333       |         |         |
| Total  | 11 | 0,70250           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para claridad de geles día 4 por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%         | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,1333                  | 0,0471           | (-0,2843; 0,0177) | -2,83   | 0,085            |
| Método 3 - Método 1   | 0,0667                   | 0,0471           | (-0,0843; 0,2177) | 1,41    | 0,525            |
| Control - Método 1    | 0,5000                   | 0,0471           | (0,3490; 0,6510)  | 10,61   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 0,2000                   | 0,0471           | (0,0490; 0,3510)  | 4,24    | 0,012            |
| Control - Método 2    | 0,6333                   | 0,0471           | (0,4823; 0,7843)  | 13,44   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 0,4333                   | 0,0471           | (0,2823; 0,5843)  | 9,19    | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 3 | 1,7667 | A          |
| Método 3 | 3 | 1,3333 | B          |
| Método 1 | 3 | 1,2667 | B C        |
| Método 2 | 3 | 1,1333 | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

## ANEXO 12: ANOVA Y LSD PARA LAS PROPIEDADES TÉRMICAS

**Tabla K.1: ANOVA para la temperatura inicial por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 205,842           | 68,6140        | 2879,92 | 0,000   |
| Error  | 4  | 0,095             | 0,0238         |         |         |
| Total  | 7  | 205,937           |                |         |         |

### Pruebas de Múltiple Rangos para la temperatura inicial por tratamiento

#### Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%        | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,450                   | 0,154            | (-1,079; 0,179)  | -2,92   | 0,134            |
| Método 3 - Método 1   | -0,455                   | 0,154            | (-1,084; 0,174)  | -2,95   | 0,131            |
| Control - Método 1    | 11,405                   | 0,154            | (10,776; 12,034) | 73,89   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -0,005                   | 0,154            | (-0,634; 0,624)  | -0,03   | 1,000            |
| Control - Método 2    | 11,855                   | 0,154            | (11,226; 12,484) | 76,80   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 11,860                   | 0,154            | (11,231; 12,489) | 76,84   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

#### Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Control  | 2 | 63,6850 | A          |
| Método 1 | 2 | 52,280  | B          |
| Método 2 | 2 | 51,830  | B          |
| Método 3 | 2 | 51,825  | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla K.2: ANOVA para la temperatura pico por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 185,100           | 61,6999        | 1882,64 | 0,000   |
| Error  | 4  | 0,131             | 0,0328         |         |         |
| Total  | 7  | 185,231           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la temperatura pico por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%        | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,433                   | 0,181            | (-1,170; 0,305)  | -2,39   | 0,221            |
| Método 3 - Método 1   | 0,033                    | 0,181            | (-0,704; 0,770)  | 0,18    | 0,998            |
| Control - Método 1    | 10,967                   | 0,181            | (10,230; 11,704) | 60,58   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 0,466                    | 0,181            | (-0,272; 1,203)  | 2,57    | 0,186            |
| Control - Método 2    | 11,400                   | 0,181            | (10,663; 12,137) | 62,97   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 10,934                   | 0,181            | (10,197; 11,672) | 60,40   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 2 | 69,235 | A          |
| Método 3 | 2 | 58,301 | B          |
| Método 1 | 2 | 58,268 | B          |
| Método 2 | 2 | 57,835 | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla K.3: ANOVA para la temperatura final por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 175,524           | 58,5080        | 445,05  | 0,000   |
| Error  | 4  | 0,526             | 0,1315         |         |         |
| Total  | 7  | 176,050           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la temperatura final por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%       | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 0,255                    | 0,363            | (-1,222; 1,732) | 0,70    | 0,891            |
| Método 3 - Método 1   | 0,225                    | 0,363            | (-1,252; 1,702) | 0,62    | 0,920            |
| Control - Método 1    | 10,975                   | 0,363            | (9,498; 12,452) | 30,27   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -0,030                   | 0,363            | (-1,507; 1,447) | -0,08   | 1,000            |
| Control - Método 2    | 10,720                   | 0,363            | (9,243; 12,197) | 29,57   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 10,750                   | 0,363            | (9,273; 12,227) | 29,65   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 2 | 76,310 | A          |
| Método 2 | 2 | 65,590 | B          |
| Método 3 | 2 | 65,560 | B          |
| Método 1 | 2 | 65,335 | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla K.4: ANOVA para la entalpia especifica por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 44,646            | 14,8819        | 20,77   | 0,007   |
| Error  | 4  | 2,866             | 0,7165         |         |         |
| Total  | 7  | 47,511            |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la entalpia especifica por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%       | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -2,031                   | 0,846            | (-5,479; 1,416) | -2,40   | 0,219            |
| Método 3 - Método 1   | 0,352                    | 0,846            | (-3,096; 3,799) | 0,42    | 0,973            |
| Control - Método 1    | 4,475                    | 0,846            | (1,028; 7,923)  | 5,29    | 0,021            |
| Método 3 - Método 2   | 2,383                    | 0,846            | (-1,064; 5,831) | 2,82    | 0,148            |
| Control - Método 2    | 6,506                    | 0,846            | (3,059; 9,954)  | 7,69    | 0,005            |
| Control - Método 3    | 4,123                    | 0,846            | (0,676; 7,571)  | 4,87    | 0,028            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 2 | 11,760 | A          |
| Método 3 | 2 | 7,637  | B          |
| Método 1 | 2 | 7,285  | B          |
| Método 2 | 2 | 5,254  | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**ANEXO 13: ANOVA Y LSD PARA LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS  
(PROPIEDADES DE FORMACIÓN DE PASTA)**

**Tabla L.1: ANOVA para la VP por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 1648629           | 549543         | 181,75  | 0,000   |
| Error  | 8  | 24189             | 3024           |         |         |
| Total  | 11 | 1672818           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la VP por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%         | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-------------------|---------|------------------|
| Método 2 – Método 1   | -964,3                   | 44,9             | (-1108,1; -820,5) | -21,48  | 0,000            |
| Método 3 – Método 1   | -257,3                   | 44,9             | (-401,1; -113,5)  | -5,73   | 0,002            |
| Control – Método 1    | -667,7                   | 44,9             | (-811,5; -523,9)  | -14,87  | 0,000            |
| Método 3 – Método 2   | 707,0                    | 44,9             | (563,2; 850,8)    | 15,75   | 0,000            |
| Control – Método 2    | 296,7                    | 44,9             | (152,9; 440,5)    | 6,61    | 0,001            |
| Control – Método 3    | -410,3                   | 44,9             | (-554,1; -266,5)  | -9,14   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Método 1 | 3 | 4853,3 | A          |
| Método 3 | 3 | 4596,0 | B          |
| Control  | 3 | 4185,7 | C          |
| Método 2 | 3 | 3889,0 | D          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla L.2: ANOVA para la VM por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 6050663           | 2016888        | 258,04  | 0,000   |
| Error  | 8  | 62531             | 7816           |         |         |
| Total  | 11 | 6113194           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la VM por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%          | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -969,0                   | 72,2             | (-1200,2; -737,8)  | -13,42  | 0,000            |
| Método 3 - Método 1   | -299,7                   | 72,2             | (-530,9; -68,4)    | -4,15   | 0,014            |
| Control - Método 1    | -1848,7                  | 72,2             | (-2079,9; -1617,4) | -25,61  | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 669,3                    | 72,2             | (438,1; 900,6)     | 9,27    | 0,000            |
| Control - Método 2    | -879,7                   | 72,2             | (-1110,9; -648,4)  | -12,19  | 0,000            |
| Control - Método 3    | -1549,0                  | 72,2             | (-1780,2; -1317,8) | -21,46  | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Método 1 | 3 | 4517,3 | A          |
| Método 3 | 3 | 4217,7 | B          |
| Método 2 | 3 | 3548,3 | C          |
| Control  | 3 | 2668,7 | D          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla L.3: ANOVA para BD por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 3058737           | 1019579        | 261,15  | 0,000   |
| Error  | 8  | 31233             | 3904           |         |         |
| Total  | 11 | 3089970           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para BD por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%        | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 4,7                      | 51,0             | (-158,8; 168,1)  | 0,09    | 1,000            |
| Método 3 - Método 1   | 42,3                     | 51,0             | (-121,1; 205,8)  | 0,83    | 0,839            |
| Control - Método 1    | 1181,0                   | 51,0             | (1017,6; 1344,4) | 23,15   | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 37,7                     | 51,0             | (-125,8; 201,1)  | 0,74    | 0,879            |
| Control - Método 2    | 1176,3                   | 51,0             | (1012,9; 1339,8) | 23,06   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 1138,7                   | 51,0             | (975,2; 1302,1)  | 22,32   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Control  | 3 | 1517,0 | A          |
| Método 3 | 3 | 378,3  | B          |
| Método 2 | 3 | 340,7  | B          |
| Método 1 | 3 | 336,0  | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla L.4: ANOVA para la VF por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 1660702           | 553567         | 320,38  | 0,000   |
| Error  | 8  | 13823             | 1728           |         |         |
| Total  | 11 | 1674525           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la VF por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%         | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -576,0                   | 33,9             | (-684,7; -467,3)  | -16,97  | 0,000            |
| Método 3 - Método 1   | -386,0                   | 33,9             | (-494,7; -277,3)  | -11,37  | 0,000            |
| Control - Método 1    | -1033,7                  | 33,9             | (-1142,4; -925,0) | -30,46  | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 190,0                    | 33,9             | (81,3; 298,7)     | 5,60    | 0,002            |
| Control - Método 2    | -457,7                   | 33,9             | (-566,4; -349,0)  | -13,48  | 0,000            |
| Control - Método 3    | -647,7                   | 33,9             | (-756,4; -539,0)  | -19,08  | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Método 1 | 3 | 5396,0  | A          |
| Método 3 | 3 | 5010,0  | B          |
| Método 2 | 3 | 4820,0  | C          |
| Control  | 3 | 4362,33 | D          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla L.5: ANOVA para SB por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 1534780           | 511593         | 47,87   | 0,000   |
| Error  | 8  | 85493             | 10687          |         |         |
| Total  | 11 | 1620273           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para SB por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%        | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 393,0                    | 84,4             | (122,6; 663,4)   | 4,66    | 0,007            |
| Método 3 - Método 1   | -86,3                    | 84,4             | (-356,7; 184,0)  | -1,02   | 0,742            |
| Control - Método 1    | 815,0                    | 84,4             | (544,6; 1085,4)  | 9,66    | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | -479,3                   | 84,4             | (-749,7; -209,0) | -5,68   | 0,002            |
| Control - Método 2    | 422,0                    | 84,4             | (151,6; 692,4)   | 5,00    | 0,005            |
| Control - Método 3    | 901,3                    | 84,4             | (631,0; 1171,7)  | 10,68   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Control  | 3 | 1693,67 | A          |
| Método 2 | 3 | 1271,7  | B          |
| Método 1 | 3 | 878,7   | C          |
| Método 3 | 3 | 792,3   | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla L.6: ANOVA para tP por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 8,7211            | 2,90703        | 159,95  | 0,000   |
| Error  | 8  | 0,1454            | 0,01818        |         |         |
| Total  | 11 | 8,8665            |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para tP por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%        | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,447                   | 0,110            | (-0,799; -0,094) | -4,06   | 0,015            |
| Método 3 - Método 1   | -0,050                   | 0,110            | (-0,403; 0,303)  | -0,45   | 0,967            |
| Control - Método 1    | -2,093                   | 0,110            | (-2,446; -1,741) | -19,02  | 0,000            |
| Método 3 - Método 2   | 0,397                    | 0,110            | (0,044; 0,749)   | 3,60    | 0,029            |
| Control - Método 2    | -1,647                   | 0,110            | (-1,999; -1,294) | -14,96  | 0,000            |
| Control - Método 3    | -2,043                   | 0,110            | (-2,396; -1,691) | -18,56  | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Método 1 | 3 | 7,0233 | A          |
| Método 3 | 3 | 6,9733 | A          |
| Método 2 | 3 | 6,577  | B          |
| Control  | 3 | 4,930  | C          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**ANEXO 14: ANOVA Y LSD PARA LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS (COMPORTAMIENTO DE FLUJO)**

**Tabla M.1: ANOVA para el umbral de fluencia por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 205,842           | 68,6140        | 2879,92 | 0,000   |
| Error  | 4  | 0,095             | 0,0238         |         |         |
| Total  | 7  | 205,937           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para el umbral de fluencia por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%        | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,577                   | 0,176            | (-1,295; 0,142)  | -3,27   | 0,098            |
| Método 3 - Método 1   | 0,439                    | 0,176            | (-0,280; 1,157)  | 2,49    | 0,201            |
| Control - Método 1    | -0,528                   | 0,176            | (-1,247; 0,190)  | -2,99   | 0,125            |
| Método 3 - Método 2   | 1,015                    | 0,176            | (0,297; 1,734)   | 5,76    | 0,015            |
| Control - Método 2    | 0,049                    | 0,176            | (-0,670; 0,767)  | 0,28    | 0,992            |
| Control - Método 3    | -0,967                   | 0,176            | (-1,686; -0,248) | -5,48   | 0,018            |

*Nivel de confianza individual = 98,48%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |   |
|----------|---|--------|------------|---|
| Método 3 | 2 | 2,1319 | A          |   |
| Método 1 | 2 | 1,693  | A          | B |
| Control  | 2 | 1,1650 |            | B |
| Método 2 | 2 | 1,1164 |            | B |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla M.2: ANOVA para índice de consistencia (K) por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 0,18501           | 0,061671       | 7,39    | 0,042   |
| Error  | 4  | 0,03339           | 0,008346       |         |         |
| Total  | 7  | 0,21840           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para el índice de consistencia (K) por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%          | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -0,3732                  | 0,0914           | (-0,7453; -0,0011) | -4,08   | 0,049            |
| Método 3 - Método 1   | -0,2589                  | 0,0914           | (-0,6310; 0,1131)  | -2,83   | 0,145            |
| Control - Método 1    | -0,0500                  | 0,0914           | (-0,4221; 0,3221)  | -0,55   | 0,943            |
| Método 3 - Método 2   | 0,1142                   | 0,0914           | (-0,2579; 0,4863)  | 1,25    | 0,633            |
| Control - Método 2    | 0,3232                   | 0,0914           | (-0,0489; 0,6953)  | 3,54    | 0,077            |
| Control - Método 3    | 0,2090                   | 0,0914           | (-0,1631; 0,5811)  | 2,29    | 0,244            |

*Nivel de confianza individual = 98,48%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |   |
|----------|---|--------|------------|---|
| Método 1 | 2 | 2,4542 | A          |   |
| Control  | 2 | 2,4043 | A          | B |
| Método 3 | 2 | 2,1953 | A          | B |
| Método 2 | 2 | 2,0810 | B          |   |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla M.3: ANOVA para índice de comportamiento de flujo ( $\eta$ ) por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 0,002510          | 0,000837       | 54,51   | 0,001   |
| Error  | 4  | 0,000061          | 0,000015       |         |         |
| Total  | 7  | 0,002571          |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para el índice de comportamiento de flujo ( $\eta$ ) por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%         | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 0,03585                  | 0,00392          | (0,0199; 0,0518)  | 9,15    | 0,003            |
| Método 3 - Método 1   | 0,02394                  | 0,00392          | (0,0080; 0,0399)  | 6,11    | 0,012            |
| Control - Método 1    | 0,04793                  | 0,00392          | (0,0320; 0,0639)  | 12,24   | 0,001            |
| Método 3 - Método 2   | -0,01191                 | 0,00392          | (-0,0279; 0,0041) | -3,04   | 0,120            |
| Control - Método 2    | 0,01208                  | 0,00392          | (-0,0039; 0,0280) | 3,08    | 0,115            |
| Control - Método 3    | 0,02399                  | 0,00392          | (0,0080; 0,0399)  | 6,12    | 0,012            |

*Nivel de confianza individual = 98,48%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media    | Agrupación |   |   |
|----------|---|----------|------------|---|---|
| Control  | 2 | 0,59253  | A          |   |   |
| Método 2 | 2 | 0,58045  | A          | B |   |
| Método 3 | 2 | 0,56854  |            | B |   |
| Método 1 | 2 | 0,544598 |            |   | C |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**ANEXO 15: ANOVA Y LSD PARA LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS  
(PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS – BARRIDO DE FRECUENCIA)**

**Tabla N.1: ANOVA para k' por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 858,647           | 286,216        | 271,19  | 0,000   |
| Error  | 4  | 4,222             | 1,055          |         |         |
| Total  | 7  | 862,869           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para k' por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%        | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -18,09                   | 1,03             | (-22,28; -13,91) | -17,61  | 0,000            |
| Método 3 - Método 1   | -2,84                    | 1,03             | (-7,02; 1,34)    | -2,76   | 0,155            |
| Control - Método 1    | 10,91                    | 1,03             | (6,73; 15,09)    | 10,62   | 0,002            |
| Método 3 - Método 2   | 15,25                    | 1,03             | (11,07; 19,44)   | 14,85   | 0,000            |
| Control - Método 2    | 29,00                    | 1,03             | (24,82; 33,19)   | 28,23   | 0,000            |
| Control - Método 3    | 13,75                    | 1,03             | (9,57; 17,93)    | 13,38   | 0,001            |

*Nivel de confianza individual = 98,48%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media   | Agrupación |   |   |
|----------|---|---------|------------|---|---|
| Control  | 2 | 48,68   | A          |   |   |
| Método 1 | 2 | 37,775  | A          | B |   |
| Método 3 | 2 | 34,935  |            | B |   |
| Método 2 | 2 | 19,6821 |            |   | C |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla N.2: ANOVA para n' por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 0,000327          | 0,000109       | 2,55    | 0,194   |
| Error  | 4  | 0,000171          | 0,000043       |         |         |
| Total  | 7  | 0,000498          |                |         |         |

**Tabla N.3: ANOVA para k" por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 4,07223           | 1,35741        | 55,00   | 0,001   |
| Error  | 4  | 0,09872           | 0,02468        |         |         |
| Total  | 7  | 4,17094           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para k" por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%        | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | -1,215                   | 0,157            | (-1,855; -0,575) | -7,74   | 0,005            |
| Método 3 - Método 1   | 0,661                    | 0,157            | (0,021; 1,301)   | 4,21    | 0,045            |
| Control - Método 1    | 0,362                    | 0,157            | (-0,277; 1,002)  | 2,31    | 0,239            |
| Método 3 - Método 2   | 1,876                    | 0,157            | (1,237; 2,516)   | 11,94   | 0,001            |
| Control - Método 2    | 1,578                    | 0,157            | (0,938; 2,218)   | 10,04   | 0,002            |
| Control - Método 3    | -0,299                   | 0,157            | (-0,939; 0,341)  | -1,90   | 0,354            |

*Nivel de confianza individual = 98,48%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |   |  |
|----------|---|--------|------------|---|--|
| Método 3 | 2 | 4,8743 | A          |   |  |
| Control  | 2 | 4,576  | A          | B |  |
| Método 1 | 2 | 4,2132 | B          |   |  |
| Método 2 | 2 | 2,9979 | C          |   |  |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla N.4: ANOVA para n” por tratamiento**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 0,000954          | 0,000318       | 5,33    | 0,070   |
| Error  | 4  | 0,000239          | 0,000060       |         |         |
| Total  | 7  | 0,001192          |                |         |         |

**ANEXO 16: ANOVA Y LSD PARA LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS (ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA)**

**Tabla O.1: ANOVA para la dureza**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 89227.8           | 29742.6        | 871.56  | 0,000   |
| Error  | 4  | 136.503           | 34.1256        |         |         |
| Total  | 7  | 89364.3           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la dureza por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95% | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------|---------|------------------|
| Control - Método 1    | 240.335                  | 7,02             | 23.7811   | 12,23   | 0,001            |
| Control - Método 2    | 153.375                  | 7,02             | 23.7811   | -4,31   | 0,042            |
| Control - Método 3    | 272.65                   | 7,02             | 23.7811   | 34,27   | 0,000            |
| Método 1 - Método 2   | -86.96                   | 7,02             | 23.7811   | -16,54  | 0,000            |
| Método 1 - Método 3   | 32.315                   | 7,02             | 23.7811   | 22,05   | 0,000            |
| Método 2 - Método 3   | 119.275                  | 7,02             | 23.7811   | 38,58   | 0,000            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Control  | 2 | 598.45  | A          |
| Método 2 | 2 | 445.075 | B          |
| Método 1 | 2 | 358.115 | C          |
| Método 3 | 2 | 325.8   | D          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla O.2: ANOVA para la adhesividad**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 1140,00           | 380,00         | 19,89   | 0,007   |
| Error  | 4  | 76,42             | 19,11          |         |         |
| Total  | 7  | 1216,42           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la adhesividad por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%       | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-----------------|---------|------------------|
| Método 2 - Método 1   | 11,22                    | 4,37             | (-6,59; 29,02)  | 2,57    | 0,187            |
| Método 3 - Método 1   | 31,61                    | 4,37             | (13,81; 49,41)  | 7,23    | 0,007            |
| Control - Método 1    | 5,61                     | 4,37             | (-12,19; 23,41) | 1,28    | 0,617            |
| Método 3 - Método 2   | 20,39                    | 4,37             | (2,59; 38,20)   | 4,67    | 0,032            |
| Control - Método 2    | -5,61                    | 4,37             | (-23,41; 12,19) | -1,28   | 0,617            |
| Control - Método 3    | -26,00                   | 4,37             | (-43,81; -8,20) | -5,95   | 0,014            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media  | Agrupación |
|----------|---|--------|------------|
| Método 3 | 2 | 55,57  | A          |
| Método 2 | 2 | 35,180 | B          |
| Control  | 2 | 29,57  | B          |
| Método 1 | 2 | 23,963 | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla O.3: ANOVA para la cohesividad**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 0.0290524         | 0.00968412     | 3.47    | 0.1303  |
| Error  | 4  | 0.0111645         | 0.00279113     |         |         |
| Total  | 7  | 0.0402169         |                |         |         |

**Tabla O.4: ANOVA para la elasticidad**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 0.00132438        | 0.00044146     | 1.56    | 0.3306  |
| Error  | 4  | 0.0011325         | 0.00028313     |         |         |
| Total  | 7  | 0.00245688        |                |         |         |

**Tabla O.5: ANOVA para la gomosisidad**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 67255             | 22418.3        | 41.05   | 0.0018  |
| Error  | 4  | 2184.54           | 546.136        |         |         |
| Total  | 7  | 69439.5           |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la gomosisidad por tratamiento****Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%   | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-------------|---------|------------------|
| Control - Método 1    | 198.865                  | 108              | (-368; 509) | 0,66    | 0,907            |
| Control - Método 2    | 65.895                   | 108              | (-398; 479) | 0,37    | 0,980            |
| Control - Método 3    | 220.435                  | 108              | (-330; 548) | 1,01    | 0,752            |
| Método 1 - Método 2   | -132.97                  | 108              | (-469; 408) | -0,28   | 0,991            |
| Método 1 - Método 3   | 21.57                    | 108              | (-400; 477) | 0,35    | 0,983            |
| Método 2 - Método 3   | 154.54                   | 108              | (-370; 507) | 0,64    | 0,914            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Método 3 | 2 | 327.07  | A          |
| Método 1 | 2 | 348.64  | A          |
| Método 2 | 2 | 481.61  | B          |
| Control  | 2 | 547.505 | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*

**Tabla O.6: ANOVA para la masticabilidad**

| Fuente | Gl | Suma de Cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Valor p |
|--------|----|-------------------|----------------|---------|---------|
| Factor | 3  | 59267.7           | 19755.9        | 29.26   | 0.0035  |
| Error  | 4  | 2700.3            | 675.076        |         |         |
| Total  | 7  | 61968             |                |         |         |

**Pruebas de Múltiple Rangos para la masticabilidad por tratamiento**

**Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias**

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | EE de diferencia | IC de 95%   | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------|-------------|---------|------------------|
| Control - Método 1    | 193.69                   | 108              | (-369; 513) | 0,67    | 0,905            |
| Control - Método 2    | 69.92                    | 108              | (-404; 478) | 0,34    | 0,985            |
| Control - Método 3    | 205.585                  | 108              | (-337; 546) | 0,96    | 0,776            |
| Método 1 - Método 2   | -123.77                  | 108              | (-476; 406) | -0,33   | 0,986            |
| Método 1 - Método 3   | 11.895                   | 108              | (-409; 473) | 0,30    | 0,990            |
| Método 2 - Método 3   | 135.665                  | 108              | (-374; 509) | 0,62    | 0,920            |

*Nivel de confianza individual = 98,74%*

**Información agrupada utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%**

| Factor   | N | Media   | Agrupación |
|----------|---|---------|------------|
| Método 3 | 2 | 293.515 | A          |
| Método 1 | 2 | 305.41  | A          |
| Método 2 | 2 | 429.18  | B          |
| Control  | 2 | 499.1   | B          |

*Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.*