



Universidad Nacional Autónoma De
México

Facultad De Estudios Superiores
Cuautitlán

Efecto de la adición de miel como recubrimiento en el
secado de carambola (*Averrhoa carambola L.*) por
microondas y en secador solar de bandeja.

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

PRESENTA:

DEL ANGEL PÉREZ ARELI

Asesores:

DRA. VARGAS UGALDE MARÍA ELENA

I.A. LÓPEZ MARTÍNEZ FRANCISCO JAVIER

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres gracias por confiar, por creer en mí, por darme su apoyo incondicional y su amor durante todos estos años.

A mis hermanos por todos los buenos momentos, gracias a Marco por ayudarme en todos los sentidos durante en esta etapa de mi vida.

A mi compañero Coco por haberme acompañado en los largos días de estudio, gracias por compartir esta vida conmigo.

A mis amigas y amigos por salvarme en los días malos, que alegraron cada día de universidad, y formaron parte la trayectoria, gracias a Alan por apoyarme, ayudarme, explicar lo que no comprendía por recorrer la carrera juntos. Sin ustedes no hubiera vivido igual cada experiencia.

A mis asesores, Dra. María Elena Vargas Ugalde y al I.A. Francisco Javier López Martínez por sus conocimientos y guiarme durante la realización de este trabajo, gracias a la Dra. María por su interés a mi trabajo y paciencia en cada revisión.

A mis sinodales por el tiempo que le dedicaron a mi trabajo, gracias por cada corrección y guiarme en la finalización de este trabajo.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por todos los conocimientos y gratos momentos que me dio.

Este trabajo se realizó con el apoyo financiero de los proyectos DGAPA PAPIME PE213020 "Simulación de cambios de propiedades durante la vida de anaquel de productos hortofrutícolas procesados térmicamente y por transferencia de masa", PIAPI FESC 2057." Alimentos procesados mediante tecnología de barreras y su simulación matemática" y PIAPI FESC CI 2255 "Procesamiento de alimentos por transferencia de calor y masa combinados con otras tecnologías"

ÍNDICE

Resumen.....	1
Introducción	2
1 Antecedentes	3
1.1 Carambola (Averrhoa carambola L.)	3
1.1.1 Descripción.....	3
1.1.2 Origen y Localización.....	4
1.1.3 Propiedades de la carambola.....	4
1.1.4 Producción de Carambola en México	4
1.1.5 Composición Nutricional	5
1.1.6 Clasificación.....	5
1.1.7 Daños en la carambola.....	6
1.2 Miel.....	7
1.3 Secado	8
1.3.1 Fases de secado.....	9
1.3.2 Clasificación de los sistemas de secado	10
1.4 Secado en campos electromagnéticos.....	15
1.4.1 Secado por microondas.....	16
1.4.2 Secado al sol.....	19
1.4.2.1 Sistemas de secadores solares.....	21
2 Metodología Experimental.....	24
2.1 Objetivos	24
2.1.2 Objetivo particular 1	24
2.1.3 Objetivo particular 2	24
2.2 Materiales y métodos	24
2.2.1 Actividades preliminares.....	24
2.2.2 Determinación de temperatura	26
2.2.3 Determinación de humedad	26
2.2.4 Color	26
2.2.5 Encogimiento.....	27
2.2.6 Evaluación sensorial	27
2.2.7 Coeficiente de Difusión.	27

2.2.8 Propiedades termofísicas de la carambola	28
2.2.9 Propiedad dieléctrica	29
2.2.10 Preparación de la muestra	30
2.2.11 Secado por microondas.....	30
2.2.12 Secado solar	31
2.2.13 Método de elementos finitos usando Comsol multiphysics	32
Secado por horno de microondas	32
Secado en secador solar	44
3 Análisis de resultados.....	50
3.1 Curvas de secado.....	50
3.2 Curvas de velocidad de secado	51
3.2.1 Coeficiente de Difusión (De)	52
3.3 Curvas de temperatura	53
3.4 simulación de Perfiles de Temperatura (COMSOL).....	55
3.5 Cambio de color	58
3.6 Encogimiento.....	60
3.7 Rendimiento.....	61
3.8 Evaluación sensorial	62
Conclusiones	63
Referencias.....	65
Anexos.....	68
Anexo 1 Condiciones ambientales	68
Anexo 2 Análisis estadístico	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Árbol de carambola	3
Figura 2 Los períodos de secado de un sólido.	10
Figura 3 Criterios de clasificación de equipos y sistemas de secado	11
Figura 4 Clasificación de secadores de contacto directo	13
Figura 5 Clasificación de secadores de contacto indirecto	14
Figura 6 Una onda electromagnética y los campos eléctricos y magnéticos oscilantes.....	16
Figura 7 El espectro de radiación electromagnética.....	16
Figura 8 Esquema de la acción de las ondas electromagnéticas en un medio húmedo.....	19

Figura 9 La irradiación solar espectral (radiación térmica).....	20
Figura 10 Secador solar de gabinete	22
Figura 11 Secador solar tipo escalera	22
Figura 12 Secador solar de chimenea	23
Figura 13 Secador solar con calentamiento de aire separado.....	23
Figura 14 Construcción del secador solar	25
Figura 15 Rodajas de carambola	26
Figura 16 Carambola a los 45 segundos de secado	26
Figura 17 Carambola seca con 200W	26
Figura 18 Formulario para el análisis sensorial.....	27
Figura 19 Preparación de las muestras de carambolo	30
Figura 20 Acomodo de la muestra en el microondas	31
Figura 21 Secador solar	32
Figura 22 Charolas con rodajas de carambola	32
Figura 23 Construcción del horno de microondas	32
Figura 24 Curva de secado por microondas de muestras de carambola	50
Figura 25 Curvas de velocidad de secado de carambola	52
Figura 26 Curvas de temperatura de carambola	54
Figura 27 Perfiles de temperatura en el secado por horno de microondas	56
Figura 28 Puntos de estudio para los perfiles de temperatura en el horno de microondas.....	56
Figura 29 Simulación de la transferencia de calor en horno de microondas	56
Figura 30 Perfiles de temperatura en el secado por un secador solar.	57
Figura 31 Puntos de estudio para los perfiles de temperatura en el secador solar.	57
Figura 32 Simulación de la transferencia de calor en secador solar.....	57
Figura 33 Cambio de color de la carambola después de secar	59
Figura 34 Rendimiento en el secado de carambola	61
Figura 35 Prueba hedónica de 4 puntos	62

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Composición nutrimental de la carambola.	5
Cuadro 2 Taxonomía de la carambola	5
Cuadro 3 Composición química de la miel.....	8

Cuadro 4 Especificaciones del microondas KOR-1N0AW	30
Cuadro 5 Niveles de potencia del microondas KOR-1N0AW	31
Cuadro 6 Características para el horno de microondas.....	33
Cuadro 7 Características para el magnetrón	33
Cuadro 8 Características para el plato de vidrio	34
Cuadro 9 Características para el polígono 1	34
Cuadro 10 Características para el plano de trabajo 1.....	35
Cuadro 11 Características para extraer 1	35
Cuadro 12 Características para unión 1	36
Cuadro 13 Características para bloque 3	36
Cuadro 14 Características para intersección 1.....	37
Cuadro 15 Características para full_geometry	37
Cuadro 16 Características la carambola.....	37
Cuadro 17 Características para el plato	37
Cuadro 18 Características para el aire	38
Cuadro 19 Características para el puerto	38
Cuadro 20 Características para la pared metálica	38
Cuadro 21 Características para la simetría	39
Cuadro 22 Características para la geometría 1.....	39
Cuadro 23 Características para la carambola como material	39
Cuadro 24 Características para el plato como material.....	40
Cuadro 25 Características para el aire como material.....	40
Cuadro 26 Características para el cobre como material.....	41
Cuadro 27 Características para la ecuación de onda eléctrica 1	42
Cuadro 28 Características para la pared metálica	42
Cuadro 29 Características para el medio puerto	43
Cuadro 30 Características para el conductor magnético perfecto 1	43
Cuadro 31 Características para el barrido paramétrico.....	44
Cuadro 32 Características para construir la carambola	44
Cuadro 33 Características para construir la caja de secado	45
Cuadro 34 Características para el aire	45
Cuadro 35 Características para construir la carambola como material.....	46

Cuadro 36	Características para construir el sólido 1	46
Cuadro 37	Características para los valores iniciales 1	47
Cuadro 38	Características para el fluido 1 solar	47
Cuadro 39	Características para la temperatura 1 solar	48
Cuadro 40	Características para el flujo de entrada 1.....	49
Cuadro 41	Características para la malla 1.....	49
Cuadro 42	Características para temporal	49
Cuadro 43	Comparaciones en parejas de Tukey para humedad	51
Cuadro 44	Comparaciones en parejas de Tukey para velocidad de secado.....	52
Cuadro 45	Comparaciones en parejas de Tukey para De	53
Cuadro 46	Comparaciones en parejas de Tukey para temperatura	55
Cuadro 47	Cálculos de Δ para el proceso de secado	58
Cuadro 48	Comparaciones en parejas de Tukey para ΔE	60
Cuadro 49	Comparación de tratamientos para el secado.	60
Cuadro 50	Comparaciones en parejas de Tukey para el rendimiento.....	62



Resumen

La carambola (*Averrhoa carambola L.*) es una fruta carnosa de color dorada en estado maduro. Este trabajo aborda el efecto de la adición de miel en el secado de carambola en un horno de microondas y un secador solar. Se determinaron cambios de color, temperatura y pérdida de humedad del producto. Se obtuvieron curvas de secado y velocidad de secado, se calculó el coeficiente de difusión para cada tratamiento, se simuló curvas de temperatura y perfiles de temperatura utilizando COMSOL Multiphysics. Se realizó una evaluación sensorial para decidir que tratamiento confiere mejores características organolépticas.

En la pérdida de humedad se realizó una comparación en parejas de Tukey con una agrupación de "A" para todos los factores por lo que con cualquier tratamiento no habrá diferencias significativas en la humedad final. Las muestras con y sin recubrimiento de miel en horno microondas alcanzaron velocidad de secado de 1.42 y 1.36 kg agua/h m² respectivamente; en el secador solar, de 0.42 y 0.32 kg agua/h m² respectivamente. El coeficiente de difusión de agua en secador solar para las muestras recubiertas con miel y sin miel tuvieron un valor D_e , respectivamente, $D_e = 9.84 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y $D_e = 9.66 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, las muestras secadas en horno de microondas con miel y sin miel tuvieron respectivamente $D_e = 9.35 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $9.41 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; las temperaturas experimentales de carambola en horno de microondas fueron similares a las simuladas en COMSOL, los perfiles de temperatura experimentales y simulados fueron similares. En la utilización de miel como recubrimiento no modificó la transferencia de masa, sin embargo, sí la transferencia de energía, así como un efecto significativo en la conservación de parámetros sensoriales.



Introducción

El secado de productos alimenticios es un método para su conservación, ya que impide la proliferación de microorganismos evitando su putrefacción mediante la extracción del agua que contienen.

El secado de alimentos tiene diversas ventajas como:

- ⊙ Reducción de pérdidas
- ⊙ Alargar la vida útil del alimento
- ⊙ Reducción en costos de transporte
- ⊙ Reducción en áreas de almacenamiento

El secado solar es un método simple que consiste en aprovechar las condiciones ambientales naturales por lo que es un proceso no contaminante y con uso de energías renovables para el secado de alimentos.

Las microondas son parte del espectro electromagnético y, en consecuencia, se componen de campos magnéticos y eléctricos. En el calentamiento de alimentos por microondas los campos eléctricos interactúan con las moléculas de agua e iones en el alimento, generando calor en el interior de este (Della y Mascheroni, 2009).

La simulación de procesos en la industria alimentaria es una herramienta que permite reproducir virtualmente los procesos y estudiar su comportamiento, para analizar el impacto de las distintas variables que puedan intervenir en el mismo, en este estudio fue el tipo de alimento a estudiar, temperatura, tipo de equipo a utilizar y el tiempo de residencia.



1 Antecedentes

1.1 Carambola (*Averrhoa carambola* L.)

La carambola (Figura 1) es un arbusto perennifolio, perteneciente a la familia de las oxalidaceaceas, muy decorativo, de una altura mediana entre 5m y 9 m, con ramas colgantes, hojas grandes, alternas, compuestas, con 5-11 folíolos ovado-elípticos de 10 x 4 cm, glaucos por el envés. Sus flores son pequeñas de unos 4 mm de diámetro, moradas o rojas, dispuestas en racimos axilares o terminales.

El cultivo se reproduce por semilla, acodo o injerto. Su densidad de siembra varía mucho, pero generalmente está en un rango de 286 a 356 árboles por hectárea. Entra en producción a los tres años de edad, se considera un cultivo tropical y subtropical.

Se adapta bien a temperaturas entre 18 y 28°C, encontrándose la temperatura óptima entre 26 y 28°C. Es susceptible a las heladas. Los suelos deben tener buena permeabilidad. Los frutos se dividen en variedades de frutos dulces y variedades de frutos agrios. (FAO, 2022)



Figura 1
Árbol de carambola

1.1.1 Descripción

El fruto es una baya carnosa dorada en su etapa madura con una cutícula cerosa de color translúcido o dorado pálido que puede medir entre 5-15 cm de longitud y 3-6 cm de ancho. La forma de estrella es característica de este fruto debido a los 4-5 vértices o aristas longitudinales y redondeadas que siempre están presentes (Arias et al., 2015).



La pulpa tiene color amarillo claro a oscuro, es crujiente y jugosa; el sabor varía desde muy ácido con poco azúcar a muy dulce con poca acidez, esto depende en gran medida de la variedad utilizada y las condiciones ambientales (León, 2000; Nakasone y Paull, 1998; George y Nissen, 1994, como se citó en Arias, 2015).

El peso recomendado para comercialización en fresco se encuentra entre 100 y 300 g. Se estima que alrededor del 95% del fruto es comestible, siendo en promedio el 70% pulpa, el 25% corteza y 5 % semilla.

1.1.2 Origen y Localización

Es originaria de Indonesia, se ha introducido en regiones tropicales con buenos resultados. Se cultiva en Malasia, Israel, China, Tailandia, India, Filipinas, Australia y no tan difundida en las islas del Pacífico Sur (Tahiti, Nueva Guinea y Hawai, entre otras). Algunas especies son cultivadas en las islas del Caribe, Centroamérica, la parte tropical de Sudamérica, en el este tropical de África y en el estado de la Florida (Estados Unidos) (Arias, 2015).

1.1.3 Propiedades de la carambola

La carambola es rica en vitamina A, vitamina C, las cuales contribuyen a reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares, Debido a su bajo contenido de carbohidratos, riqueza en potasio y bajo aporte de sodio, se recomienda a personas que sufren de diabetes, hipertensión arterial o afecciones de vasos sanguíneos y corazón (Cano y Durán, 2015). La capacidad antioxidante de esta fruta proviene de compuestos como vitamina C, vitamina E, β caroteno y polifenoles de plantas (flavonoides, antocianinas y fenilpropano). Se ha atribuido a estos fitonutrientes un efecto protector en la prevención de procesos degenerativos de enfermedades cancerígenas, cardio y cerebro vasculares, dado que los antioxidantes poseen capacidad para neutralizar los radicales libres (Cano y Durán, 2015).

1.1.4 Producción de Carambola en México

Los estados que cultivan carambola por importancia en producción son: *Michoacán, Morelos, Jalisco, Colima, Tabasco, Nayarit y Yucatán*. En 2016 se generaron 4.0 millones de pesos por este cultivo, en una superficie de 70.5 hectáreas. (SIAP, 2018)



1.1.5 Composición Nutricional

La carambola posee una pulpa jugosa por lo que su mayor componente es el agua

(Cuadro 1) 100 gramos de parte comestible contienen:

Cuadro 1

Composición nutricional de la carambola.

Compuesto	Cantidad
Calorías	35.7
Agua	89-91 g
Carbohidratos	9.38 g
Grasas	0.08 g
Proteínas	0.38 g
Ceniza	0.26-0.4 g
Fibra	0.8-0.9 g
Calcio	4.4- 6.0 mg
Fosforo	15.5-21 mg
Hierro	0.32-1.65 mg
Tiamina	0.03-0.038 mg
Riboflavina	0.019-0.03 mg
Niacina	0.294-0.38 mg
Ácido ascórbico	26-53.1 mg

Nota. Adaptado de “Fichas técnicas, productos frescos de fruta” por FAO (2022).

1.1.6 Clasificación

La carambola es un arbusto tropical, el Cuadro 2 muestra su taxonomía.

Cuadro 2

Taxonomía de la carambola

Rango	Nombre- científico y nombre común
Reino	Plantae- Plantas
Subreino	Tracheobionta - Plantas vasculares
Superdivisión	Espermatophyta - Plantas de semillas
División	Magnoliophyta - Plantas con flores
Clase	Magnoliopsida – Dicotiledóneas
Subclase	Rosidae
Orden	Geraniales
Familia	Oxalidaceae - Familia Wood-Sorrel
Género	<i>Averrhoa Adans.</i> – averrhoa
Especie	<i>Averrhoa carambola</i> L. – carambola

Nota. Adaptado de “Averrhoa carambola L. Carambola Plants” por United States Department of Agriculture (2022).



1.1.7 Daños en la carambola

⊗ Daños post- cosecha de la carambola

La carambola es altamente perecedera, existen varios factores que afectan a la fruta y aumentan su deterioro como:

⊗ Daños por frío

Los síntomas de estos daños por frío, incluyen hundimientos en la superficie; algunos son pequeños, considerándose de menos de 1 mm, otros son profundos y oscuros y otros son largos, de 1 a 2 mm. Estas áreas son de color marrón. Estos síntomas han sido observados en algunos cultivares de carambola después de las dos semanas a 0°C ó 6 semanas seguidas a 5°C, siendo los más habituales por este daño son la aparición de áreas de color grisáceo claramente definidas y algo hundidas en la piel, oscurecimiento en la pulpa, maduración anormal, mayor sensibilidad a las infecciones, más rápido deterioro, tonalidades bajas de color y poco sabor, así como la aparición de manchas en la piel.

⊗ Necrosamiento de los ángulos

Los ángulos del fruto son muy susceptibles a cualquier daño por su posición expuesta. Esto produce tejidos necrosados de color marrón que es indeseable.

⊗ Daños físicos

Las áreas oscuras y las zonas rotas pueden resultar en una superficie susceptible de abrasiones y daños. Las roturas se incrementan con la pérdida de agua de los frutos. El cuidado manual durante la recolección y posterior almacenaje y transporte es indispensable para reducir al máximo estos daños físicos.

⊗ Marchitamiento

Los síntomas son visibles cuando las carambolas pierden alrededor del 5% de su peso por el estrés hídrico.

⊗ Daños por calor

La piel oscura y el ablandamiento de la carne puede ocurrir en carambolas expuestas a tratamientos de calor (sobre como 46°C durante 35 a 55 minutos). Mejores alternativas podrían ser con irradiación. El uso de calor e irradiación se realiza con la finalidad de tratar insectos.



© Daños por patógenos

Muchos daños en la conservación de las carambolas son causados por *Alternaria alternata* (especialmente en frutos helados), *Cladosporium cladosporioides* o *Botryodiplodia theobromae*. Estos daños generalmente ocurren en los frutos durante su almacenamiento y pueden ser minimizados tratando minuciosamente los frutos durante la cosecha, conservación y transporte (Interempresas Media, S.L., 2021).

1.2 Miel

La palabra "miel" significa la sustancia dulce natural producida por las abejas (*Apis mellifera*) a partir del néctar de las plantas. El néctar es una secreción azucarada producida por glándulas especiales llamadas "nectarios" en la base de las flores (Contessi 2005, como se citó en Baglio, 2018).

La miel tiene perfiles de alta densidad energética; debido a los componentes principales (azúcares simples: glucosa y fructosa), es fácil de digerir. Por tanto, la miel proporciona un impulso energético inmediato a los consumidores; por esta razón, dicho producto alimenticio es un componente adecuado, especialmente para deportistas, ancianos y niños en edad escolar.

La miel aporta 300 kcal por 100 g frente a unas 400 kcal de sacarosa o azúcar de mesa. Además, muestra un mayor poder edulcorante si se compara con los azúcares de mesa y la sacarosa. De hecho, si el poder edulcorante de la sacarosa fuera igual a 100%, los poderes de fructosa y glucosa se calcularían como 173% y 74%, respectivamente.

Se ha mostrado actividad antibacteriana en estado puro o disolución de la miel. Esta actividad es atribuida a una sustancia con el nombre genérico de 'inhibina', se debería a la acción de la enzima glucosa oxidasa, que produce peróxido de hidrógeno y ácido glucónico a partir de la glucosa en determinadas condiciones de dilución (White et al. 1963, como se citó en Baglio, 2018).



Según esta investigación, la acumulación de peróxido de hidrógeno le daría a la miel interesantes propiedades antimicrobianas. Este mecanismo sería la base de la actividad antibacteriana explicada por la miel en las heridas.

Algunos autores han demostrado que el consumo de miel favorece el desarrollo de bifidobacterias. (Baglio, 2018)

La miel está constituida en mayor parte por azúcares (Cuadro 3), por lo que su poca humedad hace que los microorganismos no sobrevivan dentro de esta.

Cuadro 3

Composición química de la miel

Componente		Cantidad (%)
Azúcares	Fructosa	83
	Glucosa	
	Maltosa	
	Sacarosa	
Agua		17

(Le Rucher de l'Ours. 2022).

1.3 Secado

Es una operación unitaria cuyo objetivo es eliminar la humedad de los materiales con un efecto mínimo sobre sus características mecánicas, físicas y químicas y bajo costo energético.

El secado de sólidos porosos húmedos es un proceso transitorio muy complejo que implica transporte simultáneo de calor y masa y, a menudo, tanto el cambio de fase en el sólido como las variaciones de dimensión debido a la eliminación de la humedad y al calentamiento.

Actualmente se utilizan diferentes técnicas de secado, incluyen secado por convección, congelación, vacío, lecho fijo, aspersión, rotatorio, neumático, flash, lecho fluidizado, lecho con boquilla, óhmico, bomba de calor, vapor sobrecalentado, ultrasonido, solar, infrarrojo y microondas y combinaciones de los mismos. El consumo de energía y otros costos de procesamiento, la calidad y la vida útil de los productos secos son los principales parámetros para la selección correcta de una técnica de secado y tipo de secador (Delgado y Gilson, 2016).



1.3.1 Fases de secado

La Figura 2, muestra la variación típica del contenido de humedad durante el secado para un caso general cuando un sólido húmedo pierde humedad. Durante el secado de un sólido húmedo en aire caliente, el aire suministra el calor de evaporación sensible y latente necesario a la humedad y también actúa como gas portador para la eliminación del vapor de agua formado en las proximidades de la superficie de evaporación.

La primera parte del proceso, representada por la curva A – B, ocurre por transferencia de masa desde la superficie sólida. Esta es una etapa de calentamiento del (los) sólido (s) durante la cual las condiciones de la superficie sólida se equilibran con el aire de secado. En términos de consumo de energía, el período A – B a menudo representa una proporción insignificante de los requisitos generales del ciclo de secado, pero en algunos casos esto puede ser significativo. Durante este período, el material húmedo puede incluso absorber más humedad en lugar de secarse, dependiendo de las condiciones reales. Finalmente, la superficie alcanza tales condiciones que la humedad se difunde fuera del producto.

El período A – B se rige principalmente por procesos de transferencia de calor transitorios que, en función del valor del número de Biot, pueden controlarse de forma difusa o convectiva.

El proceso B – C muestra una reducción del contenido de humedad que es aproximadamente lineal en el tiempo. Durante esta fase, el área de la superficie saturada disminuye gradualmente. Este es el período de secado durante el cual la tasa de eliminación de agua por unidad de superficie de secado es esencialmente constante.

El punto C, donde termina el período de tasa constante, se conoce como el punto de contenido crítico de humedad.

Durante el período B – C, el movimiento de la humedad dentro del sólido es lo suficientemente rápido como para mantener una condición saturada en la superficie, y la velocidad de secado está controlada por la velocidad a la que se transfiere el calor a la superficie de evaporación.

La superficie del sólido permanece saturada con agua líquida (o humedad) en virtud del hecho de que el movimiento del agua dentro del sólido hacia la superficie tiene



lugar a una velocidad tan grande como la velocidad de evaporación de la superficie. Esta etapa está controlada por los coeficientes de transferencia de calor y / o humedad, el área expuesta al medio de secado y la diferencia de temperatura y humedad relativa entre el aire de secado y la superficie húmeda del sólido.

Una vez que la humedad saturada en la superficie se elimina por completo, sigue la fase C – D durante la cual no hay evaporación en la superficie, sino un proceso de difusión de la humedad dentro del sólido seguido de una transferencia de masa convectiva en la superficie sólida. Desde el punto C en adelante, la temperatura de la superficie comienza a subir y continúa haciéndolo a medida que avanza el secado, acercándose a la temperatura de bulbo seco del aire a medida que el material se acerca a la sequedad.

Por lo tanto, cuando el contenido de humedad inicial está por encima del contenido de humedad crítico, todo el proceso de secado se produce en condiciones de velocidad constante. Si está por debajo del contenido crítico de humedad, todo el proceso de secado ocurre en el período decreciente (Dincer y Zamfirescu, 2015).

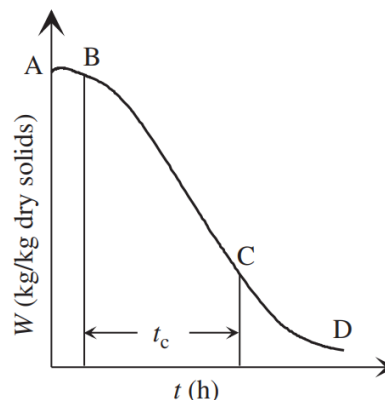


Figura 2

Los períodos de secado de un sólido.

Nota. La curva es para material húmedo secado a temperatura y humedad relativa constantes. **Adaptado de** “*Drying Phenomena: Theory and Applications.*” Por Dincer y Zamfirescu, 2015.

1.3.2 Clasificación de los sistemas de secado

- © El agente de secado general es el aire; sin embargo, a menudo se utiliza vapor. Algunas tecnologías utilizan vapor supercrítico o dióxido de carbono como agente de secado.



- ⊙ En los secadores directos, la transferencia de calor entre la superficie del material húmedo y el agente de secado se logra por contacto directo. Esta transferencia de calor induce la evaporación superficial en convección forzada o natural.
- ⊙ En los secadores indirectos, hay una pared colocada entre un fluido caloportador (o medio de calentamiento) y el material húmedo. Por lo tanto, el material húmedo está en contacto con una superficie caliente (tibia) de donde recibe calor.

La Figura 3, muestra los criterios de clasificación de los sistemas de secado. En esta figura, la clasificación con respecto al modo de transferencia de calor muestra una categoría más, además de la transferencia de calor directa e indirecta a través del campo electromagnético. Esto puede involucrar dos subcategorías: rayos infrarrojos y campo eléctrico a través del material húmedo. (Dincer y Zamfirescu, 2015)



Figura 3

Criterios de clasificación de equipos y sistemas de secado

Nota. Adaptado de "Drying Phenomena: Theory and Applications." Por Dincer y Zamfirescu, 2015.



Para los secadores de calor radiante por infrarrojos, la operación de secado depende de la generación, transmisión y absorción de los rayos infrarrojos. Los secadores de calor dieléctrico funcionan según el principio de generación de calor dentro del sólido colocando este último en un campo eléctrico de alta frecuencia.

La Figura 4, muestra una clasificación de los secadores de contacto directo. Debido a una transferencia de calor por contacto directo, las temperaturas obtenidas pueden ser muy altas (hasta $\sim 726.85^{\circ}\text{C}$ en general); esto puede resultar beneficioso en algunas aplicaciones específicas.

En general, se prefiere que el nivel de temperatura en los secadores directos esté por encima del punto de ebullición en las condiciones operativas para evitar una reducción de la velocidad de secado debido a gradientes de presión parcial desfavorables.

Para mover los productos:

- ⊙ Los secadores de bandeja continua: Utilizan cintas metálicas o bandejas vibratorias que utilizan gases calientes o turbo secadores verticales.
- ⊙ En los secadores de láminas continuas: Una hoja continua de material pasa a través de la secadora como festones o como una hoja tensa estirada sobre un marco de clavija.
- ⊙ En los secadores de transporte neumático: El secado a menudo se realiza junto con el esmerilado. El material se transporta en gases de alta temperatura y alta velocidad a un colector ciclónico.
- ⊙ En los secadores rotativos: El material se transporta y se ducha dentro de un cilindro rotatorio a través del cual fluyen los gases calientes.
- ⊙ La alimentación en los secadores por aspersion: Debe poder atomizarse mediante un disco centrífugo o una boquilla.
- ⊙ Los secadores de circulación: Tienen el material húmedo retenido en una pantalla de transporte continuo y se sopla aire caliente a través de ella. Si las partículas son demasiado pequeñas, los sistemas de secado directo pueden requerir separadores de partículas muy voluminosos, lo que puede ser un inconveniente y puede aumentar los costos.



- ⊙ En los secadores de túnel continuo: El material en camiones se mueve a través de un túnel en contacto con gases calientes.
 - ⊙ En los secadores de lecho fluido: Los sólidos se fluidizan en un tanque estacionario que también puede tener serpentines de calor indirecto.
- (Dincer y Zamfirescu, 2015)

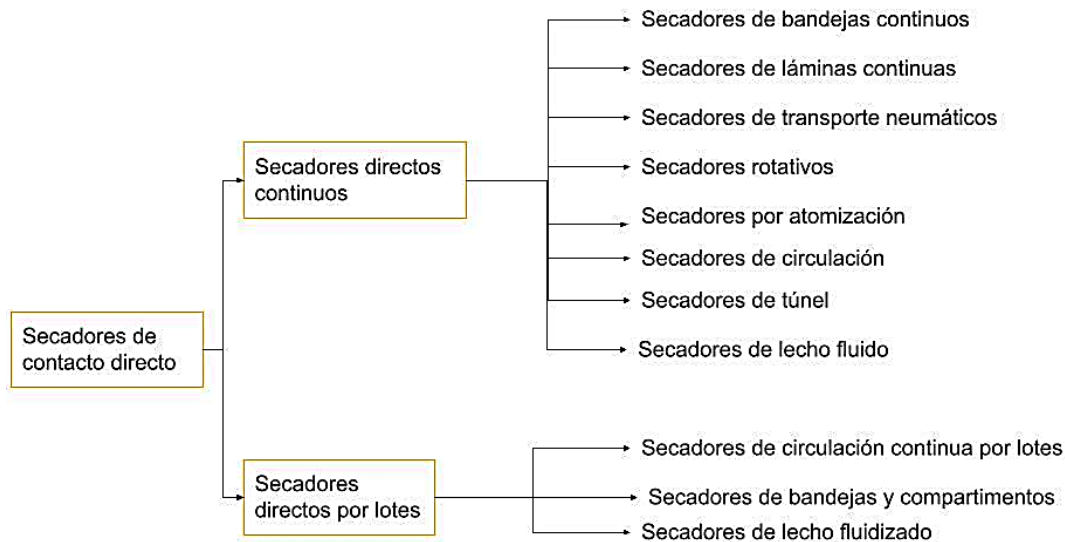


Figura 4

Clasificación de secadores de contacto directo

Nota. Adaptado de “*Drying Phenomena: Theory and Applications.*” Por Dincer y Zamfirescu, 2015.

- ⊙ Los secadores directos por lotes están diseñados para funcionar con un tamaño definido de lote de alimentación húmeda durante ciclos de tiempo determinados. En estos secadores, las condiciones de contenido de humedad y temperatura cambian continuamente en cualquier punto del secador.
- ⊙ En los secadores de circulación por lotes, el material húmedo se mantiene en bandejas con fondo de malla a través de las cuales se sopla aire caliente.
- ⊙ En los secadores de bandejas y compartimentos, el material se apoya en bandejas que pueden estar o no en camiones extraíbles, y se sopla aire (o agente de secado) a través del material en las bandejas.
- ⊙ Para los secadores de lecho fluidizado, las partículas sólidas con tamaños de hasta 5 mm se fluidizan con gas en un carro estacionario que tiene un filtro montado encima (Dincer y Zamfirescu, 2015).



La figura 5, muestra la clasificación de los secadores de contacto indirecto. En los secadores de tipo indirecto, el calor para el secado se transmite al sólido húmedo a través de un muro de contención. Por este motivo, la temperatura máxima de proceso en los secadores indirectos es menor con unos 273°C que en los directos. Sin embargo, con los secadores indirectos, se puede obtener un mejor control de las condiciones de funcionamiento.

Además, el secado indirecto es probablemente la mejor opción cuando los materiales sensibles deben manipularse utilizando disolventes de gas inerte o disolventes de condensación que deben reciclarse. El líquido vaporizado se elimina independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de secado depende del contacto del material húmedo con superficies calientes. También se denominan secadores de conducción o de contacto.

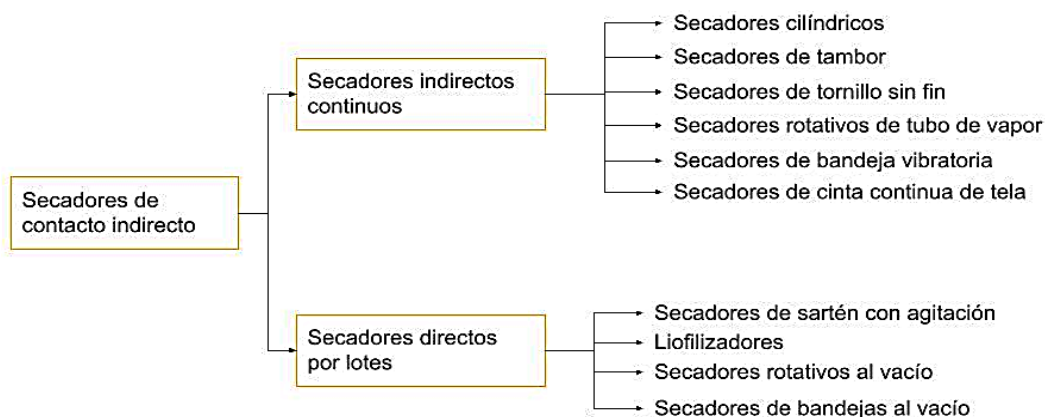


Figura 5

Clasificación de secadores de contacto indirecto

Nota. Adaptado de “*Drying Phenomena: Theory and Applications.*” Por Dincer y Zamfirescu, 2015.

En el tipo continuo, el secado se logra haciendo que el material pase a través del secador de manera continua y esté en contacto con una superficie caliente. Los secadores de cilindro se utilizan para secar hojas continuas como papel, celofán y artículos textiles en piezas. Estas hojas se enrollan en cilindros que generalmente se calientan con vapor y giran.

© Los secadores de tambor: Tienen tambores giratorios que se calientan con vapor o agua caliente.



- ⊙ Los secadores de tornillo sinfín: Funcionan continuamente al vacío para facilitar el secado y la recuperación del disolvente.
- ⊙ Los secadores rotativos de tubo de vapor también funcionan con una ligera presión negativa para permitir la recuperación del disolvente con secado si se desea; También se puede utilizar agua caliente en lugar de vapor.
- ⊙ En los secadores de bandeja vibratoria, el calentamiento se realiza mediante vapor o agua caliente.
- ⊙ Los secadores indirectos por lotes funcionan al vacío y se pueden clasificar en tipos agitados y no agitados.
- ⊙ Los secadores de sartén con agitación funcionan de forma atmosférica o al vacío y pueden manejar una pequeña producción de casi cualquier forma de material húmedo, es decir, sólidos, líquidos, lechadas, pastas o sólidos granulares.
- ⊙ Los liofilizadores utilizan material húmedo congelado. El material húmedo se congela antes de secarlo. A continuación, el secado en estado congelado se realiza a muy alto vacío.
- ⊙ En los secadores rotativos al vacío, el material húmedo se agita en una carcasa horizontal estacionaria. Es posible que el vacío no siempre sea necesario. Además del calentamiento de la carcasa, el agitador se puede calentar con vapor.
- ⊙ Los secadores de bandejas al vacío utilizan un sistema de calentamiento que se realiza por contacto con estantes calentados con vapor o agua caliente sobre los que se encuentra el material húmedo. No hay agitación involucrada.

(Dincer y Zamfirescu, 2015)

1.4 Secado en campos electromagnéticos

Las ondas electromagnéticas transportan energía a medida que viajan a través del espacio vacío. La tasa de transporte de energía está asociada tanto con la variación espacial del campo eléctrico “E” como con las amplitudes del campo magnético “B”, siendo perpendicular a los campos eléctrico y magnético y en la dirección de propagación de la onda.

Se puede crear una onda electromagnética al acelerar las cargas; las cargas en movimiento de un lado a otro producirán campos eléctricos y magnéticos oscilantes,



que viajan a la velocidad de la luz. Entonces, la onda electromagnética es una onda transversal y su energía se almacena en los campos eléctrico y magnético (Figura 6).

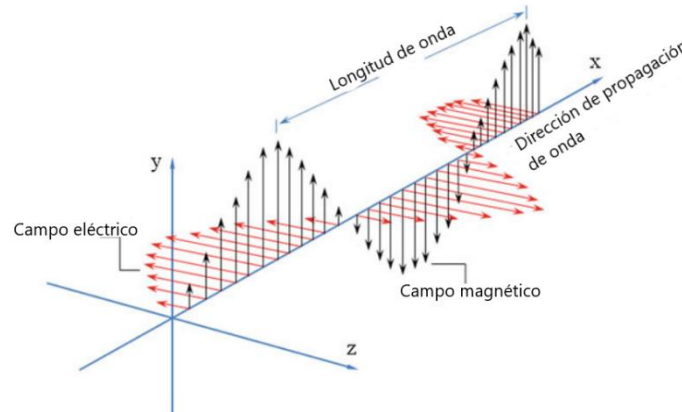


Figura 6

Una onda electromagnética y los campos eléctricos y magnéticos oscilantes.
 Nota. **Adaptado de** “Drying Process in Electromagnetic Fields. *Drying and Energy Technologies.*” Por Delgado y Gilson, 2016.

Los diferentes tipos de ondas electromagnéticas, como la luz y las microondas, forman el espectro electromagnético. En la Figura 7, se muestra un diagrama del espectro electromagnético.

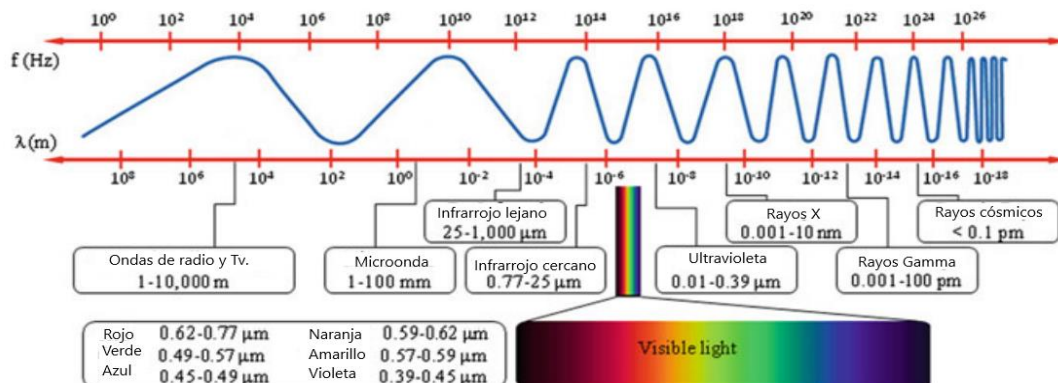


Figura 7

El espectro de radiación electromagnética

Nota. **Adaptado de** “Drying Process in Electromagnetic Fields. *Drying and Energy Technologies.*” Por Delgado y Gilson, 2016.

1.4.1 Secado por microondas

Las microondas son ondas electromagnéticas no ionizantes cuya frecuencia varía de 300 MHz a 300 GHz. Esto hace que las longitudes de onda de microondas varíen



de 1 mm a 1 m. En general, los electrodomésticos de microondas funcionan a una frecuencia de 2.45 GHz, mientras que los sistemas de microondas industriales funcionan a frecuencias de 915 MHz y 2.45 GHz (Datta, A.K., 2000; Chandrasekaran, S. et al, 2013, como se citó en Delgado y Gilson, 2016).

Los materiales interactúan con los campos electromagnéticos de diferentes formas. Por lo tanto, se pueden clasificar en cuatro clases:

- ⊙ Conductores (metales)
- ⊙ Aislantes (cerámica y aire)
- ⊙ Magnéticos. compuestos (ferritas).
- ⊙ Dieléctricos (frutas, verduras, granos, madera y muchos otros materiales porosos húmedos)
(Delgado y Gilson, 2016)

Además, según las características de absorción de microondas, los materiales se pueden clasificar en tres categorías:

- ⊙ Absorbentes o materiales de alta pérdida dieléctrica que son fuertes absorbentes de microondas.
- ⊙ Materiales transparentes o de baja pérdida dieléctrica donde la energía de microondas pasa a través del material con poca atenuación.
- ⊙ Opacos o conductores que reflejan las microondas.
(Delgado y Gilson, 2016)

Por lo tanto, es necesario el conocimiento de las propiedades dieléctricas para diferenciar el comportamiento de los materiales bajo la acción de las microondas.

El material dieléctrico, tiene cargas tanto libres como ligadas que son aceleradas por campos eléctricos. Las cargas libres pueden moverse traslacionalmente y las cargas ligadas pueden moverse rotacionalmente y vibracionalmente (Schmidt, P.S. et al, 1992, como se citó en Delgado y Gilson, 2016)

Las microondas son formas de energía que se convierten en calor a través de su interacción con los materiales. No son absorbidos por el material debido a su polarización electrónica o atómica.

Hay muchos mecanismos para esta conversión de energía. Los principales son:



conducción iónica y rotación dipolar. El último está relacionado con las moléculas dipolares. Muchas moléculas, como el agua, son de naturaleza dipolar, es decir, poseen un centro de carga asimétrico. Otras moléculas pueden convertirse en "dipolos inducidos" debido a las tensiones causadas por el campo eléctrico.

- ⊙ Rotación dipolar: cuando un campo eléctrico oscilante incide sobre las moléculas de agua, las moléculas dipolares permanentemente polarizadas intentan realinearse en la dirección del campo eléctrico. Debido a la alta frecuencia del campo eléctrico, esta realineación ocurre un millón de veces por segundo y causa la fricción interna de las moléculas que resulta en el calentamiento volumétrico del material. Así, la energía de microondas se convierte en energía cinética, lo que hace que las moléculas de agua vibren fuertemente provocando fricción y calentamiento interno.
- ⊙ Conducción iónica: el calentamiento por microondas también puede ocurrir debido a la migración oscilatoria de iones en los materiales que genera calor en presencia de un campo eléctrico oscilante de alta frecuencia.

La polarización dipolo es significativa en frecuencias por encima de 1 GHz, mientras que las pérdidas iónicas son predominantes en frecuencias por debajo de 1 GHz. Además, el agua en los materiales se puede encontrar en estado libre y unido. Bajo la acción de un campo eléctrico, las moléculas polares de agua en estado libre se orientan más libremente que las del agua ligada.

El calentamiento de materiales mediante microondas y dieléctrico es volumétrico (la energía se transmite uniformemente a la mayor parte del material poroso húmedo), por lo que es más homogéneo en comparación con los muchos métodos de calentamiento tradicionales, como la conducción y la convección, por ejemplo (Figura 8). Sin embargo, producen una distribución de temperatura no uniforme dentro del material, por lo tanto; algunas regiones del material se calientan rápidamente, mientras que otras regiones se calientan con menos intensidad. Este es uno de los principales problemas asociados con el calentamiento por microondas. El calentamiento ocurre casi instantáneamente, generalmente algunos segundos o minutos. (Delgado y Gilson, 2016).

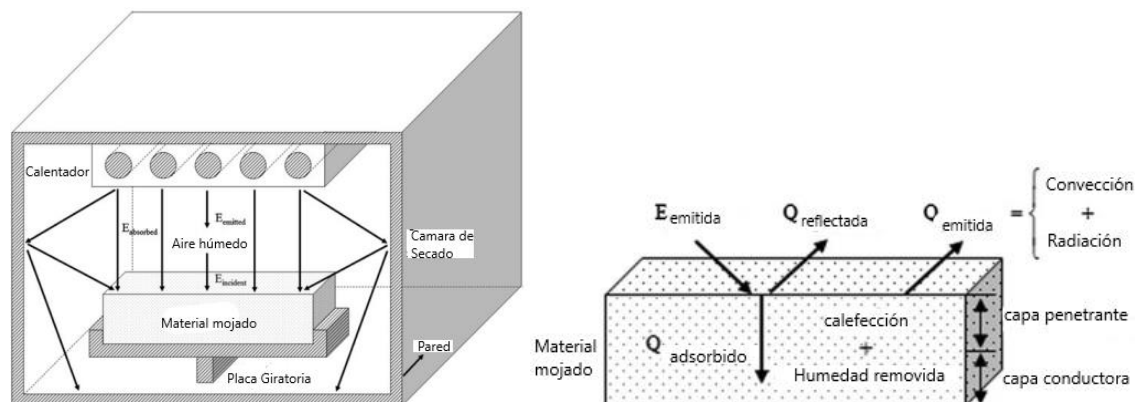


Figura 8

Esquema de la acción de las ondas electromagnéticas en un medio húmedo.

Nota. Adaptado de “Drying Process in Electromagnetic Fields. Drying and Energy Technologies.” Por Delgado y Gilson, 2016.

El calentamiento mediante microondas presenta muchas ventajas, tales como, se aumenta la velocidad del proceso, se puede producir un calentamiento uniforme en todo el material, la eficiencia de la conversión de energía, un mejor y más rápido control del proceso, tiempos de arranque y apagado más rápidos, los requisitos de espacio en el piso generalmente menos, puede producirse un calentamiento selectivo, la calidad del producto puede mejorar y pueden producirse efectos químicos y físicos deseables.

La energía de microondas actúa selectivamente sobre las moléculas de agua que están unidas débilmente al sustrato sólido, lo que hace que se evapore rápidamente sin un aumento de temperatura. Como solo se calienta el agua, no se pierde energía al calentar la atmósfera que rodea el material durante el proceso de secado. (González A., 2000, como se citó en Delgado y Gilson, 2016)

1.4.2 Secado al sol

Las ondas electromagnéticas emitidas por el sol muestran una amplia gama de longitudes de onda. Según la capacidad de los átomos ionizantes en la materia absorbente de radiación, la radiación solar se puede clasificar en radiación ionizante (rayos X y rayos gamma) y radiación no ionizante (radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja).



Afortunadamente, la radiación ionizante altamente dañina no penetra en la atmósfera terrestre, por lo que la radiación solar está compuesta únicamente por radiación no ionizante.

El sol emite casi toda su energía en un intervalo de longitudes de onda de aproximadamente 0.1 a 3 μm . La mayor parte de esta energía se encuentra en la región de luz visible (Delgado y Gilson, 2016).

La Figura 9, ilustra el espectro solar en términos de intensidad energética.

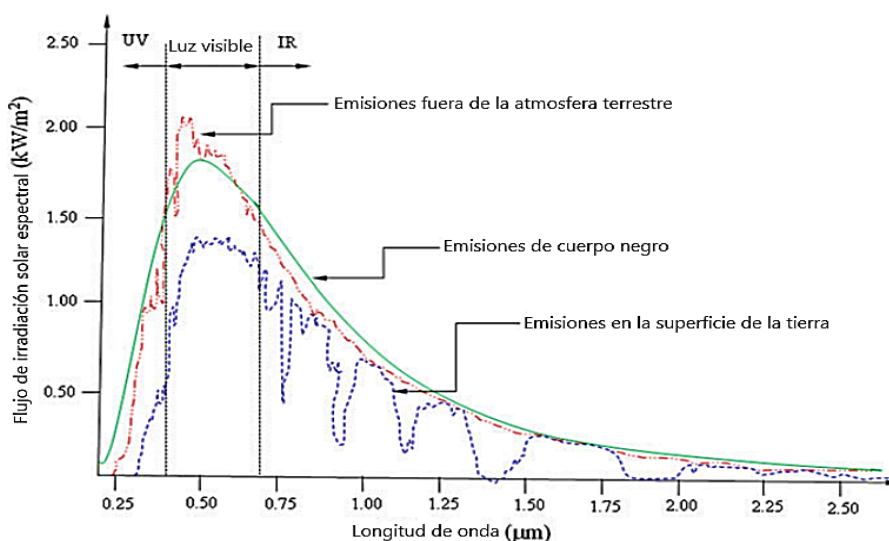


Figura 9

La irradiación solar espectral (radiación térmica)

Nota. Adaptado de “Drying Process in Electromagnetic Fields. *Drying and Energy Technologies.*” Por Delgado y Gilson, 2016.

La radiación solar se agota y atenúa parcialmente a medida que atraviesa las capas de la atmósfera debido a la absorción, la dispersión y la reflexión, que ocurre en la estratosfera en su capa delgada de ozono, y en la troposfera, debido a las formaciones de nubes y las condiciones climáticas. (Delgado y Gilson, 2016)

El secado al sol al aire libre (convección natural o secado solar convencional) se ha utilizado durante siglos para secar textiles, arcilla y plantas, productos marinos, agrícolas y alimenticios y otros materiales que contienen humedad y similares.

Durante el secado al sol, la energía se transfiere por convección del aire circundante y por radiación directa y difusa del sol a la superficie del sólido. Una parte de esta energía se propaga al interior del producto (absorción directa) provocando aumento



de la temperatura y cambio de fase del agua líquida en vapor, y el resto se utiliza para evaporar el agua líquida en la superficie del sólido, la cual se mueve por el aire, por convección natural, y se pierde al ambiente por convección y radiación (Delgado y Gilson, 2016).

Las ventajas del secado solar es una fuente de energía abundante, gratuita, no contaminante, renovable y que no puede ser monopolizada. Además, el uso de sol y secado solar puede reducir considerablemente el uso de combustibles fósiles. A pesar de estas ventajas, la radiación solar diaria presenta un carácter periódico, es decir, la radiación incidente varía con el tiempo y depende del clima; un problema que puede minimizarse almacenando o convirtiendo parte de la energía obtenida durante los periodos de radiación utilizando dispositivos eléctricos (por ejemplo, células fotovoltaicas).

Durante el secado al sol, debido a la naturaleza higroscópica de los productos agrícolas, se pueden secar o volver a humedecer dependiendo de la temperatura y la humedad relativa del aire ambiental. La rehumectación se produce por condensación de agua o por difusión de vapor provocada por fuerzas osmóticas o capilares. El secado no uniforme e insuficiente también conduce a una vida útil reducida del cultivo (Delgado y Gilson, 2016).

1.4.2.1 Sistemas de secadores solares

Existen muchos tipos de sistemas de secado solar que, en general, utilizan el efecto invernadero en recintos. Los gabinetes simples están contruidos con ventanas de vidrio inclinadas expuestas a la radiación solar. La Figura 10, muestra una vista en sección de un secador de armario. Los productos se colocan en una bandeja perforada.

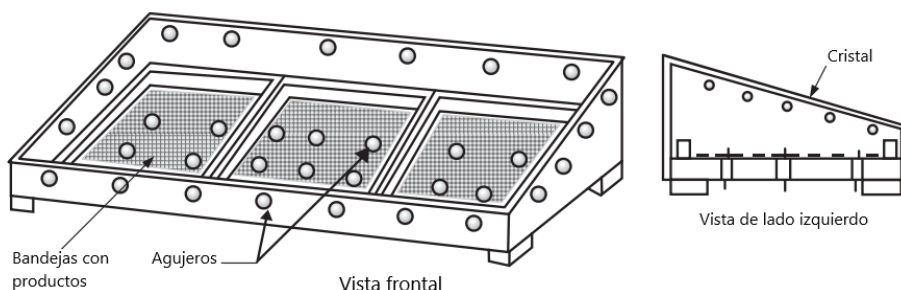


Figura 10

Secador solar de gabinete

Nota. **Adaptado de** “Drying Phenomena: Theory and Applications.” Por Dincer y Zamfirescu, 2015.

El gabinete tiene varios orificios para permitir la ventilación natural y refrescar el aire (que transporta la humedad del producto). El aire se ventila de forma natural a través de los productos y la transferencia de calor se realiza por convección natural. Un diseño alternativo al secador de armario solar es el secador solar de escalera. La Figura 11, muestra el diseño de un secador solar de escalera. En este sistema, el aire fluye a través de bandejas sucesivas con producto húmedo donde se produce el secado. Se utiliza un vaso de un material de policarbonato transparente para atrapar tanto como sea posible la radiación solar. La parte trasera está aislada térmicamente para evitar pérdidas de calor (Dincer y Zamfirescu, 2015).

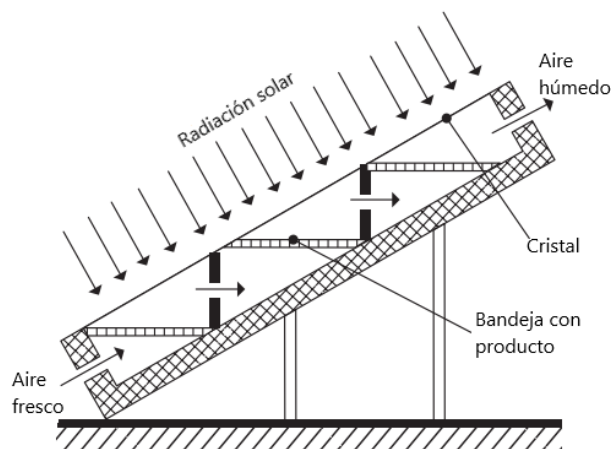


Figura 11

Secador solar tipo escalera

Nota. **Adaptado de** “Drying Phenomena: Theory and Applications.” Por Dincer y Zamfirescu, 2015.

La Figura 12, muestra un secador de chimenea solar que es una versión de diseño del secador de túnel solar. La chimenea tiene la función de mejorar el proceso de



convección natural. El colector solar de gran escala colocado horizontalmente calienta el aire que luego fluye sobre los productos colocados en bandejas y luego fluye hacia arriba a través de la chimenea.

Una versión a menor escala del secador de chimenea solar es el secador de paso solar con calentador de aire separado, que es un diseño típico, como se muestra en La Figura 13, corresponde a un sistema que utiliza convección natural.

El material está dispuesto en bandejas perforadas que permiten el paso del aire o la permeación. El aire se calienta en un colector solar inclinado. Después de pasar por el lecho permeable o las bandejas de producto (cualquiera que se use), el aire húmedo sale de la cámara de secado, ya que es aspirado naturalmente hacia la chimenea. Dado que el flujo es impulsado por convección natural, la caída de presión en el sistema debe ser relativamente pequeña. Por lo tanto, el lecho debe ser suficientemente delgado y su permeabilidad debe ser alta o la carga de producto debe ser baja. Para camas de producto más gruesas, se deben agregar ventiladores o sopladores al sistema para crear una convección forzada.

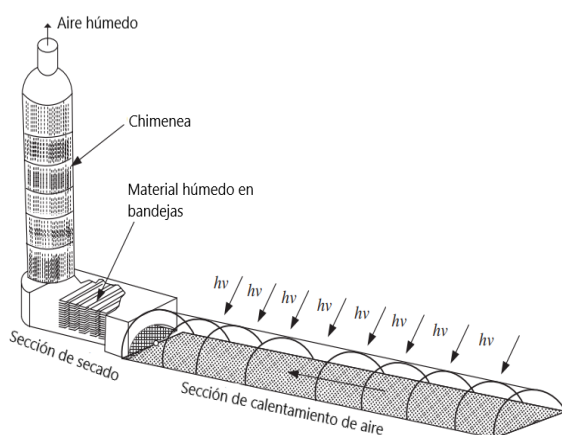


Figura 12
Secador solar de chimenea

Nota. Adaptado de "Drying Phenomena: Theory and Applications." Por Dincer y Zamfirescu, 2015.

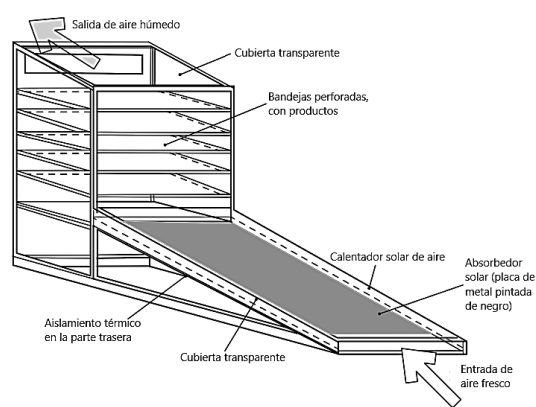


Figura 13
Secador solar con calentamiento de aire separado



2 Metodología Experimental

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo General

Evaluar el secado de carambola adicionada con miel, en un horno de microondas y un secador solar, experimentalmente y mediante la simulación de la transferencia de calor por el método de elementos finitos y la evaluación sensorial de las características del producto para predecir los tiempos y condiciones de proceso adecuados que permitan obtener un producto agradable al consumidor.

2.1.2 Objetivo particular 1

Comparar la transferencia de calor durante el secado de carambola mediante elaboración de curvas de temperatura experimentales y perfiles de temperatura por simulación por el método de elementos finitos utilizando COMSOL.

- ⊙ VI: Humedad (<10%)
- ⊙ VD: Tiempo, Temperatura
- ⊙ VR: Curvas de temperatura, Perfiles de temperatura

2.1.3 Objetivo particular 2

Estudiar el efecto de la adición de miel después de secar en dos tipos de secadores (solar y en horno de microondas) mediante un análisis sensorial aunado a una colorimetría (L^*a^*b) para elegir el proceso en el que se tenga un producto con mayor aceptación.

- ⊙ VI: Tipo de secadores
- ⊙ VD: Características sensoriales
- ⊙ VR: Aceptabilidad (olor, color, sabor y textura)

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Actividades preliminares

1. Se construyó un secador solar con calentamiento de aire separado (Figura 14), con dos charolas para colocar el alimento.

Materiales:

- | | | |
|------------------|-----------------------------------|------------------------|
| ⊙ Madera triplay | ⊙ Clavos Tornillo | ⊙ Tela mosquitera |
| ⊙ Clavo | ⊙ Tiras de madera
(2cm grosor) | ⊙ Plástico polietileno |

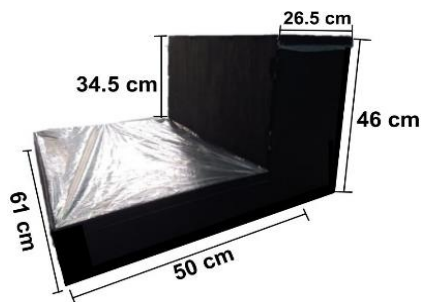


Figura 14

Construcción del secador solar

2. Se seleccionó el grosor de la rodaja de carambola, la cual fue de 5 mm. (Figura 15). Autores como German, C. M. D.(2017) , Castillo-Zamudio, R. I.(2018), Ramírez, D. A. L. (2012), en el secado de carambola y frutas en general han estudiado el secado de alimentos con grosor de 5 mm, por lo que se optó por utilizar este grosor.
3. Se realizaron experimentaciones preliminares en el secado de la carambola por horno de microondas, para establecer la potencia del horno con la que se secan las rodajas de carambola.

La primera muestra se colocó en el centro del plato de vidrio a una potencia de 1000 W, la segunda prueba se utilizó una potencia de 400 W, ambas potencias crearon quemaduras en el centro de la muestra (Figura 16) a los 40-45 segundos, por lo que se descartaron estas potencias.

La tercera prueba se utilizó una potencia de 200 W y se colocó un vaso con agua (300 mL aproximadamente), como se menciona en el trabajo de Teixeira et al. 2017, en el secado de tejido de plantas con microondas, esto para aumentar la humedad y evitar que se quemaran las muestras, con estas condiciones se presentó una ligera quemadura a los 3 minutos, se muestra la rodaja a los 33 minutos de secado (Figura 17).

La cuarta prueba se utilizó la potencia de 100 W junto con el vaso de agua, el secado de la muestra con estas condiciones fue aceptable.



Figura 15
Rodajas de carambola



Figura 16
Carambola a los 45 segundos de secado



Figura 17
Carambola seca con 200W

2.2.2 Determinación de temperatura

Las lecturas de temperatura para las muestras de carambola durante el proceso de secado se realizaron con un termómetro infrarrojo de la marca sovarcate, modelo HS960D.

2.2.3 Determinación de humedad

La humedad del producto durante el proceso se calculó a través del peso de la muestra registrado en una balanza electrónica portátil Pocket Scale de 200g de capacidad y precisión 0.01 g.

2.2.4 Color

Se evaluaron los cambios de color en el espacio L, a, b, empleando la aplicación ColorLab, utilizando un teléfono celular ZTE modelo Blade V Smart-2050 para la captura de imágenes.

La luminosidad L, con valor de 100, para un blanco perfecto, mientras que el valor mínimo, igual a cero, se utiliza para el negro.

El eje “a” positivo representa la cantidad de rojo violáceo, mientras que el eje “a” negativo representa la cantidad de verde. El eje “b” positivo representa la cantidad de amarillo y el eje “b” negativo representa la cantidad de azul. La máxima magnitud posible de los valores en estos ejes es función de la luminancia, entre ± 100 y ± 200 para “a” y “b”, respectivamente.

La ecuación 1 muestra la diferencia de color CIELAB es la distancia en el diagrama CIELAB entre el color de referencia y el color medido, dada por:

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

Donde:

$$\Delta L^* = L_f - L_i$$



$$\Delta a^* = a_f - a_i$$

$$\Delta b^* = b_f - b_i$$

El subíndice f representan a las muestras después del secado y el subíndice i a las muestras frescas. (Malacara, 2011).

2.2.5 Encogimiento

Para determinar el encogimiento se consideró despreciable la reducción en el espesor; se determinó el área inicial (A1) y final (A2), después de secar para todas las condiciones de proceso, dibujando la silueta de las rebanadas de carambola sobre un papel milimétrico y se usó la siguiente ecuación para obtener el porcentaje de encogimiento (%E) en cada caso (Ortiz y Ochoa, 2018).

$$\%E = [(A1-A2)/A1] *100 \quad (2)$$

2.2.6 Evaluación sensorial

Se eligió un panel no entrenado, de personas mayores de 18 años, a las cuales se les entregó un formulario (Figura 18).

Instrucciones

Se le presentan cuatro muestras de carambola seca, por favor observe y pruebe cada una de ellas en el orden del 1-4 e indique el grado en que le gusta o disgusta cada atributo de las muestras, de acuerdo al puntaje del 1 al 5. ¡Gracias! ☺

Puntaje	Categoría
1	Me disgusta mucho
2	No me gusto
3	Indiferente
4	Me gusto
5	Me encanto

Numero de muestras	Atributos			
	Olor	Color	Sabor	Textura
1				
2				
3				
4				

Figura 18

Formulario para el análisis sensorial

2.2.7 Coeficiente de Difusión.

El coeficiente de difusión (De), se consideró que el mecanismo de transferencia de masa era de naturaleza difusional, la resistencia externa a la transferencia de masa era despreciable en comparación con la resistencia interna, el cálculo mediante la



segunda Ley de Fick para tiempos largos y placa en una sola dimensión (espesor) sin considerar el encogimiento. Estévez (2021), mostro que aun cuando la longitud característica de difusión cambia de tamaño durante el secado se puede usar una solución analítica y considerar una difusividad promedio para reproducir aceptablemente la evolución de la humedad. Se calculó el coeficiente de difusión con la ecuación 3.

$$MR = \frac{X-X_e}{X_o-X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-Df\pi^2 t}{4L^2}\right) \quad (3)$$

Donde MR es la razón de humedad removida, X es el contenido de humedad (base seca) en el tiempo t, Xe es el contenido de humedad de equilibrio (base seca), Xo es la humedad inicial (base seca), t es el tiempo de secado en horas, L es el semiespesor de la lámina (m) y Df es el coeficiente de difusión (m^2s^{-1}). (Hernández et al. 2011)

2.2.8 Propiedades termofísicas de la carambola

Todas las propiedades termofísicas del producto están calculadas por medio de correlaciones empíricas propuestas por CHOI y OKOS (1986).

© Conductividad Térmica (K_T)

$$k_{agua} = 0.57109 + 0.0017625.7376 \times 10^{-6} T^2 \quad (4)$$

$$k_{proteinas} = 0.17881 + 0.0011958T - 2.7178 \times 10^{-6} T^2 \quad (5)$$

$$k_{lipidos} = 0.1807 - 0.0027604T - 1.7749 \times 10^{-7} T^2 \quad (6)$$

$$k_{carbohidratos} = 0.2014 + 0.0013874T - 4.3312 \times 10^{-6} T^2 \quad (7)$$

$$k_{fibra} = 0.18331 + 0.0012497T - 3.16831 \times 10^{-6} T^2 \quad (8)$$

$$k_{cenizas} = 0.3296 + 0.001401T - 2.90691 \times 10^{-6} T^2 \quad (9)$$

$$K_{alimento} = \sum k_i * x_i^w \left(\frac{W}{mK}\right) \quad (10)$$

Dónde: Ki es la conductividad térmica de los componentes individuales y x_i^w es la fracción masa del componente del alimento.

© Calor específico (Cp)

$$C_p \text{ agua} = 4176.2 - 9.0862 \times 10^{-5} T + 5473.1 \times 10^{-6} T^2 \quad (11)$$

$$C_p \text{ proteína} = 2008.2 + 1208.9 \times 10^{-3} T - 1312.9 \times 10^{-6} T^2 \quad (12)$$

$$C_p \text{ lípidos} = 1984.2 + 1473.3 \times 10^{-3} T - 4800.8 \times 10^{-6} T^2 \quad (13)$$

$$C_p \text{ Carbohidratos} = 1548.8 + 1962.5 \times 10^{-3} T - 5939.9 \times 10^{-7} T^2 \quad (14)$$



$$C_p \text{ fibra} = 1845.9 + 1930.6 \times 10^{-3}T - 4650.9 \times 10^{-6}T^2 \quad (15)$$

$$C_p \text{ cenizas} = 1092.6 + 1889.6 \times 10^{-3}T - 3681.7 \times 10^{-6}T^2 \quad (16)$$

$$C_{p\text{alimento}} = \sum C_{pi} * x_i^w \left(\frac{J}{Kg K} \right) \quad (17)$$

Dónde: C_{pi} es la sumatoria del calor específico de la composición de los alimentos y x_i^w es la fracción masa del componente del alimento

© Densidad (ρ)

$$\rho \text{ agua} = 997.18 + 0.0031439T - 0.0037574T^2 \quad (18)$$

$$\rho \text{ proteína} = 1329.9 - 0.5184T \quad (19)$$

$$\rho \text{ lípidos} = 925.59 - 0.41757T \quad (20)$$

$$\rho \text{ Carbohidratos} = 1599.1 - 0.31046T \quad (21)$$

$$\rho \text{ fibra} = 1311.5 - 0.36589T \quad (22)$$

$$\rho \text{ cenizas} = 2423.8 - 0.28063T \quad (23)$$

$$\rho_{\text{alimento}} = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i^w}{\rho_i} \right)} \left(\frac{Kg}{m^3} \right) \quad (24)$$

Dónde: ρ es la sumatoria de la densidad de la composición de los alimentos y x_i^w es la fracción masa del componente del alimento.

2.2.9 Propiedad dieléctrica

Se utilizó la ecuación general propuesta por Sipahioglu y Barringer, (2003):

$$\epsilon' = 38.75 + 0.1255T + 0.4546H - 14.54C - 0.0037HT + 0.07327CT \quad (25)$$

$$\epsilon'' = 17.72 - 0.4519T + 0.001382T^2 - 0.07448H + 22.93C - 13.44C^2 + 0.002206 * HT + 0.1505CT \quad (26)$$

$$\epsilon = \epsilon' - \epsilon''j \quad (27)$$

Dónde: T es la temperatura del alimento, C representa a las cenizas y H es la humedad del alimento.

Los resultados del cálculo de las propiedades termofísicas tanto la propiedad dieléctrica es utilizada para la simulación del secado de carambola usando COMSOL.



2.2.10 Preparación de la muestra

La carambola se adquirió en la central de abastos de Tultitlan, Estado de México. La miel se adquirió con vendedores locales del municipio de Chontla, en el estado de Veracruz.

Se cortó la carambola en rodajas de 5 mm de espesor, posteriormente se les retiraron las semillas, a la mitad de las muestras se le colocó un recubrimiento con miel de abeja por ambos lados (Figura 19), esto se realizó para ambos métodos de secado.



Figura 19

Preparación de las muestras de carambolo

2.2.11 Secado por microondas

Se utilizó un horno de microondas de la marca Daewoo, modelo KOR-1N0AW. En la Cuadro 4 se muestran las especificaciones que del fabricante.

ALIMENTACIÓN		120V~ 60Hz EN FASE SENCILLA CON CONEXIÓN A TIERRA
MICROONDAS	CONSUMO DE POTENCIA	1500 W
	POTENCIA DE SALIDA	1000 W
	FRECUENCIA	2 450MHz
DIMENSIONES EXTERNAS APROX. (An.X Al.XFond.)		515 x 304 x 375 cm (20,3 x 12,0 x 14,8 pulgadas) aprox.
DIMENSIONES DE LA CAVIDAD APROX. (An.X Al.XFond.)		356 X 238 X 358 cm (14,0x 9,4 x 14,1 pulgadas) aprox.
CAPACIDAD		1,1 pies cúbicos (31,14 dm ³) aprox.
PESO NETO		12,4 kg (27,4 lbs)
CRONOMETRO		59 min. 99 seg
NIVELES DE POTENCIA		10 niveles

Cuadro 4

Especificaciones del microondas KOR-1N0AW

Nota. Adaptado de "Especificaciones de Daewoo", 2012.

Este horno de microondas cuenta con la opción de elegir el nivel de potencia, se cuenta con 10 niveles, la Cuadro 5, muestra la indicación en la pantalla y su respectivo nivel y porcentaje de potencia.



Pulsar Botón POTENCIA	Nivel de corriente (pantalla)	Porcentaje aproximado de Corriente
Una vez	P-HI	100%
Dos veces	P-90	90%
Tres veces	P-80	80%
Cuatro veces	P-70	70%
Cinco veces	P-60	60%
Seis veces	P-50	50%
Siete veces	P-40	40%
Ocho veces	P-30	30%
Nueve veces	P-20	20%
Diez veces	P-10	10%
Once veces	P-00	0%

Cuadro 5

Niveles de potencia del microondas KOR-1N0AW

Nota. Adaptado de “Tabla de potencia de Daewoo”, 2012.

Se colocó un vaso con agua en el centro del plato de vidrio, se colocaron las muestras alrededor del plato (Figura 20), utilizando una potencia de 100W y en ciclos de 10 minutos, en cada ciclo se cambió el agua para evitar que tuviera contacto con las muestras al llegar a ebullición.



Figura 20

Acomodo de la muestra en el microondas

De igual manera en cada ciclo se midió la temperatura superficial de la carambola en su centro y se reportó el peso de la muestra.

2.2.12 Secado solar

Se utilizó un secador con calentamiento de aire separado, con dos charolas para las muestras con capacidad aproximada de medio kilo de carambola, esto para carambolas de 6 cm de diámetro y 9 cm de longitud aproximadamente. El secador contó con una entrada de aire en la parte inferior y una salida de aire húmedo en la parte superior (Figura 21).

Se colocaron las muestras con y sin miel en las charolas de 24 x 56cm (Figura 22).

Cada hora se midió la temperatura en el centro de las muestras y su peso, durante 3 días, al término de cada día se guardaron en bolsas de plástico con cierre Zip para evitar que las muestras absorbieran humedad del medio.

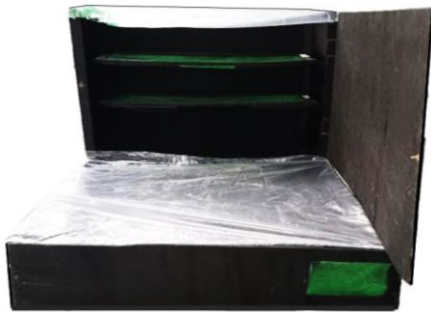


Figura 21
Secador solar



Figura 22
Charolas con rodajas de carambola

2.2.13 Método de elementos finitos usando Comsol multiphysics

Secado por horno de microondas

1. Asistente de modelo → 3D
2. Seleccionar la opción de “transferencia de calor” → “calentamiento electromagnético” → “calentamiento por microondas”
3. Agregar: Estudio → Estudios personalizados → Estudios preestablecidos para algunas interfaces físicas → Dominio de frecuencia → “Hecho”
En el constructor de modelo
4. Dar clic derecho en “Estudio 1” → Seleccionar pasos de estudio → Temporal → Temporal, Darle doble clic.
5. En la pestaña “Paso 1: Dominio de la frecuencia” seleccionar solo el recuadro de Ondas electromagnéticas
6. En la pestaña “Paso 2: temporal” seleccionar solo el recuadro de transferencia de calor en sólidos
“Definiciones globales” → “Parámetros”, hacer clic
7. En la tabla que se encuentra en ajustes, colocar:

» Nombre	Expresión	Valor	Descripción
woo	267 [mm]	0.267 m	ancho del microondas
do	270[mm]	0.27 m	profundidad del micro.
ho	188[mm]	0.188 m	altura
wg	50[mm]	0.05 m	ancho del magnetron
dg	78[mm]	0.078 m	profundidad magnetron
hg	18[mm]	0.018 m	altura del magnetron
hp	6[mm]	0.006 m	altura del plato
rp	113.5[mm]	0.1135 m	radio del plato
bp	15[mm]	0.015 m	base del plato
t0	19 [degC]	292.15 K	Tinicial
full_geom...	1	1	simetria

Figura 23
Construcción del horno de microondas



8. Dar clic en Componente 1
9. Dar clic derecho en “Geometría 1” → “Bloque”
10. En la ventana de ajustes colocar las especificaciones de la figura:

Cuadro 6

Características para el horno de microondas

Etiqueta:	microondas
Tipo de objeto:	Solido
Tamaño y forma:	
Ancho:	woo
Profundidad:	do
Altura:	ho
Posición:	
Base:	esquina
X:	0
Y:	-0.5*do
Z:	0
Eje	
Tipo de eje:	Eje z
Angulo de rotación:	
Rotación:	0
Sistema de coordenadas:	
Plano de trabajo:	Plano-xy

11. Dar clic derecho en “Geometría” y seleccionar “Bloque”

Darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 7

Características para el magnetrón

Etiqueta:	magnetron
Tipo de objeto:	Solido
Tamaño y forma:	
Ancho:	Wg
Profundidad:	Dg
Altura:	hg
Posición:	
Base:	esquina
X:	-wg
Y:	-0.5*dg
Z:	ho-hg
Eje	



Eje	
Tipo de eje:	Eje z
Angulo de rotación:	
Rotación:	0
Sistema de coordenadas:	
Plano de trabajo:	Plano-xy

12. Dar clic derecho en “Geometría” y seleccionar un “Cilindro”

Darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 8

Características para el plato de vidrio

Etiqueta:	plato
Tipo de objeto:	Solido
Tamaño y forma:	
Radio:	rp
Altura:	hp
Posición:	
X:	0.5*woo
Y:	0
Z:	bp
Eje	
Tipo de eje:	Eje z
Angulo de rotación:	
Rotación:	0
Sistema de coordenadas:	
Plano de trabajo:	Plano-xy

13. En la barra superior dar clic en “home”, dar clic en componente y seleccionar un componente en 2D

14. En la parte de constructor de modelo “Componente 2”, seleccionar “Geometría 2” y dar clic derecho, seleccionar un “Polígono”

Darle al polígono las siguientes especificaciones:

Cuadro 9

Características para el polígono 1

Etiqueta:	Polígono 1
Tipo de objeto:	
Tipo:	Solido
Coordenadas:	
Origen de datos:	Tabla
X (cm)	Y (cm)
10	-5



X (cm)	Y (cm)
15	-10
14	-2
20	2
14	2
12	8
8	2
2	2
7	-3
5	-10

15. En “componente 1” dar clic derecho en “Geometría 1” y seleccionar “Plano de trabajo”, darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 10

Características para el plano de trabajo 1

Etiqueta:	Plano de trabajo 1
Definición de plano	
Tipo de plano:	Rápido
Plano.	Plano xy
Tipo de desplazamiento:	Distancia
Coordenada z:	bp+hp
Unir objeto	√
Tolerancia de reparo:	Automático
Selecciones de entidades resultantes:	
Contribuir a:	Ninguno

16. Dar clic derecho en “Plano de trabajo” y seleccionar “Extruir”, darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 11

Características para extruir 1

Etiqueta:	Extruir 1
General	
Extruir de:	Plano de trabajo
Plano de trabajo:	Plano de trabajo 1 (wp1)
Objetos de entrada:	
Activo [off]	Wp1
Manejo de objetos de entrada:	Unir con
Distancias	
Especificar:	Distancias desde el plano
Distancias (cm)	0.5 [cm]
Incluir caras de entrada	√
Conservar las caras de sección transversal	√



17. Dar clic en “Geometría 1” seleccionar “Booleanos y particiones” y dar clic en “unión”, darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 12

Características para unión 1

Etiqueta:	Unión 1
unión	
Objetos de entrada:	
Activo [on]	Blk1
	Blk2
	Cyl1
	Ext1
Mantener contornos internos	√
Tolerancia de reparto:	Automático
Selecciones de entidades resultantes	
Contribuir a:	Ninguno

18. Dar clic en “Geometría 1” seleccionar un “Bloque”, darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 13

Características para bloque 3

Etiqueta:	Bloque 3
Tipo de objeto	
Tipo:	Sólido
Tamaño y forma	
Ancho:	40
Profundidad :	40
Altura:	40
Posición:	
Base:	Esquina
X:	-10
Y:	0
Z:	0
Eje	
Tipo de eje:	Eje z
Angulo de rotación	
Rotación:	0
Sistema de coordenadas	
Plano de trabajo	Plano-xy

19. Dar clic en “Geometría 1” seleccionar “Booleanos y particiones” y dar clic en “Intersección”, darle las siguientes especificaciones:



Cuadro 14

Características para intersección 1

Etiqueta:	Intersección 1
Intersección	
Objetos de entrada:	
Activo [off]	uni1
	Blk3
Mantener contornos internos	√
Tolerancia de reparto:	Automático
Selecciones de entidades resultantes	
Contribuir a:	Ninguno

20. Dar clic en “Geometría 1” seleccionar “Programación” y dar clic en “If+ End If”, darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 15

Características para full_geometry

Etiqueta:	full_geometry
If	
Condición:	full_geometry

21. Dar clic derecho en “Definiciones” (dentro del componente 1), dar clic en selecciones y seleccionar “Explicito”, darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 16

Características la carambola

Etiqueta:	Carambola
Entidades de entrada	
Nivel de entidad geométrica:	Dominio
Activo [on]	5
	8
Entidades de salida	
Dominios seleccionados	

22. Dar clic derecho en “Definiciones” (dentro del componente 1), dar clic en selecciones y seleccionar “Explicito”, darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 17

Características para el plato

Etiqueta:	Plato
Entidades de entrada	
Nivel de entidad geométrica:	Dominio
Activo [on]	6
	7
Entidades de salida	



Entidades de salida
Dominios seleccionados

23. Dar clic derecho en “Definiciones” (dentro del componente 1), dar clic en selecciones y seleccionar “Explicito”, darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 18

Características para el aire

Etiqueta:	aire
Entidades de entrada	
Nivel de entidad geométrica:	Dominio
Activo [on]	1
	2
	3
	4
Entidades de salida	
Dominios seleccionados	

24. Dar clic derecho en “Definiciones” (dentro del componente 1), dar clic en selecciones y seleccionar “Explicito”, darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 19

Características para el puerto

Etiqueta:	puerto
Entidades de entrada	
Nivel de entidad geométrica:	Contorno
Activo [on]	1
	5
Entidades de salida	
Contornos seleccionados	

25. Dar clic derecho en “Definiciones” (dentro del componente 1), dar clic en selecciones y seleccionar “Explicito”, darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 20

Características para la pared metálica

Etiqueta:	Pared metálica
Entidades de entrada	
Nivel de entidad geométrica:	Contorno
Activo [on]	2
	3
	4
	7
	8
	9



Entidades de salida
Contornos seleccionados

26. Dar clic derecho en “Definiciones” (dentro del componente 1), dar clic en selecciones y seleccionar “Explicito”, darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 21

Características para la simetría

Etiqueta:	Simetría
Entidades de entrada	
Nivel de entidad geométrica:	Contorno
Activo [on]	6
	16
	23
	29
	30
Entidades de salida	
Contornos seleccionados	

27. Dar clic en “Geometría 1” seleccionar “Transformadas” y dar clic en “Espejo”, darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 22

Características para la geometría 1

Etiqueta:	Geometría 1
Unidades	
Escalar valores al cambiar unidades	√
Unidad de longitud:	cm
Unidad angular:	Grados
Representación de geometría:	Núcleo CAD
Tolerancia de reparo por defecto:	Automático
Reconstrucción automática	√

28. Dar clic derecho en “Materiales” (en el componente 1), agregar un “Material en blanco”, darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 23

Características para la carambola como material

Etiqueta:	carambola
Selección de entidades geométricas	
Nivel de entidad geométrica:	Dominio
Selección:	carambola
Activo [on]	5
	8
Contenido de material	



Contenido de material					
Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propied	
<input checked="" type="checkbox"/> Permitividad relativa	epsilo...	65-20*j	1	Básico	
<input checked="" type="checkbox"/> Permeabilidad relativa	mur_i...	1	1	Básico	
<input checked="" type="checkbox"/> Conductividad eléctrica	sigma...	0	S/m	Básico	
<input checked="" type="checkbox"/> Conductividad térmica	k_iso ;...	.57	W/(m...	Básico	
<input checked="" type="checkbox"/> Densidad	rho	1034.13	kg/m ³	Básico	
<input checked="" type="checkbox"/> Capacidad térmica a presión c...	Cp	3910.093	J/(kg·K)	Básico	

29. Dar clic derecho en “Materiales” (en el componente 1), agregar un “Material en blanco”, darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 24

Características para el plato como material

Etiqueta:	Plato			
Selección de entidades geométricas				
Nivel de entidad geométrica:	Dominio			
Selección:	Plato			
Activo [on]	6			
	7			
Contenido de material				
Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propied
<input checked="" type="checkbox"/> Permitividad relativa	epsilo...	2.55	1	Básico
<input checked="" type="checkbox"/> Permeabilidad relativa	mur_i...	1	1	Básico
<input checked="" type="checkbox"/> Conductividad eléctrica	sigma...	0	S/m	Básico
Conductividad térmica	k_iso ;...	.20	W/(m...	Básico
Densidad	rho	1000	kg/m ³	Básico
Capacidad térmica a presión c...	Cp	1000	J/(kg·K)	Básico

30. Dar clic derecho en “Materiales” (en el componente 1), “Agregar un material de la biblioteca”, buscar “air”, seleccionarla y darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 25

Características para el aire como material

Etiqueta:	Air
Selección de entidades geométricas	
Nivel de entidad geométrica:	Dominio
Selección:	aire
Activo [on]	1
	2
	3
	4
Contenido de material	



Contenido de material					
»	Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propied
<input checked="" type="checkbox"/>	Permeabilidad relativa	mur_i...	1	1	Básico
<input checked="" type="checkbox"/>	Permitividad relativa	epsilo...	1	1	Básico
<input checked="" type="checkbox"/>	Conductividad eléctrica	sigma...	0[S/m]	S/m	Básico
	Viscosidad dinámica	mu	eta(T[1/...	Pa·s	Básico
	Coefficiente de dilatación adia...	gamma	1.4	1	Básico
	Capacidad térmica a presión c...	Cp	Cp(T[1/...	J/(kg·K)	Básico
	Densidad	rho	rho(pA[...	kg/m ³	Básico
	Conductividad térmica	k_iso ;...	k(T[1/K]...	W/(m...	Básico
	Velocidad del sonido	c	cs(T[1/K...	m/s	Básico
	Índice de refracción aparente,...	n_iso ;...	1	1	Índice de refracció
	Índice de refracción, parte im...	ki_iso...	0	1	Índice de refracció

31. Dar clic derecho en “Materiales” (en el componente 1), “Agregar un material de la biblioteca”, buscar “cooper”, seleccionarla y darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 26

Características para el cobre como material

Etiqueta:	Copper				
Selección de entidades geométricas					
Nivel de entidad geométrica:	Contorno				
Selección:	paredmetalica				
Activo [on]	2				
	3				
	4				
	7				
	8				
	9				
Contenido de material					
»	Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de prop
<input checked="" type="checkbox"/>	Permeabilidad relativa	mur_i...	1	1	Básico
<input checked="" type="checkbox"/>	Conductividad eléctrica	sigma...	5.998e7[...	S/m	Básico
<input checked="" type="checkbox"/>	Permitividad relativa	epsilo...	1	1	Básico
	Coefficiente de expansión tér...	alpha_...	17e-6[1/...	1/K	Básico
	Capacidad térmica a presión c...	Cp	385[J/(k...	J/(kg·K)	Básico
	Densidad	rho	8960[kg...	kg/m ³	Básico
	Conductividad térmica	k_iso ;...	400[W/(...	W/(m...	Básico
	Módulo de Young	E	110e9[Pa]	Pa	Módulo de You
	Coefficiente de Poisson	nu	0.35	1	Módulo de You
	Resistividad de referencia	rho0	1.72e-8[...	Ω·m	Resistividad lin
	Resistividad, coeficiente de te...	alpha	0.0039[1...	1/K	Resistividad lin



32. Dar clic en “Ondas electromagnéticas, dominio de la frecuencia”, seleccionar “Ecuación de onda eléctrica 1” y darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 27

Características para la ecuación de onda eléctrica 1

Etiqueta:	Ecuación de onda eléctrica 1
Selección de dominio	
Selección:	Todos los dominios
Activo [on]	1
	2
	3
	4
	5
	6
Entrada del modelo	
Temperatura:	T Temperatura (emh1)
Presión absoluta:	
PA Definido por el usuario	1 [atm]
Selección de sistema de coordenadas	
Sistema de coordenadas:	
Sistema de coordenadas global	

33. Dar clic derecho en “Ondas electromagnéticas, dominio de la frecuencia”, seleccionar “condición de contorno impedancia” y darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 28

Características para la pared metálica

Selección de contorno	
Selección:	Pared metálica
Activo [on]	2
	3
	4
	7
	8
	9
Entrada del modelo	
Temperatura:	T Temperatura (emh1)
Presión absoluta:	
PA Definido por el usuario	1 [atm]

34. Dar clic derecho en “Ondas electromagnéticas, dominio de la frecuencia”, seleccionar “puerto” y darle las siguientes especificaciones:



Cuadro 29

Características para el medio puerto

Etiqueta:	Medio puerto
Selección de contorno	
Selección:	puerto
Activo [on]	1
	5
Puerto, propiedades	
Nombre del puerto:	2
Tipo de puerto:	Definido por el usuario
Excitación de onda en este puerto:	On
Puerto, potencia de entrada:	
P_{in}	500 [W]
Puerto, configuración de modo	
Cantidad de entrada:	Campo eléctrico
Campo del modo eléctrico:	
E_0	0
	0
	$\text{Cos}(\pi*y/dg)$
Constante de propagación:	
β	$2*\pi/c_const*\text{sqrt}(\text{freq}^2-c_const^2/(4*dg^2))$
Modo de fase:	
Θ_{in}	0
De-embedding port	
Port offset:	
d_{offset}	0

35. Dar clic derecho en “Ondas electromagnéticas, dominio de la frecuencia”, seleccionar “conductor magnético perfecto” y darle las siguientes especificaciones:

Cuadro 30

Características para el conductor magnético perfecto 1

Etiqueta:	Conductor magnético perfecto 1
Selección de contorno	
Selección:	Simetría
Activo [on]	6
	16
	23
	29
	30

36. Dar clic en “Malla”, en la parte de ajustes se seleccionará “construir todo”



37. Dar clic derecho en “Estudio 1”, se seleccionará “Barrido paramétrico” y se le dará las siguientes especificaciones:

Cuadro 31

Características para el barrido paramétrico

Etiqueta:		Barrido paramétrico
Configuración del estudio		
Tipo de barrido:		Combinaciones especificadas
Nombre de parámetro	Lista de valores de parámetros	Unidad de los parámetros
full_geometry(sin	1	
Salida al resolver		
Sondas:		
Default solver sequence generation:		Using global parameters
Ajustes de memoria para trabajo		
Mantener solución en la memoria:		Todos

38. Dar clic en “Estudio 1”, en la parte de ajustes se seleccionará “Calcular”

Secado en secador solar

1. Asistente de modelo → 2D
 2. Seleccionar la opción de “transferencia de calor” → “Transferencia de calor en sólidos (ht)” → Agregar
 3. Estudio → Temporal → Hecho
- En el constructor de modelo
4. Dar clic derecho en “Geometría 1 (comp1)” → Polígono 1 (pol1)

Dar las siguientes especificaciones:

Cuadro 32

Características para construir la carambola

Etiqueta:		Polígono 1
Tipo de objeto		
Tipo:		Sólido
Coordenadas		
Origen de datos:		Tabla
X(cm)		Y(cm)
20		5
30		10
40		5
34		15
46		20
30		20
26		28



X(cm)	Y(cm)
22	20
10	20
22	15

Dar clic en “Construir todos los objetos”

5. Dar clic derecho en “Geometría 1 (comp1)” → Rectángulo 1 (r1)

Dar las siguientes especificaciones:

Cuadro 33

Características para construir la caja de secado

Etiqueta:	Rectángulo 1
Tipo de objeto	
Tipo:	Sólido
Tamaño y Forma	
Ancho:	61
Altura:	34.5
Posición	
Base:	Esquina
X:	0
Y;	0
Ángulo de rotación	
Rotación:	0
Capas	
Selecciones de entidades resultantes	
Contribuir a:	Ninguno

Dar clic en “Construir todos los objetos”

6. En Componente 1 (comp1) → Materiales → Dar clic derecho → “Agregar un material de la biblioteca” → Buscar “Air” → Tendrá y da las siguientes especificaciones:

Cuadro 34

Características para el aire

Etiqueta:	Air
Selección de entidades geométricas	
Nivel de entidad geométrico:	Dominio
Selección:	Manual
Activo (on)	1
Anular	
Propiedades de material	
Contenido de material	



Contenido de material					
»	Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propiedad
	Viscosidad dinámica	mu	eta(T[1/K]...	Pa·s	Básico
	Coefficiente de dilatación adiabát...	gamma	1.4	1	Básico
	Conductividad eléctrica	sigma_...	0[S/m]	S/m	Básico
	Capacidad térmica a presión con...	Cp	Cp(T[1/K]...	J/(kg·K)	Básico
	Densidad	rho	rho(pA[1...	kg/m ³	Básico
	Conductividad térmica	k_iso ;...	k(T[1/K]...	W/(m·K)	Básico
	Velocidad del sonido	c	cs(T[1/K]...	m/s	Básico

7. En Componente 1 (comp1) → Materiales → Dar clic derecho → “material en blanco” → Dar las siguientes especificaciones:

Cuadro 35

Características para construir la carambola como material

Etiqueta:	carambola				
Selección de entidades geométricas					
Nivel de entidad geométrica:	Dominio				
Selección:	Manual				
Activo [on]	2				
Contenido de material					
»	Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propiedad
<input checked="" type="checkbox"/>	Densidad	rho	1034.13	kg/m ³	Básico
<input checked="" type="checkbox"/>	Capacidad térmica a presión con...	Cp	3910.093	J/(kg·K)	Básico
<input checked="" type="checkbox"/>	Conductividad térmica	k_iso ;...	0.57	W/(m·K)	Básico

8. En “Transferencia de calor en sólidos (ht)” → Sólido 1 → Dar las siguientes especificaciones:

Cuadro 36

Características para construir el sólido 1

Etiqueta:	Sólido 1
Selección de dominio	
Selección:	Todos los dominios
Activo [on]	1 (no es aplicable)
	2
Entrada del modelo	
Temperatura:	Temperatura (ht)
Presión absoluta:	
P_A	Definido por el usuario 1(atm)



Selección de sistema de coordenadas	
Sistema de coordenadas:	Sistema de coordenadas globales
Conducción de calor, sólido	
Conductividad térmica:	
K	Del material
Termodinámica, solido	
Densidad:	
ρ	Del material
Capacidad térmica a presión constante:	
C_p	Del material

9. En “Transferencia de calor en sólidos (ht)” → Variables iniciales 1 → Dar las siguientes especificaciones:

Cuadro 37

Características para los valores iniciales 1

Etiqueta:	Valores iniciales 1
Selección de dominio	
Selección:	Todos los dominios
Activo [on]	1 (no es aplicable)
	2
Anular y contribución	
Temperatura:	
T	Definido por el usuario
19.3[degC]	

10. En “Transferencia de calor en sólidos (ht)” → Fluido → Dar las siguientes especificaciones:

Cuadro 38

Características para el fluido 1 solar

Etiqueta:	Fluido 1
Selección de dominio	
Selección:	Manual
Activo [on]	1 (no es aplicable)
Entrada del modelo	
Temperatura:	
T	Temperatura (ht)
Presión absoluta:	



Presión absoluta:	
P_A	Definido por el usuario (1atm)
Campo de velocidad:	
U	Definido por el usuario
0	X
0	Y
Selección de sistema de coordenadas	
Sistema de coordenadas:	
Sistema de coordenadas global	
Conducción de calor, fluido	
Conductividad térmica:	
K	Del material
Termodinámica, fluido	
Tipo de fluido:	Gas/Líquido
Densidad:	
ρ	Del material
Capacidad térmica a presión constante:	
C_p	Del material
Coeficiente de dilatación adiabática:	
γ	Del material

11. En "Transferencia de calor en sólidos (ht)" → Temperatura 1 → Dar las siguientes especificaciones:

Cuadro 39

Características para la temperatura 1 solar

Etiqueta:	Temperatura 1
Selección de contorno	
Selección:	Todos los contornos
Activo [on]	1,...,3 (no es aplicable)
	4,..., 13
	14 (no es aplicable)
Temperatura	
Temperatura:	
T_0	Definido por el usuario
22[degC]	



12. En “Transferencia de calor en sólidos (ht)” → Flujo de entrada 1 → Dar las siguientes especificaciones:

Cuadro 40

Características para el flujo de entrada 1

Etiqueta:	Flujo de entrada 1
Selección de contorno	
Selección:	Todos los contornos
Activo [on]	1,...,14 (no es aplicable)
Upstream properties	
Upstream temperature:	
T_{ustr}	Definido por el usuario
44.1[degC]	
Upstream absolute pressure:	
P_{ustr}	Definido por el usuario
1[atm]	

13. En “Malla” → Dar las siguientes especificaciones:

Cuadro 41

Características para la malla 1

Etiqueta:	Malla 1
Ajustes de malla	
Tipo de secuencia:	Malla controlada por la física
Tamaño de elemento:	Normal

Dar clic en construir malla

14. En “Estudio 1” → Paso 1: Temporal → Dar las siguientes especificaciones:

Cuadro 42

Características para temporal

Etiqueta:	Temporal
Configuración del estudio	
Unidad del tiempo:	h
Tiempos:	Range(0,0.2,8)
Tolerancia:	Controlado por la física
Selección de físicas y variables	
<input type="checkbox"/> Modify model configuration for study step	
<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> » <div style="border-bottom: 1px solid gray; padding: 2px;">Interfaz física</div> <div style="border-bottom: 1px solid gray; padding: 2px;">Resuelve para</div> <div style="border-bottom: 1px solid gray; padding: 2px;">Discretización</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="border-bottom: 1px solid gray; padding: 2px;">Transferencia de calor en sólidos</div> <div style="border-bottom: 1px solid gray; padding: 2px;"> <input checked="" type="checkbox"/> </div> <div style="border-bottom: 1px solid gray; padding: 2px;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; display: inline-block;">Ajustes de la física</div> </div> </div> </div>	

15. En la parte de ajustes se seleccionará “Calcular”



3 Análisis de resultados

3.1 Curvas de secado

La pérdida de humedad durante el proceso de secado se muestra en la Figura 24. Durante el proceso de secado en horno microondas, la humedad final de la muestra sin miel fue 32% menor en comparación con las muestras con miel. Estos resultados se pueden atribuir a que la miel formó una capa en la superficie de la carambola impidiendo el transporte de agua del interior de la muestra al medio, los azúcares se ven afectados por procesos de secado rápidos provocando un encapsulamiento del contenido de agua en los cristales (Castrillón et al., 2011), por lo que la pérdida de peso fue menor.

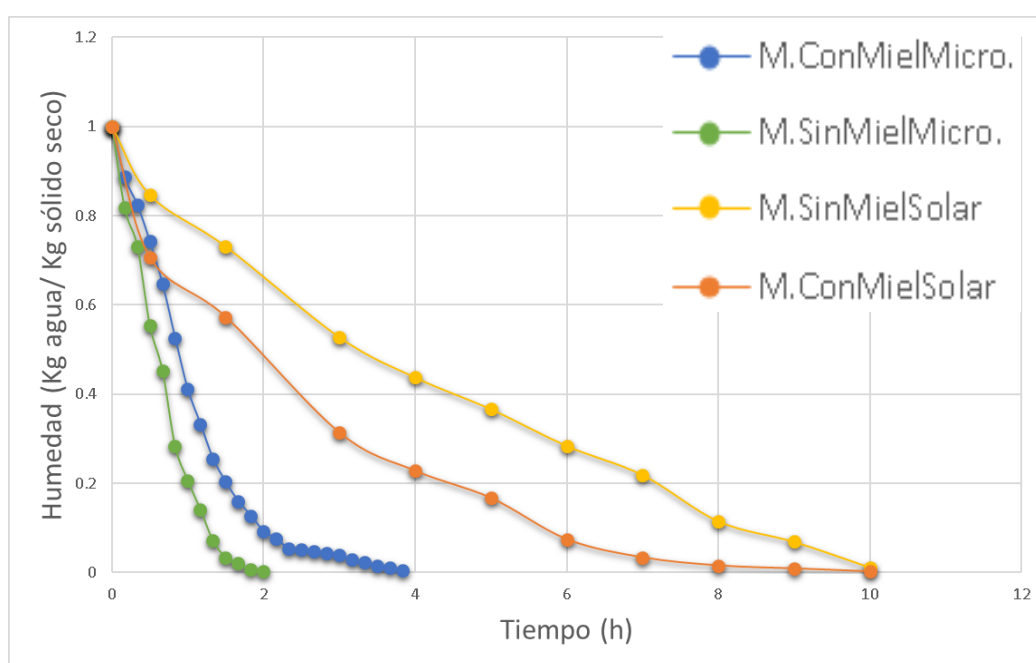


Figura 24

Curva de secado por microondas de muestras de carambola

En el secador solar, las muestras recubiertas con miel perdieron humedad más rápido que las muestras sin miel, esto se puede atribuir a una deshidratación osmótica en las muestras, ya que al colocarles miel empieza la eliminación de agua contenida, al ponerlo en contacto directo con una disolución altamente concentrada, porque el agua que sale del alimento se difunde a través de la solución osmótica (miel) mientras que la molécula de soluto se transporta inicialmente a través de la solución acuosa y luego dentro de la estructura celular vegetal con el fin de establecer el equilibrio (Muñiz, 2019). El tiempo de secado por horno de microondas,



en comparación con el tiempo en un secador solar, se redujo hasta en 8 horas. El análisis estadístico (Cuadro 43), se muestra la agrupación de información utilizando el método de Tukey y $\alpha = 0.05$. Al tener una agrupación de "A" para todos los factores tenemos que no hay diferencias significativas en la humedad de cada proceso por lo que el tipo de secador y recubrimiento no afecta la humedad final en las rodajas de carambola (los complementos de los análisis estadísticos se muestran en anexo 2).

Cuadro 43

Comparaciones en parejas de Tukey para humedad

Factor	N	Media	Agrupación
M.SinMielSolar.	3	0.01965	A
M.ConMielMicro.	3	0.009405	A
M.SinMielMicro.	3	0.00404	A
M.ConMielSolar.	3	0.003241	A

3.2 Curvas de velocidad de secado

La Figura 25 muestra la velocidad de secado en función de la humedad para carambola. Las muestras con y sin recubrimiento de miel secadas en el horno microondas tuvieron valores de velocidad de secado de 1.42 y 1.36 kg agua/h m² respectivamente en el periodo constante, el periodo decreciente empezó a las 0.66 h para las muestras con miel y a las 0.5 h para las muestras sin miel. Las muestras en el secador solar obtuvieron menores velocidades de secado: 0.32 kg agua/h m² para las muestras sin miel y 0.42 para las muestras con miel. Se obtuvo una velocidad constante, entre las 0.5 - 1.5 h de secado y un periodo decreciente después de 1.5 h.

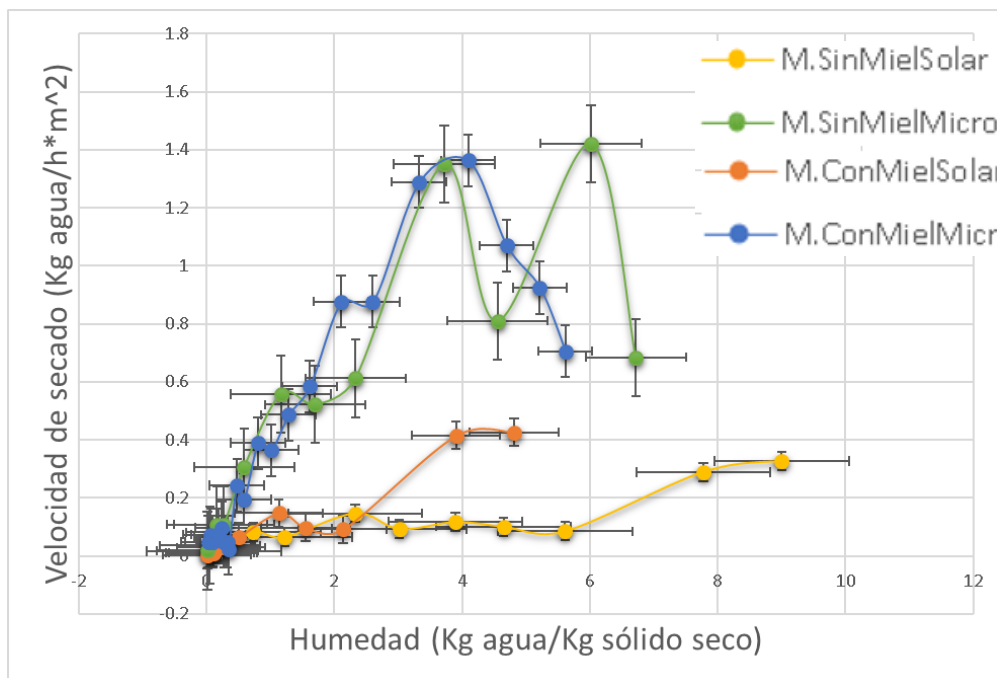


Figura 25

Curvas de velocidad de secado de carambola

El análisis estadístico (Cuadro 44), se muestra la agrupación de información utilizando el método de Tukey y $\alpha = 0.05$. Los factores M.ConMielMicro. y M.SinMielMicro. no comparten la misma agrupación por lo que hay diferencias significativas, mientras que los factores M.ConMielSolar. y M.SinMielSolar. comparten la agrupación "C" por lo que no hay diferencias significativas. El tipo de secador afecta la velocidad y el recubrimiento en el secado en horno de microondas es afectado por el recubrimiento mientras que en el secado solar no presenta diferencias significativas.

Cuadro 44

Comparaciones en parejas de Tukey para velocidad de secado

Factor	N	Media	Agrupación
M.ConMielMicro.	3	2.138	A
M.SinMielMicro.	3	1.467	B
M.ConMielSolar.	3	0.4362	C
M.SinMielSolar.	3	0.3374	C

3.2.1 Coeficiente de Difusión (De)

Las muestras secadas al sol recubiertas con miel y sin miel tuvieron un valor De, respectivamente, $De = 9.84 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y $De = 9.66 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, las muestras secadas en horno de microondas con miel y sin miel tuvieron respectivamente $De = 9.35 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $9.41 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; el orden de magnitud similar al reportado por



Giraldo-Zuniga et al., (2010) para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) de 5 mm de espesor, a 50 °C en un secador convectivo ($1.71 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$). Para el secado solar de frutas y hortalizas entre 42 y 60 °C con espesores de 5 y 7 mm, Hernández et al., (2017) calcularon valores para D_e entre 0.85 a $2.32 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. Las temperaturas en el secador del presente proyecto oscilaron entre 31 y 49 °C. Las diferencias en las condiciones experimentales explican los distintos órdenes de magnitud obtenidos. Las muestras con miel secadas al sol y por horno de microondas obtuvieron humedades finales de 4 y 5% respectivamente, lo cual permite la conservación de frutas secas.

El análisis estadístico (Cuadro 45), muestra la agrupación de información utilizando el método de Tukey y una $\alpha = 0.05$. Para cada agrupación el recubrimiento con miel no afecta al coeficiente de difusión sin embargo el tipo de secador si tiene diferencias significativas.

Cuadro 45

Comparaciones en parejas de Tukey para D_e

Factor	N	Media	Agrupación
M.SinMielMicro.	3	0.000010	A
M.ConMielMicro.	3	0.000009	A
M.ConMielSolar.	3	0.000001	B
M.SinMielSolar.	3	0.000001	B

3.3 Curvas de temperatura

La Figura 26, muestra las temperaturas obtenidas en función de la humedad. En el secado por horno de microondas, las rodajas sin miel obtuvieron valores mayores de temperatura (43.7 °C), con una humedad de 4 kg agua/kg sólido seco, mientras que las muestras con miel a esta humedad alcanzaron 18% menos temperatura en su superficie. Los valores más altos de temperatura para los diferentes tratamientos se obtuvieron a humedades de 1- 6 kg agua/kg sólido seco; esto se atribuye a que para convertir las formas de energía del horno de microondas a calor, el campo dieléctrico oscilante incide en las moléculas de agua y estas al intentar realinearse en la dirección del campo causan una fricción interna de las moléculas provocando el calentamiento interno de la carambola, por lo que a mayor cantidad de agua mayor es la rotación dipolar. (Barbosa et al., 2016).

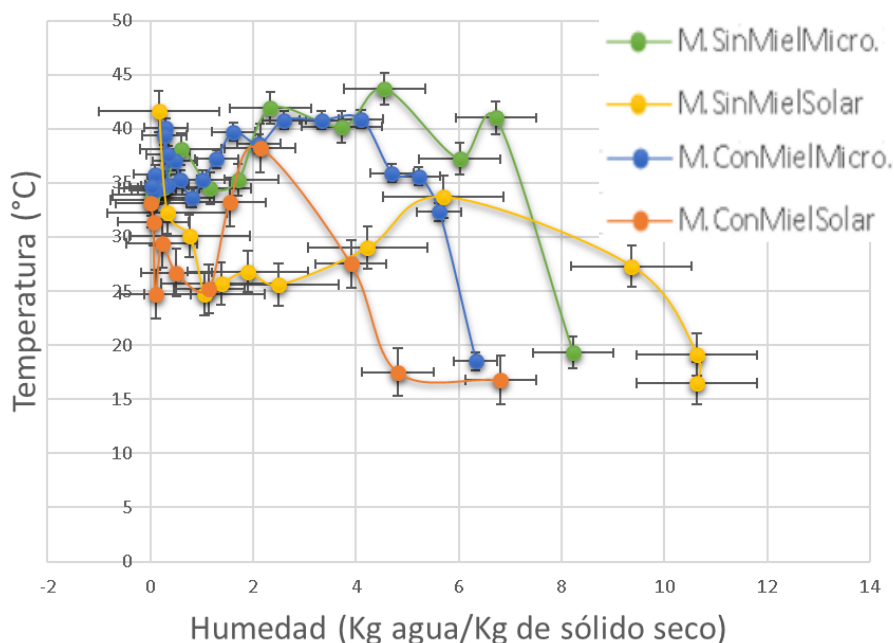


Figura 26

Curvas de temperatura de carambola

Las curvas de temperatura durante el secado solar de carambola, presentan comportamientos diferentes, las muestras con miel alcanzaron temperaturas máximas de 38 °C, mientras que las muestras sin miel tuvieron valores de 41.6 °C; estos cambios de temperatura se pueden deber a que se rotaban las charolas en cada lectura de temperatura y peso, ya que la parte superior del secador era transparente por lo que las muestras en la posición de arriba se secaban más rápido, por otra parte, la temperatura del medio no permaneció constante durante todo el tiempo de experimentación. Las curvas de temperatura de secado en el horno de microondas como en el secador solar, indicó que las muestras en horno de microondas obtuvieron valores de temperatura más altos, ya que, al tener un alto contenido de humedad en la carambola (el agua en los materiales se puede encontrar en estado libre y unido), bajo la acción de un campo eléctrico, las moléculas polares de agua en estado libre se orientan más libremente que las del agua ligada, provocando el calentamiento (Barbosa et al., 2016); en el secado solar se obtuvieron temperaturas menores al inicio del proceso, sin embargo, estuvieron en un intervalo de 25 - 35 °C para la mayoría de las lecturas, esto también dependió de las condiciones climáticas ya que en la entrada de aire del secador solar se registraron valores de 31 y 42 °C como máximo, mientras que en la salida del aire



fueron de 36 y 49 °C como valor máximo; al no ser procesos en sistemas cerrados, estos tuvieron cambios entre cada lectura.

El análisis estadístico (Cuadro 46), se muestra la agrupación de información utilizando el método de Tukey y $\alpha= 0.05$. Los factores M.SinMielSolar. y M.ConMielMicro. comparten la agrupación “C” por lo que no hay diferencias significativas en la media de temperaturas respecto a los factores M.ConMielSolar. y M.SinMielMicro. presentan diferencias significativas entre sí como a los de la agrupación “C”.

Cuadro 46

Comparaciones en parejas de Tukey para temperatura

Factor	N	Media	Agrupación		
M.ConMielSolar.	3	45.767	A		
M.SinMielMicro.	3	43.8333		B	
M.SinMielSolar.	3	41.633			C
M.ConMielMicro.	3	41.000			C

3.4 simulación de Perfiles de Temperatura (COMSOL)

Secado por horno de microondas.

En la figura 27 se muestran las gráficas por simulación como experimentales de carambola con y sin recubrimiento de miel, la recta en el Punto de Corte 8 corresponde a un punto evaluado en el centro de la carambola; el Punto de Corte 2 corresponde a un punto evaluado en una punta de la carambola (Figura 29), esto muestra que el alimento va obteniendo calor desde el centro hacia la superficie de la muestra, como se muestra en los perfiles de temperatura obtenidas por simulación del secado por horno de microondas (Figura 28); las gráficas experimentales son similares a los Puntos de Corte obtenidos en las orillas de la muestra, lo que muestra que la simulación es cercana a la experimentación. Los datos experimentales de temperatura se evaluaron solo en la superficie de la carambola y las muestras se sacaban del horno de microondas cada 10 min para su evaluación, por lo que es probable tener una disminución de temperatura en cada ciclo.

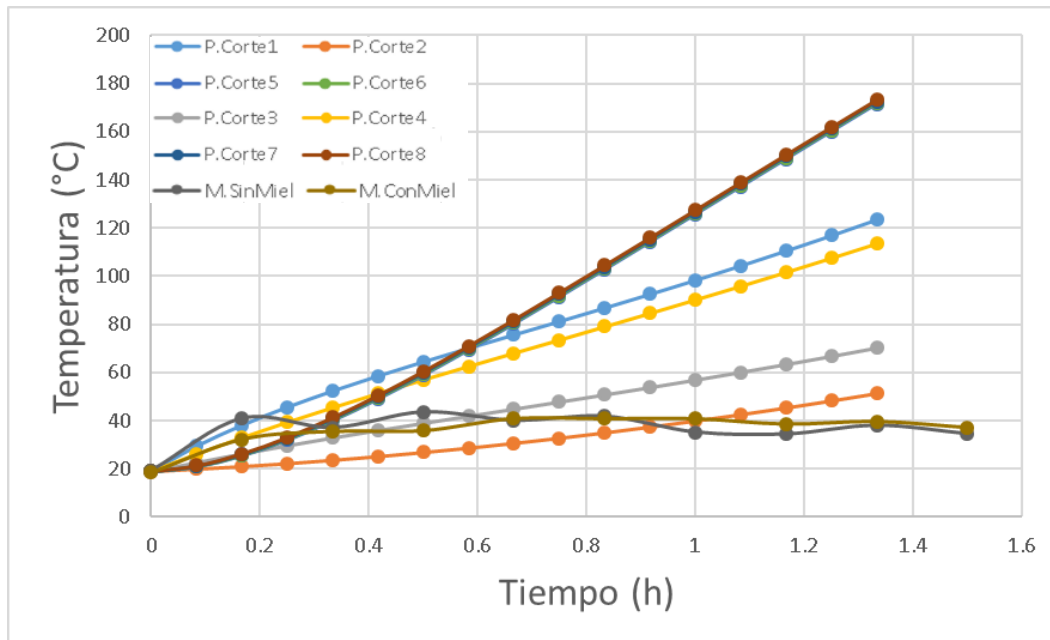


Figura 27
Perfiles de temperatura en el secado por horno de microondas

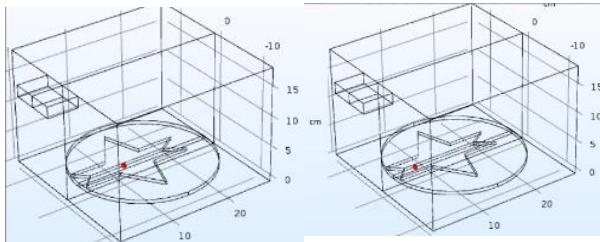


Figura 28
Puntos de estudio para los perfiles de temperatura en el horno de microondas.

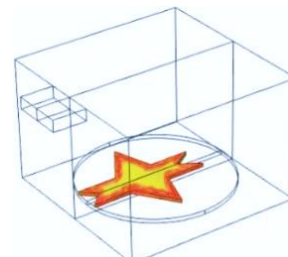


Figura 29
Simulación de la trasferencia de calor en horno de microondas

Secado solar

La Figura 30, muestra los perfiles de temperatura por simulación y experimentales del secado solar. La recta de Punto de Corte 1 corresponde a un punto evaluado en la punta de la carambola, mientras que el Punto de Corte 3 corresponde a un punto evaluado en el centro de la carambola (Figura 32), ocurre lo contrario a lo que se obtuvo en el secado por microondas; ya que la transferencia de calor se da desde el aire dentro del secador hacia la carambola (Figura 31), por lo que en determinado intervalo de tiempo la superficie de la carambola adquiere mayor temperatura que



su centro y conforme pasa el tiempo, la temperatura del aire y del alimento se igualan. Las curvas de las muestras con y sin miel, se acercan a un Punto de Corte al centro de la carambola, la simulación es similar a la experimentación durante las primeras 3 horas; los valores de temperatura fueron cercanos, tomando en cuenta que al secar al sol la temperatura en el entorno no se mantiene constante (las condiciones ambientales para los días de experimentación se muestran en anexo1) y teniendo pérdidas de calor al momento de abrir el secador solar para obtener los valores de temperatura de las rodajas de carambola durante la experimentación.

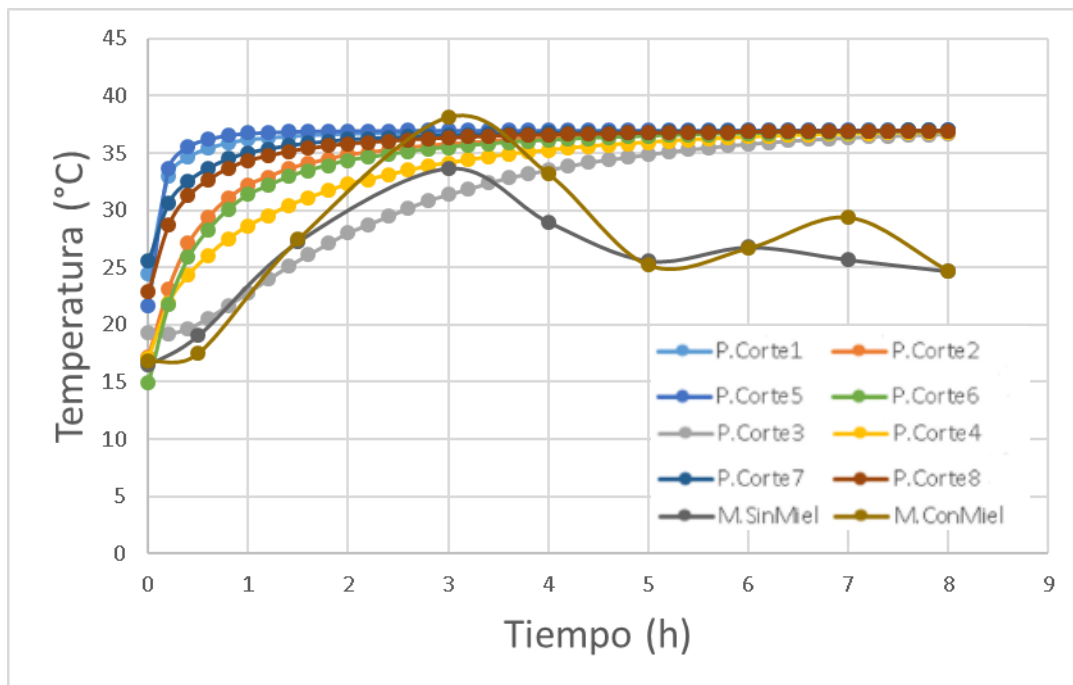


Figura 30

Perfiles de temperatura en el secado por un secador solar.

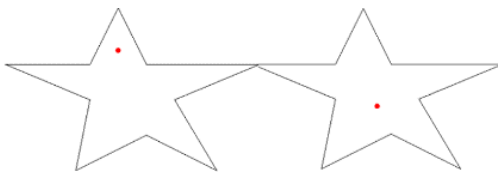


Figura 31

Puntos de estudio para los perfiles de temperatura en el secador solar.

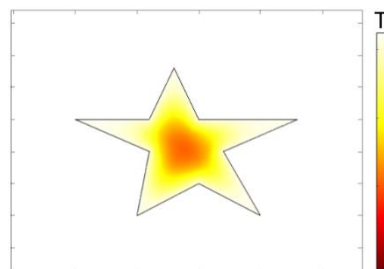


Figura 32

Simulación de la transferencia de calor en secador solar.

Los perfiles de temperatura experimentales en el secado de carambola tanto en horno de microondas como en secador solar son similares a los obtenidos en la








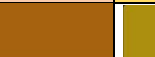

simulación con COMSOL, sin embargo, se acercaron a los perfiles de temperatura más bajos obtenidos durante la simulación; una mejor toma de temperatura durante la experimentación en la cual no se pierda calor entre cada toma podrá mejorar la similitud entre los perfiles de temperatura y su respectiva tendencia.

3.5 Cambio de color

Se calculó las variaciones de los parámetros de color L^*a^*b , se muestra en el Cuadro 47.

Cuadro 47

Cálculos de Δ para el proceso de secado

Secado por Microondas				Secado Solar			
Muestras Control		Muestra con miel		Muestras Control		Muestra con miel	
ΔL	-20.415	ΔL	-17.872	ΔL	-17.11	ΔL	-20.936
Δa	20.997	Δa	10.745	Δa	25.273	Δa	14.836
Δb	0.802	Δb	2.827	Δb	-17.852	Δb	-20.025
Tonos captados							
Inicio	final	inicio	final	inicio	final	inicio	Final
							

Para cada tratamiento se tuvieron valores de ΔL negativos, lo que nos indica que las muestras después del secado son más oscuras en comparación con su estado fresco esto debido a la oxidación tanto enzimática y no enzimática, los valores de Δa son positivos para todos los tratamientos por lo que las muestras presentan tonos violáceos y no verdes, para Δb tuvo valores positivos para el secado por microondas lo cual indica que las muestras presentaron tonos amarillos mientras que en el secado solar tuvieron tonos azules.

Aunque estos tonos no se distinguen visualmente la Cuadro 47, muestra el cambio de color en las muestras, se pueden apreciar tonos oscuros en las muestras después del secado, con la aplicación de miel se tienen tonos ligeramente más claros en comparación con las muestras sin miel.

La Figura 33, muestra los cambios totales de color ΔE . En el secado por microondas, ambas muestras presentaron menor cambio de color que las secadas al sol, esto puede deberse a la exposición al oxígeno, puesto que las muestras en el secador solar estuvieron en total contacto y en un periodo de 10h, mientras que las muestras en el horno de microondas la exposición al oxígeno fue menor con un



periodo de 2h. Las muestras en el secador solar presentaron un ΔE similar, por lo que no son significativos los cambios. En el secado por horno de microondas las muestras sin miel tuvieron un ΔE 28% mayor al compararlas con las muestras con miel. Para ambos secadores las muestras recubiertas con miel conservaron un color más claro en comparación a las muestras sin miel, esto se le atribuye a que la actividad antioxidante de la miel se debe a la acción de la enzima glucosa-oxidasa, que produce peróxido de hidrógeno y ácido glucónico a partir de la glucosa en determinadas condiciones de dilución (Baglio, 2018). Esta reacción le permite a la glucosa-oxidasa, eliminar la glucosa de ciertos alimentos, para evitar su pardeamiento posterior. (Schmidt y Pennacchiotti, 2001). La muestra con miel y secada por microondas tuvo colores hacia el amarillo claro, por lo cual es la más aceptable visualmente.

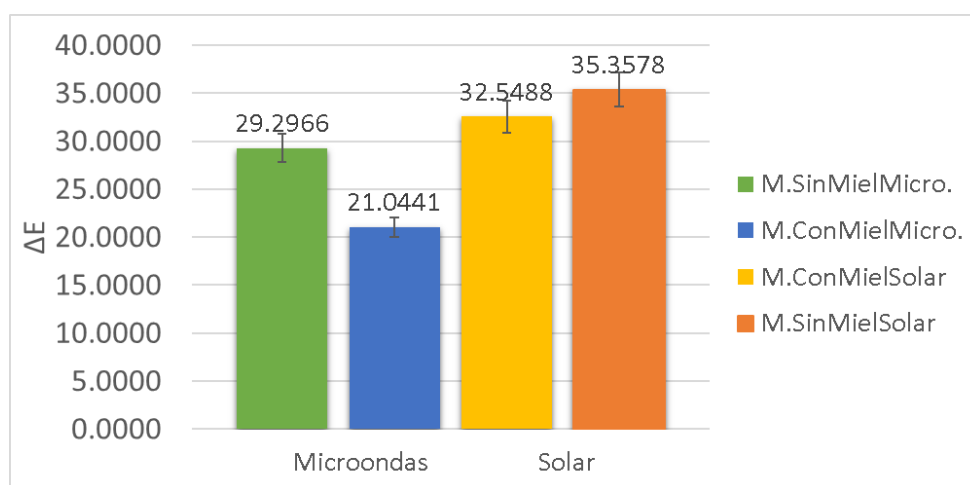


Figura 33

Cambio de color de la carambola después de secar

El análisis estadístico (Cuadro 48), muestra la agrupación de información utilizando el método de Tukey y $\alpha = 0.05$. Para ambos secadores no se tienen diferencias significativas por lo que se concluye que el recubrimiento no lo afecto. Tenemos los factores M.ConMielSolar. y M.SinMielMicro. que comparten la agrupación "B" lo cual indica que en el secado por horno de microondas se conserva mejor el color de la carambola fresca.



Cuadro 48

Comparaciones en parejas de Tukey para ΔE

Factor	N	Media	Agrupación		
M.SinMielSolar.	3	39.51	A		
M.ConMielSolar.	3	32.99	A	B	
M.SinMielMicro.	3	24.97		B	C
M.ConMielMicro.	3	18.61			C

3.6 Encogimiento.

En la Cuadro 49, se observan fotografías de carambola fresca y después del secado. En el secado por horno de microondas las muestras sin miel tuvieron un encogimiento de $\pm 35\%$, las muestras con miel presentaron $\pm 25\%$ de encogimiento. En el secado solar las muestras sin miel se encogieron $\pm 40\%$, las muestras con miel $\pm 25\%$. La contracción o colapso es el cambio de volumen durante el procesado debido a la pérdida de humedad. Es una característica básica para determinar la velocidad de secado y la calidad del producto obtenido. Se produce debido a que en ausencia de agua los biopolímeros no pueden soportar su propio peso. (Ochoa-Reyes et al., 2012).







Las muestras con miel presentaron mejores resultados, conservaron mejor su estructura comparada con su estado fresco; las muestras sin miel se compactaron más. Este fenómeno se atribuye a que la miel formó una corteza, lo cual ocurre cuando la superficie del alimento se seca por completo, creando una costra que evita que la humedad que estaba emergiendo desde el interior continúe su curso. Se puede minimizar reduciendo la velocidad de secado, así, la humedad perdida por la superficie del producto es sustituida por la humedad del interior. (Ochoa-Reyes et al., 2012)

Cuadro 49

Comparación de tratamientos para el secado.

Muestra	Secado microondas			Secado solar		
	Antes	Después	Reducción	Antes	Después	Reducción
Control						



Muestra	Secado microondas			Secado solar		
	Antes	Después	Reducción	Antes	Después	Reducción
Con Miel						

3.7 Rendimiento

En la Figura 34, se muestra el rendimiento de la carambola en el proceso de secado, las muestras con miel secadas por secador solar y por horno de microondas no presentan diferencias significativas en el rendimiento, las muestras control secadas por microondas presentaron un 20% más de rendimiento en comparación con las muestras control secadas al sol, teniendo estas con un 37% menos en rendimiento comparada con las muestras con miel secadas por horno de microondas. Estos resultados se obtienen por la pérdida de peso, ya que las muestras con miel llegaron a un peso constante con valores mayores que las muestras control.

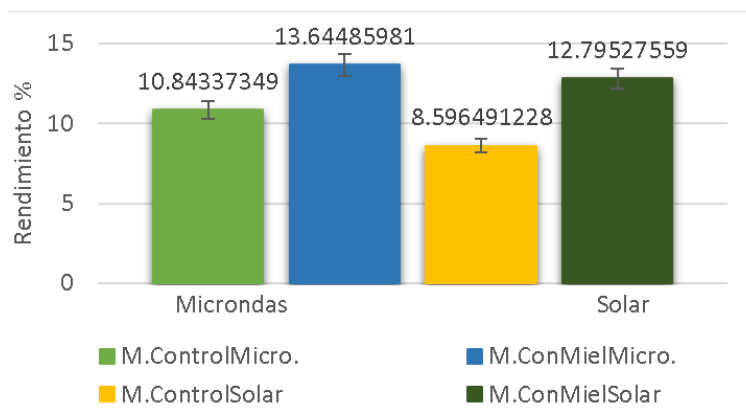


Figura 34

Rendimiento en el secado de carambola

El análisis estadístico (Cuadro 50), muestra la agrupación de información utilizando el método de Tukey y $\alpha = 0.05$. Ninguno de los factores comparte agrupación por lo que hay diferencias significativas en el rendimiento en cada proceso en el secado de carambola.



Cuadro 50

Comparaciones en parejas de Tukey para el rendimiento

Factor	N	Media	Agrupación
M.ConMielMicro.	3	17.250	A
M.ConMielSolar.	3	13.742	B
M.SinMielMicro.	3	11.248	C
M.SinMielSolar.	3	9.015	D

3.8 Evaluación sensorial

En la Figura 35, se muestran los resultados de las pruebas hedónicas, el olor fue casi imperceptible por lo que fue indiferente para cada muestra. El color de las muestras secadas al sol tanto la que no tenía miel como la recubierta con miel fueron indiferentes, mientras que la muestra sin miel secada por horno de microondas fue la que menos les agradó a los jueces, con un resultado de “no me gustó”. La muestra secada por horno de microondas recubierta con miel fue la más aceptada con un resultado de “me gustó”. El sabor de las muestras control en ambos secadores obtuvo un resultado de “indiferente”, mientras que las muestras recubiertas con miel obtuvieron una aceptación con “me gustó”. En cuanto a textura las muestras recubiertas con miel para ambos secadores tuvieron un resultado de “indiferente”, la muestra sin miel secada al sol tuvo un resultado de “no me gustó” y la muestra sin miel secada en horno de microondas fue la de menor aceptación con un “lo odio”. La muestra recubierta con miel y secada por microondas fue la más aceptada en los cuatro aspectos estudiados.

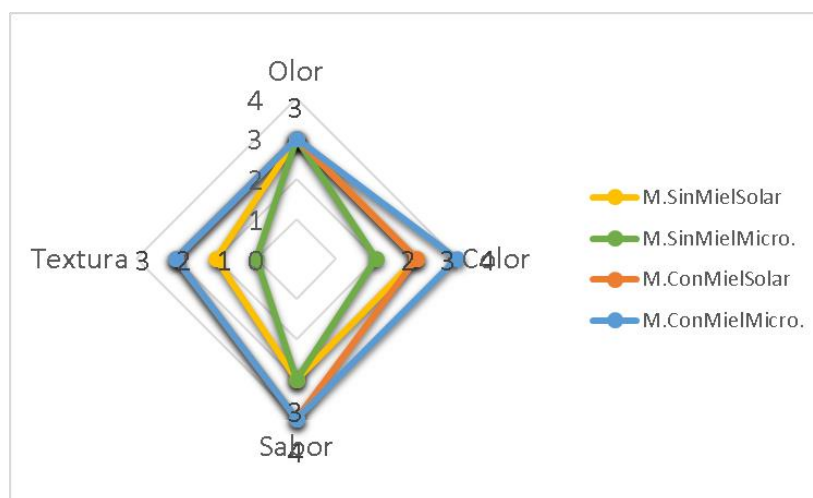


Figura 35
Prueba hedónica de 4 puntos



Conclusiones

El uso del recubrimiento con miel en los diferentes tratamientos no impidió alcanzar valores finales de humedad relativa menores al 10%, por lo que el tipo de secador y recubrimiento no afecta el secado de rodajas de carambola.

Los valores de humedad final más bajos en ambos métodos de secado se obtuvieron en las muestras sin recubrimiento.

El tiempo de secado en horno de microondas fue de hasta 8 horas menor que en el secador solar.

El tipo de secador afecta la velocidad de secado, puesto que la velocidad de secado de carambola en el secador solar fue 70% menor comparada con las muestras secadas por horno de microondas.

El uso de recubrimiento afecto la velocidad en las muestras secadas en horno de microondas mientras que en secador solar no afecto.

El coeficiente de difusión de las muestras de carambola secadas en horno de microondas fue mayor que las del secado solar, por lo que el tipo de secador si afecta la difusividad, mientras que el uso de recubrimiento no afecta la velocidad de difusión.

Los perfiles de temperatura obtenidos en los puntos de corte correspondientes a las orillas de la carambola en el horno de microondas y en el centro para las muestras en el secador solar, en la simulación son similares a los perfiles de temperatura experimentales obtenidos en el centro y superficie de las muestras, por lo que se podría utilizar la simulación para el estudio de secado de rodajas de carambola sin la necesidad de realizarlo experimentalmente ahorrando recursos y tiempo que conlleva la experimentación.

El tipo de secador tanto el uso de recubrimiento con miel que actuó como antioxidante, afecto el cambio de color durante el secado de carambola. Teniendo como mejor tratamiento el secado por horno de microondas y recubrimiento con miel ya que tuvo un menor cambio total de color.

El uso de recubrimiento impidió el encogimiento de las muestras, mientras que el tipo de secador influyo en la reducción, teniendo el tratamiento sin miel y secada al



sol con mayor reducción de tamaño y los de menor reducción los recubiertos con miel en ambos secadores.

El uso de recubrimiento tanto el tipo de secador influyo en el rendimiento, se obtuvo, el menor rendimiento con las muestras secadas al sol sin recubrimiento, mientras que el mayor rendimiento fue con las muestras secadas en horno de microondas y recubiertas con miel.

Las muestras secadas al sol tuvieron un resultado similar en la prueba hedónica por lo que es recubrimiento no influyo en los resultados de la evaluación sensorial. Las muestras secadas en horno de microondas y con recubrimiento fueron más aceptadas en su evaluación, mientras las menos agradables al consumidor de todos los tratamientos fueron las muestras sin miel.

Al consumidor le agrado una muestra con tonos amarillo claro (no tan pardos) y el ligero sabor de la miel ya que para los demás aspectos se tuvieron respuestas similares con las demás muestras por lo que no hay diferencias.



Referencias

- Arias C., Mateus-Cagua, D., Orduz-Rodríguez, J. (2015). *El cultivo de carambolo (Averrhoa carambola L.) y su comportamiento en el piedemonte del Meta (Colombia). Una revisión.* Scielo. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcch/v9n1/v9n1a12.pdf>
- Baglio E. (2018). *Chemistry and Technology of Honey Production.* Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-65751-6>
- Cano Gómez, M. y Durán Ibarra, A. (2015). *JUGO DE CARAMBOLA Y GRANADILLA (AVERRHOA CARAMBOLA Y PASIFLORA LIGLARIS).* Congresos.cio. http://congresos.cio.mx/memorias_congreso_mujer/archivos/extensos/sesion1/S1-MCS08.pdf
- Castrillón N., Pabón B. y Reif-Acherman S. (2011). Influencia de las condiciones del secado en el aterronamiento y la compactación del azúcar almacenado. *Ingeniería y Competitividad*, vol. 13 (núm. 1), pp. 9-23. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323660001>
- CHOI, Y. & OKOS, M.R. (1986). *Effects of temperature and compositions on the thermal properties of foods. In: Food engineering and process application.* Vol I.
- Daewoo. (2012). *Horno de microondas.* Manuelapdf. Recuperado el 08 de julio de 2021 de <https://www.manualpdf.es/daewoo/kor-1n0aw/manual?p=35>
- Delgado J. y Gilson A. (2016). *Drying Process in Electromagnetic Fields. Drying and Energy Technologies* (pp.89-110). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-19767-8>
- Della Rocca, P., & Mascheroni, R. H. (2009). *Secado de papas por microondas.* Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/296410715.pdf>
- Dincer I. y Zamfirescu C. (2015). *Drying Phenomena: Theory and Applications.* Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118534892.ch2>
- Elías, Castells, Xavier. *Sistemas de tratamiento térmico: procesos a baja temperatura, secado,* Ediciones Díaz de Santos, 2005. *ProQuest Ebook Central,*



<https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliodgbsp/detail.action?docID=32014>

51.

Fao. (2022). *Fichas técnicas, productos frescos de fruta*. COVER-PRO-FRESCO-FRUTAS. <http://www.fao.org/3/au173s/au173s.pdf>

Hernández L. Claudia., Karina O. Zonia., Ramirez P. Lorena. y Herrera V. Wilmer. (2011). *Influencia del espesor y la temperatura en el secado de carambola (Averrhoa carambola L.)* Ingenierías & Amazonia 4(2).

Hernández, R. J., Quinto D. P., Barbosa P. G.R., and Aguilar A. J. O. (2017). Secado Solar de Frutas y Verduras en Quintana Roo, México. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*.18 (1), 1-8
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81351597001>

Interempresas Media, S.L. (2021). *CARAMBOLA, AVERRHOA CARAMBOLA / OXALIDACEAE*. Frutas & Hortalizas. Recuperado el 14 de mayo de 2021 de <https://www.frutas-hortalizas.com/Frutas/Poscosecha-Carambola.html>

Le Rucher de l'Ours. (2022). Composición química de la miel. Recuperado el 25 de julio de 2021 de <https://www.miel-lerucherdelours.fr/es/content/54-composicion-de-la-miel>

Malacara D. (2011). *Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications*, Second Edition. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1117/3.881172>

Mateus-Cagua, D., Arias C., M. E., & Orduz-Rodríguez, J. O. (2015). El cultivo de carambolo (*Averrhoa carambola* L.) y su comportamiento en el piedemonte del Meta (Colombia). Una revisión. *Revista colombiana de ciencias hortícolas*, 9(1), 135.

Momtoya Z. (1998). Determinación de parámetros cinéticos del alcohol etílico como agente osmodeshidratante. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

Muñoz, J.R. 2007. La carambola (en línea). Consultado el 28 de septiembre. 2009. Disponible en: <http://liberia.co.cr/promo/carambola.htm>.



Patiño O. (2000). *Introducción a la ingeniería química: bancos de masa y energía*. Tomo I.

https://books.google.com.mx/books?id=vyQSaHtU50C&redir_esc=y

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (03 de abril de 2018). *La exótica fruta estrella: el carambolo*. Gobierno de México. Recuperado el 13 de abril de 2021 de <https://www.gob.mx/siap/articulos/la-exotica-fruta-estrella-el-carambolo>

Sipahioglu, O. & Barringer, S.A. (2003). Dielectric properties of vegetables and fruits as a function of temperature, ash and moisture content. *Journal of Food Science*. 68(1), 234–239.

Teixeira, Matheus P., Campos, Cid N., Prado, Mello R., Caione, Gustavo, Mingotte, Checchio F., Agostinho y Bastos F. (2017). Secado de tejido de plantas con microondas para el análisis nutricional en *Corymbia citriodora* (Hook.) y *Hevea brasiliensis* Muell. Arg.. *Agrociencia*, 51(5), 555-560. Recuperado el 22 de julio de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000500555&lng=es&tlng=es

United States Department of Agriculture. (S.f.). *Averrhoa carambola* L. Carambola. Plants <https://plants.usda.gov/home/plantProfile?symbol=AVCA>

Vazquez, L. (24 de febrero de 2014). *Por qué consumir carambola*. VIX. Recuperado el 04 de Julio de 2021 de <https://www.vix.com/es/imj/salud/5423/por-que-consumir-carambola>



Anexos

Anexo 1 Condiciones ambientales

Condiciones ambientales durante el secado solar		
Hora	Humedad %	Punto de rocío (°C)
	83	9
	Temperatura (°C)	Velocidad del aire (Km/h)
12	18	11
13	20	11
14	21	13
15	22	14
Hora	Humedad %	Punto de rocío (°C)
	68	11
	Temperatura (°C)	Velocidad del aire (Km/h)
11	19	5
12	20	6
13	21	8
14	22	10
15	22	13
16	21	13

Anexo 2 Análisis estadístico

ANOVA un solo factor, comparaciones en parejas de Tukey

Curvas de secado (humedad)

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
 Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor Niveles Valores

Factor 4 M.ConMielMicro., M.SinMielMicro., M.ConMielSolar., M.SinMielSolar.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	0.000514	0.000171	2.24	0.161
Error	8	0.000612	0.000077		
Total	11	0.001127			

Medias

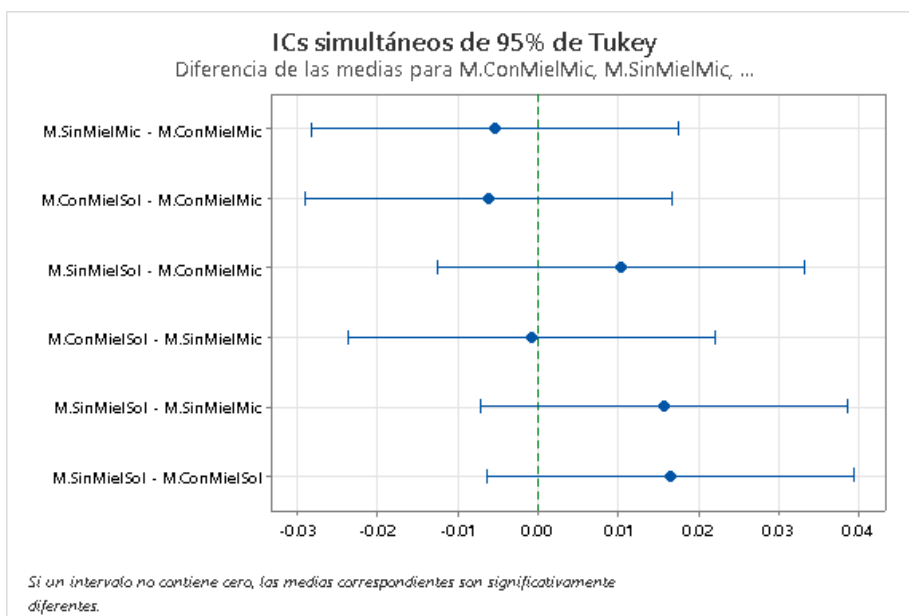


Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
M.ConMielMicro.	3	0.009405	0.001016	(-0.002244, 0.021053)
M.SinMielMicro.	3	0.00404	0.00285	(-0.00761, 0.01568)
M.ConMielSolar.	3	0.003241	0.001559	(-0.008408, 0.014889)
M.SinMielSolar.	3	0.01965	0.01716	(0.00800, 0.03130)

Desv.Est. agrupada = 0.00874910

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%



Curvas de velocidad de secado

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor Niveles Valores

Factor 4 M.ConMielMicro., M.SinMielMicro., M.ConMielSolar., M.SinMielSolar.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	6.7049	2.23496	36.39	0.000
Error	8	0.4913	0.06142		
Total	11	7.1962			

Medias

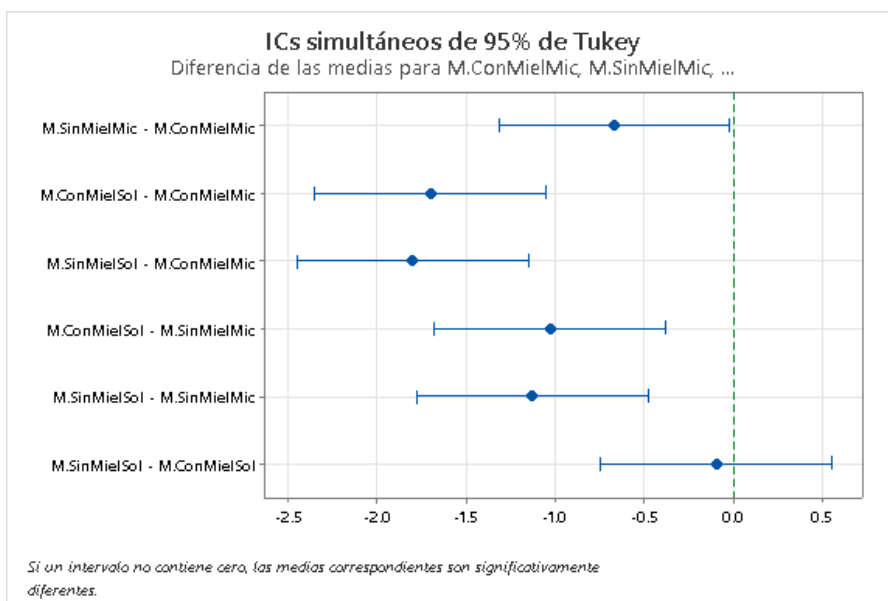


Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
M.ConMielMicro.	3	2.138	0.445	(1.809, 2.468)
M.SinMielMicro.	3	1.467	0.215	(1.137, 1.797)
M.ConMielSolar.	3	0.4362	0.0181	(0.1062, 0.7661)
M.SinMielSolar.	3	0.3374	0.0325	(0.0075, 0.6674)

Desv.Est. agrupada = 0.247822

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%



Coefficiente de difusión

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor Niveles Valores

Factor 4 M.ConMielMicro., M.SinMielMicro., M.ConMielSolar., M.SinMielSolar.

Análisis de Varianza

Fuente	G	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	0.0000000002129	0.000000000709	2122.000413705171	0.0000000000061
Residual		526	842	4679	037



Error 8 0.0000000000002 0.0000000000000
 676 335
 Total 11 0.0000000002132
 202

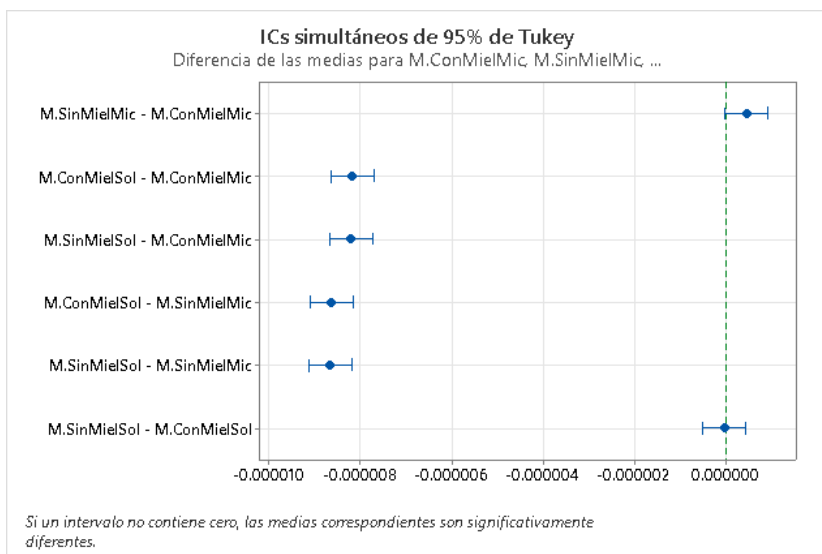
Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
M.ConMielMicro.	3	0.0000091297	0.0000001865	(0.0000088862, 0.0000093732)
M.SinMielMicro.	3	0.0000095870	0.0000003104	(0.0000093435, 0.0000098305)
M.ConMielSolar.	3	0.0000009520	0.0000000389	(0.0000007085, 0.0000011955)
M.SinMielSolar.	3	0.0000009267	0.0000000345	(0.0000006832, 0.0000011702)

Desv.Est. agrupada = 1.828976E-07

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%



Curvas de temperatura

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
 Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.



Información del factor

Factor Niveles Valores

Factor 4 M.ConMielMicro., M.SinMielMicro., M.ConMielSolar., M.SinMielSolar.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	42.6092	14.2031	138.57	0.000
Error	8	0.8200	0.1025		
Total	11	43.4292			

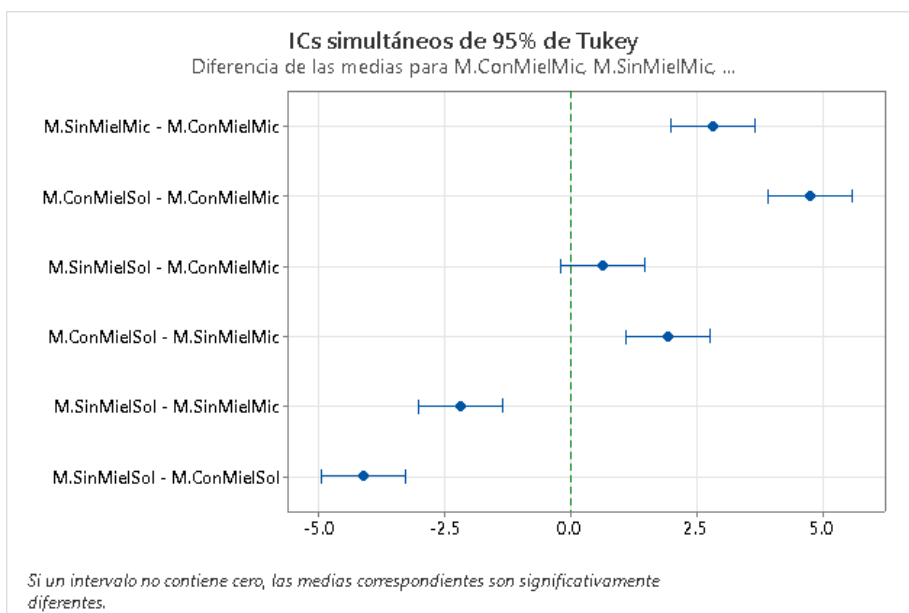
Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
M.ConMielMicro.	3	41.000	0.265	(40.574, 41.426)
M.SinMielMicro.	3	43.8333	0.1155	(43.4071, 44.2596)
M.ConMielSolar.	3	45.767	0.351	(45.340, 46.193)
M.SinMielSolar.	3	41.633	0.451	(41.207, 42.060)

Desv.Est. agrupada = 0.320156

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%



Cambio total de color

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
 Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.



Información del factor

Factor Niveles Valores

Factor 4 M.ConMielMicro., M.SinMielMicro., M.ConMielSolar., M.SinMielSolar.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	752.0	250.66	14.30	0.001
Error	8	140.3	17.53		
Total	11	892.2			

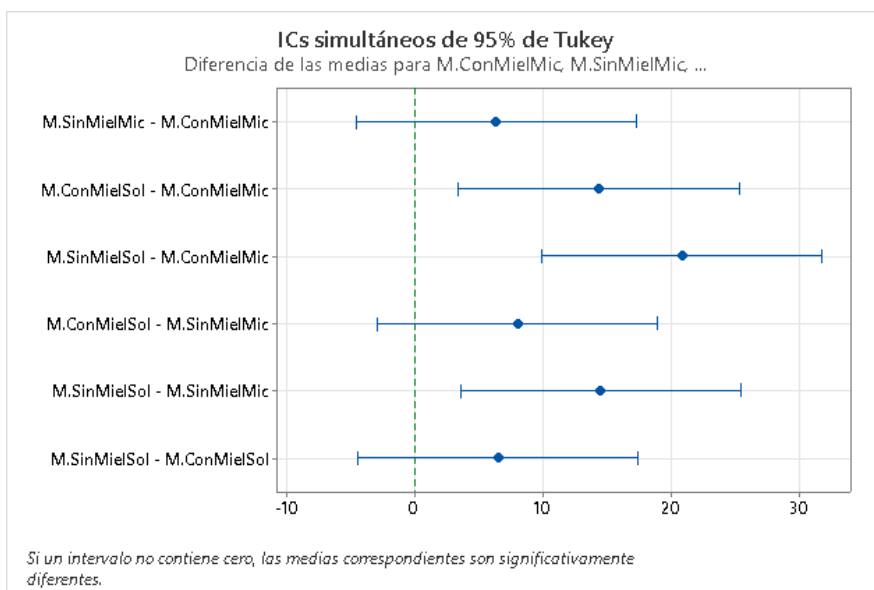
Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
M.ConMielMicro.	3	18.61	2.75	(13.03, 24.18)
M.SinMielMicro.	3	24.97	3.88	(19.40, 30.55)
M.ConMielSolar.	3	32.99	2.64	(27.41, 38.56)
M.SinMielSolar.	3	39.51	6.37	(33.94, 45.09)

Desv.Est. agrupada = 4.18711

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%



Rendimiento

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
 Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.



Información del factor

Factor Niveles Valores

Factor 4 M.ConMielMicro., M.SinMielMicro., M.ConMielSolar., M.SinMielSolar.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor p
		Ajust.	Ajust.		
Factor	3	112.283	37.4278	76.56	0.000
Error	8	3.911	0.4889		
Total	11	116.194			

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
M.ConMielMicro.	3	17.250	0.904	(16.319, 18.181)
M.SinMielMicro.	3	11.248	0.397	(10.317, 12.178)
M.ConMielSolar.	3	13.742	0.916	(12.811, 14.673)
M.SinMielSolar.	3	9.015	0.376	(8.084, 9.945)

Desv.Est. agrupada = 0.699187

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95