

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAS  
ALIMENTARIAS**



**T E S I S**

**EFEECTO DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO EN LOS PARÁMETROS  
MICROESTRUCTURALES EN CHIPS DE PAPA (*Solanum tuberosum*)  
VARIEDAD HUEVO DE INDIO**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

Presentado por la Bachiller:

**DERY EDITH LLATAS DEL CAMPO**

Asesor:

**Dr. JIMY OBLITAS CRUZ**

**CAJAMARCA – PERÚ**

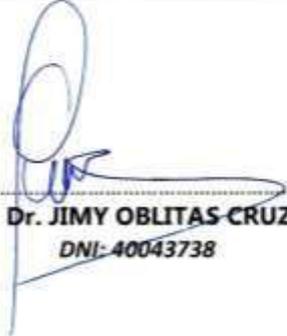
**2025**

## CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- Investigador:  
**Dery Edith Llatas Del Campo**  
DNI: N° 42232208  
Escuela Profesional/Unidad UNC:  
**INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**
- Asesor:  
**Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz.**  
  
Facultad/Unidad UNC:  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**
- Grado académico o título profesional  
 Bachiller     Título profesional     Segunda especialidad  
 Maestro     Doctor
- Tipo de Investigación:  
 Tesis     Trabajo de investigación     Trabajo de suficiencia profesional  
 Trabajo académico
- Título de Trabajo de Investigación:  
**EFFECTO DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO EN LOS PARÁMETROS MICROESTRUCTURALES EN CHIPS DE PAPA (*solanum tuberosum*) VARIEDAD HUEVO DE INDIÓ.**
- Fecha de evaluación: 03/10/2025
- Software antiplagio:  **TURNITIN**     **URKUND (ORIGINAL) (\*)**
- Porcentaje de Informe de Similitud: 14%
- Código Documento: oid: 3117:421509182
- Resultado de la Evaluación de Similitud:  
 **APROBADO**     **PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO**

Fecha Emisión: 06/10/2025

*Firma y/o Sello  
Emisor Constancia*



-----  
**Dr. JIMY OBLITAS CRUZ**  
DNI: 40043738



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"  
Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
Secretaría Académica



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

En la ciudad de Cajamarca, al primer día del mes de octubre del año dos mil veinticinco, se reunieron en el ambiente 2H - 204 de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 403-2023-FCA-UNC, de fecha 04 de setiembre del 2023**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: **"EFECTO DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO EN LOS PARÁMETROS MICROESTRUCTURALES EN CHIPS DE PAPA (*Solanum tuberosum*) VARIEDAD HUEVO DE INDIO"**, realizada por la Bachiller **DERY EDITH LLATAS DEL CAMPO** para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**.

A las diez horas y quince minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de dieciséis (16); por tanto, la Bachiller queda expedita para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**.

A las once horas y cinco minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

Dr. José Gerardo Salceda Granados  
**PRESIDENTE**

Ing. M. Sc. Fanny Lucila Rimarachin Chávez  
**SECRETARIO**

Ing. M. Sc. Jesús Hipólito De La Cruz Rojas  
**VOCAL**

Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz  
**ASESOR**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo está dedicado a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida, especialmente a mi Madre, quien me enseñó que incluso la tarea más grande se puede lograr si se hace un paso a la vez. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa universidad y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo.

De manera especial a mi Asesor de tesis, por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de investigación, sino a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente.

Asimismo, agradezco a los todos docentes que, con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona y profesional.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

I. INTRODUCCIÓN.....	1
Descripción del problema .....	1
Formulación del problema .....	1
Justificación .....	2
Importancia y posible utilidad de la investigación.....	2
Objetivos .....	2
Hipótesis .....	3
Variables .....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Antecedentes de la literatura existente.....	4
Documentos en español sobre microestructura.....	4
Documentos en Ingles sobre microestructura .....	7
Marco Teórico.....	11
Microestructura en alimentos.....	11
Relación de la microestructura y el secado de alimentos.....	22
Estructura de un alimento específico de textura modificada .....	30
Alimentos ricos en carbohidratos.....	30
Uso de Micrografías en la determinación de la microestructura de alimentos .....	33
Microscopia electrónica .....	34
Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	34
Microscopía electrónica de transmisión.....	36
Análisis de micrografías.....	39
Calidad y microestructura .....	43

III. METODOLOGÍA .....	52
Ubicación .....	52
Materiales.....	52
Tipo y diseño de investigación.....	52
Factores, Variables (Independientes), Niveles y Tratamientos en Estudio .....	53
Diseño Experimental y Arreglo de los Tratamientos.....	53
Croquis del Experimento .....	55
Tratamiento y Análisis de Datos.....	56
Implementación y caracterización microestructural de papa.....	56
Obtención de micrografías en microscopio óptico .....	56
Análisis de color .....	56
Obtención de micrografías en microscopio óptico .....	57
Presentación de la información .....	57
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	60
Extracción de características microestructurales.....	60
Efecto del Tiempo en las características microestructurales.....	65
Efecto de la temperatura en las características microestructurales .....	68
Efecto del Tiempo y temperatura sobre los parámetros microestructurales de la papa deshidratada.....	72
Efecto del Tiempo y temperatura sobre los parámetros de color .....	81
V. CONCLUSIONES .....	85
VI. RECOMENDACIONES .....	86
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87
ANEXO 1 Procesamiento de Información Científicas en la Herramienta VosViewer ...	96
ANEXO 2. ANALISIS DE VARIANZA PARA MICROESTRUCTURA .....	100

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distribución de documentos por países.....	5
<b>Figura 2.</b> Mapa de relación referido al temas de microestructura.....	6
<b>Figura 3.</b> mapa de calor de temas relacionados a microestructura.....	6
<b>Figura 4.</b> Evolución de trabajos sobre microestructura de alimentos 2000-2021 .....	7
<b>Figura 5.</b> Evolución de trabajos sobre microestructura de alimentos 2000-2021 - principales revistas.....	8
<b>Figura 6.</b> Mapa de relación referido al tema de microestructura (temas relacionados).....	9
<b>Figura 7.</b> mapa de calor de temas relacionados a microestructura.....	10
<b>Figura 8.</b> Mapa de relación referido al tema de microestructura (países).....	11
<b>Figura 9.</b> Efecto de la inmersión en solución acuosa sobre la resistencia a la fractura y la morfología microscópica de geles compuestos de goma konjac y goma xantano en diferentes proporciones .....	18
<b>Figura 10.</b> Micrografías de escaneo láser confocal de una sección (a) iridiscente y (b) no iridiscente de un músculo de cerdo curado y cocido <i>M. longissimus thoracis et lumborum</i> . Barra de escala = 100 $\mu\text{m}$ .....	20
<b>Figura 11.</b> Efecto de diferentes condiciones de secado multietapa con aire caliente sobre la microestructura muscular de la cecina.....	26
<b>Figura 12.</b> Micrografías SEM de frijoles frescos ( a ), secados al aire ( b ), secados al vacío ( c ) y liofilizados ( d ). Barra de escala: 200 $\mu\text{m}$ .....	29
<b>Figura 13.</b> Microfotografías de la mezcla sin procesar (A), pellet molido sin expandir (B) y pellet ya expandido por microondas (C).....	32
<b>Figura 14.</b> Microscopio electrónico de barrido (SEM).....	35
<b>Figura 15.</b> Microscopio electrónico de transmisión (TEM).....	37
<b>Figura 16.</b> Flujo de trabajo de procesamiento de imágenes típico de imágenes de micro-CT demostrado para el análisis de la forma y el tamaño de las células y los poros del tejido de la fruta .....	42
<b>Figura 17.</b> Tejido parenquimático en diferentes órganos de una planta. A. En un peciolo. B. En una hoja. C. en una raíz primaria. D. En un tallo secundario. E. En una raíz secundaria. Teñidos con azul de metileno. ....	45
<b>Figura 18.</b> Mapa de Ubicación .....	52
<b>Figura 19.</b> Diagrama de flujo del experimento. ....	55
<b>Figura 20.</b> Parámetros de tamaño y forma para el análisis microestructural.....	56
<b>Figura 21.</b> Flujo de trabajo y obtención de imágenes .....	60
<b>Figura 22.</b> Imágenes celulares a 50°C .....	61

<b>Figura 23.</b> Imágenes celulares a 60°C .....	62
<b>Figura 24.</b> Imágenes celulares a 70°C .....	63
<b>Figura 25.</b> Efecto del tiempo en el área celular .....	66
<b>Figura 26.</b> Efecto del tiempo en el perímetro celular.....	66
<b>Figura 27.</b> Efecto del tiempo en el eje mayor celular .....	67
<b>Figura 28.</b> Efecto del tiempo en el eje menor celular .....	67
<b>Figura 29.</b> Efecto del tiempo en la redondez celular .....	67
<b>Figura 30.</b> Efecto del tiempo en la elongación celular.....	68
<b>Figura 31.</b> Efecto del tiempo en la compactación celular.....	68
<b>Figura 32.</b> Efecto de la temperatura en el área celular .....	70
<b>Figura 33.</b> Efecto de la temperatura en el perímetro celular.....	70
<b>Figura 34.</b> Efecto de la temperatura en el eje mayor celular .....	71
<b>Figura 35.</b> Efecto de la temperatura en el eje menor celular .....	71
<b>Figura 36.</b> Efecto de la temperatura en la redondez celular .....	71
<b>Figura 37.</b> Efecto de la temperatura en la elongación celular.....	72
<b>Figura 38.</b> Efecto de la temperatura en la compactación celular .....	72
<b>Figura 39.</b> Efecto del tiempo y temperatura sobre el área celular .....	76
<b>Figura 40.</b> Efecto del tiempo y temperatura sobre el perímetro celular .....	76
<b>Figura 41.</b> Efecto del tiempo y temperatura sobre la longitud del eje mayor celular .....	77
<b>Figura 42.</b> Efecto del tiempo y temperatura sobre la longitud del eje menor celular .....	77
<b>Figura 43.</b> Efecto del tiempo y temperatura sobre la longitud del eje menor celular .....	78
<b>Figura 44.</b> Efecto del tiempo y temperatura sobre la elongación celular.....	78
<b>Figura 45.</b> Efecto del tiempo y temperatura sobre la compactación celular .....	79
<b>Figura 46.</b> Efectos combinados en parámetros de color.....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de investigaciones que relacionan microestructura con reología y textura .....	12
Tabla 2. Diferentes tipos de modificación del almidón y técnicas de preparación. ....	16
Tabla 3. Tabla de investigaciones que relacionan microestructura con procesos de secado.....	22
Tabla 4. Factores, variables, niveles y tratamientos en estudio .....	53
Tabla 5 Diseño experimental .....	53
Tabla 6. Datos promedio por tratamiento .....	64
Tabla 7. Datos de color.....	83

## RESUMEN

En la presente investigación se evaluó el efecto del proceso de deshidratación sobre la microestructura y las propiedades de color de chips de papa (*Solanum tuberosum*), variedad *Huevo de Indio*. Dada la importancia de comprender los cambios estructurales que ocurren durante el procesamiento térmico en la industria alimentaria, se abordó la influencia de dos variables críticas: la temperatura (60 °C y 70 °C) y el tiempo de deshidratación (20 y 30 minutos).

Se implementó un diseño experimental factorial para determinar el impacto de estas variables en parámetros microestructurales, tales como área celular, perímetro y redondez, así como en los valores de color en el espacio CIELab (L\*, a\*, b\*). La metodología consistió en la preparación de muestras deshidratadas, tinción con azul de toluidina, obtención de micrografías mediante microscopía óptica y análisis de imagen utilizando software MATLAB. La evaluación del color se realizó con un colorímetro Chroma Meter, y el análisis estadístico se llevó a cabo mediante ANOVA utilizando STATISTICA 7.0.

Los resultados indicaron que los parámetros microestructurales área, perímetro y redondez presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) en función de la temperatura y el tiempo de deshidratación, evidenciando un impacto directo en la integridad celular. En contraste, del análisis del color, únicamente el brillo (L\*) mostró una variación significativa ( $p < 0.05$ ), mientras que los parámetros a\* y b\* no se vieron afectados por las condiciones del proceso.

Estos hallazgos contribuyen a un mejor entendimiento de la relación entre las condiciones de deshidratación y la calidad microestructural y visual de los chips de papa, lo cual es fundamental para la optimización de procesos en la industria alimentaria.

### **Palabras clave:**

Microestructura, Deshidratación, Papa (*Solanum tuberosum*), Parámetros celulares, Análisis de imagen, Color instrumental (CIELab), Temperatura, Tiempo de proceso, Chips de papa, Ingeniería de alimentos.

## ABSTRACT

This study evaluated the effect of the dehydration process on the microstructure and color properties of potato chips (*Solanum tuberosum*), variety Huevo de Indio. Given the importance of understanding structural changes during thermal processing in the food industry, the influence of two critical variables—temperature (60 °C and 70 °C) and dehydration time (20 and 30 minutes)—was investigated.

A factorial experimental design was implemented to determine the impact of these variables on microstructural parameters such as cell area, perimeter, and roundness, as well as on color values in the CIELab space ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ). The methodology included sample preparation, toluidine blue staining, micrograph acquisition via optical microscopy, and image analysis using MATLAB software. Color evaluation was conducted with a Chroma Meter, and statistical analysis was performed using ANOVA with STATISTICA 7.0.

Results indicated that microstructural parameters—area, perimeter, and roundness—showed statistically significant differences ( $p < 0.05$ ) depending on dehydration temperature and time, demonstrating a direct impact on cellular integrity. In contrast, among the color parameters, only brightness ( $L^*$ ) exhibited significant variation ( $p < 0.05$ ), while  $a^*$  and  $b^*$  values were unaffected by the processing conditions.

These findings contribute to a better understanding of the relationship between dehydration conditions and the microstructural and visual quality of potato chips, which is essential for process optimization in the food industry.

### **Keywords:**

Microstructure, Dehydration, Potato (*Solanum tuberosum*), Cellular parameters, Image analysis, Instrumental color (CIELab), Temperature, Processing time, Potato chips, Food engineering.

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Descripción del problema.

La microestructura de los alimentos se refiere a la organización e interacción de sus componentes a escalas microscópicas, lo que determina propiedades clave como textura, color, sabor y biodisponibilidad de nutrientes. Durante el procesamiento de alimentos, como el secado, enlatado o congelación, la microestructura cambia, afectando la calidad del producto final. La comprensión de estos cambios es esencial para optimizar la calidad nutricional, sensorial y la seguridad de los productos alimenticios.

Las técnicas de microscopía y el análisis digital permiten estudiar estas estructuras a nivel detallado, lo que ayuda a correlacionar las propiedades microestructurales con las características del producto. Las propiedades fisicoquímicas, tecnológicas y nutricionales de los alimentos están influenciadas por estas relaciones entre estructura y propiedad. Por ejemplo, la estructura celular afecta la textura, la estabilidad y la calidad general de los alimentos.

En el caso de la papa deshidratada, es necesario entender cómo las condiciones de procesamiento, como el secado, afectan su microestructura. Estos cambios pueden influir en la textura, el sabor y la retención de nutrientes. Sin embargo, este tema no ha sido profundamente investigado, especialmente en el contexto de Perú, y es importante para el desarrollo de productos alimenticios de alta calidad.

El objetivo de este trabajo es investigar cómo la microestructura de la papa durante el proceso de deshidratación puede ser utilizada como una herramienta tecnológica para entender y mejorar los fenómenos que ocurren en la industria alimentaria.

## 1.2. Formulación del problema

¿Existirá efecto de la temperatura y tiempo en los parámetros microestructurales en chips de papa (*solanum tuberosum*) variedad huevo de indio?

### **1.3. Justificación**

Desde el punto de vista teórico es necesario determinar el papel de la microestructura en los cambios que se dan en los alimentos, muchos atributos de los alimentos están determinados no solo por su composición, sino también por la disposición espacial de los componentes dentro de los productos alimenticios. La microestructura de los alimentos tiene un impacto en las propiedades mecánicas, textura, sabor, propiedades de fusión, calidad, estabilidad y biodisponibilidad de los nutrientes. Por lo tanto, comprender la relación de la microestructura de los alimentos con estos diversos atributos es esencial para un diseño racional de productos alimenticios.

### **1.4. Importancia y posible utilidad de la investigación:**

En este trabajo de investigación se pretende profundizar en el conocimiento de la microestructura y del comportamiento de los tubérculos específicamente la papa, en chips de papa (*solanum tuberosum*) variedad huevo de indio, determinando el uso aplicado al proceso de deshidratación de la papa como recurso tecnológico para entender los fenómenos que se dan en la industria alimentaria para su aprovechamiento y el desarrollo de nuevas investigaciones que complementen los resultados obtenidos.

### **1.5. Objetivos**

#### **1.5.1. Objetivo general**

Determinar el efecto de la temperatura y tiempo en los parámetros microestructurales en chips de papa (*solanum tuberosum*) variedad huevo de indio.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Determinar los parámetros microestructurales de papa variedad huevo de indio por efecto de la temperatura y tiempo.
- Determinar el efecto de temperatura y tiempo en variables tecnológicas como el color.

### **1.6. Hipótesis**

#### **1.6.1. Hipótesis General**

- Existe un efecto positivo y directo de la temperatura y tiempo en los parámetros microestructurales en chips de papa (*solanum tuberosum*) variedad huevo de indio.

### **1.7. Variables**

#### **1.7.1. Independiente:**

- Temperatura
- Tiempo

#### **1.7.2. Dependientes:**

- Color Cielab. L, a y b
- Área
- Perímetro
- Diámetro
- Redondez
- Compactación
- Long. Eje mayor
- Long. eje menor

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Antecedentes de la literatura existente**

El análisis de la literatura respecto a documentos se realizó en las dos principales fuentes de información bibliográfica Scielo y Scopus, ambas para poder abordar y realizar una comparación sobre la producción científica respecto al uso del concepto de la microestructura.

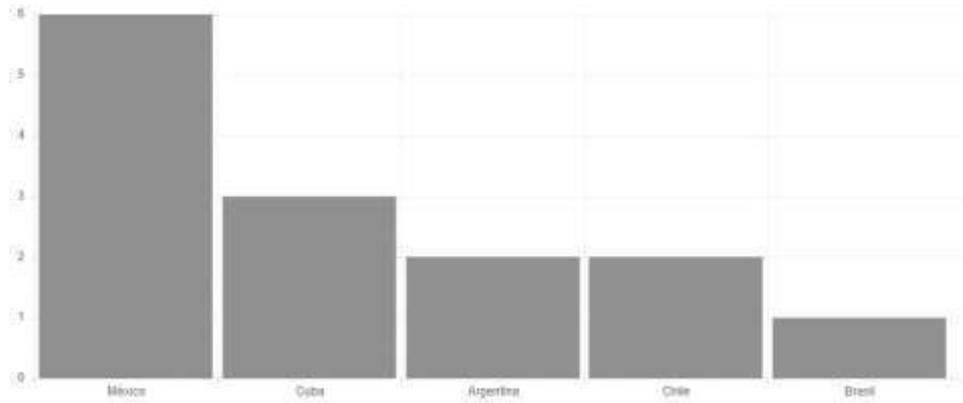
#### **2.1.1. Documentos en español sobre microestructura**

Para determinar la importancia de este concepto y el nivel de investigación se consultó a SCIELO.ORG como la página de biblioteca electrónica, esto porque este es un proyecto que cubre a Latinoamérica incluido el Caribe (Red SciELO | SciELO.org, s. f.)

En esta página se realizó una búsqueda avanzada usando los conectores AND y OR para relacionar a los conceptos de microestructura con alimentos:

“Microestructura AND fruta OR carne OR alimento OR célula OR vegetal”

La búsqueda arrojó 14 documentos en el periodo 2000 – 2021, los cuales están distribuidos de la siguiente manera.

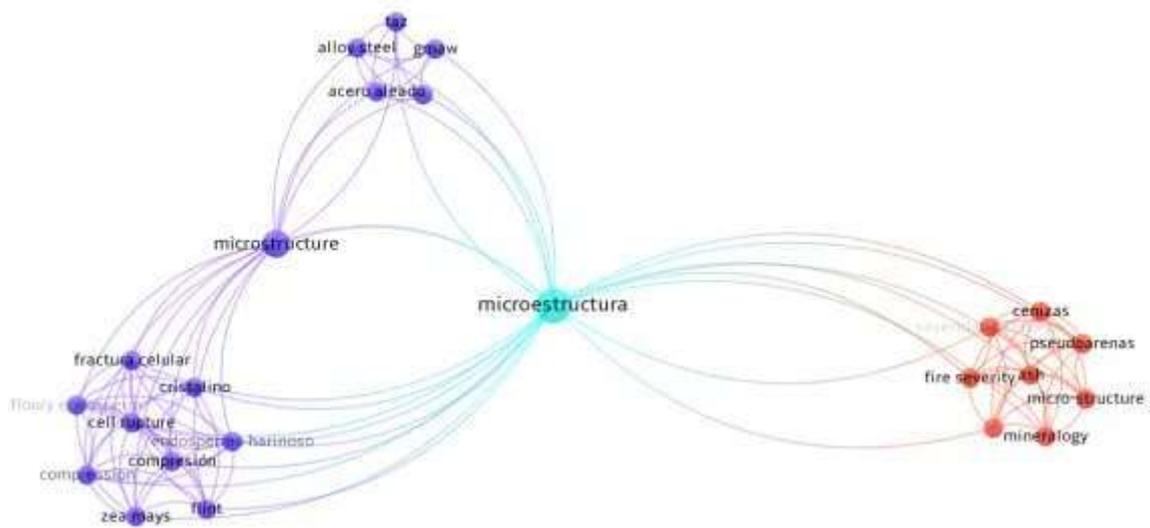


**Figura 1.** Distribución de documentos por países

**Fuente:** Red SciELO | SciELO.org. (s.f.). *Biblioteca electrónica para la región de Latinoamérica y el Caribe.*

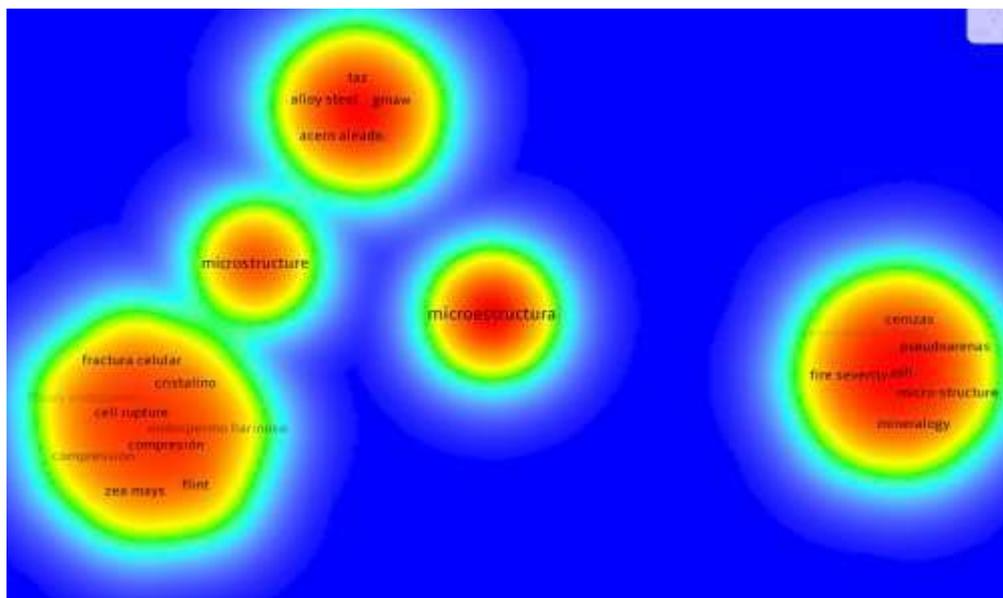
Tal como se observa en la figura 1 México es el país que más contribuye con este tema, seguidos por Cuba, Argentina, Chile y Brasil.

Los datos se analizaron usando la herramienta VOSVIEWER para encontrar relaciones de asociación de temas y de trabajos, en la figura 3 se muestra el resultado donde se observa que el tema de microestructura se relaciona con otros dos temas generales los cuales son: Estructuras celulares y observación microscópica.



**Figura 2.** Mapa de relación referido al temas de microestructura

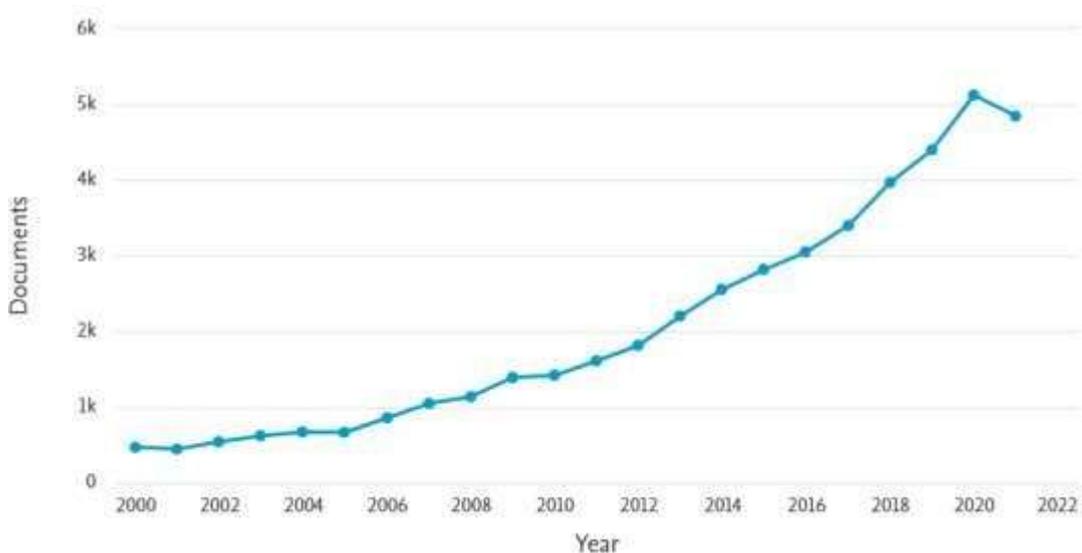
Otro grafico que nos brinda VOSVIEWER es un mapa de calor donde se observa la diferenciación por agrupaciones (cluster), esto lo observamos en la figura 4 donde se observan 5 cluster totalmente aislados uno del otro, lo cual muestra que las investigaciones en Latinoamérica y en idioma español no se han relacionado bajo ningún aspecto.



**Figura 3.** mapa de calor de temas relacionados a microestructura

### 2.1.2. Documentos en Ingles sobre microestructura

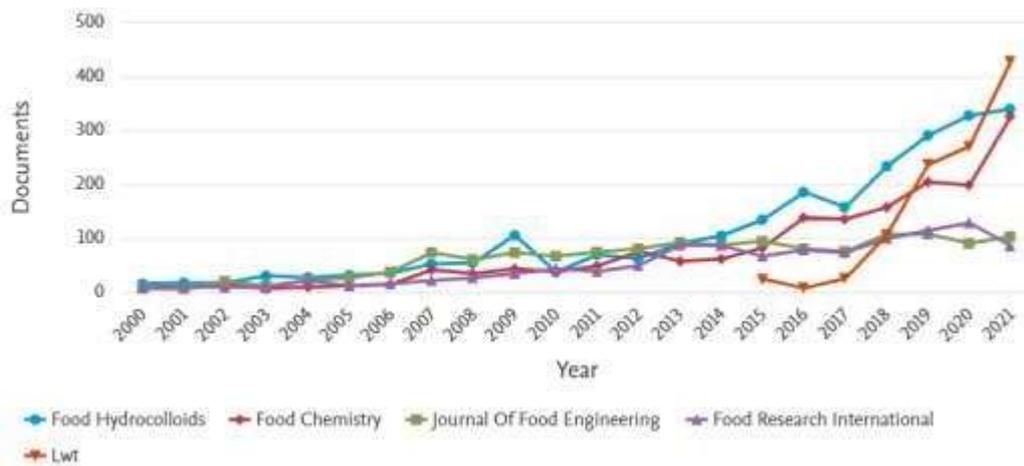
Para determinar la importancia del concepto de microestructura ligado a la ciencia y tecnología de los alimentos en idioma ingles se consultó al repositorio SCOPUS, el cual nos brindó 45082 elementos entre 2000 y 2021 que es el periodo de estudio, como se observa en la figura 5 el tema ha ido aumentando en importancia en este periodo de tiempo, lo cual muestra que más grupos de investigación han abordado el tema.



**Figura 4.** Evolución de trabajos sobre microestructura de alimentos 2000-2021

**Fuente:** Scopus. (s.f.). *Base de datos bibliográfica de literatura científica.*

El análisis nos brindó las principales fuentes donde se está publicando el tema de microestructura de alimentos y nos muestra que son revistas de alto impacto como: Food Hydrocolloids, Food Chemistry, Journal Of Food Engineering, Food Research International, Lwt. Estas revistas siguen la misma tendencia general de aumentar con respecto al tiempo, tal como se observa en la Figura 6.



**Figura 5.** Evolución de trabajos sobre microestructura de alimentos 2000-2021 - principales revistas

**Fuente:** Scopus. (s.f.). *Base de datos bibliográfica de literatura científica.*

Se analizaron los datos usando VOSVIEWER para encontrar relaciones de asociación de temas y de trabajos, en la figura 7 se muestra el resultado donde se observa que el tema de microestructura se relaciona con los temas de Reología y textura en mayor grado, además en menor proporción está relacionado a temas como propiedades fisicomecánicas, secado y actividad antioxidante, esto también se corrobora en el gráfico de calor que se muestra en la figura 8 el cual muestra que los cluster formados están muy cercanos, demostrando que el tema de microestructura tiene mucha relación con temas ligados a la ingeniería y tecnología de procesos en alimentos.







**Tabla 1.** Tabla de investigaciones que relacionan microestructura con reología y textura

<b>Título de investigación</b>	<b>Producto</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Autor</b>
Microestructura y comportamiento reológico de la mezcla de konjac glucomanano y xantano inducida por tratamiento termo alcalino	Gel	Explorar el mecanismo de formación de gel y las características del gel del sistema de sol mixto de goma konjac y goma xantana en condiciones alcalinas, y proporcionar una base teórica para el desarrollo de la goma konjac y los alimentos en gel relacionados con la goma xantana	(Li et al., 2020)
Propiedades de gelificación y microestructura de un producto similar al yogur a base de mijo que utiliza proteína de suero de leche polimerizada y goma de xantano como agentes espesantes	Lacteos	El objetivo fue investigar los efectos de PWP (0.3 a 0.5%, p / v) y XG (0 a 0.2%, p / v) sobre las propiedades de gelificación y microestructura del PAI	(Song et al., 2020)
Reología y microestructura de sistemas de goma galactomanano-xantano a diferentes valores de pH	Geles	La presente investigación tiene como objetivo determinar el efecto del pH sobre las mezclas de goma de galactomanano-xantano	(Hayta et al., 2020)
Influencia de los emulsionantes y los ingredientes lácteos en la fabricación, microestructura y propiedades físicas de la mantequilla.	Lácteos	Se investigó la influencia de los emulsionantes y los sólidos lácteos sobre el batido y los atributos físicos de la mantequilla	(Panchal et al., 2021)

<b>Título de investigación</b>	<b>Producto</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Autor</b>
Evaluación de propiedades reológicas, microestructura y la movilidad del agua en la masa de bollos enriquecida con harina de aleurona modificada por combinaciones de enzimas	Panificación	Este estudio tuvo como objetivo explorar las diferencias entre enzimas simples y enzimas combinadas para mejorar la calidad de la masa de bollos caracterizada por cambios en las propiedades reológicas, microestructura y movilidad del agua.	(M. Yang et al., 2021)
Comportamiento reológico y microestructura de emulsiones de Pickering basadas en diferentes concentraciones de nanopartículas de gliadina / caseinato de sodio	Geles	Se investigaron las propiedades de la emulsión de Pickering estabilizada por diferentes concentraciones de nanopartículas de gliadina / caseinato de sodio (Gli / CAS NP) mediante la estabilidad física, las propiedades reológicas y microestructura	(W. Xu et al., 2021)
Evoluciones de reología, microestructura e hidrólisis de almidón de pan enriquecido con calabaza durante la digestión gastrointestinal simulada	Panificación	En este estudio, las influencias de las adiciones de harina de calabaza a la panificación en la evolución de microestructura, reología se investigó la hidrólisis del almidón durante la digestión gastrointestinal simulada.	(Ge et al., 2021)

<b>Título de investigación</b>	<b>Producto</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Autor</b>
Efecto de la incorporación de harina integral de cáñamo sobre las características reológicas, microestructurales y nutricionales del chapati - pan plano indio	Panificación	se realizó con el objetivo de mejorar el valor nutritivo del chapati mediante la adición de harina integral de cáñamo y estudiar el efecto resultante sobre la calidad reológica, microestructural y nutricional del chapati.	(Sharma & Prabhasankar, 2021)
Impacto de la homogeneización a alta presión en el microestructura y propiedades reológicas de la fibra cítrica	Frutas	La distribución del tamaño de partícula, las propiedades de hidratación de los polvos, la morfología y las medidas reológicas se llevaron a cabo para estudiar la microestructura y cambios de propiedades reológicas por homogeneización a alta presión	(Su et al., 2021)

Tal como se observa la relación de la microestructura alimentaria genera un impacto en las propiedades de movilización de los fluidos como son geles, mezclas de panificación, frutas entre otros. Uno de los que más se ve en la bibliografía es el estudio de polímeros como carbohidratos, donde el almidón disfruta actualmente de una mayor atención debido a su utilidad en diferentes productos alimenticios. El almidón contribuye en gran medida a las propiedades de textura de muchos alimentos y se usa ampliamente en aplicaciones alimentarias e industriales como espesante, estabilizador coloidal, agente gelificante, agente de carga y agente de retención de agua. (Choi & Kerr, 2003). Los almidones de grado alimenticio se modifican químicamente principalmente para aumentar la consistencia, suavidad y

claridad de la pasta, y para impartir estabilidad de congelación-descongelación y almacenamiento en frío, en la tabla 2 se muestran algunos fenómenos en este tipo de producto.

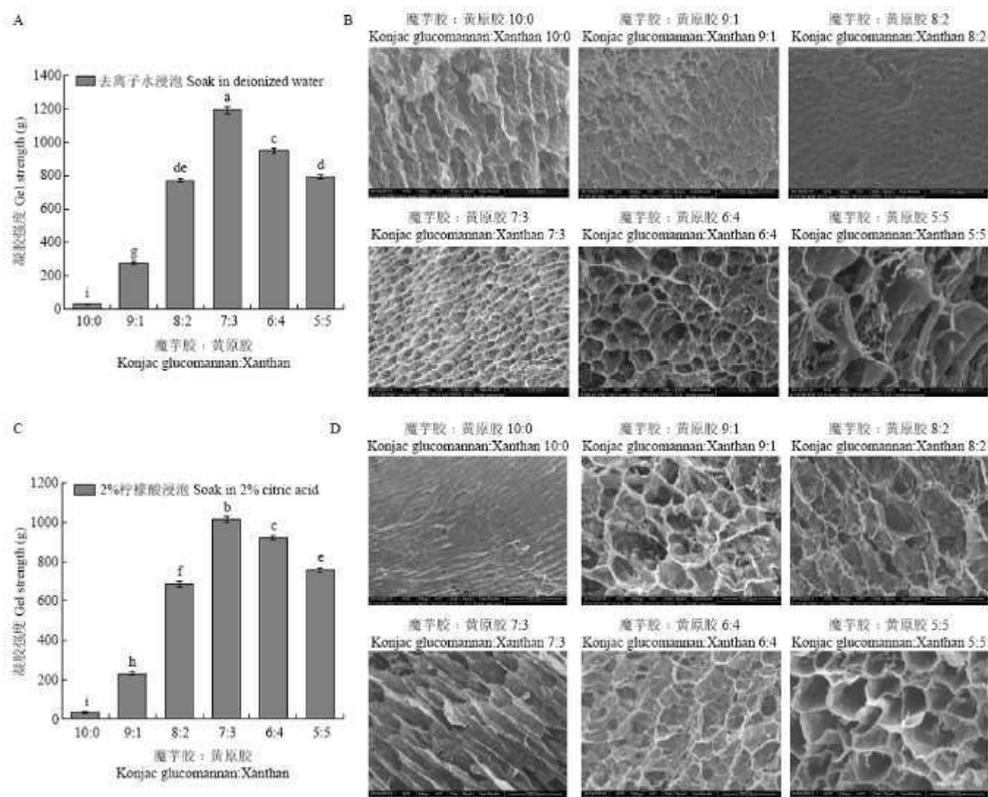
La modificación del almidón implica fenómenos físicos, químicos y bioquímicos en la superficie de las fases en contacto. La microscopía (luz y SEM) ha jugado un papel importante en aumentar la comprensión de la estructura granular de los almidones modificados. Se ha utilizado para detectar cambios estructurales provocados por modificaciones químicas y las regiones más sustituidas en los gránulos de almidón.

**Tabla 2.** Diferentes tipos de modificación del almidón y técnicas de preparación.

Modificación	Tipos	Preparación
Físico	Tratamiento de calor / humedad	Tratamiento de calor y humedad: calentar el almidón a una temperatura superior a su punto de gelatinización con humedad insuficiente para provocar la gelatinización.
	Recocido	Recocido: calentar una suspensión de almidón granular a una temperatura por debajo de su punto de gelatinización durante períodos prolongados.
	Pregelatinización	Pregeles / almidones instantáneos / hinchables en agua fría preparados mediante secado en tambor / cocción por aspersión / extrusión / procesamiento a base de solventes
Conversión	Hidrólisis ácida parcial	Tratamiento con ácido clorhídrico o ácido ortofosfórico o ácido sulfúrico
	Hidrólisis enzimática parcial	Tratamiento en una solución acuosa a una temperatura por debajo del punto de gelatinización con una o más enzimas amilolíticas de grado alimenticio
	Tratamiento alcalino	Tratamiento con hidróxido de sodio o hidróxido de potasio.
	Oxidación / blanqueo	Tratamiento con ácido peracético y / o peróxido de hidrógeno, o hipoclorito de sodio o clorito de sodio, o dióxido de azufre, o permanganato de potasio o persulfato de amonio.
Derivatización	Piroconversión (dextrinización)	Pirodextrinas: preparadas tostando en seco almidón acidificado
	Eterificación	Almidón de hidroxipropilo: esterificación con óxido de propileno
	Esterificación	Acetato de almidón: esterificación con anhídrido acético o acetato de vinilo
	Reticulación	Adipato de dialmidón acetilado: esterificación con anhídrido acético y anhídrido adípico
		Otenilsuccinato sódico de almidón: esterificación por anhídrido octenilsuccínico
		Fosfato de monoalmidón: esterificación con ácido ortofosfórico, ortofosfato de sodio o potasio o tripolifosfato de sodio.
	Modificación dual	Fosfato de distarch: esterificación con trimetafosfato de sodio u oxiclورو de fósforo
Fosfato de dialmidón fosfatado: combinación de tratamientos para el fosfato de monoalmidón y el fosfato de distarch		
Fosfato de dialmidón acetilado: esterificación por trimetafosfato de sodio u oxiclورو de fósforo combinada con esterificación por anhídrido acético o acetato de vinilo		
	Fosfato de dialmidón de hidroxipropilo: esterificación por trimetafosfato de sodio u oxiclورو de fósforo combinado con eterificación por óxido de propileno.	

Fuente: (Singh et al., 2007)

Un caso donde se observa la microestructura es donde se usa como espesante de geles las gomas de Konjac y Xantana y se la relaciona a diferentes propiedades externas físicas, la goma de konjac es una fibra dietética soluble en agua con excelentes propiedades, el propósito de ajustar las propiedades físicas del sistema de gel macroscópico se puede lograr ajustando la formación y construcción de la red de gel de polisacáridos mixtos (Li et al., 2020). Tal como se observa en la Figura 12 la morfología microscópica del gel está estrechamente relacionada con su resistencia. Se puede ver que los geles compuestos de diferentes proporciones han formado una estructura de red. La conclusión de este trabajo fue que cuando el sistema de mezcla de goma konjac y goma xantana se calienta a 90 ° C, se forma una red de gel térmicamente irreversible.



A, B: la fuerza del gel y la morfología microscópica del gel de los geles compuestos con diferentes proporciones de goma konjac y goma xantana después de remojar en agua

desionizada; los geles compuestos C, D con diferentes goma xantana de y gel empapado en ácido cítrico al 2.0% fuerza y morfología microscópica de gel

**Figura 9.** Efecto de la inmersión en solución acuosa sobre la resistencia a la fractura y la morfología microscópica de geles compuestos de goma konjac y goma xantano en diferentes proporciones

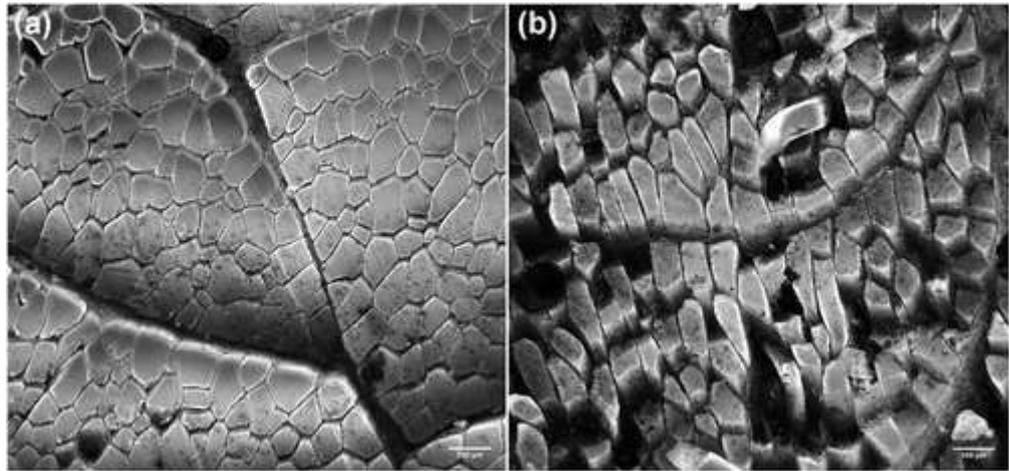
**Fuente.** (Li et al., 2020)

El ambiente de alto contenido de agua es una situación ideal para el pegado y gelatinización del almidón, en el que los gránulos de almidón se hinchan y pierden cristalinidad a través de la absorción de agua. El efecto general es un suavizante y la creación de un gel cuando se enfría. La solubilización de pectina también se favorece en dichos entornos acuosos a temperaturas elevadas. Además, la solubilización de la pectina también se ve influenciada por el pH y los minerales disueltos en el agua de cocción, por lo que los cationes divalentes (por ejemplo,  $\text{Ca}^{2+}$ ) se reticularán, ayudando a la retención de pectina y dando lugar a materiales más firmes después de la cocción. Por el contrario, la adición de bicarbonato ablandará las verduras durante la cocción (Chen & Rosenthal, 2015). La presión de turgencia de las células vegetales requiere membranas celulares intactas y que funcionen biológicamente. La aplicación de calor y la subsiguiente desnaturalización de las proteínas da como resultado la inactivación de las enzimas unidas que controlan el equilibrio de agua y sal. La turgencia ya no se establece y los tejidos se ablandan irremediamente.

Cualquiera que sea el mecanismo de pérdida de textura, se han estudiado las tasas de ablandamiento de las verduras durante la cocción húmeda. Se cree que el ablandamiento de las verduras durante la cocción es una reacción de primer orden, aunque durante largos períodos de cocción, este modelo no encaja tan bien. (Chen & Rosenthal, 2015) identificaron diferentes

mecanismos y especularon que uno se debe a cambios en la pectina en la lamelar media.

Otro caso es en productos cárnicos donde se investigaron los factores microestructurales asociados con la iridiscencia de la superficie en productos de cerdo curados y cocidos. La iridiscencia de la carne es un fenómeno físico comúnmente observado en la carne cruda y los productos cárnicos que consisten en tejido muscular intacto. Dado que la decisión de compra de los consumidores se basa principalmente en la primera impresión del color y la apariencia de la carne, es posible que se rechacen los productos que muestren una iridiscencia colorida. Cuatro músculos diferentes (RF : M. rectus femoris , BF: M. biceps femoris , ST: M. semitendinosus y LD: M. longissimus thoracis et lumborum) se inyectaron con salmuera, se cocinaron, se cortaron en rodajas y se evaluó la iridiscencia mediante análisis de imágenes digitales (figura 13) y análisis sensorial. Los resultados del estudio indican que la longitud del sarcómero y los diámetros de las fibras pueden ser, por tanto, de menor importancia para la explicación de la iridiscencia de la carne en los productos cárnicos cocidos y están más bien relacionados con múltiples efectos de dispersión y absorción en entidades estructurales más pequeñas como la red de miofilamento o entidades más grandes como haces de fibras. (Ruedt et al., 2021).



**Figura 10.** Micrografías de escaneo láser confocal de una sección (a) iridiscente y (b) no iridiscente de un músculo de cerdo curado y cocido *M. longissimus thoracis et lumborum*. Barra de escala = 100  $\mu\text{m}$

**Fuente:** (Ruedt et al., 2021)

A diferencia de las frutas y verduras, la carne se deriva de un organismo vivo, aunque normalmente el animal ha estado muerto durante un tiempo; esto da como resultado cambios bioquímicos en las proteínas del músculo a través de la glucólisis post mortem, lo que da como resultado una disminución del pH y la consiguiente precipitación. La carne se deriva predominantemente de los músculos y la estructura fibrosa persiste. Además de las proteínas contráctiles, el tejido conectivo, en particular el colágeno, tiene un impacto profundo en la textura. La estructura y los alimentos de carne han sido revisados por (Schreuders et al., 2021); describen algunos de los factores que contribuyen a la estructura y la textura, además de discutir formas de modificarlos. Estos incluyen el tratamiento enzimático con proteasas, marinado, cocción prerigor y curado.

Generalmente, la estructura de los alimentos frescos se debe a la organización biológica de los tejidos en las materias primas, por lo que las frutas y verduras tienden a depender de elementos como la pectina que

cementa las células, la presión de turgencia y tejidos botánicos como el esclerénquima.

Del mismo modo, la carne se deriva del músculo y su textura depende de las cantidades de las diferentes proteínas presentes en el músculo, las condiciones de sacrificio y los cambios post mortem. En contraste con estas observaciones, la estructura de los alimentos manufacturados depende mucho más de la composición química y la interacción entre los ingredientes y componentes durante el procesamiento.

Se puede agregar la dimensión de solidez y apertura de estructura, que nos ayuda a separar los productos. Por ejemplo, en el área de confitería, podemos fabricar caramelos duros (caramelos duros) o algodón de azúcar (hilo de azúcar). Desde la perspectiva de microestructura son diferentes, pero desde la perspectiva de composición ambos productos tienen contenidos similares de agua y grasa, pero son muy diferentes en términos de apertura de estructura.

No existe una base uniforme para la estructura de las verduras y frutas; por ejemplo, la piña debe su textura a haces de fibras que fallan a lo largo de planos paralelos a los haces cuando se comprimen; en contraste, la sandía colapsa en sobre sí mismo cuando se comprime. La preparación de alimentos domésticos de frutas y verduras a menudo comienza con operaciones de limpieza y pelado para eliminar la suciedad de la superficie, los defectos de la superficie y las pieles y capas externas menos atractivas. Tales operaciones conducirán a un grado de ablandamiento mediante la eliminación de las capas externas no comestibles. La posterior reducción de tamaño mediante el corte influye en el tamaño de la mordida para consumo

posterior, pero lo que es más importante, limita la distancia mínima desde la superficie al centro y aumenta la relación entre el área de la superficie y la masa; estos factores son importantes si se va a aplicar calor, ya que afectan las tasas de penetración, así como la lixiviación de material vegetal soluble.

### 2.2.2. Relación de la microestructura y el secado de alimentos

La estructura de los alimentos modificados depende en gran medida de los ingredientes que los componen y de los procesos que intervienen en su elaboración. Identificamos dos parámetros clave en la percepción de la estructura, siendo la humedad-sequedad y el grado de apertura / porosidad. Por supuesto, la humedad no es solo una medida del contenido de agua, ya que muchos alimentos se humedecen por la presencia de grasas y aceites. En consecuencia, nos propusimos intentar trazar un mapa de la variedad de la estructura de los alimentos, expresada en términos de agua y contenido de grasa como medidas de humedad-sequedad. La tabla 3 muestra algunas investigaciones donde relacionan el secado con la microestructura de los alimentos:

**Tabla 3.** Tabla de investigaciones que relacionan microestructura con procesos de secado

<b>Título de investigación</b>	<b>Producto</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Autor</b>
Efectos del tratamiento ultrasónico al vacío sobre la textura de los panes de carne vegetarianos elaborados	Carne	Para mejorar la calidad de los panes de carne vegetarianos (MV) elaborados con proteína de trigo texturizada, se compararon los efectos de	(Z.-H. Yang et al., 2021)

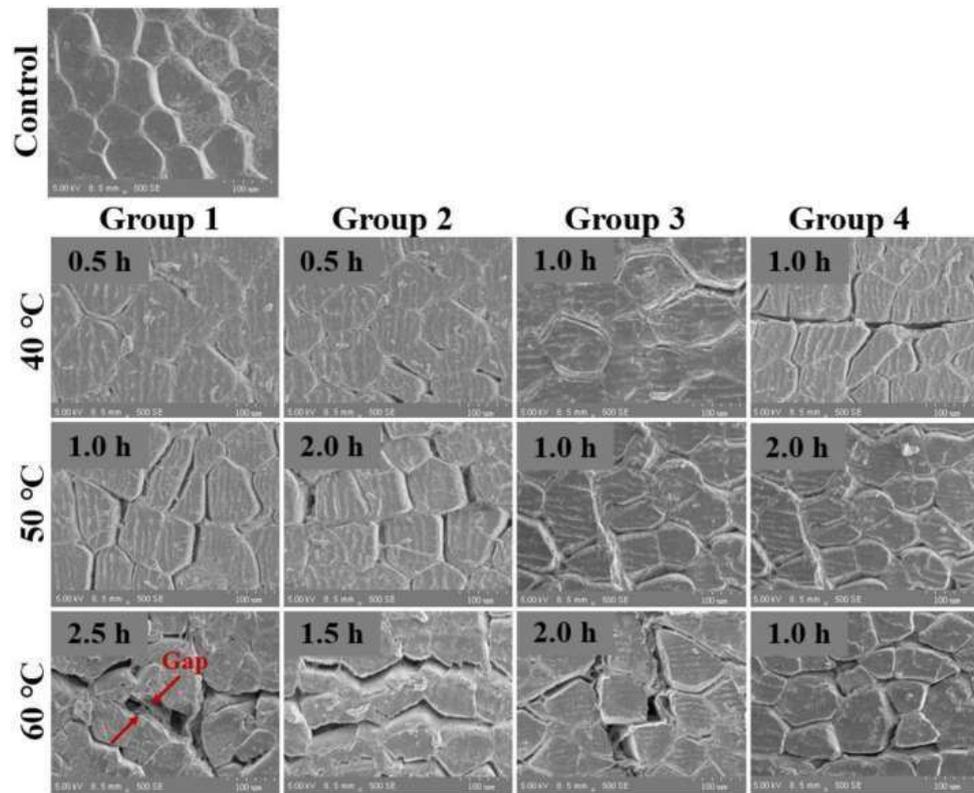
con proteína de trigo texturizada		diferentes tratamientos (vacío, ultrasonido y ultrasonido al vacío) en términos de textura, distribución de humedad, microestructurae interacciones de enlaces químicos	
Dinámica de la transferencia de calor y la humedad en la carne seca durante el aire caliente el secado	Cecina	El objetivo de este estudio fue investigar la temperatura de la superficie, la migración de humedad, la contracción muscular y microestructura de cecina de res durante varias etapas de aire caliente el secado.	(Shi et al., 2021)
Partición de aceite en rodajas de patata pretratadas durante la fritura y el enfriamiento	Papa	El objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto de algunos pretratamientos y temperaturas del aceite en la cinética de absorción y distribución del aceite en la estructura de las patatas fritas no solo durante el proceso de fritura sino también durante el enfriamiento posterior.	(Durán et al., 2007)
Microencapsulación multicapa de aceite de semilla de chía mediante secado por atomización utilizando tecnología de deposición electrostática	Chia	Se llevó a cabo un proceso de microencapsulación multicapa para proteger y entregar el aceite de chía, que presenta un alto valor nutricional pero también una alta susceptibilidad a la oxidación de lípidos.	(Copado et al., 2021)

<b>Título de investigación</b>	<b>Producto</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Autor</b>
Características de secado de espuma y esterilla de espuma de la pulpa de plátano maduro [ Musa balbisiana (BB)]	Platano	Se investigaron las características de secado de la esterilla de espuma de la pulpa de banano maduro silvestre [ Musa balbisiana (BB)] sobre los atributos del producto. Se estudiaron los efectos de la concentración de pulpa (PC), la leche desnatada en polvo (SMP) y el tiempo de batido (WT) sobre las características de formación de espuma, como la densidad de la espuma, el volumen de drenaje y la expansión de la espuma	(Watharkar et al., 2021)
Micro-tomografía computarizada in situ para estudiar la microestructura y el frente de sublimación durante la liofilización	Diversos	En este estudio, se presenta un nuevo método para examinar el proceso de liofilización de soluciones congeladas in situ. Mediante el uso de una etapa de liofilización recientemente desarrollada para tomografía de rayos X microcomputada de alta resolución, el proceso de liofilización se puede investigar con más detalle.	(Gruber et al., 2021)

<b>Título de investigación</b>	<b>Producto</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Autor</b>
El impacto del secado y la rehidratación en las propiedades estructurales y los atributos de calidad de los frijoles secos precocidos	Frijoles	Este estudio investigó la interacción entre el proceso de secado (aire, vacío y liofilización), la microestructura y los atributos funcionales de los frijoles precocidos rehidratados. El estudio microscópico reveló que las tres técnicas de secado diferentes dieron como resultado microestructuras claramente diferentes, con el proceso de liofilización dando como resultado materiales altamente porosos, mientras que las muestras secadas al aire y al vacío sufrieron contracción.	(Aravindakshan et al., 2021)

Una de las investigaciones mas resaltantes es la de carne de Cecina (Shi et al., 2021), donde el objetivo de este estudio fue investigar la temperatura de la superficie, la migración de humedad, la contracción muscular y la microestructura de la carne seca durante el secado en múltiples etapas con aire caliente. Las temperaturas se incrementaron secuencialmente de 40 a 50 a 60 ° C, y los tiempos correspondientes fueron 0.5 h - 1 h - 2.5 h, 0.5 h - 2 h - 1.5 h, 1 h - 1 h - 2 h y 1 h - 2 h - 1 h en 4 grupos. Con el aumento de la temperatura, el contenido de humedad y la difusividad de la muestra disminuyeron, la temperatura de la superficie, la migración de la humedad, la contracción muscular y los espacios (espaciamiento) entre las fibras

musculares aumentaron. Esto se evidencia en la figura 14 donde se muestra las micrografías de esta investigación.



**Figura 11.** Efecto de diferentes condiciones de secado multietapa con aire caliente sobre la microestructura muscular de la cecina

**Fuente:** (Shi et al., 2021).

La microestructura de la carne seca se vio significativamente afectada por la temperatura de secado. Después de que la temperatura de secado se aumentó de 40 ° C a 50 ° C, los haces de fibras musculares se dispersaron gradualmente. El diámetro de los haces de fibras musculares disminuyó. Además, aumentó la brecha entre los haces de fibras musculares. Después de secar a 60 ° C, el diámetro de los haces de fibras musculares fue el más pequeño. La brecha entre los haces de fibras musculares fue la más grande.

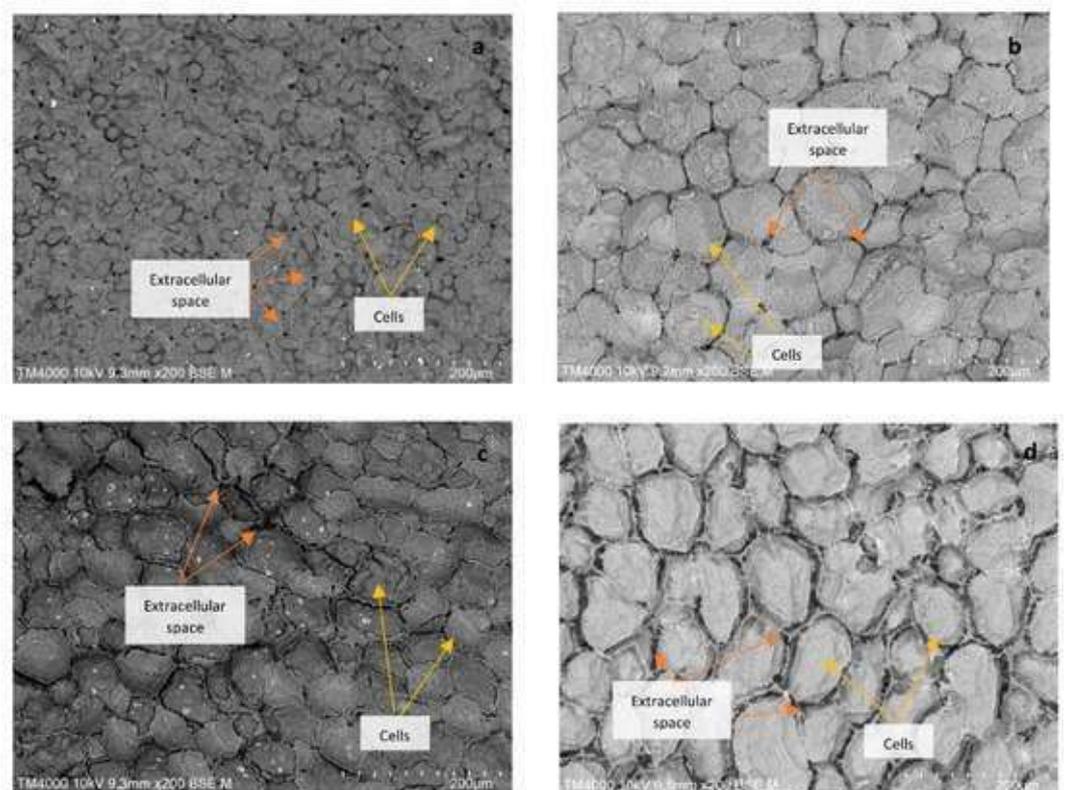
La microestructura de la carne seca a la misma temperatura de secado se vio significativamente afectada por el tiempo de secado. Durante el secado a 40 ° C, el espacio entre los haces de fibras musculares de la cecina que se secó durante 1 h fue mayor que los de las muestras que se secaron durante 0,5 h. Durante el secado a 50 ° C, los efectos del tiempo de secado sobre la microestructura de las muestras no fueron fácilmente observables. Después de secar a 60 ° C, las microestructuras de las muestras que se secaron durante 2 y 2,5 h difirieron sustancialmente de las de las muestras que se secaron durante 1 y 1,5 h. Se observó una disposición irregular y un diámetro desigual de los haces de fibras musculares, junto con el mayor espacio entre los haces de fibras musculares. Los cambios microestructurales de la muestra de cecina que se secaron en los procesos del grupo 2 y del grupo 4 fueron más uniformes.

Los cambios en la microestructura de la carne seca se relacionaron con la desnaturalización de la proteína miofibrilar y la migración de humedad. Durante el secado, el calentamiento provocó la degeneración de la miosina. La degeneración de la miosina resultó en una disminución en la capacidad de unión de la red de proteínas miofibrilares a la humedad

Otra investigación interesante en el efecto del secado en la microestructura es la del efecto en los frijoles (Aravindakshan et al., 2021) donde a través del estudio microscópico se reveló que las tres técnicas de secado diferentes dieron como resultado microestructuras claramente diferentes, con el proceso de liofilización dando como resultado materiales altamente porosos, mientras que las muestras secadas al aire y al vacío sufrieron contracción. Además, el comportamiento de rehidratación (modelado

mediante modelos empíricos y de difusión) demuestra que la alta tasa de rehidratación de los frijoles liofilizados se debe a la capilaridad, mientras que la rehidratación, en el caso de los frijoles secados al aire y al vacío, se controla principalmente por difusión. Independientemente de la técnica de secado, la alta capacidad de rehidratación soporta poco o ningún colapso estructural o daño a las paredes celulares. El color y la textura de los frijoles rehidratados no difirieron mucho de los de los frijoles recién cocidos. El área de pico total de los volátiles de los frijoles rehidratados se redujo significativamente mediante el proceso de secado, pero se retuvieron los volátiles característicos del aroma del frijol cocido. Esta nueva comprensión es beneficiosa para adaptar las propiedades funcionales de los frijoles secos y convenientes precocinados que requieren tiempos de preparación cortos. El color y la textura de los frijoles rehidratados no difirieron mucho de los de los frijoles recién cocidos. El área de pico total de los volátiles de los frijoles rehidratados se redujo significativamente mediante el proceso de secado, pero se retuvieron los volátiles característicos del aroma del frijol cocido. Esta nueva comprensión es beneficiosa para adaptar las propiedades funcionales de los frijoles secos y convenientes precocinados que requieren tiempos de preparación cortos. El color y la textura de los frijoles rehidratados no difirieron mucho de los de los frijoles recién cocidos. El área de pico total de los volátiles de los frijoles rehidratados se redujo significativamente mediante el proceso de secado, pero se retuvieron los volátiles característicos del aroma del frijol cocido. Esta nueva comprensión es beneficiosa para adaptar las propiedades funcionales de los frijoles secos y convenientes precocinados que requieren tiempos de preparación cortos.

La figura 15 muestra las micrografías de la estructura de esta investigación, donde se ve claramente las diferencias. El daño a la estructura celular causado por la presión del agua vaporizada dentro de la célula durante el secado o por los cristales de hielo formados durante la congelación condujo a la presencia de sólidos lixiviados en los espacios extracelulares. Este estudio concluye que no solo el tipo de proceso de secado influye en las características de rehidratación de los frijoles secos, sino también en muchos otros parámetros, como la temperatura de rehidratación, la naturaleza de los poros y el estado de los componentes que absorben agua. El daño limitado a la pared celular y el almidón gelatinizado durante el secado fue fuertemente responsable de la alta capacidad de rehidratación independientemente de la técnica de secado



**Figura 12.** Micrografías SEM de frijoles frescos ( a ), secados al aire ( b ), secados al vacío ( c ) y liofilizados ( d ). Barra de escala: 200 μm.

**Fuente:** (Aravindakshan et al., 2021).

### **2.2.3. Estructura de un alimento específico de textura modificada**

Las propiedades de textura varían mucho de un tipo de alimento a otro, al igual que los intereses de textura de los consumidores. Por ejemplo, nuestra preocupación por la textura de una bebida se basa más en su comportamiento de flujo, pero para un producto sólido como una galleta, la forma en que se fractura se convierte en una preocupación principal. Por lo tanto, es necesario identificar las propiedades de textura clave a nivel de categoría de acuerdo con las diferentes formas físicas de los alimentos: sólido, sólido blando y fluido. Un alimento sólido normalmente se refiere a aquellos que tienen características y formas geométricas específicas. Este tipo de alimento solo puede soportar una pequeña deformación por deformación antes de sufrir una fractura catastrófica. Un alimento fluido significa que el material tiene poca resistencia contra una tensión, por pequeña que sea, y no puede resistir la gravedad. Una característica principal de los alimentos fluidos es que no tienen forma geométrica, sino que toman la forma de cualquier recipiente en el que se encuentren.

### **2.2.4. Alimentos ricos en carbohidratos**

Las técnicas de soplado implican la expansión o liberación de gas dentro de un material para crear una estructura. Se han utilizado varias técnicas, como la cocción por extrusión, en la que el agua presente en los ingredientes se calienta a presión y, cuando se libera a través de la boquilla, se evapora en forma de vapor, logrando una gran expansión del material y un enfriamiento rápido.

El efecto general de los cereales ricos en almidón es la creación de una matriz vítrea, porosa y muy expandida. Dichos alimentos incluyen algunos productos de refrigerio expandidos, algunos cereales para el desayuno y algunas galletas saladas (Chen & Rosenthal, 2015).

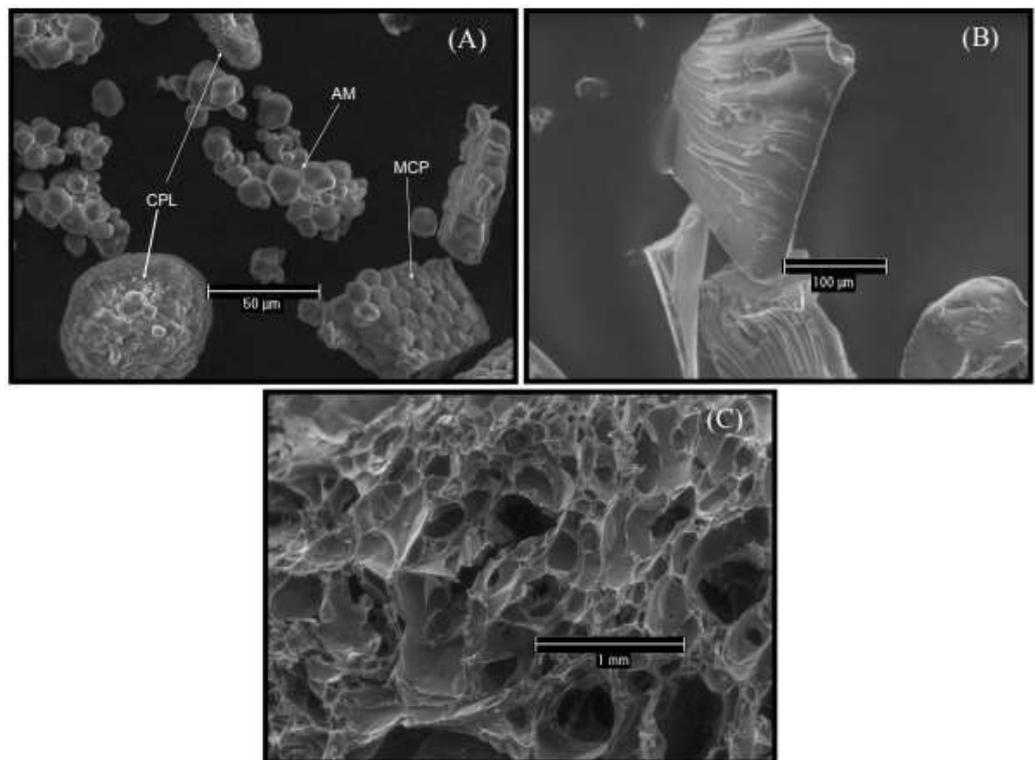
La estructura celular abierta y porosa de los productos, que a menudo consta de materiales vítreos de paredes delgadas, da lugar a materiales quebradizos y quebradizos cuando se comprimen.

El inflado de explosión de vapor se utiliza para algunas frutas, como las manzanas, para producir frutos secos expandidos. La materia prima se calienta a presión con vapor y luego la presión se libera repentinamente. Se utiliza un enfoque similar para crear tortas de arroz; sin embargo, la etapa de expansión se lleva a cabo en un molde confinado para crear las formas características, pero logrando la estructura celular expandida.

Las técnicas de horneado tradicionales tienen generalmente una estructura menos abierta, debido a la naturaleza menos explosiva del paso de expansión. Sin embargo, la fermentación de la levadura o la generación de dióxido de carbono a partir de un agente leudante seguida de un fraguado inducido térmicamente, ya sea desde el enfriamiento del almidón gelatinizado o derretido hasta el estado gomoso o incluso vítreo, logra diversos grados de expansión: la interacción de otros ingredientes juega un papel clave en el grado de expansión, y las formulaciones modificadas pueden hacer que los productos tengan menos éxito.

Una investigación realizada por (Limón-Valenzuela et al., 2017) tuvo como el objetivo estudiar el proceso de extrusión en la elaboración de un alimento botana de tercera generación (pellets), a partir de mezclas de maíz de calidad

proteínica (MCP), almidón de maíz (AM) y concentrado proteínico de leche (CPL) a diferentes contenidos de humedad (CH) de las mezclas sobre características microestructurales y de formación de pasta, donde encontraron que los valores de los parámetros de viscosidad disminuyeron con el incremento del contenido de CPL y se incrementaron al incrementar el CH, además el incremento en el contenido de CPL (0 a 10%) causaron una disminución en la cristalinidad del producto, las micrografías de esta investigación se muestran en la Figura 16.



**Figura 13.** Microfotografías de la mezcla sin procesar (A), pellet molido sin expandir (B) y pellet ya expandido por microondas (C).

**Fuente:** (Limón-Valenzuela et al., 2017)

### **2.2.5. Uso de Micrografías en la determinación de la microestructura de alimentos**

Sería una simplificación excesiva suponer que el uso de microscopios más potentes y sofisticados conduce automáticamente a un mejor conocimiento de la microestructura de los alimentos. Desafortunadamente, el sistema visual humano no es muy adecuado para realizar determinaciones objetivas y cuantitativas de las características de la imagen que vemos bajo la lente de un microscopio. Como se indicó anteriormente, los ingenieros trabajan con modelos físicos y relaciones matemáticas que obtienen información cuantitativa y datos numéricos de una imagen cuando los microscopios modernos se acoplan a programas de software para el análisis de imágenes. El análisis de imágenes se basa en gran medida en la tecnología informática para reconocer, diferenciar y cuantificar imágenes.(Hajalilou & Ghadimi, 2019)

Por ejemplo la investigación comentada en ítem anteriores por Shi et al., (2021) evaluó la microestructura muscular de la muestra de carne de vacuno y se caracterizó mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) TM-5570 (Hitachi High-Technologies Corp., Tokio, Japón) y las muestras de carne de vacuno se cortaron en cubos (20 mm x 20 mm x 50 mm). Por ello es primordial.

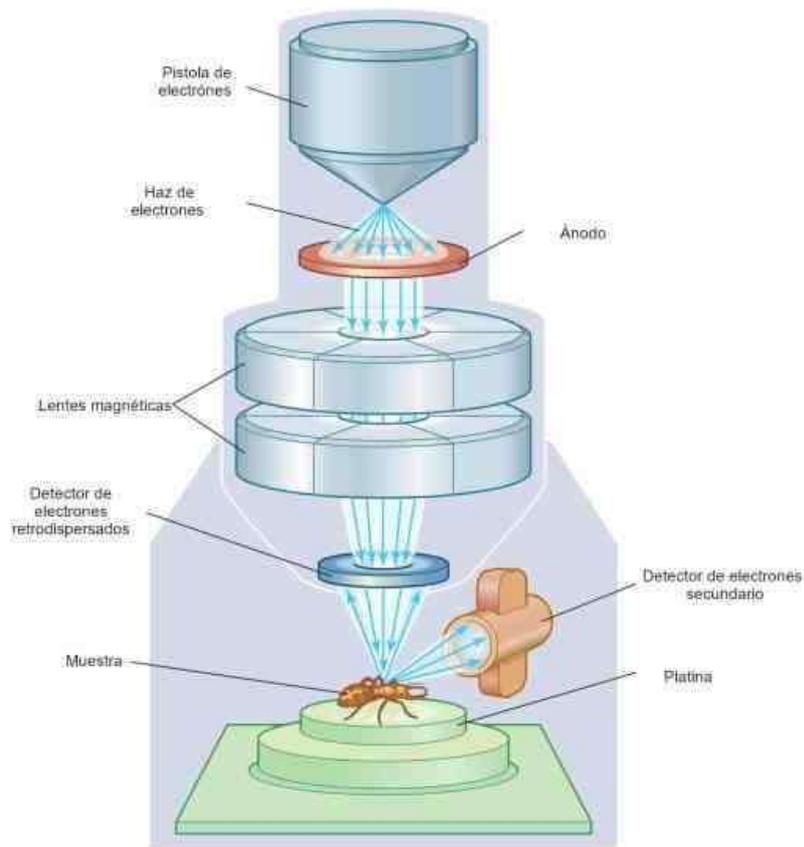
### **2.2.5.1. Microscopía electrónica**

La microscopía electrónica es una herramienta poderosa, capaz de proporcionar información de alta resolución sobre el tamaño, la forma y la composición de los sistemas de administración de omega-3. Con las metodologías adecuadas de preparación de muestras, la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM) pueden proporcionar información detallada sobre la morfología de los encapsulados en polvo, incluida la porosidad y la distribución de omega-3 tanto en los encapsulados en polvo como en las emulsiones, entre otros parámetros. SEM puede proporcionar una caracterización detallada de la superficie de encapsulados en polvo, mientras que TEM puede proporcionar detalles sobre la estructura interna de estos materiales. Cryo SEM puede permitir la caracterización de emulsiones que antes eran difíciles, si no imposibles, de caracterizar.

### **2.2.5.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

La microscopía electrónica de barrido conocida más por sus siglas SEM por su nombre en inglés (Scanning Electron Microscopy) produce imágenes de la superficie de una muestra mediante el barrido de la superficie con un haz de electrones enfocado. SEM permite realizar un análisis cuantitativo de diferentes aspectos morfológicos de una superficie corroída, incluyendo la estimación de la rugosidad de la superficie. El principio de observación SEM se basa en escanear la superficie de una muestra con un haz de electrones enfocado. El voltaje de aceleración aplicado en SEM está

típicamente en un rango de unos pocos a 30 keV. Las imágenes SEM se crean recolectando electrones secundarios de baja energía (SE) o electrones retrodispersados (BSE). Las observaciones SEM realizadas con un detector de electrones secundarios proporcionan información sobre el contraste topográfico, lo que lo convierte en un método apropiado para estimar la rugosidad de la superficie y caracterizar el daño por corrosión local (de Assumpção Pereira-da-Silva & Ferri, 2017).

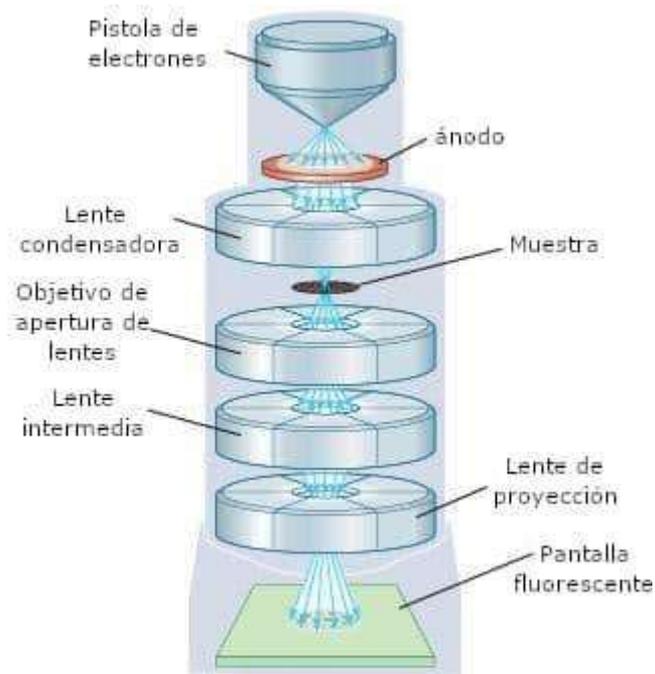


**Figura 14.** Microscopio electrónico de barrido (SEM)

**Fuente:** (*scanning electron microscope | Definition, Images, Uses, Advantages, & Facts, s. f.*)

### **Microscopía electrónica de transmisión**

La microscopía electrónica de transmisión del inglés Transmission electron microscope (TEM), con sus diversos modos de imagen y capacidades analíticas, es ahora una herramienta indispensable para la caracterización química y estructural a nanoescala de todo tipo de materiales. Los materiales del patrimonio cultural no se diferencian fundamentalmente de otros materiales excepto en que son más heterogéneos, con una estructura más compleja e imperfecta. Además, muchos de ellos contienen nanopartículas o tienen una estructuración a nanoescala, lo que juega un papel importante en sus propiedades físicas o es rico en información sobre su fabricación. Por lo tanto, las técnicas TEM son adecuadas para investigarlas, especialmente porque los desarrollos de estas últimas décadas permiten una preparación de muestras más eficiente y un registro de datos más rápido. La característica distintiva de la microscopía electrónica de transmisión (TEM) es su capacidad para formar imágenes de arreglos atómicos en regiones localizadas dentro de los materiales. Proporciona una vista de la microestructura, es decir, las variaciones en la estructura de una región a otra y las interfaces entre ellas. TEM juega un papel crítico siempre que las propiedades macroscópicas estén controladas o influenciadas por defectos o interfaces, por ejemplo, en el desarrollo de materiales estructurales avanzados con su compleja microestructura de segundas fases o materiales electrónicos que dependen del exquisito control de interfaces y multicapas (Hajalilou & Ghadimi, 2019).



**Figura 15.** Microscopio electrónico de transmisión (TEM)

**Fuente:** (*Transmission electron microscope / instrument*, s. f.)

La interpretación de micrografías requiere una comprensión de los principios de las técnicas, así como experiencia en la detección de errores metodológicos. Una imagen de microscopio electrónico se caracteriza por su gran cantidad de información. Sin embargo, solo una parte de la información está relacionada directamente con el objeto biológico en sí; otras partes dependen de varios pasos preparatorios y de las características del instrumento. Como consecuencia, las micrografías electrónicas son mucho menos accesibles a la interpretación de lo que parecen. El proceso de interpretación de la micrografía electrónica puede dividirse intencional o involuntariamente en una serie de pasos o niveles de análisis consecutivos, como la detección de objetos, la identificación de artefactos y el análisis de geometría. La posibilidad de detectar un objeto depende de su tamaño, frecuencia, distribución, y densidad de electrones

dentro de la micrografía electrónica. Tras la detección de un patrón, el investigador tiene que juzgar hasta qué punto pueden verse influidos por los artefactos de preparación. Este juicio es el segundo nivel de análisis y requiere conocimiento del procedimiento de preparación particular, así como de la influencia de los pasos individuales en el procedimiento. Las micrografías de electrones son registros bidimensionales de objetos tridimensionales. La apariencia de varios detalles dentro de la muestra depende de su orientación relativa al haz de electrones. La forma tridimensional generalmente se deduce de una inspección de muchos objetos similares vistos desde diferentes ángulos. Inclinar el objeto en una platina de goniómetro también puede ser muy útil. el investigador tiene que juzgar hasta qué punto los artefactos de preparación pueden influir en él. Este juicio es el segundo nivel de análisis y requiere conocimiento del procedimiento de preparación particular, así como de la influencia de los pasos individuales en el procedimiento. Las micrografías de electrones son registros bidimensionales de objetos tridimensionales. La apariencia de varios detalles dentro de la muestra depende de su orientación relativa al haz de electrones. La forma tridimensional generalmente se deduce de una inspección de muchos objetos similares vistos desde diferentes ángulos. Inclinar el objeto en una platina de goniómetro también puede ser muy útil. el investigador tiene que juzgar hasta qué punto los artefactos de preparación pueden influir en él. Este juicio es el segundo nivel de análisis y requiere conocimiento del procedimiento de preparación particular, así como de la influencia de los pasos individuales en el procedimiento. Las micrografías de electrones son registros bidimensionales de objetos

tridimensionales. La apariencia de varios detalles dentro de la muestra depende de su orientación relativa al haz de electrones. La forma tridimensional generalmente se deduce de una inspección de muchos objetos similares vistos desde diferentes ángulos. Inclinar el objeto en una platina de goniómetro también puede ser muy útil. así como de la influencia de los pasos individuales en el procedimiento. Las micrografías de electrones son registros bidimensionales de objetos tridimensionales. La apariencia de varios detalles dentro de la muestra depende de su orientación relativa al haz de electrones. La forma tridimensional generalmente se deduce de una inspección de muchos objetos similares vistos desde diferentes ángulos. Inclinar el objeto en una platina de goniómetro también puede ser muy útil. así como de la influencia de los pasos individuales en el procedimiento. Las micrografías de electrones son registros bidimensionales de objetos tridimensionales. La apariencia de varios detalles dentro de la muestra depende de su orientación relativa al haz de electrones. La forma tridimensional generalmente se deduce de una inspección de muchos objetos similares vistos desde diferentes ángulos. Inclinar el objeto en una platina de goniómetro también puede ser muy útil (Maunsbach & Afzelius, 1999).

#### **2.2.6. Análisis de micrografías**

El procesamiento cuantitativo de imágenes ha progresado mucho más allá de la visualización pura y ahora permite el análisis de imágenes 2D y 3D también con números que describen la microestructura de manera significativa. Los diferentes pasos del procesamiento de imágenes generalmente implican la mejora de la imagen, la segmentación de la

imagen y el análisis cuantitativo de las características segmentadas. Finalmente, las imágenes en 3D se pueden renderizar para visualización o modelado por computadora (Verboven et al., 2018).

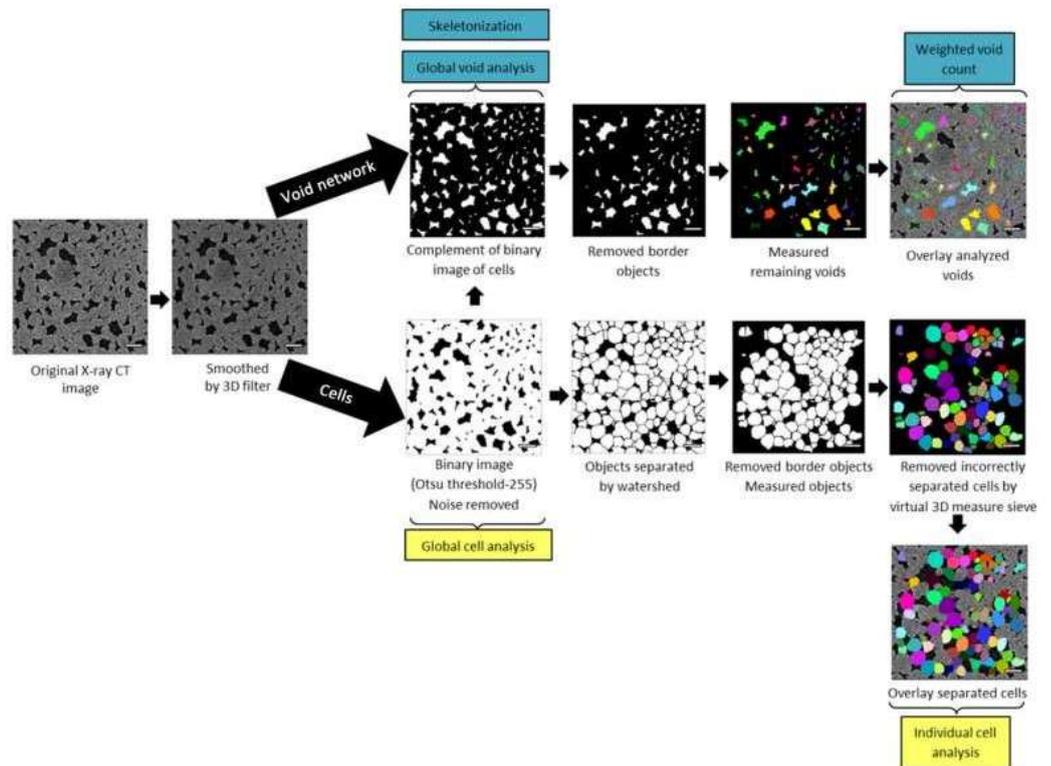
La mayoría de las imágenes obtenidas con los métodos descritos estarán en escala de grises. En la mayoría de los casos, las características de las imágenes cubren una amplia gama del espectro de escala de grises y tienen un histograma de escala de grises característico (es decir, la distribución del número de píxeles de valor de gris) que es continuo en lugar de discreto. En muchos casos, el histograma muestra un solo pico, lo que dificulta la separación de objetos según el valor de la escala de grises.

Además, siempre se debe tener en cuenta que las imágenes contienen un cierto nivel de ruido o artefactos que no deben confundirse con la estructura real. Por lo tanto, antes de la segmentación, a menudo se filtra la imagen y se mejora el contraste. Con este fin, se suelen aplicar diferentes operaciones secuenciales que incluyen algoritmos para eliminar ruido y mejorar el contraste local. Este paso suele implicar una considerable prueba y error para mejorar el contraste de las características específicas de la imagen.

La segmentación es el proceso de convertir la imagen optimizada en escala de grises en una imagen en blanco y negro determinando la asignación de población (por ejemplo, espacio vacío o material sólido) para cada píxel de la imagen. Para ello, una práctica habitual es seleccionar un umbral global sencillo, ya que es intuitivo y muy sencillo de aplicar. El umbral a menudo se establece para que coincida con una medida de porosidad en masa predeterminada.

Sin embargo, elegir el umbral correcto es muy subjetivo y puede dar lugar a sesgos cuando se intenta segmentar una pila de imágenes de rayos X. La distinción entre las fases vacía y sólida en las imágenes tomográficas y radiográficas a menudo no es nítida (es decir, no muestra una distribución bimodal). Además, las imágenes binarias resultantes del uso de umbrales globales pueden ser ruidosas y la porosidad promedio puede depender en gran medida del valor de umbral seleccionado.

El proceso de segmentación se realiza completamente en tres dimensiones y no en cortes. Los componentes pequeños desconectados en fase sólida o vacíos, que pueden ser físicos o surgir de un error de segmentación, pueden limpiarse de cada imagen mediante un procedimiento morfológico llamado apertura que considera un simple paso de erosión seguido de dilatación. Todos los métodos de segmentación de última generación, como la segmentación por cuencas hidrográficas o por niveles, comparten la misma característica en el sentido de que los parámetros se establecen basándose únicamente en la imagen reconstruida (Karim et al., 2018). En la figura 19 se muestra un flujo de trabajo de procesamiento de imágenes típico.



**Figura 16.** Flujo de trabajo de procesamiento de imágenes típico de imágenes de micro-CT demostrado para el análisis de la forma y el tamaño de las células y los poros del tejido de la fruta

**Fuente:**

Una vez que la imagen está segmentada en las fases de interés, cada fase puede caracterizarse más. La fracción de volumen de cada fase se puede cuantificar fácilmente mediante el recuento de píxeles en imágenes 3D. Para ser verdaderamente representativo de la estructura, se debe tener cuidado de realizar un análisis del volumen elemental representativo de la imagen (Mendoza et al., 2007). Relativamente sencillo es el cálculo del volumen y el área de superficie de partículas individuales, poros o burbujas en la imagen segmentada y produce una distribución de tamaño. Si la fase es continua, se podrían aplicar algoritmos de separación de cuencas hidrográficas o de ajuste de esferas para ayudar a caracterizar cómo cambian las dimensiones en toda la microestructura. La comparación estadística de

distribuciones de tamaño permite cuantificar las diferencias entre microestructuras (Verboven et al., 2018). La combinación de todos los parámetros estructurales medidos con otras cantidades de interés (por ejemplo, atributos de calidad medidos o propiedades termofísicas del material alimenticio estudiado) puede revelar importantes relaciones estructura-propiedad. Como las características de la microestructura son esencialmente multidimensionales, se requieren técnicas multivariadas.

### **2.2.7. Calidad y microestructura**

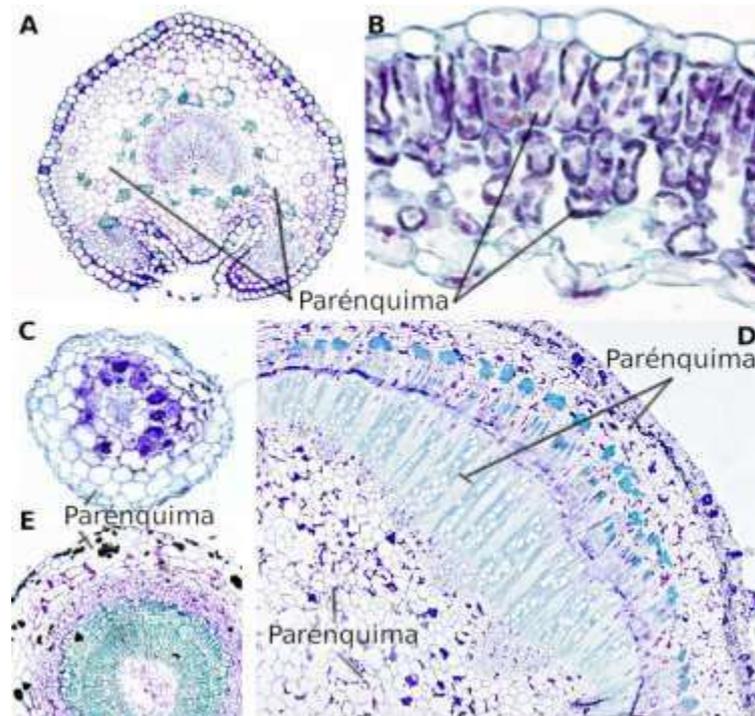
La microestructura de los alimentos se puede definir como la disposición espacial de la célula y el espacio intercelular en el material alimentario (Aguilera, 2005). La composición y organización originales (frescas) de los alimentos tienen un gran impacto en la estabilidad, estructura y valor nutricional del producto alimenticio. Dado que los cambios estructurales durante el procesamiento de alimentos pueden degradar la calidad de los alimentos, una de las principales preocupaciones es preservar la microestructura original de los materiales alimentarios. Los elementos microestructurales que están por debajo del rango de 100  $\mu\text{m}$  participan en las propiedades de transporte y comportamiento físico. El transporte de humedad a través de los poros, las células y las paredes celulares del material alimentario se produce a esta escala. A este respecto, se requiere una comprensión de las características microscópicas para explicar los cambios en las características de los alimentos a nivel microestructural durante el procesamiento de los alimentos

La naturaleza de los materiales alimenticios vegetales es compleja ya que tienen propiedades heterogéneas, porosas e higroscópicas. La célula es el componente básico del tejido vegetal. Las paredes celulares están formadas por la integración de células, y estas se estabilizan con la ayuda de fibras. La celulosa, la pectina y la hemicelulosa en la célula vegetal suelen ser los materiales de construcción de la pared celular. El tejido celular de los alimentos vegetales se puede ver como una suma de células parenquimáticas y espacios intercelulares (Mebatsion et al., 2006). En la figura 3.1 se muestra un tejido celular típico de materiales alimenticios vegetales que contienen células y espacio intercelular. Hay una membrana semipermeable dentro de la pared celular llamada lema plasmática (Aguilera y Stanley, 1999). Cada célula contiene citoplasma con una variedad de orgánulos.

Estos orgánulos juegan un papel clave en la actividad metabólica de la planta. Las membranas celulares son semipermeables, lo que ayuda a crear el efecto osmótico. El potencial hídrico externo a la vacuola genera presión hidrostática, que mantiene el fluido celular presionado firmemente contra la pared celular y, por lo tanto, mantiene firme el tejido. Por esta razón, la pérdida de agua va acompañada de una pérdida de presión interna mientras que el tejido se vuelve flácido. Esta presión se conoce como presión de turgencia y juega un papel importante en la reología y textura del tejido.

La microestructura juega un papel importante en la calidad y estabilidad de los alimentos procesados. Los alimentos se componen principalmente de polímeros y agua, pero también contienen aire y minerales. Las condiciones del proceso también son factores responsables del cambio de calidad. Las características estructurales de los alimentos vegetales a nivel macro y

micro son diferentes. En la figura 20 se presenta una estructura jerárquica de un alimento vegetal. La microestructura se puede definir como la disposición espacial de las células y los poros. La estructura está formada por tres moléculas básicas que incluyen polisacáridos, proteínas y lípidos. La estructura celular se puede clasificar como fibrosa, carnosa o encapsulada. Los materiales celulares están hechos principalmente de glucosa. El ensamblaje del elemento molecular, incluido el compuesto y la microfibrilla, crea la estructura superior (tejido) de los materiales.



**Figura 17.** Tejido parenquimático en diferentes órganos de una planta. A. En un peciolo. B. En una hoja. C. en una raíz primaria. D. En un tallo secundario. E. En una raíz secundaria. Teñidos con azul de metileno.

Comprender la relación entre la microestructura de los alimentos y la forma en que se comportan los alimentos durante el procesamiento es muy importante para diseñar un sistema de procesamiento de alimentos eficiente.

Es más fácil determinar la relación entre la estructura y las propiedades físicas específicas de los materiales de ingeniería tradicionales, ya que las propiedades de estos materiales están bien definidas. Sin embargo, es muy difícil descubrir tales relaciones entre la microestructura y las propiedades físicas de los alimentos, ya que aún no se conocen la mayoría de las propiedades mecánicas, reológicas y químicas a nivel micro de estos materiales. Las propiedades de transporte, la nutrición y la estabilidad de los alimentos también están influenciadas por su microestructura. La alteración de la microestructura del producto conduce a cambios de muchos atributos físicos en los materiales alimenticios. Por lo tanto, la comprensión adecuada de la relación entre los cambios físicos y microestructurales puede ayudar a determinar las condiciones óptimas de procesamiento de alimentos.

Uno de los principales fenómenos que afecta la calidad de los alimentos es la contracción que influye en la calidad del producto al disminuir su humectabilidad, alterar su textura y reducir la capacidad de reconstitución del agua. La contracción se produce cuando se elimina el agua del tejido y el tejido se vuelve incapaz de mantener su disposición estructural regular. En el caso de que existan gradientes de humedad dentro de la estructura celular, se produciría una contracción no uniforme, lo que provocaría tensiones microestructurales. Estas tensiones conducen a su vez a una deformación y colapso aún más extensos de la estructura del material alimenticio. La contracción se puede explicar a partir de la microestructura de los materiales alimenticios con la ayuda de la disposición celular y sus propiedades mecánicas dentro del tejido. Desde el punto de vista mecánico, las células se pueden considerar una estructura de pared de célula delgada

cerrada. Se considera que la construcción básica de la pared celular son materiales elásticos no lineales (Aregawi et al., 2013).

(Joardder et al., 2017) también incluyó entre las condiciones que afectan la calidad de los alimentos a las condiciones y métodos del proceso que influyen directamente en las propiedades físicas, incluida la porosidad. La porosidad en el material alimenticio se conoce como la fracción de volumen del espacio de aire o espacio vacío dentro del tejido. Depende del contenido de humedad y las condiciones del proceso. El espacio de aire intercelular se llama poros y se puede dividir en tres grupos como poros abiertos, poros cerrados y poros ciegos. El flujo de fluido generalmente tiene lugar en los poros abiertos, ya que estos tienen ambos lados abiertos. Los poros ciegos tienen un extremo cerrado y los poros cerrados están cerrados por todos los lados. La porosidad en materiales no higroscópicos no varía con el contenido de humedad. Por otra parte, la porosidad en materiales higroscópicos, como en los alimentos, aumenta con la reducción del contenido de humedad. La fase gaseosa está presente en poros abiertos y cerrados. Los poros abiertos están interconectados con la superficie externa de los materiales. La porosidad puede evaluarse teórica o experimentalmente. Los modelos teóricos se basan en una interpretación física de la estructura de los materiales alimentarios. Las predicciones de porosidad se realizan considerando la remoción de masa y la variación de volumen de las diferentes fases dentro del sistema alimentario.

(Aguilera, 2005) también comenta que parte de las pérdidas de calidad están relacionadas a las pérdidas por temas nutritivos, donde el estado de la

microestructura de los alimentos juega un papel fundamental en la cinética de liberación, absorción y estabilidad bioquímica de los nutrientes dentro del producto alimenticio. La microestructura de los alimentos puede resistir la pérdida de nutrientes porque esos compuestos que promueven la salud suelen estar estrechamente unidos a la matriz alimentaria intracelular e intercelular. Se ha hecho evidente que la presencia de paredes celulares puede ser un factor de control en la liberación de compuestos bioactivos. El procesamiento de alimentos es un ejercicio de valor agregado y los alimentos procesados pueden alterar la eficiencia de los procesos de digestión. Un proceso térmico inadecuado puede destruir la integridad de la pared celular y las membranas de los orgánulos en los que se encuentran los nutrientes y antioxidantes (Aguilera, 2000). De hecho, el tratamiento térmico puede hacer que los compuestos bioactivos se vuelvan más accesibles al romper la estructura celular mediante la desintegración de los grupos de células y la ruptura de las células que contienen nutrientes y, finalmente, destruir su vínculo con el tejido. El calor durante el tratamiento térmico puede debilitar las paredes / membranas celulares que encierran compuestos bioactivos y aumentar la eliminación de pectina, lo que da como resultado el ablandamiento de la pared celular. El ablandamiento de la microestructura de los alimentos y, en consecuencia, la desnaturalización de los complejos de nutrientes unidos a proteínas, la modificación de los gránulos de almidón hinchados y la modificación de la solubilidad pueden aumentar la bioactividad. Además, el proceso térmico amplifica el área de superficie expuesta para la digestión enzimática y, por lo tanto, es un enfoque beneficioso para liberar nutrientes de la matriz alimentaria. Sin

embargo, se ha informado que en muchos casos hay una alta reducción en el contenido de nutrientes de los alimentos en el procesamiento como resultado de la ruptura de las paredes celulares de los tejidos vegetales y la desintegración de los complejos de la matriz de nutrientes que potencia las reacciones químicas degradantes.

### 2.3. Definición de términos:

<b>Término</b>	<b>Definición</b>	<b>Referencia bibliográfica (APA)</b>
<b>Microestructura</b>	Organización interna de los componentes celulares y tisulares de un alimento a nivel microscópico. En la papa, incluye la disposición de células, almidón, paredes celulares y espacios intercelulares de estos.	Aguilera, J. M., & Lillford, P. J. (2008). <i>Food Materials Science: Principles and Practice</i> . Springer.
<b>Deshidratación</b>	Proceso de eliminación de agua del alimento mediante transferencia simultánea de calor y masa. En chips de papa, se busca reducir humedad para prolongar vida útil y lograr textura crujiente en el alimento.	Mujumdar, A. S. (2014). <i>Handbook of Industrial Drying</i> (4th ed.). CRC Press.
<b>Papa (Solanum tuberosum)</b>	Tubérculo rico en almidón ampliamente utilizado en procesamiento de snacks. Su estructura	Singh, J., & Kaur, L. (2009). <i>Advances in Potato</i>

	celular y contenido de almidón influyen la textura tras el secado y fritura.	<i>Chemistry and Technology</i> . Academic Press.
<b>Parámetros celulares</b>	Características microscópicas como integridad celular, ruptura de paredes, turgencia, tamaño y forma celular, que cambian durante el procesamiento térmico.	Aguilera, J. M. (2005). "Why food microstructure?" <i>Journal of Food Engineering</i> , 67(1–2), 3–11.
<b>Análisis de imagen</b>	Técnica no destructiva que permite cuantificar parámetros estructurales (tamaño de célula, porosidad, distribución del almidón) mediante procesamiento digital de imágenes microscópicas.	Brosnan, T., & Sun, D. W. (2004). "Improving quality inspection of food products by computer vision." <i>Journal of Food Engineering</i> , 61(1), 3–16.
<b>Color instrumental (CIELab)</b>	Sistema de medición del color basado en tres parámetros: L* (luminosidad), a* (rojo-verde) y b* (amarillo-azul). Se usa para cuantificar cambios de color en alimentos durante fritura o secado.	Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A. J. (2013). "Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review." <i>Food and Bioprocess Technology</i> , 6(1), 36–60.
<b>Temperatura de proceso</b>	Parámetro térmico crítico que influye en la tasa de transferencia de calor, velocidad de evaporación, cambios de	Fellows, P. (2009). <i>Food Processing Technology</i> :

	color, textura y microestructura durante deshidratación.	<i>Principles and Practice</i> (3rd ed.). Woodhead Publishing.
<b>Tiempo de proceso</b>	Duración durante la cual el alimento está expuesto al tratamiento térmico.  Junto con la temperatura, determina la cinética de deshidratación, gelatinización del almidón y cambios estructurales de este.	Barbosa-Cánovas, G. V., et al. (2005). <i>Dehydration of Foods</i> . Springer.
<b>Chips de papa</b>	Producto deshidratado y frito de papa, con bajo contenido de humedad, estructura porosa, textura crujiente y color dorado característico. Su calidad depende del tratamiento térmico y condiciones iniciales del tubérculo a las que a sido sometido.	Pedreschi, F., & Moyano, P. (2005). "Oil uptake and texture development in fried potato slices." <i>Journal of Food Engineering</i> , 70(4), 557–563.
<b>Ingeniería de alimentos</b>	Disciplina que aplica principios de ingeniería (transferencia de calor y masa, mecánica, reología) al diseño, análisis y optimización de procesos de transformación de alimentos.	Toledo, R. T. (2007). <i>Fundamentals of Food Process Engineering</i> (3rd ed.). Springer.

**Table N° 03:** Terminología técnica clave y definiciones

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Ubicación

La presente tesis se realizó en la ciudad Universitaria, en el laboratorio de Fermentaciones Industriales de la E.A.P. de Ingeniería de Industrias alimentarias de la Universidad Nacional de Cajamarca.



Figura 18. Mapa de Ubicación

#### 3.2. Materiales

- Papa variedad Huevo de indio
- Azul de toluidina
- Secador de aire forzado
- Microscopio óptico
- Laminillas
- Portaobjetos
- Colorímetro

#### 3.3. Tipo y diseño de investigación

La investigación se enmarca dentro del enfoque **experimental**, lo cual permite establecer relaciones causa-efecto entre variables manipuladas, siguiendo el enfoque propuesto por Hernández et al. (2014). El diseño experimental se basa en una combinación de factores y niveles que permiten evaluar la influencia de la temperatura y el tiempo sobre variables de respuesta.

### 3.4. Factores, Variables (Independientes), Niveles y Tratamientos en Estudio

A continuación, en la Tabla 1 se describe los factores asociados a las variables independientes:

**Tabla 4. Factores, variables, niveles y tratamientos en estudio**

Variables		Dimensiones	Indicador
Variable Independiente	temperatura	60° 70°	°C
	Tiempo	20 30	minutos
Variable Independiente	Parámetros microestructurales de celulas	Área Perímetro Diámetro Redondez Compactación Long. Eje mayor Long. eje menor	Valor numérico
	Luminosidad (L*)	Color instrumental	L*
	Espacio Cielab – a*	Color instrumental	a*
	Espacio Cielab – b*	Color instrumental	b*

*Nota. Elaboración propia.*

La definición de variables y dimensiones sigue criterios de estudios similares en análisis morfoestructural y colorimétrico en productos vegetales (Pirayeshfar & Sadeghi, 2019; Varela et al., 2008).

### 3.5. Diseño Experimental y Arreglo de los Tratamientos

A continuación, en la Tabla 5 se muestra los parámetros de control para la presente investigación:

**Tabla 5**

*Diseño experimental*

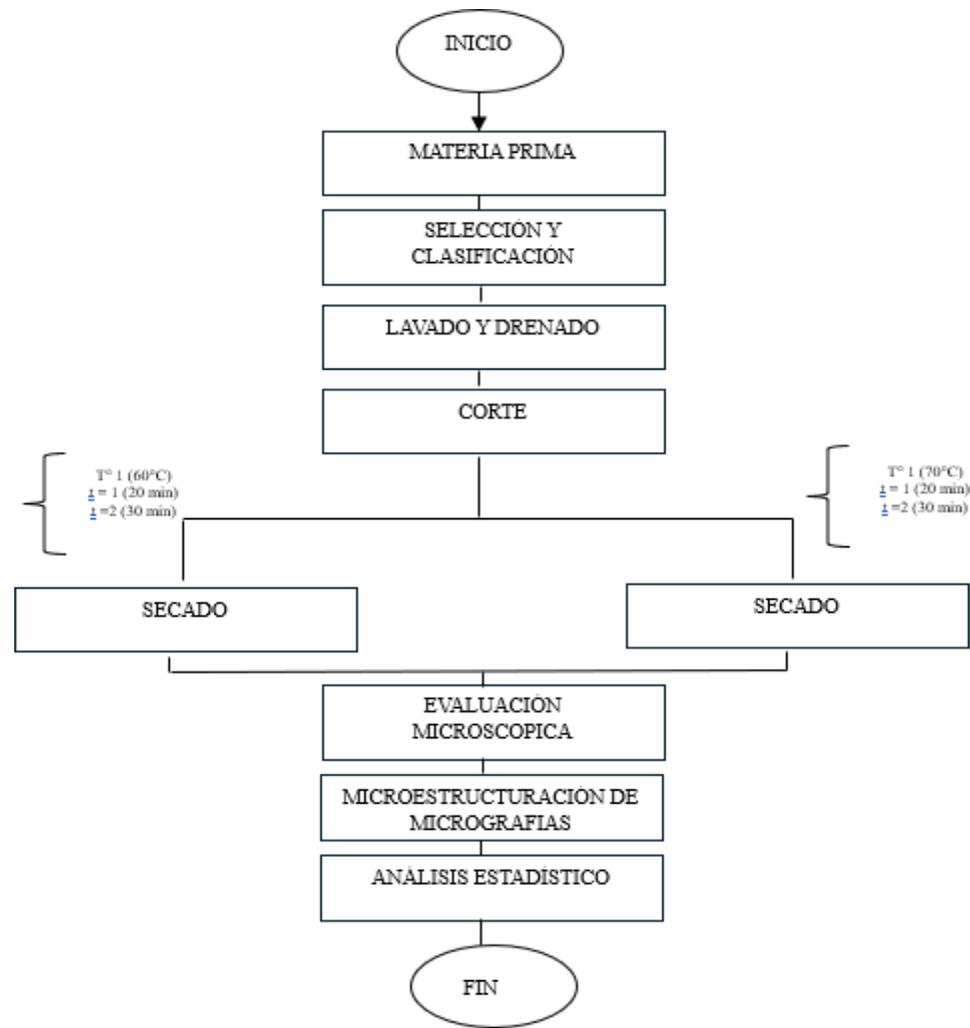
Tratamiento	Temperatura	Tiempo	Variables dependientes
1	T1	E1	Parametros microestructurales, L, a y b
2	T2	E1	
3	T1	E2	
4	T2	E2	

*Nota. Elaboración propia.*

El diseño factorial utilizado es común en estudios donde se evalúan múltiples factores simultáneamente. Se aplicó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con replicaciones, lo cual es recomendado para experimentos de laboratorio controlados (*Montgomery, 2017*).

### **3.6. Diagrama del Experimento**

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo para llevar a cabo el proceso experimental de la tesis.



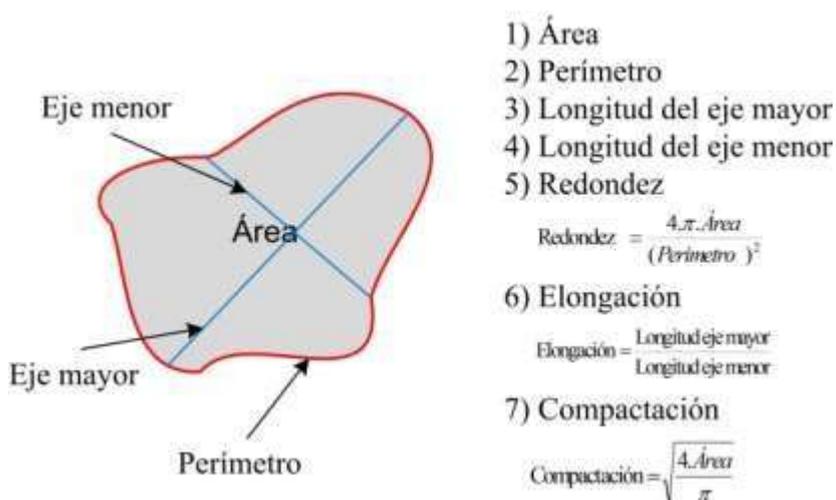
**Figura 19.** Diagrama de flujo del experimento.

## Tratamiento y Análisis de Datos

El análisis estadístico fue realizado mediante un **ANOVA**, como técnica básica para determinar la significancia de los factores estudiados (Montgomery, 2017). La optimización estadística se llevó a cabo usando el software **STATISTICA 7.0**, ampliamente aplicado en ingeniería de procesos y alimentos (Box & Draper, 2007). para identificar las condiciones óptimas del proceso estudiado.

## Implementación y caracterización microestructural de papa

Las muestras fueron previamente caracterizadas mediante el análisis de la distribución estadística de los parámetros de tamaño y forma de los elementos estructurales del tejido vegetal en estudio. Esta caracterización permitió obtener una representación cuantitativa de la microestructura de la papa, como se muestra en la Figura 2.



**Figura 20.** Parámetros de tamaño y forma para el análisis microestructural

Para obtener la información de cada elemento, así como para individualizar estos, se desarrolló un sistema automatizado a partir de la propuesta de (Castro et al., 2019). El sistema se implementó en el software matemático Matlab 2019<sup>a</sup>.

## Análisis de color

El color de las patatas fritas se determinó mediante Chroma Meter (CM-2003d, Konica Minolta, Japón). El espectrofotómetro se calibró con una pizarra blanca estándar antes de

la prueba. La escala se exhibió en  $L^*$  (0 = negro; 100 = blanco),  $a^*$  (-a = verdoso; +a = rojo), y  $b^*$  (-b = azul; +b = amarillez).

### **Obtención de micrografías en microscopio óptico**

De la muestra de patata deshidratada se añadieron una gota de colorante azul de toluidina al 5%. Las láminas procesadas se examinaron en un microscopio binocular con Sistema Óptico de Corrección del Color al Infinito marca Motic. Posteriormente se tomaron fotografías de las preparaciones con los objetivos 4x y 10x, mediante una cámara Motic de 10 Megapíxeles acoplada al microscopio usando el software Motic Image Plus 3.0.

### **Presentación de la Información**

La información obtenida fue organizada y presentada en tablas y figuras, siguiendo normas de comunicación científica para resultados experimentales (Day & Gastel, 2011).

Parámetro	Descripción técnica	Importancia en alimentos	Referencia bibliográfica (APA)
<b>1. Área (A)</b>	Medida de la superficie ocupada por una partícula u objeto (en 2D) en una imagen binaria.	Refleja el tamaño medio de las células, espacios intercelulares o poros. Cambios indican contracción o expansión celular.	Aguilera, J. M. (2005). Why food microstructure? <i>Journal of Food Engineering</i> , 67(1–2), 3–11.
<b>2. Perímetro (P)</b>	Longitud total del borde externo de una partícula.	Útil para calcular la regularidad de las células. Perímetros más irregulares pueden asociarse con daño térmico.	Lillford, P. J., & Hermansson, A. M. (2007). Food microstructure: the past, present, and future. <i>Food Hydrocolloids</i> , 21(4), 459–466.
<b>3. Eje mayor (a)</b>	Línea más larga que cruza el objeto, representa su dimensión máxima.	Evalúa la dirección de elongación celular. Aumentos pueden indicar expansión térmica.	Oliveira, F. A. R., & Oliveira, J. C. (1999). Processing foods: Quality optimization and process assessment. CRC Press.
<b>4. Eje menor (b)</b>	Línea perpendicular al eje mayor, representa la dimensión mínima.	Combinado con el eje mayor, permite calcular elongación. Disminuciones pueden indicar colapso celular.	Barbosa-Cánovas, G. V., et al. (2005). <i>Dehydration of Foods</i> . Springer.
<b>5. Redondez (R)</b>	$R = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2}$ Evalúa la circularidad de un objeto.	Valores cercanos a 1 indican estructuras regulares (como células intactas); valores bajos indican deformación.	Jancsó, P. T., et al. (2001). Relationships between mechanical properties and structure of potato tuber ( <i>Solanum tuberosum</i> L.). <i>Acta Alimentaria</i> , 30(3), 311–322.
<b>6. Elongación (E)</b>	$E = \frac{\text{Eje mayor}}{\text{Eje menor}}$	Mide cuán alargada está la célula o poro. Elongaciones altas sugieren deformaciones inducidas por calor o presión.	Aguilera, J. M., & Stanley, D. W. (1999). <i>Microstructural Principles of Food Processing and Engineering</i> . Springer.

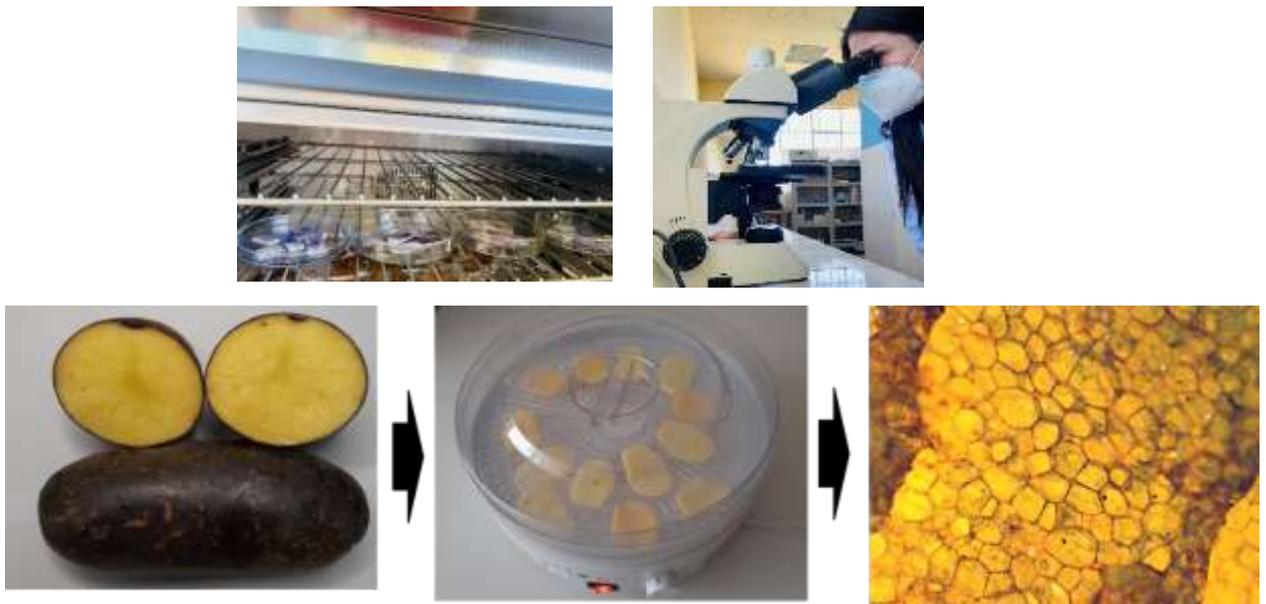
Parámetro	Descripción técnica	Importancia en alimentos	Referencia bibliográfica (APA)
7. Compactación (C)	$C = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$	Indica cuán compacta es una estructura en relación con un círculo equivalente. Útil para estudiar contracción celular.	Sun, D. W. (Ed.). (2008). <i>Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation</i> . Academic Press.

**Reseña:** Figura 20. Parámetros estructurales con descripción y referencia

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

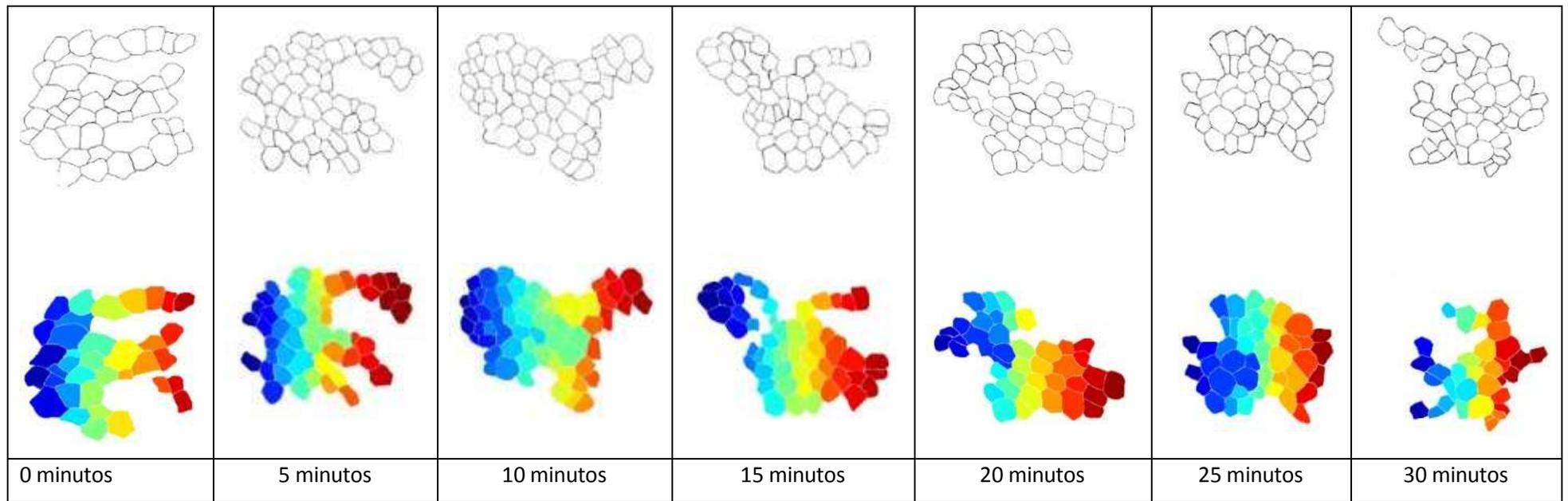
### 4.1. Extracción de características microestructurales

En la **Figura 21** se muestra el flujo de trabajo generado para la obtención de las micrografías, se observa la papa variedad huevo de indio, el equipo secador usado y la micrografía obtenida teñida con azul de toluidina.

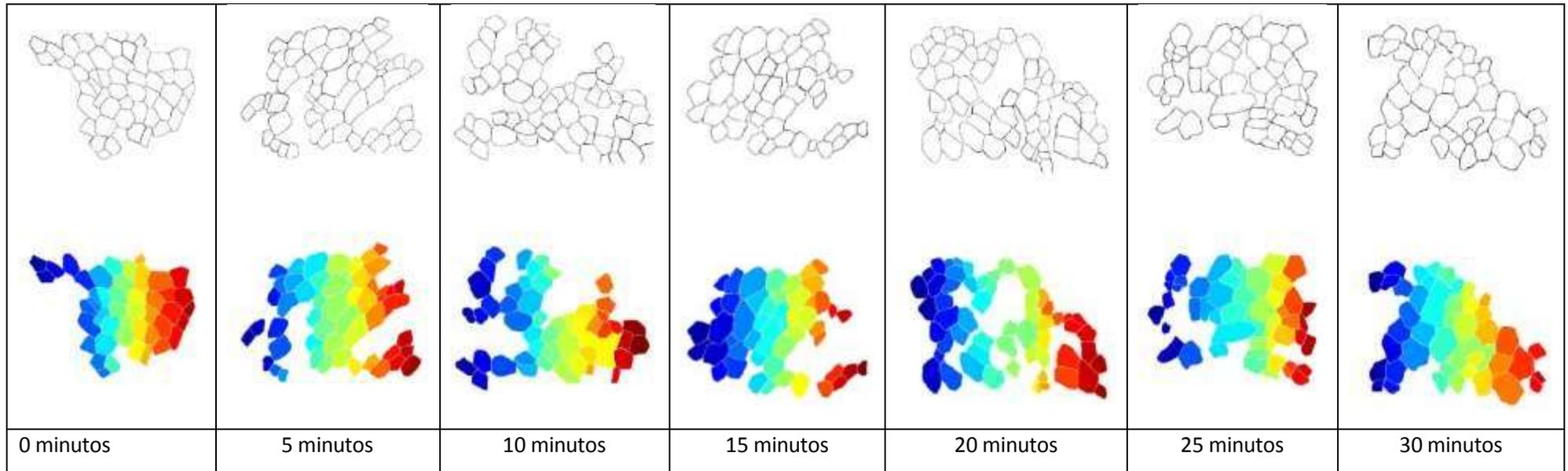


**Figura 21.** Flujo de trabajo y obtención de imágenes

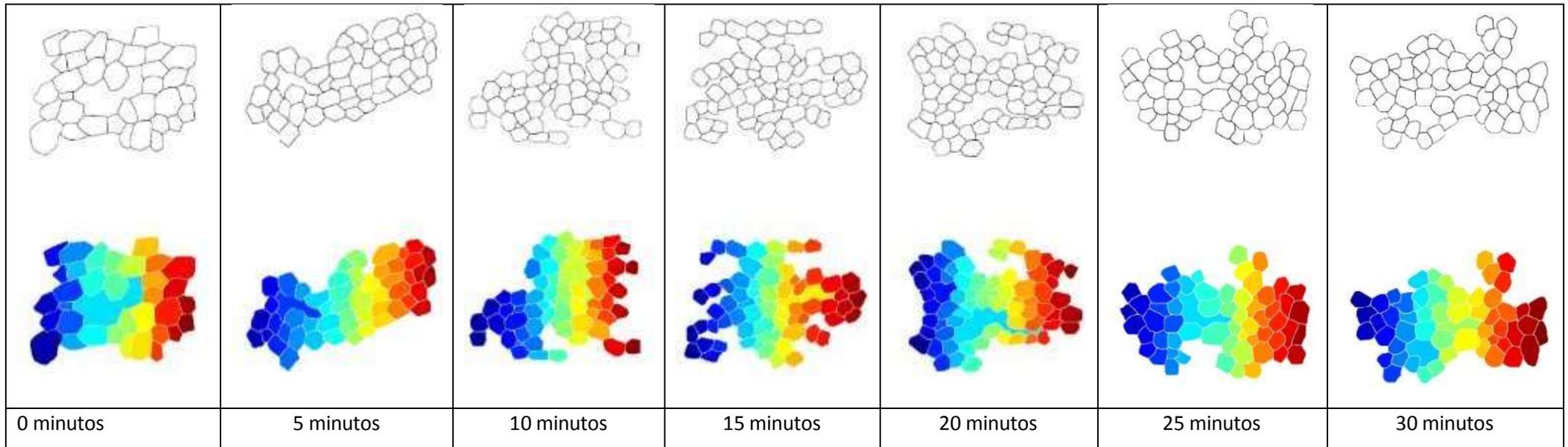
Las figuras 22, 23 y 24 muestran las micrografías tratadas con el software usado, basado en el trabajo de (Oblitas et al., 2021), donde se estructuran las imágenes para extraer los parámetros microestructurales de cada micrografía tomada en los tiempos previstos por la investigación. De cada micrografía se obtuvo un promedio de 120 células analizadas, el detalle promedio de las mismas se muestra en la Tabla 6.



**Figura 22.** Imágenes celulares a 50°C



**Figura 23.** Imágenes celulares a 60°C



**Figura 24. Imágenes celulares a 70°C**

**Tabla 6. Datos promedio por tratamiento**

<b>Temperatura</b>	<b>Tiempo</b>	<b>AREA</b>	<b>PERIMETRO</b>	<b>LOGITUD EJE MAYOR</b>	<b>LONGITUD EJE MENOR</b>	<b>REDONDEZ</b>	<b>ELONGACION</b>	<b>COMPACTACION</b>
°C	Minutos	µm <sup>2</sup>	µm	µm	µm			
50	5	4550	275.493	95.431	62.849	0.843	1.404	76.113
60	5	3916	248.487	88.465	59.672	0.827	1.466	70.612
70	5	4870	275.190	93.259	67.124	0.841	1.319	78.740
50	10	4707	264.754	91.286	68.285	0.858	1.307	77.415
60	10	4752	266.176	89.980	65.932	0.850	1.368	77.784
70	10	5389	281.867	96.228	69.823	0.860	1.315	82.834
50	15	4931	277.647	95.310	69.485	0.827	1.505	79.236
60	15	3609	237.479	88.294	58.757	0.824	1.490	67.787
70	15	4548	261.408	90.600	68.603	0.864	1.320	76.097
50	20	4853	273.772	96.423	66.219	0.843	1.438	78.602
60	20	4343	252.135	84.865	62.806	0.821	1.435	74.362
70	20	4562	259.065	89.163	69.706	0.866	1.306	76.214
50	25	4174	258.516	88.510	59.513	0.827	1.490	72.893
60	25	3132	217.298	77.693	54.165	0.834	1.485	63.147
70	25	4454	259.515	88.408	68.385	0.868	1.259	75.306
50	30	3354	221.162	78.377	53.837	0.836	1.506	65.348
60	30	3927	251.213	88.832	58.144	0.827	1.353	70.711
70	30	5231	269.494	93.251	73.632	0.856	1.232	81.611

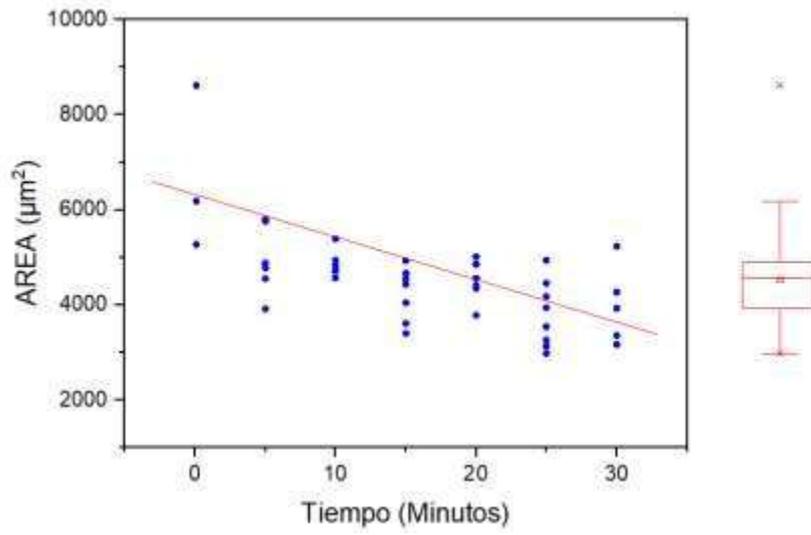
#### 4.2. Efecto del Tiempo en las características microestructurales

En las figuras 25 a la 31 se realizó un análisis descriptivo para observar el comportamiento de las características microestructurales de la papa durante el proceso de secado, podemos observar que los parámetros de Área, perímetro, longitud de eje mayor y longitud de eje menor tienen una tendencia a decrecer, lo cual muestra una contracción por efecto del tiempo, la cual es la misma para las temperaturas evaluadas. Las demás características no mostraron una tendencia clara.

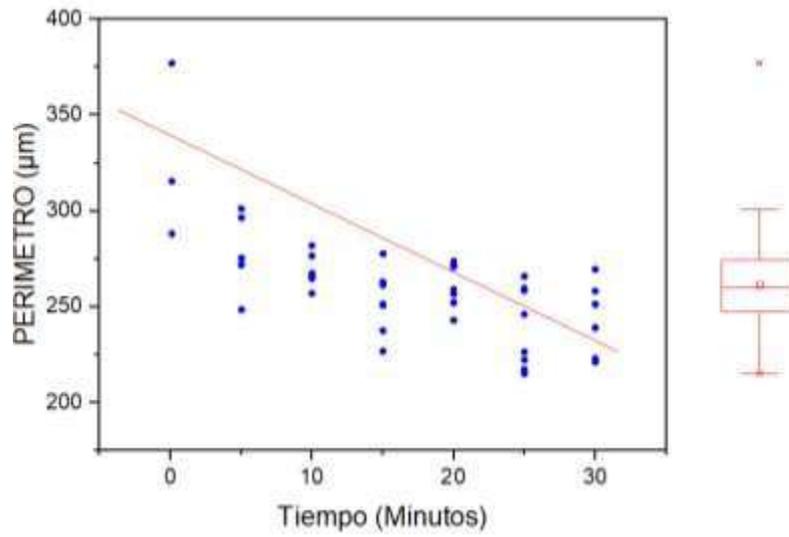
Zhong, Y., & Zheng, Y. (2016). Observaron que, durante el proceso de secado de las papas, se produce una contracción celular, lo cual causa una disminución en los parámetros microestructurales como el área celular y el perímetro. Este comportamiento es dependiente del tiempo de secado y la temperatura aplicada. El estudio también destaca que las papas secadas a altas temperaturas experimentan una mayor contracción celular debido a la rápida pérdida de agua, lo que es consistente con los resultados de tu investigación.

González, M., & Pérez, F. (2017). Analizaron cómo el tiempo y la temperatura afectan las propiedades microestructurales de las papas durante el proceso de secado. Los resultados de este estudio indican una disminución en el tamaño de las células y la contracción de los parámetros mencionados (como área y perímetro). Sin embargo, encontraron que otras características como la forma celular y la redondez no siempre muestran una tendencia uniforme.

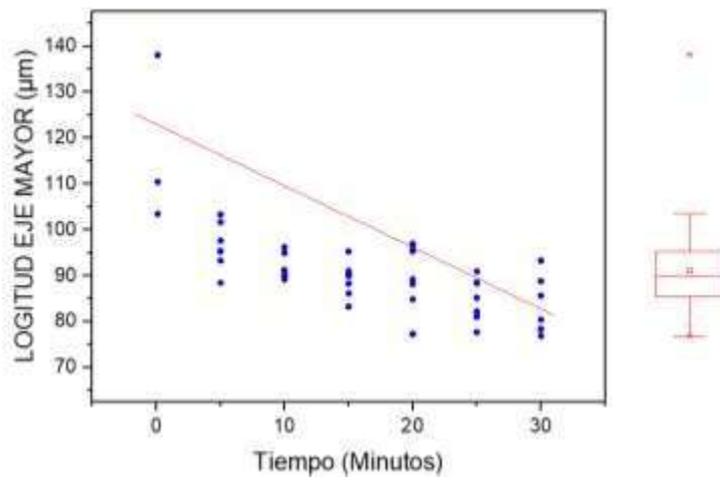
Campos, M. L., Santos, A. S., & Silva, A. F. (2013) manifiesta que durante el secado de productos alimenticios como la papa, **la temperatura y el tiempo** son factores clave que influyen en la alteración de las características microestructurales. La **temperatura** elevada acelera la evaporación del agua, pero también puede provocar una mayor contracción y cambios en la textura de la célula (Campos et al., 2013). Sin embargo, en este caso, se observa que la contracción ocurre de manera similar para todas las temperaturas evaluadas, lo que sugiere que el tiempo juega un papel más importante que la temperatura en este proceso específico.



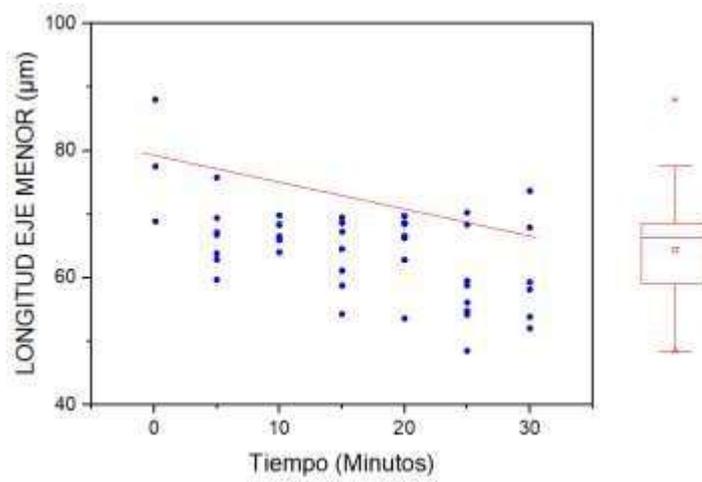
**Figura 25.** Efecto del tiempo en el área celular



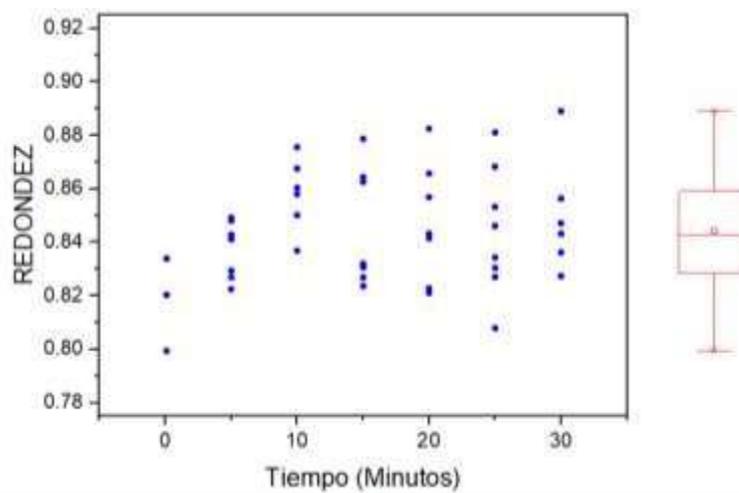
**Figura 26.** Efecto del tiempo en el perímetro celular



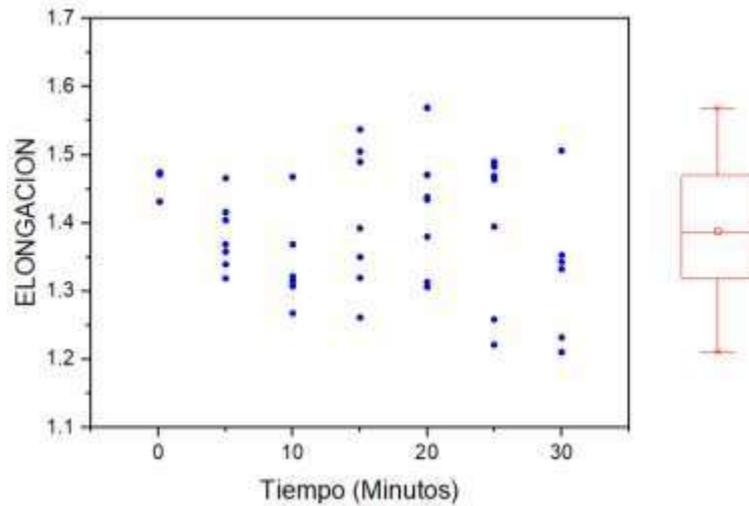
**Figura 27.** Efecto del tiempo en el eje mayor celular



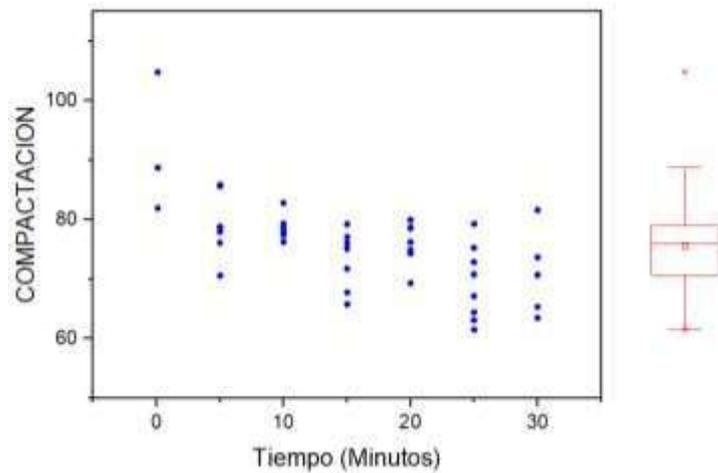
**Figura 28.** Efecto del tiempo en el eje menor celular



**Figura 29.** Efecto del tiempo en la redondez celular



**Figura 30.** Efecto del tiempo en la elongación celular



**Figura 31.** Efecto del tiempo en la compactación celular

### 4.3. Efecto de la temperatura en las características microestructurales

De la misma forma que se analizó la tendencia del efecto del tiempo se analizó el efecto de la temperatura sobre las características microestructurales, esto se observa en las Figuras 32 a la 38, teniendo niveles de contracción a mayores temperaturas, mostrados claramente en las características de área, perímetro, longitud de eje mayor y menor, las otras características no muestran un efecto claro.

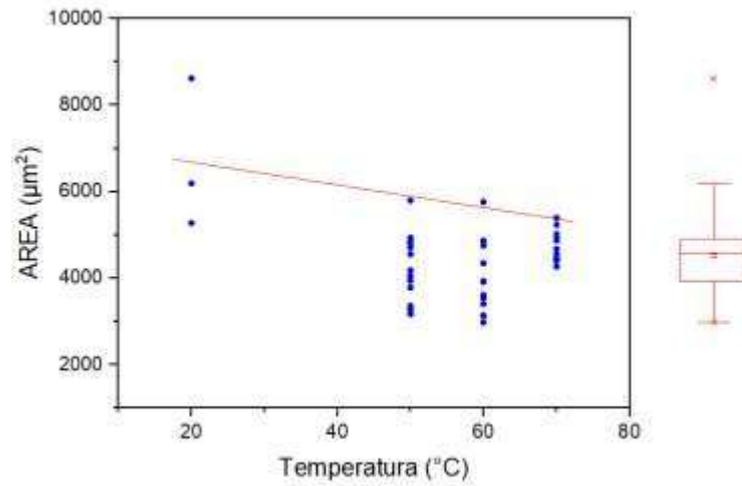
En la literatura, se ha documentado que la temperatura tiene un impacto directo sobre el proceso de deshidratación, acelerando la pérdida de agua y provocando una mayor contracción celular (Campos et al., 2013). A temperaturas elevadas, la evaporación del agua es más rápida, lo que puede causar una reducción más significativa en el tamaño de las células debido a la deshidratación rápida y la compresión de la estructura celular. Este comportamiento concuerda con los resultados observados en este estudio, donde los parámetros de área, perímetro, y dimensiones del eje (mayor y menor) disminuyen más a mayores temperaturas.

Diversos estudios han encontrado que, a medida que aumenta la temperatura durante el secado, el material puede experimentar una mayor **compresión celular** debido a la pérdida rápida de agua y la **reducción de los espacios intercelulares** (Zhang et al., 2014). Este fenómeno es particularmente evidente en los productos alimenticios, como la papa, donde la **estructura celular** se ve alterada por la rápida evaporación del agua. La **temperatura elevada** facilita un secado más rápido, pero también puede generar una **destrucción de la estructura celular** si no se controla adecuadamente.

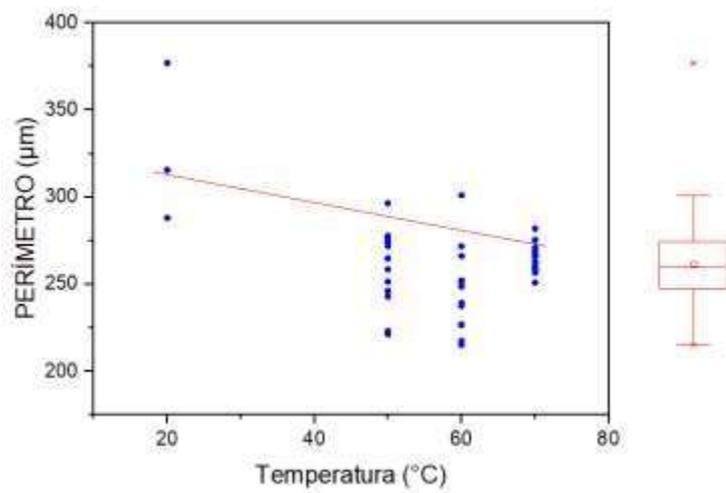
El **incremento de la temperatura** acelera no solo la pérdida de agua, sino también la descomposición o alteración de las estructuras celulares, lo que puede afectar la **morfología de las células**. Según estudios previos, temperaturas más altas pueden **degradar más rápidamente las paredes celulares**, lo que puede llevar a una mayor contracción de la estructura interna (Mujumdar, 2014). Este fenómeno se refleja en los datos presentados, donde los parámetros medidos muestran una contracción más significativa a mayores temperaturas.

Aunque la contracción en **área, perímetro y dimensiones** de los ejes fue notable a temperaturas más altas, **otras características microestructurales** (como la distribución de la porosidad o la estructura interna) no mostraron un comportamiento claro, lo cual puede sugerir que ciertos aspectos de la microestructura de la papa no están tan influenciados por las variaciones de

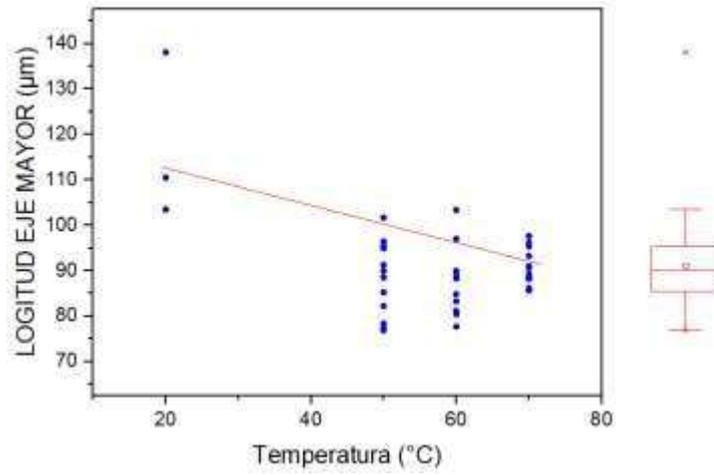
temperatura o pueden estar determinados por otros factores, como el tiempo de secado o las características iniciales del material (Alves et al., 2017).



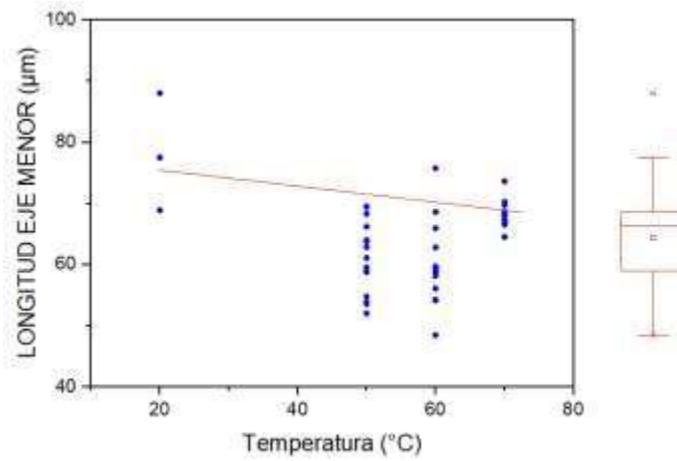
**Figura 32. Efecto de la temperatura en el área celular**



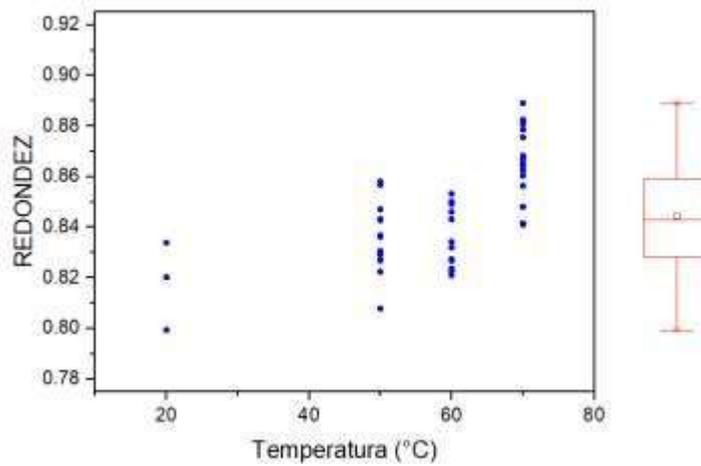
**Figura 33. Efecto de la temperatura en el perímetro celular**



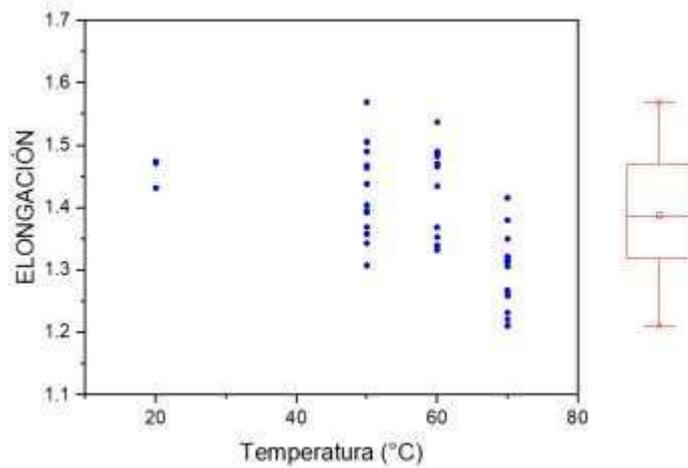
**Figura 34. Efecto de la temperatura en el eje mayor celular**



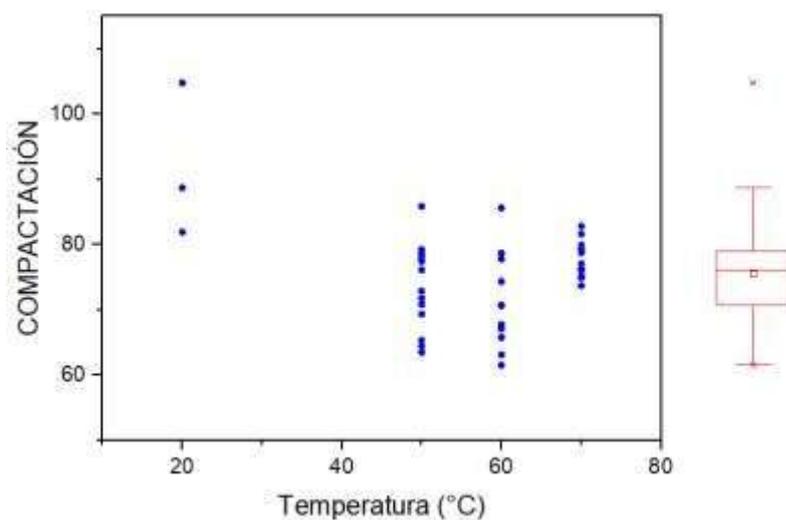
**Figura 35. Efecto de la temperatura en el eje menor celular**



**Figura 36. Efecto de la temperatura en la redondez celular**



**Figura 37. Efecto de la temperatura en la elongación celular**



**Figura 38. Efecto de la temperatura en la compactación celular**

#### **4.4. Efecto del Tiempo y temperatura sobre los parámetros microestructurales de la papa deshidratada**

Se realizó el análisis estadístico del tipo multifactorial para evaluar el efecto de la temperatura y tiempo sobre las características microestructurales de las células de papa de la variedad huevo de indio durante el proceso de deshidratación, los detalles por cada parámetro los ponemos a continuación:

- Para el parámetro microestructural área celular se observa que le mayor efecto esta dado por el tiempo seguido de la temperatura, teniendo ambos factores un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre este parámetro microestructural, el  $R^2$  fue de 0.751 (figura 39).
- Para el parámetro microestructural perímetro celular se observa que le mayor efecto esta dado por el tiempo seguido de la temperatura, siendo solo el tiempo significativo ( $p < 0.05$ ) sobre este parámetro microestructural, el  $R^2$  fue de 0.745 (Figura 40).
- Para el parámetro microestructural longitud de eje mayor celular se observa que le mayor efecto esta dado por el tiempo seguido de la temperatura, siendo solo el tiempo significativo ( $p < 0.05$ ) sobre este parámetro microestructural, el  $R^2$  fue de 0.785 (Figura 41).
- Para el parámetro microestructural longitud de eje menor celular se observa que le mayor efecto esta dado por la temperatura seguido del tiempo, teniendo ambos factores un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre este parámetro microestructural, el  $R^2$  fue de 0.716 (Figura 42).
- Para el parámetro microestructural redondez celular se observa que le mayor efecto esta dado por la temperatura seguido del tiempo, siendo solo la temperatura significativa ( $p < 0.05$ ) sobre este parámetro microestructural, el  $R^2$  fue de 0.794 (Figura 43).
- Para el parámetro microestructural elongación celular se observa que le mayor efecto esta dado por la temperatura seguido del tiempo, siendo solo la temperatura significativa ( $p < 0.05$ ) sobre este parámetro microestructural, el  $R^2$  fue de 0.793 (Figura 44).
- Para el parámetro microestructural compactación celular se observa que le mayor efecto esta dado por el tiempo seguido de la temperatura, teniendo ambos factores

un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre este parámetro microestructural, el  $R^2$  fue de 0.791 (figura 45).

En investigaciones previas sobre el secado de productos vegetales, se ha encontrado que el área celular tiende a disminuir durante el proceso de deshidratación debido a la pérdida de agua. El tiempo tiene un efecto más significativo que la temperatura en la reducción del volumen celular, ya que la contracción celular es un fenómeno que se acumula con el paso del tiempo (Campos et al., 2013). Este comportamiento es consistente con los resultados obtenidos en este estudio.

El **perímetro celular** se ve afectado por la deshidratación, pues a medida que las células pierden agua, su contorno se ve alterado, lo que lleva a una reducción en su tamaño y forma (Zhao et al., 2015). La influencia del **tiempo** sobre este parámetro es esperada, ya que la **deshidratación prolongada** provoca una mayor contracción celular.

La longitud del eje mayor de las células de los alimentos durante el secado disminuye debido a la deshidratación que reduce el volumen celular (Bourne, 2002). El tiempo prolongado de secado generalmente provoca un acortamiento de los ejes celulares debido a la contracción progresiva, lo cual es consistente con los resultados obtenidos en este estudio.

La longitud de los ejes menores celulares también se ve afectada por la contracción que ocurre durante el proceso de deshidratación. A temperaturas más altas, el proceso de secado puede ser más rápido, lo que provoca una mayor contracción en todas las dimensiones celulares, incluidas las más pequeñas (Mujumdar, 2014). Este comportamiento se alinea con los resultados de este estudio.

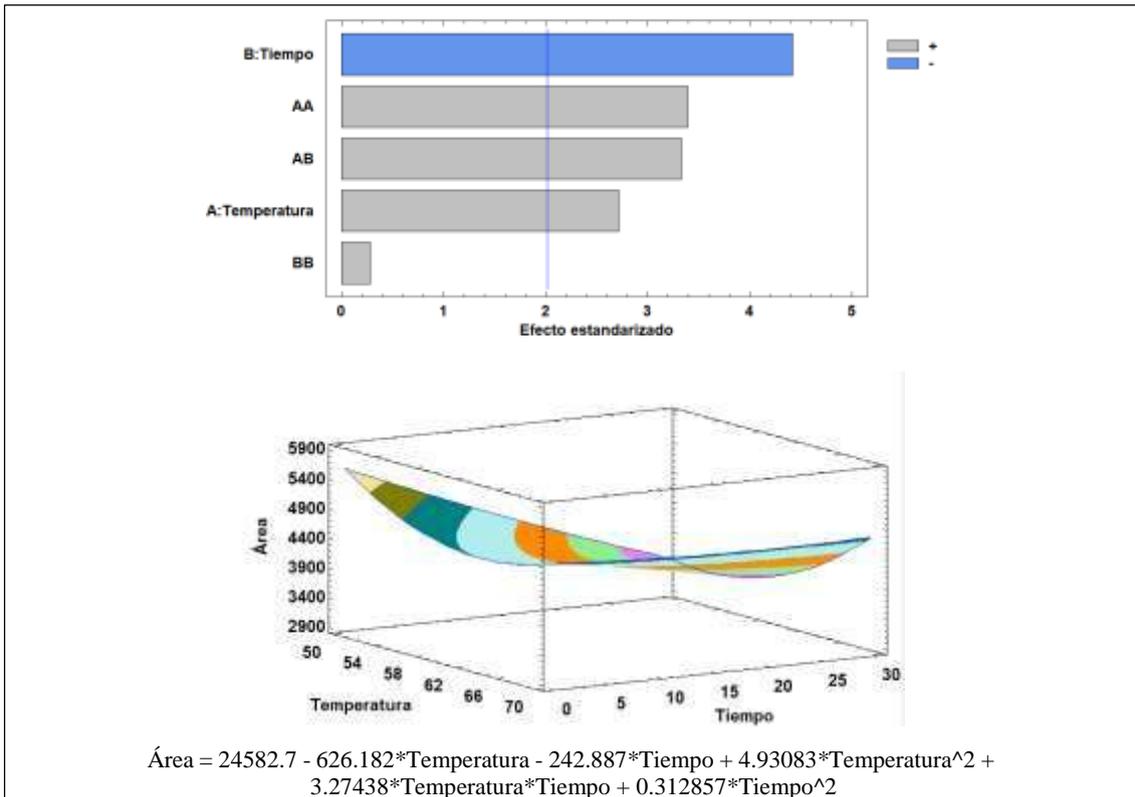
El aumento de la temperatura durante el secado provoca una **alteración de la forma celular**, haciéndola más redonda a medida que las paredes celulares se colapsan y la célula pierde su forma al reducir su contenido de agua (Alves et al., 2017). Este comportamiento coincide con la literatura que describe cómo la temperatura puede afectar la morfología celular.

La **elongación celular** tiende a reducirse durante el secado debido a la **contracción interna** que ocurre en las células. La **temperatura elevada** acelera este proceso, resultando en células que pierden su capacidad de alargarse (Zhang et al., 2014). Este

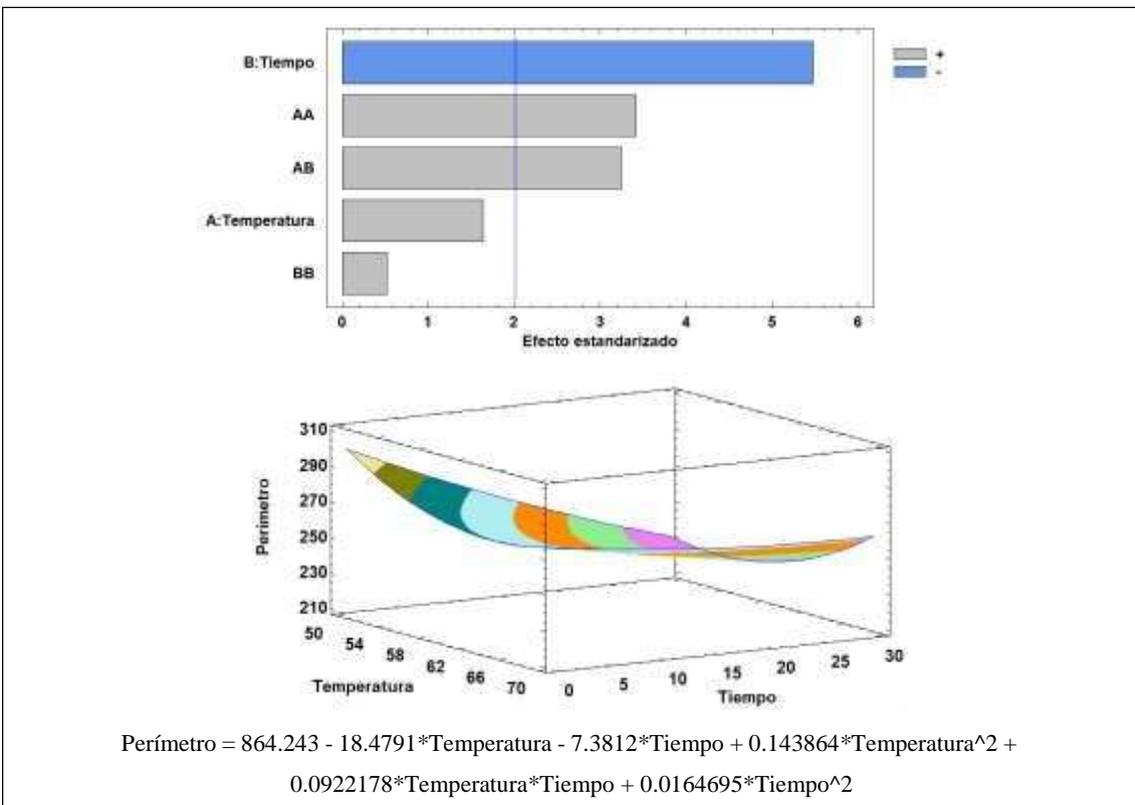
resultado es consistente con los hallazgos de este estudio, donde la temperatura fue el principal factor influyente.

La **compactación celular** se produce cuando las células pierden agua y se comprimen debido a la evaporación. Este fenómeno es más pronunciado con el paso del tiempo, ya que las células se contraen progresivamente durante el secado (Bourne, 2002). Este patrón es coherente con los resultados encontrados en el estudio.

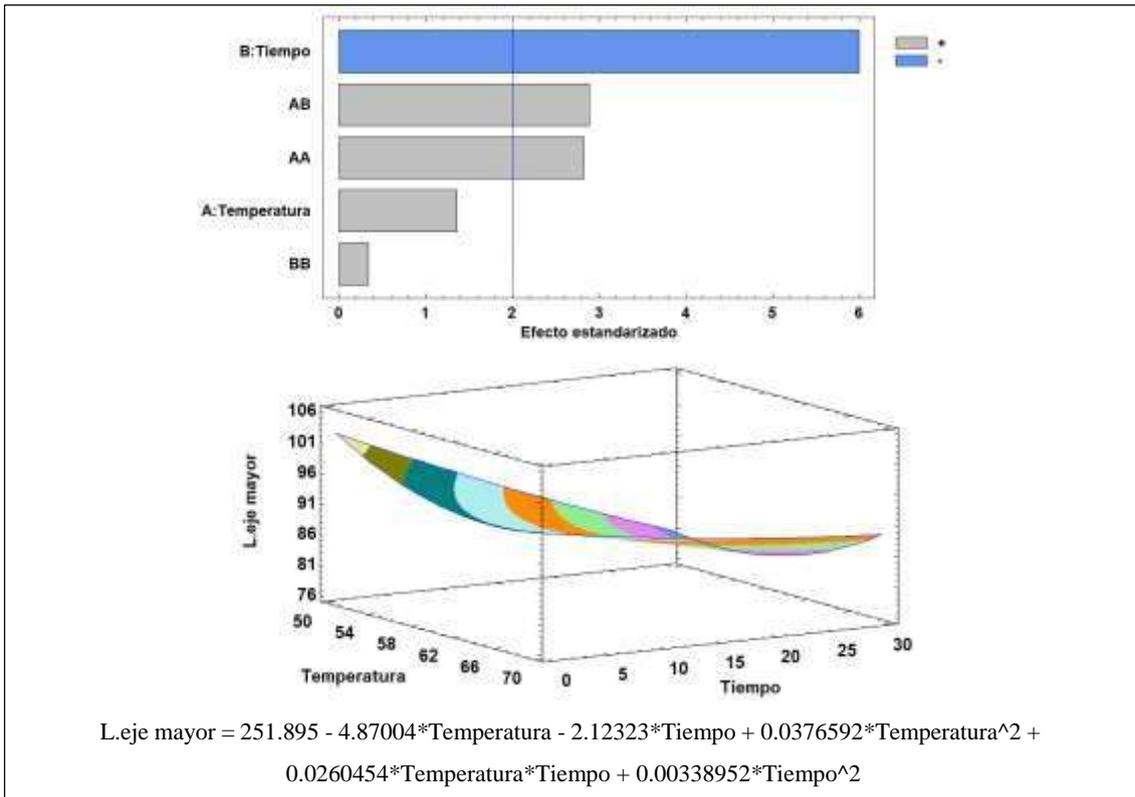
Los resultados de este análisis multifactorial indican que tanto **el tiempo** como **la temperatura** influyen significativamente en las características microestructurales de las células de papa durante el proceso de deshidratación. En general, el **tiempo** fue el factor dominante en muchos parámetros, especialmente en la reducción del área celular, el perímetro y la longitud de los ejes mayor y menor. La **temperatura** tuvo un impacto más notable en la redondez y elongación celular. Estos resultados son consistentes con la literatura existente sobre el efecto de estos dos factores en la microestructura de los productos deshidratados, confirmando que el tiempo de secado y la temperatura son dos factores críticos para controlar las características finales del producto deshidratado.



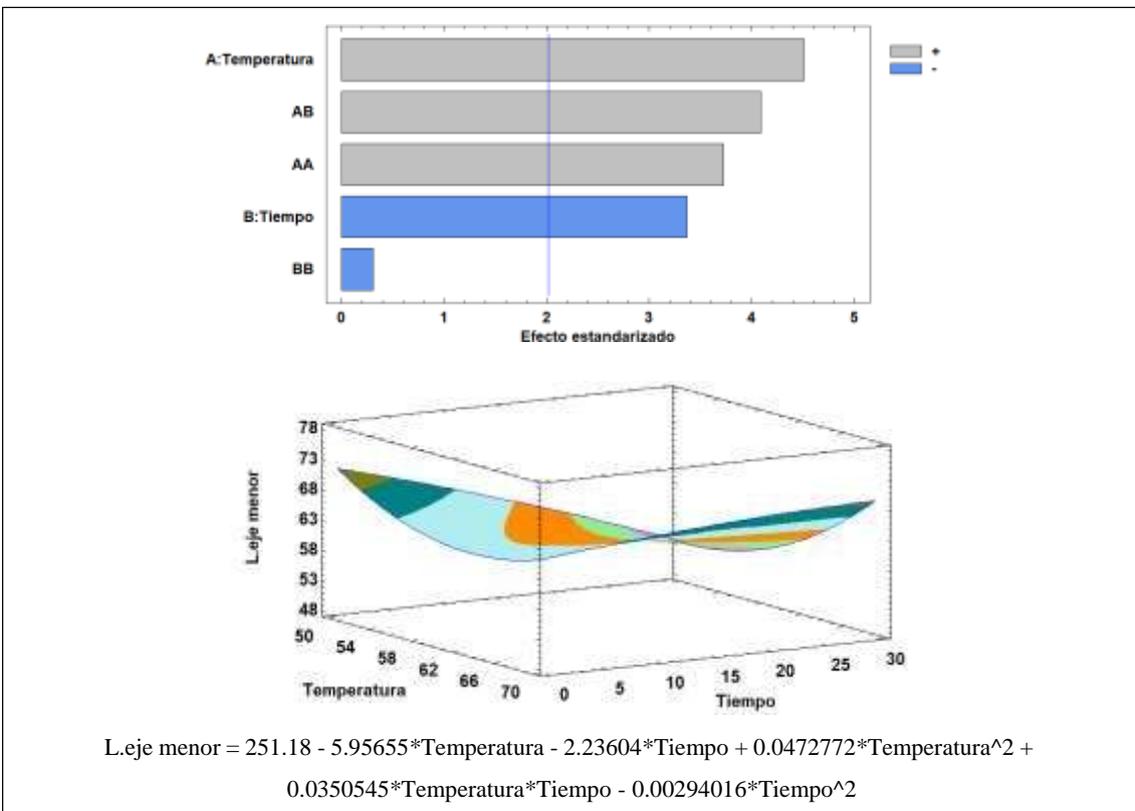
**Figura 39. Efecto del tiempo y temperatura sobre el área celular**



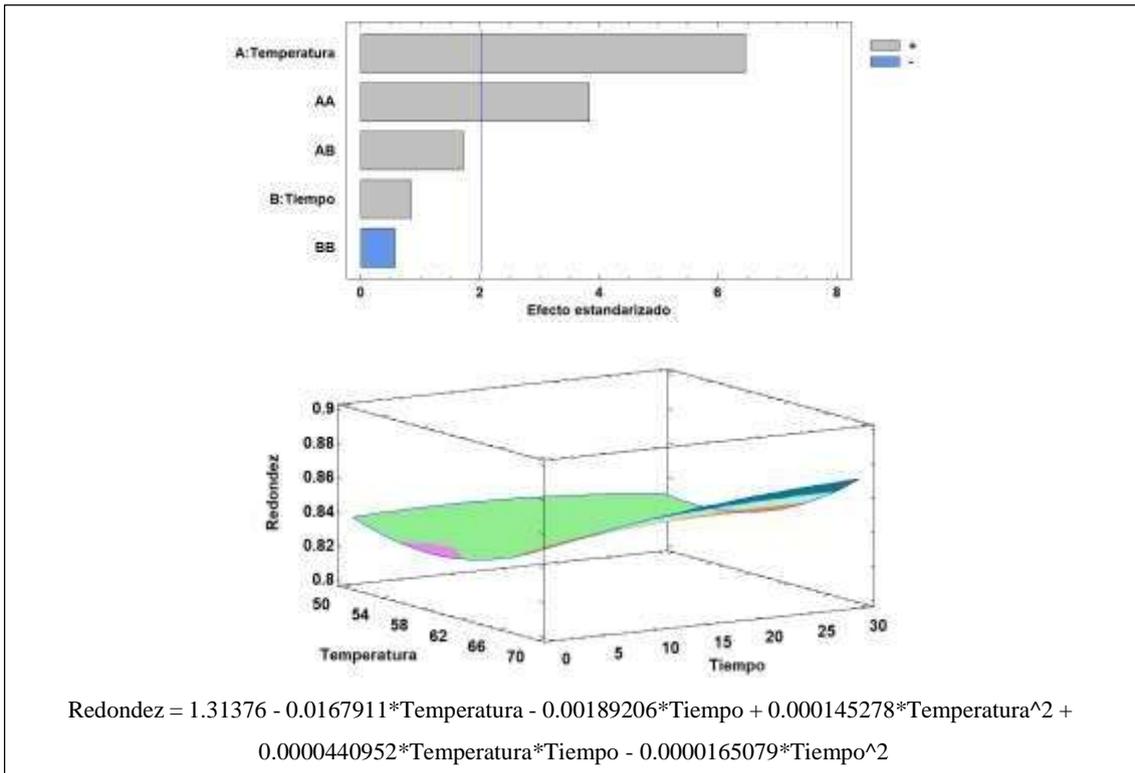
**Figura 40. Efecto del tiempo y temperatura sobre el perímetro celular**



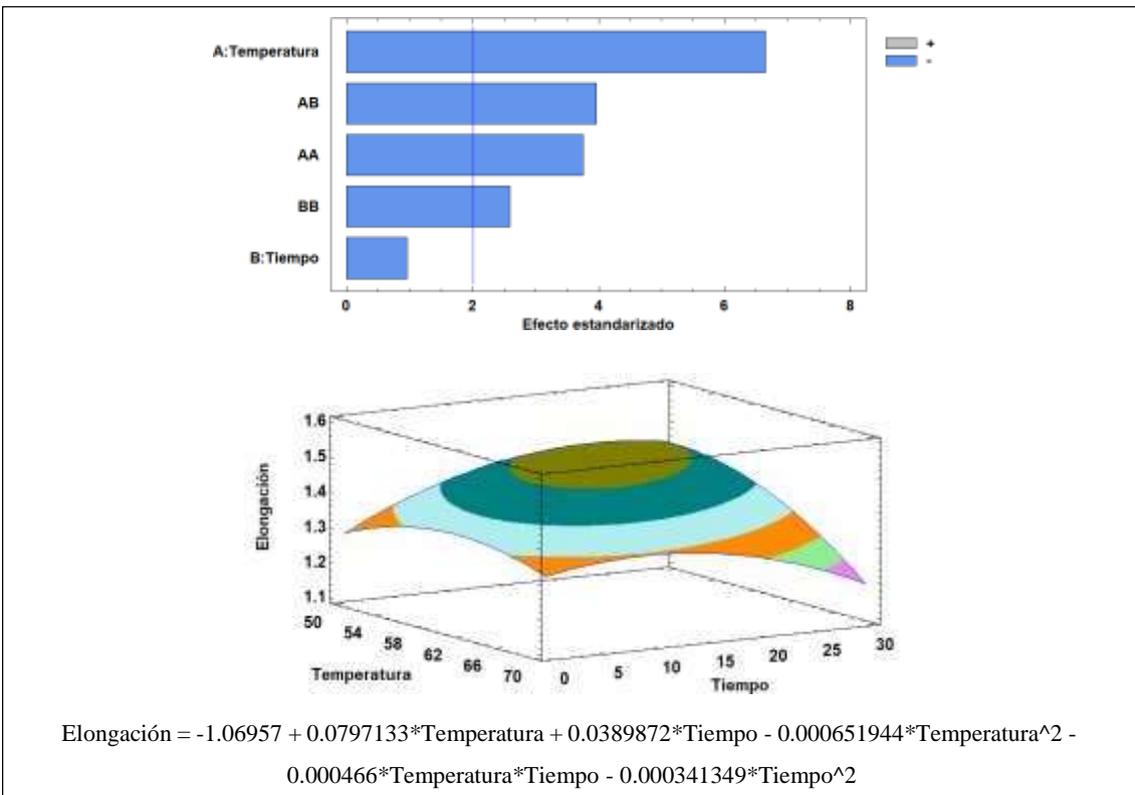
**Figura 41. Efecto del tiempo y temperatura sobre la longitud del eje mayor celular**



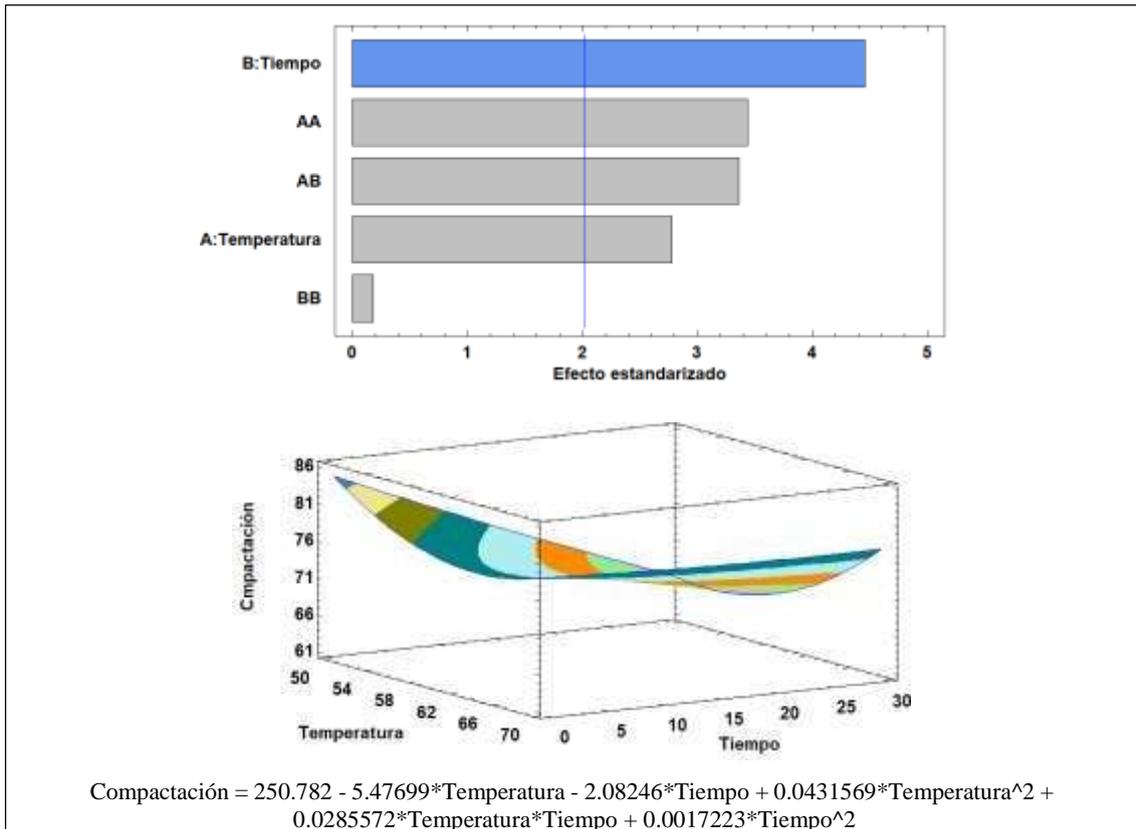
**Figura 42. Efecto del tiempo y temperatura sobre la longitud del eje menor celular**



**Figura 43. Efecto del tiempo y temperatura sobre la longitud del eje menor celular**



**Figura 44. Efecto del tiempo y temperatura sobre la elongación celular**



**Figura 45. Efecto del tiempo y temperatura sobre la compactación celular**

Podemos observar que la estructura de los alimentos está formada por varios componentes y sus interacciones mutuas y está estrechamente relacionada con la calidad de los materiales alimentarios. Por lo tanto, los cambios microestructurales durante el procesamiento de los materiales alimentarios deben tenerse en cuenta en el modelo matemático y en el diseño de un sistema (Joardder et al., 2017). Por ejemplo, durante el secado de la papa variedad huevo de indio en la presente tesis, la microestructura del material alimenticio de origen vegetal colapsa. Esto ocurre debido a la pérdida de presión de turgencia y la rotura de las membranas celulares. Por ejemplo, la calidad de los frutos secos, como el color y los nutrientes, depende en gran medida del nivel de cambios estructurales que tienen lugar durante el procesamiento. Los nuevos enfoques de secado se basan principalmente en la comprensión adecuada de la arquitectura y organización de las microestructuras.

Otros procesos revisados sobre deshidratación se encontró que un pretratamiento como deshidratación osmótico antes del tratamiento de secado convencional tuvo un efecto positivo en la calidad general final del producto (Carciofi et al., 2012). Los estudios microscópicos de la estructura de los alimentos mostraron que el tratamiento osmótico aumenta el grosor de la pared celular. Algunos investigadores introdujeron el secado por microondas intermitente de productos alimenticios encontraron que un proceso de secado intermitente puede proporcionar una mejor retención de ácido ascórbico que los otros métodos de secado, ya que se produce un calentamiento menos intenso durante el secado intermitente, por lo que se mejora la retención de las paredes celulares, protegiendo eficazmente el contenido de las células.

Por ello podemos tener claro que la microestructura es una parte importante de las propiedades mecánicas del producto, que incluye la textura y firmeza del material alimenticio. Si la microestructura está muy dañada, la calidad del producto se degradaría significativamente.

Las condiciones del proceso afectan la calidad y estabilidad de los productos alimenticios (Rahman et al., 2018). En la mayoría de los casos, los alimentos sufren varios cambios físicos, químicos y nutricionales que pueden resultar en cambios en los atributos de calidad nutritiva y organoléptica del producto. La transferencia de calor y masa durante el procesamiento de alimentos tiene un efecto directo sobre las propiedades físicas y la microestructura, lo que lleva a cambios significativos en los componentes nutricionales de los alimentos procesados. La contracción es también uno de los fenómenos más importantes que se producen durante el procesamiento de alimentos. Los materiales alimenticios de origen vegetal, en particular, experimentan una gran contracción durante el procesamiento de los alimentos (por ejemplo, el secado) ya que estos materiales contienen una alta proporción de humedad. Además, la estabilidad de los alimentos también es una preocupación durante cualquier procesamiento de alimentos. La

estabilidad de los alimentos se refiere a la capacidad de restringir cualquier reacción y cambios no deseados durante el procesamiento de los alimentos.

Por lo tanto, el conocimiento sobre cómo cambia la calidad y estabilidad de los alimentos durante el procesamiento de alimentos es importante para la selección, estimación, caracterización y mejora del proceso de la calidad de un producto seco (Rahman et al., 2018). La comprensión de las propiedades microestructurales de los materiales alimentarios también es importante para el control adecuado de las operaciones de procesamiento de alimentos, así como para mejorar la calidad del producto final.

La relación entre los cambios microestructurales y los atributos de calidad, como el cambio del tamaño de los poros y el color, se presenta con los resultados experimentales.

La relación entre la microestructura y la calidad de los alimentos es un área interesante en la investigación de la ingeniería alimentaria. La comprensión adecuada de esta relación ayudará a los futuros investigadores a diseñar un sistema de procesamiento de alimentos optimizado.

#### **4.5. Efecto del Tiempo y temperatura sobre los parámetros de color**

La diferencia más llamativa entre las preparaciones obtenidas con los tratamientos fue el color del producto, ya que solo el parámetro de brillo ( $L^*$ ) tuvo una diferencia significativa para la temperatura y el tiempo ( $p < 0.05$ ); las otras dos propiedades de color  $a^*$  y  $b^*$  no tuvieron ningún efecto significativo.

El brillo ( $L^*$ ) es un parámetro de color muy sensible al tratamiento térmico. Durante el secado, las altas temperaturas pueden causar una oxidación de los pigmentos (como la clorofila y los carotenoides), afectando negativamente el brillo del producto (Singh et al., 2007). Se ha observado que a temperaturas elevadas, los productos tienden a perder brillo debido a la descomposición de los pigmentos naturales (Martins et al., 2012). En este

sentido, los resultados de este estudio son consistentes con estos hallazgos, donde la variabilidad en el brillo ( $L^*$ ) fue significativa para los diferentes tratamientos de secado.

La literatura indica que el **valor  $a^*$** , que se refiere a la intensidad del color rojo-verde, y el **valor  $b^*$** , relacionado con el color amarillo-azul, pueden verse alterados por el **procesamiento térmico**. Sin embargo, el efecto depende de los **pigmentos específicos presentes** en el material. Por ejemplo, el valor  **$a^*$**  puede verse afectado por la **oxidación de compuestos fenólicos** y el  **$b^*$**  por la **descomposición de carotenoides**, pero esto depende de la **temperatura y tiempo de exposición** (Duarte et al., 2014). En muchos casos, las alteraciones de estos parámetros pueden ser menores si la **temperatura de secado** no es extremadamente alta o si el proceso de secado no es muy prolongado (Rodríguez et al., 2016). Estos resultados son consistentes con los hallazgos de este estudio, donde no se observó un cambio significativo en los parámetros  **$a^*$**  y  **$b^*$** .

El secado de frutas y vegetales es conocido por **alterar el color** debido a la degradación de los **pigmentos naturales**. En el caso de la papa, el **color** puede ser afectado principalmente por la **actividad enzimática** y la **oxidación** que ocurre a temperaturas elevadas (Ratti, 2001). La variación en los valores de  **$L^*$** ,  **$a^*$**  y  **$b^*$**  depende del tipo de material y los **condiciones específicas de secado**. De acuerdo con varios estudios, el secado rápido a **altas temperaturas** tiende a **oscurecer** el producto (lo que resulta en una disminución en el valor  **$L$** ), mientras que temperaturas más bajas pueden **preservar mejor los colores** naturales, manteniendo el **brillo** (Martins et al., 2012).

Los resultados obtenidos en este estudio, en los cuales solo el parámetro  **$L^*$**  (brillo) mostró una diferencia significativa debido al **tiempo y temperatura**, son consistentes con la literatura que sugiere que **el brillo** es uno de los parámetros de color más sensibles a los tratamientos térmicos. El **brillo** disminuye con temperaturas más altas o tiempos

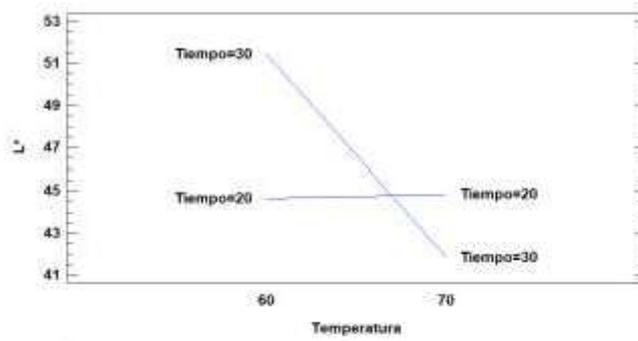
más prolongados de secado debido a la **oxidación de pigmentos**. Por otro lado, los parámetros **a\*** y **b\***, que están relacionados con las tonalidades rojas y amarillas, no mostraron efectos significativos, lo que sugiere que estos aspectos del color son menos sensibles a las condiciones de secado evaluadas en este estudio, corroborando otros estudios que indican que estos parámetros pueden ser más estables bajo condiciones de secado moderado.

Los resultados obtenidos en este estudio, en los cuales solo el parámetro **L\*** (brillo) mostró una diferencia significativa debido al tiempo y temperatura, son consistentes con la literatura que sugiere que el brillo es uno de los parámetros de color más sensibles a los tratamientos térmicos. El brillo disminuye con temperaturas más altas o tiempos más prolongados de secado debido a la oxidación de pigmentos. Por otro lado, los parámetros **a\*** y **b\***, que están relacionados con las tonalidades rojas y amarillas, no mostraron efectos significativos, lo que sugiere que estos aspectos del color son menos sensibles a las condiciones de secado evaluadas en este estudio, corroborando otros estudios que indican que estos parámetros pueden ser más estables bajo condiciones de secado moderado.

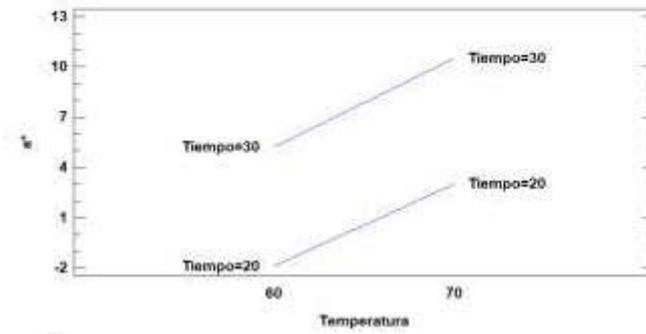
**Tabla 7. Datos de color**

Temperatura °C	Tiempo Minutos	L	a	b
60	20	44.64±4.5	-1.92±0.6	11.18±0.7
60	30	51.44±5.2	5.21±0.9	25.51±2.3
70	20	44.84±3.5	3.02±0.2	16.82±1.7
70	30	41.84±6.1	10.52±0.6	27.37±1.9

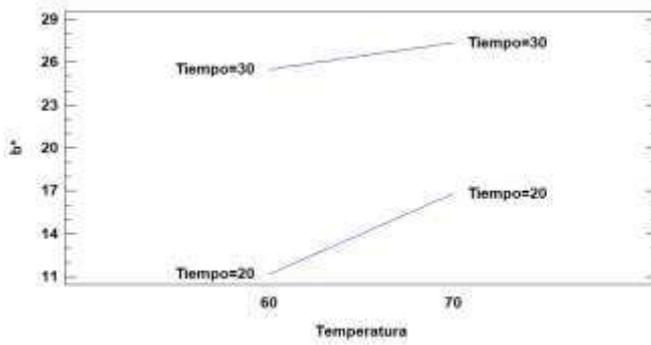
La figura 46 muestra las interacciones temperatura – tiempo para cada parámetro, solo se observa un efecto significativo de la temperatura en mayor nivel seguido por el tiempo para la luminosidad (**L\***).



a



b



c

Figura 46. Efectos combinados en parámetros de color

## V. CONCLUSIONES

1. Se logró cuantificar siete parámetros microestructurales en rodajas de papa de la variedad *Huevo de Indio*, evaluando el efecto combinado de la temperatura y el tiempo de tratamiento térmico. Entre estos, los parámetros de **área celular**, **perímetro celular** y **redondez** mostraron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ), lo que indica que son los más sensibles a los cambios estructurales inducidos por el proceso térmico. Estos resultados evidencian que dichas variables representan de manera más precisa las alteraciones microestructurales en la papa bajo condiciones de calor.

En cuanto a las propiedades de color, únicamente el parámetro de **brillo** ( $L^*$ ) presentó diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) como resultado del tratamiento térmico. Por el contrario, los parámetros  $a^*$  (rojo-verde) y  $b^*$  (amarillo-azul) no mostraron variaciones significativas, lo que indica que el efecto de la temperatura y el tiempo fue perceptible únicamente en la luminosidad del producto.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- 1.** El estudio de la microestructura es clave para entender los efectos reales que provocan los distintos tratamientos durante el procesamiento de alimentos. Por ello, se recomienda continuar investigando productos con características estructurales similares como frutas y tubérculos utilizando temperaturas más moderadas que minimicen el deterioro celular, con el objetivo de conservar tanto la estructura como la funcionalidad de los tejidos.
- 2.** Desde una perspectiva experimental, sería conveniente aplicar métodos de secado o calentamiento en etapas controladas (como curvas de temperatura escalonada), lo que facilitaría la identificación precisa de los puntos críticos en los que se produce daño estructural. Esta estrategia ayudaría a desarrollar modelos predictivos más precisos sobre la evolución microestructural bajo diversas condiciones de procesamiento.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, J. M. (2000). Microstructure and Food Product Engineering. *Food Technology*, 54(11), 56-X. Scopus.
- Aguilera, J. M. (2005). Why food microstructure? *Journal of Food Engineering*, 67(1), 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.050>
- Aguilera, J. M., & Stanley, D. W. (1999). *Microstructural Principles of Food Processing and Engineering* (2nd ed.). Aspen Publishers.
- Aravindakshan, S., Nguyen, T. H. A., Kyomugasho, C., Buvé, C., Dewettinck, K., Van Loey, A., & Hendrickx, M. E. (2021). The Impact of Drying and Rehydration on the Structural Properties and Quality Attributes of Pre-Cooked Dried Beans. *Foods*, 10(7), 1665. <https://doi.org/10.3390/foods10071665>
- Aregawi, W. A., Defraeye, T., Verboven, P., Herremans, E., De Roeck, G., & Nicolai, B. M. (2013). Modeling of Coupled Water Transport and Large Deformation During Dehydration of Apple Tissue. *Food and Bioprocess Technology*, 6(8), 1963-1978. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0862-1>.
- Barbosa-Cánovas, G. V., Vega-Mercado, H., & Tapia, M. S. (2005). *Dehydration of Foods*. Springer.
- Carciofi, B. A. M., Prat, M., & Laurindo, J. B. (2012). Dynamics of vacuum impregnation of apples: Experimental data and simulation results using a VOF model. *Journal of Food Engineering*, 113(2), 337-343. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.05.023>
- Castro, W., Yoshida, H., Gil, L. S., López, L. M., Oblitas, J., De-la-Torre, M., & Avila-George, H. (2019). Microstructural analysis in foods of vegetal origin: An

- approach with convolutional neural networks. *2019 8th International Conference On Software Process Improvement (CIMPS)*, 1-5.  
<https://doi.org/10.1109/CIMPS49236.2019.9082421>
- Chen, J., & Rosenthal, A. (2015). 1—Food texture and structure. En J. Chen & A. Rosenthal (Eds.), *Modifying Food Texture* (pp. 3-24). Woodhead Publishing.  
<https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-333-1.00001-2>
- Choi, S.-G., & Kerr, W. L. (2003). Effects of chemical modification of wheat starch on molecular mobility as studied by pulsed <sup>1</sup>H NMR. *LWT - Food Science and Technology*, 36(1), 105-112. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(02\)00200-1](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(02)00200-1)
- Copado, C. N., Julio, L. M., Diehl, B. W. K., Ixtaina, V. Y., & Tomás, M. C. (2021). Multilayer microencapsulation of chia seed oil by spray-drying using electrostatic deposition technology. *LWT*, 152. Scopus.  
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112206>
- de Assumpção Pereira-da-Silva, M., & Ferri, F. A. (2017). 1—Scanning Electron Microscopy. En A. L. Da Róz, M. Ferreira, F. de Lima Leite, & O. N. Oliveira (Eds.), *Nanocharacterization Techniques* (pp. 1-35). William Andrew Publishing.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-49778-7.00001-1>
- Day, R. A., & Gastel, B. (2011). *How to Write and Publish a Scientific Paper* (7th ed.). Greenwood.
- Durán, M., Pedreschi, F., Moyano, P., & Troncoso, E. (2007). Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 257-265. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.11.004>
- Duarte, A. R., Castro, M. A., & Rodrigues, R. C. (2014). Effect of drying and storage on the color and nutritional quality of fruits and vegetables. *Journal of Food Science*,

- Rodriguez, F., & Martinez, C. (2016). Changes in color and composition of dried fruits under varying drying conditions. *Food Chemistry*, 208, 28-34.
- Ge, F., Wu, P., & Chen, X. D. (2021). Evolutions of rheology, microstructure and starch hydrolysis of pumpkin-enriched bread during simulated gastrointestinal digestion. *International Journal of Food Science and Technology*. Scopus. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15273>
- Gregersen, S. B., Glover, Z. J., Wiking, L., Simonsen, A. C., Bertelsen, K., Pedersen, B., Poulsen, K. R., Andersen, U., & Hammershøj, M. (2021). Microstructure and rheology of acid milk gels and stirred yoghurts –quantification of process-induced changes by auto- and cross correlation image analysis. *Food Hydrocolloids*, 111. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106269>
- Gruber, S., Vorhauer-Huget, N., & Foerst, P. (2021). In situ micro-computed tomography to study microstructure and sublimation front during freeze-drying. *Food Structure*, 29. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100213>
- Hajalilou, A., & Ghadimi, L. S. (2019). 30—Transmission electron microscopies for food quality evaluation. En J. Zhong & X. Wang (Eds.), *Evaluation Technologies for Food Quality* (pp. 763-792). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814217-2.00030-5>
- Hayta, M., Dogan, M., & Aslan Türker, D. (2020). Rheology and microstructure of galactomannan–xanthan gum systems at different pH values. *Journal of Food Process Engineering*, 43(12). Scopus. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13573>
- Hernández Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.

- Joardder, M. U. H., Kumar, C., & Karim, M. A. (2017). Food structure: Its formation and relationships with other properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), 1190-1205. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.971354>.
- Jancsó, P. T., Fekete, A., & Friedrich, L. (2001). Relationships between mechanical properties and structure of potato tuber (*Solanum tuberosum* L.). *Acta Alimentaria*, 30(3), 311–322. <https://doi.org/10.1556/AAlim.30.2001.3.7>
- Karim, M. A., Rahman, M. M., Pham, N. D., & Fawzia, S. (2018). 3—Food Microstructure as affected by processing and its effect on quality and stability. En S. Devahastin (Ed.), *Food Microstructure and Its Relationship with Quality and Stability* (pp. 43-57). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100764-8.00003-4>
- Li, P., Li, X., Li, A., Yu, W., Guo, C., Yang, X., & Guo, Y. (2020). Microstructure and rheological behavior of mixed konjac glucomannan and xanthan induced by thermo-alkali treatment. *Scientia Agricultura Sinica*, 53(18), 3792-3804. Scopus. <https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2020.18.014>
- Limón-Valenzuela, V., Aguilar-Palazuelos, E., Zazueta-Morales, J. de J., & Martínez-Bustos, F. (2017). Propiedades Microestructurales Y De Formación De Pasta De Pellets Extrudidos Elaborados a Partir De Almidón De Maíz Enriquecidos Con Mcp Y Concentrado Proteínico De Leche. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(1), 193-205.
- Lillford, P. J., & Hermansson, A. M. (2007). Food microstructure: The past, present, and future. *Food Hydrocolloids*, 21(4), 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.10.012>.

- Maunsbach, A. B., & Afzelius, B. A. (1999). Chapter 1—Micrograph Interpretation. En A. B. Maunsbach & B. A. Afzelius (Eds.), *Biomedical Electron Microscopy* (pp. 1-31). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012480610-8/50003-2>
- Mebatsion, H. K., Verboven, P., Verlinden, B. E., Ho, Q. T., Nguyen, T. A., & Nicolai, B. M. (2006). Microscale modelling of fruit tissue using Voronoi tessellations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 52(1), 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.01.002>
- Mendoza, F., Verboven, P., Mebatsion, H. K., Kerckhofs, G., Wevers, M., & Nicolai, B. (2007). Three-dimensional pore space quantification of apple tissue using X-ray computed microtomography. *Planta*, 226(3), 559-570. <https://doi.org/10.1007/s00425-007-0504-4>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). Wiley.
- Oblitas, J., Mejia, J., De-la-Torre, M., Avila-George, H., Seguí Gil, L., Mayor López, L., Ibarz, A., & Castro, W. (2021). Classification of the Microstructural Elements of the Vegetal Tissue of the Pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) Using Convolutional Neural Networks. *Applied Sciences*, 11(4), 1581. <https://doi.org/10.3390/app11041581>.
- Oliveira, F. A. R., & Oliveira, J. C. (1999). *Processing foods: Quality optimization and process assessment*. CRC Press.
- Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A.-J. (2013). Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(1), 36–60.
- Panchal, B., Truong, T., Prakash, S., Bansal, N., & Bhandari, B. (2021). Influence of emulsifiers and dairy ingredients on manufacturing, microstructure, and physical

- properties of butter. *Foods*, 10(5). Scopus.  
<https://doi.org/10.3390/foods10051140>
- Pirayeshfar, B., & Sadeghi, A. (2019). Image processing techniques for microstructural analysis of potato tissues. *Food Structure*, 19, 100103.  
<https://doi.org/10.1016/j.foostr.2019.100103>
- Rahman, M. M., Joardder, M. U. H., Khan, M. I. H., Pham, N. D., & Karim, M. A. (2018). Multi-scale model of food drying: Current status and challenges. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(5), 858-876.  
<https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1227299>
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 311-319.
- Martins, S. I. F. S., & Cunha, L. M. (2012). Impact of drying on the color and texture of fruits and vegetables. *Food Science and Technology International*, 18(1), 19-30.  
*Red SciELO | SciELO.org*. (s. f.). Recuperado 20 de agosto de 2021, de <https://www.scielo.org/es/sobre-el-scielo/red-scielo/>
- Ruedt, C., Gibis, M., & Weiss, J. (2021). Influence of muscle type and microstructure on iridescence in cooked, cured pork meat products. *Journal of Food Science*, 86(8), 3563-3573. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15832>
- Scanning electron microscope | Definition, Images, Uses, Advantages, & Facts*. (s. f.). Encyclopedia Britannica. Recuperado 24 de agosto de 2021, de <https://www.britannica.com/technology/scanning-electron-microscope>
- Schreuders, F. K. G., Schlangen, M., Kyriakopoulou, K., Boom, R. M., & van der Goot, A. J. (2021). Texture methods for evaluating meat and meat analogue structures: A review. *Food Control*, 127, 108103.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108103>

- Sharma, S., & Prabhasankar, P. (2021). Effect of whole hempseed flour incorporation on the rheological, microstructural and nutritional characteristics of chapati – Indian flatbread. *LWT*, *137*. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110491>
- Shi, S., Feng, J., An, G., Kong, B., Wang, H., Pan, N., & Xia, X. (2021). Dynamics of heat transfer and moisture in beef jerky during hot air drying. *Meat Science*, *182*. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108638>
- Singh, J., Kaur, L., & McCarthy, O. J. (2007). Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications—A review. *Food Hydrocolloids*, *21*(1), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.02.006>
- Song, X., Sun, X., Ban, Q., Cheng, J., Zhang, S., & Guo, M. (2020). Gelation and microstructural properties of a millet-based yogurt-like product using polymerized whey protein and xanthan gum as thickening agents. *Journal of Food Science*, *85*(11), 3927-3933. Scopus. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15504>
- Su, D., Zhu, X.-D., Wang, Y., Li, D., & Wang, L.-J. (2021). Impact of high-pressure homogenization on the microstructure and rheological properties of citrus fiber. *International Journal of Food Engineering*, *17*(4), 299-308. Scopus. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0206>.
- Sun, D. W. (Ed.). (2008). *Computer vision technology for food quality evaluation*. Academic Press.
- Transmission electron microscope / instrument*. (s. f.). Encyclopedia Britannica. Recuperado 24 de agosto de 2021, de <https://www.britannica.com/technology/transmission-electron-microscope>

- Verboven, P., Defraeye, T., & Nicolai, B. (2018). 1 - Measurement and visualization of food microstructure: Fundamentals and recent advances. En S. Devahastin (Ed.), *Food Microstructure and Its Relationship with Quality and Stability* (pp. 3-28). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100764-8.00001-0>
- Watharkar, R. B., Chakraborty, S., Srivastav, P. P., & Srivastava, B. (2021). Foaming and foam mat drying characteristics of ripe banana [*Musa balbisiana* (BB)] pulp. *Journal of Food Process Engineering*, 44(8), e13726. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13726>
- Wu, B., Guo, X., Guo, Y., Ma, H., & Zhou, C. (2021). Enhancing jackfruit infrared drying by combining ultrasound treatments: Effect on drying characteristics, quality properties and microstructure. *Food Chemistry*, 358, 129845. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129845>
- Xu, F., Zhang, L., Liu, W., Liu, Q., Wang, F., Zhang, H., Hu, H., & Blecker, C. (2021). Physicochemical and structural characterization of potato starch with different degrees of gelatinization. *Foods*, 10(5). Scopus. <https://doi.org/10.3390/foods10051104>
- Xu, W., Zheng, S., Sun, H., Ning, Y., Jia, Y., Luo, D., Li, Y., & Shah, B. R. (2021). Rheological behavior and microstructure of Pickering emulsions based on different concentrations of gliadin/sodium caseinate nanoparticles. *European Food Research and Technology*. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03827-6>
- Yang, M., Li, N., Wang, A., Tong, L., Wang, L., Yue, Y., Yao, J., Zhou, S., & Liu, L. (2021). Evaluation of rheological properties, microstructure and water mobility in buns dough enriched in aleurone flour modified by enzyme combinations.

*International Journal of Food Science and Technology*. Scopus.

<https://doi.org/10.1111/ijfs.15170>

Yang, Z.-H., Zhou, H.-M., & Bai, Y.-P. (2021). Effects of vacuum ultrasonic treatment on the texture of vegetarian meatloaves made from textured wheat protein. *Food Chemistry*, 361, 130058. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130058>

Zhong, Y., & Zheng, Y. (2016). Microstructural changes of potato during the drying process. *Food Science and Technology*, 49(5), 1098-1105. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.06.009>

González, M., & Pérez, F. (2017). Effect of drying conditions on the structural properties of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 196, 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.11.020>

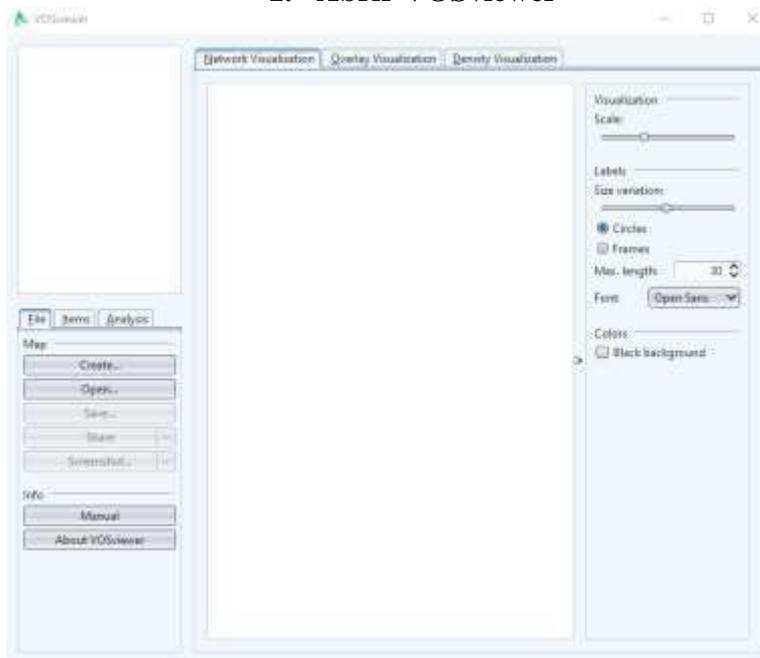
Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Zhou, W. (2014). *Fundamentals of drying in food processing*. Elsevier.

Campos, M. L., Santos, A. S., & Silva, A. F. (2013). *Effect of drying temperature on the microstructure and texture of potato slices*. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(3), 512-519.

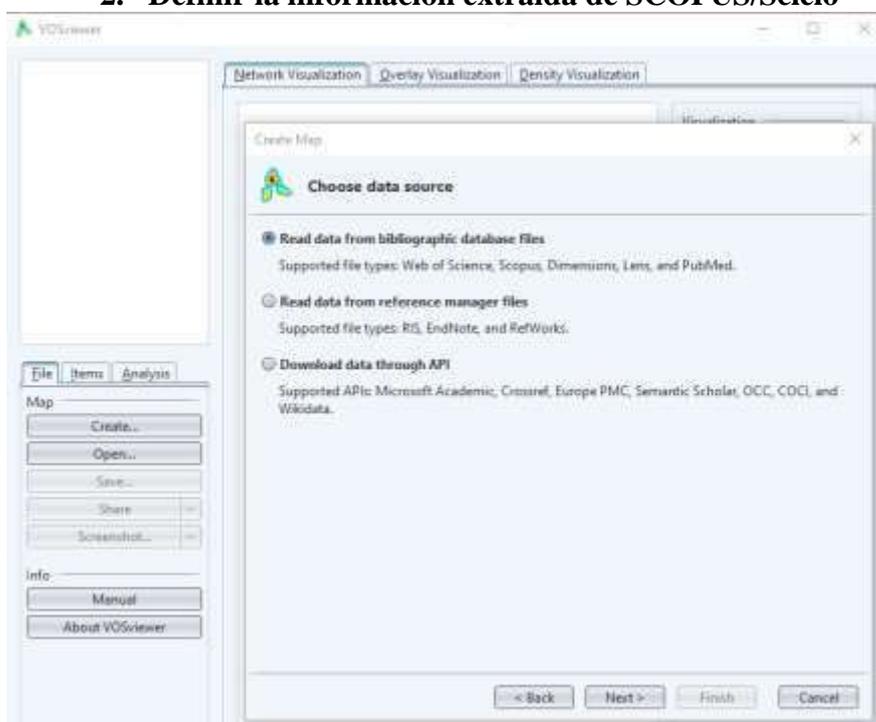
Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of industrial drying*. CRC Press.

# ANEXO 1 Procesamiento de Información Científicas en la Herramienta VosViewer

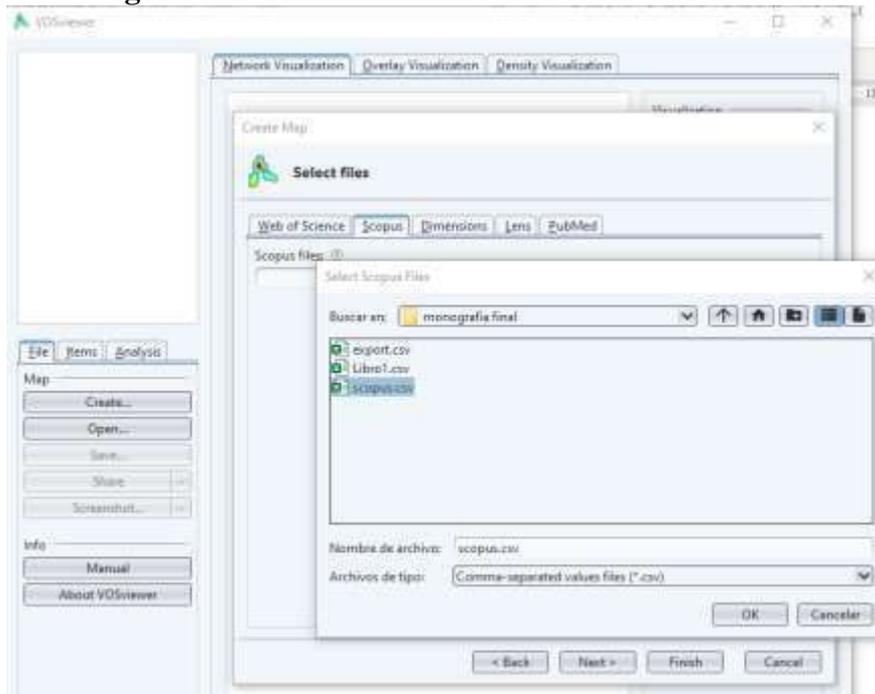
## 1. Abrir VOSviewer



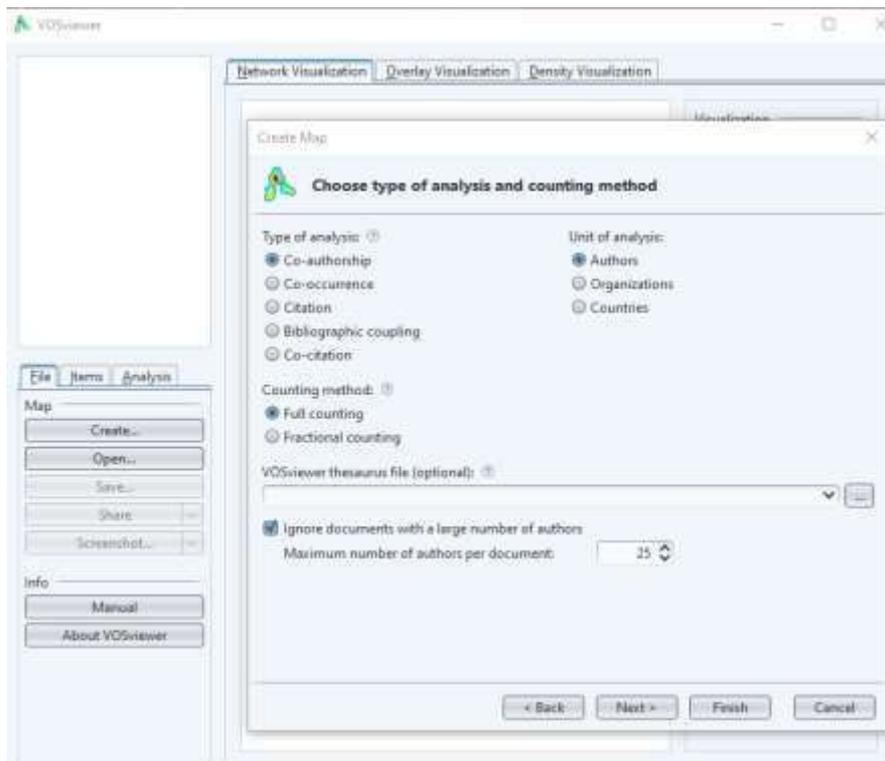
## 2. Definir la información extraída de SCOPUS/Scielo



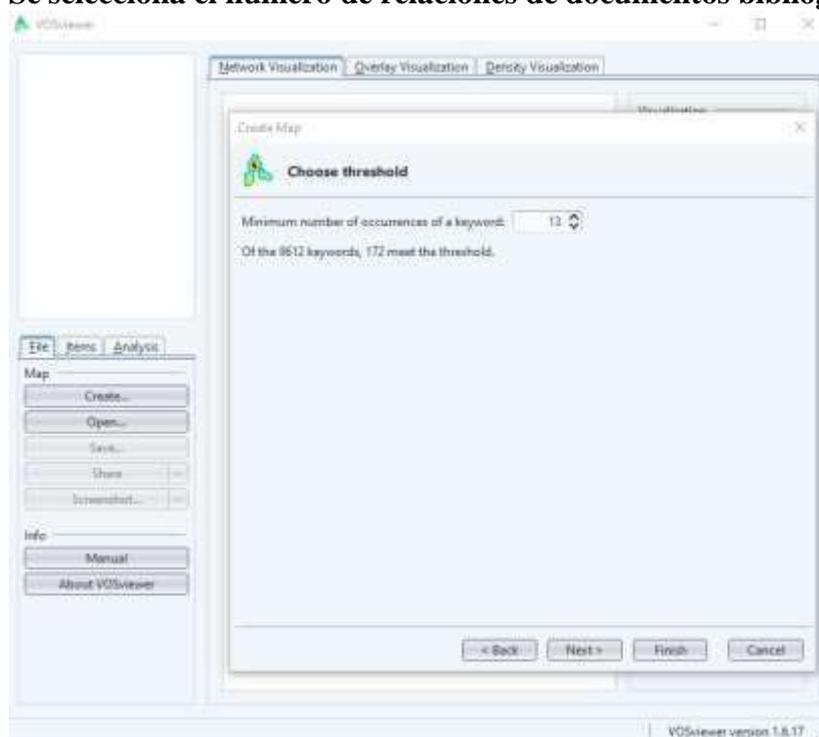
### 3. Cargar la información extraída de las referencias consultadas



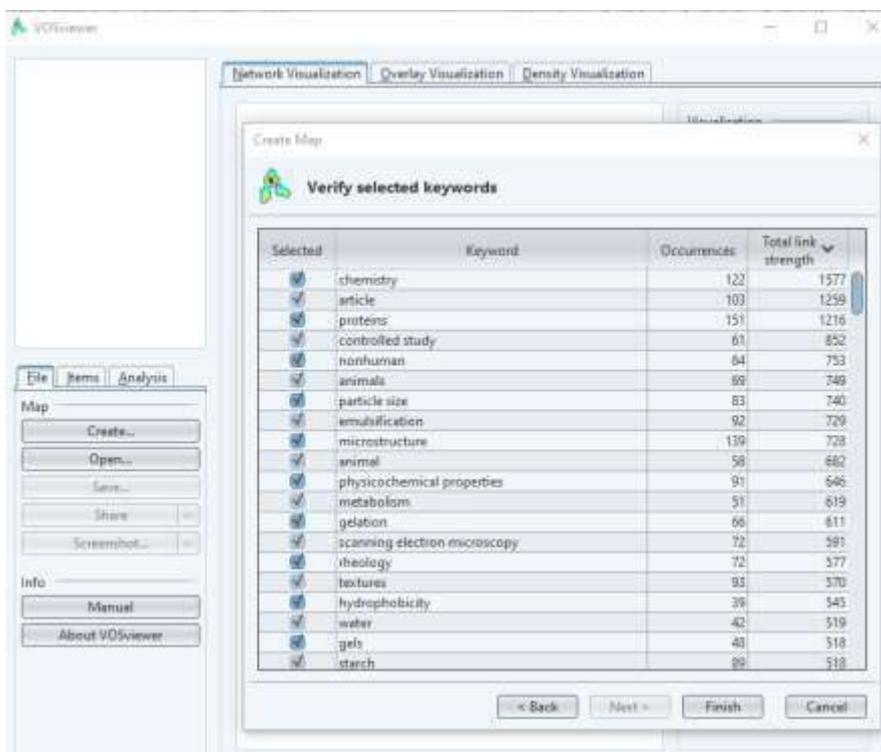
### 4. Ya cargado el sistema se puede analizar por temas y sus relaciones.



5. Se selecciona el numero de relaciones de documentos bibliográficos



6. Se revisa las palabras claves de la bibliografía revisada y se marca solo la de interés para la tesis





## ANEXO 2. ANALISIS DE VARIANZA PARA MICROESTRUCTURA

### Análisis de Varianza para Área

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	1.87462E6	1	1.87462E6	7.38	0.0093
B:Tiempo	4.95505E6	1	4.95505E6	19.50	0.0001
AA	2.91757E6	1	2.91757E6	11.48	0.0014
AB	2.81441E6	1	2.81441E6	11.08	0.0017
BB	20554.7	1	20554.7	0.08	0.7774
bloques	5697.0	2	2848.5	0.01	0.9889
Error total	1.16876E7	46	254079.		
Total (corr.)	2.42755E7	53			

### Análisis de Varianza para Compactación

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	146.301	1	146.301	7.73	0.0079
B:Tiempo	375.337	1	375.337	19.83	0.0001
AA	223.503	1	223.503	11.81	0.0013
AB	214.073	1	214.073	11.31	0.0016
BB	0.622928	1	0.622928	0.03	0.8569
bloques	0.337059	2	0.168529	0.01	0.9911
Error total	870.835	46	18.9312		
Total (corr.)	1831.01	53			

### Análisis de Varianza para Elongación

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	0.1604	1	0.1604	44.23	0.0000
B:Tiempo	0.0033327	1	0.0033327	0.92	0.3428
AA	0.0510038	1	0.0510038	14.06	0.0005
AB	0.0570035	1	0.0570035	15.72	0.0003
BB	0.024469	1	0.024469	6.75	0.0126
bloques	0.00105381	2	0.000526907	0.15	0.8652
Error total	0.166831	46	0.00362675		
Total (corr.)	0.464094	53			

### Análisis de Varianza para Redondez

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	0.00719669	1	0.00719669	41.70	0.0000
B:Tiempo	0.000121792	1	0.000121792	0.71	0.4052
AA	0.00253268	1	0.00253268	14.67	0.0004
AB	0.000510402	1	0.000510402	2.96	0.0922
BB	0.0000572275	1	0.0000572275	0.33	0.5675
bloques	0.000248259	2	0.00012413	0.72	0.4925
Error total	0.00793949	46	0.000172598		
Total (corr.)	0.0186065	53			

**Análisis de Varianza para L.eje menor**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	392.449	1	392.449	20.30	0.0000
B:Tiempo	218.697	1	218.697	11.31	0.0016
AA	268.216	1	268.216	13.87	0.0005
AB	322.564	1	322.564	16.68	0.0002
BB	1.81535	1	1.81535	0.09	0.7607
bloques	19.768	2	9.88402	0.51	0.6031
Error total	889.392	46	19.3346		
Total (corr.)	2112.9	53			

**Análisis de Varianza para L.eje mayor**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	39.5788	1	39.5788	1.85	0.1803
B:Tiempo	768.797	1	768.797	35.96	0.0000
AA	170.186	1	170.186	7.96	0.0070
AB	178.071	1	178.071	8.33	0.0059
BB	2.41266	1	2.41266	0.11	0.7385
bloques	10.7292	2	5.36461	0.25	0.7792
Error total	983.51	46	21.3806		
Total (corr.)	2153.28	53			

**Análisis de Varianza para Perímetro**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura	571.489	1	571.489	2.69	0.1079
B:Tiempo	6367.75	1	6367.75	29.96	0.0000
AA	2483.63	1	2483.63	11.68	0.0013
AB	2232.33	1	2232.33	10.50	0.0022
BB	56.9615	1	56.9615	0.27	0.6072
bloques	111.357	2	55.6785	0.26	0.7707
Error total	9777.68	46	212.558		
Total (corr.)	21601.2	53			