

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Modelado Computacional y Validación CFD del Proceso de Secado de la
Almendra de cacao por Convección Forzada”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Omar Xavier Saavedra Moran

David Joshua Mantilla Cáceres

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

Agradezco a mis padres y a Nohelia, por el gran apoyo que me han dado en este tiempo y por la confianza que ponen en mí.

Les dedico a todas las personas allegadas que siempre están ahí para dar la mano.

Omar Saavedra Moran

A mi familia, amigos cercanos y compañeros por su apoyo constante durante todo este tiempo. En especial a Mechita y Roberto por darme todo lo que tengo y todo lo que soy, esto es para ustedes.

David Mantilla Cáceres

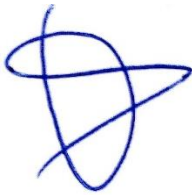
AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestros tutores PhD. Eduardo Castillo y al MSc. Oguier Garavito, la profesora del paralelo PhD. Emérita Delgado por su constante supervisión y ayuda en el desarrollo del proyecto. Además, agradecemos al Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable (CDTS) de ESPOL por facilitarnos con curvas experimentales de secado de tipos de cacao fino y de aroma y CCN51 y a nuestro compañero Luis Atauchí, quien de manera desinteresada nos invitó a su finca y nos explicó el proceso de cultivo del cacao hasta llegar a la etapa de secado. Finalmente, agradecemos a todas las personas que de una u otra manera colaboraron con información y consejos para este proyecto.

**Omar Saavedra Moran y David Mantilla
Cáceres**

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Omar Xavier Saavedra Morán y David Joshua Mantilla Cáceres damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Omar Xavier Saavedra
Morán



David Joshua Mantilla
Cáceres

EVALUADORES

**EMERITA
ALEXANDRA
DELGADO
PLAZA**

Firmado digitalmente por EMERITA
ALEXANDRA DELGADO PLAZA
Nombre de reconocimiento (DN):
c=EC, ou=SECURITY DATA S.A., 1,
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION
DE INFORMACION,
serialNumber=280920191019,
cn=EMERITA ALEXANDRA
DELGADO PLAZA
Fecha: 2021.09.22 20:53:43 -05'00'

PhD, Emérita Delgado Plaza
PROFESOR DE LA MATERIA



Firmado electrónicamente por:
**EDUARDO ADAN
CASTILLO OROZCO**

PhD, Eduardo Castillo Orozco
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Debido al crecimiento en la exportación del cacao nacional, incluso durante la pandemia por COVID-19, la necesidad de diseñar equipos de secado más eficientes, y a la vez de bajo costo, es urgente. En el presente proyecto final de graduación se realizó la validación de un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) del proceso de secado de cacao por convección forzada con el objetivo de optimizar el proceso de diseño de las maquinas secadoras.

Se realizó la simulación utilizando el Software comercial COMSOL MULTIPHYSICS (usando una licencia de prueba autorizada por esta empresa). Se utilizaron los módulos de flujo de fluido, transferencia de calor entre fluidos y sólido, transporte de especies diluidas. El modelo desarrollado en este trabajo se centra en la difusión de agua desde el núcleo del producto a los contornos y la transferencia de masa por evaporación únicamente en su superficie.

Los resultados teóricos-computacionales fueron presentados con gráficas que muestran campos de velocidad del aire alrededor de la almendra de cacao, la distribución de temperatura, variación del contenido de humedad del producto. Se compararon los resultados de la simulación CFD con pruebas experimentales realizadas en el Centro CDTS de ESPOL. Los errores máximos obtenidos son entre 23% - 41.4% al comparar con los resultados experimentales de secado en cacao fino y de aroma y 61.8% - 64.9% con los resultados experimentales de secado en cacao CCN51. Sin embargo, el modelo CFD predice resultados cualitativos adecuados del fenómeno físico de secado del grano de cacao, mostrando la disminución de la concentración de humedad en un tiempo dado, es decir, curvas de secado similares a las determinadas en los experimentos.

Palabras Clave: Simulación CFD, difusión, secado, convección forzada, almendra de cacao

ABSTRACT

Due to the growth in the export of national cocoa, even during the COVID-19 pandemic, there is a need for designing more efficient drying equipment and processes. At the same time, obtaining lower production costs, is important. This capstone project presents the validation of a Computational Fluid Dynamics (CFD) model of the drying process of cocoa beans by forced convection. The main objective is to validate the CFD model and to carry out simulations for optimizing the process to improve technology and design of drying equipment.

The simulation was performed using the commercial software COMSOL MULTIPHYSICS (using a trial license authorized by this company). The modules fluid flow, fluid-to-solid heat transfer, and diluted species transport were used. The model developed in this study focuses on the diffusion of water from the core of the bean to the boundaries and mass transfer by evaporation only on its surface.

The theoretical-computational results were presented with graphs showing air velocity fields around the cocoa bean, the temperature distributions, and the variation in moisture content on a dry base of the product. The results of the CFD simulations were compared with experimental tests carried out at ESPOL's CDTS Center. The maximum errors obtained were between 23% - 41.4% when comparing with experimental results of drying process in "Fino y de aroma" cocoa and 61.8% - 64.9% for CCN51 cocoa. However, the CFD model predicts adequate qualitative results of the physical phenomenon of cocoa bean drying, showing the decrease in moisture concentration in a given time, i.e., drying curves similar to those determined in experiments.

Key Words: *CFD Simulation, diffusion, drying, forced convection, cocoa bean*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Cacao	3
1.4.2 Composición de la almendra de Cacao	5
1.4.3 Generalidades del secado de cacao.....	7
1.4.4 Estudios realizados sobre el cacao.....	9
1.4.5 Clasificación de máquinas secadoras de cacao	10
1.4.6 Modelos matemáticos que gobiernan el movimiento de fluido, transferencia de calor y masa	10
1.4.7 Softwares que permiten el modelado CFD del secado de cacao	11
1.4.8 Importancia del mallado dentro de la simulación CFD.....	13
CAPÍTULO 2.....	15
2. Metodología.....	15

2.1	Análisis y alternativas para resolver el problema fluidodinámico.....	15
2.1.1	Alternativa 1 – Simulación 2D.....	15
2.1.2	Alternativa 2 – Simulación 2D Axisimétrica.....	16
2.1.3	Alternativa 3 – Simulación 3D.....	17
2.2	Matriz de decisión para selección del mejor modelo	18
2.3	Simulación.....	18
2.3.1	Geometría.....	19
2.3.2	Materiales	20
2.3.3	Modelos físicos implicados y parámetros de entrada	20
2.3.3.1	Modelos matemáticos usados	20
2.3.3.2	Parámetros de simulación	21
2.3.3.3	Coeficientes de transferencia de calor y masa teóricos	21
2.3.3.4	Coeficientes de transferencia de calor y masa simulados.....	23
2.3.4	Mallado	23
2.3.5	Solución.....	24
2.4	Parámetros usados en el procesamiento de resultados.....	24
2.5	Pruebas experimentales.....	24
CAPÍTULO 3.....		30
3.	Resultados y análisis.....	30
3.1	Resultados	30
3.1.1	Post procesamiento de resultados teórico-computacionales.....	30
3.1.1.1	Resultados del modelo 2D.....	30
3.1.1.2	Resultados del modelo 2D axis-simétrico.....	31
3.1.1.3	Resultados del modelo 3D.....	32
3.1.2	Campos de velocidad	33
3.1.3	Distribución de temperatura.....	34
3.1.4	Estudio de la Independencia de malla	35

3.1.5	Coeficientes convectivos de calor y masa	36
3.1.5.1	Coeficiente global de transferencia de calor convectivo.....	36
3.1.5.2	Coeficiente global de transferencia de masa.....	38
3.1.5.3	Error relativo de los coeficientes convectivos entre los valores simulados y teóricos.....	39
3.1.6	Comparación de resultados teórico-computacionales con los resultados de las pruebas experimentales.....	39
3.1.7	Comportamiento de la concentración de humedad y temperatura en el tiempo	42
3.2	Análisis de resultados.....	44
3.2.1	Validación del modelo, simulación de un grano vs pruebas experimentales con muestra de 200 gramos	44
3.2.2	Análisis del comportamiento de la humedad y temperatura del grano frente a diversas temperaturas de ingreso de aire.....	46
3.2.3	Límites de la simulación computacional.....	46
3.2.4	Análisis del encogimiento del grano durante el secado	47
3.2.5	Factibilidad de la simulación aplicando resultados a diseño de equipos ...	47
CAPÍTULO 4.....		49
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	49
4.1	Conclusiones.....	49
4.2	Recomendaciones.....	50

Bibliografía

Apéndices

ABREVIATURAS

FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
CDTS	Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable
ICCO	International Cocoa Organization
CFD	Computational Fluid Dynamics
MDF	Método de Diferencias Finitas
MVF	Método de Volumen Finito
MEF	Método de Elementos Finitos
EDP	Ecuación Diferencial Parcial
VC	Volumen de control
CAE	Computer Aided Engineering

SIMBOLOGÍA

ρ_c	Densidad del cacao (kg/m^3)
k_c	Conductividad térmica del cacao (W/mK)
C_{p-c}	Calor específico a presión constante del cacao (J/kgK)
D	Difusividad (m^2/s)
ρ_{air}	Densidad del aire (kg/m^3)
k_{air}	Conductividad térmica del aire (W/mK)
C_{p-air}	Calor específico a presión constante del aire (J/kgK)
t	Tiempo (h)
u	Velocidad (m/s)
P	Presión (Pa)
μ	Viscosidad dinámica (Pa.s)
∇	Gradiente
c	Concentración (mol/m^3)
R	Constante de gas universal ($8.314 \frac{J}{mol.K}$)
q	Flujo de calor (W/m^2)
c_o	Concentración inicial (mol/m^3)
T	Temperatura ($^{\circ}C$)
X	Contenido de humedad ($\frac{kg\ agua}{kg\ ss}$)
HR	Humedad relativa (%)
m	Masa de la muestra (gr)
h_t	Coficiente global de transferencia de calor ($\frac{W}{mK}$)
h_m	Coficiente global de transferencia de masa ($\frac{m}{s}$)

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Precio por tonelada del cacao, Junio 2020 – Abril 2021.....	3
Figura 1.2 Provincias con mayor volumen de ventas de empresas dedicadas al cultivo de cacao. Periodo 2010 – 2019. En millones de USD.....	4
Figura 1.3 Cacao fino o de aroma	4
Figura 1.4 Cacao CCN-51	5
Figura 1.5 Composición superficial del cacao	6
Figura 1.6 Esquema del proceso de secado de cacao.....	7
Figura 1.7 Curva típica de contenido de agua en el sólido en función del tiempo.....	8
Figura 1.8 Lado izquierdo: Temperatura del grano; Lado derecho: Gradiente de temperatura.....	9
Figura 1.9 Partes de un subdominio computacional en 2D y 3D.....	14
Figura 2.1 Geometría 2D.....	16
Figura 2.2 Geometría 2D Axis-simétrica.....	16
Figura 2.3 Geometría 3D.....	17
Figura 2.4 Diagrama de flujo del modelado CFD.....	19
Figura 2.5 Diversos tamaños de mallado controlado por la física	24
Figura 2.6 Variación del contenido de humedad de la muestra en función del tiempo a diversas temperaturas	29
Figura 2.7. Variación del contenido de humedad de la muestra en función del tiempo a diversas temperaturas	29
Figura 3.1. Temperatura del Cacao vs tiempo para diferentes temperaturas de aire, modelo 2D	30
Figura 3.2. Concentración de humedad del Cacao vs tiempo para diferentes temperaturas de aire, modelo 2D	31
Figura 3.3. Temperatura del Cacao vs tiempo para diferentes temperaturas de aire, modelo 2D axis-simétrico	31
Figura 3.4 Puntos de análisis en la geometría del Cacao, modelo 2D axis-simétrico ..	32
Figura 3.5 Concentración de humedad del Cacao vs tiempo para temperaturas de aire, modelo 2D axis-simétrico	32
Figura 3.6 Temperatura del Cacao vs tiempo para temperatura del aire a 60[°C], modelo 3D	33

Figura 3.7 Concentración de humedad del Cacao vs tiempo para temperatura del aire a 60[°C], modelo 3D.....	33
Figura 3.8 Campos de velocidad (a) Modelo 2D; (b) Modelo 2D axisimétrico; (c)Modelo 3D	34
Figura 3.9 Distribución de temperatura (a) Modelo 2D; (b)Modelo 2D axis-simétrico ; (c) Modelo 3D	35
Figura 3.10 Estudio de independencia de malla de la simulación	36
Figura 3.11 Contorno del grano para una geometría 2D axis-simétrico	37
Figura 3.12 Coeficiente de transferencia de calor local para cada posición a lo largo del contorno de la elipse	37
Figura 3.13 Línea de corte a lo largo del semieje menor.....	40
Figura 3.14 Concentración de humedad vs Tiempo a Temperatura de aire 40[°C], pruebas experimentales y simulación computacional.....	40
Figura 3.15. Concentración de humedad vs Tiempo a Temperatura de aire 50[°C], pruebas experimentales y simulación computacional.....	41
Figura 3.16 Concentración de humedad vs Tiempo a Temperatura de aire 60[°C], pruebas experimentales y simulación computacional.....	41
Figura 3.17 Cambio en la concentración del grano de cacao (a) t = 0; (b) t = 7h; (c) t = 14h; (d) t = 20h.....	43
Figura 3.18 Cambio en la temperatura del grano de cacao (a) t = 0; (b) t = 7h; (c) t = 14h; (d) t = 20h.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Dimensiones de granos de origen ecuatoriano y peruano.....	6
Tabla 2.1 Parámetros a tener en cuenta en el espacio del dominio a simular.....	17
Tabla 2.2 Matriz de selección del mejor modelo.....	18
Tabla 2.3 Parámetros necesarios a insertar en los módulos	21
Tabla 2.4 Datos obtenidos de masa del grano en gramos (Cacao fino).....	25
Tabla 2.5 Datos obtenidos de masa del grano en gramos (Cacao CCN51).....	26
Tabla 2.6 Cálculo del contenido de humedad en Base seca, Cacao Fino.....	27
Tabla 2.7. Cálculo del contenido de humedad en Base seca, Cacao CCN51	28
Tabla 3.1 Valores globales del coeficiente de transferencia de calor convectivo	38
Tabla 3.2 Cálculo del coeficiente del coeficiente de transferencia de masa global simulado	38
Tabla 3.3 Valores globales del coeficiente de transferencia de masa	38
Tabla 3.4. Error relativo del coeficiente de transferencia de calor y coeficiente de transferencia de masa para cada temperatura de aire	39
Tabla 3.5 Valor promedio de los errores para los experimentos con cacao fino y CCN51	42

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El cacao es uno de los productos nacionales que más se exporta hacia países extranjeros, aún durante la pandemia por COVID-19 del año 2020, la exportación de cacao aumentó en un 22% comparado al año anterior [1]. En consecuencia, se han realizado varios proyectos en los que se requiere diseñar una máquina secadora de cacao con el fin de reemplazar métodos tradicionales de secado y así aumentar su producción. Una de las herramientas que no ha sido explotada, durante el proceso de diseño, ha sido el análisis computacional avanzado utilizando softwares que permiten simular el proceso teóricamente, previo a la construcción del prototipo. La simulación permite ver el comportamiento de parámetros como presión, velocidad, temperatura, concentración de humedad, etc. El modelado CFD del proceso de secado es una herramienta innovadora, dado que puede analizar parámetros óptimos para así obtener las indicaciones técnicas que debe tener una máquina destinada para el secado de cacao. El secado de cacao es de gran relevancia debido a que garantiza la buena calidad del producto (aroma, sabor, textura), para que pueda cumplir con las normas establecidas y permitir su comercialización y exportación.

1.1 Descripción del problema

El comercio de cacao ha experimentado un crecimiento en las últimas décadas, caracterizándose por una creciente diversificación de productos procesados y derivados durante la fase de postcosecha. En dicha fase de la cadena productiva, el transporte y la conservación de los granos ha requerido de la aplicación extensiva de procesos de secado tanto artesanales, como altamente tecnificados, todo esto con el fin de reducir la humedad para evitar la descomposición y cumplir con los estándares para su comercialización. Siendo Ecuador uno de los grandes exportadores de cacao a nivel mundial, carece hasta el momento de procesos optimizados y adaptados al genotipo de cacao de producción nacional. Actualmente, se utilizan equipos importados o nacionales que han sido diseñados sin tomar en cuenta un estudio de caracterización termo-física de las variedades de granos ecuatorianos y sin

ningún estudio del fenómeno de transferencia de masa y calor durante dichos procesos de secado.

1.2 Justificación del problema

El estudio y validación basado en CFD aquí propuesto, es un paso imprescindible para poder desarrollar y construir equipos de secado de cacao, a nivel nacional, en el que se consideren las propiedades térmicas y difusivas de las variedades de cacao autóctonas del Ecuador, y de esta forma optimizar el consumo de energía y reducir el tiempo de secado. El modelo CFD del secado de cacao es de gran beneficio para quienes se encargan de diseñar un equipo de secado, porque realizar una simulación computacional de fluido con ciertos parámetros iniciales de trabajo (dimensiones del secador, humedad, temperatura del aire y velocidad), es más fácil realizarla mediante cálculos numéricos ya preestablecidos a realizarlo de manera experimental. Además, el modelo CFD tiene la ventaja respecto al modelo real, porque se pueden variar los parámetros y escoger los valores óptimos para las condiciones de trabajo que se requiera del secador.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo de CFD que considere los fenómenos acoplados de transferencia de masa y calor de un grano de cacao con el fin de determinar condiciones óptimas de secado.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Revisar antecedentes nacionales e internacionales de propiedades térmicas y difusivas de granos de cacao, así como parámetros de secado, para conocer las variables que determinan el proceso de secado.
2. Modelar la geometría 3D, mallado que contenga el dominio del grano sólido y el dominio fluido alrededor del grano, cálculos de los fenómenos difusivos dentro del grano y convectivos fuera de este, por medio de la solución numérica de las ecuaciones de conservación.

3. Construir gráficos de variables de estado en función del tiempo, a través del post-procesamiento del modelo de CFD.
4. Validar los resultados del modelo computacional con curvas de secado experimentales, para determinar errores de análisis.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Cacao

Según la FAO, el árbol cacaotero o por su nombre científico “Theobroma cacao”, es un árbol de 4 a 8 m de alto y regularmente de aquí se originan de 15 a 20 frutos, llamados vainas o mazorcas, en las cuales se alojan las semillas o granos de cacao, usualmente cada mazorca contiene entre 20 a 60 granos de cacao. Este fruto se lo encuentra en regiones tropicales de América del sur y América central. Los granos de cacao son usados para elaborar la masa de cacao, polvo de cacao y el chocolate. [2]

Tipos de cacao

La exportación del cacao ha situado al Ecuador como un país competitivo de América Latina en esta área, y presenta dos diferentes tipos de cacao: CCN-51 y fino aroma.

Según datos pertenecientes a la ICCO (International Cocoa Organization), Ecuador es de los países más destacados en la producción de la almendra. Como se muestra en la Figura 1.1, el precio por tonelada del cacao desde el junio del 2020 a abril del 2021.

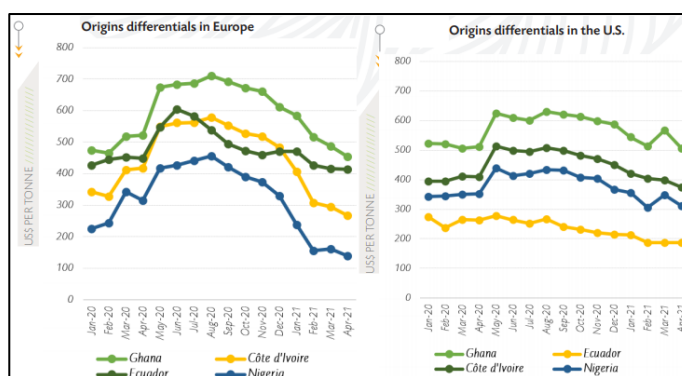


Figura 1.1 Precio por tonelada del cacao, Junio 2020 – Abril 2021

Fuente: <https://www.icco.org/wp-content/uploads/ICCO-Monthly-Cocoa-Market-Report-April-2021.pdf>

En la figura 1.2, se indica cuanto es el volumen de ventas de las empresas que se dedican al cultivo de cacao en el lapso del 2010 – 2019. Las ventas totales del año 2018 fueron de \$157,0 millones de dólares.

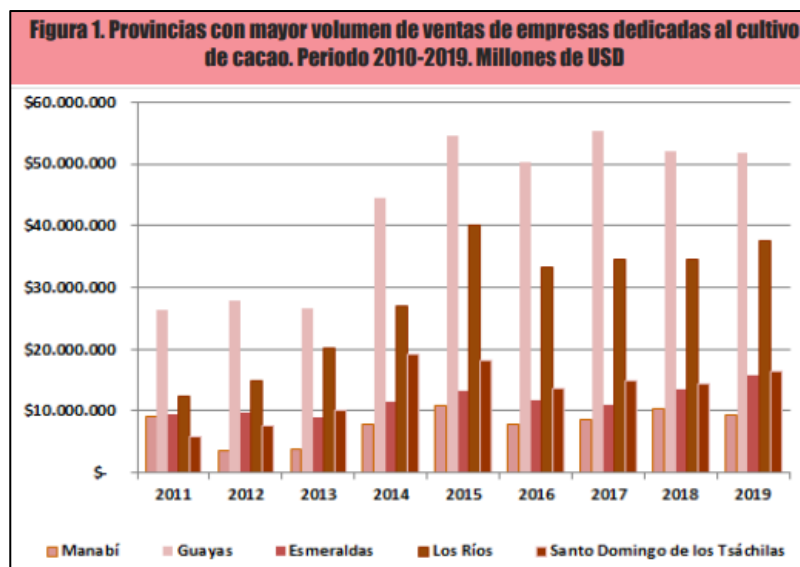


Figura 1.2 Provincias con mayor volumen de ventas de empresas dedicadas al cultivo de cacao. Periodo 2010 – 2019. En millones de USD
Fuente: Servicio de Rentas Internas. SAIKU. Declaraciones 104

En el Ecuador hay dos tipos de cacaos que predominan, y son:

Cacao fino o aroma

Se lo suele conocer como cacao nacional, el color que presenta es amarillo como se observa en la ilustración, y su sabor y aroma son únicos los cuales son indispensables para poder elaborar un buen chocolate. En la figura 1.3 se ilustra como es el cacao fino.



Figura 1.3 Cacao fino o de aroma
Fuente: www.culturaypatrimonio.gob.ec/cacao-el-fino-aroma-de-nuestra-identidad/

Cacao CCN-51

El nombre de CCN viene de las siglas Colección Castro Naranjal, tiene su reconocimiento dado la gran producción que se tiene. Como ventaja tiene que es resistente a enfermedades. Presenta color rojizo, tal como la figura 1.4.



Figura 1.4 Cacao CCN-51

Fuente: www.anecacao.com/index.php/es/quienes-somos/cacaoccn51.html

El proceso que sigue el cacao para pasar de la etapa de cosecha a almacenamiento son los siguientes:

1. Cosecha
2. Quiebra
3. Fermentación
4. Secado
5. Selección
6. Almacenamiento

1.4.2 Composición de la almendra de Cacao

Estructura de la almendra de cacao

La estructura de la almendra de cacao se compone principalmente por la sección interior llamada cotiledón y la testa o cáscara exterior, ambas cubiertas por una capa de pulpa, tal como se observa en la figura 1.5. En promedio, el cotiledón conforma un 88% del peso seco del grano y la testa el 12% [3].

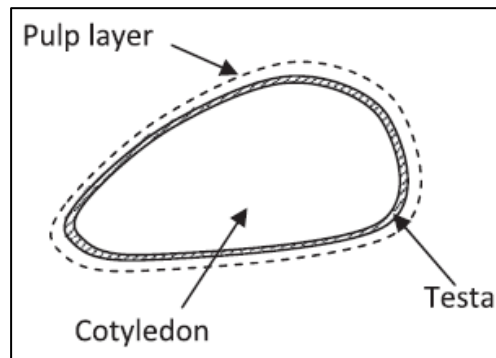


Figura 1.5 Composición superficial del cacao
Fuente: [4]

Para fines prácticos se va a considerar el grano de cacao como una fase sólida de grano de cacao más agua, y al exterior del cacao se modela el aire como una mezcla de aire más vapor de agua.

Estudios anteriores de la Universidad Técnica Equinoccial han calculado las dimensiones que presenta el cacao ecuatoriano y el cacao peruano, y ellos generan los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1 Dimensiones de granos de origen ecuatoriano y peruano
Fuente: [5]

Cultivares de cacao	Variables		
	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
Nacional Ecuador	21.96 ± 0.13	12.32 ± 0.17	8.19 ± 0.09
CCN 51 Ecuador	22.45 ± 0.32	12.79 ± 0.16	8.24 ± 0.36
CCN 51 Perú	24.97 ± 0.40	13.80 ± 0.89	9.78 ± 0.94
ICS 6 Perú	23.39 ± 1.24	12.82 ± 0.34	9.32 ± 1.38

Propiedades térmicas de la almendra de cacao

Las propiedades térmicas de la almendra de cacao definen como va a reaccionar el grano cuando se lo someta a un proceso donde se involucre transferencia de calor y masa. De estudios anteriores, las propiedades cacao se han establecido en función de la temperatura [6]:

- Densidad:

$$\rho_c = -0.008T^2 + 4.7188T + 408.42 \quad (1.1)$$

- Calor específico:

$$C_{p-c} = 0.1569T^2 - 102.51T + 18806 \quad (1.2)$$

- Coeficiente de conductividad térmica:

$$k_c = 2 * 10^{-5}T^2 - 0.0111T + 2.1422 \quad (1.3)$$

- Difusividad:

$$D = 12 * 10^{-4} * \exp\left(-\frac{38000}{8.314 * T}\right) \left[\frac{m^2}{s}\right] \quad (1.4)$$

Donde:

T: Temperatura del cacao [K]

R: Constante de gas universal $\left(8.314 \frac{J}{mol.K}\right)$

1.4.3 Generalidades del secado de cacao

La etapa del secado de cacao es aquella mediante el cual se remueve el exceso de humedad de los granos por calentamiento aplicado y así toma el sabor y aroma a chocolate. La humedad se la debe reducir hasta valores del 6 – 7 %, dado que, si se reduce mucho, la cascara tendera a volverse bien quebradiza [5]. En la figura 1.6 se observa un esquema del proceso de secado de cacao.

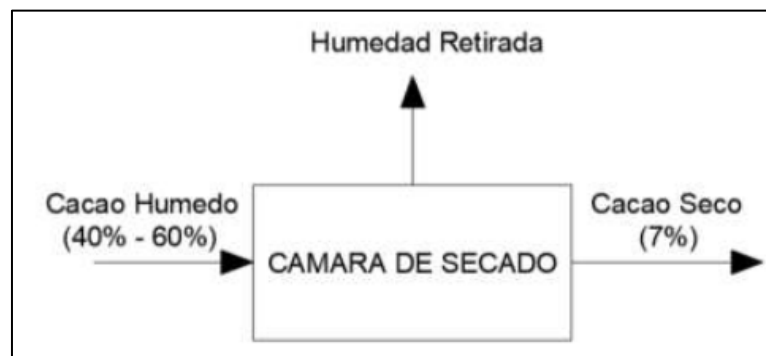


Figura 1.6 Esquema del proceso de secado de cacao
Fuente: [7, p. 50]

En términos generales, el secado hace referencia a retirar el líquido que puede presentar un sólido. La curva típica de secado es como se la observa

en la figura 1.7, donde se mide el contenido de humedad como función del tiempo en horas.

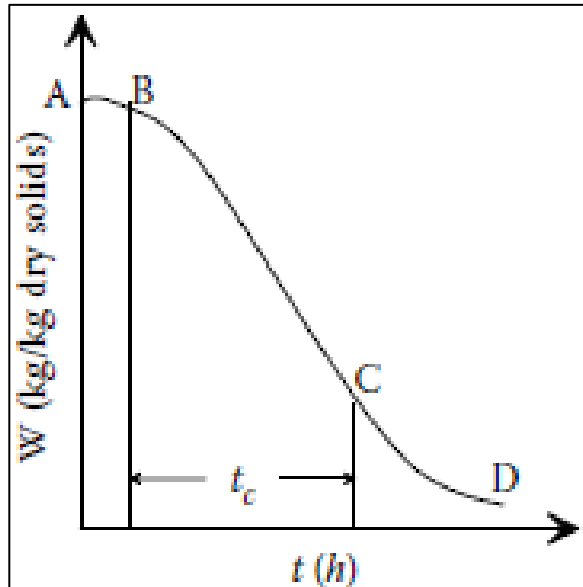


Figura 1.7 Curva típica de contenido de agua en el sólido en función del tiempo

Fuente: [8, p. 254]

Existen dos formas en la cual el proceso del secado de cacao puede realizarse:

- Secado natural

En este tipo de secado se utiliza la energía solar para poder remover el exceso de humedad presente en el producto, estos se los ubican en tendales donde van a recibir directamente el sol [9].

- Secado artificial

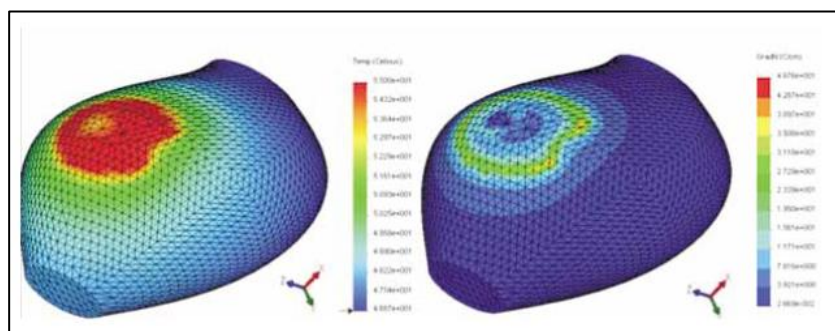
Este método también se lo puede denominar secado por convección forzada, dado que se fuerza a circular aire caliente sobre el grano fermentado. Por ende, es necesario contar con una fuente de energía tal como: leña, electricidad, diésel, etc. Este proceso es de gran relevancia estudiarlo porque se busca optimizar este proceso de secado y buscar mejoras en las propiedades organolépticas del cacao. [9]

Este tipo de secado presenta ventajas respecto al secado natural:

- Dado que el producto no se encuentra al exterior, entonces no tiene contacto con el polvo, desechos, insectos, entre otros.
- Se requiere de menos área para secar el producto.

1.4.4 Estudios realizados sobre el cacao

Se han llevado a cabo estudios del proceso de secado de cacao en el que se analiza la transferencia de calor y masa durante todo el proceso utilizando softwares de simulación computacional. En [4] se utiliza la simulación computacional 3D para analizar la cinética del secado de una almendra de cacao para así poder predecir la proporción de humedad de la almendra de Cacao durante el secado a temperatura constante de 56[C] y a pasos de temperatura de (30.7[C]-43.6[C]-56-9[C] y 54.9[C]-43.9[C]). Además, llegaron a la conclusión de que el encogimiento de la almendra de cacao no es un factor que influya en los resultados teóricos de la simulación. En el trabajo realizado por [10], se utilizó la simulación computacional para estudiar la transferencia de calor entre la bandeja, que sostiene la muestra durante el secado, y la almendra a una temperatura constante de 55[C] sin flujo de aire. Llegando a la conclusión de que se forma un gradiente de temperatura en la superficie del grano de cacao que está en contacto con la bandeja, lo cual genera una distribución de temperatura no homogénea dentro del mismo, tal y como se observa en la figura 1.8.



**Figura 1.8 Lado izquierdo: Temperatura del grano;
Lado derecho: Gradiente de temperatura
Fuente: [10]**

1.4.5 Clasificación de máquinas secadoras de cacao

Secador tipo túnel

Estos equipos hacen fluir el aire caliente en dirección horizontal. Las variables correspondientes a la transferencia de calor y masa son controladas de manera fácil, son largos comparado con las dimensiones de su área transversal, el calentamiento se produce a partir de resistencias eléctricas. Este tipo de secadores es bien común para el secado de frutas [11].

Secador rotatorio

Este secador es recomendable cuando se trata de grandes cantidades del producto, dado que el costo de este equipo es bajo y el tiempo del proceso de secado es corto. El funcionamiento de este equipo consiste en rotar el producto húmedo, el cual está expuesto al flujo de aire caliente que fluye en dirección longitudinal del tambor de secador. [12]

Secador de lecho fluido

Este tipo de secadores presenta gran capacidad de deshidratación, su costo de operación es bajo, este proceso solo es aplicable en producto deshidratados. Este proceso consiste en hacer circular un gas (por lo general, aire) a cierta velocidad, a través del producto para poder tener el estado de fluidización [11].

Secador con bomba de calor

Este tipo de equipos ofrece condiciones de secado suave, buena eficiencia energética, control de los parámetros de secado. Los secadores de bomba de calor operan usando el concepto de ciclo de refrigeración e intercambio de calor con aire seco que circula a través del condensador (aire caliente) y evaporador (aire frío). Este tipo de secadores preserva los ingredientes bioactivos de la muestra a secar. [4]

1.4.6 Modelos matemáticos que gobiernan el movimiento de fluido, transferencia de calor y masa

La **ecuación de la conservación** de masa viene dada por [13]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1.5)$$

Esta ecuación dice que la densidad en un lugar fijo cambia debido a la divergencia de la masa.

Las **ecuaciones de Navier – Stokes**, se encargan de modelar el movimiento de un fluido viscoso newtoniano. Son representadas vectorialmente mediante [13]:

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho g - \nabla P + \mu \nabla^2 V \quad (1.6)$$

A manera general la ecuación que gobierna la **transferencia de calor** está dada por [13]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) \quad (1.7)$$

Y de manera análoga la ley de Fick desarrolla la ecuación de la **transferencia de masa** [13]:

$$\frac{\partial c_j}{\partial t} - \nabla \cdot (D \nabla c_j) = 0 \quad (1.8)$$

Donde:

- $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$
- ρ : Densidad del fluido $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- C_p : Constante de calor específico del fluido $\frac{\text{J}}{\text{mol.K}}$
- k : Conducitividad termica $\frac{\text{W}}{\text{m.K}}$
- V : Campo de velocidad $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
- μ : Viscosidad del fluido $\frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$
- g : aceleración de la gravedad $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- P : Presión $\left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)$
- Y : Concentración $\left(\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg muestra}} \right)$ o $\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right)$
- D : Difusividad entre las fases $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

1.4.7 Softwares que permiten el modelado CFD del secado de cacao

Todo software CFD, trabaja en base a algún método numérico, a continuación, se detallará los tres métodos más usados: Método de

diferencias finitas (MDF), Método de volumen finito (MVF), Método de elementos finitos (MEF) los cuales permiten resolver problemas asociados al flujo de fluido donde intervienen las ecuaciones de conservación de masa, de momentum, energía y especies química. [13].

Método de Diferencias Finitas (MDF)

Éste es el método con más tiempo para poder resolver Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP), el cual fue introducido por Euler en el siglo XVIII. En geometría simples es bien recomendable el uso de este método. Plantear una ecuación diferencial de una **variable ϕ** , es el primer paso del método, esta variable cubre mediante puntos los nodos de una malla. La ecuación diferencial se aproxima en cada nodo mediante aproximaciones finitas usando las series de Taylor, para obtener las diferencias finitas de 1er y 2do orden. Como resultado se obtiene en cada nodo una expresión para ϕ . Como desventaja se presenta que es un método no conservativo, es decir no satisface la conservación de la masa [13].

Método de Volumen Finito (MVF)

Fue desarrollado como una forma del método de diferencias finitas. Este método usa como punto de partida las ecuaciones en forma **integral** de la conservación (masa, momentum, energía y transporte de especies) que se aplican sobre cada volumen de control (VC) existente al interior del dominio. Para cada variable de estudio mencionada anteriormente se calcula su valor en el centroide del VC. El resultado obtenido de este proceso es una ecuación algebraica para cada VC. A diferencia del método anterior (MDF) este método si es aplicable en geometría complejas y si es conservativo. [13]

Método de Elementos Finitos (MEF)

Este método propone que la solución ϕ de una ecuación diferencial puede ser modelada por una combinación lineal de parámetros c_j y funciones apropiadas ϕ_j , es decir
$$\phi = \sum_{j=1}^n c_j \phi_j.$$
 Las funciones ϕ_j se escogen a manera de que puede satisfacer las condiciones de frontera del problema. Este método al no cubrir todo el dominio entonces queda un residual el cual debe ser reducido mediante algún método numérico y así obtener una solución exacta.

Softwares que permite modelar CFD

Comsol: Es un software CAE (Computer Aided Engineering) para realizar simulación multi-físicas de fenómenos físicos 3D como problemas de fluidos, transferencia de calor, transferencia de masa, simulaciones estructurales, etc.

Ansys Fluent: Este software se utiliza principalmente para el modelo de flujo de fluidos y transferencia de calor. Se pueden modelar procesos de flujo de fluido de todo tipo. Usa el método del MVF (Método de volumen finito).

Open Foam: Es un código CFD de código abierto. Este programa se encuentra escrito en C++. El método numérico que se aplica es el MVF en mallas no estructuradas.

Flow 3D: Es un programa computacional de fluidos CFD, creado por FlowScience, incluye los módulos requeridos para el modelado CFD, entre las aplicaciones se tiene: Proceso de fundiciones de acero, ingeniería automotriz.

1.4.8 Importancia del mallado dentro de la simulación CFD

El mallado dentro de una simulación CFD es la división del dominio en subdominios más pequeños, también denominado volúmenes de control, para geometrías 2D están compuestos de triángulos y cuadrados, y para geometrías en 3D los subdominios se componen de hexaedros, tetraedros, etc. Una vez que se ha mallado o realizado el subdominio, las ecuaciones a usar en el modelo se discretizan y posteriormente se resuelven en cada uno de estos elementos. Como se ilustra en la figura 1.9, el dominio computacional se subdivide en celdas o subdominios para dos casos: cuando la geometría es 2D y 3D. En ambas ilustraciones existen límites, en la geometría 2D reciben el nombre de lados y para la geometría 3D el nombre de caras. [14, p. 879].

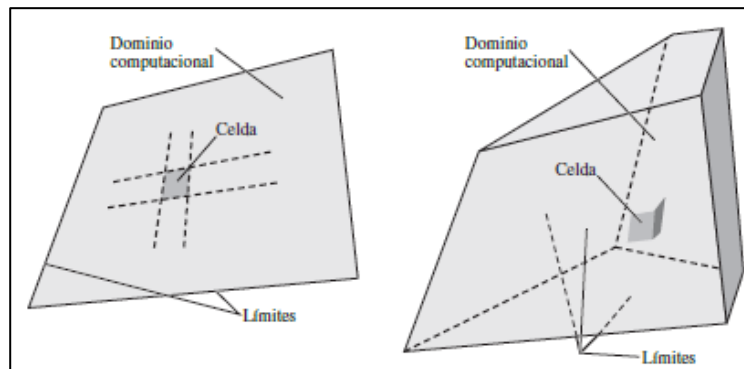


Figura 1.9 Partes de un subdominio computacional en 2D y 3D
Fuente: [14]

Independencia de malla

Un tema que se suele hablar cuando se habla de mallado, es la independencia de malla, esta consiste en que, si se aumentan los números de elementos, los resultados deben cambiar desde el tercer o cuarto decimal. [9]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El objetivo de la presente tesis es desarrollar un modelo CFD que permita validar el fenómeno del secado de un grano de cacao a partir de mediciones experimentales. Por ende, se elaboró un diagrama de flujo que permite describir de manera ordenada la configuración del modelo CFD. Como resultado principal a comparar y analizar es el contenido de humedad teórico-computacional. Se realizó la simulación utilizando el módulo “Fluid and Heat” del software “COMSOL MULTIPHYSICS”, el cual posee submódulos de Transferencia de Calor, Dinámica de Fluidos, Transporte de especies, entre otros. Al ser un software comercial se requiere de una licencia para su uso, por esta razón se contactó con un proveedor de COMSOL Inc. Y se consiguió una licencia de prueba, con número de licencia: 2098865.

2.1 Análisis y alternativas para resolver el problema fluidodinámico

De acuerdo con el objetivo general planteado en el capítulo 1, se requirió simular la transferencia de calor y de masa involucrados en el proceso de secado de cacao por convección forzada. Se priorizó la dimensión del espacio, es decir, si el estudio se llevó a cabo en 2D, 2D axis-simétrico o 3D. Se requirió modelar la geometría de un grano de cacao rodeado por el dominio que ocupa el aire dentro de la maquina secadora. Es de gran importancia este análisis dado que se van a resolver las 4 ecuaciones diferenciales parciales (EDP) que gobiernan el fenómeno de secado, mencionadas en el capítulo 1 por cada celda del modelo a analizar. Se realizó una simulación preliminar sobre el flujo de aire a través de una almendra de cacao.

2.1.1 Alternativa 1 – Simulación 2D

El estudio realizado en una dimensión de espacio 2D de un plano conformado por la sección longitudinal de la geometría en cuestión. El dominio de aire está representado por una geometría rectangular y el dominio de la almendra de cacao, por una elipse (figura 2.1).

Ventaja

Mayor rapidez de cálculos, dado que se requieren menos celdas o volúmenes de control, con respecto a una geometría en 3D.

Desventaja

Resultados menos precisos.

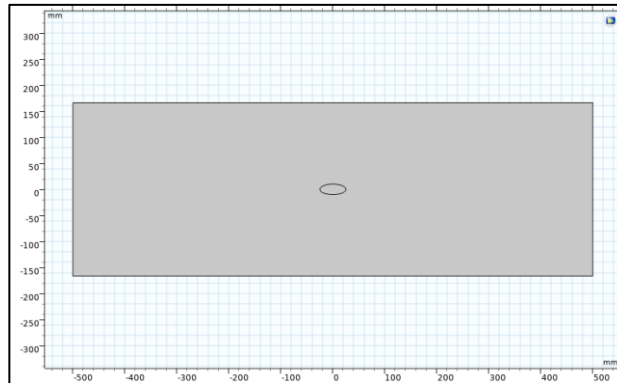


Figura 2.1 Geometría 2D

2.1.2 Alternativa 2 – Simulación 2D Axisimétrica

El estudio en un espacio 2D axis-simétrico permite modelar una geometría 3D a partir de una superficie de revolución, la cual genera un modelo 3D al girar 360 grados con respecto a un eje de revolución.

Ventaja

Se puede realizar cálculos para un modelo 3D, a partir de un modelo revolucionado 2D.

Reducción en el número de cálculos comparado con la geometría en 3D.

Desventaja

Solo pueden ser realizados modelos que sean simétricos.

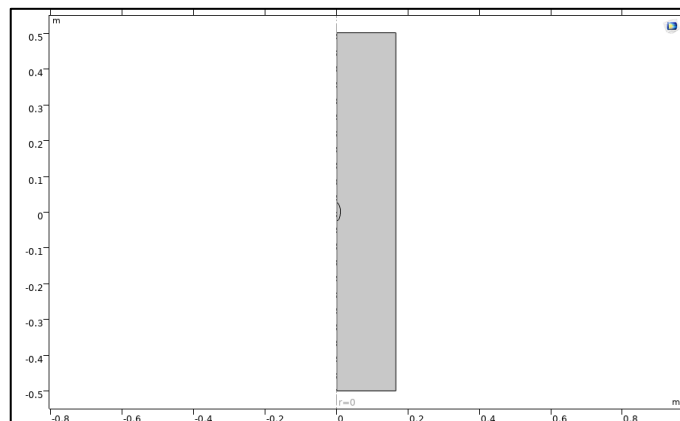


Figura 2.2 Geometría 2D Axis-simétrica

2.1.3 Alternativa 3 – Simulación 3D

Ventaja

Se modela el dominio real, lo cual permite mejor calidad de resultados.

Desventaja

Ocupa una gran cantidad de recursos computacionales para realizar los cálculos.

Requiere mayor número de elementos en la malla.

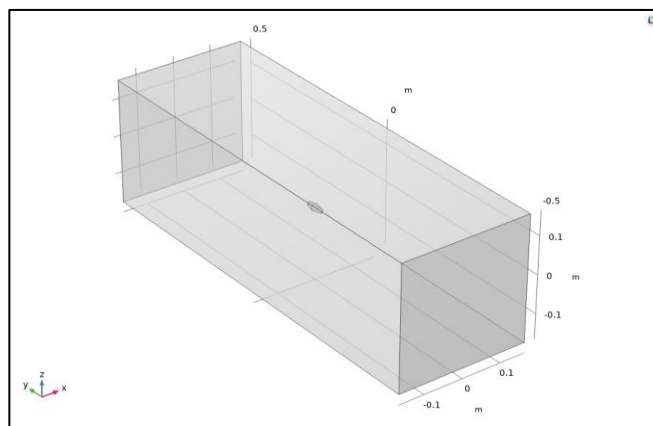


Figura 2.3 Geometría 3D

En la Tabla 2.1 se compara los diversos parámetros que se deben considerar, cuando se desea realizar una simulación, ya sea en un espacio 2D, 2D Axisimétrica o 3D.

Tabla 2.1 Parámetros a tener en cuenta en el espacio del dominio a simular

	2D	2D Axisimétrica	3D
Fiabilidad de resultados		X	X
Ocupa menos recursos computacionales	X	X	
Menor tiempo de simulación	X		
Facilidad para ingresar condiciones de frontera	X	X	
Modelar un dominio tridimensional		X	X

2.2 Matriz de decisión para selección del mejor modelo

A continuación, en la tabla 2.2 se evaluó los parámetros planteados para cada geometría, siendo 1: Baja importancia y 5: Alta importancia.

Tabla 2.2 Matriz de selección del mejor modelo

	Fiabilidad de resultados	Ocupa menos recursos computacionales	Menor tiempo de simulación	Facilidad para ingresar condiciones de frontera	Modelar dominio tridimensional	Total
2D	1	5	5	5	1	17
2D axis	4	3	4	5	5	21
3D	5	1	1	3	5	15

El modelo que cumplió de mejor manera con los parámetros mencionados es el modelo 2D axis- simétrico. No obstante, para fines didácticos se va a mostró resultados de campo de velocidad y campo de temperatura para los modelos 2D y 3D.

Los demás resultados fueron netamente los que se obtuvieron a partir del modelo 2D axis – simétrico.

2.3 Simulación

Para realizar el modelo CFD del proceso de secado de cacao, se planteó un diagrama de trabajo dividido por etapas. Después de conocer el problema, se plantearon los parámetros que se ingresan al modelo y las variables que se deben obtener como resultado. De acuerdo con los parámetros establecidos, se estructuró el modelo. Se empezó por la geometría del problema, estableciendo 2 dominios: Aire y Cacao. Al conocer que la física involucrada en el proceso de secado son transferencia de masa y transferencia de calor, se utilizaron los módulos del software para recrear dichos fenómenos. Se construyó la malla de la geometría y resolvió el modelo planteado. Finalmente, los resultados fueron comparados con datos de pruebas experimentales para determinar la validez de la simulación. Si es que el modelo no cumplía los requisitos, se debían realizar ajustes hasta que se cumplieran.

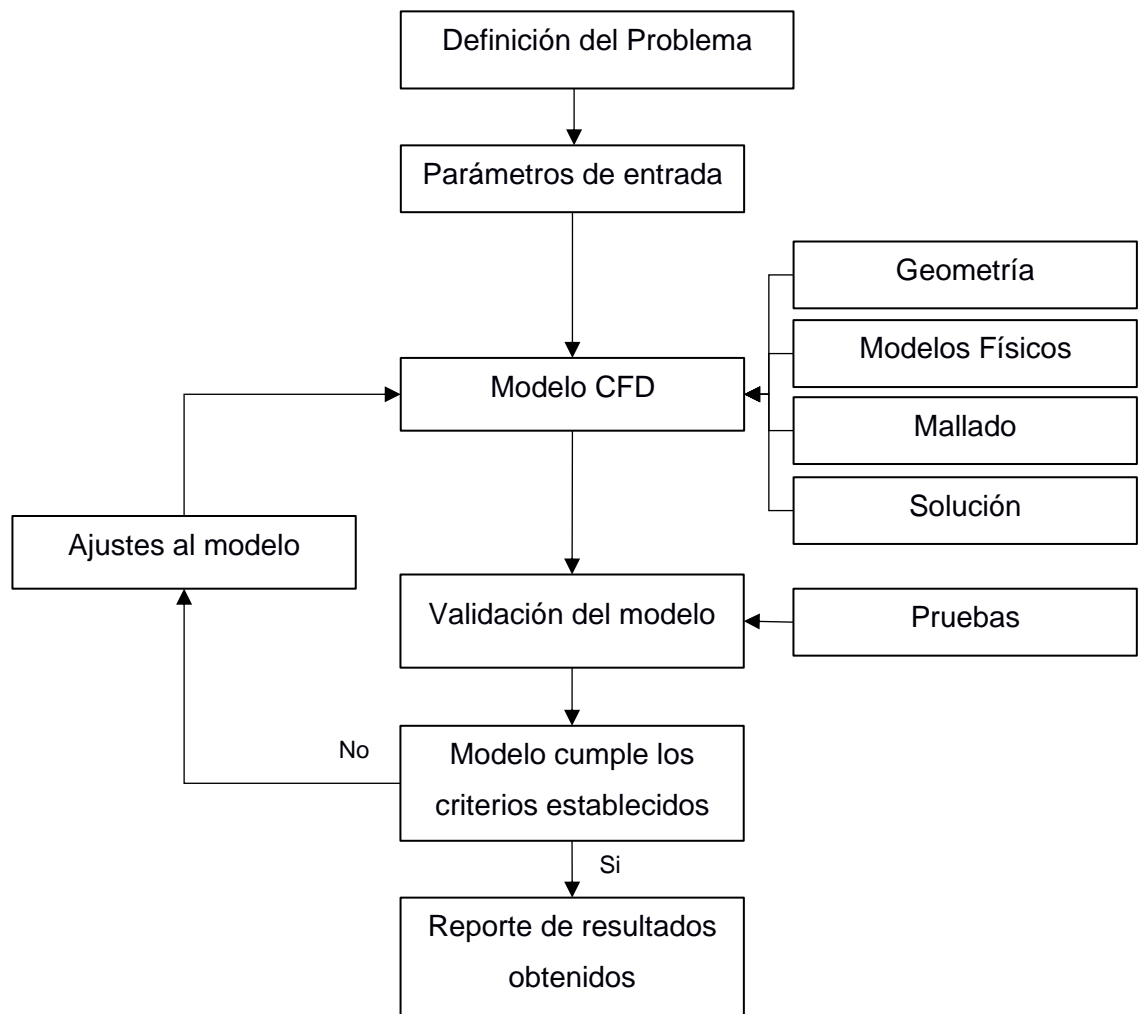


Figura 2.4 Diagrama de flujo del modelado CFD

2.3.1 Geometría

El modelado del dominio computacional fue realizado en base al secador de cacao horizontal de bandejas ubicado en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción. A partir de lo dicho anteriormente, el dominio de aire es un ducto rectangular de 50cm*50cm*2m. Pero bajo la condición de que el fluido se considera completamente desarrollado entonces 50cm*50cm*0.8m y el dominio del grano de cacao, se lo modelo como un elipsoide de 12.3mm*12.3mm*22mm, en base a la Tabla 1.1, donde se detalla que es un cacao ecuatoriano. El modelo real es tal cual se muestra en la Figura 2.3.

2.3.2 Materiales

Se especificó el tipo de materiales de los dominios que estuvieron involucrados en la simulación. De acuerdo con el modelo geométrico, se definieron 2 materiales: **Cacao y Aire** (Sólido y Fluido, respectivamente). El material aire se eligió de la librería de materiales **predeterminado** de COMSOL, el cual incluye propiedades como densidad, calor específico, conductividad térmica, viscosidad, etc.; propiedades basadas en funciones analíticas y por partes, definidas entre intervalos que dependen de variables como temperatura y presión.

Por otro lado, el material cacao se definió manualmente. Se establecieron las propiedades densidad, calor específico, conductividad térmica y coeficiente de difusión, a partir de ecuaciones obtenidas del trabajo de investigación [4]. Las funciones dependen de la temperatura del sólido. Estos parámetros son presentados en la Tabla 2.2 en la sección 2.2.3

2.3.3 Modelos físicos implicados y parámetros de entrada

2.3.3.1 Modelos matemáticos usados

El software COMSOL, posee diversos módulos para resolver un determinado problema, y entre los módulos usados se tiene:

- Módulo de flujo **turbulento**, k-e:

Mediante este módulo es posible obtener el campo de velocidad y de presión en el dominio de fluido

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho g - \nabla P + \mu \nabla^2 u \quad (2.2)$$

- Transferencia de calor en **sólidos y fluidos**:

Este modelo permite calcular la temperatura en el dominio de fluido (aire húmedo) y el dominio sólido (grano de cacao).

- Fluido

$$\rho_{air} C_{p-air} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{air} C_{p-air} u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (-k_{air} \cdot \nabla T) \quad (2.3)$$

- Solido

$$\rho_c C_{p-c} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (-k_c \cdot \nabla T) \quad (2.4)$$

- **Concentración** de especies diluidas:

Este módulo determina como disminuye concentración de humedad dentro del dominio del grano de cacao.

$$\frac{\partial c_j}{\partial t} - \nabla \cdot (D_j \nabla c_j) = 0 \quad (2.5)$$

2.3.3.2 Parámetros de simulación

A continuación, en la tabla 2.3 se enlista los parámetros necesarios para realizar esta simulación en el software.

Tabla 2.3 Parámetros necesarios a insertar en los módulos

Geometría	
Dimensiones del ducto (cm*cm*cm)	50*50*80
Dimensión del grano (mm*mm*mm)	8.19*12.32*21.96
Datos del aire a la entrada del ducto	
Temperatura (°C)	40°C - 50°C - 60°C
Humedad (%)	15-30%
Velocidad (m/s)	1
Propiedades del grano	
Densidad (kg/m ³)	ρ_c
Calor específico a presión constante [J/(kg.K)]	C_{p-c}
Conductividad térmica [W/(m.K)]	k_c
Difusividad del aire-grano (m ² /s)	D
Datos iniciales del grano	
Temperatura (°C)	24
Concentración de humedad (mol/m ³)	68341

2.3.3.3 Coeficientes de transferencia de calor y masa 21eóricos

Como dato adicional si se desea replicar este experimento sin resolver las ecuaciones de Navier Stokes para hallar el campo de velocidad, se puede hacer uso del coeficiente de transferencia de calor $h_t \left[\frac{W}{m^2.K} \right]$ y el coeficiente de transferencia de masa $h_m \left[\frac{m}{s} \right]$, los cuales pueden ser obtenidos mediante las correlaciones del número de Nusselt y la correlación del número de Sherwood

A continuación, se explican como determinar dichos coeficientes:

Nusselt: Correlación para transferencia de calor [4]

$$Nu = 2 + 0.552 * Re^{0.53} * Pr^{1/3} \quad (2.6)$$

Reynolds

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (2.7)$$

Schmidt

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (2.8)$$

Sherwood: Correlación para transferencia de masa [4]

$$Sh = 2 + 0.552 * Re^{0.53} * Sc^{1/3} \quad (2.9)$$

Coefficiente de transferencia de calor

$$h_t = \frac{Nu * k}{d} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (2.10)$$

Coefficiente de transferencia de masa

$$h_m = \frac{Sh * D}{d} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.11)$$

Donde:

- Nu: Número de Nusselt
- Re: Número Reynolds
- Pr: Número de Prandtl
- Sc: Número de Schmidt
- U: Velocidad media (m/s)
- d: diámetro del eje mayor de la elipse
- ν : Viscosidad cinemática (m²/s)
- k: Conductividad térmica $\left(\frac{W}{m.K} \right)$
- D: Difusividad (m²/s)
- h_t : Coeficiente de transferencia de calor $\left(\frac{W}{m^2K} \right)$
- h_m : Coeficiente de transferencia de masa (m/s)

Pasos:

1. Se determinan las propiedades (aire) de viscosidad cinemática (ν), número de Prandtl (Pr) y conductividad térmica k .
2. Se calcula el número de Reynolds.
3. Se procede a determinar el número de Nusselt y por consiguiente el coeficiente de transferencia de calor.
4. Finalmente se calcula el coeficiente de transferencia de masa mediante el número de Sherwood.

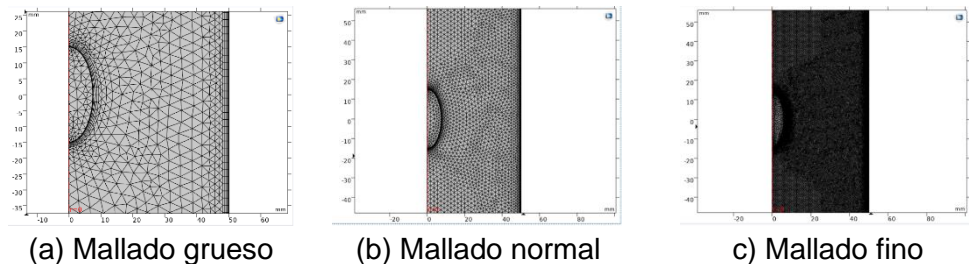
2.3.3.4 Coeficientes de transferencia de calor y masa simulados

Se realizó una simulación por separado donde incluye las físicas de flujo de fluido y transferencia de calor en sólidos y fluidos con el fin de determinar el coeficiente global de transferencia de calor. Posteriormente mediante la ecuación de Chilton y Colburn (Ecuación 2.12) se calcula el coeficiente global de transferencia de masa. Lo mencionado anteriormente se muestra en el capítulo 3, sección 3.1.4. la ecuación de Chilton y Colburn [15].

$$h_m = \frac{D}{k} \left(\frac{k}{\rho c_p D} \right)^{1/3} h_t \quad (2.12)$$

2.3.4 Mallado

Se definió el mallado de la geometría haciendo que esté controlada por la física. Es decir, la malla está **controlada por los módulos de física establecidos**. El tamaño de los elementos de la malla se adaptó a la geometría, refinando la malla en la frontera entre ambos dominios. De tal modo, se logra replicar mejor las condiciones de frontera con una malla distribuida uniformemente. Además, el tamaño de elementos se establece por rangos desde tamaño grueso hasta extremadamente fino. En la figura 2.5 se muestra diferencias entre un mallado grueso, normal y fino.



(a) Mallado grueso (b) Mallado normal (c) Mallado fino
Figura 2.5 Diversos tamaños de mallado controlado por la física
Fuente: [Propia, tomada de Comsol]

Una de las variables que se verificó fue la **independencia de malla**, Se realizó la simulación con mallas de distinto tamaño de elementos; para así determinar el tipo de malla que reproduzca resultados más certeros y con mejor aprovechamiento de recursos computacionales.

2.3.5 Solución

Se realizó un estudio **estacionario** y otro **temporal**. El **estacionario** se utilizó para resolver el modelo del flujo de aire a través de la almendra de cacao. En cambio, el estudio **temporal** se utilizó para solucionar la transferencia de Calor y Transferencia de masa del proceso, y así obtener resultados en función del tiempo.

2.4 Parámetros usados en el procesamiento de resultados

Error individual para cada instante de tiempo:

$$\%E_i = \frac{|V_{experimental} - V_{simulado}|}{V_{experimental}} * 100 \quad (2.13)$$

Valor promedio del error relativo:

$$\%E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \%E_i \quad (2.14)$$

2.5 Pruebas experimentales

En la Tabla 2.3 se presentan los resultados determinados en los experimentos realizados por parte de la ESPOL, FIMCP, Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable (CDTS). El secador utilizado para las pruebas experimentales es tipo bandeja de dimensión ducto rectangular.

Las condiciones de trabajo fueron:

- Temperatura del aire: 40°C - 60°C

- Humedad del aire: 30-35%
- Velocidad del aire: 1 – 1.5 m/s
- Dimensiones del cacao: 12.3mm*12.3mm*22mm
- Contenido de humedad inicial del cacao: $1.11 \frac{g_{H_2O}}{g_{solido\ seco}}$
- Tiempo de secado: 14 – 19 horas
- Masa inicial de la muestra: 200 gr
- Masa final de la muestra: 94 -94.6 gr

Datos obtenidos de las pruebas experimentales:

Tabla 2.4 Datos obtenidos de masa del grano en gramos (Cacao fino)

t(h) \ T (°C)	Masa (gramos)		
	40 °C	50 °C	60 °C
0	200	200	200
1	168.6	163.9	154.2
2	142.1	131.2	145
3	126.9	122.2	128.4
4	119.5	115	116.3
5	115.3	111.4	112.2
6	112.3	108.8	108
7	108	105.3	104.6
8	105.6	102.9	102.1
9	103.3	100.6	100.1
10	100.7	98.5	98.5
11	99.2	97.4	96.4
12	98.1	96.8	95.1
13	97.2	96	94.2
14	96.6	95.3	94
15	96	95	-
16	95.6	94.3	-
17	95	-	-
18	94.6	-	-

Tabla 2.5 Datos obtenidos de masa del grano en gramos (Cacao CCN51)

t(h) \ T (°C)	Masa (gramos)		
	40 °C	50 °C	60 °C
0	200	200.00	200
0.5	198.2	192.50	184.2
1	193.2	185	176.4
1.5	186.7	176.4	171.4
2	181.2	174.2	168.7
3	175.7	172.1	162.1
4	171.2	169	158
5	166.8	165.8	154.1
6	163.1	161.8	150.2
7	160.1	158.4	147
8	154.8	148.4	143.2
9	150.5	141.1	128.3
10	146.5	135.5	124.1
11	143.1	128.8	120.4
12	141.7	124	117.5
13	138.3	119.7	113.2
14	134.8	112.2	110.1
15	132.1	109	107
16	129	106.4	104.4
17	127	104.6	100.4
18	122	102.9	99.1
19	120.5	101.4	98.1
20	117.5	100.5	98
21	114	98.8	-
22	110.2	98.2	-
23	106	-	-
24	104	-	-
25	102	-	-
26	100	-	-
27	98	-	-
28	98	-	-

Datos procesados de las pruebas experimentales

Tabla 2.6 Cálculo del contenido de humedad en Base seca, Cacao Fino

t(h) \ T (°C)	Humedad (g H ₂ O/g ss)		
	40 °C	50 °C	60 °C
0	1,173913	1,173913	1,173913
1	0,832609	0,781522	0,676087
2	0,544565	0,426087	0,576087
3	0,379348	0,328261	0,395652
4	0,298913	0,25	0,26413
5	0,253261	0,21087	0,219565
6	0,220652	0,182609	0,173913
7	0,173913	0,144565	0,136957
8	0,147826	0,118478	0,109783
9	0,122826	0,093478	0,088043
10	0,094565	0,070652	0,070652
11	0,078261	0,058696	0,047826
12	0,066304	0,052174	0,033696
13	0,056522	0,043478	0,023913
14	0,05	0,03587	0,021739
15	0,043478	0,032609	-
16	0,03913	0,025	-
17	0,032609	-	-
18	0,028261	-	-
19	0,028261	-	-

Tabla 2.7. Cálculo del contenido de humedad en Base seca, Cacao CCN51

t(h) \ T (°C)	Humedad (g H ₂ O/gss)		
	40 °C	50 °C	60 °C
0	1,08333	1,083333	1,083333
0,5	1,06458	1,005208	0,91875
1	1,0125	0,927083	0,8375
1,5	0,94479	0,8375	0,785417
2	0,8875	0,814583	0,757292
3	0,83021	0,792708	0,688542
4	0,78333	0,760417	0,645833
5	0,7375	0,727083	0,605208
6	0,69896	0,685417	0,564583
7	0,66771	0,65	0,53125
8	0,6125	0,545833	0,491667
9	0,56771	0,469792	0,336458
10	0,52604	0,411458	0,292708
11	0,49063	0,341667	0,254167
12	0,47604	0,291667	0,223958
13	0,44063	0,246875	0,179167
14	0,40417	0,16875	0,146875
15	0,37604	0,135417	0,114583
16	0,34375	0,108333	0,0875
17	0,32292	0,089583	0,045833
18	0,27083	0,071875	0,032292
19	0,25521	0,05625	0,021875
20	0,22396	0,046875	0,020833
21	0,1875	0,029167	-
22	0,14792	0,022917	-
23	0,10417	-	-
24	0,08333	-	-
25	0,0625	-	-
26	0,04167	-	-
27	0,02083	-	-
28	0,02083	-	-

Curva de secado

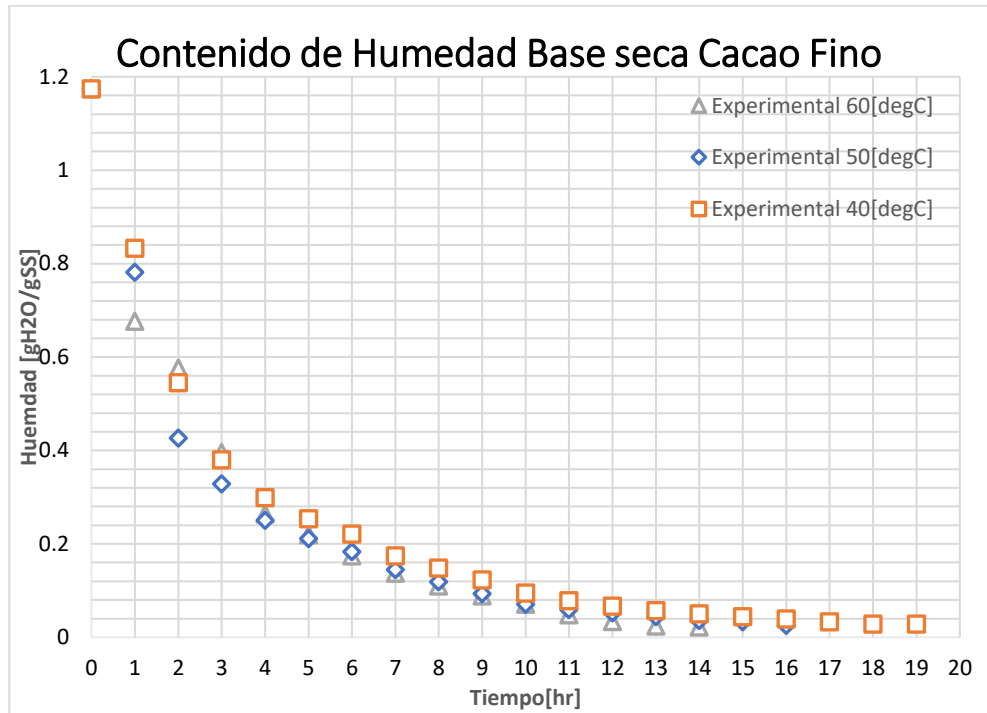


Figura 2.6 Variación del contenido de humedad de la muestra en función del tiempo a diversas temperaturas

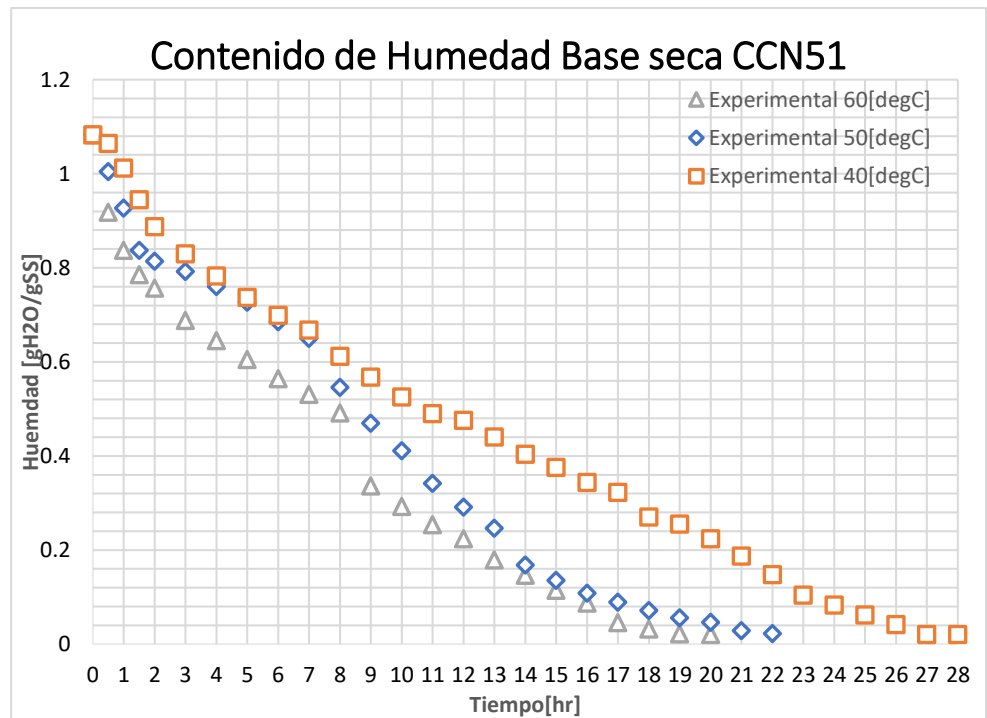


Figura 2.7. Variación del contenido de humedad de la muestra en función del tiempo a diversas temperaturas

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Resultados

En esta sección se describen los resultados obtenidos de las simulaciones usando el programa COMSOL Multiphysics 5.6. Los datos obtenidos de la simulación son procesados en forma de gráficas o imágenes en los que se puede apreciar visualmente las soluciones de las ecuaciones de los fenómenos físicos que intervienen en el proceso de secado de cacao. Se pueden obtener resultados a partir de contornos o puntos específicos de los contornos que forman parte de cada geometría.

3.1.1 Post procesamiento de resultados teórico-computacionales

3.1.1.1 Resultados del modelo 2D

En la figura 3.1 y 3.2 se muestra la variación de temperatura de la superficie de la almendra de cacao al ser calentada por aire a temperaturas de entrada de 40°C, 50°C, 60°C; y el cambio de la concentración de humedad a dichas temperaturas, para cada intervalo de tiempo.

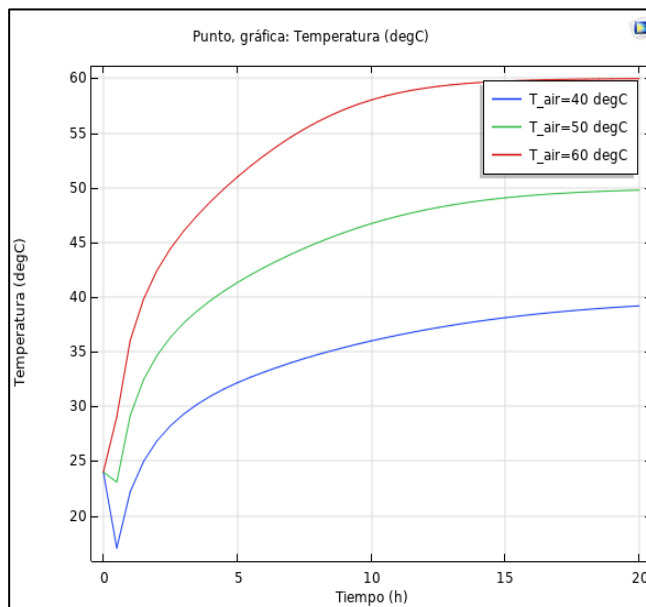


Figura 3.1. Temperatura del Cacao vs tiempo para diferentes temperaturas de aire, modelo 2D

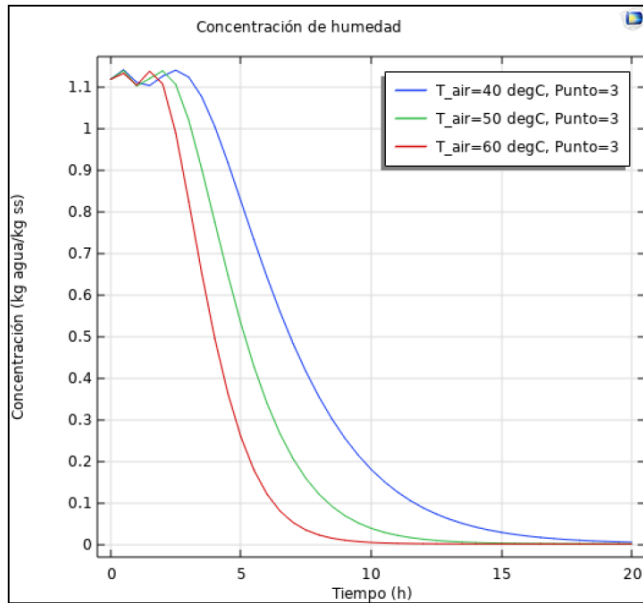


Figura 3.2. Concentración de humedad del Cacao vs tiempo para diferentes temperaturas de aire, modelo 2D

3.1.1.2 Resultados del modelo 2D axis-simétrico

En la figura 3.3 se observa la variación de la temperatura en la superficie de la almendra de cacao al ser calentada por aire a temperaturas de entrada de 40°C, 50°C, 60°C. El cambio de la concentración de humedad se analiza independientemente en una gráfica para cada temperatura, desde la figura 3.6 a la 3.8. La figura 3.4 muestra los puntos de evaluación en la geometría del cacao al que se analiza cada parámetro.

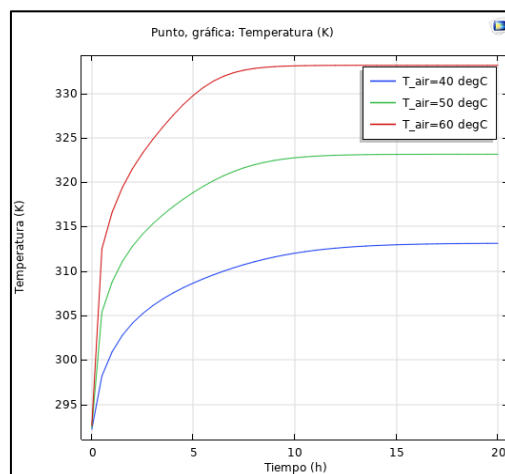


Figura 3.3. Temperatura del Cacao vs tiempo para diferentes temperaturas de aire, modelo 2D axis-simétrico

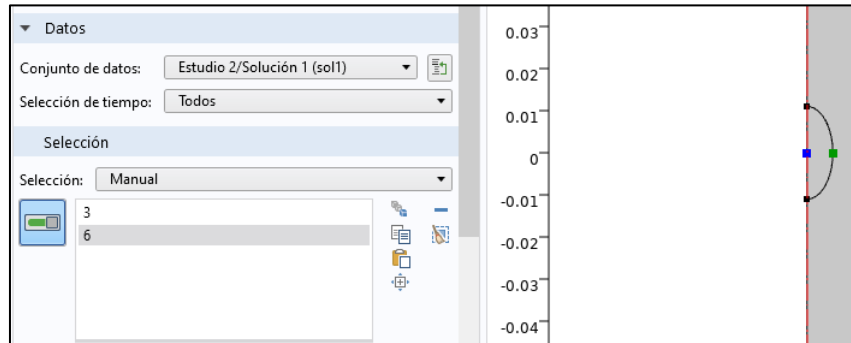


Figura 3.4 Puntos de análisis en la geometría del Cacao, modelo 2D axis-simétrico

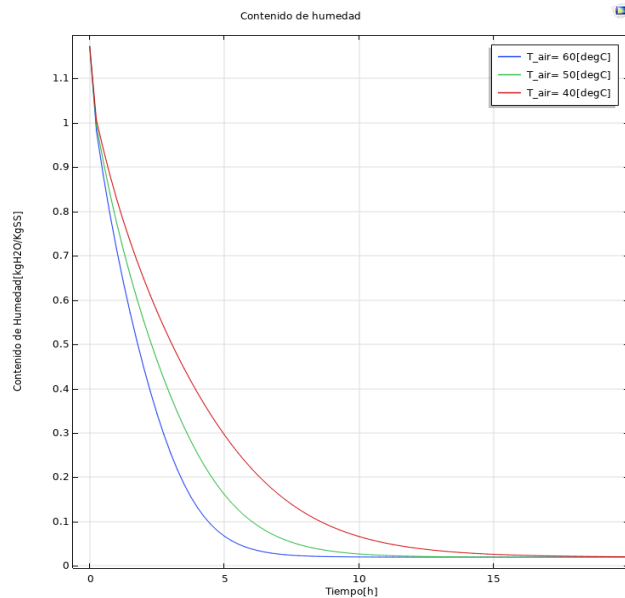


Figura 3.5 Concentración de humedad del Cacao vs tiempo para temperaturas de aire, modelo 2D axis-simétrico

3.1.1.3 Resultados del modelo 3D

En los resultados obtenidos del modelo 3D se aprecia como cambia la temperatura y concentración en el contorno de la almendra de cacao con respecto al tiempo, en las figuras 3.7 y 3.6. Se consideró el análisis de una sola temperatura por la alta demanda de recursos computacionales que requiere realizar una simulación en un espacio tridimensional. Se eligió la temperatura de entrada de aire de 60 [°C].

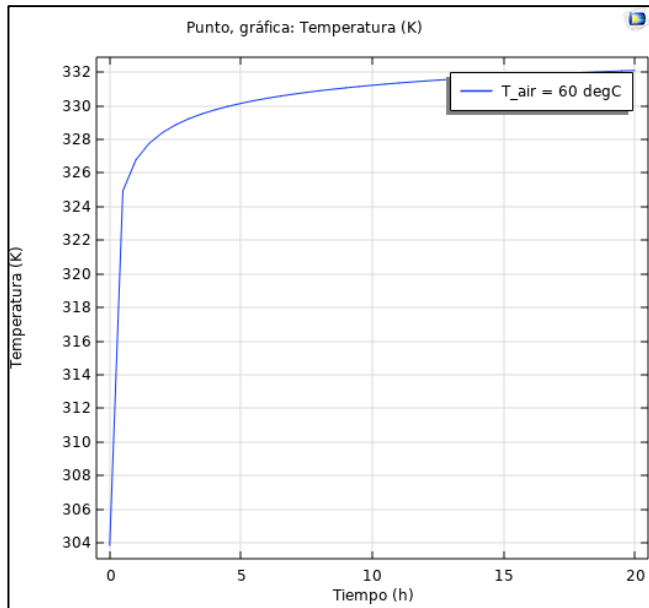


Figura 3.6 Temperatura del Cacao vs tiempo para temperatura del aire a 60[°C], modelo 3D

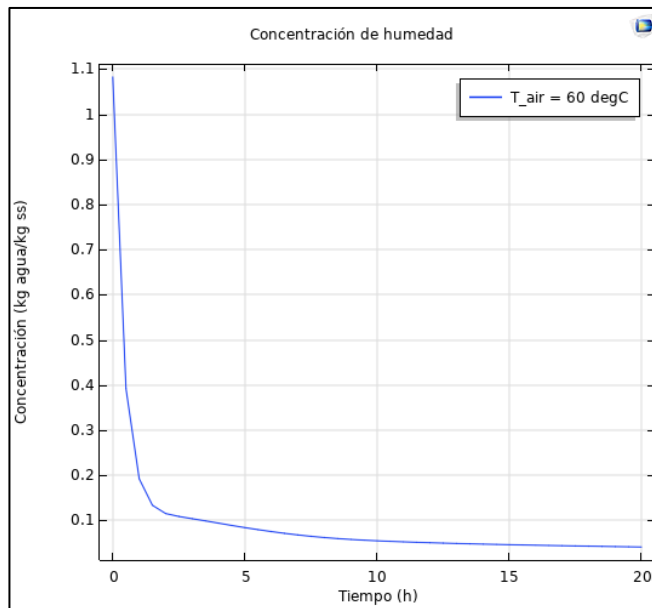


Figura 3.7 Concentración de humedad del Cacao vs tiempo para temperatura del aire a 60[°C], modelo 3D

3.1.2 Campos de velocidad

En la figura 3.8 se pueden observar los contornos de velocidad para los modelos 2D, 2D axis-simétrico y 3D respectivamente. El flujo de aire avanza en una sola dirección, desde un contorno de entrada hasta uno de salida.

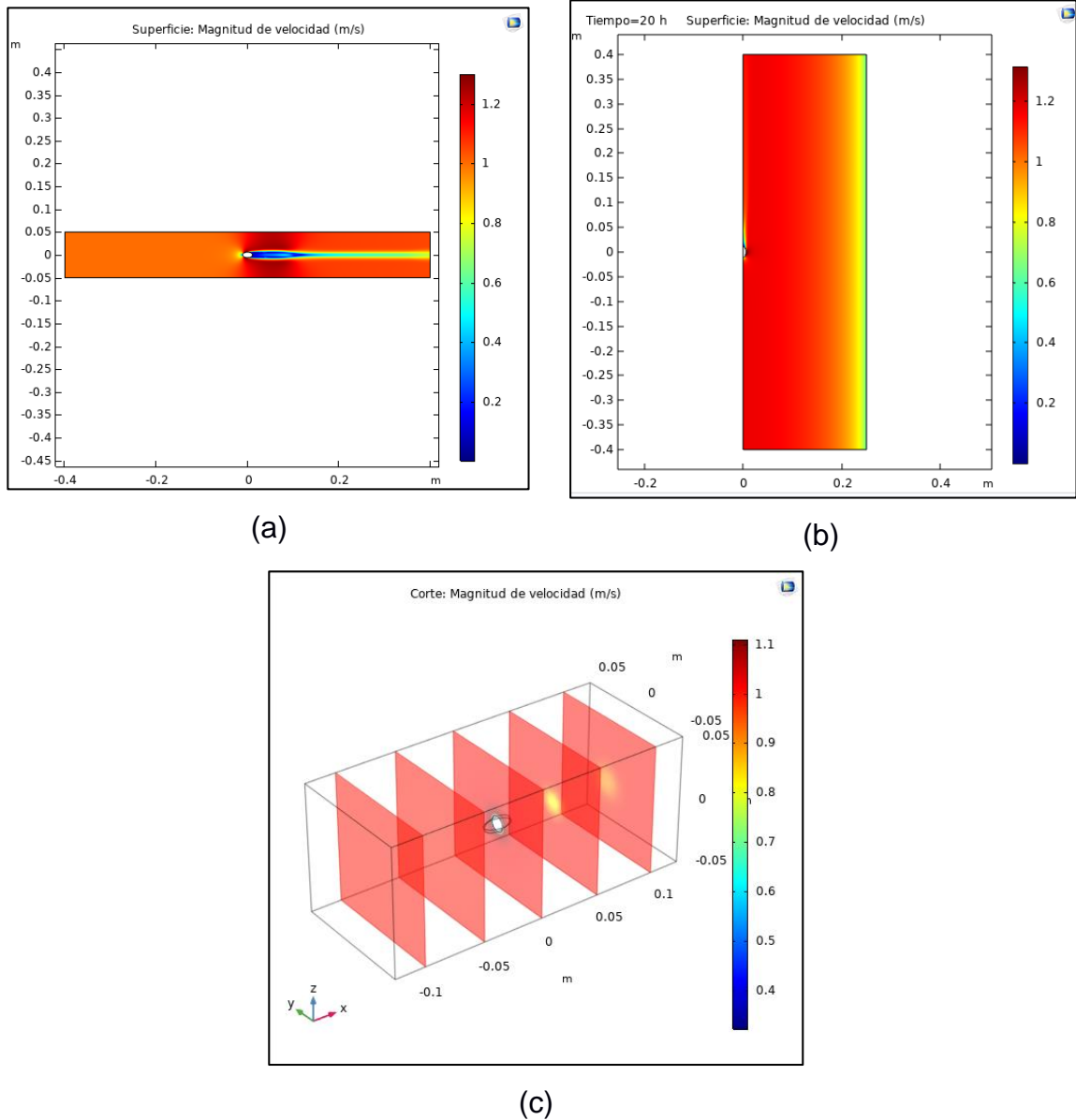
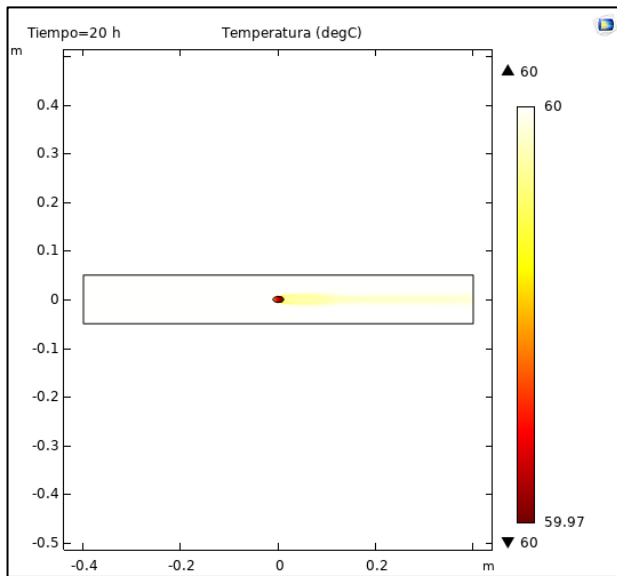


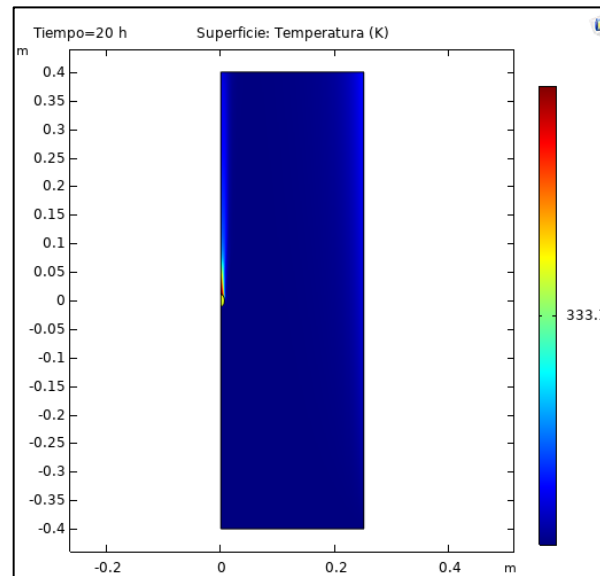
Figura 3.8 Campos de velocidad (a) Modelo 2D; (b) Modelo 2D axisimétrico; (c) Modelo 3D

3.1.3 Distribución de temperatura

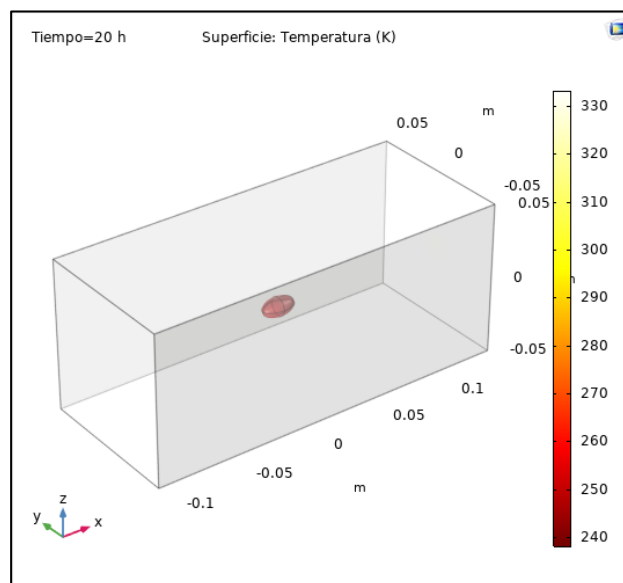
En la figura 3.9 se pueden observar la distribución de temperatura para los modelos 2D, 2D axis-simétrico y 3D respectivamente. Se aprecia la distribución de temperatura para el dominio del fluido como para el dominio del sólido. Los perfiles son mostrados para un tiempo de simulación de 20[h], tiempo en el que se ha llegado a una temperatura de equilibrio entre ambos dominios.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.9 Distribución de temperatura (a) Modelo 2D; (b)Modelo 2D axis-simétrico; (c) Modelo 3D

3.1.4 Estudio de la Independencia de malla

Se realizó el análisis de independencia de malla para determinar el tamaño de malla óptima al que ya no se observan cambios en los datos simulados, aunque se aumente el número de los elementos de la malla. En el estudio

se realizó la simulación del contenido de humedad en base seca a una temperatura de 60[°C] para 4 tipos de mallas con número de elementos que van desde los 14301 hasta 155555.

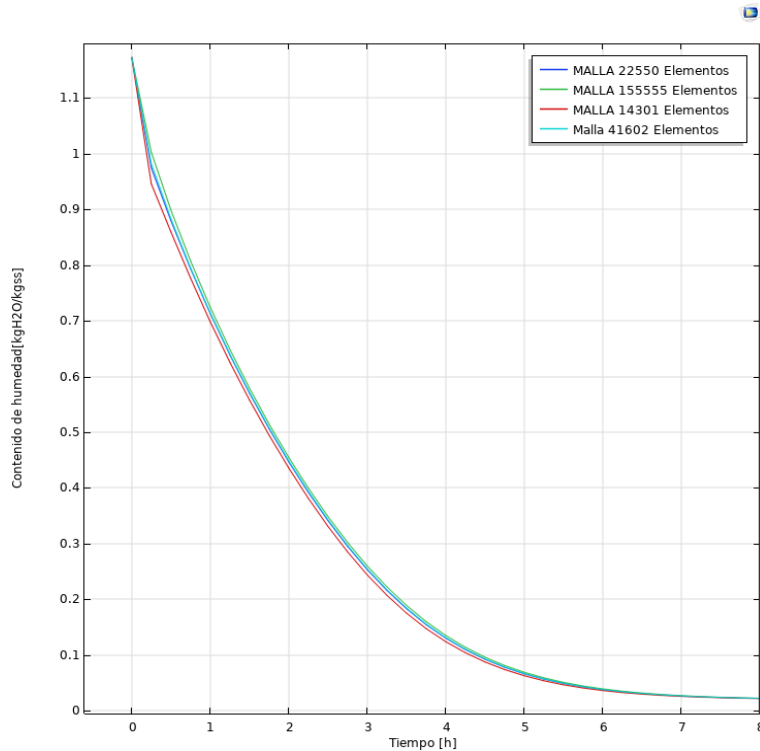


Figura 3.10 Estudio de independencia de malla de la simulación

3.1.5 Coeficientes convectivos de calor y masa

A partir de los resultados de la simulación, con los módulos de flujo turbulento k-e, transferencia de calor en sólidos y fluidos para estado estacionario, se simularon los coeficientes de transferencia de calor locales para una misma velocidad de entrada de fluido, pero a diferentes temperaturas. Con el coeficiente de transferencia de calor promedio se calculó el coeficiente global de transferencia de masa para cada temperatura, utilizando la analogía de Chilton-Colburn ecuación 2.9.

3.1.5.1 Coeficiente global de transferencia de calor convectivo

El coeficiente de transferencia de calor convectivo se calculó alrededor del contorno de la elipse (figura 3.11). En la figura 3.12 se graficó el

coeficiente de transferencia de calor convectivo local para cada posición a lo largo del contorno de la elipse. Posteriormente, se determinó el valor global (promedio) para cada temperatura de entrada de aire.

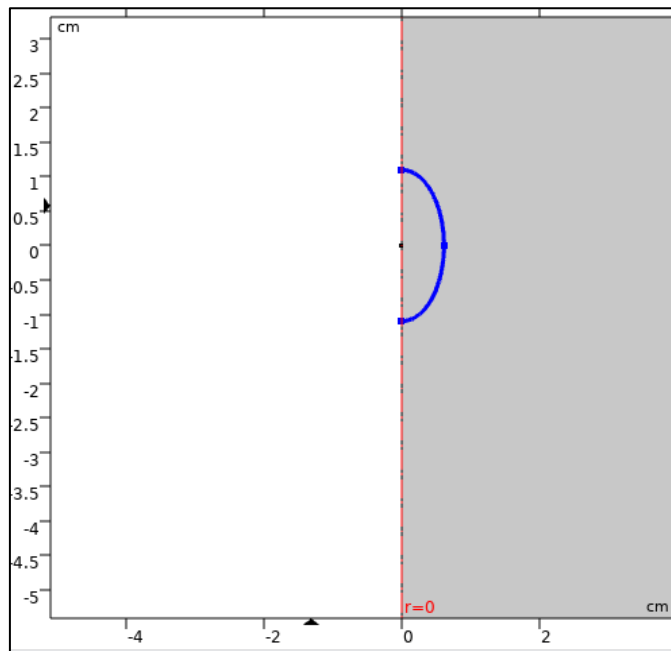


Figura 3.11 Contorno del grano para una geometría 2D axis-simétrico

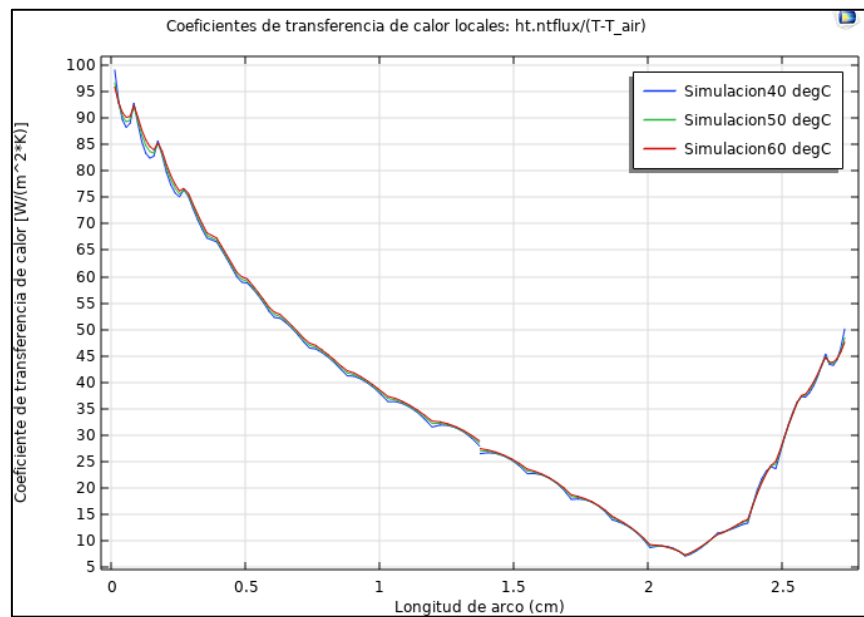


Figura 3.12 Coeficiente de transferencia de calor local para cada posición a lo largo del contorno de la elipse

A partir de la integración de línea, se obtuvieron los valores globales o promedio del coeficiente de transferencia de calor convectivo para las temperaturas de entrada del aire, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\bar{h}_t = \frac{\int_l q_n dL}{(T - T_\infty)} \quad (3.1)$$

Tabla 3.1 Valores globales del coeficiente de transferencia de calor convectivo

Temperatura[°C]	$\bar{h}_t \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$
40 °C	32.05
50 °C	32.27
60 °C	32.51

3.1.5.2 Coeficiente global de transferencia de masa

Con la ecuación 2.9, se procedió a determinar el coeficiente global de transferencia de masa:

Tabla 3.2 Cálculo del coeficiente del coeficiente de transferencia de masa global simulado

$T(^{\circ}C)$	$D \left[\frac{m^2}{s} \right]$	$k \left[\frac{W}{mK} \right]$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$c_p \left[\frac{J}{kgK} \right]$	$\bar{h}_m \left[\frac{m}{s} \right]$
40	5.46 E-10	0.02726	1.118	1008	2.28 E-5
50	8.58 E-10	0.028	1.085	1008	3.07 E-5
60	13.1 E-10	0.02874	1.052	1008	4.07 E-5

Tabla 3.3 Valores globales del coeficiente de transferencia de masa

Temperatura[°C]	$\bar{h}_m \left[\frac{m}{s} \right]$
40 °C	2.28 E-5
50 °C	3.07 E-5
60 °C	4.07 E-5

3.1.5.3 Error relativo de los coeficientes convectivos entre los valores simulados y teóricos

En la Tabla 3.4 se encuentra un resumen de los valores globales obtenidos de la simulación y los valores calculados con las correlaciones encontradas en la literatura, para cada temperatura. Además, se calculó el error relativo entre los valores teóricos y los teórico-computacionales:

Tabla 3.4. Error relativo del coeficiente de transferencia de calor y coeficiente de transferencia de masa para cada temperatura de aire

	$T_{air}(^{\circ}C)$	Simulación	Correlación	Error (%)
$\bar{h}_t \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	40	32.05	29.41	8.97
	50	32.27	29.43	9.65
	60	32.51	29.47	10.31
$\bar{h}_m \left[\frac{m}{s} \right]$	40	2.28 E-5	1.92 E-5	9.76
	50	3.07 E-5	2.57 E-5	19.45
	60	4.07 E-5	3.38 E-5	20.41

3.1.6 Comparación de resultados teórico-computacionales con los resultados de las pruebas experimentales

Se determinó que es suficiente realizar la simulación en un espacio 2D axisimétrico, ya que aprovecha los recursos computacionales al máximo y los tiempos de computación no son extensos. Además, el modelo 2D axisimétrico cumple con el objetivo de modelar una geometría tridimensional. Los resultados computacionales (figura 3.13, 3.14 y 3.15), fueron procesados mediante el cálculo del valor promedio de la concentración de humedad para cada instante de tiempo a lo largo del semieje b (línea roja) de la figura 3.13; e asumió que la distribución de concentración de humedad va en dirección radial desde el centro hasta la superficie del sólido. Estos datos son comparados con los resultados del secado de cacao fino y cacao CCN51, expresados en contenido de humedad en base seca.

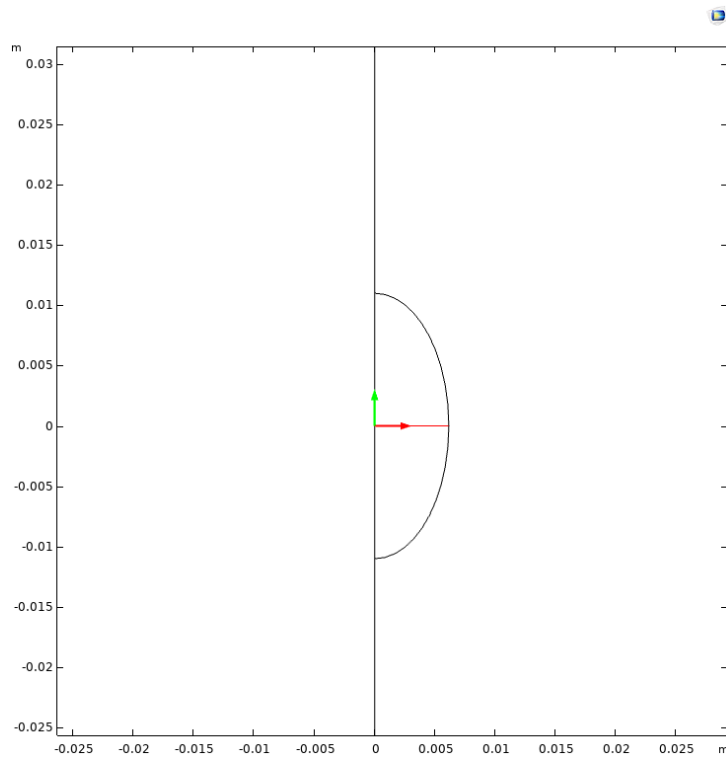


Figura 3.13 Línea de corte a lo largo del semieje menor

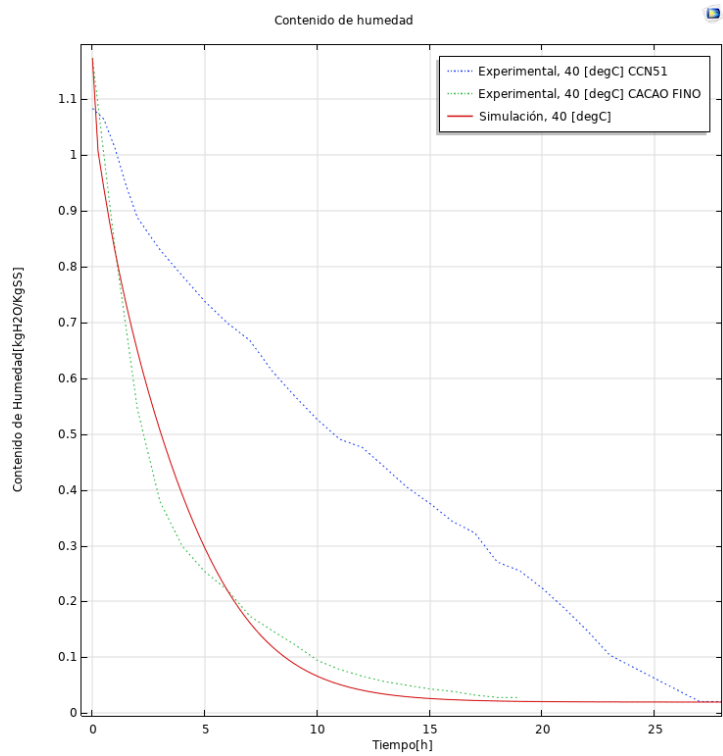


Figura 3.14 Concentración de humedad vs Tiempo a Temperatura de aire 40[°C], pruebas experimentales y simulación computacional

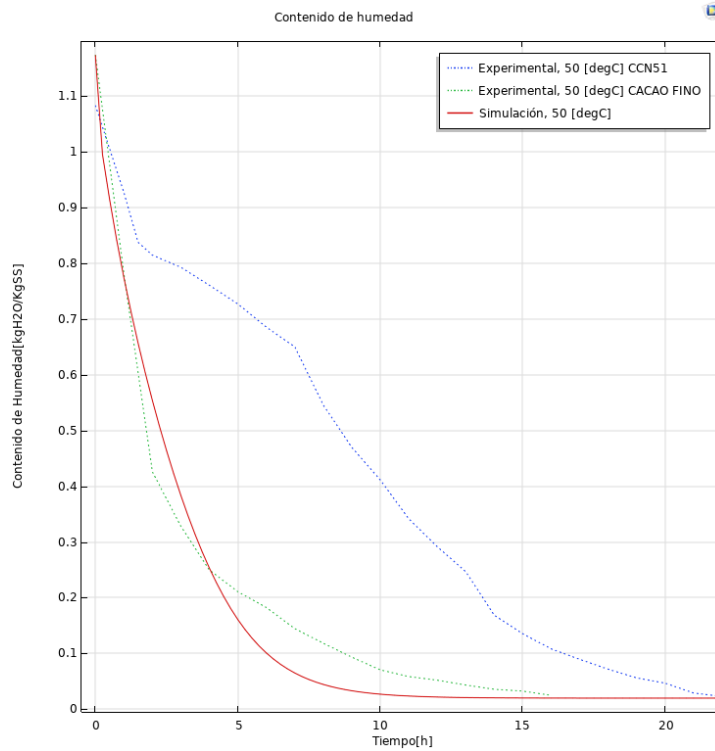


Figura 3.15. Concentración de humedad vs Tiempo a Temperatura de aire 50[°C], pruebas experimentales y simulación computacional

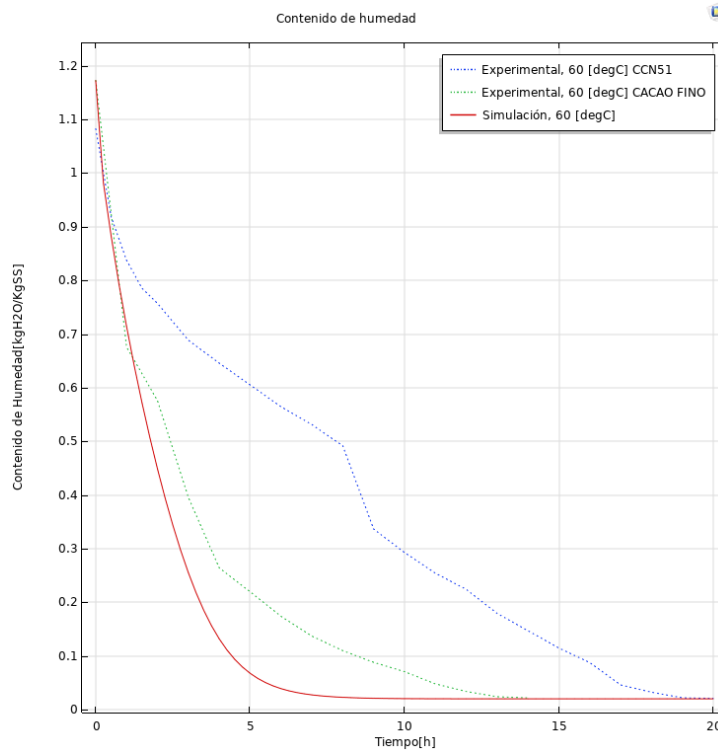


Figura 3.16 Concentración de humedad vs Tiempo a Temperatura de aire 60[°C], pruebas experimentales y simulación computacional

En la Tabla 3.5 se encuentran el valor promedio de los errores para los experimentos con cacao fino y cacao CCN51, en el apéndice B se encuentra los valores de la simulación y experimentos, y mediante dichos valores se realiza el cálculo de los errores al cual se le determina el valor promedio.

Tabla 3.5 Valor promedio de los errores para los experimentos con cacao fino y CCN51

	Experimento Cacao fino	Experimento Cacao CCN51
40 °C	23.01	64.89
50 °C	33.98	63.36
60 °C	41.41	61.81

3.1.7 Comportamiento de la concentración de humedad y temperatura en el tiempo

En las figuras 3.17 y 3.18 se aprecia como cambia el contenido de humedad y la temperatura en el grano de cacao para tiempos específicos.

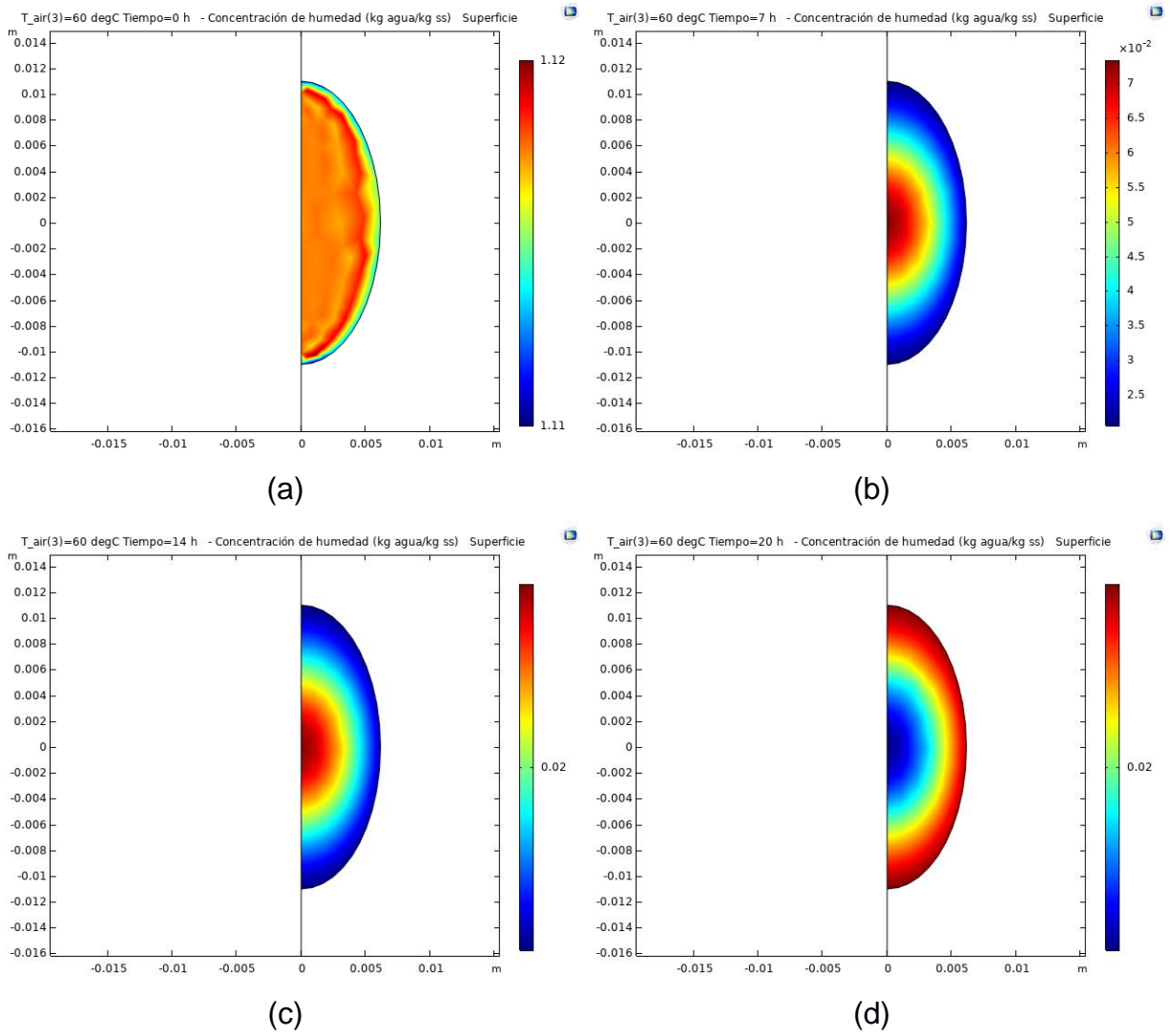


Figura 3.17 Cambio en la concentración del grano de cacao (a) $t = 0$; (b) $t = 7\text{h}$; (c) $t = 14\text{h}$; (d) $t = 20\text{h}$

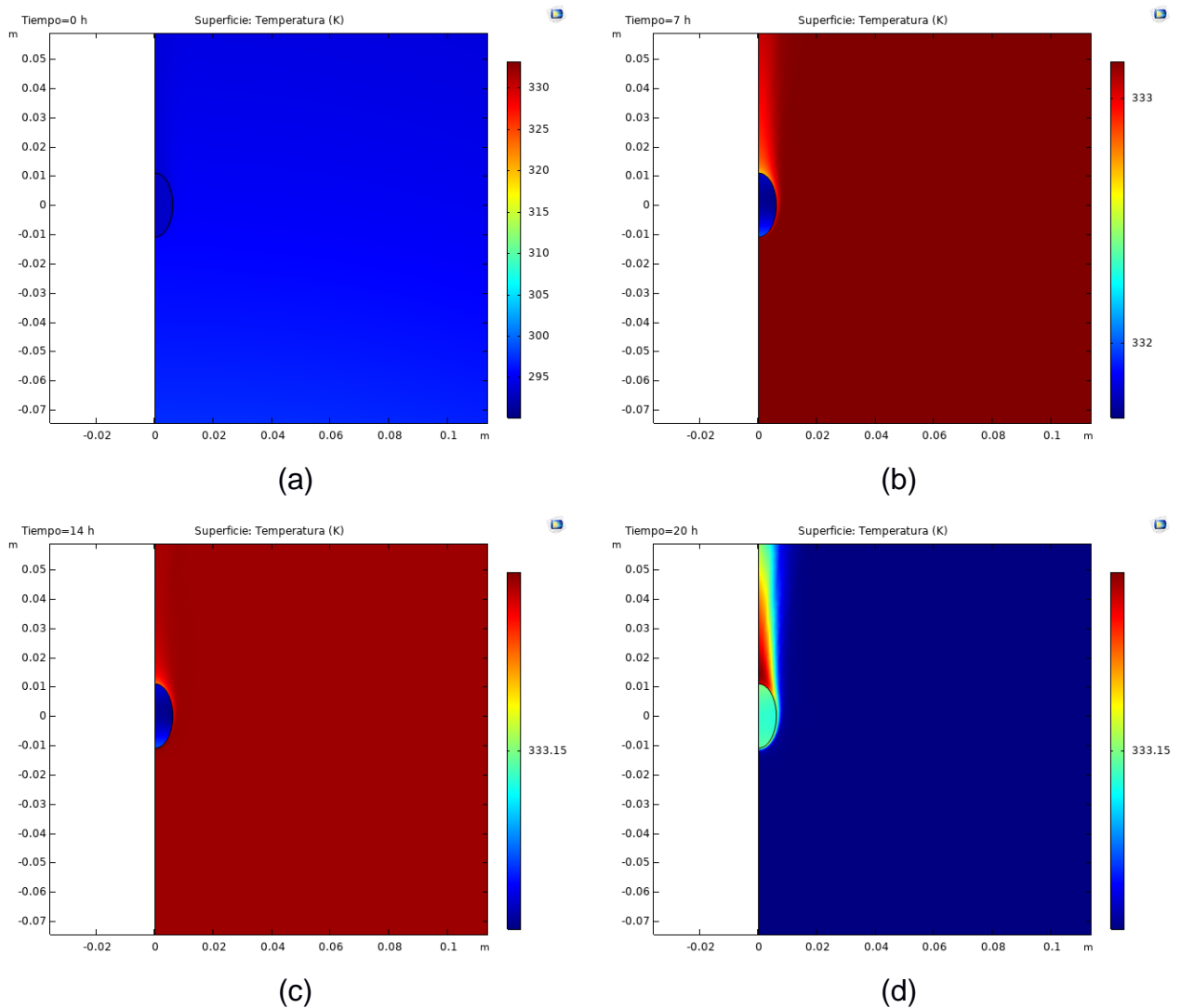


Figura 3.18 Cambio en la temperatura del grano de cacao (a) $t = 0$; (b) $t = 7$ h; (c) $t = 14$ h; (d) $t = 20$ h

3.2 Análisis de resultados

3.2.1 Validación del modelo, simulación de un grano vs pruebas experimentales con muestra de 200 gramos

El estudio teórico-computacional de la cinética del secado de cacao presenta datos visuales de cómo se desarrolla el flujo de aire caliente alrededor de la almendra de cacao, tal como se aprecia en los contornos de velocidad de la sección 3.1.2 y los perfiles de temperatura de la sección 3.1.3. Los contornos de velocidad muestran cómo se forma la capa límite sobre la superficie del sólido estacionario, por efecto de la condición de no deslizamiento en la superficie, que provoca una diferencia de velocidades

en el fluido. Además, se aprecia el punto de estancamiento donde el fluido entra en contacto con el elipsoide. Del mismo modo, en los perfiles de temperatura se puede observar la formación de la capa límite térmica, la cual es causada por la diferencia de temperaturas entre el fluido y el sólido.

Por efecto de la transferencia de calor entre el sólido y fluido, se observa un cambio de temperatura en el interior del grano de cacao, el cual tiene una temperatura inicial de 24[°C] y una temperatura final que va de acuerdo con la temperatura del fluido, al llegar a un estado de equilibrio (Sección 3.1.7). Por otro lado, en la temperatura del fluido no se observan cambios significativos ya que fluye a lo largo del dominio y es calentada constantemente a la entrada. Por efecto de la distribución de temperatura en la interfaz sólido-fluido se pudieron determinar valores del coeficiente de transferencia de calor, y con la analogía de Chilton-Colburn se calculan los coeficientes de transferencia de masa para cada temperatura, obteniendo un error relativo máximo del 10.31% y 20.41% respectivamente.

En la sección 3.1.6, se comparan los resultados teórico-experimentales y los resultados de las pruebas experimentales para el Cacao fino y de aroma y el Cacao CCN51. De acuerdo con la Tabla 3.5, se calculó un valor de error promedio máximo de 33.98% y 64.98% entre los resultados de la simulación y los del Cacao fino y de aroma y Cacao CCN51 respectivamente. Estos valores de error altos se deben a que, para configurar la simulación, se usaron las propiedades termo-físicas de un tipo de cacao proveniente de malasia. Las propiedades del cacao cambian dependiendo de muchos factores del ambiente donde crece y al estar comparando las propiedades de 2 tipos de cacao cultivados en continentes diferentes se van a obtener errores significativos. Sin embargo, se puede observar en las gráficas de contenido de humedad para las 3 temperaturas, que la curva de simulación computacional tiende a parecerse a las curvas del cacao fino y de aroma.

La simulación es buena cualitativamente por cuestión del parecido que presentan los valores del coeficiente convectivo de transferencia de calor, es decir, el dominio de fluido circundante, si causa los mismos resultados que un modelo difusivo puro, usando un coeficiente de transferencia de calor. De la misma forma, la simulación y experimento se pueden relacionar mediante el contenido de humedad inicial, puesto que se está asumiendo que el único grano simulado posee la misma cantidad inicial de concentración del experimento. [16]

3.2.2 Análisis del comportamiento de la humedad y temperatura del grano frente a diversas temperaturas de ingreso de aire.

Tal como se observa en las figuras de la sección 3.1.1 se puede ver como varia. Respecto a la temperatura, se comporta de manera creciente hasta llegar a la estabilización, es decir el grano posee una temperatura inicial y ésta va a cambiar gradualmente hasta llegar a la temperatura del aire. En cambio, la concentración de humedad tiene un comportamiento contrario, es decir su valor decrece con el tiempo.

3.2.3 Límites de la simulación computacional

Se puede aprovechar la simulación computacional para replicar el proceso de secado de grandes o pequeñas muestras de cacao. Sin embargo, se deben conocer las condiciones iniciales necesarias para configurar la simulación como: contenido de humedad, propiedades termo físicas, temperatura y velocidad tanto del fluido de secado como del tipo de muestra a secar, además de los coeficientes y variables involucradas en los fenómenos físicos. Todo lo mencionado se obtiene a partir de un análisis previo de pruebas experimentales o por publicaciones científicas. De tal forma, se puede configurar la simulación. En la literatura se encontraron casos de simulaciones computacionales similares en los que el volumen de control es una figura geométrica ajustada a la de la muestra o una sección de esta y los datos obtenidos se comparan con los resultados

experimentales del secado de muestras de más de 600[gr], obteniendo errores relativos promedio menores al 5%. [17] [4] [18]

Otro límite que presenta la simulación centrando el análisis en otro contexto, es que modelar más granos (elipsoides) causa un gran gasto en los recursos computacionales usados y por ende se requiere de un mejor equipo para realizar un modelo más parecido al real, en el que se tiene una muestra de varios granos de cacao esparcidos sobre una bandeja.

3.2.4 Análisis del encogimiento del grano durante el secado

No se ha tomado en cuenta el encogimiento de la almendra de cacao durante el secado debido a que, según trabajos de investigación en el que se analiza el secado de la almendra de cacao con y sin encogimiento, se calculó un error relativo promedio de 3.1% entre los datos experimentales y los datos teórico-computacionales sin tomar en cuenta encogimiento y del 3.3% tomando en cuenta el encogimiento de la almendra. Por lo tanto, el encogimiento de la almendra tiene un leve impacto en los resultados teórico-computacionales. [19] No obstante, el encogimiento de la muestra tiene un papel importante en el análisis de secado de frutas y vegetales, puesto que a medida que el producto pierde agua, su estructura interna va cambiando, y por lo tanto también cambian sus propiedades termo físicas. Del mismo modo, la porosidad interviene en el sabor y apariencia del producto final. [20] [4]

3.2.5 Factibilidad de la simulación aplicando resultados a diseño de equipos

Los resultados que se obtuvieron son válidos para el diseño de ductos rectangulares, debido a que la simulación involucra un flujo de aire a través de un ducto, que calienta una muestra del producto que se encuentra estacionaria mientras pierde humedad. Un paso más hacia el uso de la simulación en el diseño de equipos es la de obtener ecuaciones de la tendencia que siguen los 2 tipos de cacao al ser secadas y ya no sea necesario utilizar el software para simular todo el proceso. Estas ecuaciones se pueden expresar en función de la temperatura o tasa de

humedad de la muestra de cacao, pero al tener errores significativos aún no pueden ser obtenidas de este estudio.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- En base a los resultados, se concluye que el modelo establecido predice que el grano de cacao pierde concentración de humedad con el tiempo de una manera similar a los experimentos realizados para el cacao fino y de aroma, e.g., las curvas de secado de la almendra de cacao son determinadas satisfactoriamente. Además, se logra visualizar que mientras mayor es la temperatura del aire, menor tiempo tarda el modelo en alcanzar el contenido de humedad de equilibrio.
- En este modelo no se consideró la porosidad que presenta el grano, rugosidades en la superficie, ni el encogimiento ya que según estudios realizados en [4] afecta hasta en un 3% los resultados finales obtenidos. Este estudio está más enfocado en cómo se desarrolla el transporte de humedad por difusión y evaporación en la superficie del cacao. El estudio considera que la almendra de cacao queda suspendida y es cubierta totalmente por el flujo de aire, de esta forma se garantiza una distribución uniforme de calor sobre la superficie del grano. Del mismo modo, durante las pruebas experimentales se le da un movimiento constante a la muestra para asegurar que el flujo de aire caliente alrededor del grano sea uniforme.
- Es un modelo estrictamente dependiente de la temperatura ya que las propiedades térmicas como densidad, calor específico, conductividad térmica y difusividad son ecuaciones dependientes de esta variable.
- Los resultados sugieren que el modelo computacional presenta diferencias al momento de compararlos con los resultados de las pruebas experimentales porque en el modelo computacional no se consideró las propiedades del entorno, es decir del aire exterior a la máquina de secado. Por lo tanto, se refleja en el error relativamente alto que se presenta en determinadas zonas de los gráficos comparativos.

- Se optó por utilizar simulaciones del modelo 2D axis-simétrico debido a que estos generan resultados óptimos sin gastar excesivamente recursos computacionales. Además, permite obtener resultados de la geometría tridimensional del grano de cacao y el campo de fluido optimizando tiempo de simulación.
- Este trabajo se diferencia de otros estudios similares ya realizados porque en el fenómeno de transferencia de calor está considerando el campo de fluido para el desarrollo de sus ecuaciones; mientras que en otros estudios disponibles en la literatura no se considera el flujo de fluido para el análisis de transferencia de calor, sino que usan un modelo difusivo puro, es decir, realizan el análisis de la transferencia de calor solo usando un coeficiente convectivo de calor.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar simulaciones para obtener resultados de campos de velocidad, con un estudio estacionario y otro estudio de estado transitorio con el objetivo de resolver las ecuaciones diferenciales parciales de la transferencia de calor y concentración de especies simultáneamente.
- Este trabajo puede ser usado como el inicio de futuras investigaciones, tales como determinar las propiedades de cacao ecuatoriano: densidad, calor específico, conductividad térmica y difusividad; obtención de la curva de secado de una sola almendra de cacao para recrear el modelo computacional desarrollado en este trabajo; y la optimización del diseño de un secador de cacao. Cabe enfatizar la importancia del cálculo de las propiedades fisicoquímicas de la almendra de cacao en función de temperatura, tasa de humedad o tiempo de simulación, debido a que son parámetros necesarios para realizar una simulación más acercada a la realidad. Además, se puede mejorar el estudio de simulación del secado incluyendo encogimiento y porosidad. Este trabajo brinda la oportunidad para realizar el mismo estudio a otros frutos y vegetales nacionales como lo pueden ser el café, uvilla, garbanzos, etc.

- Este modelo es una solución parcial dado que se está validando los resultados obtenidos para un grano o almendra de cacao con curvas experimentales de secado de una muestra de 200 gramos (alrededor de 170 granos). Es preferible comparar esta simulación realizada con un experimento donde solo un grano de cacao sea secado dentro de la maquina secadora tipo ducto analizado. De manera similar, se puede realizar una simulación en la que se construya una geometría con varios elipsoides que simulen la muestra del producto. Con estas ideas planteadas se puede lograr disminuir el error relativo entre los resultados simulados y las pruebas experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Macías-Badaraco, R. Correa-Quezada, J. Álvarez García y D. Rama, «Effects of Covid-19 on Ecuador's international trade,» *Contaduría y Administración*, vol. 66, pp. 1-24, 28 May 2021.
- [2] S. Tigselema Zambrano, J. Vera Chang, S. Ordoñez Choez, G. Segovia Freire, G. Vasconez Montúfar y J. Rosero Zambrano, «Elaboración de chocolate de siete genotipos experimentales de cacao (*Theobroma cacao* L.) seleccionados en la Finca Experimental La Represa,» *Ciencia y Tecnología*, vol. 11, nº 2, pp. 39-45, 2018.
- [3] E. Afoakwa, «Bean composition and flavour precursor Formation,» de *Chocolate Science and Technology*, vol. I, John Wiley & Sons, Ltd., 2010, pp. 20-26.
- [4] C. L. Hii, C. L. Law y M. C. Law, «Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying condition in a heat pump dryer,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 54, nº 1, pp. 264-271, 2013.
- [5] J. Atanacio Andrade, J. Rivera García, G. Chire Fajardo y M. O. Ureña Peralta, «Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.) de Ecuador y Perú,» *Enfoque UTE*, vol. 10, nº 4, pp. 1-13, 2019.
- [6] C.-L. Hii, «Investigation of Drying and Quality Changes of Cocoa Beans Under Conditions in a Heat Pump Dryer (PhD thesis),» University of Nottingham, Malaysia, 2010.
- [7] J. C. Loja Juca y A. F. Barbecho Guailas, «Desarrollo de un prototipo de máquina híbrida de secado de granos de cacao con sistema de control automático de temperatura (Tesis de grado),» Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingeniería Mecánica, Cuenca, 2019.
- [8] M. F. Mohammed, *Mathematical Modeling of Food Processing*, vol. II, Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [9] C. K. Poveda Oyos y Simbaña Caiza Stalyn Fabian, «Estudio numérico y experimental de caudales óptimos para secado de grano de cacao (Tesis de grado),» Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, 2018.

- [10] H. A. Tinoco y D. Y. Ospina, «ANÁLISIS DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE CACAO PARA LA DISMINUCIÓN DEL TIEMPO DE SECADO,» *EIA*, nº 13, pp. 53-63, 2010.
- [11] J. A. Agamez Parías, «Diseño de un secador convectivo para el secado del grano de cacao (Trabajo de Investigación),» Universidad de Antioquia, Departamento de Ingeniería Mecánica, Colombia, Medellín, 2020.
- [12] O. Cano Cruz, «Tipos de Secados en Alimentos (Monografía),» Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", Coahuila, México, 2014.
- [13] J. Xamán y M. Gijón Rivera, *DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL PARA INGENIEROS*, Estados Unidos: Palibrio, 2016.
- [14] Y. A. Cengel y J. M. Cimbala, *Mecánica de fluidos Fundamentos y aplicaciones*, 2 ed., Mexico: McGraw-Hill, 2012, pp. 855-857.
- [15] R. ElGamal, F. Ronsse, S. Radwan y J. Pieters, «Coupling CFD and Diffusion Models for Analyzing the Convective Drying Behavior of a Single Rice Kernel,» *Taylor & Francis*, vol. 32, nº 3, pp. 311-320, 2014.
- [16] M. Ateeque, Udayraj, R. K. Mishra, V. Chandramohan y P. Talukdar, «Numerical modeling of convective drying of food with spatially dependent transfer coefficient in a turbulent flow field,» *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 78, pp. 145-157, 2014.
- [17] C. Kumas, A. Karim y G. J. Millar, «Effective Diffusivity and Evaporative Cooling in Convective Drying of Food Material,» *Drying Technology: An International Journal*, pp. 227-237, 2015.
- [18] D. Onwude, N. Hashim, K. Abdan, R. Janius y G. Chen, «Experimental studies and mathematical simulation of intermittent infrared and convective drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.),» *Food and Bioproducts Processing*, vol. 114, p. 163–174, 2019.
- [19] J. Aprajeeta, R. Gopirajah y C. Anandharamakrishnan, «Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying,» *Journal of Food Engineering*, vol. 144, pp. 119-128, 2015.
- [20] B. Kamenan Koua, P. M. Ekoun Koffi y P. Gbaha, «Evolution of shrinkage, real density, porosity, heat and mass transfer coefficients during indirect solar drying of

cocoa beans,» *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, vol. 18, n° 1, pp. 72-82, 2019.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Cálculos

Cálculos de los coeficientes de transferencia de calor y masa mediante correlación del número de Nusselt para flujo externo.

$$Nu = 2 + 0.552 * Re^{0.53} * Pr^{1/3}$$

$$h_t = \frac{Nu * k}{d}$$

1. Se obtuvieron las propiedades del aire a las temperaturas establecidas:

Tabla A.1 Propiedades del aire a las temperaturas dadas

T (°C)	ν [$\frac{m^2}{s}$]	Pr	k [$\frac{W}{mK}$]
40	1,72E-5	0,7052	0,02726
50	1,82E-5	0,7038	0,028
60	1.92E-02	0,7024	0,02874

2. Se calculó el número de Reynolds y Nusselt, cabe recalcar que para flujo externo se usó el eje mayor de la elipse ($d = 0.022$ m) y de velocidad $U = 1$ m/s.

$$Re = \frac{Ud}{\nu}$$

$$Re = \frac{\left(1 \frac{m}{s}\right) (0.022 m)}{\nu} = \frac{0.022}{\nu}$$

Tabla A.2 Cálculo del número de Nusselt

T (°C)	ν	Pr	$Re = 0.022/\nu$	Nu
40	1,72E-5	0,7052	1279	23,78
50	1,82E-5	0,7038	1209	23,12
60	1.92E-05	0,7024	1145	22,51

3. Finalmente se calcula el coeficiente de transferencia de calor:

Tabla A.3 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor

T (°C)	k $\left[\frac{W}{mK}\right]$	Nu	h_t $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
40	0,02726	23,78	29,41
50	0,028	23,12	29,43
60	0,02874	22,51	29,47

Cálculos de los coeficientes de transferencia de masa mediante correlación del número de Sherwood para flujo externo [4]. Se va a seguir un esquema similar al anteriormente realizado, pero con nuevas variables tal como es la difusividad entre el grano de cacao y el aire circundante y el número de Schmidt.

$$D = 12 * 10^{-4} * \exp\left(-\frac{38000}{8.314 * T}\right) \left[\frac{m^2}{s}\right]$$

$$Sh = 2 + 0.552 * Re^{0.53} * Sc^{1/3}$$

$$h_m = \frac{Sh * D}{d} \left[\frac{m}{s}\right]$$

Tabla A.4 Cálculo del coeficiente global de transferencia de masa

T (°C)	D $\left[\frac{m^2}{s}\right]$	ν $\left[\frac{m^2}{s}\right]$	Re	$Sc = \frac{\nu}{D}$	Sh	h_m $\left[\frac{m}{s}\right]$
40	5.46 E-10	1,72E-5	1279	3.15 E+4	774.7	1.92 E-5
50	8.58 E-10	1,82E-5	1209	2.12 E+4	659.2	2.57 E-5
60	13.1 E-10	1.92E-05	1145	1.46 E+4	566.4	3.38 E-5

APÉNDICE B

Comparación de resultados teórico-computacionales con los resultados de las pruebas experimentales para 3 temperaturas.

Tabla B.1 Resultados de la simulación y experimentos a 40°C

40 °C			
Tiempo (h)	Simulación	Cacao fino y de aroma	Cacao CCN51
0	1.173	1.174	1.083
0.5	0.942	1.003	1.065
1	0.828	0.833	1.013
1.5	0.733	0.689	0.945
2	0.649	0.545	0.888
3	0.507	0.379	0.830
4	0.391	0.299	0.783
5	0.296	0.253	0.738
6	0.220	0.221	0.699
7	0.162	0.174	0.668
8	0.119	0.148	0.613
9	0.088	0.123	0.568
10	0.066	0.095	0.526
11	0.051	0.078	0.491
12	0.041	0.066	0.476
13	0.034	0.057	0.441
14	0.029	0.050	0.404
15	0.026	0.043	0.376
16	0.024	0.039	0.344
17	0.023	0.033	0.323
18	0.022	0.028	0.271
19	0.021	0.028	0.255
20	0.021	-	0.224
21	0.021	-	0.188
22	0.020	-	0.148
23	0.020	-	0.104
24	0.020	-	0.083
25	0.020	-	0.063
26	0.020	-	0.042
27	0.020	-	0.021
28	0.020	-	0.021

Tabla B.2 Resultados de la simulación y experimentos a 50°C

50 °C			
Tiempo (h)	Simulación	Cacao fino y de aroma	Cacao CCN51
0	1.173	1.174	1.083
0.5	0.914	0.976	1.005
1	0.774	0.782	0.927
1.5	0.657	0.603	0.838
2	0.554	0.426	0.815
3	0.384	0.328	0.793
4	0.253	0.250	0.760
5	0.161	0.211	0.727
6	0.101	0.183	0.685
7	0.065	0.145	0.650
8	0.045	0.118	0.546
9	0.033	0.093	0.470
10	0.027	0.071	0.411
11	0.024	0.059	0.342
12	0.022	0.052	0.292
13	0.021	0.043	0.247
14	0.021	0.036	0.169
15	0.020	0.033	0.135
16	0.020	0.025	0.108
17	0.020	-	0.090
18	0.020	-	0.072
19	0.020	-	0.056
20	0.020	-	0.047
21	0.020	-	0.029
22	0.020	-	0.023

Tabla B.3 Resultados de la simulación y experimentos a 60°C

60 °C			
Tiempo (h)	Simulación	Cacao fino y de aroma	Cacao CCN51
0	1.173	1.174	1.083
0.5	0.883	0.925	0.919
1	0.714	0.676	0.838
1.5	0.572	0.626	0.785
2	0.449	0.576	0.757
3	0.255	0.396	0.689
4	0.132	0.264	0.646
5	0.067	0.220	0.605
6	0.038	0.174	0.565
7	0.027	0.137	0.531
8	0.023	0.110	0.492
9	0.021	0.088	0.336
10	0.020	0.071	0.293
11	0.020	0.048	0.254
12	0.020	0.034	0.224
13	0.020	0.024	0.179
14	0.020	0.022	0.147
15	0.020	-	0.115
16	0.020	-	0.088
17	0.020	-	0.046
18	0.020	-	0.032
19	0.020	-	0.022
20	0.020	-	0.021

Tabla B.4 Errores y valor promedio de resultados a 40°C

40 °C		
Tiempo (h)	Error cacao fino y de aroma (%)	Error cacao CCN51 (%)
0	0.081	8.273
0.5	6.044	11.523
1	0.530	18.203
1.5	6.396	22.466
2	19.152	26.889
3	33.615	38.947
4	30.700	50.126
5	16.735	59.913
6	0.290	68.523
7	6.878	75.745
8	19.563	80.587
9	28.352	84.499
10	29.868	87.393
11	34.426	89.540
12	38.040	91.370
13	39.571	92.248
14	41.029	92.705
15	39.415	92.995
16	38.057	92.949
17	29.979	92.929
18	22.590	91.922
19	24.908	91.685
20	-	90.716
21	-	89.062
22	-	86.260
23	-	80.603
24	-	75.844
25	-	67.872
26	-	51.898
27	-	3.902
28	-	3.979
Promedio	23.01	64.89

Tabla B.5 Errores y valor promedio de resultados a 50 °C

50 °C		
Tiempo (h)	Error cacao fino y de aroma(%)	Error cacao CCN51(%)
0	0.066	8.290
0.5	6.322	9.044
1	0.920	16.477
1.5	8.897	21.594
2	30.042	31.979
3	16.860	51.608
4	1.357	66.677
5	23.679	77.865
6	44.667	85.258
7	54.985	89.988
8	62.391	91.837
9	64.463	92.929
10	61.685	93.421
11	59.505	93.043
12	57.908	92.471
13	51.716	91.496
14	42.840	87.850
15	37.903	85.047
16	19.504	81.424
17	-	77.616
18	-	72.152
19	-	64.442
20	-	57.353
21	-	31.467
22	-	12.763
Promedio	33.985	63.364

Tabla B.6 Errores y valor promedio de resultados a 60 °C

60 °C		
Tiempo (h)	Error cacao fino y de aroma (%)	Error cacao CCN51 (%)
0	0.080	8.275
0.5	4.522	3.872
1	5.664	14.700
1.5	8.641	27.184
2	22.074	40.720
3	35.518	62.947
4	50.173	79.622
5	69.450	88.917
6	77.875	93.185
7	80.286	94.918
8	79.404	95.401
9	76.185	93.768
10	71.203	93.049
11	57.957	92.089
12	40.568	91.058
13	16.368	88.838
14	8.034	86.388
15	-	82.550
16	-	77.146
17	-	56.368
18	-	38.068
19	-	8.574
20	-	4.001
Promedio	41.412	61.810

A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo. Se tomará la primera celda (t=0) para la temperatura a 60°C del cacao fino y de aroma.

$$\%E_i = \frac{|V_{experimental} - V_{simulado}|}{V_{experimental}} * 100$$

$$\%E_i = \frac{|1.1739 - 1.1729|}{1.1739} * 100$$

$$\%E_i = 0.079 \%$$

Valor promedio del error:

$$\%E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \%E_i$$

$$\%E = \frac{1}{17} (\%E_1 + \%E_2 + \%E_3 + \dots + \%E_{17})$$

$$\%E = \frac{1}{17} (0.079 + 4.521 + 5.664 + \dots + 8.034)$$

$$\%E = 41.41\%$$