

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS



T E S I S

**“EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO EN LOS PARÁMETROS
MICROESTRUCTURALES Y FÍSICOQUÍMICOS DE YACÓN MEDIANTE
PRETRATAMIENTO CON ULTRASONIDO EN EL PROCESO DE SECADO”**

**Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**Presentado por la Bachiller:
MARÍA CRUZ SOTO VEGA**

**ASESOR:
Dr. JIMY FRANK OBLITAS CRUZ**

CAJAMARCA – PERÚ

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigadora:
SOTO VEGA, MARÍA CRUZ
DNI: N° 75953803
Escuela Profesional/Unidad UNC:
ESCUELA PROFESIONAL DE ING. EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
 2. Asesor:
Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz
Facultad/Unidad UNC:
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
 3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
 4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
 5. Título de Trabajo de Investigación:
"EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO EN LOS PARÁMETROS MICROESTRUCTURALES Y FÍSICOQUÍMICOS DE YACÓN MEDIANTE PRETRATAMIENTO CON ULTRASONIDO EN EL PROCESO DE SECADO"
 6. Fecha de evaluación: 06/05/2025
 7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
 8. Porcentaje de Informe de Similitud: 11%
 9. Código Documento: oid: 3117:456397130
 10. Resultado de la Evaluación de Similitud: 11%
- APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 07/05/2025

<i>Firma y/o Sello Emisor Constancia</i>
 Dr. Jimmy Frank 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, a los cuatro días del mes de febrero 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° 677-2024-FCA-UNC, de fecha 16 de diciembre del 2024**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: "**EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO EN LOS PARÁMETROS MICROESTRUCTURALES Y FÍSICOQUÍMICOS DE YACÓN MEDIANTE PRETRATAMIENTO CON ULTRASONIDO EN EL PROCESO DE SECADO**", realizada por la Bachiller **MARÍA CRUZ SOTO VEGA** para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**.

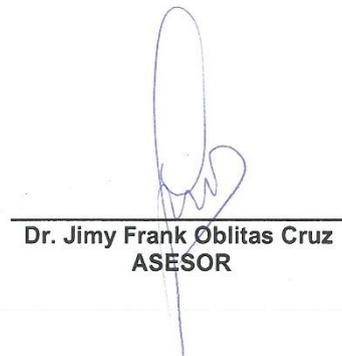
A las nueve horas y cinco minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, 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 diez horas y veinte minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.


Dr. Rodolfo Raúl Orejuela Chirinos
PRESIDENTE


Ing. Mtr. Max Edwin Sangay Terrones
SECRETARIO


Dr. José Gerardo Salhuana Granados
VOCAL


Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz
ASESOR

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mi madre María Donatilde Vega Castillo por el esfuerzo brindado para ser una profesional con valores y enseñarme a no rendirme y ser una mujer fuerte ante los obstáculos durante mi etapa profesional. A mis hermanas y a mi novio Denilson

CH.S.

Agradecimiento

Primeramente, agradezco a Dios por darme salud, entendimiento y fuerzas para salir adelante teniendo un propósito culminar mis estudios superiores y así superarme en mi vida profesional. Del mismo modo, a todos los que fueron parte durante mi formación y desarrollo de esta investigación, mi familia, a mi novio, a mi asesor de tesis por su paciencia y apoyo, amigos y a la Universidad Nacional de Cajamarca especialmente a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias por permitirme usar sus laboratorios para el desarrollo con éxito esta investigación.

Índice general

Resumen-----	xi
Abstract-----	xii
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN-----	1
Descripción del problema -----	1
Problema de investigación -----	2
Justificación-----	2
Objetivos -----	3
Objetivo general -----	3
Objetivos específicos-----	3
Hipótesis-----	3
CAPITULO II.....	4
REVISIÓN DE LITERATURA -----	4
Antecedentes de la investigación -----	4
Marco teórico-----	8
Origen de la historia-----	8
Yacón -----	8
Clasificación taxonómica del yacón-----	9
Condiciones agroecológicas del cultivo de yacón -----	9
Contenido nutricional del yacón -----	10
Composición química del yacón -----	11
Generalidades sobre el secado de alimentos -----	11
Factores que afectan en el proceso de secado -----	12
Curva de secado-----	12

Tiempo de sacado-----	16
Periodo constante de secado -----	16
El ultrasonido como tecnologia emergente en el pre tratamiento en la conservaci3n de alimentos -----	18
Tecnolog3a de ultrasonido-----	20
Efecto de ultrasonido-----	23
Campo de aplicaci3n del ultrasonido-----	24
Importancia de color en los alimentos -----	24
Medici3n de color-----	26
Definici3n de t3rminos-----	27
Yac3n: -----	27
Microestructura de alimento: -----	27
Orientaci3n de corte: -----	27
Par3metros cin3ticos de secado:-----	27
Secado de alimentos: -----	27
La frecuencia: -----	27
Pre- tratamiento del ultrasonido: -----	28
CAPITULO III.....	29
MATERIALES Y METODOS-----	29
Ubicaci3n-----	29
Metodolog3a -----	30
Tipo y dise1o de investigaci3n -----	30
Dise1o de la investigaci3n -----	30
Factores, variables independientes y dependientes -----	41
Descripcion de diagrama de flujo-----	33

CAPITULO IV.....	35
Resultados y Discusiones -----	35
Efecto de la temperatura y tiempo de ultrasonidos en la velocidad de secado -----	35
Análisis de secado -----	35
Análisis de la velocidad de secado -----	36
Efecto de la temperatura y tiempo de ultrasonidos en el color -----	40
Análisis del color L* -----	40
Análisis del Color a* -----	43
Análisis del Color b* -----	45
Análisis microestructural -----	51
CAPITULO V.....	56
Conclusiones -----	56
Recomendaciones-----	57
CAPITULO VI.....	58
Bibliografía -----	58
CAPITULO VII.....	65
ANEXOS-----	65
Anexo 1: Tabal de datos de calculo para la velocidad de secado -----	65
Anexo 2: Curvas para determinar la difusividad-----	65
Anexo 3: Imágenes de la parte experimental de la tesis -----	65

Índice de figuras

Figura 1: curva de velocidad de secado para muestras sólidas -----	13
Figura 2: curva de velocidad de secado: -----	13
Figura 3: cavitación ultrasónica -----	19
figura 4: Mapa del lugar de la investigación -----	29
Figura 5: Diagrama de flujo -----	32
Figura 6: curva de secado en base al tiempo -----	36
Figura 7: efectos individuales para la velocidad de secado -----	38
Figura 8: PARETO efectos estandarizados para la velocidad de secado -----	39
Figura 9: superficie de respuesta para la velocidad de secado -----	40
Figura 10: Efectos individuales del color L* -----	42
Figura 11: efectos estandarizados para el color L* -----	43
Figura 12: efectos individuales para el color a* -----	44
Figura 13: PARETO efecto estandarizado para el color a* -----	45
Figura 14: efectos individuales para el parámetro b* -----	47
Figura 15: PARETO efecto estandarizado para el color b* -----	48
Figura 16: superficie de respuesta para el color b* -----	49
figura 17: Curva de Optimización -----	50
figura 18: Microestructura celular -----	51
figura 19: Partes de estudio de la microestructura celular -----	51
figura 20: Prueba Tukey para el área celular del yacón -----	52
figura 21: Efecto de la temperatura y tiempo de ultrasonido sobre el eje mayor celular	52
figura 22: Efecto de la temperatura y tiempo de ultrasonido sobre el eje menor celular	52
figura 23: efecto de la temperatura y tiempo de ultrasonido en la circularidad celular	52
figura 24 Diagrama de flujo de proceso -----	52

Índice de tablas

Tabla 1: composición nutricional del yacón -----	10
Tabla 2: factor de variables -----	31
Tabla 3: ANOVA para la velocidad de secado -----	37
Tabla 4: ANOVA CIELAB para el color L* -----	41
Tabla 5: ANOVA CIELAB para el color a* -----	43
Tabla 6: ANOVA CIELAB para el color b* -----	46
Tabla 7: Valores Óptimos de temperatura y tiempo de ultrasonido -----	50

Resumen

En la presente tesis se realizó en el laboratorio de fermentaciones industriales de la escuela académico de Ingeniería en Industrias Alimentarias, ambiente (2H-304) de la Universidad Nacional de Cajamarca, ubicados en el departamento, provincia y distrito de Cajamarca, el cual tuvo como objetivo la evaluación de la temperatura y tiempo en los parámetros microestructurales y fisicoquímicos de yacón mediante pretratamiento con ultrasonido en el proceso de secado, para ello se usó un diseño experimental usando las temperaturas de secado 50, 75 y 90 °C y tiempo de ultrasonido, separando tres grupos de muestras fraccionadas cada una de ellas en tres partes (MA₁, MA₂, MA₃), (MB₁, MB₁, MB₁) y (MC₁, MC₁, MC₁), realizando pretratamiento con un equipo de ultrasonido, para el secado se utilizó un secador por bandejas, de la misma forma para el color se determinó mediante Chroma Meter y el análisis de microestructura mediante el microscopio de barrido con el objetivo 10X mediante una cámara Motic de 10 Megapíxeles acoplada al microscopio usando el software Motic Image Plus 3.0. Al evaluar el efecto de la temperatura y tiempo sobre el color en los tejidos del yacón mediante pretratamiento utilizando ultrasonido (Hz) en la velocidad de secado se determinó que ambos parámetros tienen efecto significativo para la velocidad de secado y para el parámetro de color b*. Asimismo, al determinar la temperatura de 73.54 °C y tiempo de ultrasonido de 3.90613 se observó que tiene un efecto sobre los parámetros microestructurales del área, eje mayor, eje menor y sobre la circularidad, por lo que se concluye que la velocidad de secado utilizando pretratamiento con ultrasonido (Hz) es más eficiente acelerando la velocidad de secado y mejora los parámetros de color y microestructura.

Palabras clave. Velocidad de secado, microestructura, ultrasonido, color del espacio CIELAB.

Abstract

In this thesis, the industrial fermentation laboratory of the academic school of Food Industry Engineering, environment (2H-304) of the National University of Cajamarca, located in the department, province and district of Cajamarca, was carried out with the objective of evaluating the temperature and time in the microstructural and physicochemical parameters of yacon by means of ultrasound pretreatment in the drying process. For this, an experimental design was used using drying temperatures of 50, 75 and 90 °C and ultrasound time, separating three groups of samples, each one of them divided into three parts (MA1, MA2, MA3), (MB1, MB1, MB1) and (MC1, MC1, MC1), performing pretreatment with ultrasound equipment. For drying, a tray dryer was used. In the same way, the color was determined by Chroma Meter and the microstructure analysis by means of the scanning microscope with the 10X objective using a 10 Megapixel Motic camera coupled with a 10-megapixel camera. under a microscope using Motic Image Plus 3.0 software. When evaluating the effect of temperature and time on the color of yacon tissues by pretreatment using ultrasound (Hz) on the drying speed, it was determined that both parameters have a significant effect on the drying speed and on the color parameter b^* . Likewise, when determining the temperature of 73.54 ° C and ultrasound time of 3.90613, it was observed that it has an effect on the microstructural parameters of the area, major axis, minor axis and on circularity, so it is concluded that the drying speed using pretreatment with ultrasound (Hz) is more efficient in accelerating the drying speed and improves the color and microstructure parameters.

Keywords. Drying speed, microstructure, ultrasound, CIELAB space color.

CAPITULO I

I. INTRODUCCIÓN

1.1.Descripción del problema

El ultrasonido representa una tecnología novedosa, la cual, ha brindado interés debido a sus efectos promisorios en el área de procesamiento y conservación de alimentos, ya que ha promovido en su aplicación de productos comerciales. Se ha reconocido como una tecnología, y se define ultrasonido como una forma de energía que viaja en ondas de sonido iguales o mayores a 20000 vibraciones por segundo, las aplicaciones de estas ondas ultrasónicas se dividen por lo general en dos grupos: baja y elevada intensidad.

La microestructura de los alimentos es importante para obtener los cambios que ocurre en los alimentos durante el desarrollo, la postcosecha y tratamientos de procesamiento y conservación de los mismos, como el secado entre otros. Cabe recalcar que la microestructura también es importante en los alimentos manufacturados y en el desarrollo de nuevos tipos de alimentos con ingredientes nuevos que estos ayudan a competir en el espacio del volumen de los mismos. Encontrar formas innovadoras de examinar la microestructura de los alimentos no solo ayuda a la comprensión fundamental, sino que también nos permite resolver problemas para la industria cuando los productos fallan. Por ello el presente trabajo de tesis tiene el objetivo de ver el efecto de temperatura y tiempo en los parámetros microestructurales y fisicoquímicos del yacón mediante pretratamiento con ultrasonido en el proceso de secado.

1.2.Problema de investigación

¿Cómo afecta la evaluación de temperatura y tiempo en los parámetros microestructurales y fisicoquímicos de yacón mediante pretratamiento con ultrasonido en el proceso de secado?

1.3.Justificación

El valor teórico de esta investigación que se realizó se ampara en el desconocimiento del efecto de tiempo y temperatura de secado por ultrasonido en las características microestructurales y fisicoquímicas del yacón y de los rangos óptimos que maximicen estas variables. Su valor práctico se encuentra en prolongar su vida útil y la calidad del yacón, que contiene proteínas, calorías y compuestos bioactivos importantes con una técnica para el secado ha demostrado una alta retención de nutrientes. Sin embargo, es consumido por la población peruana, en personas con colesterol, diabetes. En la actualidad no existe investigaciones de la microestructura del yacón, por el cual esta investigación determinara el efecto de la temperatura y el tiempo de los parámetros microestructurales y físicos del yacón.

1.4.Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Determinar el efecto de la temperatura y tiempo en los parámetros microestructurales y fisicoquímicos del yacón mediante pretratamiento con ultrasonido en el proceso de secado.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la temperatura en los cambios fisicoquímicos (color) mediante pretratamiento con ultrasonido en el proceso de secado de yacón.
- Determinar el efecto de la temperatura y el tiempo del ultrasonido en las características microestructurales del yacón.

1.5.Hipótesis

Existió un efecto positivo y directo de la temperatura y tiempo en los parámetros microestructurales y fisicoquímicos del yacón.

CAPITULO II

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

Modelado de la Cinética de Secado en Microondas de Ñame. (García-Mogollon et al., 2016) investigación realizada en Colombia. Donde se tomaron muestras de ñame (*D. rotundata*) en el corregimiento de Berástegui, del municipio de Ciénaga de Oro del departamento de Córdoba. La adecuación se realizará para los chips de ñame dándole dimensiones de 3cm de diámetro y 1cm de espesor, caracterizando el contenido de humedad Para el secado en microondas se utilizó un horno microondas doméstico de marca Haceb HM-1.1 con una frecuencia de 2450MHz y dimensiones internas de 354x228x373mm. Se tomaron masas de 50, 60 y 70g de muestra y distribuyeron uniformemente en el plato del microondas y se evaluaron las potencias de 420W, 560W y 700W. La masa de las muestras durante el secado se pesó en una balanza analítica (MettlerPS4000 con exactitud + 0.01 g) cada 30 segundos para 420W, 560W y 700W. Las bandejas con las muestras fueron sacadas de la cámara de secado, pesadas y puestas de nuevo en la cámara. Para la construcción de las curvas de secado se graficó el contenido de humedad del producto en base seca (MS) contra el tiempo para la determinación de las curvas de secado. Para determinar el modelo que mejor describe el comportamiento cinético de secado de ñame.

“Mejora del secado por convección de la zanahoria mediante la combinación de etanol y ultrasonido como pretratamientos: efecto sobre la estructura del producto, la calidad, el consumo de energía, la cinética de secado y rehidratación” (Saavedra Davila, 2022). sontos. Según esta investigación, el ultrasonido se combinó con etanol para mejorar diferentes aspectos de secado convectivo zanahoria, evaluando tanto la calidad

de procesamiento y el producto. La ecografía en el tratamiento del agua como resultado de la inflamación celular y pequeño impacto en la textura. En otras palabras, el ultrasonido en etanol y tratamientos con etanol modifica tanto la microestructura (modificaciones de la pared celular de tejido parenquimático) y macroestructura (contracción y resistencia a la perforación) de la zanahoria. Pretratamientos con ultrasonidos en etanol y etanol mejoraron la cinética de secado, lo que reduce el tiempo de procesamiento (50%) y el consumo de energía (42-62%). Estos pretratamientos también mejoran la rehidratación, cuya tasa y la retención inicial de agua fueron mayores que el control. Además, el contenido de carotenoides se conservó después del secado, para todos los tratamientos. No se observó ningún impacto en la contracción. Una discusión mecanicista, basado en modificación estructural (microestructura y la macroestructura) y las propiedades físicas del agua y etanol, se proporcionó. Como conclusión, este trabajo no sólo describe los aspectos positivos de la combinación de las tecnologías de ultrasonido y etanol como pretratamientos a secado por convección, pero también propuso mecanismos para explicar los fenómenos.

“Pretratamientos con ultrasonido y etanol para mejorar el secado por convección: Secado, rehidratación y contenido de carotenoides de la calabaza”(Rojas et al., 2020). En este proyecto se analiza los diferentes efectos, las tecnologías de ultrasonido y etanol cambian la estructura del producto y promueven la transferencia de masa cuando se utilizan como pretratamientos para mejorar el secado de los alimentos. Por primera vez, se evaluó su aplicación combinada como pretratamiento para mejorar el secado convectivo, así como las propiedades del alimento seco. Como alimento modelo se utilizaron cilindros de calabaza, que se secaron con aire a 50°C y $0.8 \pm 0.1 \text{ ms}^{-1}$. Se estudiaron los efectos sobre la cinética de secado y rehidratación, así como sobre el consumo energético y la conservación de carotenoides. En comparación con el control,

todos los pretratamientos disminuyeron el tiempo de secado en más del 48%. La combinación de etanol y ultrasonidos presentó la mayor reducción tanto en el tiempo de secado (59%) como en el consumo de energía (44%). Los pretratamientos también mejoraron las propiedades de rehidratación en más de un 28%: se logró una mayor tasa de rehidratación y un aumento de la retención de agua. Se discutieron los posibles mecanismos que involucran la modificación de la estructura y la transferencia de masa durante el proceso de pretratamiento y secado. Además, la extracción de carotenoides debido a los pretratamientos fue insignificante en comparación con el notable efecto de evitar la degradación de este nutriente durante el secado. Las muestras pretratadas conservaron ~100% del contenido de carotenoides, mientras que las muestras control presentaron degradación parcial (23%). Esto se explica por los efectos negativos evidenciados por el historial térmico de la muestra durante el secado. Los resultados abren nuevas perspectivas sobre un método innovador para mejorar el proceso de secado y la calidad del producto mediante la combinación de etanol y ultrasonido.

Aplicación del Ultrasonido en la Industria de los Alimentos. (Delgado, 2012), investigación realizada en Colombia donde muestra que el ultrasonido es una tecnología emergente que, recientemente, ha sido estudiada para propósitos de inactivación microbiana y enzimática, pero que durante años ha sido objeto de investigación en la industria de alimentos, especialmente, en el tema de control de calidad. Se ha demostrado que puede ser utilizado para la evaluación de textura, composición y viscosidad de alimentos. Los mecanismos de acción del ultrasonido se clasifican principalmente en térmicos (generación de energía calórica o mecánica), y no térmicos (cavitación, rarefacción, formación de radicales libres, choques micromecánicos y fuerza de radiación). ultrasonido alta intensidad (18-100kHz). Procesamiento o estabilización de

alimentos, rompimiento celular, permeabilización la de membrana celular, cambios estructurales y Fisicoquímicos.

Parámetro de medición del color en rodajas de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) mediante un sistema de visión artificial. (Villa et al., 2014). Artículo realizado por investigadores de distintas universidades del Perú en la universidad Nacional de Moquegua, universidad Nacional de Trujillo y la Universidad Nacional de Frontera. Donde el color es una propiedad importante relacionada con la composición química y el grado de alteración de los alimentos a través del tiempo. El objetivo de la investigación fue diseñar, implementar y calibrar un Sistema de Visión por Computador (SVC), para su uso en tiempo real, con el fin de medir el color en rodajas de yacón mínimamente procesadas. Para ello, se diseñó e implementó un dispositivo (software y hardware) que constó de dos pasos: a) adquisición de imágenes y b) procesamiento y análisis de imágenes. La calibración del SVC se realizó con un colorímetro convencional (Modelo CIE $L^* a^* b^*$). Se obtuvieron rodajas de yacón mínimamente procesadas y se almacenaron a 5 °C. Se estimaron los cambios de color cada 2 h, durante 26 h, obteniendo sus parámetros de color. L^* disminuyó de 65,9 a 60,8, con tendencia a un color negro; a^* aumentó de 7,3 a 17,7, acercándose a un color rojo; b^* aumentó de 35,1 a 41,5, presentando una tendencia a un color amarillo. Además, C^* aumentó de 35,9 a 40,1, H^* disminuyó de 78,2 a 66,9 y ΔE^* aumentó de 2,6 a 13,2. Los bajos errores calculados ($e_{L^*} = 5,001\%$, $e_{a^*} = 2,287\%$, y $e_{b^*} = 4,314\%$) garantizan una aplicación adecuada y eficiente en la automatización de procesos industriales y el control de calidad en la industria alimentaria.

Avances recientes en la determinación de la evolución de las propiedades a nivel celular de los materiales alimenticios de origen vegetal durante el secado (Weligama Thuppahige et al., 2024), desarrollaron una investigación en distintos vegetales mostrando métodos microscópicos existentes donde pueden observar la microestructura del material, sus aplicaciones para investigar procesos extremadamente dinámicos, como el secado, tienen algunas limitaciones. Por ejemplo, investigar PBFM seco bajo microscopio óptico no es apropiado ya que el proceso de preparación de la muestra puede causar un daño significativo a las alteraciones estructurales reales a nivel celular resultantes del secado. Además, la técnica de microscopio óptico no es adecuada para observar las muestras con temperaturas elevadas durante el secado, mientras que enfriar las muestras a temperatura ambiente también puede causar vistas estructurales erróneas a nivel celular. Estos desafíos solo se pueden superar con tecnologías microscópicas sofisticadas y avanzadas que incluyen, entre otras, microscopía electrónica de barrido, microscopio de iones de helio, microscopio electrónico de barrido ambiental y μ CT de rayos X.

2.2.Marco teórico

2.2.1. Origen de la historia

2.2.1.1.Yacón

El yacón (*Smallanthus sonchifolius*), perteneciente a la familia Asterácea y originaria de la región andina, es una planta perenne y de porte herbáceo que llega a medir entre 1.5 y 2.5 m de altura. Presenta raíces fibrosas y reservantés, siendo estas últimas engrosadas, fusiformes u ovadas y exteriormente de color blanco, crema o púrpura (Seminario et al., s. f.).

La mayor parte de las raíces comestibles están compuestas por agua (85 % a 90 %). Respecto al peso seco, del 40 % al 70 % se encuentra en forma de fructooligosacáridos (FOS), azúcares con efectos favorables para la salud humana. Destaca su alto poder antioxidante, por lo que es considerado un recurso potencialmente importante para el mercado de productos dietéticos y para personas que padecen diabetes. (Seminario et al., s. f.)

2.2.1.2. Clasificación taxonómica del yacón

En el norte del Perú es conocido como “yacón” o “llacón” y “lajuash”. En el centro del Perú se conoce como “aricama” o “aricona”. En Ecuador es conocido como “jicama” o “jíquima” y en Colombia y Venezuela como “jíquima” y “jiquimilla. (Manrique et al., s. f.).

Condiciones agroecológicas del cultivo de yacón

El yacón puede ser cultivado en la costa, sierra y selva, hasta los 3 000 m.s.n.m. En suelos ubicados desde los 100 a 1 000 m.s.n.m. se recomienda para semilleros, ya que el rendimiento de raíces reservantés es bajo; mientras que los valles interandinos, en el rango altitudinal de 1 100 a 2 500 m.s.n.m. son mejores para la producción. El cultivo requiere suelos francos, de buen drenaje, profundos, porosos y provistos de materia orgánica. El pH óptimo es de 6.0 a 7.5 pero tolera suelos ligeramente ácidos. Se debe evitar sembrar en suelos arcillosos y salinos. (*Yacon Cultivo Experiencia Valle Condebamba / PDF*, s. f.)

El cultivo tolera temperaturas desde 10 °C hasta 25 °C, siendo el rango de 14 °C – 20 °C óptimo para su crecimiento. Temperaturas menores a 10 °C retardan el crecimiento y disminuyen los rendimientos; temperaturas mayores a 26 °C, sin la humedad necesaria, la planta se estresa y detiene su desarrollo. El yacón es susceptible a

heladas y vientos fuertes y se desarrolla normalmente en un rango de 550 a 1 000 mm de lluvia anual. El yacón no demanda horas luz e intensidad de luz específica; sin embargo, teniendo en cuenta las zonas de producción, se asume que debe recibir como mínimo nueve horas de luz. Además, puede crecer junto a otras especies forestales que le generan sombra o también puede crecer recibiendo luz solar directa.(Seminario et al., s. f.)

2.2.1.3.Contenido nutricional del yacón

La planta produce raíces reservantés que son fuente importante de fructooligosacáridos (FOS), un azúcar no digerible que aporta pocas calorías y no eleva el nivel de glucosa en la sangre; por ello, tiene un impacto positivo en la lucha contra el colesterol, la diabetes y la osteoporosis. Las raíces reservantés y las hojas contienen compuestos fenólicos antioxidantes asociados a la prevención de ciertas enfermedades crónicas como la arteriosclerosis y la diabetes.(J. Lachman et al., 2011)

Tabla 1: composición nutricional del yacón

Compuesto	Rango
Agua	85.0 – 90.0 g
Fructooligosacáridos (FOS)	6.0 - 12.0 g
Azucares simples	2.2 – 4.0 g
Proteínas	0.1 – 0.5 g
Potasio	185.0 – 295.0 mg
Calcio	6.0 – 13.0 mg
Calorías	14.0 – 22.0 kcal
Incluye sacarosa, fructosa y glucosa	

Fuente: (Armas et al., 2012)

2.2.1.4.Composición química del yacón

Las raíces frescas acumulan principalmente agua y carbohidratos. Entre el 40 a 70% del peso seco está en forma de oligofructosa (OF) - un azúcar especial que tiene varios efectos favorables en la salud- y 15 a 40% está en forma de azúcares simples: sacarosa, fructosa y glucosa. El contenido de otros nutrientes es bajo, sólo el potasio se encuentra en cantidades importantes. Tanto las raíces como las hojas contienen compuestos con un alto poder antioxidante: ácido clorogénico, triptófano y varios fenoles derivados del ácido cafeico.

2.2.1.5.Postcosecha de yacón

Con la cosecha de las raíces empieza un rápido proceso de conversión de la OF en azúcares simples. Después de una semana en almacenamiento a temperatura ambiente, el contenido de OF puede disminuir en un 30 a 40%. Así, con el fin de obtener productos con el mayor contenido posible de OF es necesario procesar las raíces inmediatamente después de la cosecha o refrigerarlas para disminuir la tasa de degradación de la OF. Por otro lado, la costumbre tradicional de solear (exponer al sol) las raíces por unos días para que se vuelvan más dulces, aceleran el proceso de conversión de la OF en azúcares simples. Para evitar la degradación de la OF en el procesamiento, es preferible no exceder temperaturas superiores a 120° C. (Manrique et al., s. f.)

2.2.2. Generalidades sobre el secado de alimentos

El secado de los alimentos parte de evaporar el agua libre de ellos por medio de la adicción de calor a una temperatura adecuada sin que esta provoque ruptura estructural. En este procedimiento intervienen dos factores los cuales son la transferencia de calor que suministra el calor latente de evaporación necesario para evaporar 1 kg de agua líquida y la transferencia de masa en donde se tiene en cuenta el agua que se extrae del

alimento y se evapora en el ambiente. El secado de los alimentos es uno de los métodos más antiguos utilizados para su conservación y también se ha utilizado con el propósito de disminuir el peso y el volumen de los mismos, lo que reduce los costos de envase y transporte, requerimientos mínimos de almacenamiento y los costos de distribución se reducen.(Cadena, 2008)

2.2.3. Factores que afectan en el proceso de secado

Es importante recalcar que el secado de alimentos existe algunos factores los cuales pueden afectar en el desempeño de este proceso, y entre los más relevantes están la humedad, temperatura, velocidad del aire y espesor del producto. Donde la T° y el %H del producto o del ambiente podrían afectar la velocidad del secado, puesto que entre mayor sea el %H en el producto tardará más en secarse o si por el contrario es la respectiva del ambiente no habrá una transferencia de masa de vapor de agua efectiva; para el secado por convección forzada la velocidad del aire es un factor influyente en el secado ya que entre mayor circulación de aire seco hará que se extraiga más agua, sin embargo, este factor va de la mano con la temperatura; el espesor influye en el sentido de la forma que tenga el producto, puesto que entre mayor sea habrá más humedad que extraer, no obstante, esto depende también del tipo de producto a secar (Cadena, 2008).

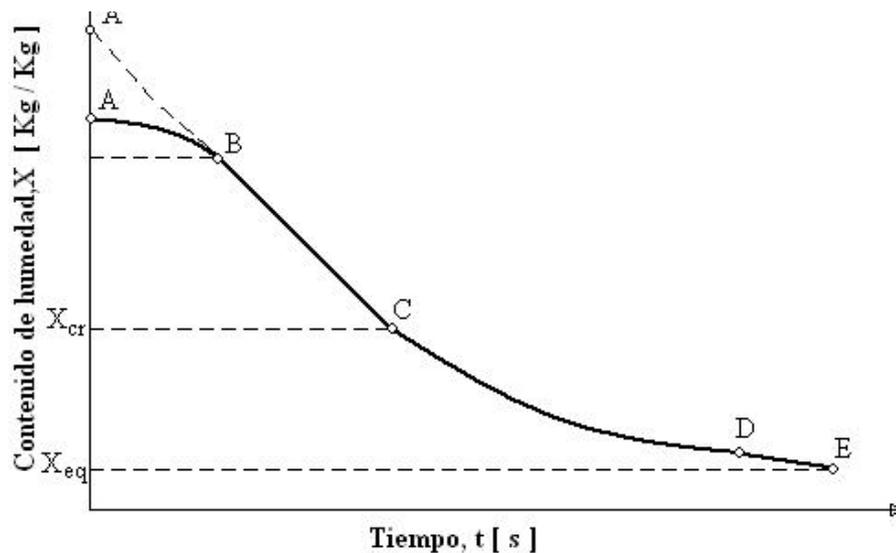
2.2.4. Curva de secado

Esta curva de secado nos muestra el contenido de humedad a través del tiempo en el proceso de secado. En el periodo inicial de secado, el cambio de humedad en el material esta ilustrado en la curva A-B. al terminar este primer periodo el secado toma una forma lineal del tipo $X = f(t)$. en este periodo la velocidad de secado es constante (recta B-C). el secado se mantiene igual por un periodo de tiempo hasta que llegue a un punto crítico (punto C) donde la línea recta tiene a curvarse y a formar una asíntota con el contenido

de humedad X_{eq} donde es el valor mínimo de humedad en el proceso de secado esto quiere decir que el punto E jamás es tocado.

La recta (B-C) es llamado el periodo de velocidad de secado constante, y al siguiente periodo de secado se conoce como el periodo de caída de velocidad del secado.

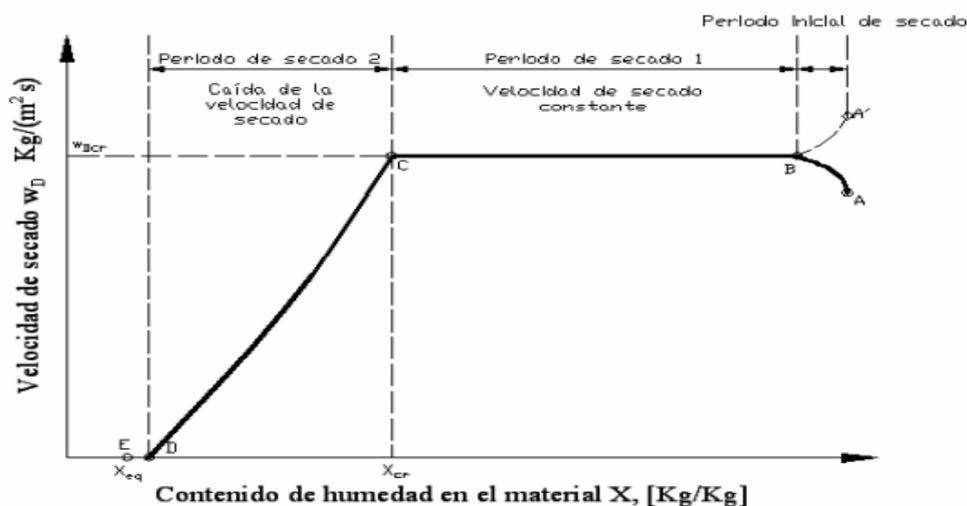
Figura 1: curva de velocidad de secado para muestras sólidas



Fuente: (Nava, 2004)

2.2.5. Curva de velocidad de secado

Figura 2: curva de velocidad de secado:



Fuente: (Strumillo & Kudra, 1986)

En este tipo de curva indica que la velocidad se seca el material. Este diagrama es muy útil para diferentes propósitos. Este diagrama tiene la función $w_D = f(X)$, donde muestra la cantidad de humedad removida desde el material secado por unidad de tiempo por unidad de superficie secada.

$$w_D = -\frac{mdX}{A dt}$$

5.1

O como:

$$N = \frac{dX}{dt}$$

5.2

En esta grafica también pueden verse los periodos de velocidad constante y caída en la velocidad de secado. La explicación de la forma de la curva de secado la superficie del material está cubierta con una capa delgada de líquido la cual puede ser tratada como humedad desatada, libre o capilar. La evaporación empieza con el contacto con el aire. Considerando la resistencia de la transferencia de masa, tenemos las condiciones externas y la capa circulante de gas; limitado la velocidad de secado. Así la velocidad de evaporación puede expresarse como el coeficiente de transferencia de masa y un gradiente de humedad del aire.

$$w_D = k_g (Y_s - Y)$$

5.3

Donde Y y Y_s son la humedad del ambiente circulante. El coeficiente de transferencia de masa K_g para una velocidad de gas constante en la relación con el material, permanecerá constante. La humedad Y_s corresponde a las condiciones de saturación en la temperatura de la capa de líquido (T_s). como la evaporación de la

humedad requiere de la misma cantidad de calor latente de evaporación, la superficie del líquido después de algún tiempo alcanzara una temperatura de equilibrio (periodo inicial de secado), así la cantidad de calor proveída hacia la superficie desde el aire circulante sería igual al calor necesario para el cambio de fase la humedad Y_s permanece constante. Como resultado de los parámetros constantes del proceso, la humedad del aire Y no cambia. La velocidad de vaporación entre los puntos B y C será constante e igual a $W_{D_{cr}}$. Este valor es igual a la velocidad de evaporación en una superficie libre. Sin embargo se ha demostrado que $W_{D_{cr}}$ depende del tipo de material de secado y usualmente es menor que el 30% de los valores obtenidos en el proceso de evaporación de líquidos en una superficie libre.

Como ya es bien sabiendo en el periodo inicial de secado, el cuerpo se seca y su superficie están cubiertas con una capa de líquido, teniendo una temperatura menos a la temperatura de equilibrio T_s . y como resultado, la velocidad de secado en el rango entre los puntos A y B se incrementan hasta que la temperatura de la superficie alcanza el valor correspondiente a la línea B-C. Es más raro cuando el secador es alimentado con material húmedo a una temperatura $T > T_s$. entonces el periodo inicial de secado está representando por la línea punteada A-B. usualmente el periodo inicial es muy corto y en la práctica puede ser despreciado.

Cuando $X < X_{cr}$ la cantidad de humedad que alcanza la superficie del cuerpo a secar empieza a caer gradualmente. Como resultado, la presión de vapor arriba de la superficie del material también empieza a decrecer de acuerdo a la ecuación 5.3 la velocidad secada (Curva C-D) en este periodo la velocidad de secado es controlado por el transporte de la humedad del material (condiciones internas) la cuales dependen del gradiente de la concentración de humedad.

2.2.6. Tiempo de secado

El tiempo de secado depende del material, esto define las características que tendrá la curva de secado.

La ecuación 5.2 define la velocidad de secado, esta puede reacomodarse para obtener el tiempo de secado.

$$\int_0^t dt = -\frac{m_s}{A} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{w_D}$$

5.4

Donde X_1 y X_2 son el contenido de humedad desde el tiempo cero al tiempo t , respectivamente.

2.2.6.1. Periodo constante de secado

El secado en este periodo es constante y por lo tanto la ecuación 5.4 esto es el contenido de humedad al final del primer periodo. En este periodo de secado influyen la velocidad de secado w_{DI} depende del coeficiente de transferencia de calor y masa (h y k_g) entre el agente de secado y la superficie a secar. Sin embargo, los materiales porosos representan un reto debido a su estructura no uniforme que crea dificultades en la estimación del contenido crítico de humedad.

2.2.6.2. Periodo de caída de secado

Este periodo de caída de secado puede comportarse de manera lineal como lo muestra la curva de velocidad de secado, pero también puede comportarse de manera no lineal por lo cual requiere un estudio más minucioso del comportamiento de la curva de secado. En este estudio consideramos el caso lineal de la curva de caída de secado. La forma de la velocidad de la curva de secado depende del tipo de cuerpo, la velocidad de secado en el primer periodo de secado y el contenido crítico de humedad.

Ahora tomando la ecuación 5.4 podemos construir una ecuación similar en la cual la velocidad de secado depende de contenido de humedad.

$$t_{II} = \frac{m_s}{A} \int_{X_2}^{X_{cr}} \frac{dX}{w_{DII}} \quad 5.5$$

Donde X_2 es el contenido final de humedad en el material.

Si observamos en la curva de secado podemos decir que existe una dependencia de $w_{DII} = f(X)$ que es lineal y puede ser escrita de la siguiente manera.

$$w_{DII} = aX + b \quad 5.6$$

Sustituyendo esta ecuación 5.5 obtenemos:

$$t_{II} = \frac{m_s}{A} \int_{X_2}^{X_{cr}} \frac{dX}{aX + b}$$

Realizando la integración obtenemos:

$$t_{II} = \frac{m_s}{aA} \ln \frac{aX_{cr} + b}{aX_2 + b}$$

5.8

Los coeficientes pueden ser obtenidos de la siguiente manera.

$$a = \frac{w_{DI} - w_{DII}}{X_{cr} - X_2}$$

$$w_{DII} = aX_2 + b \quad 5.10$$

Sustituyendo estos coeficientes (a y b) en la ecuación 5.8 obtenemos:

5.11

$$t_{II} = \frac{m_s}{A} \frac{X_{cr} - X_2}{w_{DI} - w_{DII}} \ln \frac{w_{DI}}{w_{DII}}$$

Finalmente, el tiempo total del proceso es la suma de los tiempos en los dos periodos.

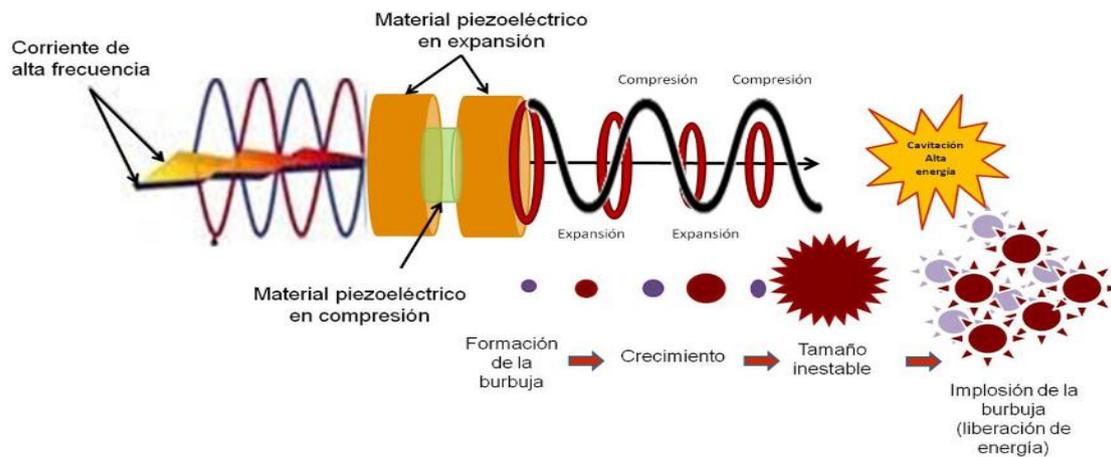
$$t = t_I + t_{II}$$

5.12

2.2.7. El ultrasonido como tecnología emergente en el pre tratamiento en la conservación de alimentos

Al utilizar la técnica de deshidratación por aplicación de aire caliente, se busca combinar con otras técnicas que promueven una mejor apariencia del alimento disminuyendo los efectos de la temperatura o la exposición al aire por periodos largos y los cuales los llamamos pre tratamientos. Estas técnicas pueden ser sencillas como el escaldado u osmosis o mucho más complejas y más industrializadas como el ultrasonido. El ultrasonido consiste en aplicar energía a un cuerpo mediante una serie de ondas mecánicas, generalmente longitudinales, cuya frecuencia está por encima de la capacidad de audición del oído humano. Las fuerzas involucradas en este mecanismo pueden ser más altas que la tensión superficial, lo que mantiene la humedad dentro de los capilares del alimento creando canales microscópicos que podrían facilitar la eliminación de la misma. En medio líquido, la sonicación o generación de las ondas acústicas a alta frecuencia, causa agitación del medio y cavitación (formación de burbujas en el interior del líquido que pueden colapsar de forma explosiva y generar presión localizada, liberando grandes cantidades de energía térmica y mecánica).

Figura 3: cavitación ultrasónica



Fuente: (*How To Use Hielscher's Ultrasonic Tissue Homogenizers*, s. f.)

La técnica de ultrasonido se ha utilizado como pre tratamiento al secado de alimentos dado que provoca cambios en la estructura y acelera la transferencia de masa debido a los canales generados en la matriz del producto, producto de la cavitación (Mosquera-Vivas et al., 2019).

La cavitación genera canales en la matriz del alimento que favorece la eliminación de la humedad a temperaturas de deshidratación más bajas, manteniendo las propiedades organolépticas del alimento en buenas condiciones”

El ultrasonido causa un aumento en la velocidad con que se evapora la humedad en los alimentos que, al combinarla con el secado por aire caliente, es posible deshidratar el alimento a temperaturas más bajas que las utilizadas normalmente sin aplicar ultrasonido (Deshidratación de alimentos asistida con ultrasonido como tecnología emergente, 2020). Con la ventaja de obtener un producto deshidratado con mejores propiedades sensoriales. Aunque, de acuerdo a estudios a escala de laboratorio, la técnica promete buenos resultados tanto como técnica de pretratamiento que asiste a técnicas de deshidratación de alimentos por secado de aire caliente o liofilización, como también una técnica directa de deshidratación; en ambos casos, es necesario mayores estudios que

mejoren los procesos de optimización de parámetros con el fin de desarrollar un proceso conveniente de escalamiento hacia su industrialización.

La deshidratación de alimentos asistida por ultrasonido se encuentra aún en proceso de escalamiento en el área de tecnología de alimentos para poder industrializarla.

2.2.8. Tecnología de ultrasonido

El ultrasonido (US) se define como la energía emitida por ondas sonoras con frecuencias desde 18 KHz hasta el rango de gigahercios (Yanniotis et al., 2013). Están caracterizados, como cualquier onda, por parámetros como la frecuencia, la velocidad, la longitud de onda, la potencia o la impedancia. La denominación “ultrasonidos de potencia” hace referencia a aquellas aplicaciones de los ultrasonidos para producir efectos significativos. Así, en el secado de alimentos, los ultrasonidos producen en los sólidos una serie de ciclos de compresiones y relajaciones, conocidos como efecto esponja, que pueden incrementar el transporte de materia y calor. Además, pueden llegar a producir la formación de micro canales internos que facilitan el movimiento de la humedad contenida hacia la superficie (Mulet et al., 2003). En la interfase sólido-gas provocan variaciones de presión y velocidades oscilantes (Cárcel & Villanueva, 2017) que disminuyen la capa límite de difusión. Todo esto aumenta la velocidad de eliminación de humedad desde la superficie hasta el ambiente, lo que podría reducir el tiempo de secado y el consumo energético sin necesidad de utilizar altas temperaturas.

Sin embargo, la influencia de los ultrasonidos en el secado depende de las condiciones en las que se realice el proceso. Así, los efectos de los ultrasonidos de potencia son superiores a temperaturas moderadas, (por debajo de 40°C) que a altas temperaturas (por encima de 60°C). Esto se podría explicar a partir de la relación entre la energía mecánica que proporcionan los ultrasonidos, y la energía térmica que proporciona

el aire de secado. Así, la gran cantidad de energía disponible a altas temperaturas enmascara la influencia de los ultrasonidos (Sabarez et al., 2012), que sí que resulta significativa a temperaturas moderadas.

En la mayoría de los sistemas industriales se utiliza un generador para convertir la electricidad de la red en una corriente alterna de alta frecuencia, que luego se convierte en vibraciones ultrasónicas de alta frecuencia mediante un material piezoeléctrico, que se transmite a través de cualquier sólido, líquido o gas que posea propiedades elásticas (en sólidos) o acústicas (en fluidos) (Baeghballi et al., 2020) (Cárcel et al., 2014).

Las ondas sonoras longitudinales pueden transmitirse a gases, fluidos o alimentos, provocando compresiones cíclicas y rarefacciones del material respectivo. El ultrasonido de alta intensidad y baja frecuencia (16-100 kHz) pueden provocar cavitación, la creación, crecimiento e implosión violenta de burbujas de gas (Patist & Bates, 2008). El colapso de la burbuja se acompaña de picos de alta presión y temperatura (hasta 100 MPa y 5000 K), así como un intenso cizallamiento local (Clark, 2008). Estos tratamientos de ultrasonido de alta potencia tienen el potencial de mejorar una amplia gama de procesos clave en la producción de alimentos (Yanniotis et al., 2013).

La velocidad del aire de secado es también una variable importante que influye en los efectos de los ultrasonidos. Así, a velocidades de aire elevadas, las turbulencias que genera el aire de secado pueden romper el campo acústico (García-Pérez et al., 2007) e impedir que la energía acústica llegue a las muestras con suficiente intensidad como para provocar efectos.

La potencia es la energía total irradiada por un sistema ultrasónico por unidad de tiempo ($J \cdot s^{-1}$ o W). El incremento de la potencia determina los efectos conseguidos con el ultrasonido, por lo que es conveniente relacionar la energía ultrasónica en forma

relativa al sistema (Blei & Sommerfeld, 2007). Así, la intensidad ultrasónica se define por la potencia aplicada por unidad de área tratada ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). La intensidad ultrasónica, I , está relacionada con la presión acústica, PA , por la relación (Mason y Lorimer, 2002).

$$I = PA^2 / 2\rho v$$

donde ρ es la densidad del medio y v la velocidad de la onda.

La frecuencia, f , es el número de ciclos completados por una onda por unidad de tiempo. Está inversamente relacionado con la longitud de onda, λ , que es la distancia entre dos puntos que vibran por igual: $f = v / \lambda$

La frecuencia está relacionada con la alternancia de compresiones y expansiones producidas por ultrasonidos en un sólido. Además, la relación entre la longitud de onda y el tamaño de los poros del material define su interacción: si la longitud de onda es mayor que el diámetro de un poro, no se verá afectado internamente por la energía ultrasónica, y si está en el rango del tamaño de los poros, producirá vibraciones internas (Blei & Sommerfeld, 2007).

Otra característica importante de la onda, es la atenuación que sufre, durante la propagación a través de un medio. La intensidad de la onda disminuye a medida que aumenta la distancia a la superficie del emisor:

$$I = I_0 e^{-\alpha d}$$

Aquí, " I_0 " es la intensidad emitida, " d " es la distancia a la superficie del emisor y " α " es el coeficiente de atenuación (absorción) que es una propiedad característica del medio. La atenuación puede producirse por reflexión de ondas, dispersión o conversión

en energía cinética o térmica. Un aumento en la frecuencia eleva el coeficiente de atenuación (Mason y Lorimer, 2002).

Los mecanismos de calentamiento, turbulencia, agitación, fricción, inestabilidad de la superficie y otros provocados por el ultrasonido derivan de un fenómeno llamado cavitación (Ahmed et al., 2016). Cuando un líquido se somete a ultrasonidos suficientemente potentes, el líquido se comprime y expande alternativamente cuando la potencia ultrasónica alcanza un umbral, donde la rarefacción supera las fuerzas de atracción entre moléculas y, a partir de los núcleos de gas existentes, pueden aparecer burbujas de cavitación. Estas burbujas reaccionan y crecen con los ciclos de compresión y expansión de la onda ultrasónica, lo que hace que se expandan y, cuando alcanzan un tamaño crítico, finalmente colapsan (Ahmed et al., 2016);(Soria & Villamiel, 2010).

2.2.9. Efecto de ultrasonido

El ultrasonido, mediante la transmisión acústica, afecta el grosor de la capa límite entre el líquido agitado y el sólido. La cavitación generada, consiste en la formación de burbujas en el líquido que pueden colapsar y generar fluctuaciones de presión localizadas. Esto aumenta la transferencia de masa de tratamiento osmóticos(Rosa et al., 2019); (Sagar & Suresh Kumar, 2010); (Yanniotis et al., 2013); (Zhu et al., 2018). La alta presión hidrostática daña la estructura de la pared celular, que conduce a cambios significativos en la arquitectura del tejido, dejando las células más permeables, resultando en aumento de transferencia de masa, al tiempo que inactiva microorganismos y enzimas. (N. Rastogi et al., 2008); (N. K. Rastogi & Knorr, 2013); (Sagar & Suresh Kumar, 2010); (Yanniotis et al., 2013). El campo eléctrico pulsante aumenta la permeabilidad de células vegetales, el daño celular inducido por el tratamiento resulta en el ablandamiento del tejido, pérdida de presión de turgencia y reducción de la resistencia por compresión(Loginova et al., 2011); (Moses et al., 2014);(O. Parniakov et al., 2014); (Sagar & Suresh Kumar, 2010);

(Yanniotis et al., 2013). La deshidratación osmótica conduce a procesos de deshidratación parcial, que no elimina suficiente humedad para ser considerado un producto seco, pero requiere poca energía, funcionando bien como pretratamiento a otros métodos (Fernandes et al., 2008);(Sagar & Suresh Kumar, 2010);(Torringa et al., 2001).

2.2.10. Campo de aplicación del ultrasonido

El ultrasonido hace uso de fenómenos físicos y químicos que son fundamentalmente diferentes a los que se aplican convencionalmente en las técnicas de extracción, procesamiento y conservación. Ofrece ventajas en términos de productividad, rendimiento y selectividad, ya que se obtienen mejores tiempos de proceso, mejora la calidad, reduce riesgos químicos y físicos y se considera ambientalmente amigable. Actualmente es considerada una técnica de procesamiento sustentable, debido a que típicamente emplea menos tiempo, agua y energía (Chemat et al., 2011).

2.2.11. Importancia de color en los alimentos

El color es una característica de gran importancia en nuestra valoración física y de la calidad de los alimentos. En el caso de las frutas y vegetales el color depende de la presencia de cuatro tipos fundamentales de pigmentos, carotenoides, antocianinas, clorofilas y compuestos fenólicos, los cuales pueden cambiar durante el procesado y almacenamiento. Por otra parte, en ciertos alimentos la aparición de coloraciones marrones frecuentemente indeseadas, se asocia a reacciones de pardeamiento no enzimático (reacción de Maillard, propiciada por las altas temperaturas), pardeamiento de tipo enzimático y el producido por la caramelización de los azúcares, en la superficie del alimento. Todo esto puede afectar en forma negativa a la presentación y al sabor de los productos (Guerreo & Núñez García, 1991).

La medición del color se ve afectada por muchos factores tales como la iluminación, el observador, la naturaleza y características de la propia superficie (tamaño de la muestra, su textura y brillo). Además, el color es un fenómeno de interpretación subjetivo dependiente del observador, siendo más difícil su medida que la de un fenómeno objetivo como es medir una masa. Desde hace muchos años existe interés en estudiar el color y establecer estándares y modelos para interpretar y comunicar el color.

Desde que se estableció la definición de una serie de fuentes de iluminación estándar y observadores patrón, que permitieron establecer una medida del color en base a las coordenadas triestímulo X, Y, Z, se han introducido muchas otras coordenadas colorimétricas calculadas a partir de ellas, a partir de relaciones matemáticas más o menos complicadas. Tales coordenadas sitúan cada color en un espacio determinado, que tendrá tantas dimensiones como número de coordenadas se necesiten. Aparecen así los denominados colorimétricas a emplear, queda definido un espacio de color (Gilbert, 1992). Tras los esfuerzos encaminados a lograr un espacio de color lo más uniforme posible, la CIELAB (Comisión Internacional d' Ecléragé) o Instituto Internacional del color recomendó en 1976 el espacio de color CIELAB^{*}a^{*}b^{*}, adoptado también como norma UNE. Este espacio es un sistema coordinado cartesiano definido por tres coordenadas colorimétricas L^{*}, a^{*}, b^{*}, magnitudes que derivan matemáticamente de los valores de las coordenadas triestímulo. A partir de estas coordenadas es posible definir las magnitudes colorimétricas tono y saturación o croma. A continuación, se comenta la especificación de los parámetros colorimétricos del espacio de color CIELAB^{*}a^{*}b^{*} (Gilbert, 1992): espacios de color, definidos como la representación geométrica de los colores en el espacio, normalmente en tres dimensiones. Por tanto, elegidas unas coordenadas.

L^* : recibe el nombre de “luminosidad”, atributo según el cual una superficie parece emitir más o menos luz. Para superficies reflectoras o transmisoras se reserva el término de “claridad”, por la que un cuerpo parece reflejar (o transmitir) por difusión una fracción mayor o menor de la luz incidente. Puede tomar valores entre 0 (negro absoluto) y 100 (blanco absoluto).

a^* : define la desviación del punto acromático correspondiente a la claridad, hacia el rojo si $a^* > 0$, hacia el verde si $a^* < 0$.

b^* : define la desviación del punto acromático correspondiente a la claridad, hacia el amarillo si $b^* > 0$, hacia el azul si $b^* < 0$.

C^*ab : identificado como “saturación” o “croma”, es el atributo que permite estimar la proporción de color cromático puro contenido en la sensación total. Este concepto representa, por lo tanto, la pureza o intensidad relativa de un color. Numéricamente corresponde, en el plano cromático a^*-b^* , a la distancia desde el centro de la esfera de color al punto en cuestión.

h^*ab : corresponde al “tono”, atributo que ha suscitado nombres como azul, verde, amarillo, rojo, etc. Numéricamente, también en el plano cromático a^*-b^* , es una medida angular y corresponde al ángulo de matiz definido desde el eje positivo de la coordenada a^* , que varía entre 0 y 360°.

2.2.12. Medición de color

Las medidas de color se realizaron tanto en el producto fresco como en las muestras secas y deshidratadas. Para ello, se determinaron las coordenadas de color L^* , a^* y b^* de la superficie de las muestras con un colorímetro (modelo CM-2500d de Konica Minolta, Japón). L^* indica la medida de luminosidad, variando entre 100, que es el

blanco, y 0, que es el negro; a^* , que mide la variación de intensidad de rojo y verde, ($a^* > 0$ y $a^* < 0$ y b^*).

2.3. Definición de términos

- **Yacón:** Yacón adquirido en estado de maduración fisiológico, procedente del distrito de Cajamarca, Provincia de Cajamarca, departamento Cajamarca.
- **Microestructura de alimento:** la microestructura de alimentos está relacionada con las particularidades de calidad, como la textura, y aspectos de seguridad. Entender que función cumple la microestructura de los alimentos un rol primordial para mejorar o cambiar sus propiedades funcionales.
- **Secado de alimentos:** el secado de los alimentos parte de evaporar el agua libre de ellos por medio de la adicción de calor a una temperatura adecuada sin que esta provoque ruptura estructural.
- **Factores que afectan el proceso de secado:** Es importante recalcar que el secado de alimentos existe algunos factores los cuales pueden afectar en el desempeño de este proceso, y entre los más relevantes están la humedad, temperatura, velocidad del aire y espesor del producto.
- **Medición de color:** Las medidas de color es donde se determina las coordenadas de color L^* , a^* y b^* de la superficie de las muestras con un colorímetro (modelo CM-2500d de Konica Minolta, Japón). L^* indica la medida de luminosidad, variando entre 100, que es el blanco, y 0, que es el negro; a^* , que mide la variación de intensidad de rojo y verde, ($a^* > 0$ y $a^* < 0$ y b^*).

- **Pretratamiento del ultrasonido:** En esta operación, la técnica de ultrasonido se ha utilizado como pre tratamiento al secado de alimentos dado que provoca cambios en la estructura y acelera la transferencia de masa debido a los canales generados en la matriz del producto, producto de la cavitación. (Mosquera-Vivas et al., 2019). Este equipo de ultrasonido se encuentra en la Universidad Nacional de Cajamarca, en la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias, en el Laboratorio de Bioingeniería y Fermentaciones Industriales, utilizando oscilaciones por segundo de una onda electromagnética. Determina las propiedades y la utilización de la onda. Las frecuencias se miden en hercios (Hz). 1 Hz es una oscilación por segundo, 1 kHz mil oscilaciones, 1 MHz un millón de oscilaciones, y 1 GHz mil millones.

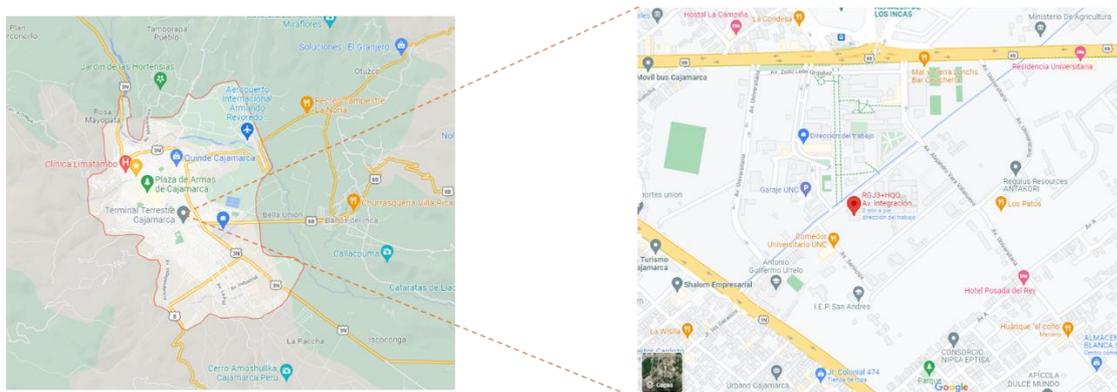
CAPITULO III

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Ubicación

La investigación se realizó en los laboratorios de la Escuela Académico Profesional de **INGENIERIA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS** de la **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA, Av. Atahualpa N°. 1050**

figura 4: Mapa del lugar de la investigación



3.2. Materiales

3.2.1. Materia prima

- Yacón

3.2.2. Equipos

- Estufa
- Balanza analítica
- Ultrasonido (cleaner)

- Secador de humedad por bandejas

3.2.3. Materiales

- Cuchillos
- Bisturís
- Navajas
- Papel toalla
- Bolsas (siploc)

3.2.4. Materiales de escritorio

- Cámara fotográfica
- Computadora portátil
- Útiles de escritorio

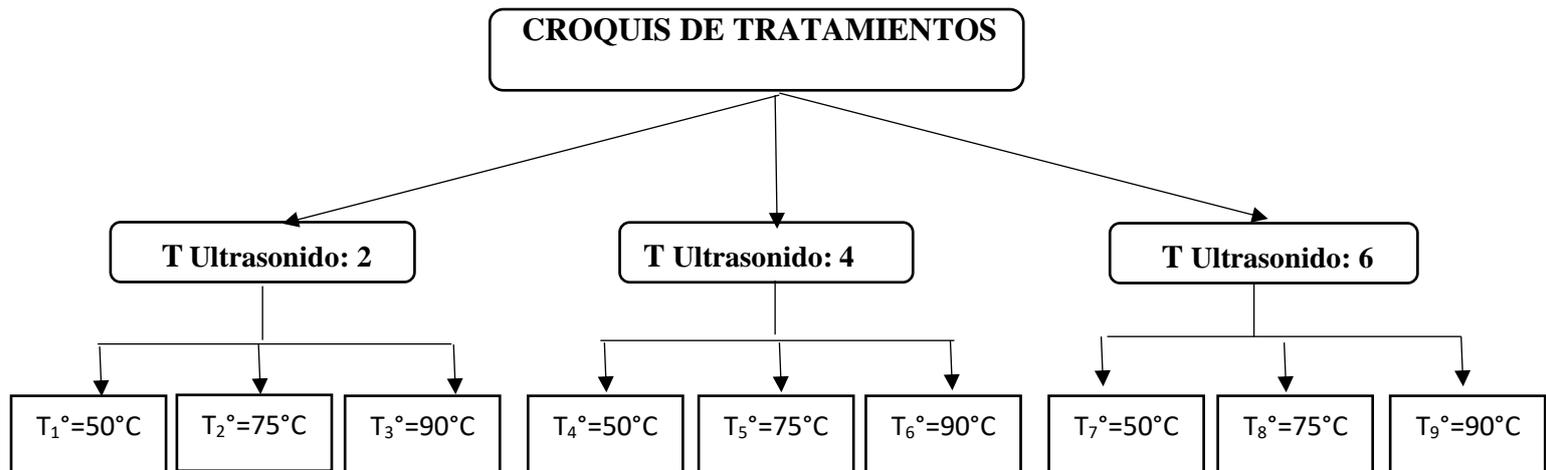
3.2.5. Otros

- Tinte para pared celular azul de toluidina

3.3. Metodología

3.3.1. Tipo y diseño de investigación

Esta investigación es de tipo experimental cuantitativa, en él se busca la relación de causa y efecto entre dos variables independientes (Tiempo de ultrasonido y temperatura) en el efecto de las variables dependientes (color y microestructura), tiene un diseño factorial de 3X2 con 9 tratamientos.



Factores, variables independientes y dependientes

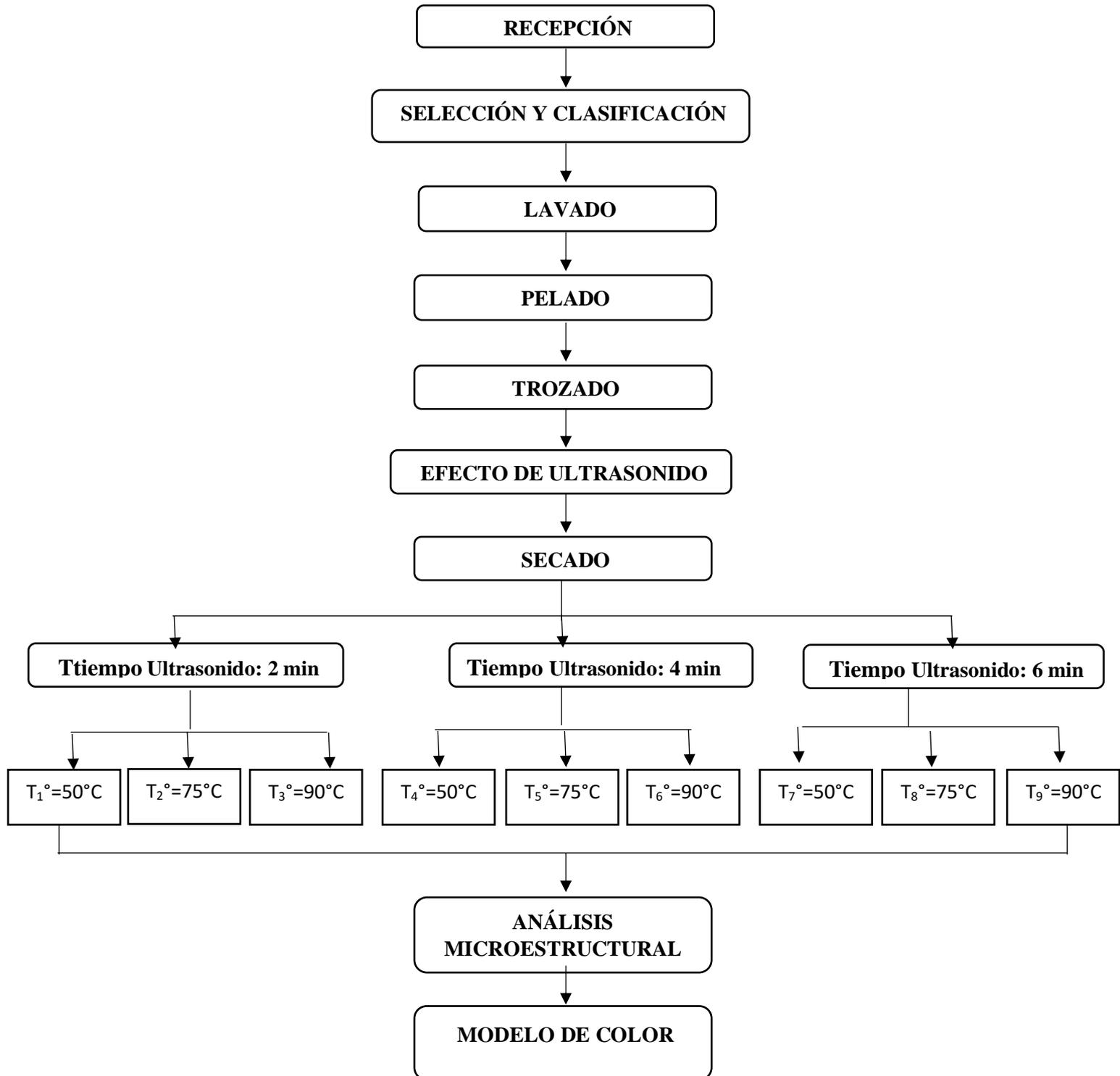
Tabla 2: factor de variables

Variables independientes	Variables dependientes
<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de ultrasonido • Temperatura de secado convencional 	<ul style="list-style-type: none"> • Microestructuras • Color

3.4. Croquis del experimento

En la figura 5 se muestra el diagrama de flujo para el análisis de microestructura y color.

Figura 5: Diagrama de flujo



3.5.Descripción del diagrama de flujo

- **Recepción:** En esta etapa se dio inicio al proceso donde la materia prima(yacón) adquirido en estado de maduración fisiológico, procedente del Distrito de Cajamarca de la Provincia de Cajamarca, departamento Cajamarca, durante la primera semana de cosecha, siendo escogidos al azar los frutos serán trasladados a laboratorio de la Universidad Nacional de Cajamarca, donde serán almacenados a temperatura ambiente.
- **Selección y clasificación:** En esta etapa se realizó en una mesa de acero inoxidable, se seleccionará por tamaño, color, forma, maduración, materia prima sin presencia de daños físicos, microbiológicos.
- **Lavado:** El lavado es una operación que constituye el punto de inicio de cualquier proceso de producción de alimentos, consiste en eliminar la tierra que está en el yacón, residuos como hojas, palos. Se realizará con agua (potable) limpia.
- **Pelado:** Consiste en la eliminación de la piel de materia prima (yacón), se realiza por medio físico con el uso de cuchillo. Esta operación permite una mejor presentación del producto, al mismo tiempo que favorece la calidad sensorial al eliminar material de textura más firme y áspera al consumo.
- **Trozado:** Consiste en obtener placas de yacón () de 0.5 cm de espesor, 2.5. cm de largo y 2.5 cm de ancho.
- **Pretratamiento del ultrasonido:** En esta operación, la técnica de ultrasonido se ha utilizado como pre tratamiento al secado de alimentos dado que provoca cambios en la estructura y acelera la transferencia de masa debido a los canales

generados en la matriz del producto, producto de la cavitación. (Mosquera-Vivas et al., 2019). Este proceso se lleva a cabo donde cada muestra de yacón es sometida a una frecuencia de ultrasonido por un tiempo de 2min, 4min, 6min en movimiento periódico que produce mil vibraciones por segundo. Este equipo de ultrasonido se encuentra en la Universidad Nacional de Cajamarca, en la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias, en el Laboratorio de Bioingeniería y Fermentaciones Industriales.

- **Secado:** En esta operación se realizó un secador por bandejas a temperaturas de 50°C, 75°C y 90°C. se realizó un control por tres tiempos de secado cada 15 minutos de muestras de yacón por 4 horas mediante pruebas sucesivas hasta obtener el objetivo de la velocidad de secado.
- **Análisis microestructural:** Este proceso se lleva a cabo a cada muestra de yacón se añadió una gota de colorante azul de toluidina al 5%, posteriormente se lleva al proceso de secado aun total de 15 muestras simultaneas a temperaturas de 50°C, 75°C y 90°C y cada 15 minutos se evalúa mediante un microscopio electrónico de barrido con el objetivo 10x y se captura la imagen usando el software Motic Image Plus 3.0 para su posterior análisis.
- **Modelos de color:** Las medidas de color se realizaron tanto en el producto fresco como en las muestras secas y deshidratadas. Para ello, se determinaron las coordenadas de color L*, a* y b* de la superficie de las muestras con un colorímetro (modelo CM-2500d de Konica Minolta, Japón). L* indica la medida de luminosidad, variando entre 100, que es el blanco, y 0, que es el negro; a*, que mide la variación de intensidad de rojo y verde, (a*>0 y a*0 y b*).

CAPITULO IV

IV. RESULTADO Y DISCUSIÓN

4.1.Efecto de la temperatura y tiempo de ultrasonidos en la velocidad de secado

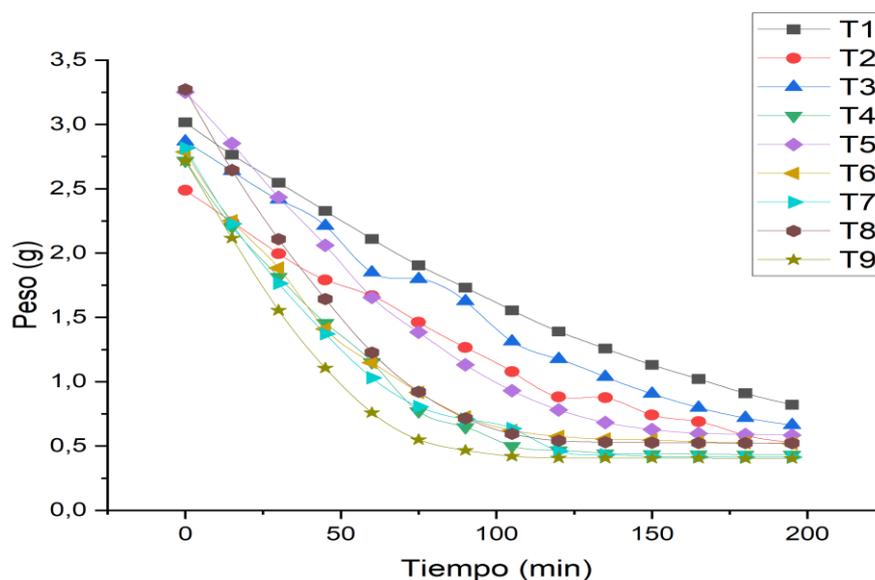
4.1.1. Análisis de secado

Para la temperatura de 50 °C con 2 minutos de ultrasonido no se logra un descenso rápido de las curvas de secado tal como se muestra en la figura 6, por ende, la incidencia sobre la pérdida de humedad es lento y con lleva más tiempo de secado y mayor gasto de energía.

Durante el aumento de temperatura a 75 °C y a mayor tiempo de ultrasonido de 3 minutos, lo cual se observa en la figura 6, muestra una aceleración en la velocidad de secado generando cambios en el peso inicial de la muestra.

En la figura 6, las curvas de temperatura y tiempo de ultrasonido en la velocidad de secado, donde la temperatura de 90°C (T7, T8 Y T9) a 6 minutos de ultrasonido es cual muestra un descenso más rápido con respecto al peso inicial de la muestra esto se debe que se contrae debido al aumento de temperatura por ende aumenta la velocidad de secado. Esto se puede explicar según (Jambrak et al., 2007), la energía ultrasónica se ha utilizado en procesos de secado porque las vibraciones de alta amplitud son capaces de aumentar los procesos de transferencia de calor y masa en los materiales al producir cambios en los gradientes de concentración, coeficientes de difusión o capa límite. De esta manera, es posible eliminar la humedad sin calentar significativamente el producto.

Figura 6: curva de secado en base al tiempo



Según la investigación realizada se explica que a temperaturas de 90 °C y tiempo de ultrasonido de 6 minutos se produce mayor vibración por segundo reduciendo el contenido de humedad y por ende aumenta la transferencia de calor produciendo un contracción y descenso del peso inicial que facilita el proceso de secado.

4.1.2. Análisis de la velocidad de secado

En la tabla 3, se muestra los ANOVA para la velocidad de secado con respecto al tiempo de pretratamiento con ultrasonido y temperatura, donde se logra observar que solo la temperatura tiene efecto significativo en la velocidad de secado obteniendo un valor $p < 0.05$.

Tabla 3: ANOVA para la velocidad de secado**Coded Parameter Estimation Table**

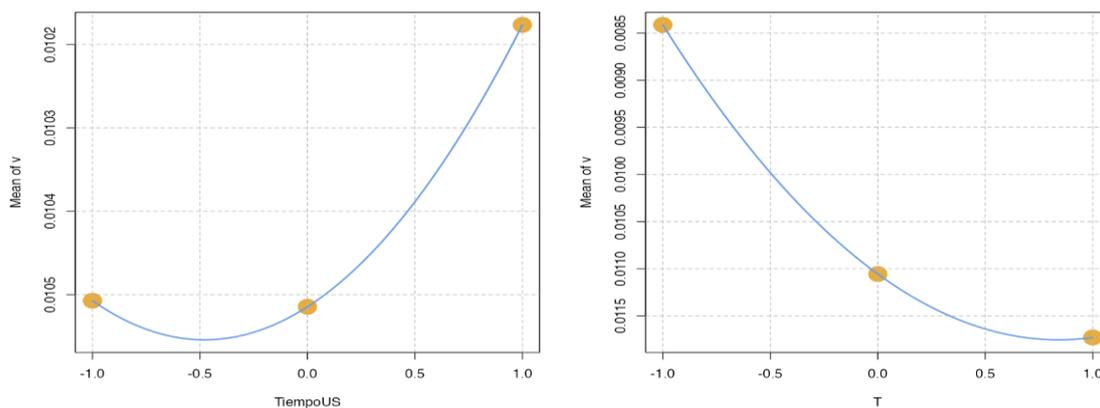
Model Terms	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
A: Tiem. (Us)	-1.65e-4	3.67e-4	-0.451	0.683
B: Temperatura	0.00166	3.67e-4	4.521	0.020
AA	-1.73e-4	6.35e-4	-0.272	0.803
AB	-9.85e-4	6.35e-4	-1.550	0.219
BB	-5.17e-4	4.49e-4	-1.151	0.333

Coded Model – v

Model equation (Coded)	R ²	R _A ²	MSE
$v=0.0112-0.0002 \cdot x_1+0.0017 \cdot x_2-0.0002 \cdot I(x_1^2)-$ $0.0010 \cdot I(x_2^2)-0.0005 \cdot x_1 \cdot x_2$	0.891		

En la figura 7, se observa el modelo de predicción de los efectos individuales de tiempo y temperatura con respecto al pretratamiento con ultrasonido, donde muestra que a mayor tiempo de ultrasonido la velocidad de secado aumenta, mientras que a mayor temperatura la velocidad de secado disminuye.

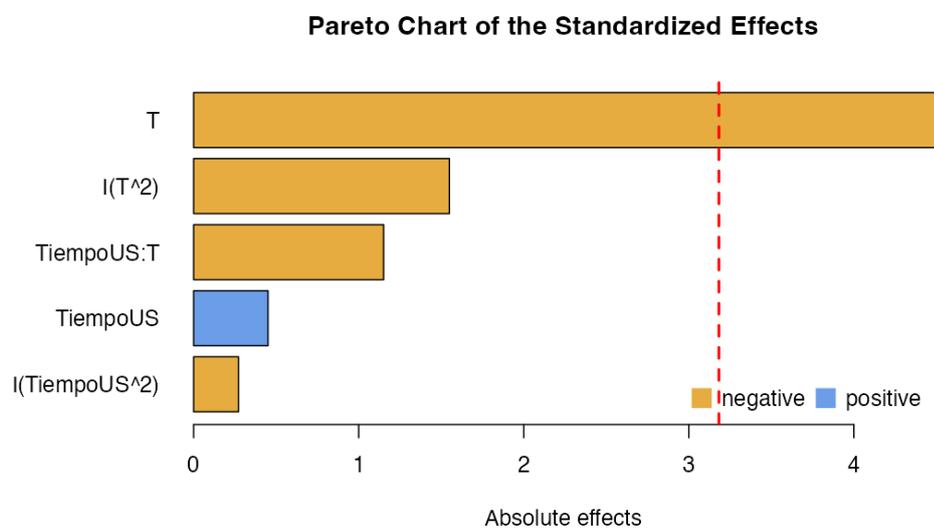
Figura 7: efectos individuales para la velocidad de secado



Asimismo, en la figura 8, del diagrama de Pareto de efectos estandarizados se puede observar que el tiempo de ultrasonido no tiene ningún efecto sobre la velocidad de secado, pero la temperatura tiene un efecto significativo en la velocidad de secado, es decir al aumentar la temperatura la velocidad de secado disminuye significativamente porque se crea un descenso rápido y una contracción dando origen a una capa externa dura del alimento, esto se puede explicar según (Salcedo Mendoza et al., 2020), en términos generales la velocidad de secado es la eliminación del agua es mayor cuando aumenta la temperatura, retirándose un alto porcentaje de agua en este primer periodo es gracias al ultrasonido ya que ayuda la salida de la humedad ya que la muestra se cargó iónicamente. Posteriormente, empieza el segundo periodo de velocidad decreciente en la cual la pérdida de humedad es mucho más lenta que la del periodo anterior, lo que indica que el agua tiene gran dificultad para migrar hacia la superficie por la alta retracción que presenta el sólido provocado por la gran desecación en que se encuentran las muestras, lo cual repercute directamente en la reducción de la cinética de secado.

Según el trabajo de investigación se explica que al aumentar la temperatura entre 75 °C y 90 °C durante el secado la muestra se contrae generando una corteza primaria dura que impide la migración del agua y esto se vio reflejado en la primera etapa durante el proceso de secado a temperaturas de 90 °C.

Figura 8: PARETO efectos estandarizados para la velocidad de secado

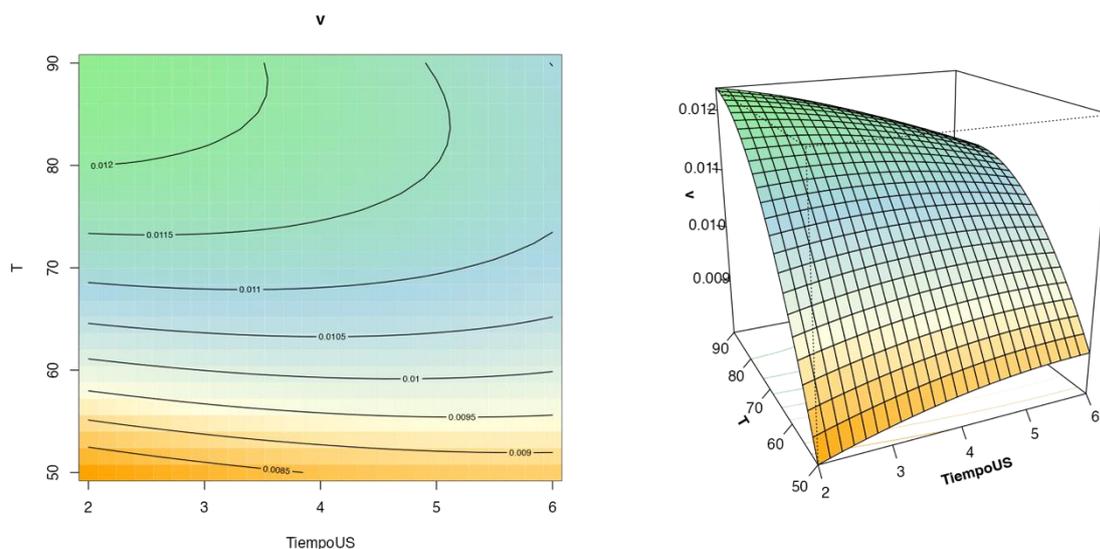


En la figura 9, se observa la superficie de respuesta en el cálculo del efecto de la temperatura y pretratamiento de ultrasonido para la velocidad de secado en las muestras de yacón, donde muestra la ecuación:

$$\text{Velocidad de secado} = 0.0112 - 0.0002 \cdot x_1 + 0.0017 \cdot x_2 - 0.0002 \cdot I(x_1^2) - 0.0010 \cdot I(x_2^2) - 0.0005 \cdot x_1 \cdot x_2$$

$$R^2 = 0.891$$

Figura 9: superficie de respuesta para la velocidad de secado



4.1.3. Valor óptimo para la cinética de secado

El valor óptimo del sistema de ecuaciones de la superficie de respuesta como se muestra en la figura 9 para la cinética de secado con respecto a la temperatura es de 80 °C donde se logra una mejor migración del agua con el propósito de evitar que se genere una capa externa dura y reduciendo por ende la velocidad de secado.

4.2.Efecto de la temperatura y tiempo de ultrasonidos en el color

4.2.1. Análisis del color L*

Para el estudio del color CIELAB, es el modelo cromático más usado normalmente para escribir todos los colores con valores numéricos, los resultados obtenidos por efecto de la temperatura y tiempo de ultrasonido para el parámetro L* (0= negro, 100= blanco), por el cual, no se logró efecto significativo para las variables de estudio de la temperatura y tiempo de ultrasonido, esto se observa en la tabla 4.

Tabla 4: ANOVA CIELAB para el color L*

Coded Parameter Estimation Table

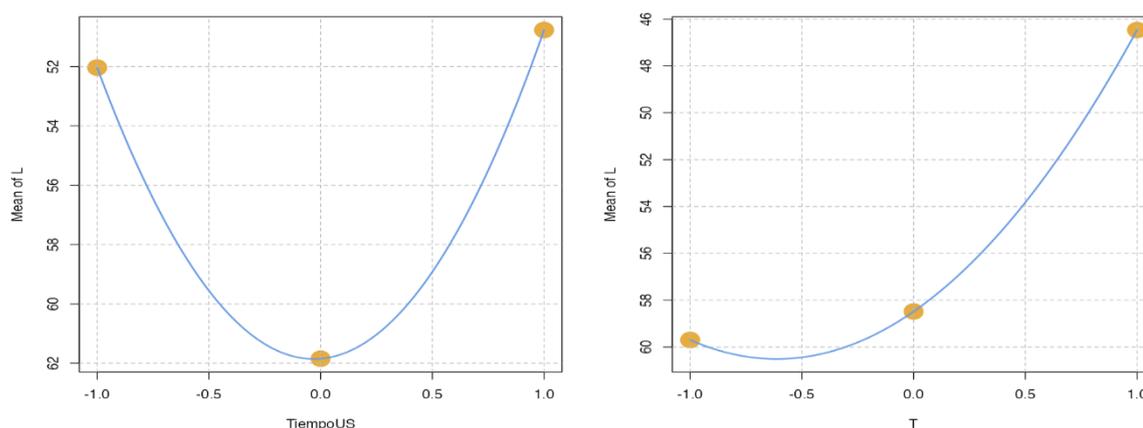
Model Terms	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
A: Tiem.(Us)	-0.634	2.46	-0.257	0.814
B: Temperatura	-6.616	2.46	-2.685	0.075
AA	-10.445	4.27	-2.448	0.092
BB	-5.402	4.27	-1.266	0.295
AB	7.093	3.02	2.350	0.100

Coded Model – L

Model equation (Coded)	R²
$L^* = 65.4478 - 0.6339 \cdot x_1 - 6.6161 \cdot x_2 - 10.4450 \cdot I(x_1^2) - 5.4017 \cdot I(x_2^2) + 7.0925 \cdot x_1 \cdot x_2$	0.872

En la figura 10, de efectos individuales se muestran las curvas del tiempo de ultrasonido y temperatura, donde se observa que el tiempo de ultrasonido no tiene una tendencia observable y por otro lado al aumentar la temperatura el parámetro L^* va aumentando lo cual representa más luminosidad.

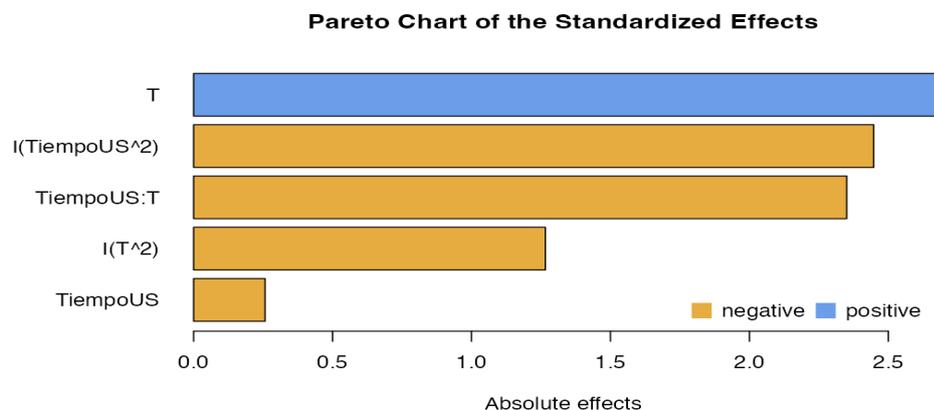
Figura 10: Efectos individuales del color L^*



En la figura 11, en el diagrama de Pareto de efectos estandarizados se observa que no hay ningún efecto significativo, pero la temperatura tiene mayor efecto sobre el color L^* con respecto al tiempo de ultrasonido. Según (Garzón-García et al., 2018) muestran resultados que al aumentar la temperatura se reduce potencialmente el pardeamiento enzimático donde los beta carotenos pigmentos naranjas, rojos y amarillos llamados carotenoides son la fuente con mayor antioxidantes presentes en el yacón y con ayuda del ultrasonido evitamos el pardeamiento, por ende, la muestra presenta colores más claros L^* (0= negro, 100= blanco).

Según el análisis de resultados podemos decir que al aumentar la temperatura de 90 °C las vibraciones por el ultrasonido entre 4 a 6 minutos ralentizan la actividad enzimática de los beta carotenos de este modo no influye en los cambios de color a tonalidades más oscuras reflejando el color característico del yacón a tonalidades claras de este modo evitamos variación en la luminosidad.

Figura 11: efectos estandarizados para el color L*



4.2.2. Análisis del Color a*

En la tabla 5, se muestran los valores numéricos del ANOVA para el parámetro a^* * (-a = verdoso, +a = rojo), del espacio CIELAB, lo cual no muestran significancia estadística tanto la temperatura y el tiempo de ultrasonido como pretratamiento.

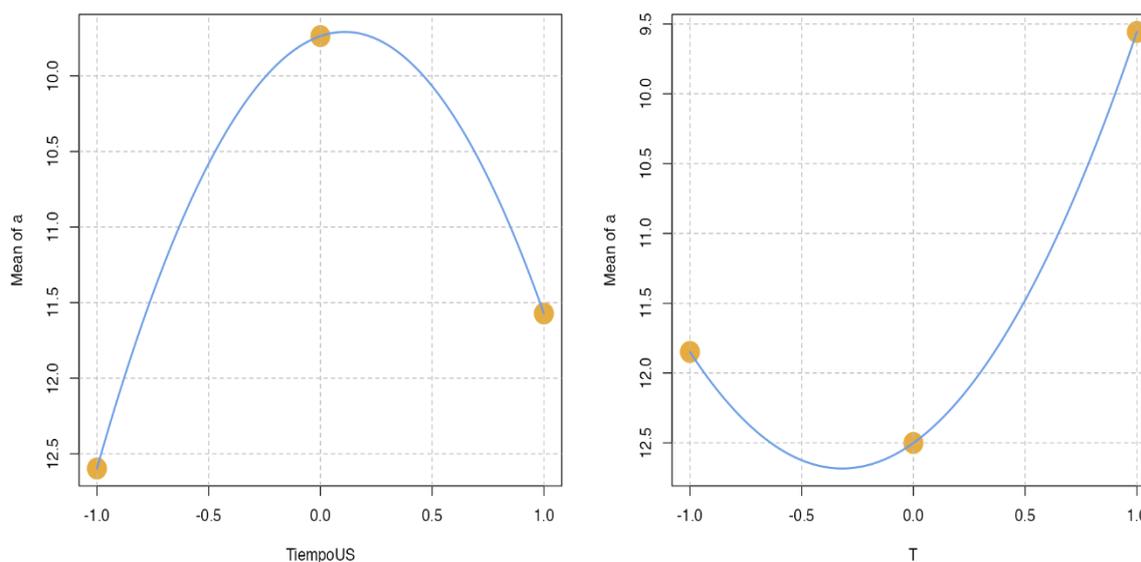
Tabla 5: ANOVA CIELAB para el color a*

Coded Parameter Estimation Table

Model Terms	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
A: Tiemp. (Us)	-0.513	0.819	-0.626	0.576
B: Temperatura	-1.146	0.819	-1.399	0.256
AA	2.348	1.419	1.655	0.197
BB	-1.798	1.419	-1.267	0.295
AB	-0.412	1.004	-0.410	0.709

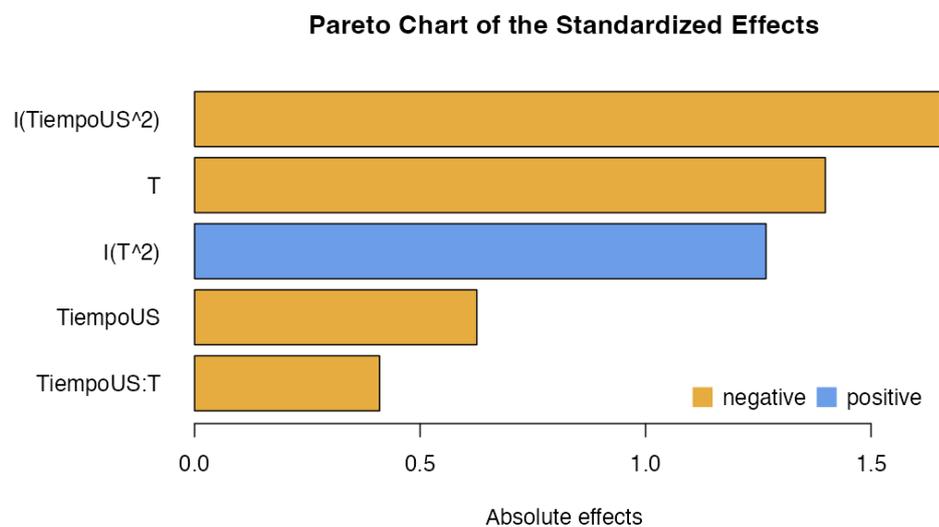
Como se muestra en la figura 12, para el análisis de los efectos individuales de tiempo de ultrasonido y temperatura, se observa que el tiempo de pretratamiento con ultrasonido no tiene una tendencia observable, pero por otro lado al aumentar la temperatura se logra mayor realce en el parámetro a^* .

Figura 12: efectos individuales para el color a^*



Asimismo, al graficar los efectos estandarizados del diagrama de Pareto en la figura 13, se logra observar que no hay significancia sobre el parámetro a^* con respecto a la temperatura y el tiempo de ultrasonido, pero el tiempo de ultrasonido tiene mayor efecto en el realce del color (a^*) con respecto a la temperatura. Este efecto mencionado por (Ortega Quintana & Montes Montes, 2015) en su investigación se puede explicar que al aumentar la temperatura se produce un enrojecimiento natural del vegetal a^* ($-a =$ verdoso, $+a =$ rojo), debido que la temperatura neutraliza el pardeamiento enzimático de las propiedades antioxidantes como son los beta carotenoides presentes en el yacón.

Figura 13: PARETO efecto estandarizado para el color a*



Tal como se muestra en el análisis de resultados el tiempo de 6 minutos de ultrasonido evitan el pardeamiento enzimático mediante las vibraciones por segundo mejorando la comprensión de mecanismos a colores más claros y nativos mediante la selección de las condiciones óptimas de procesamiento ultrasónico (frecuencia, potencia, tiempo, etc.) es crucial para que cada alimento obtenga el mejor color debido a su componentes antioxidantes que presenta dentro de su composición tales como son los β -caroteno.

4.2.3. Análisis del Color b*

En la tabla 6, se muestra el color L* del espacio CIELAB, donde se observa que hay significancia estadística de la temperatura y tiempo de ultrasonido de pre tratamiento para el color b* (-b = azul, +b = amarillo).

Tabla 6: ANOVA CIELAB para el color b*

Coded Parameter Estimation Table

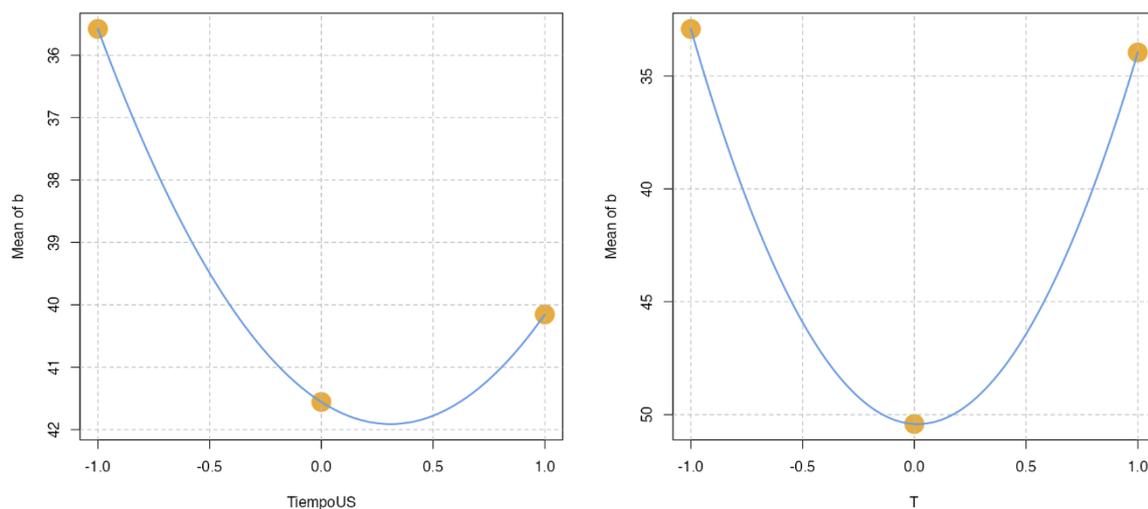
Model Terms	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
A: TIEMP. (US)	2.287	0.857	2.668	0.076
B: TEMPERATURA	0.521	0.857	0.607	0.586
AA	-3.690	1.484	-2.486	0.089
BB	-16.972	1.484	-11.434	0.001
AB	3.647	1.050	3.475	0.040

Coded Model - b

Model equation (Coded)	R ²	R _A ²	MSE
b=52.8711+2.2867·x1+0.5206·x2-3.6900·I(x1 ²)- 16.9717·I(x2 ²) +3.6475·x1·x2	0.981		

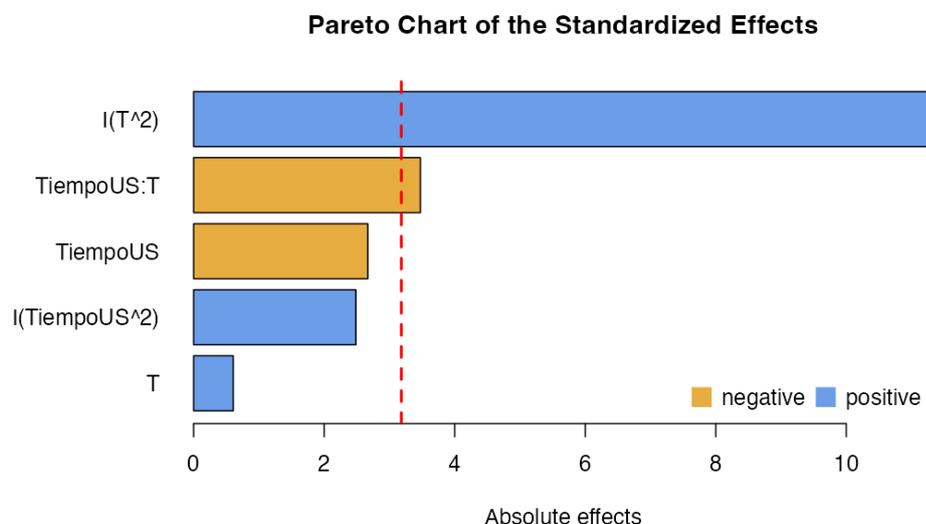
En la evaluación de los efectos individuales en la figura 14, observamos que a mayor tiempo de ultrasonido aumenta el parámetro b^* y por otro lado la temperatura no tiene una tendencia observable.

Figura 14: efectos individuales para el parámetro b^*



En la figura 15, de Pareto estandarizado, donde se muestra que la temperatura con pre tratamiento de ultrasonido y tiempo de ultrasonido tiene significancia estadística sobre el parámetro de color b^* . Estudios muestran que la temperatura de tratamiento en rodajas de yacón se vuelven más cromáticas, con una tendencia hacia una combinación amarillenta. ($-b = \text{azul}$, $+b = \text{amarillo}$) esto según (Saldaña et al., 2014). Asimismo (Costa Santos et al., 2020) explica que el pretratamiento con ultrasonido mejora sus propiedades fisicoquímicas del alimento. Esto puede explicarse que la combinación de temperatura y tiempo de ultrasonido realzan la apariencia del producto durante la etapa de secado logrando colores más claros de tonalidades más amarillentas.

Figura 15: PARETO efecto estandarizado para el color b^*



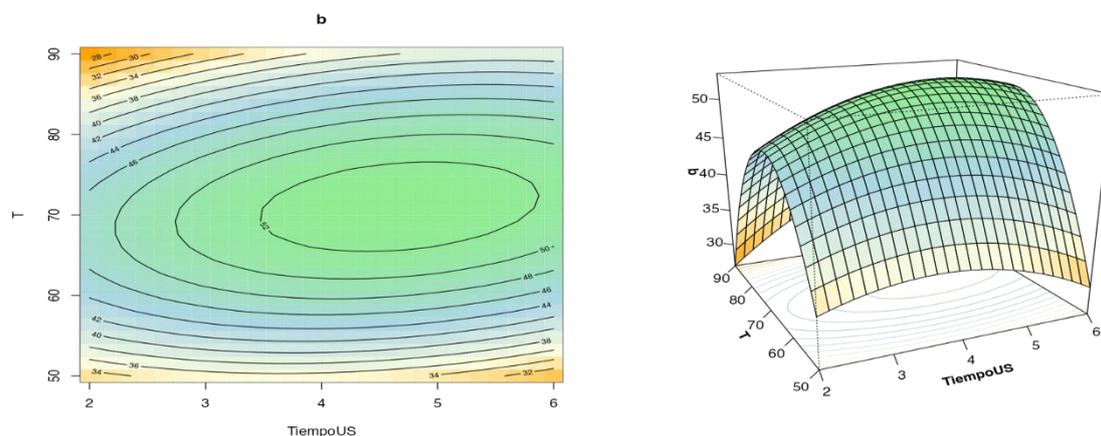
La razón de este hallazgo se ha explicado que al aumentar la temperatura a 90 °C, generan una reacción de Maillard la cual genera obtener colores más claros debido al alto contenido de azúcares (fructooligosacáridos (FOS) los más representativos, seguidos de los azúcares simples como glucosa, fructuosa y sacarosa) (Kortsarz G. et al., 2015). Asimismo, al aumentar el tiempo de 6 minutos de la potencia ultrasónica evita la oxidación enzimática del contenido de carotenoides de su poder antioxidante del yacón de este modo se potencia colores más claros tonalidades amarillentas.

En la figura 16, se muestra la superficie de respuesta sobre el efecto de la temperatura y el tiempo de ultrasonido en las muestras de yacón para el parámetro del color b^* cuya ecuación:

$$b^* = 52.8711 + 2.2867 \cdot x_1 + 0.5206 \cdot x_2 - 3.6900 \cdot I(x_1^2) - 16.9717 \cdot I(x_2^2) + 3.6475 \cdot x_1 \cdot x_2$$

$$R^2 = 0.981$$

Figura 16: superficie de respuesta para el color b^*



4.2.4. Valor óptimo para el parámetro b^*

En la figura 17, de la superficie de respuesta se muestra las incidencias de color del parámetro b^* donde la temperatura ideal es de 90 °C y tiempo de ultrasonido es de 6 minutos para obtener la brillantes y color amarillo durante el secado.

4.3. Optimización

Los valores óptimos es un sistema de ecuaciones que define optimizar las operaciones de deshidratación para lograr la máxima eficiencia de las características para el producto.

Los valores óptimos de concentración de pre tratamiento con ultrasonido y temperatura de secado para obtener una mejor calidad de color y microestructura en la muestra deshidratada fueron de 3.90613 de tiempo de ultrasonido y temperatura de 73.5462 °C para lograr mejorar las características del alimento tal como se muestra en la figura 17 y tabla 7.

figura 17: Curva de Optimización

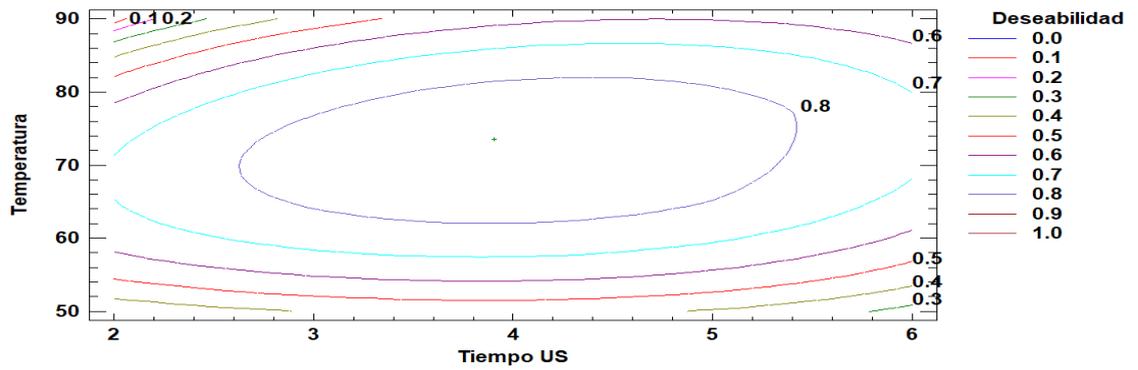


Tabla 7: Valores Óptimos de temperatura y tiempo de ultrasonido

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Tiempo US	2.0	6.0	3.9061
Temperatura	50.0	90.0	73.546

4.4. Análisis microestructural

Para el análisis microestructural se evalúa la tendencia del efecto del tiempo de pretratamiento con ultrasonido y el efecto de la temperatura sobre las características microestructurales, esto se observa en las Figuras 18 a la 19, mostrados claramente las características microestructurales de área, longitud del eje mayor, eje menor y circularidad.

figura 18: Microestructura celular

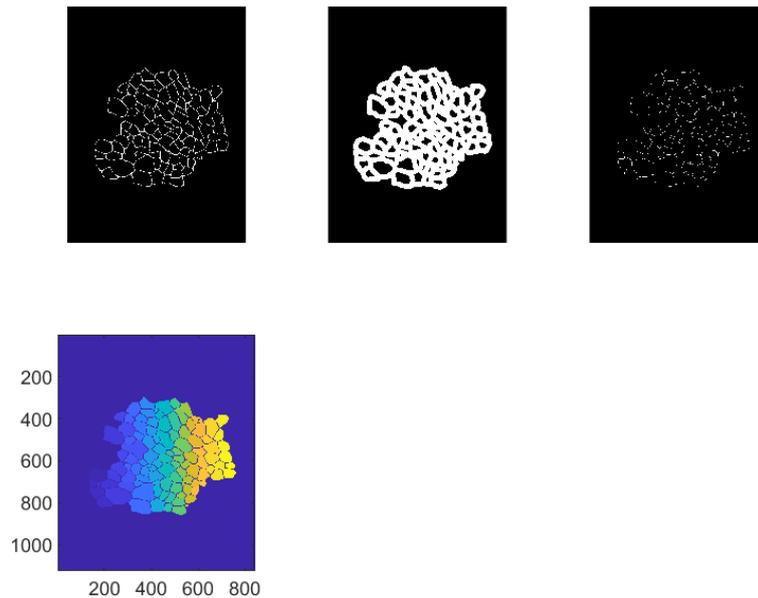


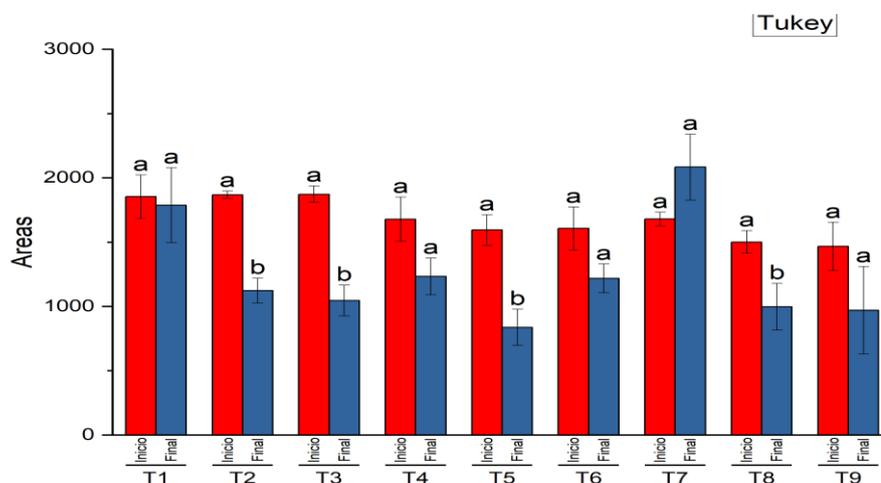
figura 19: Partes de estudio de la microestructura celular



En la figura 20, se realizó un análisis descriptivo de la prueba Tukey para observar el comportamiento de las características microestructurales del pretratamiento de ultrasonido y temperatura en el proceso de secado de yacón, se observa que, en los parámetros del área muestran una tendencia a decrecer al aumentar la temperatura, lo cual se muestra una contracción por efecto del tiempo de ultrasonido y por el aumento de la temperatura. Esto se logra explicar según (Prawiranto et al., 2019). Cuando el agua comienza a migrar desde las células, las células se encogen y, en última instancia, pueden colapsar. Esto conduce a la contracción en masa. Asimismo (Ramos et al., 2003), menciona que la contracción es la reducción de tamaño celular durante las etapas de secado usualmente referido como encogimiento y esto dependerá que tan intensivo es el tiempo y temperatura de secado.

Las pruebas de microestructura que se realizaron en la presente investigación lograron un encogimiento a nivel celular cuando estaban más en exposición a altas temperaturas de 90 °C y según fuentes bibliográficas que el uso de tecnología de ultrasonido como pretratamiento mejora considerablemente ya que facilita la salida de la salida de la humedad.

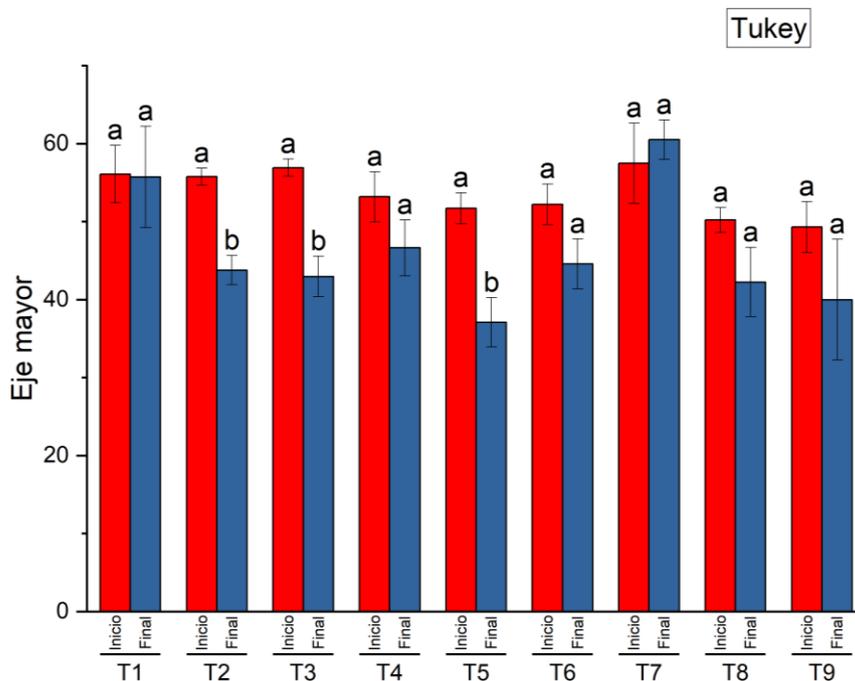
figura 20: Prueba Tukey para el área celular del yacón



Significance Level: 0,05

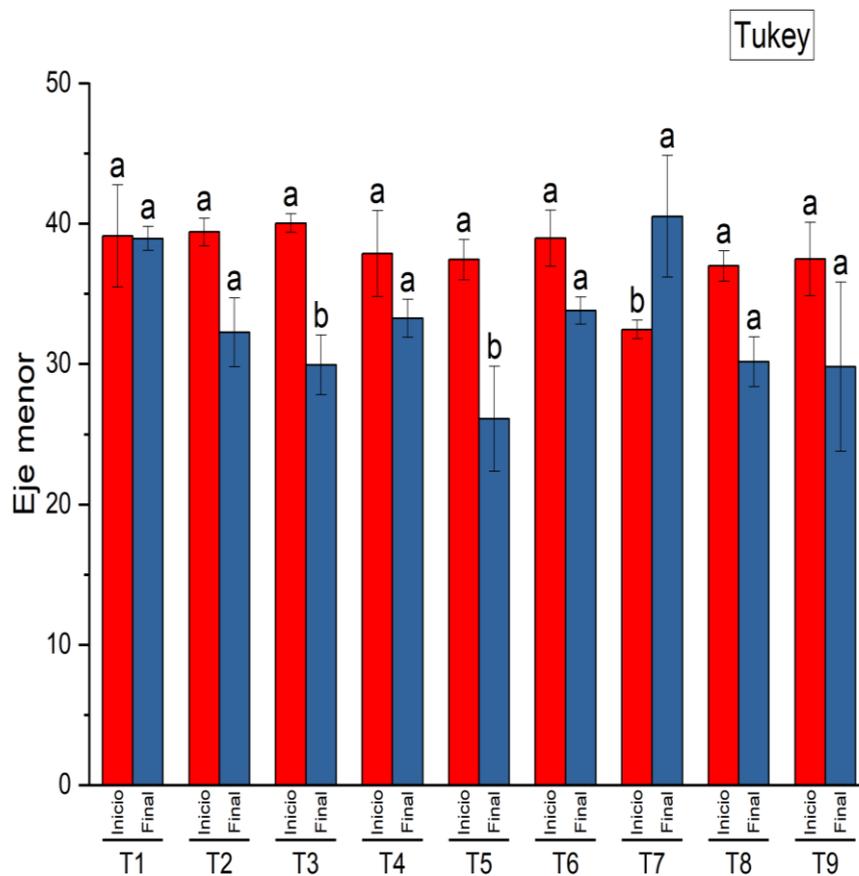
En la figura 21 se observa el efecto de la temperatura y tiempo de pretratamiento con ultrasonido sobre el eje mayor de la estructura celular del yacón, donde el mayor efecto se logra al aumentar la temperatura. Del mismo modo en la figura 22 el eje menor de la microestructura celular muestra ligeros cambios estructurales logrando una contracción por efecto del aumento de temperatura. Esto se explica que la temperatura más el pretratamiento con ultrasonido facilita la salida de agua de la célula por ende el eje mayor y eje menor pueden contraerse de acuerdo al tiempo de ultrasonido y al aumento de temperatura. Asimismo (Oblitas et al., 2021), menciona en su investigación que los elementos microestructurales son celdas y espacios intercelulares que al aplicar distintos tratamientos logran cambios microestructurales dentro del tejido vegetal sea contracción para predecir futuros modelos matemáticos y mejorar la calidad del alimento.

figura 21: Efecto de la temperatura y tiempo de ultrasonido sobre el eje mayor celular



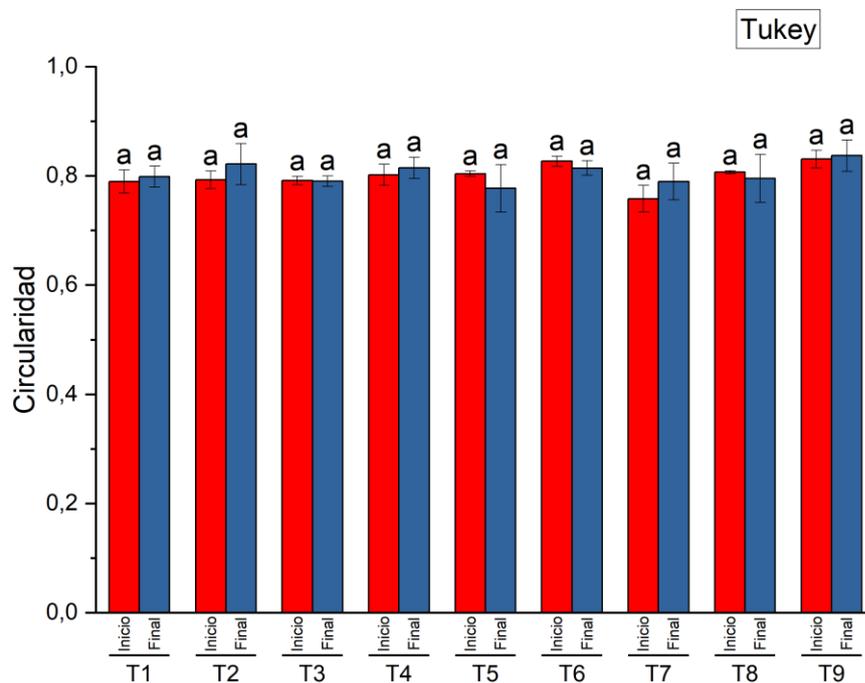
Con respecto al eje mayor y eje menor a nivel celular el efecto logrado que en el tratamiento de 90 °C x 6 minutos de ultrasonido (T7) se logra que exista cambios microestructurales, es decir una reducción debido a la salida de agua de los espacios intracelulares de la célula por efecto de las vibraciones que produce el ultrasonido que en conjunto con la temperatura facilitan la salida del agua y aceleran el proceso de secado.

figura 22: Efecto de la temperatura y tiempo de ultrasonido sobre el eje menor celular



Asimismo, en la figura 23 se observa el efecto de la temperatura y tiempo de pretratamiento con ultrasonido sobre la circularidad celular en las muestras de yacón, donde se observa que no hay contracción alguna durante los tratamientos. De esta manera, el estudio de los cambios microestructurales durante el secado es una tarea importante para entender y predecir los cambios ocurridos en las propiedades físico-químicas a niveles superiores de estructura. Según (Mayor et al., 2008), explica en dicha investigación que la ruptura celular durante la deshidratación puede llevar a crear espacios intercelulares que favorecen a la porosidad de la muestra y tener distintos tamaños y formas de la estructura celular y de este modo es que se explica que la célula evite perder su estructura celular inicial.

figura 23: efecto de la temperatura y tiempo de ultrasonido sobre la circularidad celular



Significance Level: 0,05

CAPITULO V

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.CONCLUSIONES

Se observó que la temperatura de 90 °C combinada con el pretratamiento de ultrasonido de 6 minutos aumenta la velocidad de secado del yacón, esto se realizó en base a prueba del diagrama de Pareto donde se determinó que hay efecto sobre la velocidad de secado.

Se logró observar los efectos sobre los parámetros fisicoquímicos del color del espacio CIELAB, donde L* nos muestra un efecto significativo sobre la temperatura de 90 °C y tiempo de ultrasonido de 6 minutos lograron mayor realce en los colores claros de tonalidades amarillentas, mejorando las propiedades fisicoquímicas en el yacón.

Se determinó que los parámetros microestructurales del área, eje mayor, eje menor y circularidad celular, donde las temperaturas aplicadas de 50 °C, 75°C y 90°C y la combinación de pretratamiento con ultrasonido solo tienen efecto de contracción celular al aumentar la temperatura entre los rangos de 75°C y 90 °C y tiempo de ultrasonido de 6 minutos, logrando una contracción solo sobre el área, eje mayor y eje menor mas no tiene efecto sobre la circularidad celular.

5.2.RECOMENDACIONES

Se debe comparar este estudio y de este modo generar nuevos tratamientos de estudio respecto al tiempo aplicado de ultrasonido con respecto a la temperatura para evaluar mejor los efectos de color durante el proceso de secado.

Debería ampliarse el análisis de variables para este tipo de proceso de secado con el uso de pretratamiento, como: espesor, tamaño de muestra, características organolépticas, textura, Aw, entre otras más, así facilitan el entendimiento más complejo sobre el uso de aceleradores de secado como es el ultrasonido.

CAPITULO VI

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, J., Ramaswamy, H. S., Kasapis, S., & Boye, J. I. (2016). *Nuevo procesamiento de alimentos: Efectos sobre las propiedades reológicas y funcionales*.
<https://doi.org/10.1201/9781420071221>
- Arias, J., Holgado, J., Tafur, T., & Vasquez, M. (2022). *Metodología de la investigación: El método ARIAS para desarrollar un proyecto de tesis* (1.^a ed.). Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.016>
- Armas, V., Lezama, R., Iparraguirre, R., Corcuera, A., & Siche, R. (2012). Aumento ebulloscópico de extracto de jugo de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) y determinación de gráficas de Dühring. *Agroindustrial science*, 2, 146-152.
<https://doi.org/10.17268/agroind.science.2012.02.04>
- Baeghbali, V., Ngadi, M., & Niakousari, M. (2020). Effects of ultrasound and infrared assisted conductive hydro-drying, freeze-drying and oven drying on physicochemical properties of okra slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 63, 102313.
<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102313>
- Blei, S., & Sommerfeld, M. (2007). CFD in Drying Technology – Spray-Dryer Simulation. En *Modern Drying Technology* (pp. 155-208). John Wiley & Sons, Ltd.
<https://doi.org/10.1002/9783527631629.ch5>
- Cadena, J. M. (2008, diciembre 8). *Análisis experimental del secado de semillas de pimienta grande (dp=7.55mm) en un lecho fluidizado al vacío empleando aire*.
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/martinez_c_j/resumen.html
- Cárcel, J. A., García-Pérez, J. V., Riera, E., Rosselló, C., & Mulet, A. (2014). Drying Assisted by Power Ultrasound. En *Modern Drying Technology* (pp. 237-278). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9783527631704.ch08>

- Cárcel, J. A., & Villanueva. (2017). *ultrasonido en el procesamiento de alimentos: Avances recientes* / Wiley. Wiley.com. <https://www.wiley.com/en-gb/Ultrasound+in+Food+Processing%3A+Recent+Advances-p-9781118964187>
- Chemat, F., Zill-e-Huma, null, & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813-835. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>
- Clark. (2008, agosto 1). *Plenty to Process*. <https://www.ift.org/news-and-publications/food-technology-magazine/issues/2008/august/features/plenty-to-process>
- Costa Santos, K., Souza Guedes, J., Lindsay Rojas, M., Reis Carvalho, G., & Duarte Augusto, P. E. (2020). Enhancing carrot convective drying by combining ethanol and ultrasound as pre-treatments: Effect on product structure, quality, energy consumption, drying and rehydration kinetics. *Universidad Privada Del Norte*. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105304>
- Delgado, J. (2012). Aplicación del Ultrasonido en la Industria de los Alimentos. *Publicaciones e Investigación*, 6, 141. <https://doi.org/10.22490/25394088.1098>
- Deshidratación de alimentos asistida con ultrasonido como tecnología emergente*. (2020, mayo 31). Defruveg. <https://defruveg.wixsite.com/defruveg/post/técnicas-emergentes-en-procesos-de-conservación-de-alimentos-ultrasonido>
- Fernandes, F. a. N., Gallão, M. I., & Rodrigues, S. (2008). Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. *Food Science and Technology*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2007.05.007>
- García-Mogollon, C., Sierra-Bautista, M., & Miranda-Ramos, L. (2016). Modelado de la Cinética de Secado en Microondas de Ñame. *Información tecnológica*, 27(1), 61-68. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000100008>
- García-Perez, J. V., Cárcel, J. A., Benedito, J., & Mulet, A. (2007). Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying. *Food and Bioproducts Processing : Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C*.

- https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Power+ultrasound+mass+transfer+enhancement+in+food+drying&author=Garcia-Perez%2C+J.V.&publication_year=2007
- Garzón-García, A. M., Dussán-Sarria, S., Melo-Sevilla, R. E., Garzón-García, A. M., Dussán-Sarria, S., & Melo-Sevilla, R. E. (2018). Estudio de la Variación de Parámetros de Color del Yacón utilizando un Prototipo de Medición de Color y Temperatura. *Información tecnológica*, 29(6), 75-82. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000600075>
- Gilabert, E. J. (with Universidad Politécnica de Valencia Servicio de Publicaciones). (1992). *Medida del color*. Universidad Politécnica, Servicio de publicaciones.
- Guerreo, L., & Núñez García, M. J. (1991). El proceso de secado en los alimentos. *Alimentación, equipos y tecnología*, 10(10), 111-117. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=88380>
- How To Use Hielscher's Ultrasonic Tissue Homogenizers*. (s. f.). Hielscher Ultrasonics. Recuperado 7 de mayo de 2023, de <https://www.hielscher.com/es/how-to-use-hielschers-ultrasonic-tissue-homogenizers.htm>
- J. Lachman, E.C. Fernández, & M. Orsák. (2011). Yacon [*Smallanthus sonchifolia* (Poepp. Et Endl.) H. Robinson] chemical composition and use – a review. *Plant, Soil and Environment*, 49(6), 283-290. <https://doi.org/10.17221/4126-pse>
- Jambrak, A. R., Mason, T. J., Paniwnyk, L., & Lelas, V. (2007). Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.009>
- Kortsarz G., A. M., Zannier, M. L., & Grau, A. (2015). Variación estacional de azúcares de reserva en yacón cultivado en el pedemonte de Tucumán. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 92(2), 17-22. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1851-30182015000200003&lng=es&nrm=iso&tlng=es

- Loginova, K. V., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2011). Pulsed electric field assisted aqueous extraction of colorants from red beet. *Journal of Food Engineering*, *106*, 127-133.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.04.019>
- Manrique, I., Hermann, M., & Bernet, T. (s. f.). *Yacon FichaTecnica*.
- Mason y Lorimer. (2002). Front Matter and Subject Index. En *Applied Sonochemistry* (pp. i-x). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/352760054X.fmatter_insub
- Mayor, L., Pissarra, J., & Sereno, A. M. (2008). Microstructural changes during osmotic dehydration of parenchymatic pumpkin tissue. *Journal of Food Engineering*, *85*(3), 326-339. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.06.038>
- Moses, J. A., Norton, T., Alagusundaram, K., & Tiwari, B. K. (2014). Novel Drying Techniques for the Food Industry. *Food Engineering Reviews*, *6*(3), 43.
https://www.academia.edu/15199399/Novel_Drying_Techniques_for_the_Food_Industry
- Mosquera-Vivas, E. S., Ayala-Aponte, A. A., & Serna-Cock, L. (2019). Ultrasonido y Deshidratación Osmótica como Pretratamientos a la Liofilización de Melón (*Cucumis melo* L.). *Información tecnológica*, *30*(3), 179-188. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000300179>
- Mulet, A., Cárcel, J. A., Sanjuán, N., & Bon, J. (2003). New Food Drying Technologies—Use of Ultrasound. *Food Science and Technology International*, *9*(3), 215-221.
<https://doi.org/10.1177/1082013203034641>
- Nava, J. R. D. (2004, mayo 13). *Estudio experimental del efecto de la porosidad de partículas sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando aire*.
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/davila_n_jr/
- O. Parniakov, N. I. Lebovka, E. Van Hecke, & E. Vorobiev. (2014). Pulsed Electric Field Assisted Pressure Extraction and Solvent Extraction from Mushroom (*Agaricus Bisporus*). *Food and Bioprocess Technology*, *7*(1), 174-183.
<https://doi.org/10.1007/s11947-013-1059-y>

- 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), Article 4. <https://doi.org/10.3390/app11041581>
- Ortega Quintana, F. A., & Montes Montes, E. J. (2015). Efecto del escaldado y la temperatura sobre el color y textura de rodajas de yuca en freído por inmersión. *Revista ION*, *28*(1), 19-28. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-100X2015000100003&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Patist, A., & Bates, D. (2008). Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *9*(2), 147-154. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.07.004>
- Prawiranto, K., Defraeye, T., Derome, D., Bühlmann, A., Hartmann, S., Verboven, P., Nicolai, B., & Carmeliet, J. (2019). Impact of drying methods on the changes of fruit microstructure unveiled by X-ray micro-computed tomography. *RSC Advances*, *9*(19), 10606-10624. <https://doi.org/10.1039/C9RA00648F>
- Ramos, I., Brandão, T., & Silva, C. (2003). Structural Changes During Air Drying of Fruits and Vegetables. *Food Science and Technology International - FOOD SCI TECHNOL INT*, *9*, 201-206. <https://doi.org/10.1177/1082013030335522>
- Rastogi, N. K., & Knorr, D. (2013). *Recent Developments in High Pressure Processing of Foods*.
- Rastogi, N., Nguyen, L. T., & Balasubramaniam, V. (2008). Effect of pretreatments on carrot texture after thermal and pressure-assisted thermal processing. *Journal of Food Engineering*, *88*, 541-547. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.016>
- Rojas, M. L., Silveira, I., & Augusto, P. E. D. (2020). Ultrasound and ethanol pre-treatments to improve convective drying: Drying, rehydration and carotenoid content of pumpkin. *Food and Bioproducts Processing*. <https://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2019.10.008>
- Rosa, G., Vanga, S. K., Gariépy, Y., & Raghavan, V. (2019). Comparison of microwave, ultrasonic and conventional techniques for extraction of bioactive compounds from

- olive leaves (*Olea europaea* L.). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 58, 102234. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102234>
- Saavedra Davila, J. E. (2022). Combinación de tecnologías de ultrasonido y flujo Marangoni en el proceso de secado de corazón de piña y el mecanismo de interacción de su estructura. *Universidad Privada del Norte*. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/31446>
- Sabarez, H. T., Gallego-Juarez, J. A., & Riera, E. (2012). Ultrasonic-Assisted Convective Drying of Apple Slices. *Drying Technology*, 30(9), 989. https://www.academia.edu/21764637/Ultrasonic_Assisted_Convective_Drying_of_Apple_Slices
- Sagar, V. R., & Suresh Kumar, P. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review. *Journal of food science and technology*, 47(1), 15-26. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0010-8>
- Salcedo Mendoza, J., Mercado B, J. L., Vanegas B., M., Fernández Q., A., & Vertel Morinson, M. (2020). *Cinética de secado de la yuca (Manihot esculenta Crantz) variedad CORPOICA M-tai en función de la temperatura y de la velocidad de aire*. <https://repositorio.unisucre.edu.co/handle/001/1005>
- Saldaña, E., Siche, R., Castro, W., Huamán, R., & Quevedo, R. (2014). Parámetro de medición del color en rodajas de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) mediante un sistema de visión artificial. *LWT - Food Science and Technology*, 59(2, Part 2), 1220-1226. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.037>
- Seminario, J., Valderrama, M., & Manrique, I. (s. f.). *El Yacon Fundamentos para el Aprovechamiento de un Recurso Promisorio*.
- Soria, A. C., & Villamiel, M. (2010). Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 21(7), 323-331. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.04.003>
- Strumillo, C., & Kudra, T. (1986). *Drying: Principles, Applications, and Design*. CRC Press.

- Torrington, E., Esveld, D. C., Scheewe, I., Berg, R., & Bartels, P. (2001). Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms. *Journal of Food Engineering*, *49*, 185-191. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00212-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00212-0)
- Villa, E., Siche, R., Castro, W., Huamán, R., & Quevedo, R. (2014). Measurement parameter of color on yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices using a computer vision system. *LWT - Food Science and Technology*, *59*, 1220-1226. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.037>
- Weligama Thuppahige, V. T., Welsh, Z. G., Joardder, M., & Karim, A. (2024). Recent advances in determining the cellular-level property evolutions of plant-based food materials during drying. *Trends in Food Science & Technology*, *143*, 104291. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104291>
- Yacon Cultivo Experiencia Valle Condebamba / PDF*. (s. f.). Scribd. Recuperado 26 de abril de 2023, de <https://es.scribd.com/doc/129142832/Yacon-Cultivo-Experiencia-Valle-Condebamba>
- Yanniotis, S., Taoukis, P., Stoforos, N., & Karathanos, V. (2013). *Advances in Food Process Engineering Research and Applications*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7906-2>
- Zhu, Y., Vanga, S. K., Wang, J., & Raghavan, V. (2018). Effects of Ultrasonic and Microwave Processing on Avidin Assay and Secondary Structures of Egg White Protein. *Food and Bioprocess Technology*, *11*. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2158-6>

CAPITULO VII

VII. ANEXOS

Anexo 1: Tabal de datos de cálculo para la velocidad de secado

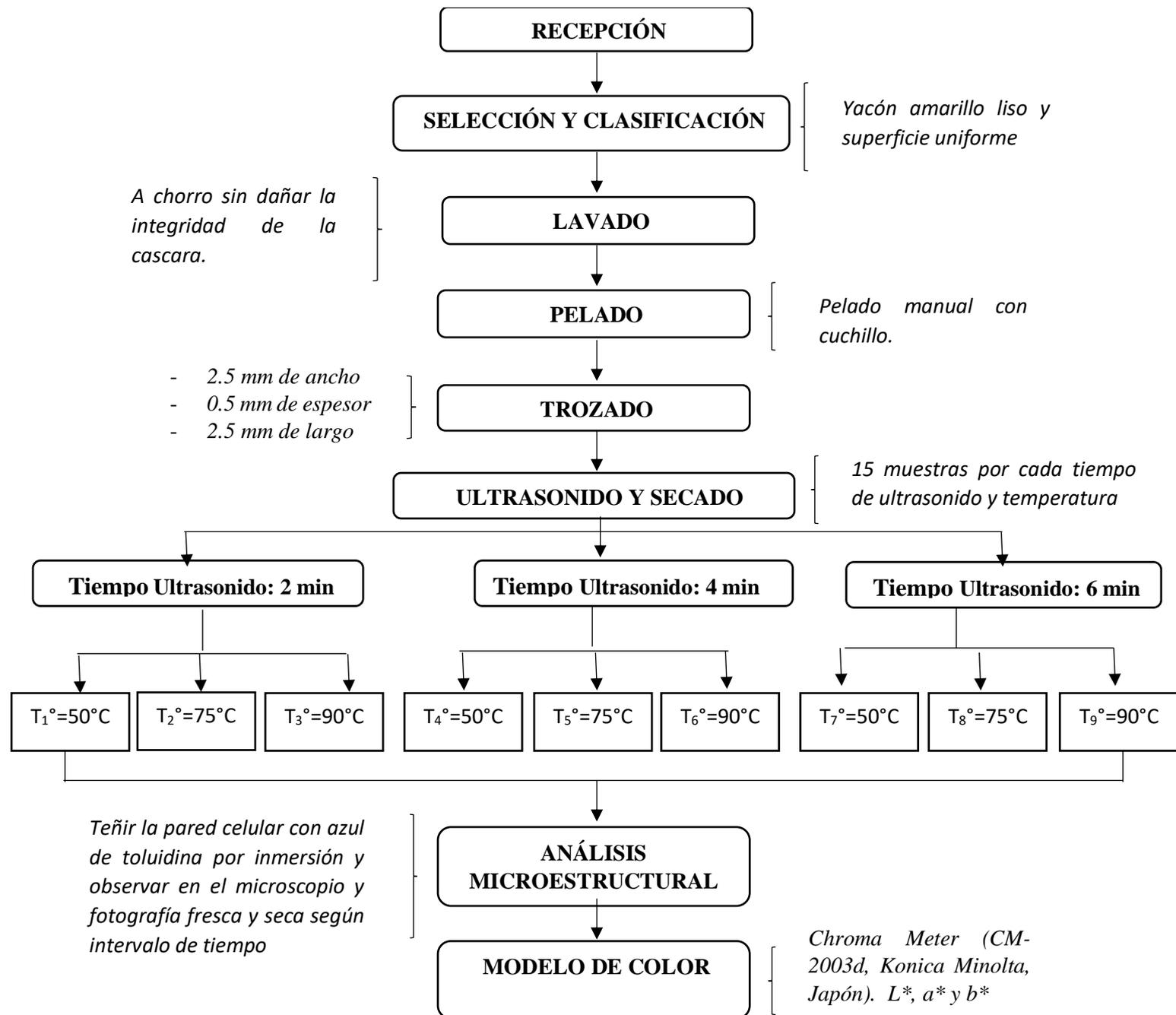
Anexo 2: Curvas para determinar la difusividad

Anexo 3: Imágenes de la parte experimental de la tesis

7.1. Flujograma de proceso de secado del yacón

En la figura 24 se muestra el diagrama de flujo para el análisis de microestructura y color.

figura 24 Diagrama de flujo de proceso



Anexo: Tablas de cálculo para la velocidad de secado

TIEMPO	PESO	MR _t	DM	x _w	X _w	Y = dX _w /dt	Ln MR _t
min	g	-	g	gH ₂ O/ g.alim	gH ₂ O/ g.s.s.	gH ₂ O/ g.s.s. x min	
0.000	3.017	1.000	0.000	0.805	4.135	0.000	0.000
15.000	2.765	0.913	-0.083	0.788	3.707	0.029	-0.091
30.000	2.547	0.838	-0.156	0.769	3.336	0.025	-0.177
45.000	2.327	0.762	-0.228	0.748	2.962	0.025	-0.272
60.000	2.110	0.687	-0.301	0.722	2.591	0.025	-0.376
75.000	1.905	0.616	-0.369	0.692	2.242	0.023	-0.484
90.000	1.732	0.556	-0.426	0.661	1.948	0.020	-0.586
105.000	1.555	0.495	-0.485	0.622	1.647	0.020	-0.702
120.000	1.391	0.439	-0.539	0.578	1.367	0.019	-0.824
135.000	1.258	0.393	-0.583	0.533	1.141	0.015	-0.935
150.000	1.131	0.349	-0.625	0.481	0.926	0.014	-1.052
165.000	1.021	0.311	-0.662	0.425	0.738	0.013	-1.168
180.000	0.910	0.273	-0.698	0.354	0.549	0.013	-1.299
195.000	0.821	0.242	-0.728	0.284	0.397	0.010	-1.419

TIEMPO	PESO	MR _t	DM	x _w	X _w	Y = dX _w /dt	Ln MR _t
min	g	-	g	gH ₂ O/ g.alim	gH ₂ O/ g.s.s.	gH ₂ O/ g.s.s. x min	
0.000	2.488	1.000	0.000	0.805	4.135	0.000	0.000
15.000	2.243	0.897	-0.098	0.784	3.629	0.034	-0.109
30.000	1.996	0.792	-0.198	0.757	3.120	0.034	-0.233
45.000	1.792	0.706	-0.280	0.730	2.698	0.028	-0.348
60.000	1.669	0.654	-0.329	0.710	2.444	0.017	-0.425
75.000	1.463	0.567	-0.412	0.669	2.019	0.028	-0.567
90.000	1.266	0.484	-0.491	0.617	1.613	0.027	-0.726
105.000	1.078	0.405	-0.567	0.550	1.225	0.026	-0.905
120.000	0.883	0.322	-0.645	0.451	0.822	0.027	-1.133
135.000	0.876	0.319	-0.648	0.447	0.808	0.001	-1.142
150.000	0.742	0.263	-0.702	0.347	0.531	0.018	-1.337
165.000	0.689	0.240	-0.723	0.297	0.422	0.007	-1.426
180.000	0.585	0.196	-0.765	0.171	0.207	0.014	-1.629
195.000	0.528	0.172	-0.788	0.083	0.091	0.008	-1.757

TIEMPO	PESO	MR _t	DM	x _w	X _w	Y = dX _w /dt	Ln MR _t
min	g	-	g	gH ₂ O/ g.alim	gH ₂ O/ g.s.s.	gH ₂ O/ g.s.s. x min	
0.000	2.868	1.000	0.000	0.805	4.135	0.000	0.000
15.000	2.637	0.916	-0.081	0.788	3.721	0.028	-0.088
30.000	2.416	0.836	-0.158	0.769	3.326	0.026	-0.180
45.000	2.213	0.761	-0.229	0.748	2.962	0.024	-0.272
60.000	1.850	0.629	-0.355	0.698	2.312	0.043	-0.463
75.000	1.798	0.611	-0.373	0.689	2.220	0.006	-0.493
90.000	1.625	0.548	-0.433	0.656	1.909	0.021	-0.602
105.000	1.313	0.434	-0.542	0.575	1.350	0.037	-0.835
120.000	1.175	0.384	-0.590	0.525	1.105	0.016	-0.957
135.000	1.037	0.334	-0.638	0.462	0.857	0.016	-1.097
150.000	0.906	0.286	-0.684	0.384	0.623	0.016	-1.251
165.000	0.798	0.247	-0.722	0.300	0.429	0.013	-1.399
180.000	0.718	0.218	-0.750	0.222	0.285	0.010	-1.525
195.000	0.663	0.198	-0.769	0.157	0.187	0.007	-1.622

TIEMPO	PESO	MR _t	DM	x _w	X _w	Y = dX _w /dt	Ln MR _t
min	g	-	g	gH ₂ O/ g.alim	gH ₂ O/ g.s.s.	gH ₂ O/ g.s.s. x min	
0.000	2.720	1.000	0.000	0.805	4.135	0.000	0.000
15.000	2.204	0.801	-0.190	0.760	3.161	0.065	-0.221
30.000	1.816	0.652	-0.332	0.708	2.428	0.049	-0.427
45.000	1.456	0.514	-0.464	0.636	1.750	0.045	-0.665
60.000	1.153	0.397	-0.576	0.540	1.176	0.038	-0.923
75.000	0.770	0.250	-0.717	0.312	0.453	0.048	-1.387
90.000	0.648	0.203	-0.762	0.182	0.223	0.015	-1.594
105.000	0.500	0.146	-0.816	-0.059	-0.056	0.019	-1.923
120.000	0.467	0.133	-0.828	-0.135	-0.119	0.004	-2.015
135.000	0.444	0.124	-0.837	-0.194	-0.162	0.003	-2.084
150.000	0.438	0.122	-0.839	-0.209	-0.173	0.001	-2.101
165.000	0.436	0.122	-0.840	-0.215	-0.177	0.000	-2.107
180.000	0.434	0.121	-0.840	-0.220	-0.180	0.000	-2.113
195.000	0.433	0.120	-0.841	-0.223	-0.182	0.000	-2.117

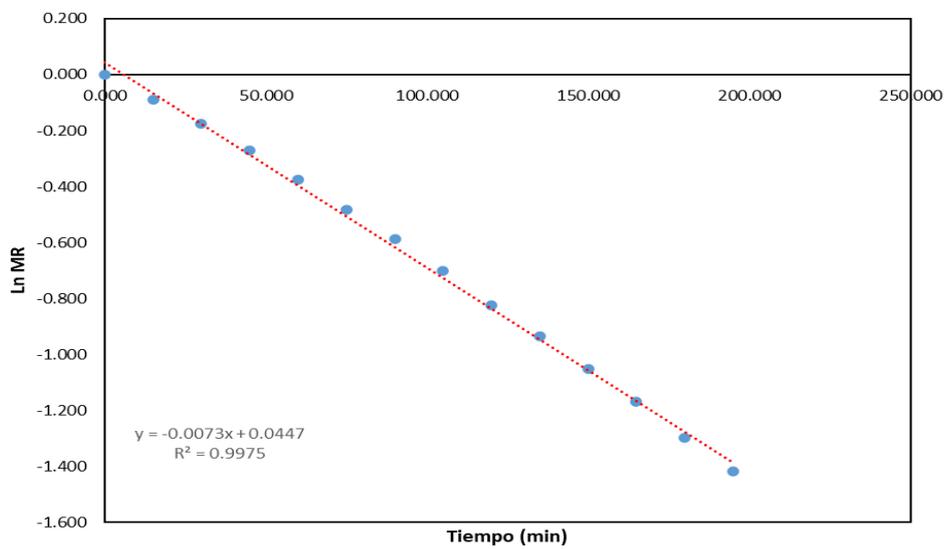
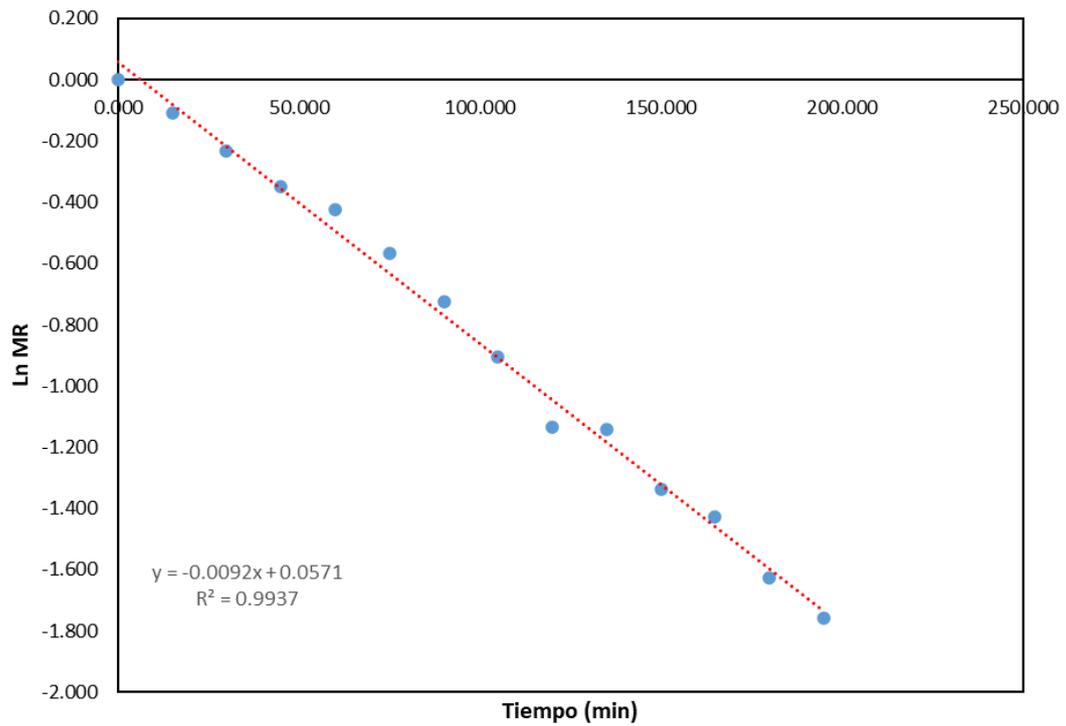
TIEMPO	PESO	MR _t	DM	x _w	X _w	Y = dX _w /dt	Ln MR _t
min	g	-	g	gH ₂ O/ g.alim	gH ₂ O/ g.s.s.	gH ₂ O/ g.s.s. x min	
0.000	3.253	1.000	0.000	0.805	4.135	0.000	0.000
15.000	2.852	0.872	-0.123	0.778	3.503	0.042	-0.137
30.000	2.435	0.739	-0.251	0.740	2.844	0.044	-0.303
45.000	2.061	0.620	-0.366	0.693	2.254	0.039	-0.479
60.000	1.656	0.490	-0.491	0.617	1.614	0.043	-0.713
75.000	1.384	0.404	-0.574	0.542	1.185	0.029	-0.908
90.000	1.132	0.323	-0.652	0.440	0.787	0.027	-1.130
105.000	0.930	0.259	-0.714	0.319	0.469	0.021	-1.352
120.000	0.781	0.211	-0.760	0.189	0.233	0.016	-1.556
135.000	0.684	0.180	-0.790	0.073	0.079	0.010	-1.715
150.000	0.628	0.162	-0.807	-0.009	-0.009	0.006	-1.820
165.000	0.598	0.153	-0.816	-0.060	-0.056	0.003	-1.880
180.000	0.590	0.150	-0.819	-0.073	-0.068	0.001	-1.896
195.000	0.585	0.148	-0.820	-0.083	-0.077	0.001	-1.908

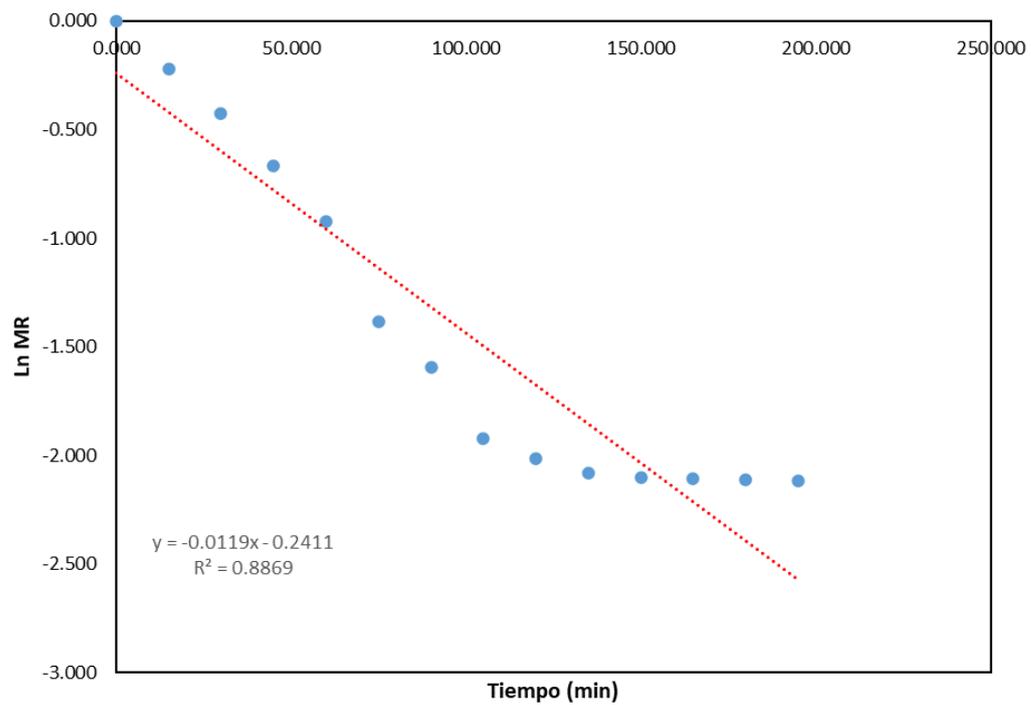
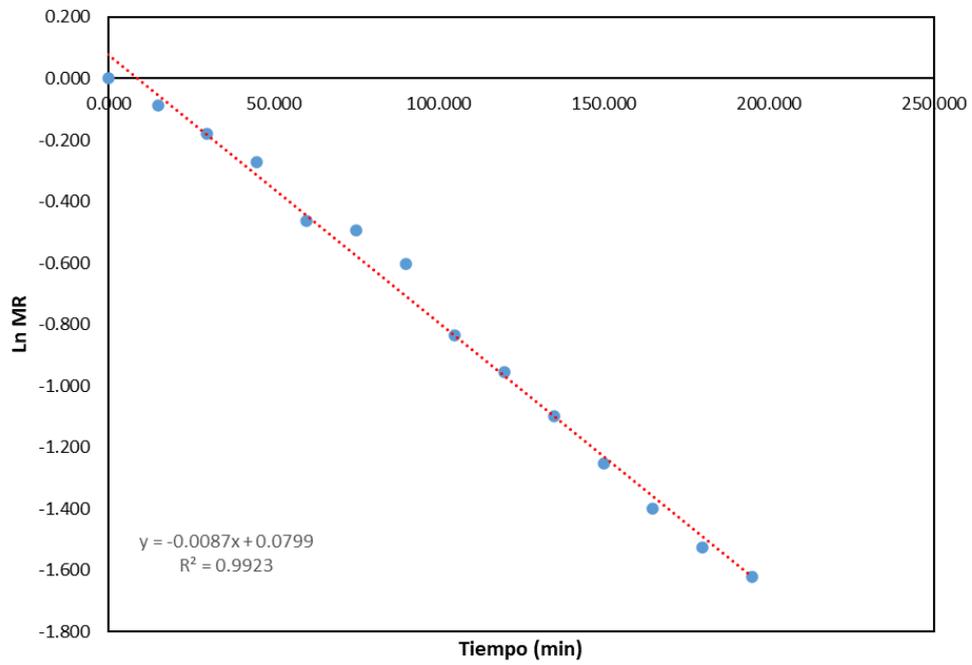
TIEMPO	PESO	MR _t	DM	x _w	X _w	Y = dX _w /dt	Ln MR _t
min	g	-	g	gH ₂ O/ g.alim	gH ₂ O/ g.s.s.	gH ₂ O/ g.s.s. x min	
0.000	2.786	1.000	0.000	0.805	4.135	0.000	0.000
15.000	2.251	0.800	-0.192	0.759	3.150	0.066	-0.224
30.000	1.883	0.662	-0.324	0.712	2.472	0.045	-0.413
45.000	1.410	0.484	-0.494	0.615	1.600	0.058	-0.725
60.000	1.148	0.385	-0.588	0.527	1.115	0.032	-0.953
75.000	0.917	0.299	-0.671	0.409	0.691	0.028	-1.207
90.000	0.727	0.228	-0.739	0.254	0.341	0.023	-1.479
105.000	0.622	0.188	-0.777	0.128	0.147	0.013	-1.669
120.000	0.575	0.171	-0.794	0.057	0.060	0.006	-1.768
135.000	0.555	0.163	-0.801	0.023	0.023	0.002	-1.813
150.000	0.546	0.160	-0.804	0.007	0.007	0.001	-1.833
165.000	0.533	0.155	-0.809	-0.018	-0.018	0.002	-1.865
180.000	0.525	0.152	-0.811	-0.033	-0.032	0.001	-1.884
195.000	0.519	0.150	-0.814	-0.045	-0.043	0.001	-1.899

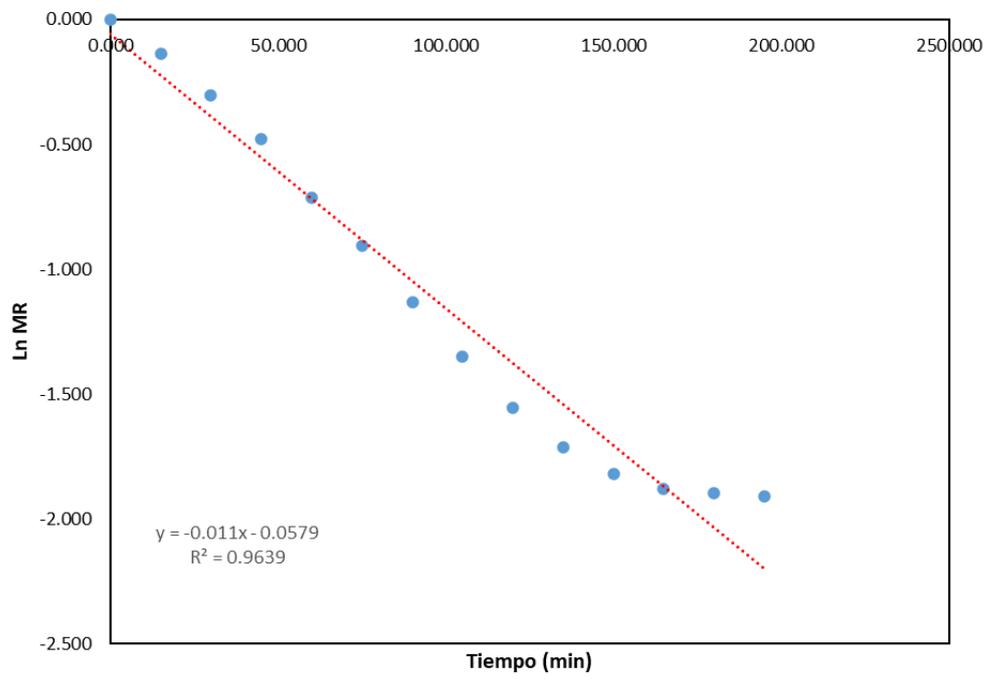
TIEMPO	PESO	MR _t	DM	x _w	X _w	Y = dX _w /dt	Ln MR _t
min	g	-	g	gH ₂ O/ g.alim	gH ₂ O/ g.s.s.	gH ₂ O/ g.s.s. x min	
0.000	2.817	1.000	0.000	0.805	4.135	0.000	0.000
15.000	2.228	0.782	-0.209	0.754	3.061	0.072	-0.246
30.000	1.765	0.610	-0.373	0.689	2.218	0.056	-0.494
45.000	1.372	0.464	-0.513	0.600	1.501	0.048	-0.767
60.000	1.030	0.337	-0.634	0.467	0.877	0.042	-1.087
75.000	0.806	0.254	-0.714	0.319	0.469	0.027	-1.369
90.000	0.710	0.219	-0.748	0.227	0.294	0.012	-1.520
105.000	0.636	0.191	-0.774	0.138	0.159	0.009	-1.654
120.000	0.462	0.127	-0.836	-0.187	-0.158	0.021	-2.065
135.000	0.432	0.116	-0.847	-0.271	-0.213	0.004	-2.158
150.000	0.418	0.110	-0.852	-0.313	-0.238	0.002	-2.203
165.000	0.415	0.110	-0.853	-0.321	-0.243	0.000	-2.212
180.000	0.414	0.109	-0.853	-0.324	-0.245	0.000	-2.215
195.000	0.413	0.109	-0.853	-0.327	-0.246	0.000	-2.218

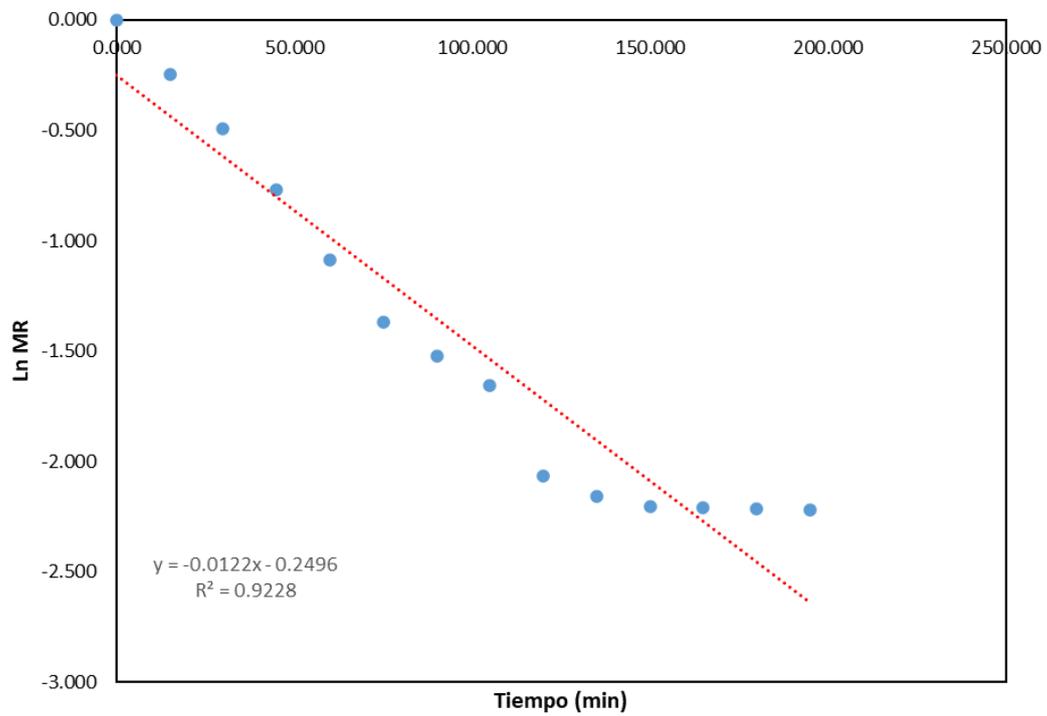
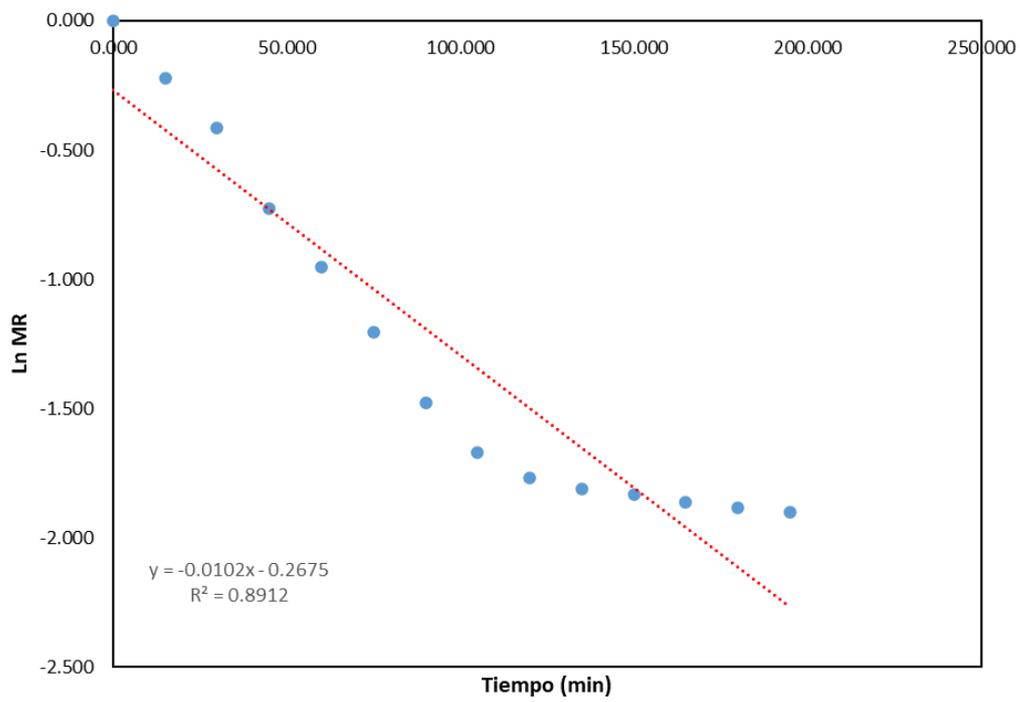
TIEMPO	PESO	MR _t	DM	x _w	X _w	Y = dX _w /dt	Ln MR _t
min	g	-	g	gH ₂ O/ g.alim	gH ₂ O/ g.s.s.	gH ₂ O/ g.s.s. x min	
0.000	3.272	1.000	0.000	0.805	4.135	0.000	0.000
15.000	2.644	0.801	-0.192	0.759	3.150	0.066	-0.222
30.000	2.109	0.631	-0.355	0.698	2.310	0.056	-0.460
45.000	1.643	0.483	-0.498	0.612	1.578	0.049	-0.727
60.000	1.227	0.351	-0.625	0.481	0.925	0.044	-1.047
75.000	0.922	0.254	-0.718	0.309	0.447	0.032	-1.369
90.000	0.716	0.189	-0.781	0.110	0.124	0.022	-1.666
105.000	0.595	0.151	-0.818	-0.071	-0.066	0.013	-1.893
120.000	0.542	0.134	-0.834	-0.176	-0.150	0.006	-2.012
135.000	0.530	0.130	-0.838	-0.202	-0.168	0.001	-2.040
150.000	0.526	0.129	-0.839	-0.211	-0.174	0.000	-2.049
165.000	0.524	0.128	-0.840	-0.215	-0.177	0.000	-2.054
180.000	0.523	0.128	-0.840	-0.219	-0.179	0.000	-2.057
195.000	0.522	0.127	-0.841	-0.221	-0.181	0.000	-2.060

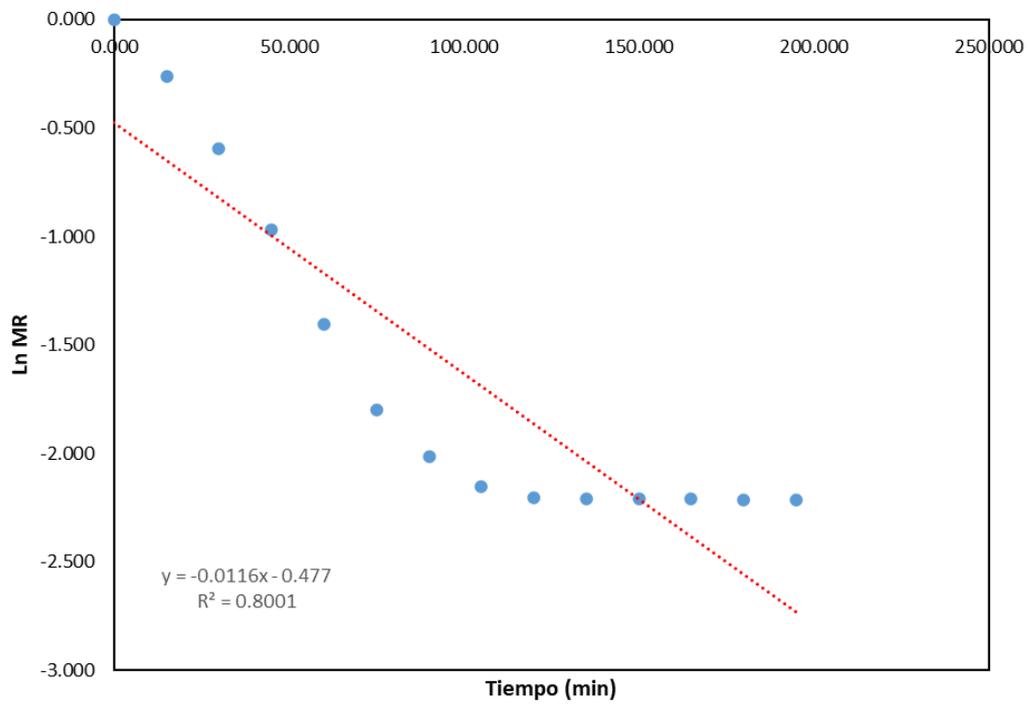
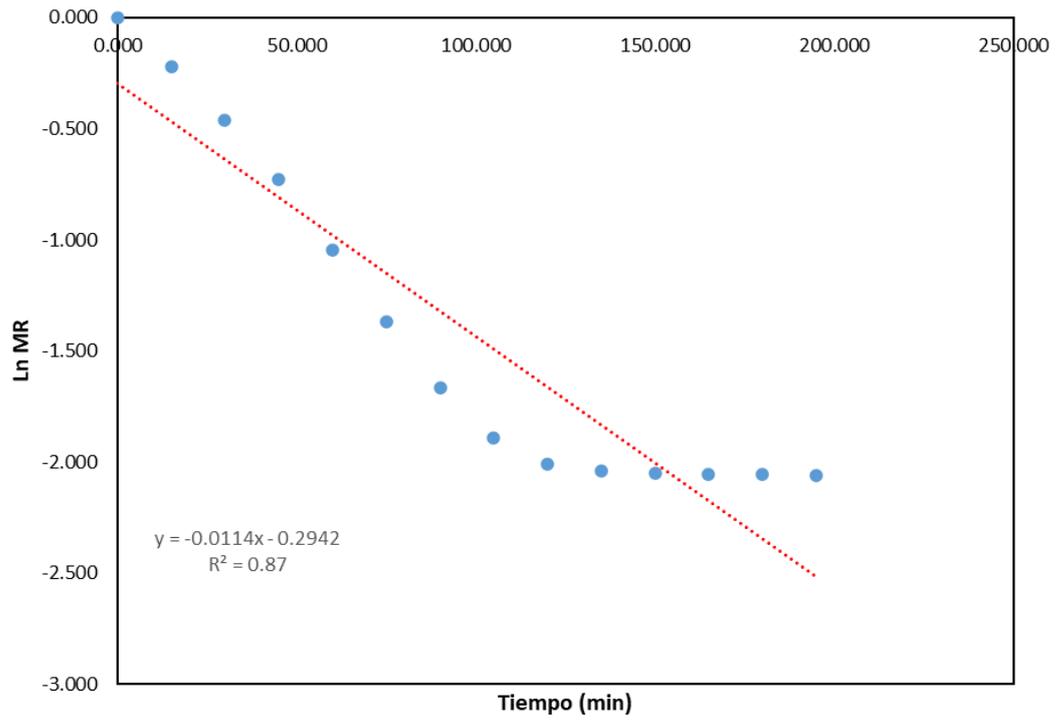
TIEMPO	PESO	MR_t	DM	x_w	X_w	Y = dX_w/dt	Ln MR_t
min	g	-	g	gH₂O/ g.alim	gH₂O/ g.s.s.	gH₂O/ g.s.s. x min	
0.000	2.718	1.000	0.000	0.805	4.135	0.000	0.000
15.000	2.117	0.768	-0.221	0.750	2.999	0.076	-0.263
30.000	1.555	0.552	-0.428	0.660	1.938	0.071	-0.594
45.000	1.106	0.380	-0.593	0.521	1.090	0.057	-0.969
60.000	0.759	0.246	-0.721	0.303	0.434	0.044	-1.402
75.000	0.550	0.165	-0.798	0.037	0.038	0.026	-1.800
90.000	0.466	0.133	-0.829	-0.136	-0.119	0.011	-2.016
105.000	0.421	0.116	-0.845	-0.257	-0.204	0.006	-2.155
120.000	0.407	0.111	-0.850	-0.300	-0.231	0.002	-2.202
135.000	0.406	0.110	-0.851	-0.305	-0.234	0.000	-2.208
150.000	0.405	0.110	-0.851	-0.306	-0.234	0.000	-2.209
165.000	0.405	0.110	-0.851	-0.307	-0.235	0.000	-2.210
180.000	0.403	0.109	-0.852	-0.313	-0.239	0.000	-2.217
195.000	0.403	0.109	-0.852	-0.314	-0.239	0.000	-2.217

Anexo: Curvas de cálculo para la difusividad









Anexo: Imágenes de la parte experimental

Preparación y corte de las muestras



Pretratamiento con ultrasonido y tinción de las muestras con azul de toluidina.



Proceso de secado (secador por bandejas) y medición del color



Etapa de pesado de muestras de yacón y fotografías de estructura celular mediante el microscopio.

