



Evaluación de las condiciones de operación del túnel de remoción de humedad y sistema de parafinado para yuca (*Manihot Esculenta*) de exportación en la empresa Expagricol S.A.S

Yurany Marcela Castillo Mosquera 1

Laura Daniela Gutiérrez Ochoa 2

Tesis de grado para optar al título de Ingeniera Agroindustrial

Asesor

Mauricio José Sierra Bautista

Magister en Ciencias Agroalimentarias

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química

Ingeniería Agroindustrial

Carepa, Antioquia, Colombia

2023

Cita

(Castillo Mosquera¹ & Gutiérrez Ochoa², 2023)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Castillo Mosquera, Y. M. & Gutiérrez Ochoa L. D. (2023). *Evaluación de las condiciones de operación del túnel de remoción de humedad y sistema de parafinado para yuca (Manihot Esculenta) de exportación en la empresa Expagricol S.A.S*, Trabajo de grado. Universidad de Antioquia, Carepa, Antioquia, Colombia.



Empresa Expagricol S.A.S

Asesor interno: Mauricio José Sierra Bautista



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Lina María González Rodríguez

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este proyecto va dirigido a mis padres que con su amor, educación y entrega han contribuido en mi crecimiento y formación académica, porque han sido mi soporte y me han motivado a alcanzar esta meta y porque mis logros son los suyos.

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por permitirme optar al título de Ingeniera Agroindustrial, a mi familia por ser un apoyo enorme e incondicional y por ser mi fuente primaria de inspiración y motivación, a la Universidad de Antioquia por brindarme conocimientos y experiencias enriquecedoras, a mis compañeros que me han ayudado a lo largo de este ciclo académico, al profesor Mauricio José Sierra Bautista por su apoyo, tiempo y disposición durante la carrera y por el acompañamiento durante la elaboración de este proyecto y a la empresa Expagricol S.A.S por la confianza y por abrirme las puertas de sus instalaciones para el desarrollo de esta tesis.

Yurany Marcela Castillo Mosquera 1

Dedicatoria

Siempre será para Dios que ha sido testigo de cada paso que doy en la vida, a mi familia Gutiérrez que me apoyo e impulso a no desertar, a mi madre que siempre ha estado orgullosa de cada eslabón de la vida que subo, a mi hermana Valeria que me ha enseñado a luchar, ser paciente y no fallecer, a mi gran amiga Dina que soportó mi casi inalcanzable lucha por este título, dedico este trabajo a mis compañeros de estudio, a todas las personas que de una u otra manera indirecta me felicitaron, apoyaron, impulsaron y sembraron en mi la fe y la esperanza que algún momento perdí y me auto dedico este logro por lo fuerte y resiliente que he sido.

Agradecimientos

La empresa EXPAGRICOL S.A.S, que permitió que desarrollara este trabajo de grado en su empresa y fue facilitadora de los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación, permitió que fuera parte de esta gran familia empresarial y me regaló una experiencia laboral y personal única y con mucho significado para mí.

A el profesor Mauricio Sierra que ante tantos inconvenientes y faltas de disciplina por mi parte estuvo presente y apoyó para que este trabajo se llevara a cabo.

Laura Daniela Gutiérrez Ochoa 2

Tabla de Contenido

Resumen	14
Abstract	15
1.0 Introducción	16
2.0 Objetivos	18
2.1 Objetivo general	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3.0 Marco teórico	19
3.1 Yuca	19
3.2 Características de calidad de la yuca fresca parafinada para exportación.....	20
3.3 Sistemas de remoción de humedad	20
3.3.1 Secadores continuos convectivos.....	21
Secadores de Túnel y Banda transportadora por convección.....	22
3.4 Secado y remoción de humedad superficial	23
3.5 Velocidad de Secado	23
3.6 Sistema de secado y remoción de humedad superficial	24
3.7 Parafinado de yuca	24
3.7.1 Parafinado	25
3.7.2 Métodos de parafinado de yuca	25
3.7.3 Temperatura de Parafinado	25
3.8 Daños que se presentan en el parafinado de yuca	26
3.8.1 Deterioro Vascular de la Yuca.....	26
Daño por Microorganismos.....	26
Daño Fisiológico	26
3.9 Métodos de determinación de vida útil	27

3.9.1 Método directo.....	29
3.9.2 Microbiología predictiva.....	29
3.9.3 Pruebas aceleradas de vida útil.....	29
4.0 Metodología.....	28
4.1 Materiales y Métodos.....	29
4.2 Diseño y planeación experimental.....	30
4.2.1 Determinación las condiciones de operación del sistema de remoción de humedad de la yuca beneficiada.....	30
4.2.2 Evaluación de la estabilidad en almacenamiento refrigerado de yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión.....	30
4.3	Métodos
29.....	
31 4.3.1 Determinación de las condiciones de operación de remoción de humedad la yuca beneficiada.....	29
Evaluación de la velocidad de la banda, distribución del flujo de aire del túnel de remoción de humedad.....	29
Velocidad de la banda.....	329
<i>Distribución de flujo de aire en el túnel.....</i>	31
Determinación de la distribución de temperaturas, pérdidas de calor paredes y consumo de combustible.....	323
Distribución de temperatura en el túnel de remoción de humedad.....	32
Determinación de perdida de calor a través de paredes.....	35
Consumo Energético	34
Calores del Sistema	35
4.3.2 Evaluación de la estabilidad de la yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión (3,6 y 9 segundos) y luego almacenadas en refrigeración.....	36

Determinación ganancia de parafina, daño fisiológico(cinética) en yucas beneficiadas en diferentes tiempos de inmersión.....	36
Evaluación microbiológica en la superficie de la yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión.....	38
5.0 Resultados.....	39
5.1 Determinación de las condiciones de operación de remoción de humedad de la yuca beneficiada	38
5.1.1 Evaluación de la velocidad de la banda, distribución del flujo de aire del túnel de remoción de humedad.	38
Velocidad de la banda.....	38
<i>Distribución de flujo de aire en el túnel.....</i>	39
Determinación de la distribución de temperaturas, pérdidas de calor paredes y consumo de combustible.....	41
Distribución de temperatura en el túnel de remoción de humedad.....	42
Determinación de pérdida de calor a través de paredes.....	44
Consumo Energético	43
Calores del sistema.....	45
5.2 Evaluación de la estabilidad de la yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión (3,6 y 9 segundos) y luego almacenadas en refrigeración.....	46
5.2.1 Determinación ganancia de parafina, daño fisiológico(cinética) en yucas beneficiadas en diferentes tiempos de inmersión.....	46
Yuca fresca.....	47
Yuca Parafinada	47
Análisis estadístico.....	49
5.2.2 Evaluación microbiológica en la superficie de la yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión.....	49
6.0 Análisis.....	50
6.1 Determinación de las condiciones de operación de remoción de humedad de la yuca beneficiada.....	52

6.1.1 Evaluación de la velocidad de la banda, distribución del flujo de aire del túnel de remoción de humedad.....	52
Distribución de flujo de aire en el túnel.....	52
Determinación de la distribución de temperaturas, pérdidas de calor paredes y consumo de combustible.....	53
Distribución de temperatura en el túnel de remoción de humedad.....	53
Remoción de humedad en el túnel a condiciones extremas de operación.....	54
Determinación de pérdida de calor a través de paredes.....	54
Consumo Energético.....	55
Calores del sistema.....	56
6.2 Evaluación de la estabilidad de la yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión (3,6 y 9 segundos) y luego almacenadas en refrigeración.....	56
6.2.1 Determinación ganancia de parafina, daño fisiológico(cinética) en yucas beneficiadas en diferentes tiempos de inmersión.....	56
6.2.2 Evaluación microbiológica en la superficie de la yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión.....	57
7.0 Conclusiones	58
8.0 Recomendaciones.....	60
9.0 Referencias	61
10.0 Anexos.....	65
Anexo 1. Producción de yuca en los municipios de Urabá.....	65
Anexo 2. Caracterización banda transportadora	65
Anexo 3. Distribución de flujo de aire.....	66
Anexo 3.1 Flujo de aire sin anular la salida de aire del ducto D	66
Anexo 3.2 Flujo de Aire anulando la salida de aire del ducto D	66
Anexo 4. Distribución de Temperatura.....	67

Anexo 4.1 Temperatura 50 °C	67
Anexo 4.2 Temperatura 70 °C	68
Anexo 4.3 Temperatura 90 °C	68
Anexo 4.4 Temperatura 110 °C	69
Anexo 4.5 Temperatura 130 °C	70
Anexo 4.6 Temperaturas promedio.....	71
Anexo 5. Distribución de temperatura en la superficie.....	71
Anexo 6. Diagrama de colores, distribución de temperatura superficial.	73
Anexo 7. Consumo Energético	75
Anexo 8. Calor aprovechado.....	75
Anexo 8.1 Convección Natural	76
Anexo 8.2 Convección forzada.....	76
Anexo 9. Análisis microbiológico	77
Anexo 9.1 Yuca fresca (UFC/g)	77
Anexo 9.2 Yuca parafinada 3s de inmersión (UFC/g).....	77
Anexo 9.3 Yuca parafinada 6s de inmersión. (UFC/g).....	78
Anexo 9.4 Yuca parafinada 9s de inmersión. (UFC/g).....	79

Lista de tablas

Tabla 1 Características físicas de yuca parafinada tipo exportación.....	20
Tabla 2 Especificaciones Anemómetro digital Gm8901.....	32
Tabla 3 Especificaciones termómetro digital termopar RISEPRO	33
Tabla 4 Desviación estándar.....	42
Tabla 5 Calor generado por el quemador.....	44
Tabla 6 Análisis ANOVA con test de TUKEY.....	49
Tabla 7 Especificaciones microbiológicas para yuca parafinada.....	51

Lista de Figuras

Figura 1. a) Cultivo de yuca b) Raíces.....	19
Figura 2. Métodos para la determinación de humedad en alimentos.....	21
Figura 3. Secador por convección tipo túnel.....	22
Figura 4. Curva de secado de materiales porosos	23
Figura 5. Túnel de remoción de humedad, por convección forzada y combustión de gas comprimido	24
Figura 6. Daño vascular en la Yuca causado por microorganismos	26
Figura 7. Daño fisiológico en la Yuca causado por enzima polifenol oxidasa (PPO).....	26
Figura 8. Túnel de remoción de humedad, empresa EXPAGRICOL S.A.S. a) Vista superior, b) Vista lateral, c) vista frontal	29
Figura 9. Cotas del túnel de remoción de humedad.....	30
Figura 10. Elemento de volumen de un nodo interior general (m, n) para la conducción bidimensional en coordenadas rectangulares.	34
Figura 11. a) Limpieza y desinfección, b) secado, c) parafinado	37
Figura 12. Velocidad lineal vs nivel variador de frecuencia.....	38
Figura 13. Túnel de remoción de humedad, vista lateral, ubicación de flautas y puntos de toma de muestra de temperatura.....	39
Figura 14. Perfil de velocidad dentro de ductos de distribución de flujo de aire.....	40
Figura 15. Remoción de humedad	40
Figura 16. Distribución de temperatura dentro del equipo para los niveles programados por controlador: 50,70, 90, 110 y 130 °C.	41
Figura 17. Consumo Energético.....	43
Figura 18. Túnel de remoción de humedad con entradas y salidas de energía en forma de calor	45
Figura 19. Calores del sistema	45
Figura 20. Transferencia de calor túnel de remoción de humedad a) Conducción b) convección forzada.....	46

Figura 22. Daño Fisiológico: a) Primeras semanas b) Semana 4-5 c) Semana 6+	47
Figura 23. Daño Fisiológico a) Primeras semanas b) semana 9-10 c) semana 11+.....	47
Figura 24. Retención de parafina para los tiempos de inmersión 3,6 y 9 segundos.	48
Figura 25. Vida útil yuca tratada con parafina para los tiempos de inmersión 3,6, 9 segundos y sin parafina	48
Figura 26. Hongos y levaduras permitidos.	50
Figura 27. Análisis microbiológico a) yuca fresca 28 días de almacenamiento b) yuca parafinada 76 días de almacenamiento	51

Siglas, acrónimos y abreviaturas

C	Cámara
F	Flauta
N	Nodo
P	Punto
UdeA	Universidad de Antioquia
Ra	Número de Rayleigh
Re	Número de Reynolds
Tbh	Temperatura de bulbo húmedo
T_c	Temperatura del foco caliente
T_f	Temperatura del foco frío
Dx	Espesor
Nu	Número de Nusselt
L_c	Longitud característica
Gr_L	Número de Grashof
Pr	Número de Prandtl
h	Coefficiente convectivo
k	Conductividad térmica
n	Viscosidad cinemática
a	Difusividad térmica
b	Coefficiente de expansión volumétrica
UFC	Unidad formadora de colonia
W	Watt

Resumen

El presente trabajo se centró en la necesidad de la empresa Expagricol S.A.S de evaluar las condiciones de operación del sistema de remoción de humedad y la estabilidad de la yuca parafinada a diferentes tiempos de inmersión. Se tomaron como factores de estudio la distribución del flujo de aire y la temperatura, tomando como respuestas la remoción de humedad, las pérdidas de calor por medio de las superficies y el consumo energético. Para la determinación de la vida útil de la yuca se evaluó la degradación del color por medio de la escala CIELAB y se determinó el crecimiento de mohos y levaduras de la yuca con diferentes días de almacenamiento empleando los medios de cultivo PDA y Sabouraud.

De los resultados obtenidos, destacamos que el sistema de remoción de humedad, bajo las condiciones de diseño no tiene capacidad para eliminar el exceso de agua, debido a: 1. El sistema de ventilación del túnel de secado no tiene capacidad de distribuir el aire en todas cámaras del equipo, 2. El túnel de secado no tiene sistema de evacuación del aire húmedo, 3. No hay distribución uniforme de la temperatura dentro del túnel y control del sistema de combustión apaga al quemador sólo cuando la cámara que censa alcanza el valor de control, 4. El túnel de secado no se encuentra aislado y pierde 58.28% de la capacidad del quemador.

Con respecto al estudio la estabilidad de la yuca parafinada, no se encontró diferencias significativas en los tiempos 3, 6 y 9 segundos de inmersión y el recuento de mohos y levadura en esta se encuentra dentro de los parámetros establecidos por la normatividad.

Palabras clave: túnel de remoción de humedad, distribución de aire y temperatura, yuca parafinada, vida útil, daño fisiológico, análisis microbiológico.

Abstract

This study aimed to evaluate the operating conditions of the moisture removal system and the stability of waxed cassava at different immersion times for the company Expagricol S.A.S. The study factors were air flow distribution and temperature, while moisture removal, heat losses through surfaces, and energy consumption served as key responses. In order to determine the shelf life of cassava, an assessment was conducted to evaluate the degradation of color using the CIELAB scale. Additionally, the growth of mold and yeast in cassava with varying storage periods was determined using PDA and Sabouraud culture media.

The results showed that the moisture removal system, as designed, was incapable of eliminating excess water due to the following reasons: 1) The ventilation system of the drying tunnel lacked the ability to uniformly distribute air in all chambers of the equipment, 2) There was no system to evacuate humid air from the drying tunnel, 3) The temperature distribution within the tunnel was non-uniform, and the combustion control system turned off the burner only when the sensing chamber reached the control value, and 4) The drying tunnel was not insulated, resulting in a 58.28% loss of burner capacity.

As for the stability of waxed cassava, no significant differences were found in the mold and yeast count between the 3, 6, and 9 seconds immersion times, and the counts were within the parameters established by regulations.

Keywords: Moisture removal tunnel, air distribution and temperature, waxed cassava, shelf life, physiological damage, microbiological analysis.

1.0 Introducción

El departamento de Antioquia, ubicado en el noroeste de Colombia se encuentra dividido en nueve subregiones, una de ellas la subregión de Urabá, que representa el 10.5% de la población de Antioquia (Instituto Popular de Capacitación (IPC), 2023), cuenta con una extensión de 11.664km² y una población de 508.802 habitantes, su actividad económica es el turismo, la agroindustria, ganadería, la pesca, la explotación de madera, y principalmente la producción agrícola de plátano, banano, yuca, piña, palma de aceite y maracuyá, para comercio nacional e internacional, la subregión de Urabá lo constituyen 11 municipios, Mutatá, Chigorodó, Carepa, Apartadó, Turbo, Necoclí, San Juan de Urabá, San Pedro de Urabá, Arboletes, Murindó y Vigía del fuerte. (Gobernación de Antioquia. 2022). Donde según el anuario estadístico del sector agropecuario departamento de Antioquia 2021, los municipios de Mutatá y Arboletes son los principales productores de yuca, con 41.67% y 20.83% del área cosechada del total de la región de Urabá. (Gobernación de Antioquia, 2021). (Anexo 1), además Antioquia es el sexto departamento en producción de yuca del país con el 7% del volumen de producción, según el ministerio de agricultura, los departamentos que más aportan volumen de producción son Bolívar (17%), Córdoba (11%) y sucre (8%). (Parra, 2018). Es por estas cifras de producción que la empresa Expagricol S.A.S, se ha visto obligada a encontrar su materia prima en el departamento de Córdoba, para cumplir con los contratos dispuestos.

Expagricol es una entidad de derecho privado, constituida legalmente en el mes de junio del 2016 ubicada en el municipio de Turbo corregimiento de Río Grande, con el objeto social de comercializar productos y ofrecer servicios agrícolas, la maquila de frutos frescos y procesados. La empresa Expagricol es pionera en la exportación de yuca parafinada, ha realizado exportaciones a Estados Unidos (New York, Miami), Holanda, Bélgica, España y Grecia, su primer envío fue a mediados del mes de noviembre de 2019, una carga de dos contenedores con destino a Lisboa, Portugal, con migración desde puerto Antioquia, ubicado en el municipio de Turbo. La empresa cuenta con una planta que opera de manera artesanal, con capacidad de procesamiento de beneficio de yuca de 2.5 Ton/día, consistiendo en el lavado, desinfección y secado de yuca, de este último destacamos que es realizado por convección natural, punto crítico del proceso a consecuencia de requerir hasta 24 horas para eliminar el agua retenida en la superficie de las raíces. Por otro lado,

la capacidad de parafinado de la empresa es de 4 ton/día, se realiza por inmersión (manual) presentado la necesidad trabajar horas extras, requiriendo horas nocturnas para cumplir con los compromisos comerciales.

De lo anterior situación y en aras de asumir una participación más relevante en el comercio de yuca procesada hacia Norte América y Europa, procesos asociados a la misión de la empresa, Expagricol S.A.S ha invertido en infraestructura, adquiriendo para las etapas de lavado, desinfección, remoción de humedad y parafinado, implementando bandas de selección y clasificación, sistema de remoción de humedad, sistema de parafinado y almacenamiento de producto terminado.

Esta fase de la adecuación de las instalaciones de Expagricol S.A.S se encuentra en el montaje y la evaluación de las condiciones de operación de los equipos antes mencionado, resultando como necesidad inmediata la evaluación de las condiciones de operación del túnel de remoción de humedad y condiciones de operación del sistema de parafinado de yuca. De lo anterior, con el objeto de atender la necesidad de evaluación de los nuevos sistemas de procesamiento de yuca parafinada, se propone, realizar la evaluación de la operación del túnel de remoción de humedad; velocidad de banda, flujos de aire, distribución de temperatura, consumo de energía y combustible para mantener temperaturas entre 50 - 130°C dentro del equipo. Además, para el caso del sistema de parafinado de yuca evaluar los tiempos de inmersión y al mismo tiempo determinar la estabilidad de almacenamiento refrigerado de la yuca parafinada por medio de análisis de color y pruebas microbiológicas.

2.0 Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar las condiciones de operación del túnel de remoción de humedad y la etapa de parafinado de yuca (*Maniotea esculenta*) para exportación en la empresa EXPAGRICOL S.A.S.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar las condiciones de operación del sistema de remoción de humedad de la yuca beneficiada; velocidad de la banda, distribución de caudal de aire, distribución de temperatura en el túnel, pérdida de calor y consumo de combustible.
- Evaluar la estabilidad en almacenamiento refrigerado de yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión; cinética de daño fisiológico y análisis microbiológico.

3.0 Marco teórico

3.1 Yuca

La yuca (*Manihot esculenta Crantz*) pertenece a la familia Euphorbiaceae. Esta familia está constituida por unas 7200 especies que se caracterizan por el desarrollo de vasos laticíferos compuestos por células secretoras o galactocitos que producen una secreción lechosa. Su centro de origen genético se encuentra en la Cuenca Amazónica. Dentro de esta familia se encuentran tipos arbóreos como el caucho, *Hevea brasiliensis*; arbustos como el ricino o higuierilla, *Ricinus communis* y numerosas plantas ornamentales, medicinales y malezas además del género *Manihot* (Aristizábal et al., 2007).

Es importante por ser producto de consumo popular y fuente barata de energía básica, aporta 124 kilocalorías/100g, su raíz es rica en potasio, calcio y vitamina C posee niveles aceptables de otros minerales y de vitamina del complejo B su contenido proteico es bajo (1%); sin embargo, sus hojas en estado fresco contienen de 8-10%. Entre los cultivos tropicales, tiene el cuarto lugar como fuente de calorías siendo básica en la alimentación humana, animal y usos industriales. Se produce por lo general en suelos agrícolas marginales, siendo una planta perenne y leñosa, alta productora de carbohidratos, tolerante a plagas, enfermedades y sequía (IICA, 2014).

Figura 1. a) Cultivo de yuca b) Raíces.



a)

b)

Nota. Fuente (Aguilar et al., 2017)

3.2 Características de calidad de la yuca fresca parafinada para exportación

El parafinado de yuca se usa para prologar la vida útil del vegetal, prolongando y reduciendo la absorción de oxígeno, evitando la proliferación temprana de microorganismos que inician la descomposición, para garantizar este método de conservación de requieren de unas especificaciones de calidad en la selección de la yuca, descritas en la pág. 59 del libro manual de cultivo de yuca (Aguilar et al., (2017)).

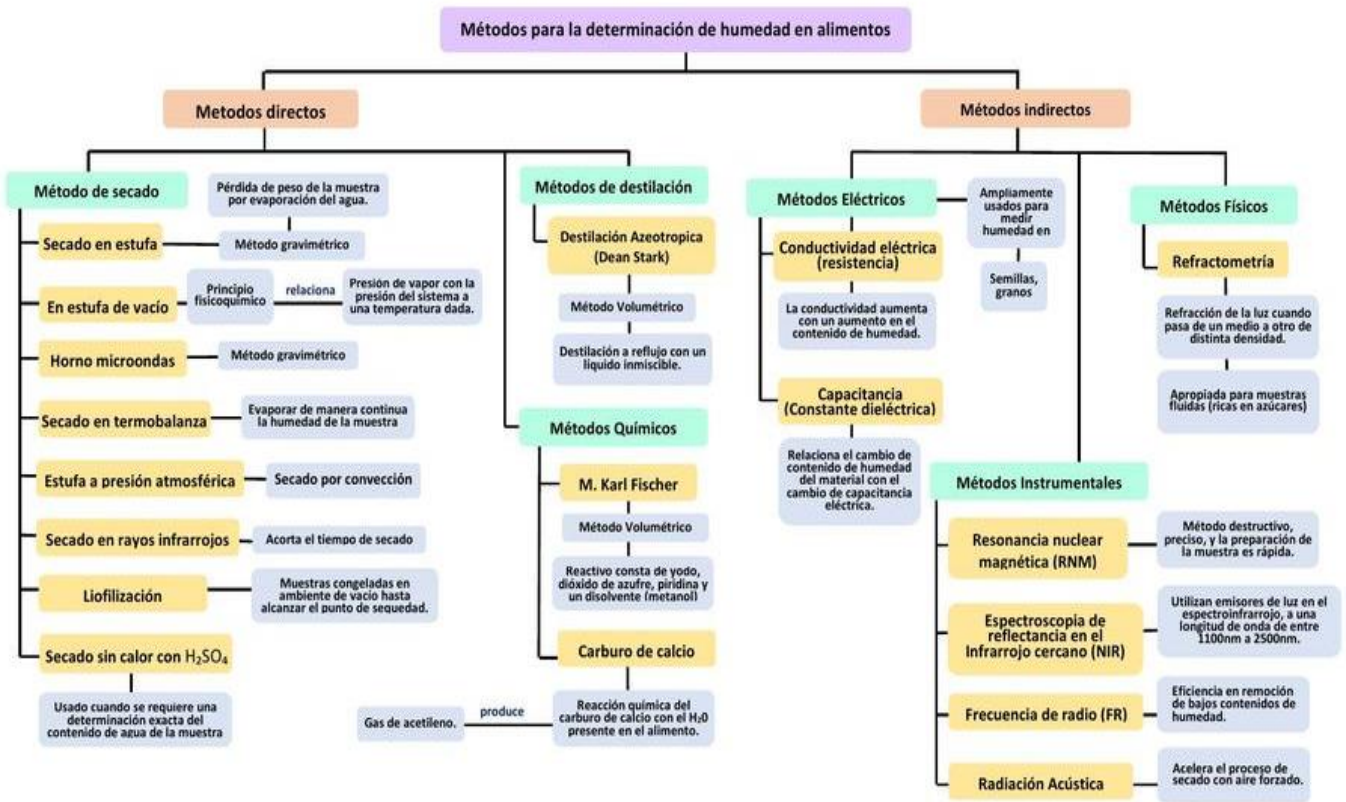
Tabla 1. Características físicas de yuca parafinada tipo exportación

Criterio de calidad	Mínimo	Máximo
Diámetro (cm)	4	10
Longitud (cm)	25	50
Peladura de la epidermis (%)	-	10
Pedúnculo (cm)		2.5
Otros criterios		
1. Relativamente recta		
2. Ausencia de quebraduras		
3. Sin daños mecánicos causados por insectos, roedores o enfermedades		
4. Libre de manchas u hongos.		
<hr/> <i>Nota.</i> Fuente (Aguilar et al., 2017) <hr/>		

3.3 Sistemas de remoción de humedad

La clasificación de los equipos de secado dependen de las características y propiedades del producto húmedo, y del procedimiento usado para transmitir el calor solido húmedo, entre estos se encuentran los secadores directos, que utilizan gases calientes en contacto con el sólido húmedo para suministrar el calor y arrastrar el líquido vaporizado, secadores indirectos en los que el calor se transmite al solido húmedo a través de la pared que lo contiene , eliminándose el líquido vaporizado independientemente del medio calefactor, secadores dieléctricos y secadores por radiación. (Maupoey et al., 2016). En la figura 2 se pueden observar los métodos para la determinación de humedad en alimentos, resaltando los métodos directos e indirectos.

Figura 2. Métodos para la determinación de humedad en alimentos.



Nota. Adaptado de Cruz, (2023).

3.3.1 Secadores continuos convectivos.

En este apartado, nos centraremos en los secadores continuos por convección forzada, representado por los tipos túnel, cinta o banda transportadora. Estos secadores se caracterizan por utilizar gases calientes que entran en contacto directo con el sólido húmedo al que transmiten calor por convección fundamentalmente y que arrastran fuera del secador los vapores producidos.

Los gases calientes pueden ser aire calentado por vapor de agua, productos de la combustión, gases inertes, vapor recalentado o aire calentado por radiación solar.

En este tipo de secadores el consumo de combustible es tanto mayor cuanto más bajo es el contenido de humedad residual del producto final.

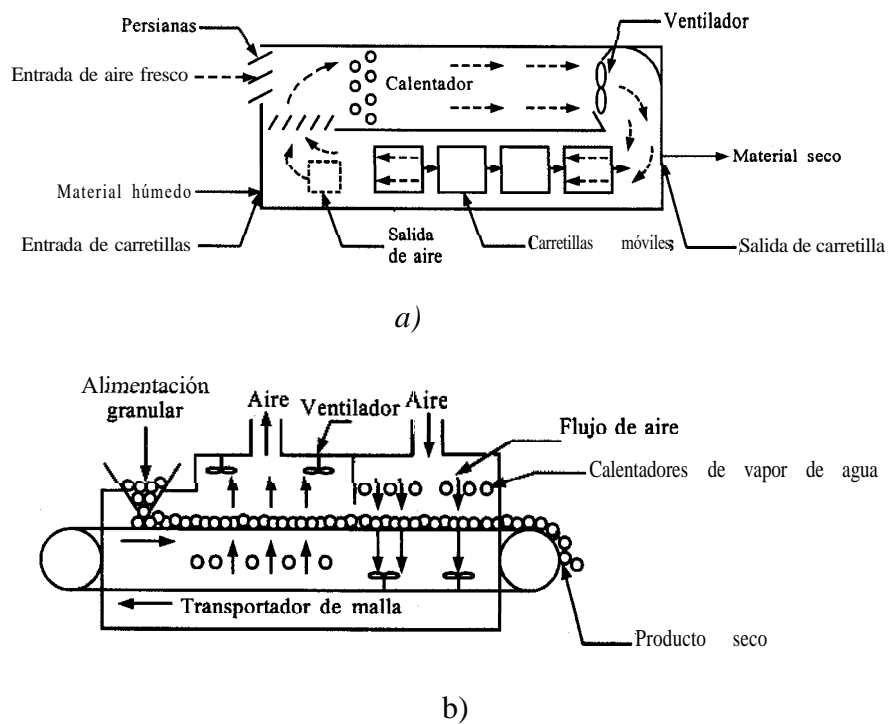
Este tipo de secadores pueden ser continuos o intermitentes, siendo el costo de funcionamiento menor en los primeros y utilizándose los segundos para bajas capacidades de producción y para el tratamiento de productos que exigen manipulación especial (Fito et al., 2016).

Secadores de Túnel y Banda transportadora por convección

Son en general aparatos sencillos y de fácil manejo, los secadores por convección son los más utilizados en las industrias agrícolas y constan, en esencia, de las siguientes partes: Recinto, sistema de calefacción y sistema de impulsión del aire generalmente calorífugo, donde se realiza la evaporación.

Dentro ese grupo de secadores por convección, se destaca los sistemas de remoción de humedad de túnel de secado, caracterizado procesar el material de interés de manera continua ajustado a la velocidad lineal de la banda transportadora y flujo de aire circula en contra corriente o transversalmente.

Figura 3. Secador por convección tipo túnel.

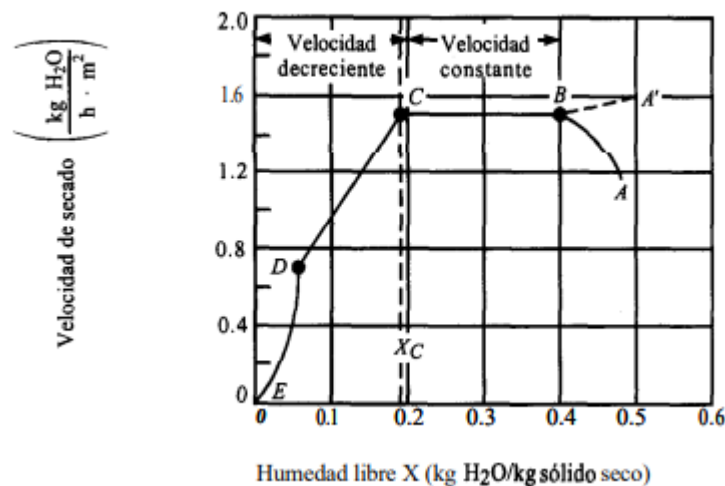


Nota. Secadores continuos del túnel: a) secador de carretillas con flujo de aire a contracorriente, b) secador de banda transportadora con circulación cruzada, Adaptado de *procesos de transportes y operaciones unitarias*. Por C.J. Geankoplis, 1998, University of Minnesota.

3.4 Secado y remoción de humedad superficial

El secado es una operación unitaria de transferencia de masa y calor, caracterizada por emplear generalmente un gas acarreador que posee la capacidad de transportar humedad basado en condiciones psicrométricas específicas (Geankoplis, 1998). Los materiales sometidos a secado experimentan curvas características, donde las velocidades de secado permiten evidenciar tres periodos conocidos como: ante crítico o a velocidad constante y los periodos proscriticos 1 y 2 a velocidad decreciente como lo ilustra la figura 4.

Figura 4. Curva de secado de materiales porosos



Nota. Fuente (Geankoplis, 1998)

Del periodo de secado a velocidad constante la remoción de la humedad de la superficie es inferior a la capacidad de transporte de humedad del sólido desde su interior hasta la superficie, manteniendo una capa de agua que desaparece al iniciar el primer periodo proscritico (Punto C, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**); fenómeno característico de la eliminación de agua superficial en sólidos que son sometidos a tratamiento de superficies como lavado, desinfección por inmersión o aspersión.(Geankoplis, 1998)

3.5 Velocidad de Secado

Cuando un sólido se coloca en el equipo de secado, comienza a absorber calor e incrementa su temperatura hasta la fijada para el secado. A medida que la temperatura aumenta, la humedad

se evapora y se empieza a enfriar el sólido. Posteriormente la velocidad de enfriamiento y calentamiento se igualan y la temperatura se estabiliza, la T_{bh} del aire secante será igual a la temperatura alcanzada. En este punto la temperatura se estabilizará y permanecerá constante siempre y cuando haya una capa de humedad remanente en la superficie del sólido. Entre los puntos B y C la humedad de evaporación de la superficie se reemplaza por el agua de difusión del interior del sólido a una velocidad igual a la de evaporación, aquí la velocidad de secado/unidad de superficie es constante (Georgette, 2009).

3.6 Sistema de secado y remoción de humedad superficial

En la figura 5 se muestra un sistema de remoción de humedad de la empresa Expagricol, basado en el fenómeno de secado a velocidad constante del periodo ante crítico de materiales porosos, en cual consta de un túnel de secado, con una banda transportadora tipo malla de velocidad regulable, por medio de la cual ingresa aire caliente con el objetivo de remover la humedad superficial de la yuca, adicionalmente, en la parte superior cuenta con un distribuidor de aire facilitan la recirculación del aire. El sistema además regular la velocidad de la banda, permite controlar la temperatura en diferentes puntos del túnel y realizar chequeos del flujo de aire.

Figura 5. Túnel de remoción de humedad, por convección forzada y combustión de gas comprimido. a) vista lateral, b) vista frontal, c) vista superior.



a)



b)



c)

3.7

3.7 Parafinado de yuca

3.7.1 Parafinado

El parafinado de la yuca se realiza con el propósito de establecer una barrera física entre la raíz y el medio ambiente, para controlar o reducir la absorción de oxígeno y de esta manera evitar la oxidación interna vascular, que se presenta con coloraciones oscuras en la pulpa de la raíz. El parafinado debe cubrir completamente la superficie de la raíz, ya que en los espacios que no sean cubiertos puede infiltrarse oxígeno que activa la enzima polifenol oxidasa y produce el deterioro vascular. Igualmente, las raíces que presentan heridas, rajaduras

o golpes y que son parafinadas se deterioran posteriormente, por efecto de patógenos que han entrado en su interior (Aguilar et al.,2017).

3.7.2 Métodos de parafinado de yuca

Aunque el proceso de parafinado puede realizarse de manera manual o mecánicamente, generalmente, la técnica de parafinado es manual; primero se introduce en el recipiente la mitad de la raíz hasta tres segundos, se espera que la película de parafina se enfríe sobre ella y se parafina luego la otra mitad. También se pueden usar canastillas similares a las utilizadas para inmersión en productos fritos. Esta operación es crítica, ya que la mala aplicación de la parafina, por exceso o por defecto, ya sea de tiempo o de temperatura, no solo invalida el proceso, sino que puede aún acelerar el deterioro de las raíces (Aristizábal et al., 2007).

3.7.3 Temperatura de Parafinado

Según estudios realizados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y la Universidad de Costa Rica (UCR), la temperatura de la parafina debe estar alrededor de 150 °C, la cual brinda un acabado trasparente adecuado. Temperaturas inferiores, por ejemplo, de 120 °C a 130 °C, consumen cerca de 20 % más de parafina. Temperaturas inferiores a 120 °C dan una apariencia blancuzca no adecuada para una calidad de exportación. Por otro lado, las temperaturas mayores a 150 °C favorecen la sublimación (paso a estado gaseoso) de ciertos componentes de la parafina, los cuales al ser respirados se solidifican en el organismo y pueden afectar la salud de los operarios, y requieren el uso de una mayor cantidad de parafina (Aguilar et al., (2017)).

3.8 Daños que se presentan en el parafinado de yuca

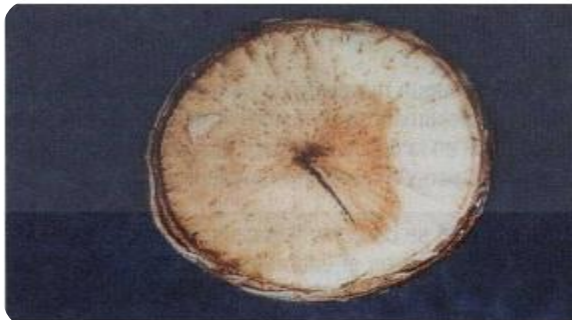
3.8.1 Deterioro Vascular de la Yuca

De acuerdo con Fonseca y Saborío (2001), el deterioro vascular de la yuca puede iniciarse de manera perceptible desde 8 horas después de haberse cosechado y hay dos tipos de daño, plenamente identificados, que pueden presentarse aislada o simultáneamente:

Daño por Microorganismos.

Atribuido principalmente a bacterias, presenta una textura más suave y un color crema distribuido en forma localizada y con poca uniformidad, ver figura 6.

Figura 6. *Daño vascular en la Yuca causado por microorganismos*



Nota. Fuente (Fonseca & Saborío, 2001)

Daño Fisiológico

Dado por la oxidación de un compuesto fenólico llamado escopoletina en presencia de la enzima polifenol oxidasa (PPO); en la figura 7, se puede ver la sintomatología de decoloración negro - morada de los rayos xilemáticos y parénquima periférico. La escopoletina se puede detectar en las raíces antes de los síntomas típicos del deterioro, cuando se exponen las raíces a luz ultravioleta, pues emite una fluorescencia de color azul intenso, la cual indica el inicio del proceso.

Figura 7. *Daño fisiológico en la Yuca causado por enzima polifenol oxidasa (PPO)*



Nota. Fuente (Fonseca & Saborío, 2001)

3.9 Métodos de determinación de vida útil

La yuca parafinada tiene como función extender la vida útil, por ser un producto vegetal sin ninguna adición de ingredientes o transformación fisicoquímica. De acuerdo con la empresa de Biotecnologías Aplicadas (BTSA, 2022), los métodos más utilizados hoy en día para determinar la vida útil de los alimentos son:

3.9.1 Método directo.

Son estudios a tiempo real que consisten en almacenar el producto en condiciones similares a las que se enfrentará en la realidad, para monitorear su evolución en intervalos de tiempo regulares. Su principal ventaja es que permiten hacer una estimación muy exacta del tiempo que tarda un producto en deteriorarse, sin embargo, son estudios que por lo general toman mucho tiempo y que no consideran que las condiciones de almacenaje de un producto no siempre son estables en el tiempo.(BTSA, 2022)

3.9.2 Microbiología predictiva.

Esta metodología estudia las diferentes respuestas microbianas de los alimentos a distintas condiciones ambientales, basándose para ello en modelos matemáticos y estadísticos, con el objetivo de predecir el comportamiento de los microorganismos en el producto. Este tipo de estudios son muy utilizados cuando se quiere desarrollar un nuevo producto y sí considera las posibles condiciones cambiantes de un producto, sin embargo, sus mayores limitaciones son que

suponen una mayor complejidad para el fabricante y que los resultados corresponden a una simulación por lo que pueden no ser exactos. (BTSA, 2022)

3.9.3 Pruebas aceleradas de vida útil

En estos ensayos, las condiciones como la temperatura, la presión de oxígeno o el contenido de humedad son modificadas para acelerar las reacciones de deterioro de un alimento. Estas predicciones permiten predecir el comportamiento de los alimentos frente a unas condiciones determinadas y estimar cómo será su evolución en ciertas condiciones de almacenamiento. Las pruebas aceleradas permiten la inclusión de condiciones ambientales cambiantes y variaciones de concentración de los ingredientes que los componen. (BTSA, 2022)

4.0 Metodología

4.1 Materiales y Métodos

Los materiales vegetales empleados en este trabajo se recolectaron de principales productores de yuca de la subregión de Urabá, localizados en los municipios de Chigorodó y Mutatá. El material se acondicionó en las instalaciones de la Universidad de Antioquia, sede Tulenapa (Q8FP+JH Carepa, Antioquia) y en la sede de Expagricol S.A.S ubicada en el corregimiento de Riogrande, Turbo. Los reactivos empleados fueron el agar Sabouraud glucosado, el agar PDA (agar papa dextrosa) y agua peptonada.

4.2 Diseño y planeación experimental.

4.2.1 Determinación las condiciones de operación del sistema de remoción de humedad de la yuca beneficiada; velocidad de la banda, distribución de caudal de aire, distribución de temperatura en el túnel, pérdida de calor y consumo de combustible.

Para realizar la evaluación del sistema de remoción de humedad de la yuca beneficiada emplearemos la planeación experimental bajo la evaluación fenomenológica de los principios de continuidad, transferencia de calor por conducción y condiciones de frontera por convección y radiación térmica. Empleamos la evaluación de cinco niveles de temperatura [50, 70, 90, 110 y 130° C] y cinco repeticiones. Para el estudio de la variación de los efectos empleamos estadística descriptiva

4.2.2 Evaluación de la estabilidad en almacenamiento refrigerado de yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión; cinética de daño fisiológico y análisis microbiológico.

Para encontrar las condiciones de parafinado, emplearemos un diseño completamente al azar DCA con tres niveles de parafinado, inmersión 3, 6 y 9 segundos, con ocho repeticiones evaluadas en el tiempo. Para el estudio de la variación de los efectos del diseño de los experimentos propuestos, emplearemos análisis de varianza (ANAVA), para las medias de tratamientos test Tukey todo al nivel confianza del 95 %.

4.3 Métodos

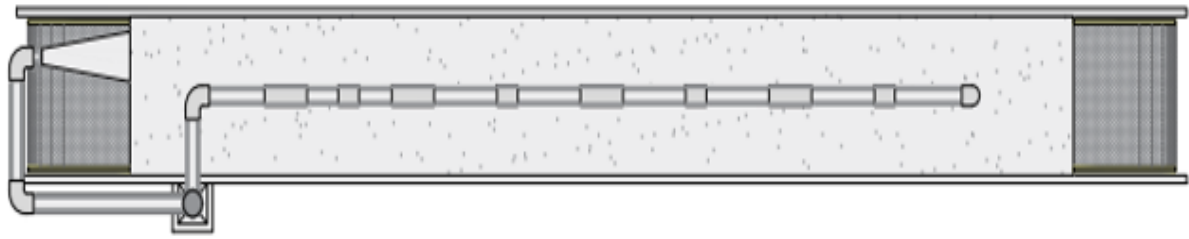
4.3.1 Determinación de las condiciones de operación de remoción de humedad la yuca beneficiada

Evaluación de la velocidad de la banda, distribución del flujo de aire del túnel de remoción de humedad.

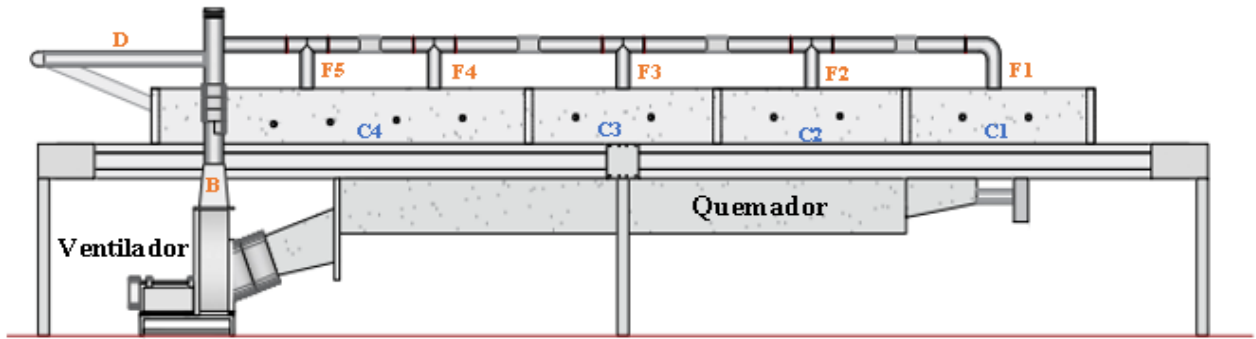
Velocidad de la banda

El proceso de determinación de velocidad de la banda se realizó variando el nivel del controlador y tomando el tiempo en que tarda la yuca dentro del túnel (anexo 2), ver figura 8.

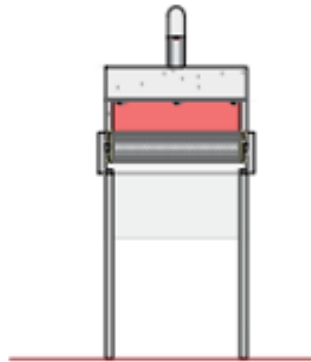
Figura 8. *Túnel de remoción de humedad, empresa EXPAGRICOL S.A.S. a) Vista superior, b) Vista lateral, c) vista frontal*



a)

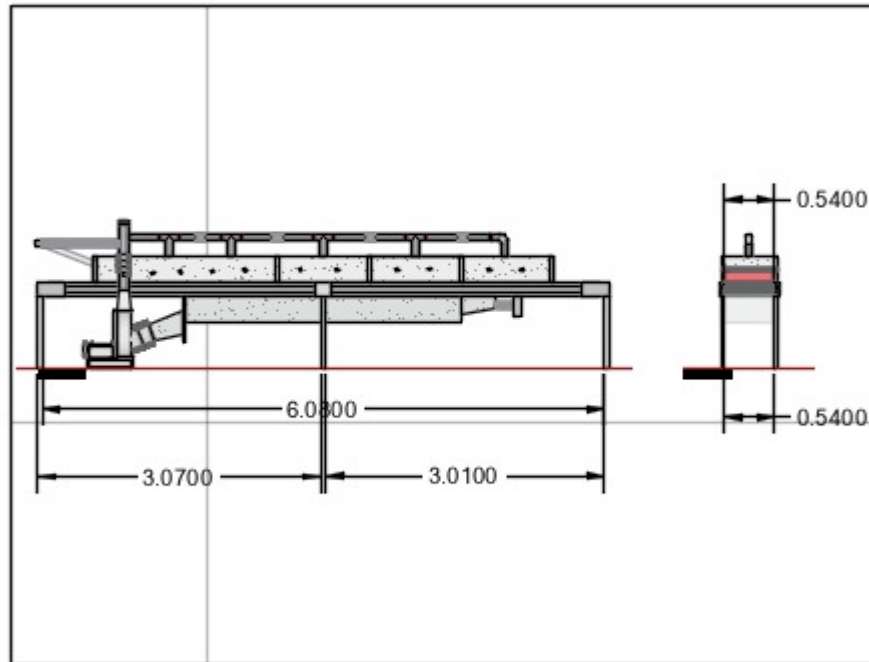


b)



c)

Figura 9. Cotas del túnel de remoción de humedad




Distribución de flujo de aire en el túnel

Para la evaluación de este apartado, se segmentó el equipo por cámaras, según la entrada de aire por diferentes ductos (cámara 1; flauta 1, cámara 2; flauta 2, cámara 3; flauta 3, cámara 4; flauta 4 y 5). Se anuló la salida de aire por el ducto “D” (figura 8, inciso b) para garantizar mayor flujo en las flautas y se evaluó el flujo del ventilador y la distribución del aire a temperatura ambiente. Para la medición de caudal de aire se empleó un anemómetro digital AR836 suministrado por la Universidad de Antioquia. Por otra parte, se operó el equipo a la velocidad de banda mínima (5×10^{-2} m/s) y a la temperatura de secado de $130 \text{ }^\circ\text{C}$ para evaluar el sistema de remoción, para ello se seleccionaron 8 muestras de yuca lavadas y desinfectadas y se pesaron antes y después de ingresar al túnel.

Se tomaron los datos en las entradas principales y secundarias del equipo, sin estrangular y estrangulando en cada flauta, inicialmente se tomaron los datos teniendo en cuenta el punto “D”, sin embargo, las salidas de aire por medio de las flautas eran bajas, lo que se puede corroborar en el anexo 3.1, es por esto que se optó por anular esa salida de aire para obtener una mayor distribución y velocidad de flujo en los ductos, los resultados de esta evaluación se encuentran ilustrados en las siguientes gráficas.

En la medición de flujo de aire se utilizó un anemómetro digital Gm8901 con especificaciones en la tabla 2

Tabla 2. Especificaciones Anemómetro digital Gm8901.

Especificaciones	Velocidad del aire	Temperatura	Equipo
Unidad	m/s	°C	
Rango	0-45	0 -+ 45	
Resolución mínima	0.01	0.2	
Limite	0.3	N.A	
Exactitud	± 3% ± 0.1 dgts	± 2 °C	

Determinación de la distribución de temperaturas, perdidas de calor paredes y consumo de combustible

Distribución de temperatura en el túnel de remoción de humedad.


Para la evaluación de la temperatura interna y del flujo de aire, se tomaron varios puntos de lectura por cada cámara o segmento del equipo. El túnel tiene un total de 4 cámara que miden un metro (1 m), con diferencia en la última que es el doble del tamaño (figura 9), para las 3 primeras cámaras se tomaron dos puntos dentro del túnel y uno en flauta, mientras que en la cuarta y última se tomaron 4 puntos internos y uno en la flauta 4 y 5 (anexo 4), con respecto a la temperatura superficial se realizó una discretización de 160 nodos (anexo 5).

La cámara 1 está representada por los puntos o tomas de temperatura en F1, P1 y P2, la cámara 2 por F2, P3 y P4, en la cámara 3 se encuentran los puntos F3, P5 y P6 y en la última cámara, los puntos F4, F5, P7, P8, P9, P10 y P11.

Se realizó un registro de temperatura interna programando el equipo a 50, 70, 90, 110, y 130 °C. Para su mayor interpretación se realizaron gráficas las cuales representan el comportamiento de la temperatura dentro del túnel en cada una de las temperaturas indicadas y

también se calculó la desviación estándar en cada cámara. La toma de datos se llevó a cabo por medio de un termómetro digital termopar RISEPRO usando sondas de sensor tipo K (tabla 3).

Tabla 3. Especificaciones termómetro digital termopar RISEPRO

Especificaciones	Temperatura	Equipo
Unidad	°C	
Rango	-200 ~ 1372 °C	
Resolución mínima	0.1	
Limite	N.A	
Exactitud	± 0.3% + 1 °C	

Determinación de pérdida de calor a través de paredes

Para el establecimiento de las pérdidas de calor por medio de las paredes del equipo se consideraron las siguientes condiciones: Estado estable, temperatura ambiente constante, el calor perdido al ambiente se evaluó por nodos y cámaras. Cada cámara cuenta con 8 nodos, ubicados en dos filas (4 nodos por fila), a excepción de la última cámara que por ser más grande se tomaron en cuenta 16 nodos (8 nodos por fila). Estos puntos se ubicaron cada 25 cm a lo horizontal y cada fila estaba ubicada a 10 y 16 cm de la base. También se realizó un método gráfico de diferencias finitas explícitas junto con un diagrama de colores para evaluar la distribución de la temperatura en las paredes del equipo (anexo 6), los colores fríos, en este caso el color verde, representa las temperaturas más bajas, a medida que la temperatura aumenta esta se representa con colores cálidos, tornándose amarillo hasta alcanzar su máximo valor el cual es ilustrado con el color naranja. Para su elaboración se consideró la siguiente fórmula:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + e_{vol}. \quad Ec. 1$$

$$\text{Condición inicial } T(x, y, z) = T_{inicial}; t = 0, Ec. 2$$

Condiciones de frontera

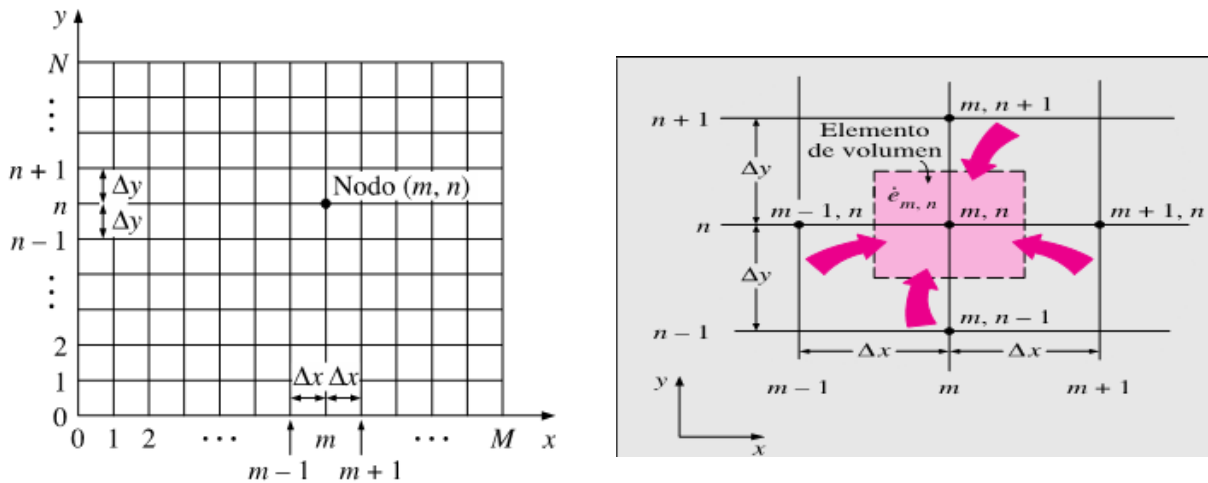
$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h (T - T_a) + \epsilon \sigma (T^4 - T_{alred}^4); t > 0 Ec. 3$$

Simplificado a:

$$\frac{T_{m-1,n} - 2T_{m,n} + T_{m+1,n}}{\Delta x^2} + \frac{T_{m,n-1} - 2T_{m,n} + T_{m,n+1}}{\Delta y^2} + \frac{\dot{e}_{m,n}}{k} = 0 \quad \text{Ec. 4}$$

$$T_{m-1,n} + T_{m+1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 4T_{m,n} + \frac{\dot{e}_{m,n} \Delta x^2 \Delta y^2}{k} = 0 \quad \text{Ec. 5}$$

Figura 10. Elemento de volumen de un nodo interior general (m, n) para la conducción bidimensional en coordenadas rectangulares.



Elemento de volumen de un nodo interior general (m, n) para la conducción bidimensional en coordenadas rectangulares

Nota. Adaptado de Transferencia de Calor y Masa (Cengel, 2007)

Consumo Energético

Para determinar el consumo de combustible se pesó el cilindro de gas propano antes de poner a funcionar el equipo y una vez encendido este, se pesó en un intervalo de 5 minutos con cada temperatura hasta alcanzar los 20 minutos (anexo 7).

Calores del Sistema

Con el fin de determinar el porcentaje de aprovechamiento del equipo se consideraron los calores generados tanto en la parte interna como en la parte externa del túnel, de esta manera, se calculó, el calor liberado por el ventilador, calor perdido por medio de las paredes (convección y radiación), calor aprovechado (interno) y los calores que se generan mediante el quemador (conducción, convección y radiación). Las ecuaciones empleadas para este apartado se encuentran a continuación las cuales fueron tomadas y adaptadas del libro Cengel (2007).

Balances de energía del sistema.

$$\{Entra\} - \{Sale\} + \{Genera\} = \{Acumula\} \quad Ec. 6$$

$$\{\dot{Q}_{quemador}\} - \left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{aprovechado} \\ \dot{Q}_{perd.-paredes} \\ \dot{Q}_{quem-conv} \\ \dot{Q}_{quem-cond} \\ \dot{Q}_{quem-rad} \end{array} \right\} + \{0\} = \left\{ C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right\} = 0 \quad Ec. 7$$

$$\dot{Q}_{quemador} = \dot{Q}_{aprovechado} + \dot{Q}_{perd.-paredes} + \dot{Q}_{quem-conv} + \dot{Q}_{quem-cond} + \dot{Q}_{quem-rad} \quad Ec. 8$$

$$\%Aprovechamiento = \left\{ \frac{\sum \dot{Q}_{total}}{\dot{Q}_{quemador}} \right\} * 100 \quad Ec. 9$$

Ecuación - Ley de enfriamiento de Newton

$$\dot{Q} = hA_i(T_w - T_\infty) \quad Ec. 10$$

Ecuación - Ley de Fourier

$$Q = KA \frac{T_c - T_f}{\Delta x} \quad Ec. 11$$

Ley de Stefan-Boltzmann - Calor por radiación

$$Q = A\varepsilon\sigma(T_s - T_{alrededores}) \text{ Ec. 12}$$

Ecuación de Dittus-Boelter

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \text{ Ec. 13}$$

$$Re = \frac{V_{max}L_c}{\nu} \text{ Ec. 14}$$

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \text{ Ec. 15}$$

Ley de Conservación de la Energía

$$Q = \dot{m}c_p(T_f - T_i) \text{ Ec. 16}$$

Correlación Número de Nusselt

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra_L} \right] + \left[\frac{Ra_L^{1/3}}{18} - 1 \right] \text{ Ec. 17}$$

4.3.2 Evaluación de la estabilidad de la yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión (3, 6 y 9 segundos) y luego almacenadas en refrigeración.

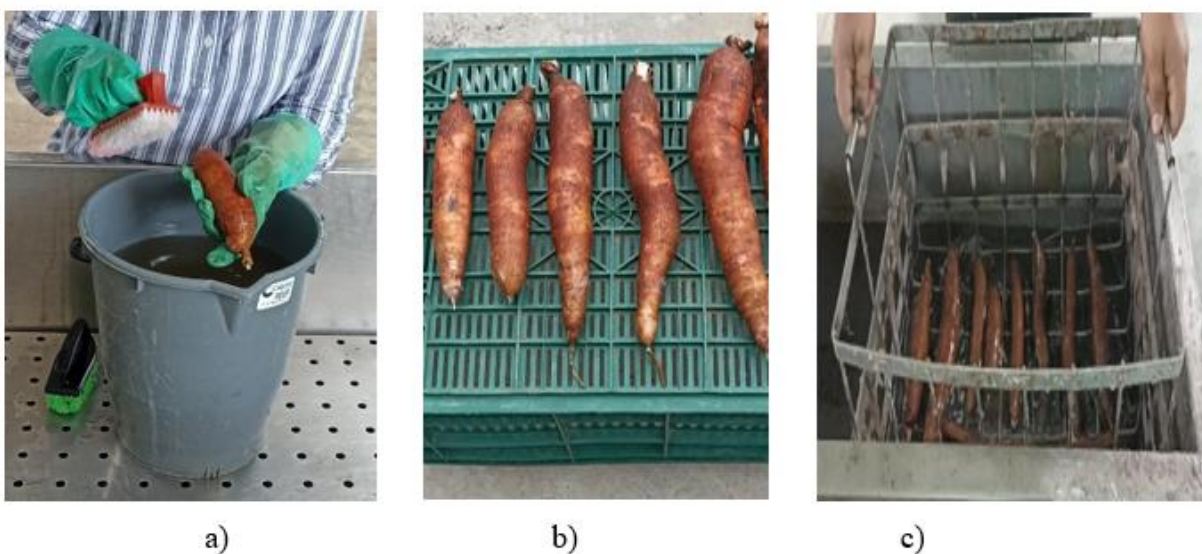
El cultivo de yuca del que fueron cosechados los ejemplares está ubicado en el corregimiento de Pavarandocito, Mutatá, Antioquia. Se seleccionaron alrededor de 100 raíces de yuca para su posterior análisis, los parámetros de selección fueron; tamaño (diámetro 4-10 cm, longitud 25-50 cm), ausencia de daños por rajadura o peladura, sin daños mecánicos (insectos o roedores), ausencia de daño microbiológico por exceso de humedad u otro factor (Aguilar et al., 2017).

Determinación ganancia de parafina, daño fisiológico(cinética) en yucas beneficiadas en diferentes tiempos de inmersión.

El recubrimiento de la yuca con parafina se realizó a 3 tiempos de inmersión 3, 6 y 9 s, con el objetivo de determinar si había diferencia en cuanto a la ganancia de parafina y a su vez si se

generaba diferencias en la vida útil de la yuca. Para ello se seleccionaron las yucas que cumplieran con las especificaciones técnicas para yuca parafinada de exportación, se realizaron las etapas previas de lavado, el cual se realizó utilizando agua potable y cepillo para eliminar el barro y demás impurezas presentes en el tubérculo, posteriormente se realizó la desinfección en una dilución de agua y citrosan (desinfectante fungicida y bactericida de origen natural), mezclando 3 mL/L (Diken International, 2015). Una vez desinfectadas se secaron de manera natural a temperatura ambiente, ya que el sistema de remoción de humedad de la empresa no logra eliminar el agua superficial de las raíces. Pasadas 24 horas se realizó el recubrimiento con parafina china, este proceso se realizó en un sistema que funciona con gas propano, en el que se fundió la parafina y por medio de una canastilla metálica se realizó el proceso de inmersión a diferentes tiempos (3, 6, y 9s), se dejaron enfriar y se almacenaron a temperatura de refrigeración de 3°C. La empresa Expagricol cuenta un sistema de parafinado, pero debido a que presentó problemas en cuanto al diseño y operación no fue posible su instalación, por lo tanto, el proceso de parafinado se realizó de manera artesanal.

Figura 11. a) Limpieza y desinfección, b) secado, c) parafinado



Para la evaluación del daño fisiológico de la yuca, se tomaron fotos de la parte central de la yuca tratada a diferentes condiciones de parafinado y se evaluó el daño fisiológico como el cambio de color en el tiempo. Se determinó la cinética del color bajo la escala CIELAB y se calculó el color a través de la ecuación 7.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 + (\Delta L)^2} \quad Ec. 18$$

Nota. Fuente (Talens, 2016)

Evaluación microbiológica en la superficie de la yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión.

Para la evaluación microbiológica se realizaron siembras en placas en los medios PDA y Sabouraud con el fin de determinar mohos y levaduras presentes en la cáscara de la yuca parafinada y sin parafinar. Para la siembra en placa se realizaron diluciones seriadas (10^{-1} , 10^{-2} y 10^{-3}), mezclando 10 g de muestra (cáscara de yuca) con 90 ml de solución (Agua peptonada), para las diluciones se tomó 1 ml de mezcla y 9 ml de agua peptonada y la siembra en superficie se realizó adicionando 100 μ L en cada caja (PDA y Sabouraud). Pasados 5 días se realizaba el conteo de UFC en las placas de 10^{-3} .

5.0 Resultados

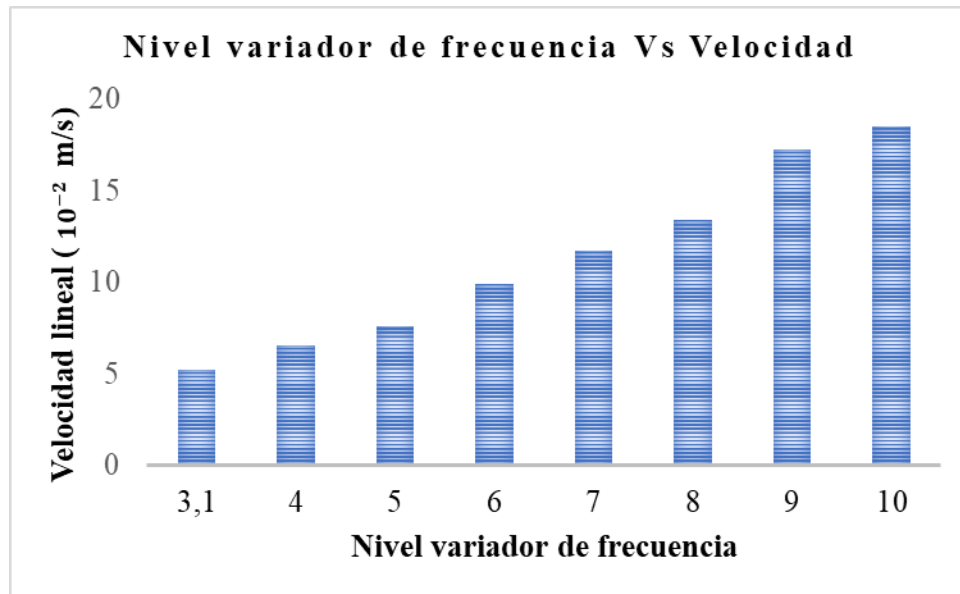
5.1 Determinación de las condiciones de operación de remoción de humedad de la yuca beneficiada

5.1.1 Evaluación de la velocidad de la banda, distribución del flujo de aire del túnel de remoción de humedad.

Velocidad de la banda

Se observó una proporción ascendente entre el variador de frecuencia y la velocidad lineal, la velocidad mínima fue de 5×10^{-2} m/s y la máxima de 19×10^{-2} m/s, además se pudo apreciar que las velocidades en los niveles 9 y 10 del variador de frecuencia presentan una diferencia significativa de solo 7%.

Figura 12. *Velocidad lineal vs nivel variador de frecuencia*



Distribución de flujo de aire en el túnel

Se observó que el sistema sin ningún tipo de restricción presenta una mayor velocidad en la flauta uno, donde oscila entre 9 y 10 m/s, mientras que en la segunda flauta no presenta ingreso de aire a la cámara 2, las flautas 3, 4 y 5, presentan velocidades de 1.7670, 3.6670 y 2.2330 m/s aproximadamente.

Estrangulando la flauta 1 y estrangulando la flauta 2 (por separado), se evidenció fuga y el flujo de aire se concentró en las cámaras 3 y 4 mayoritariamente.

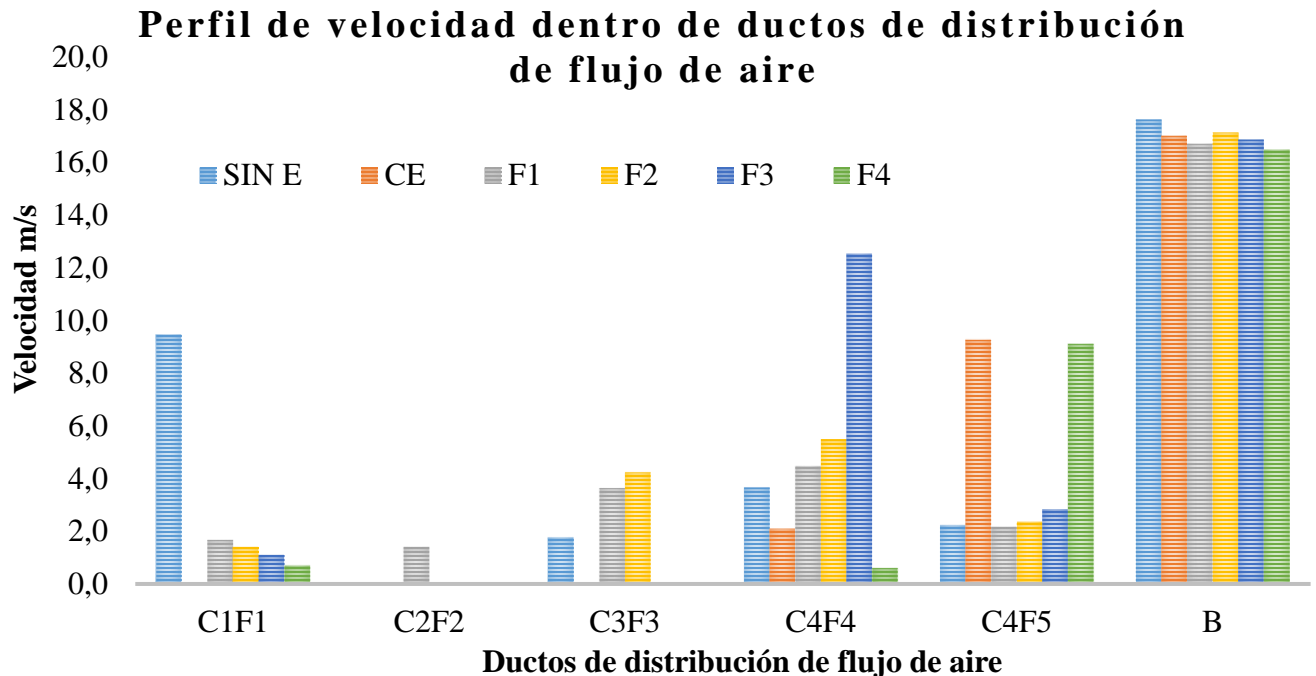
Al estrangular las flautas 3 y 4 (por separado), el flujo se concentró en la parte extrema del túnel, es decir, en la cámara 4, con velocidades promedio de 12.5333 m/s F3 y 2.8333 m/s F4 y 0.6000 m/s F3 y 9.1000 m/s F4, respectivamente.

Figura 13. Túnel de remoción de humedad, vista lateral, ubicación de flautas y puntos de toma de muestra de temperatura.



La figura 14 representa la velocidad de flujo en cada una de las flautas y cámaras del túnel.

Figura 14. Perfil de velocidad dentro de ductos de distribución de flujo de aire

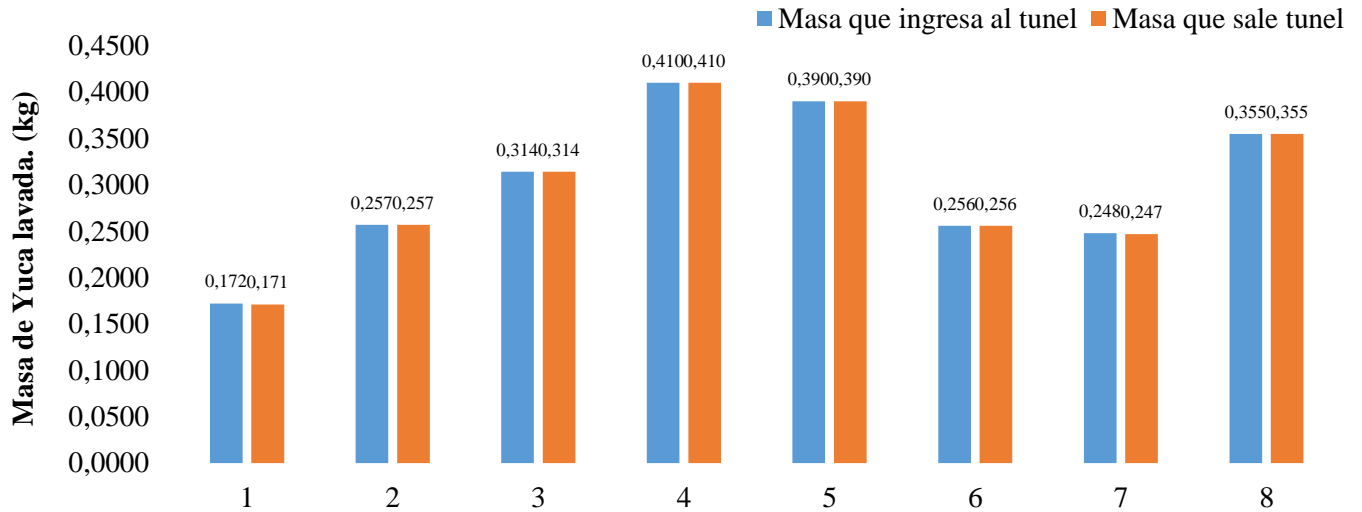


Remoción de humedad en el túnel a condiciones extremas de operación.

Al someter varios ejemplares de yuca al túnel de remoción de humedad, no se observó una disminución significativa en el peso de la yuca antes y después de salir del túnel, lo cual indica que el equipo no está eliminando la humedad superficial de manera efectiva. La figura 15 representa la variación de peso antes y después de salir del túnel. El eje x representa el numero de ejemplares, mientras que el eje y representa el peso de la yuca en kilogramos. Las columnas azules muestran el peso inicial de la yuca y las anaranjadas el peso después de pasar por el túnel. No hubo variación considerable en los pesos, pues, estos se mantienen constantes.

Figura 15. Remoción de humedad

Variación de Masa de agua antes y después de pasar por el tunel de remoción de Humedad



Repeticiones a las máxima condiciones de Operación del tunel de remoción de Humedad, Veolcidad máxima del sistema de ventilación, velocidad mínima de la banda y máxima temperatura del aire (130°C)

Determinación de la distribución de temperaturas, perdidas de calor paredes y consumo de combustible.

Distribución de temperatura en el túnel de remoción de humedad

Por medio de la figura 16 se pudo observar el comportamiento de la temperatura dentro del túnel de remoción de humedad programado a 50, 70, 90, 110 y 130°C, se evidenció variabilidad en los datos y la temperatura se presenta de manera irregular a lo largo del túnel.

En cuanto a la desviación estándar se establece que la temperatura que más se asemeja a la temperatura programada en el sistema es la de 50°C al presentar una desviación menor comparado con las otras temperaturas (tabla 5).

Figura 16. Distribución de temperatura dentro del equipo para los niveles programados por controlador: 50,70, 90, 110 y 130 °C.

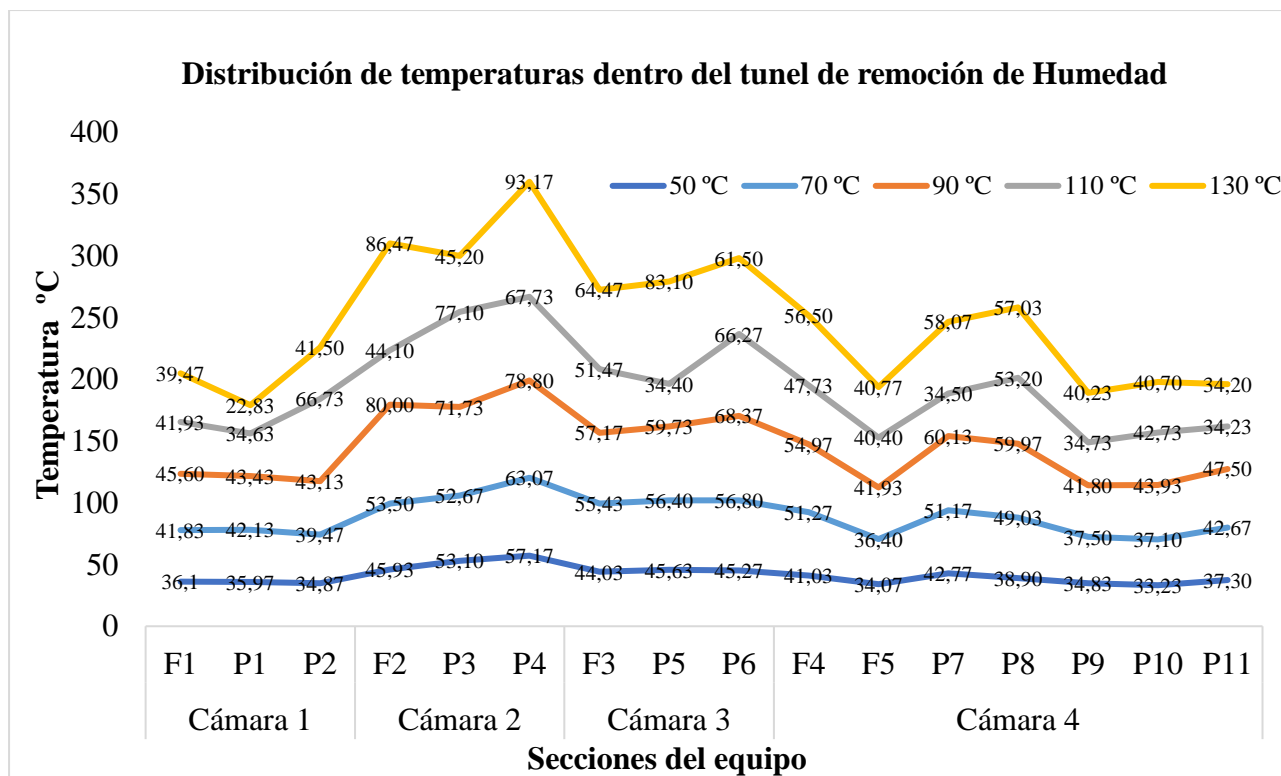


Tabla 4. Desviación estándar

Desviación Estándar				
Temperatura (°C)	C1	C2	C3	C4
50	1,02E+01	1,46E+00	3,55E+00	8,88E+00
70	2,04E+01	9,61E+00	9,75E+00	1,87E+01
90	3,25E+01	9,30E+00	2,00E+01	2,83E+01
110	4,40E+01	3,32E+01	4,19E+01	4,87E+01
130	6,75E+01	3,89E+01	4,26E+01	5,88E+01

Determinación de pérdida de calor a través de paredes

Del anexo 6 se puede observar la distribución, las temperaturas indicadas con color negro son las obtenidas durante la toma de datos, es decir los nodos y las de color rojo son las temperaturas internas entre nodos (calculada). Las temperaturas más altas en la superficie se

encuentran entre las cámaras 2 y 3 y en algunos puntos de las cámaras adyacentes a estas; alcanzando valores entre 70 – 87 °C, mientras que la temperatura de los extremos se encuentra entre 35 - 62 °C, este comportamiento se correlaciona con el perfil de temperatura encontrada al interior de cada cámara como lo muestra las figura 15 vale la pena aclarar que la evaluación del perfil de temperatura en la superficie se analizó a la temperatura de 130°C programada en el quemador.

Consumo Energético

Mediante la figura 17, se pudo observar el comportamiento del consumo en cada una de las temperaturas programadas. A medida que se incrementa la temperatura, el consumo es cada vez mayor. A partir de estos datos también fue posible calcular el calor liberado por el quemador, el cual es de 103.1200×10^3 W para las temperaturas de 110 y 130°C, cabe aclarar que el quemador no genera una llama constante, esta se activa cada 20 minutos aproximadamente y el tiempo que dura encendida se encuentra en un rango de 40 - 50 segundos (tabla 6).

Figura 17. Consumo Energético

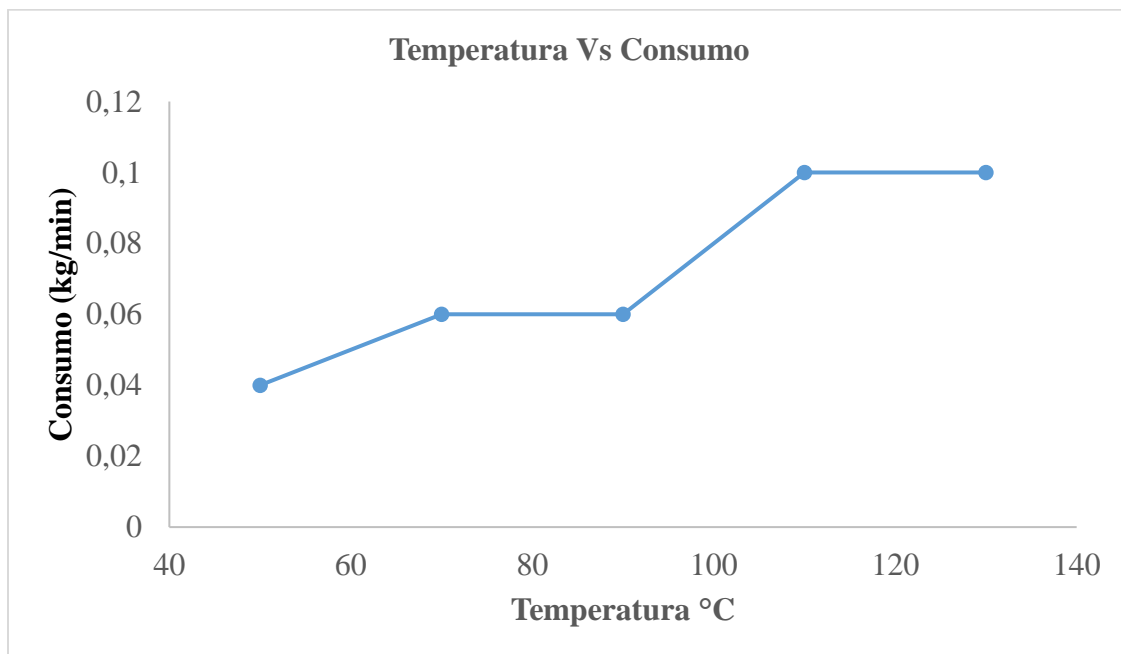


Tabla 5. Calor generado por el quemador

Temperatura (°C)	Consumo (Kg/20 min)	Consumo (Kg/0,75min)	Consumo (Kg/h)	Consumo W
50	4,00E-02	5,33E-02	3,20E+00	4,12E+04
70	6,00E-02	8,00E-02	4,80E+00	6,19E+04
90	6,00E-02	8,00E-02	4,80E+00	6,19E+04
110	1,00E-01	1,33E-01	8,00E+00	1,03E+05
130	1,00E-01	1,33E-01	8,00E+00	1,03E+05

Calores del sistema

El túnel de remoción de humedad cuenta con un quemador que genera calor mediante la combustión de gas propano, este tiene una potencia de 103120 Watt, lo que permite generar suficiente calor para remover la humedad superficial del alimento. La llama generada calienta el aire que libera el ventilador y este ingresa al sistema mediante el ducto “B” (figura 8) y circula por la tubería hasta llegar a las cámaras del túnel.

Durante el análisis del proceso de combustión se tuvieron en cuenta los diferentes mecanismos de transferencia de calor, convección natural, conducción y radiación. Para el cálculo de los flujos de calor se implementaron las leyes de enfriamiento de Newton (Ec. 10), Fourier (Ec. 11) y Stefan-Boltzmann (Ec. 12). Los resultados obtenidos indicaron que la transferencia de energía por convección natural era de 1890.03 Watt, por conducción 41719.14 Watt y por radiación de 1914.80 Watt.

El calor del aire por convección forzada del sistema de ventilación fue de 40893.52 Watt, desarrollada por un coeficiente global de 1,119 Watt/(m² °C), mientras que el calor aprovechado era de tan solo 3189.90 Watt. Para este análisis se aplicó la correlación de Dittus-Boelter (Ec. 13) y la ley de conservación de la energía (Ec. 16)

El calor perdido por medio de las paredes presentó valores de 108.30 Watt por convección (Ec. 10) y 116.99 Watt por radiación (Ec. 12), las pérdidas de calor por medio de las superficies son relativamente bajas debido a que la velocidad de secado que ingresa a cada una de las cámaras también es baja.

Con base en los resultados obtenidos se determinó el porcentaje de aprovechamiento del equipo (ec) y se obtuvo un valor de 41,72% (Ec. 19)

$$\%Aprov = \frac{\dot{Q}_{total}}{\dot{Q}_{quemador}} * 100\% = \frac{48939.16}{117302.05} * 100\% = 41.72\% \text{ Ec. 19}$$

Figura 18. Túnel de remoción de humedad con entradas y salidas de energía en forma de calor

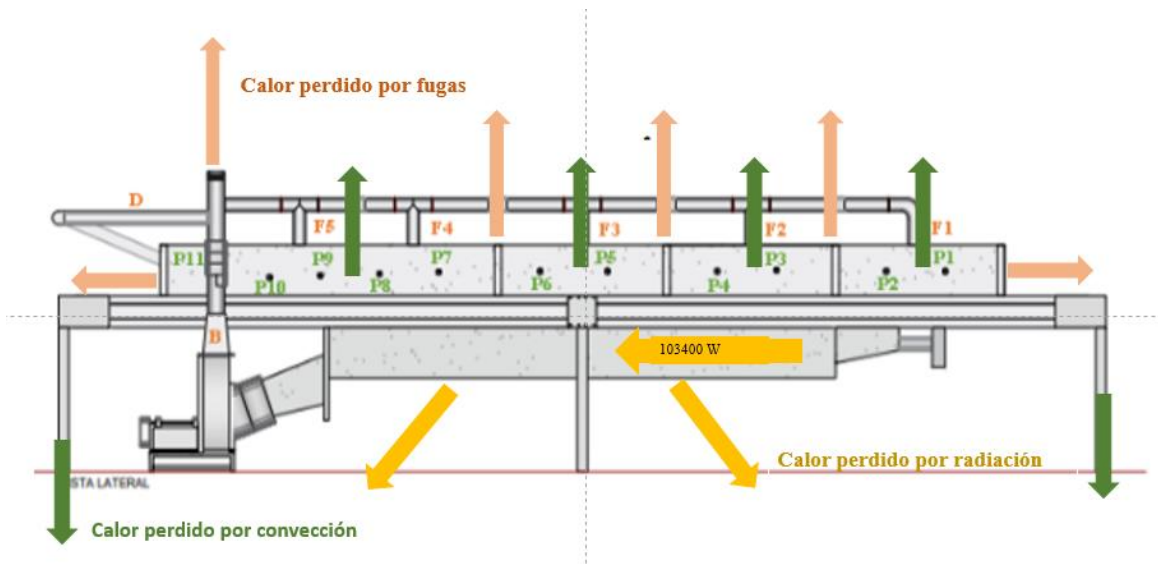


Figura 19. Calores del sistema

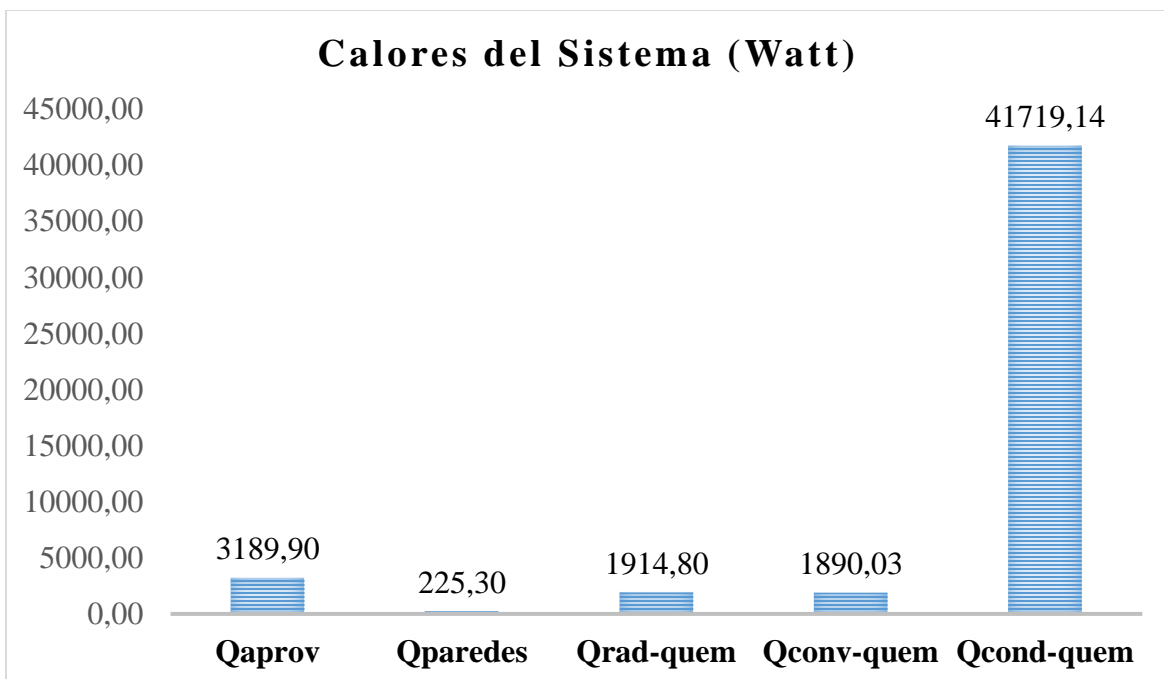
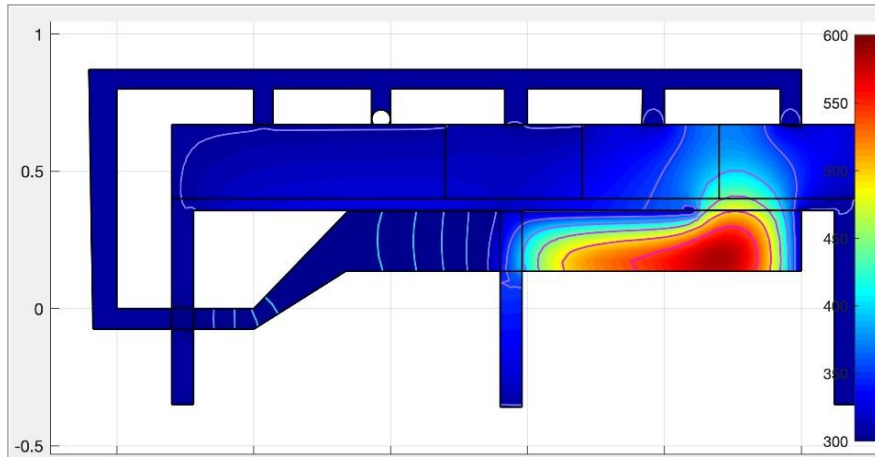
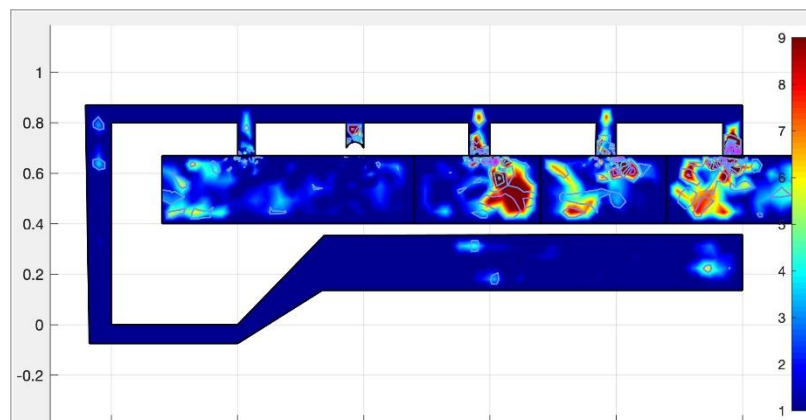


Figura 20. *Transferencia de calor túnel de remoción de humedad a) Conducción b) convección forzada*



a)



b)

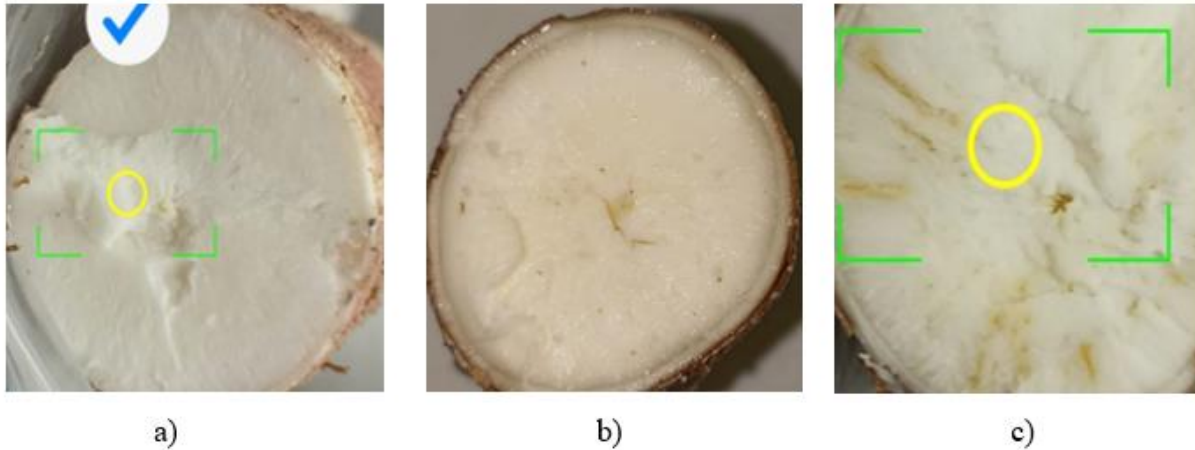
5.2 Evaluación de la estabilidad de la yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión (3,6 y 9 segundos) y luego almacenadas en refrigeración.

5.2.1 Determinación ganancia de parafina, daño fisiológico en yucas beneficiadas en diferentes tiempos de inmersión.

Yuca fresca

Durante las primeras semanas se observó una yuca blanquecina con olor y sabor característico. Entre los días 28-30, la corteza de la yuca se fue tornando opaca, sin embargo, no se vio afectada la pulpa en cuanto a sus características organolépticas y/o sensoriales.

Figura 21. Daño Fisiológico: a) Primeras semanas b) Semana 4-5 c) Semana 6+



Entre los días 35- 50, la pulpa fue perdiendo el color blanquecino que la caracteriza y comenzaron a salir manchas amarillas y café, perdiendo olor característico y el sabor dulce pasó a sabor amargo.

Yuca Parafinada

En cuanto a los tiempos de inmersión no se encontró diferencia significativa entre los 3 tratamientos, hubo buena adherencia, la parafina ganada por las yucas oscila entre 4 - 9 g, la diferencia en el peso (espesor) de esta radica en el tamaño y/o dimensiones de la yuca.

Figura 22. Daño Fisiológico a) Primeras semanas b) semana 9-10 c) semana 11+

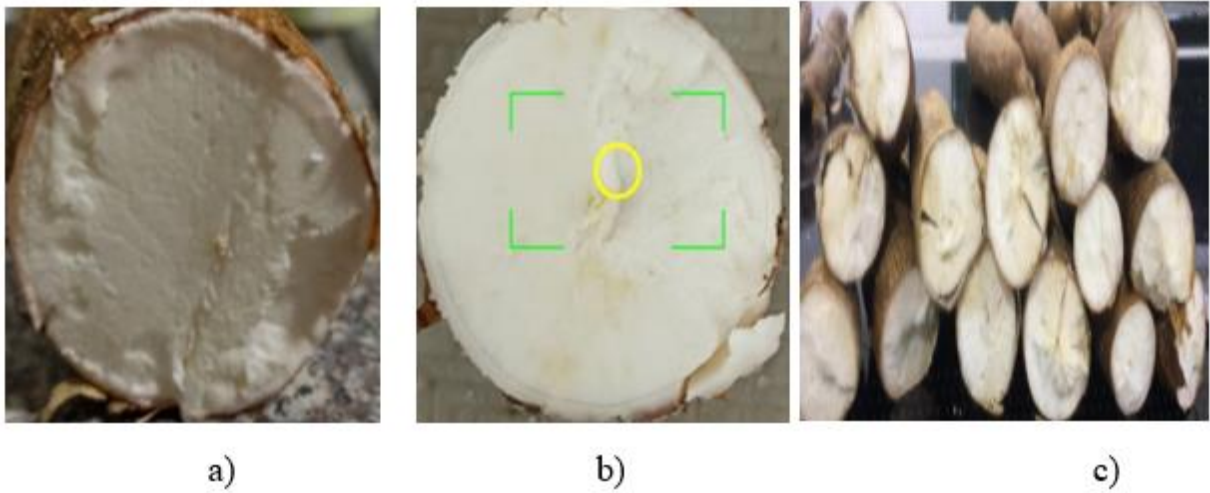


Figura 23. Retención de parafina para los tiempos de inmersión 3,6 y 9 segundos.

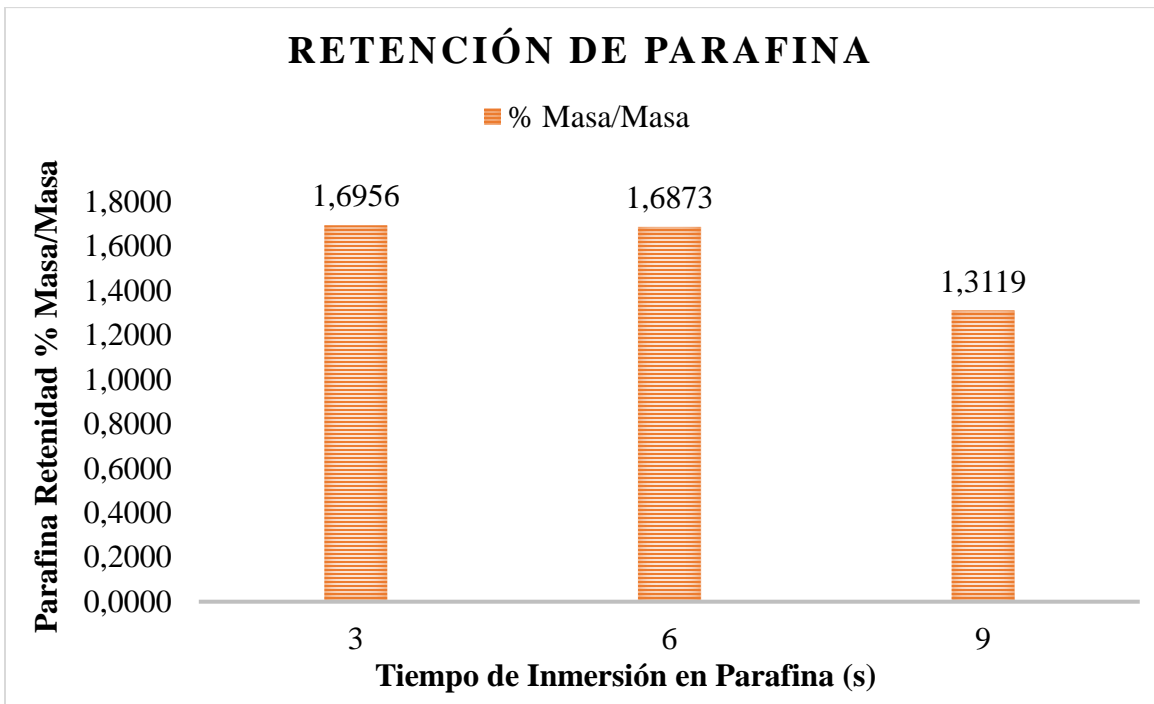
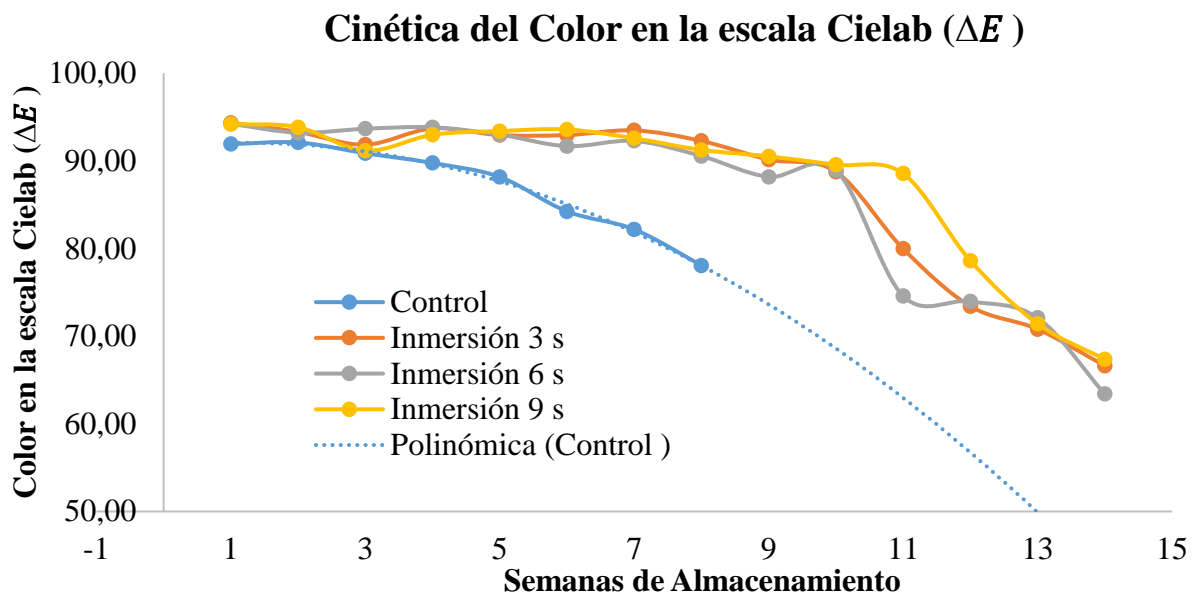


Figura 24. Vida útil yuca tratada con parafina para los tiempos de inmersión 3,6, 9 segundos y sin parafina



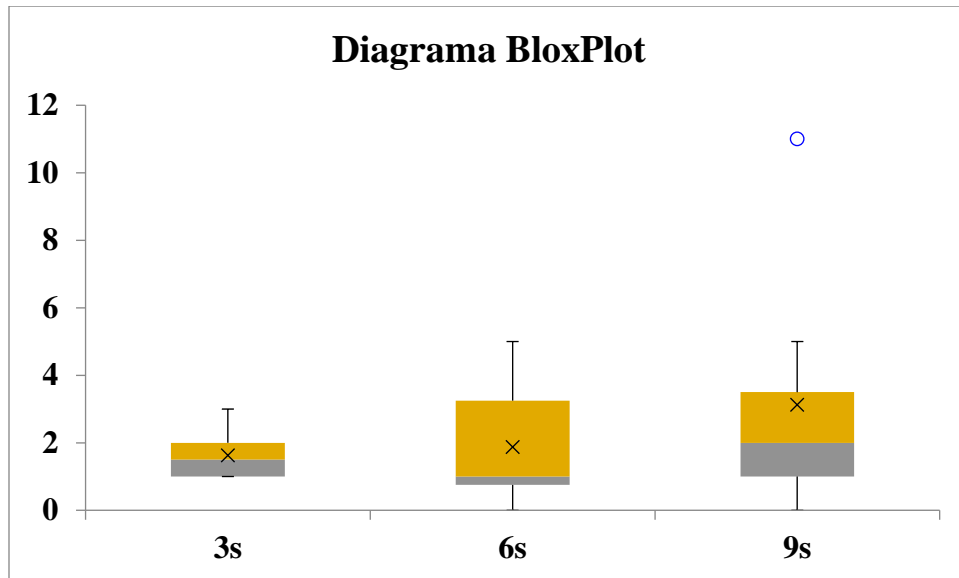
Por medio de la gráfica se da a conocer el deterioro de la parte interna de la yuca con el tiempo. El daño fisiológico de la yuca parafinada se evidenció entre los días 68 - 70 y después de las 10 semanas se presencié pérdida de color característico, la yuca pasa de tener una escala entre 90- 95 a tener valores menores a 79 una vez pasados los 70 días.

Análisis Estadístico

Se realizó un análisis ANOVA para determinar si existía una diferencia significativa entre las yucas parafinadas en diferentes tiempos de inmersión.

Tabla 6. Análisis ANOVA con test de TUKEY

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	P-value
Entre las muestras	10.3333	2	5.1667	0.9384	0.4071
Dentro de las muestras	115.6250	21	5.5060		
Total	125.9583	23	5.4764		



Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza de 95% indicaron que no hubo diferencia significativa entre los tres tratamientos (3s, 6s y 9s), se puede constatar con la tabla 7, ya que el valor p obtenido es mayor al valor de significancia establecido (0.05).

5.2.2 Evaluación microbiológica en la superficie de la yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión.

La figura 24 representa el contenido de mohos y levadura presentes en la yuca parafinada evaluada en los medios PDA y Sabouraud (columnas anaranjadas). El crecimiento microbiano se encuentra dentro de lo establecido por la normatividad (tabla 7).

Figura 25. Hongos y levaduras permitidos.

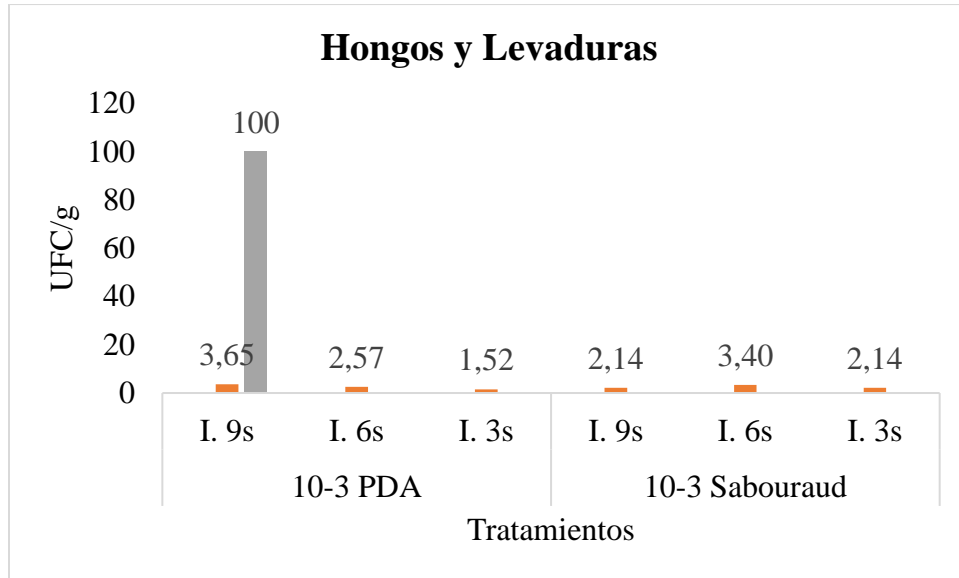
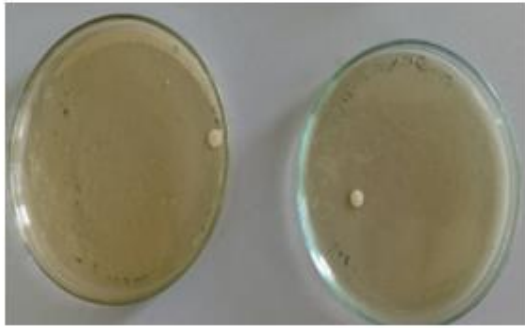


Tabla 7. Especificaciones microbiológicas para yuca parafinada

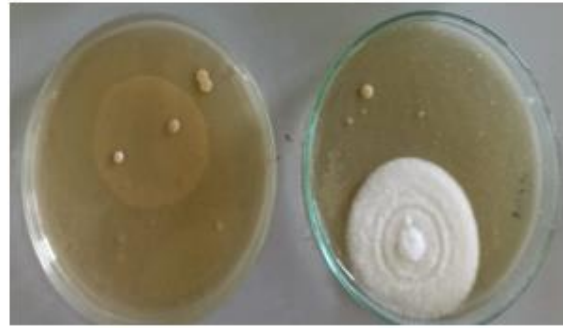
Especificaciones Microbiológicas para yuca parafinada	
Aerobios Mesófilos	< 100000 UFC/g
Hongos y levaduras	< 100 UFC/g
Coliformes totales	< 200 UFC/g
E. Coli	< 3 UFC/g
Salmonella	Negativo/25g

Nota. Fuente Compañía Import Export de Colombia S.A.S

Figura 26. Análisis microbiológico a) yuca fresca 28 días de almacenamiento b) yuca parafinada 76 días de almacenamiento



a)



b)

6.0 Análisis

6.1 Determinación de las condiciones de operación de remoción de humedad de la yuca beneficiada

6.1.1 Evaluación de la velocidad de la banda, distribución del flujo de aire del túnel de remoción de humedad.

Distribución de flujo de aire en el túnel

De acuerdo con los datos obtenidos se encontró que el sistema de ventilación con el que cuenta el equipo tiene un problema de diseño y en la distribución del flujo, ya que la variación de la velocidad de cámara a cámara no existe un flujo uniforme. El flujo máximo desarrollado por el sistema de ventilación es $18 \text{ m}^3/\text{s}$, de los cuales sólo 45 % ingresa a la cámara de remoción de humedad, precisando que la sección de equipo no recibe ingreso de aire, lo anterior puede explicarse en pérdidas de flujo de aire a través de diferentes cámaras y del sistema de distribución del aire.

Por otra parte, el túnel no cuenta con un sistema para evacuar la humedad en cada cámara, por lo que se queda recirculando dentro de las mismas, con velocidades inferiores a 1.00 m/s , en régimen de flujo laminar, condiciones que no permiten transferencia de calor por convección forzada, no permiten transferencia de masa necesaria para la remoción de humedad de la yuca lavada, como se confirma en la tabla 4. El sistema de ventilación debe suministrar por cámara flujos

de aire entre 2 a 2.5 m³/s, para cumplir con regímenes de flujo turbulento, para velocidad internas de 3.00 – 4.00 m/s, condiciones de operación en túneles de secado que trabaja por convección forzada (Cengel, 2007). El grupo de investigación PADES de la universidad de Sucre, evaluó la temperatura (35, 45 y 55 °C) y la velocidad del aire (1, 2 y 3 m/s) sobre el tiempo de secado de la yuca y se obtuvo que a una temperatura de 55°C y una velocidad de secado de 3 m/s se obtiene el menor tiempo de secado, particularmente en el periodo de velocidad constante (Salcedo et al., 2014). Torregroza (2013) determinó la influencia de la temperatura (45, 55 y 70 °C) y la velocidad de secado (1, 3 y 4 m/s) de tres variedades de yuca (Corpoica Tai, Corpoica Gines y Corpoica Veronica) y se llegó a la conclusión de que las mejores condiciones de secado se obtuvieron a una velocidad de 3 m/s y 4 m/s, ya que se observó que no hubo diferencias significativas entre los tiempos de secado para dichas velocidades y tampoco se encontró diferencia significativa entre las tres variedades. Por lo tanto, se estima que una velocidad promedio para secado de la yuca puede oscilar entre 3 y 4 m/s.

Determinación de la distribución de temperaturas, Remoción de humedad en el túnel a condiciones extremas de operación, pérdidas de calor paredes y consumo de combustible.

Distribución de temperatura en el túnel de remoción de humedad

De la figura 16 la cual registra el comportamiento de la temperatura desarrollada dentro el túnel a diferentes condiciones de operación se pudo observar que el sistema de calentamiento y de distribución de flujo de aire no mantiene un perfil uniforme por cámara y ni en todo el equipo. El sensor y control de temperatura del túnel, presenta alta desviación (ver tabla 5) entre la condición monitoreada y la programada. Adicionalmente, fue posible analizar que independiente de la temperatura programada, la cámara 2 localizada encima del quemador, para las temperaturas programadas y evaluadas registro un máximo valor, explicado por las condiciones de contornos adicionales de ese segmento del túnel, ingreso de calor por radiación y conducción desde la cámara de combustión. Esta situación ilustra problemas de diseño térmico del túnel. Por otro lado, las cámaras 1 y 4, distantes del quemador, registran los perfiles más bajos de temperatura producto de las pérdidas de flujo del sistema de ventilación, de las pérdidas de calor a través de toda la estructura del equipo por conducción.

Finalizando el análisis de este apartado, el sistema con las temperaturas de 110 y 130 °C presentaron mayor desviación estándar, lo que indica que hay más dispersión y variabilidad de las temperaturas, es decir que el equipo no tiene la capacidad de llegar a la temperatura programada.

Remoción de humedad en el túnel a condiciones extremas de operación.

De la tabla 4 (remoción de humedad), se evidenció que el sistema aun trabajando a las condiciones extremas, no tiene la capacidad de remover la humedad de la yuca que sale de la etapa de lavado, esta situación se puede explicar desde la psicrometría, el aire es tomado del ambiente a 31° C y Humedad relativa 85%, y llevado a humedad absoluta constante hasta 72-74 °C, bajo dichas condiciones el aire tiene capacidad de remover 0.018 kg H₂O por kg aire seco (Díaz, 2019) que pase alrededor de la yuca húmeda y cómo el sistema tiene flujo de aire internos por cámara inferiores a 0.4 m³/s (0.2786 kg aire seco/s), sólo se podría remover 0.0050 kg H₂O/s, una tasa muy baja, además esta remoción es posible si y sólo si el equipo en discusión contara con sistema de evacuación del aire húmedo. Lo anterior demuestra que el sistema no tiene capacidad de remoción de humedad. Ahora bien, con respecto a la distribución y control de temperaturas en el túnel como se evidencia en el apartado anterior.

Determinación de pérdida de calor a través de paredes

El túnel de remoción de humedad evaluado en este trabajo está construido en acero inoxidable AISI 304 calibre 20 y opera bajo techo con temperaturas ambientales promedio de 31°C, no se encuentra aislado y no tiene aislamiento térmico entre las cámaras donde se transfiere calor y su estructura que lo soporta, esta última tampoco tiene separación térmica con el piso donde se encuentra instalado el túnel. Ahora bien, la evaluación del comportamiento resistivo de la temperatura en la superficie del equipo, encontramos que las paredes de cámaras 1, 2, 3 y 4 se encuentran por encima de temperatura ambiente 15, 25, 30 y 17 °C, Ilustrando pérdida de calor y generaría un consumo adicional de combustible durante su operación, ocasionado costo altos de operación. Por otro lado, el calor perdido y entregado al ambiente, resulta ser una condición no favorable para el personal de trabajo.

Es indispensable para las industrias contar con aislantes térmicos en equipos que trabajan a temperaturas altas, para aumentar la seguridad del ambiente de trabajo y para ahorrar recursos

energéticos. Díaz y Jaramillo (2022), en su tesis para la obtención del título Ingeniero Mecánico, proponen un diseño de un sistema de recuperación de calor residual en el horno túnel de la empresa UCEM S.A., y recomiendan aislar el sistema de tuberías con el material lana mineral con un espesor de 80 mm, ya que es adecuado para trabajar en altas temperaturas. Este aislante se caracteriza por evitar pérdidas o ganancias de temperaturas, además tiene alto poder de aislación térmica, gran absorción acústica, ahorro de energía, seguro para personas, durabilidad e inalterabilidad.

Murillo (2007), diseñó un deshidratador de convección para frutas y vegetales el cual se deberá construir en paneles de acero inoxidable AISI 304 calibre 20, con recubrimiento de lana mineral de 2 pulgadas de espesor, para evitar pérdidas de calor. Por otra parte, en un diseño de un sistema mecatrónico para el secado de espirulina, priorizaron la disminución del consumo energético, para ello utilizaron como elemento aislante la fibra de vidrio en un secador formado por tuberías cuadradas en acero estructural HR (Cruz et al., 2021).

Por lo tanto, se consideran la lana mineral y la fibra de vidrio las principales alternativas para aislar el túnel de secado de la empresa Expagricol S.A.S., ya que son materiales que se utilizan con frecuencia en túneles de secado, porque resisten altas temperaturas y tienen una conductividad térmica baja ($0.038 \text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$) y la lana mineral ($0.030\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{C})$) (Gutiérrez et al., 2014).

Consumo Energético

El sistema de calentamiento del túnel de remoción de humedad tiene un quemador con una capacidad nominal de 400000 BTU/h equivalente a $107.302 \times 10^3 \text{ Watt}$, ajustado para trabajar con gas propano comprimido. Durante la evaluación del funcionamiento del quemador, se logró registrar el máximo grado de aprovechamiento de la capacidad del dispositivo a las temperaturas programadas de 110 a la 130° C , con una liberación $103.1200 \times 10^3 \text{ Watt}$, equivalente a una eficiencia del 87.99 %, en términos generales considerada adecuada en la cámara de combustión. Sin embargo, el manejo de yuca en secado o procesos similares no se puede exceder temperaturas entre $60\text{-}70^{\circ} \text{ C}$, para evitar el desarrollo de gelatinización. (Salcedo et al., 2014),

De lo anterior y durante la evaluación del equipo, realizamos adicionalmente monitoreo y análisis del consumo de combustible y liberación de energía para temperaturas en túnel 50°C , 70 y 90°C .

El consumo energético presenta tres grupos estadísticamente diferenciados en la programación de temperaturas 50°C , 70 a 90°C y de 110 a 130°C . Se evidenció que no hay diferencias significativas para los consumos de combustibles para sostener la temperatura entre 70

y 90 °C, Otro grupo estadístico se dio para las temperaturas de 110 y 130 °C. Con respecto a la eficiencia global para las temperaturas 50°C, 70 a 90°C, 110 y 130°C se establecieron en n1, n2, n3, n4 y n5 respectivamente, valor muy por debajo de lo considerado en sistemas de transferencia de calor con secador, hornos donde se espera un aprovechamiento de energía térmica por encima del 85,00 %.(Cardona, et. al, 2014). Sin embargo las necesidades energéticas del sistema exigen un quemador para el sistema de ventilación con capacidad de sostener temperaturas entre 60 y 70°C, representa una liberación de calor entre 328.330 y 464.400 x10³ Watt, respectivamente; por lo tanto el sistema de calentamiento no tiene la capacidad, además el sistema de ventilación está subdimensionado al no permitir obtener velocidades medias en cámara de 3 a 4 m/s, ocasionando que la distribución de la temperatura no sea uniforme, dando lugar a que se presenten zonas donde la temperatura es más baja que en otras, lo cual se puede constatar en las tablas del anexo 4.

Calores del Sistema

La figura 20 respalda los datos obtenidos al ilustrar la distribución de la temperatura en todo el sistema, se puede observar que el mayor flujo de transferencia de calor se presenta por conducción ya que es un sistema que no está aislado. Se nota, además, que la cámara uno y dos, que son las que tienen proximidad directa con el quemador, alcanzan la mayor temperatura de las cámaras del túnel, esto sugiere que la conducción de calor desde el quemador es un factor importante en el aumento de temperatura del equipo, particularmente en la cámara 2.

6.2 Evaluación de la estabilidad de la yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión (3,6 y 9 segundos) y luego almacenadas en refrigeración.

6.2.1 Determinación ganancia de parafina, daño fisiológico(cinética) en yucas beneficiadas en diferentes tiempos de inmersión.

Con el proceso de parafinado se logra extender la vida útil de la yuca de 4 semanas con respecto a la yuca sin parafinar. De manera general y de acuerdo con los resultados obtenidos y la revisión bibliográfica para de estabilidad en yuca y otros tubérculos con recubrimiento con

parafina, es posible extender su vida útil hasta el doble de la vida útil del alimento en fresco siempre y cuando se mantengan las condiciones adecuadas de almacenamiento y acondicionamiento. *Gutiérrez y Vaca (2011), realizaron un recubrimiento con parafina para prolongar la vida útil del yacón (Smallanthus sonchifolius) y no se observó deterioro significativo en 60 días.*

Por otro lado, La temperatura adecuada para preservar la yuca en condiciones óptimas debe oscilar entre 0-5 °C (Aguilar et al., 2017), no se debe llegar a condiciones de congelación debido a que se genera quebrantamiento de la parafina y a su vez se van generando pequeñas ranuras en la yuca, lo que permite que la parte interna de esta, es decir, la pulpa o carne almidonada, quede expuesta a daños físicos, mecánicos o microbiológicos. Por otra parte, al congelar la yuca y luego hacer un cambio brusco de temperatura puede ocasionar acumulación o exceso de agua, generando que esta no sea apta para consumo.

6.2.2 Evaluación microbiológica en la superficie de la yuca beneficiada y parafinada a diferentes tiempos de inmersión.

Conforme a los análisis realizados en los laboratorios de la Universidad de Antioquia, no se encontró crecimiento microbiano que pudiera poner en riesgo la inocuidad de la yuca, al realizar el recuento de mohos y levadura se evidenció que la yuca fresca presentó mayor crecimiento microbiano que la yuca parafinada (anexo 9), sin embargo, ambas se encuentran dentro del rango permitido de acuerdo con las especificaciones técnicas de la compañía Import Export de Colombia S.A.S (tabla 7) y de la resolución 1407 de 2022 por la cual se establecen los criterios microbiológicos que deben cumplir los alimentos y bebidas destinados para consumo humano, incluyendo raíces tubérculos. Solórzano en 2015 también realizó un análisis microbiológico a la yuca recubierta con látex de sande (*Brosimum utile*) y no hubo crecimiento de mohos y levadura en el recubrimiento comestible.

7.0 Conclusiones

El sistema de remoción de humedad funciona mediante una banda transportadora que permite variar o controlar su velocidad de acuerdo con las necesidades del alimento, las velocidades van desde 5×10^{-2} m/s hasta 19×10^{-2} m/s, sin embargo, el flujo de aire de secado no remueve la humedad superficial del alimento por las siguientes razones:

1. El ventilador del sistema no tiene la capacidad suficiente de impulsar el aire por medio de las tuberías del sistema para garantizar un flujo uniforme
2. El aire que ingresa al interior de la cámara por medio de los ductos no ingresa con la misma intensidad por lo tanto el alimento no está recibiendo una corriente de aire que retire el agua superficial
3. El aire húmedo no cuenta con un sistema de salida, este se queda recirculando en el interior del equipo.

La distribución de temperatura dentro del sistema es irregular, el porcentaje de aprovechamiento equivale al 41.72 %, el calor (aire de secado) que libera el quemador se pierde mayoritariamente por conducción (41719.14 W) la cámara 2 es la zona de más alta temperatura (39 - 94 °C), mientras que la cámara 4 es la zona donde se encuentra el rango más bajo (34 - 58 °C). Adicionalmente el sistema no garantiza la temperatura programada, a consecuencia que el sensor y controlador de esta variable se encuentra localizado en la cámara 2 y esta zona no genera remoción de humedad y las temperaturas obtenidas están muy alejadas del valor real.

El consumo energético presenta tres grupos estadísticamente diferenciados en la programación de temperaturas 50°C, 70 a 90°C y de 110 a 130°C. Se evidencia que el diseño del sistema de remoción de humedad genera 225.30 W de pérdidas de calor a través paredes sin aislamiento y 1914.80 W por pérdidas por radiación desde la unidad del Quemador.

La parafina logra extender la vida útil de la yuca hasta 10 semanas, contribuye a la reducción de la carga microbiana que se encuentren presentes en la cáscara debido a la temperatura en la que se lleva a cabo el recubrimiento. Por otro lado, el parafinado de yuca generó una reducción de la velocidad de deterioro fisiológico, al comparar la yuca tratada con parafina y el material sin tratar; registramos incremento del 122.2 % periodo de la vida útil.

El tiempo de inmersión en la parafina, de acuerdo con el análisis de varianza ANOVA, se debe aceptar la hipótesis nula, pues no existe diferencia entre las muestras.

No se presenta variación en cuanto a la vida útil de la yuca en los diferentes tiempos de inmersión en parafina. La temperatura optima de parafinado debe oscilar entre 140-150 °C y la temperatura de almacenamiento entre 0-5 °C.

8.0 Recomendaciones

1. Rediseño en la estructura del sistema para garantizar un flujo de aire homogéneo, ubicar un ventilador con diámetro entre 5 - 8 pulgadas aproximadamente en la parte lateral de cada cámara, cuya velocidad oscile entre 3 - 4 m/s, de manera que el aire ingrese por un lado y salga por el otro, para ello también se recomienda diseñar un sistema de evacuación del aire húmedo que libere la humedad al ambiente por medio de un extractor.
2. Aislar el sistema para garantizar un proceso hermético que genera pérdidas de calor mínimas y contribuya al ahorro energético empleando aislantes térmicos de baja conductividad como la lana mineral y la fibra de vidrio.
3. Ubicar un sensor de temperatura en cada cámara, que alimente los datos al controlador del quemador, para mantener las temperaturas programadas se aproximen a las registradas en cada recinto del túnel, para garantizar calor uniforme en el túnel.
4. Para la inmersión de la yuca en la parafina se recomienda un tiempo de 3 segundos, puesto que no hay diferencia significativa entre los tiempos 3, 6 y 9 segundos, para la adhesión a la yuca, pero si ahorra tiempo dentro del proceso.

9.0 Referencias

- Acosta, A., & Burgos, J. (2012). *Condiciones de operación de un secador de rodillos en la deshidratación de residuos de tomate (Lycopersicon esculentum Mill)*.
- Aguilar, E., Segreda, A., Saborío, D., Morales, J., Chacón, M., Rodríguez, L., Acuña, P., Torres, S., & Gómez, Y. (2017). Manual del cultivo de yuca Manihot esculenta Crantz. *Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA)*, 96.
- Alvis, A., Vélez, C., Villada, H., & Rada, M. (2008). Análisis Físico-Químico y Morfológico de Almidones de Ñame, Yuca y Papa y Determinación de la Viscosidad de las Pastas. *Scielo*, 19.
- Aristizábal, J., Sánchez, T., & Mejía, D. (2007). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. *Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación*, 153.
- BTSA. Métodos más utilizados para determinar la vida útil de los alimentos, 2023
- Cardona, E. J. Mosquera, y J. A. López *Análisis de la eficiencia de un secador de café* (publicado en la Revista de Investigación Agraria y Ambiental, vol. 5, no. 2, 2014)
- Casasús, Á. (2011). *Aplicación del método de diferencias finitas generalizadas a problemas de elasto-dinámica*.
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*.
- Corporation, R. O. (s. f.). *Secador continuo de cinta transportadora | Maquinaria de procesamiento y suministro de proyectos llave en mano | TSHS. Tsung Hsing Food Machinery CO., LTD.*
- Cruz, N. (2023). Métodos para la Determinación de Humedad en Alimentos.
- Cruz, W., Caicedo, J., & Ramos, J. (2021). Diseño de un sistema mecatrónico para el secado de

espirulina. *Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)*.

Dávila, J. (2004). *Estudio experimental del efecto de la porosidad de partículas sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando aire*.

de la Iglesia, J. (2012). *Operaciones y Procesos*. 58.

Díaz, A. V. (2009). *Análisis de varianza*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Psicología.

Díaz, C., & Jaramillo, P. (2022). *Propuesta de diseño de un sistema de recuperación de calor residual en el horno túnel de la empresa UCEM S.A.*

Diken International. (2015). *Citrosan*.

El tiempo. (1997). *Estudiantes de unillanos producen yuca parafinada*.

Felder, R. (2004). *Principios elementales de los procesos químicos*.

Fito, P., Andrés, A., Barat, J., & Albors, A. (2016). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. *Universitat Politècnica de Valencia*.

Fonseca, J., & Saborío, D. (2001). *Tecnología post cosecha de yuca fresca parafinada (Manihot esculenta Crantz) para exportación en Costa Rica*.

Geankoplis, C. J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. En (CECSA) *Compañía Editorial Continental*.

Georgette. (2009). *Secador de Bandeja*.

Gobernación de Antioquia. (2021). *Anuario estadístico del sector agropecuario departamento de*

antioquia 2021.

Gutiérrez, J., Cadena, C., & Bula, A. (2014). Aislamiento térmico producido a partir de cascarilla de arroz aglomerada utilizando almidón producido con *saccharomyces cerevisiae*. *SciELO*, 81.

Gutiérrez, L., & Vaca, S. (2011). *Evaluación del uso de recubrimientos lipídicos, poliméricos y refrigeración par acción para prolongar la vida útil del y olongar la vida útil del yacón (Smallantus acón (Smallantus Sonchifolius))*.

Huaraca, J. (2009). *Respuesta del deterioro de la raíz de yuca (Manihot esculenta Crantz), variedad camerún al uso de empaques de conservación en condiciones de la zona de Satipo*.

IICA. (2014). Manual Técnico de la Yuca. *Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP)*, 50.

Infoalimentos. (2023). *Liofilización de alimentos: dos métodos de conservación en uno*. Consejo Argentino sobre Seguridad de Alimentos y Nutrición.

Instituto Popular de Capacitación (IPC). (2023). *Urabá Antioqueño*.

Maupoey, P., Andres, Barat, & Albors, A. (2016). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*.

Murillo, C. (2007). *Diseño de un deshidratador de conveccion para frutas y vegetales*.

Parra, J. (2018). *Subsector Productivo de la Yuca*.

Rodríguez, H. (2023). *Cálculo de Transportadores de Tornillo Sin Fin*. Ingemecánica.

Salcedo, J., Mercado, J., Vanegas, M., Fernández, A., & Vertel, M. (2014). *Cinética de secado de*

la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) variedad Corpoica M-tai en función de la temperatura y de la velocidad de aire. *Scielo*.

Solórzano, V. (2015). *Estudio del efecto de un recubrimiento comestible con látex de sande (Brosimum utile) sobre la vida útil de yuca (Manihot esculenta), tomate de árbol (Solanum betaceum) y papa chaucha (Solanum phureja)*.

Talens, P. (2016). Evaluación del color y tolerancia de color en alimentos a través del espacio CIELAB. *Universidad Politécnica de Valencia*.

Torregroza, A. (2013). *Determinación de la influencia de la temperatura y velocidad del aire sobre las cinéticas de secado de tres variedades de yuca procesadas en la planta instalada en la vereda los algarrobos*.

Triana, M., Ayala, M., De la Puente, F., & Camargo, R. (2009). Grado de secado y eficiencia térmica de un secador de tornillo transportador drying. *Scielo*.

Universidad de Granada. (2012). *Secado por Liofilización*.

10.0 Anexos

Anexo 1. Producción de yuca en los municipios de Urabá

Municipio	Área	Área	Producción Toneladas	Rendimiento Ton/ha	Explotaciones Agrícolas
	Sembrada	Cosechada			
	Hectáreas				
Apartadó	526,00	512,00	5632,00	11,00	0,00
Arboletes	1072,00	800,00	12000,00	15,00	357,00
Carepa	25,00	20,00	260,00	13,00	72,00
Chigorodó	100,00	100,00	2000,00	20,00	80,00
Murindó	13,00	13,00	104,00	8,00	0,00
Mutatá	1600,00	1600,00	30400,00	19,00	50,00
Necoclí	295,00	292,00	3650,00	12,50	276,00
San Juan de Urabá	40,00	40,00	560,00	14,00	30,00
San Pedro de Urabá	160,00	160,00	2400,00	15,00	150,00
Turbo	230,00	225,00	2250,00	10,00	147,00
Vigía del Fuerte	80,00	78,00	624,00	8,00	70,00
Total, subregión de Urabá	4141,00	3840,00	58880,00	145,50	1232,00

Anexo 2. Caracterización banda transportadora

Controlador	Frecuencia (Hz)	Frecuencia (1/min)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	v (m/S)	Diferencia Significativa
3.1	20.2	1212	95.4	1.59	5	12.66
3.5	21.9	1314	84.68	1.41	6	10.32
4	24.5	1470	76.76	1.28	7	13.65
4.5	27.5	1650	67.54	1.13	7	2.38
5	30.4	1824	65.97	1.10	8	13.68
5.5	33.2	1992	58.03	0.97	9	14.82
6	36.1	2166	50.54	0.84	10	6.22
6.5	40.1	2406	47.58	0.79	11	11.43
7	43.4	2604	42.7	0.71	12	11.84
7.5	47.8	2868	38.18	0.64	13	2.25
8	52.2	3132	37.34	0.62	13	13.60

8.5	57.2	3432	32.87	0.55	15	13.27
9	62.7	3762	29.02	0.48	17	7.48
9.5	68.7	4122	27.00	0.45	19	0.00
10	70	4200	27.00	0.45	19	

Anexo 3. Distribución de flujo de aire

Anexo 3.1 Flujo de aire sin anular la salida de aire del ducto D

		C1F1	C2F2	C3F3	C4F4	C4F5	D	B
Sin E	R1	6,50	0,00	3,90	6,00	5,60	5,00	7,00
	R2	6,30	0,00	2,90	3,20	2,00	4,20	6,00
	R3	6,30	0,00	3,00	3,00	2,00	4,40	6,50
	Promedio	6,37	0,00	3,27	4,07	3,20	4,53	6,50
E 1	R1	2,20	2,60	5,40	6,10	5,10	5,00	7,50
	R2	2,00	2,40	4,60	5,80	3,40	5,00	6,30
	R3	2,10	2,50	5,20	4,70	2,90	4,00	7,30
	Promedio	2,10	2,50	5,07	5,53	3,80	4,67	7,03
E2	R1	1,90	0,00	5,20	5,40	1,70	3,60	6,30
	R2	2,40	0,00	3,20	4,20	2,50	3,80	6,20
	R3	2,00	0,00	3,50	4,00	2,40	3,70	6,50
	Promedio	2,10	0,00	3,97	4,53	2,20	3,70	6,33
E3	R1	1,80	0,00	0,00	10,60	2,40	3,80	5,00
	R2	2,00	0,00	0,00	10,30	2,30	5,30	7,70
	R3	2,00	0,00	0,00	10,00	2,30	5,50	6,40
	Promedio	1,93	0,00	0,00	10,30	2,33	4,87	6,37
E4	R1	2,50	0,00	0,00	0,70	6,60	5,10	6,20
	R2	2,20	0,00	0,00	0,80	7,00	5,40	6,30
	R3	2,30	0,00	0,00	0,80	7,40	5,60	6,00
	Promedio	2,33	0,00	0,00	0,77	7,00	5,37	6,17

Anexo 3.2 Flujo de Aire anulando la salida de aire del ducto D

		C1F1	C2F2	C3F3	C4F4	C4F5	B
SIN E	R1	9.60	0.00	1.80	3.70	2.20	17.90
	R2	9.10	0.00	1.70	3.20	2.40	17.30
	R3	9.70	0.00	1.80	4.10	2.10	17.70
	Promedio	9.47	0.00	1.77	3.67	2.23	17.63
CON E	R1	0.00	0.00	0.00	1.90	9.20	17.10

	R2	0.00	0.00	0.00	2.20	9.50	17.2
	R3	0.00	0.00	0.00	2.20	9.10	16.70
	Promedio	0.00	0.00	0.00	2.10	9.27	17
E1	R1	1.50	1.60	3.60	4.30	2.20	16.30
	R2	1.70	1.30	3.80	4.70	2.10	16.90
	R3	1.80	1.30	3.50	4.40	2.20	16.90
	Promedio	1.67	1.40	3.63	4.47	2.17	16.7
E2	R1	1.30	0.00	4.20	4.70	2.00	16.7
	R2	1.50	0.00	4.20	5.80	2.50	17.30
	R3	1.40	0.00	4.30	6.00	2.60	17.40
	Promedio	1.40	0.00	4.23	5.50	2.37	17.13
E3	R1	1.10	0.00	0.00	12.70	2.60	17.90
	R2	1.10	0.00	0.00	12.50	2.90	15.30
	R3	1.10	0.00	0.00	12.40	3.00	17.40
	Promedio	1.10	0.00	0.00	12.53	2.83	16.87
E4	R1	0.80	0.00	0.00	0.60	8.80	16.10
	R2	0.80	0.00	0.00	0.60	9.50	16.50
	R3	0.50	0.00	0.00	0.60	9.00	16.80
	Promedio	0.70	0.00	0.00	0.60	9.10	16.47

Anexo 4. Distribución de Temperatura

Anexo 4.1 Temperatura 50 °C

T1= 50°C			
	R1	R2	R3
F1	35	36.8	36.5
F2	38.2	47.3	52.3
F3	44.1	43.4	44.6
F4	40	40.3	42.8
F5	33	34.4	34.8
P1	32.3	41.3	34.3
P2	34.2	36.5	33.9
P3	38.9	50	70.4
P4	53.3	61.7	56.5
P5	44.1	45.6	47.2
P6	42.8	44.4	48.6

P7	42.4	45.5	40.4
P8	38.6	39.1	39
P9	33.8	34.5	36.2
P10	31.4	33.7	34.6
P11	37.4	36.5	38
TB	35.1	35	36.1
TD	31.2	32.1	32.1

Anexo 4.2 Temperatura 70 °C

T2 = 70°C			
	R1	R2	R3
F1	42.1	41.1	42.3
F2	58.6	53.8	48.1
F3	50.8	65.5	50
F4	50	50.4	53.4
F5	36.5	36.4	36.3
P1	47.9	38.9	39.6
P2	39.4	38.8	40.2
P3	56.9	46.8	54.3
P4	79	56.5	53.7
P5	52.7	60.6	55.9
P6	55	63.6	51.8
P7	50.6	51.7	51.2
P8	49.1	49	49
P9	36.9	36.5	39.1
P10	36.7	36.8	37.8
P11	41.4	42.9	43.7
TB	38.4	40	39.9
TD	34.3	34.3	34.4

Anexo 4.3 Temperatura 90 °C

T3= 90°C

	R1	R2	R3
F1	45.3	45.5	46
F2	75	80.5	84.5
F3	52.2	60	59.3
F4	48.9	62.1	53.9
F5	43.1	40.1	42.6
P1	43	42	45.3
P2	44.5	42.2	42.7
P3	71.9	70.8	72.5
P4	85.6	68	82.8
P5	56.8	61.1	61.3
P6	64.3	66.8	74
P7	50.5	70	59.9
P8	58.1	59	62.8
P9	39.5	42.8	43.1
P10	44.1	41.6	46.1
P11	46.6	47.7	48.2
TB	41.3	42.2	41.1
TD	35.6	36.7	38.1

Anexo 4.4 Temperatura 110 °C

T4= 110 °C			
	R1	R2	R3
F1	41.5	41.9	42.4
F2	42.6	43.7	46
F3	47.5	50.3	56.6
F4	48.1	47.6	47.5
F5	39.7	40.5	41
P1	34.9	34.5	34.5
P2	65	67.5	67.7
P3	95.1	67.9	68.3
P4	65.2	67.8	70.2

P5	34.8	34	34.4
P6	66.4	66.1	66.3
P7	34.8	34.4	34.3
P8	53	53.3	53.3
P9	35.1	34.6	34.5
P10	44	42.5	41.7
P11	34.2	34.2	34.3
TB	46.4	46.8	46.9
TD	45.4	45.4	45.5

Anexo 4.5 Temperatura 130 °C

T5= 130°C			
	R1	R2	R3
F1	38,5	39,4	40,5
F2	67,5	94,7	97,2
F3	56,6	63,7	73,1
F4	53,9	56,8	58,8
F5	41,3	40,6	40,4
P1	32,6	32,5	3,4
P2	41,1	41,9	41,5
P3	63,6	39,1	32,9
P4	94,1	91,3	94,1
P5	72,7	75,7	100,9
P6	58,7	61	64,8
P7	65,2	48,5	60,5
P8	58	56,9	56,2
P9	38,1	41,3	41,3
P10	41,1	40,8	40,2
P11	34	33,8	34,8
TB	39,5	43,1	44,6
TD	37,9	40,7	42,8

Anexo 4.6 Temperaturas promedio

Distribución de Temperatura					
Puntos	Temperatura (°C)				
	50	70	90	110	130
F1	36.10	41.83	45.60	41.93	39.47
P1	35.97	42.13	43.43	34.63	22.83
P2	34.87	39.47	43.13	66.73	41.50
F2	45.93	53.50	80.00	44.10	86.47
P3	53.10	52.67	71.73	77.10	45.20
P4	57.17	63.07	78.80	67.73	93.17
F3	44.03	55.43	57.17	51.47	64.47
P5	45.63	56.40	59.73	34.40	83.10
P6	45.27	56.80	68.37	66.27	61.50
F4	41.03	51.27	54.97	47.73	56.50
F5	34.07	36.40	41.93	40.40	40.77
P7	42.77	51.17	60.13	34.50	58.07
P8	38.90	49.03	59.97	53.20	57.03
P9	34.83	37.50	41.80	34.73	40.23
P10	33.23	37.10	43.93	42.73	40.70
P11	37.30	42.67	47.50	34.23	34.20
TB	35.40	39.43	41.53	46.70	42.40
TD	31.80	34.33	36.80	45.43	40.47

Anexo 5. Distribución de temperatura en la superficie

Nodo	Izquierdo	Superior	Derecho
1	47.5	48.1	54.1
2	43.7	49.8	40.8
3	50.3	46.3	47.5
4	55.4	53.2	45.3
5	47.6	55.5	48.9
6	54.5	53.3	49.6
7	53.7	51.3	53.6
8	50.9	54.7	51.4
9	61.2	54.2	57.9

10	55	56.4	67.7
11	59.5	54.1	60.5
12	77.1	55.7	63.9
13	87	59.4	80.3
14	79	55	79.8
15	77.1	60.7	82.3
16	78.5	55.5	85.7
17	73	72.1	92.9
18	77.2	60.8	81.6
19	77.6	69.5	77.3
20	73.3	58.6	69.4
21	67.6	81.4	65.1
22	64.3	74.9	66
23	65.9	82.7	56.8
24	51.4	67.2	61
25	54.9	74.6	60.9
26	53.5	75.7	56.7
27	52.6	80.1	62.4
28	45.6	85.4	58.2
29	53.2	74.1	56
30	48.9	86.9	53.3
31	49.1	73.5	50.2
32	46.3	85.7	56.8
33	50.2	74.8	53.6
34	47.3	65.4	47.9
35	46	72.7	50.7
36	44.9	67.5	50.9
37	41.5	65.3	48.4
38	38.6	60.2	46.5
39	39.7	65.9	46.1
40	39.7	62.3	41.5
41		62.6	
42		56.5	
43		56.9	
44		59.8	
45		58.9	
46		55.1	
47		54.8	
48		55.9	

49		59	
50		54.8	
51		54.7	
52		56.6	
53		53.5	
54		49	
55		49	
56		54	
57		52.1	
58		47.5	
59		53.2	
60		50.3	
61		48.4	
62		45.1	
63		43.9	
64		43.6	
65		45.5	
66		44.3	
67		41.1	
68		44.5	
69		40.9	
70		41.3	
71		38.7	
72		41.2	
73		39.1	
74		41.4	
75		40.9	
76		39.5	
77		36.7	
78		38.1	
79		37	
80		37.1	

Anexo 6. Diagrama de colores, distribución de temperatura superficial.

IZQUIERDA

Q CONVECCION		Q CONVECCION		Q CONVECCION		Q CONVECCION	
31,00	47,50	46,10	55,40	47,80	50,40	48,60	61,20
31,00	43,10	50,30	52,00	54,50	53,40	61,20	48,40
31,00	43,70	43,20	47,60	45,10	47,30	43,90	59,50
		31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
			50,53			61,90	
						116,77	
						31,00	31,00

Q RADIACION

SUPERIOR

31,00	41,30	40,58	45,50	42,68	50,30	44,44	49,00
31,00	38,86	44,50	44,57	43,90	47,53	47,50	51,00
31,00	38,70	42,09	44,30	45,07	48,40	50,78	54,00
31,00	37,93	40,90	42,49	43,60	47,58	53,20	52,08
31,00	41,20	38,55	41,10	40,22	45,10	50,25	52,10
		31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
			50,53			61,90	
						116,77	
						31,00	31,00

DERECHA

31,00	40,90	38,71	41,50	41,76	48,40	44,55	47,90
31,00	38,21	41,40	42,04	46,10	47,97	50,90	50,79
31,00	39,50	37,76	39,10	40,68	46,50	49,65	50,70
		31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
			50,53			61,90	
						116,77	
						31,00	31,00

Anexo 7. Consumo Energético

QUEMADOR				
TIEMPO	TEMPERATURA °C	KILOGRAMOS		
		Wi	Wf	Wi-Wf
0	50	32.52	32.5	0.02
5	50	32.5	32.5	0
10	50	32.5	32.5	0
15	50	32.5	32.5	0
20	50	32.5	32.48	0.02
25	70	32.48	32.46	0.02
30	70	32.46	32.44	0.02
35	70	32.44	32.44	0
40	70	32.44	32.42	0.02
45	90	32.42	32.4	0.02
50	90	32.4	32.38	0.02
55	90	32.38	32.36	0.02
60	90	32.36	32.36	0
65	110	32.36	32.32	0.04
70	110	32.32	32.3	0.02
75	110	32.3	32.28	0.02
80	110	32.28	32.26	0.02
85	130	32.26	32.22	0.04
90	130	32.22	32.2	0.02
95	130	32.2	32.18	0.02
100	130	32.18	32.16	0.02

Anexo 8. Calor aprovechado

Punto	T (°C)	vflauta	A*v (m ³ /s)	A*v (m ³ /h)
F1	39,47	9,47	0,03644	131,20
F2	86,47	0,00	0,00000	0,00
F3	64,47	1,77	0,00681	24,52
F4	56,50	3,67	0,01412	50,85
F5	40,77	2,23	0,00858	30,90
	Total		0,0700	237,46

Caudal perdido			0,2456	884,11
B	42,4	17,63	0,3115	1121,57
NRe	NPr	Nu	h	Q (W)
155558,82	0,7224	287,58	52,66	10609,61

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)}{\nu^2} Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu \alpha} \quad \text{ec 20.}$$

Nota. Fuente (Cengel, 2007)

Anexo 8.1 Convección Natural

T (°C)	T (K)	Pr	NRa	UN	hex	N (m ² /s)	K (W/m ² *°C)
50,45	323,45	0,7248	4,1E+07	47,07	3,408	1,7E-05	0,0266
71,80	344,80	0,7220	7,6E+07	55,04	4,094	1,8E-05	0,0274
68,79	341,79	0,7237	7,0E+07	53,99	4,017	1,8E-05	0,0274
47,00	320,00	0,7259	3,3E+07	44,83	3,246	1,7E-05	0,0266
48,90	321,90	0,7255	3,7E+07	46,04	3,334	1,7E-05	0,0266
72,26	345,26	0,7224	7,5E+07	54,95	4,106	1,8E-05	0,0275
71,26	344,26	0,7225	7,4E+07	54,69	4,080	1,8E-05	0,0274
52,51	325,51	0,7250	4,4E+07	47,96	3,490	1,7E-05	0,0268
53,95	326,95	0,7248	4,6E+07	48,65	3,546	1,7E-05	0,0268
75,20	348,20	0,7220	7,9E+07	55,69	4,178	1,8E-05	0,0276
62,16	335,16	0,7237	6,1E+07	52,06	3,838	1,8E-05	0,0271
45,69	318,69	0,7259	3,1E+07	44,02	3,173	1,7E-05	0,0265

Anexo 8.2 Convección Forzada

NRA	NRa/NRe>>1 es natural	UN	hi (W/m ² *°C)	U(W/M ² °C)	Q(W) pared	QRad
1,8E+07	13085,89	15,90	1,150	0,858	4,424	6,099
7,1E+07	N/A	24,45	1,995	1,338	14,466	14,244
5,3E+07	247960,13	22,35	1,727	1,205	12,069	12,999
4,4E+07	94937,73	21,07	1,595	1,067	4,525	4,925
1,8E+07	13085,89	15,90	1,150	0,854	4,049	5,567
7,1E+07	N/A	24,45	1,995	1,339	14,643	14,438
5,3E+07	247960,13	22,35	1,727	1,211	12,920	14,020

4,4E+07	94937,73	21,07	1,595	1,092	6,225	6,817
1,8E+07	13085,89	15,90	1,150	0,867	5,272	7,329
7,1E+07	N/A	24,45	1,995	1,347	15,774	15,690
5,3E+07	247960,13	22,35	1,727	1,189	9,816	10,374
4,4E+07	94937,73	21,07	1,595	1,059	4,123	4,488
TOTAL					108,30	116,99

Anexo 9. Análisis microbiológico

Anexo 9.1 Yuca fresca (UFC/g)

Sin parafinar		
Días	10⁻³ PDA	10⁻³ Sabouraud
4	9	6
8	16	10
12	1 Moho algodonoso 3 colonias penicillium (contaminación del ambiente)	4 1 colonia de penicillium (contaminación del ambiente)
16	1	3
20	2	7 penicillium
24	Contaminación del cambiante (penicillium)	50 Moho algodonoso 1 penicillium (Puede ser contaminación del ambiente)
28	4	3 Moho algodonoso
32	12	8
36	5	7
40	7	9
44	1	8
48	6	13 Contaminación del ambiente (penicillium) Moho algodonoso
52	5	7

Anexo 9.2 Yuca parafinada 3s de inmersión (UFC/g)

Inmersión 3s

Días	10⁻³ PDA	10⁻³ Sabouraud
4	1	4
8	1	3
12	4	2
16	Moho algodonoso 3 colonias	1
20	--	Moho algodonoso
24	2	1
28	1	1
32	--	--
36	1	Penicillium (contaminación del ambiente)
40	1 moho extendido por todo el interior de la placa	1
44	4	3
48	--	--
52	Moho algodonoso	1
56	1	1
60	2 1 moho	3
64	1 moho algodonoso extendido en la placa	2
68	1	4
72	3	3
76	2	3 9 penicillium
80	2 penicillium Moho algodonosos	1

Anexo 9.3 Yuca parafinada 6s de inmersión. (UFC/g)

Inmersión 6s		
Días	10⁻³ PDA	10⁻³ Sabouraud
4	3	2
8	4	2
12	2 1 colonia algodonosa	7 colonias de penicillium
16	1	2 penicillium (contaminación del ambiente)
20	5	1
24	2	4

28	Moho algodonoso extendido en placa	7
32	4	4
36	6	8
40	3	2
44	4	--
48	3	1
52	Penicillium (contaminación del ambiente)	1 moho algodonoso
56	--	--
60	4	6
64	5	7
68	1	3
72	3	8
76	1	1
80	--	2

Anexo 9.4 Yuca parafinada 9s de inmersión. (UFC/g)

Inmersión 9s		
Días	10⁻³ PDA	10⁻³ Sabouraud
4	3	2
8	4	3
12	Contaminación del ambiente	Contaminación del ambiente
16	15	6
20	3	1
24	Crecimiento de moho algodonoso	--
28	7	3
32	2	6
36	1	2
40	4	9
44	3	Moho algodonoso extendido en placa
48	5	--
52	2 colonias de penicillium	--
56	1	--
60	--	--
64	3	--
68	2	1
72	11	3

76	5	2
80	1	4
1 moho algodónoso		

Anexo 10. Cuantiles de la distribución de Tukey

TABLA 8: Cuantiles de la distribución de Tukey $q(n, m)$

$\alpha = 0.01$	n														
m	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
2	13.90	19.02	22.56	25.37	27.76	29.86	31.73	33.41	34.93	36.29	37.53	38.66	39.70	40.66	
3	8.26	10.62	12.17	13.32	14.24	15.00	15.65	16.21	16.71	17.16	17.57	17.95	18.29	18.62	
4	6.51	8.12	9.17	9.96	10.58	11.10	11.54	11.92	12.26	12.57	12.84	13.09	13.32	13.53	
5	5.70	6.98	7.80	8.42	8.91	9.32	9.67	9.97	10.24	10.48	10.70	10.89	11.08	11.24	
6	5.24	6.33	7.03	7.56	7.97	8.32	8.61	8.87	9.10	9.30	9.48	9.65	9.81	9.95	
7	4.95	5.92	6.54	7.00	7.37	7.68	7.94	8.17	8.37	8.55	8.71	8.86	9.00	9.12	
8	4.75	5.64	6.20	6.62	6.96	7.24	7.47	7.68	7.86	8.03	8.18	8.31	8.44	8.55	
9	4.60	5.43	5.96	6.35	6.66	6.91	7.13	7.33	7.49	7.65	7.78	7.91	8.03	8.13	
10	4.48	5.27	5.77	6.14	6.43	6.67	6.87	7.05	7.21	7.36	7.49	7.60	7.71	7.81	
11	4.39	5.15	5.62	5.97	6.25	6.48	6.67	6.84	6.99	7.13	7.25	7.36	7.46	7.56	
12	4.32	5.05	5.50	5.84	6.10	6.32	6.51	6.67	6.81	6.94	7.06	7.17	7.26	7.36	
13	4.26	4.96	5.40	5.73	5.98	6.19	6.37	6.53	6.67	6.79	6.90	7.01	7.10	7.19	
14	4.21	4.89	5.32	5.63	5.88	6.08	6.26	6.41	6.54	6.66	6.77	6.87	6.96	7.05	
15	4.17	4.84	5.25	5.56	5.80	5.99	6.16	6.31	6.44	6.55	6.66	6.76	6.84	6.93	
16	4.13	4.79	5.19	5.49	5.72	5.92	6.08	6.22	6.35	6.46	6.56	6.66	6.74	6.82	
17	4.10	4.74	5.14	5.43	5.66	5.85	6.01	6.15	6.27	6.38	6.48	6.57	6.66	6.73	
18	4.07	4.70	5.09	5.38	5.60	5.79	5.94	6.08	6.20	6.31	6.41	6.50	6.58	6.65	
19	4.05	4.67	5.05	5.33	5.55	5.73	5.89	6.02	6.14	6.25	6.34	6.43	6.51	6.58	
20	4.02	4.64	5.02	5.29	5.51	5.69	5.84	5.97	6.09	6.19	6.28	6.37	6.45	6.52	
21	4.00	4.61	4.99	5.26	5.47	5.65	5.79	5.92	6.04	6.14	6.23	6.32	6.39	6.47	
22	3.99	4.59	4.96	5.22	5.43	5.61	5.75	5.88	5.99	6.10	6.19	6.27	6.35	6.42	
23	3.97	4.57	4.93	5.20	5.40	5.57	5.72	5.84	5.95	6.05	6.14	6.23	6.30	6.37	
24	3.96	4.55	4.91	5.17	5.37	5.54	5.69	5.81	5.92	6.02	6.11	6.19	6.26	6.33	
25	3.94	4.53	4.89	5.14	5.35	5.51	5.65	5.78	5.89	5.98	6.07	6.15	6.22	6.29	
26	3.93	4.51	4.87	5.12	5.32	5.49	5.63	5.75	5.86	5.95	6.04	6.12	6.19	6.26	
27	3.92	4.49	4.85	5.10	5.30	5.46	5.60	5.72	5.83	5.92	6.01	6.09	6.16	6.22	
28	3.91	4.48	4.83	5.08	5.28	5.44	5.58	5.70	5.80	5.90	5.98	6.06	6.13	6.20	
29	3.90	4.47	4.81	5.06	5.26	5.42	5.56	5.67	5.78	5.87	5.96	6.03	6.10	6.17	
30	3.89	4.45	4.80	5.05	5.24	5.40	5.54	5.65	5.76	5.85	5.93	6.01	6.08	6.14	
31	3.88	4.44	4.79	5.03	5.23	5.38	5.52	5.63	5.74	5.83	5.91	5.99	6.05	6.12	
32	3.87	4.43	4.77	5.02	5.21	5.37	5.50	5.61	5.72	5.81	5.89	5.96	6.03	6.10	
33	3.87	4.42	4.76	5.00	5.20	5.35	5.48	5.60	5.70	5.79	5.87	5.94	6.01	6.08	
34	3.86	4.41	4.75	4.99	5.18	5.34	5.47	5.58	5.68	5.77	5.85	5.93	5.99	6.06	
35	3.85	4.40	4.74	4.98	5.17	5.32	5.45	5.57	5.67	5.75	5.84	5.91	5.98	6.04	
36	3.85	4.40	4.73	4.97	5.16	5.31	5.44	5.55	5.65	5.74	5.82	5.89	5.96	6.02	
37	3.84	4.39	4.72	4.96	5.15	5.30	5.43	5.54	5.64	5.72	5.80	5.88	5.94	6.00	
38	3.83	4.38	4.71	4.95	5.13	5.29	5.41	5.53	5.62	5.71	5.79	5.86	5.93	5.99	
39	3.83	4.37	4.70	4.94	5.12	5.28	5.40	5.51	5.61	5.70	5.78	5.85	5.91	5.97	
40	3.82	4.37	4.70	4.93	5.11	5.26	5.39	5.50	5.60	5.69	5.76	5.83	5.90	5.96	
41	3.82	4.36	4.69	4.92	5.11	5.26	5.38	5.49	5.59	5.67	5.75	5.82	5.89	5.95	
42	3.82	4.35	4.68	4.91	5.10	5.25	5.37	5.48	5.58	5.66	5.74	5.81	5.88	5.94	
43	3.81	4.35	4.67	4.91	5.09	5.24	5.36	5.47	5.57	5.65	5.73	5.80	5.86	5.92	
44	3.81	4.34	4.67	4.90	5.08	5.23	5.35	5.46	5.56	5.64	5.72	5.79	5.85	5.91	
45	3.80	4.34	4.66	4.89	5.07	5.22	5.34	5.45	5.55	5.63	5.71	5.78	5.84	5.90	
46	3.80	4.33	4.66	4.89	5.07	5.21	5.34	5.44	5.54	5.62	5.70	5.77	5.83	5.89	
47	3.80	4.33	4.65	4.88	5.06	5.21	5.33	5.44	5.53	5.61	5.69	5.76	5.82	5.88	
48	3.79	4.32	4.64	4.87	5.05	5.20	5.32	5.43	5.52	5.61	5.68	5.75	5.81	5.87	
49	3.79	4.32	4.64	4.87	5.05	5.19	5.31	5.42	5.51	5.60	5.67	5.74	5.80	5.86	
50	3.79	4.32	4.63	4.86	5.04	5.19	5.31	5.41	5.51	5.59	5.67	5.73	5.80	5.85	