

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Mecánica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Estudio del Comportamiento de Descriptores
Visuales Durante el Proceso de Deshidratado de Chile Habanero**

presentada por
Ing. Erick Iván Téllez Velázquez

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Director de tesis
Dr. Efraín Simá Moo

Codirectora de tesis
Dra. Andrea Magadán Salazar

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Mor., 21 /octubre/2016

OFICIO No. DIM/283 /2016

Asunto: Aceptación de documento de tesis

C. DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Ing. Erick Iván Téllez Velázquez, con número de control M14CE051, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **“Estudio del comportamiento de descriptores visuales durante el proceso de deshidratado de chile habanero”**. Y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

DR. EFRAÍN SIMÁ MOO
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica
6601954

REVISOR 1

DRA. YVONNE CHÁVEZ CHENA
Doctora en Ciencias en Ingeniería Mecánica
7492003

REVISOR 2

DR. JESÚS PERFECTO XAMÁN VILLASEÑOR
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica
4672156

REVISOR 3

DR. JOSÉ FASSÓN FLORES PRIETO
Doctor en Ingeniería
4355408

C.p. Departamento de Servicios Escolares.
Estudiante
Expediente

Iniciales AAP/mrsr

cenidet[®]
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira. C.P. 62490 Cuernavaca, Mor.
Tels. (01)777 362-77-70 Ext. 4106, e-mail: direccion@cenidet.edu.mx
www.cenidet.edu.mx



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Mor. 24 de octubre de 2016
OFICIO No. SAC/306/2016

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ING. ERICK IVÁN TÉLLEZ VELÁZQUEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Estudio del comportamiento de descriptores visuales durante el proceso de deshidratado de chile habanero”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO”

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



S.E.P. - TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
DIRECCIÓN

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr

cenidet[®]
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira. C.P. 62490 Cuernavaca, Mor.
Tels. (01)777 362-77-70 Ext. 4106, e-mail: direccion@cenidet.edu.mx
www.cenidet.edu.mx



A Dios

Te agradezco por permitirme estar aquí, por todas las bendiciones que me has dado. Gracias por la fortaleza que me diste para lograr concluir otra etapa más de mi vida y con ello subir un escalón más de mi meta final.

Gracias por todas las experiencias que me permitiste vivir y todas las personas que me dejaste conocer que hoy las considero como parte de mi familia.

A mis padres

Sr. Salvador y Sra. Leticia son los nombres de las dos personas que me dieron la vida y que desde ese momento hasta el día de hoy no me han dejado ni un solo instante, la mayor parte de este trabajo es gracias a ustedes, muchas gracias por todo su amor y el apoyo me han dado, sin ustedes nada de esto se podría haber hecho, son los mejores, son mi fuerza y mi inspiración para lograr nuevas metas. Muchas gracias papás y siéntanse contentos que parte de su esfuerzo está grabado en este trabajo.

A mi hermano

Jhonatan, la diferencia de edades nos ha limitado un poco para llevar una buena convivencia, pero no ha sido impedimento para pasar muy buenos ratos, y que hace algún tiempo ya hemos logrado tener

Conversaciones más amistadas, tú no te das cuenta, pero cada rato de plática, cada momento de salir y cada momento de jugar LOL, me ayudaron mucho para lograr concluir este trabajo, por eso mediante estas palabras te doy las gracias hermano por compartir parte de tu vida y estar conmigo en esta etapa que, y recuerda que siempre estaré contigo, apoyándote en todas metas personales y profesionales.

A mi esposa y familia

Krishna mi amada esposa, formaste parte de esta etapa, gracias a todo ese cariño, amor y atenciones que tuviste conmigo fue que logre terminar este trabajo, siempre tuviste toda la confianza de que lo lograría aún en los momentos donde yo ya no creía en mí, gracias porque en esta etapa tu y yo logramos concluir una etapa personal para comenzar una nueva que durará para toda la vida, nunca nunca olvides que Te Amo.

Sr. Fabián, Sra. Consolación, Fernanda y Felipe. Les doy las gracias por todo el apoyo que me han brindado desde el primer día que nos conocimos, gracias por apoyarme en todos los aspectos haciendo lo posible para que yo lograra concluir esta etapa, muchas gracias por todos los buenos y malos momentos que me han regalado, porque todo es parte de la experiencia, y es lo que me ha ayudado a mejorar. Muchas gracias por todo

y son mi familia no sólo por una unión, sino porque se han ganado mi cariño y amistad.

¡A mi abuelita

Sra. Joaquina, muchas muchas gracias por estar siempre conmigo, sin importar la distancia, usted siempre me ha apoyado, gracias por confiar en mí por creer que llegare muy lejos, gracias por todas sus palabras y ánimos, muchas gracias por ser quien es y más que nada gracias por ser mi abuelita y yo ser su nieto favorito.

¡A mis tíos

Omar, Susana y Patricia, les agradezco mucho por todo el apoyo que he tenido de ustedes, gracias por los ánimos que me brindaron y siempre llevo presente todos los consejos que me dan.

Fernando, Magali y Joel (Roque), muchas gracias tíos, que, aunque muy estrictos, ustedes me enseñaron a valorar las cosas y a no quedarse estancado conformándose con una victoria, sino que debemos de luchar por ser mejores y tanto personal como profesionalmente, muchas gracias por todo, y tío Fernando, esta es otra muestra de que voy por más, eso sí, sin olvidar nunca de dónde vengo.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por brindarme la oportunidad de cumplir mis estudios de posgrado.

Al Dr. Efraín Simá Moo por darme la oportunidad de trabajar bajo su dirección y guiarme en la realización de mi trabajo.

A la Dra. Andrea Magadán Salazar, por todo su apoyo, ya que, sin ella, habría sido muy difícil lograr culminar este trabajo, muchas gracias por los consejos que fueron de mucha ayuda.

Al M. Javier Enrique González Barajas por su apoyo, porque sin conocernos y ser de nacionalidades diferentes, no dudó en apoyarme y gracias a eso es que este trabajo pudo realizarse, le mando un fuerte abrazo, y que ¡viva Colombia!

Al Dr. Jesús P. Xamán Villaseñor por todo su apoyo, consejos y platicas que me brindo a lo largo de mi maestría, muchas gracias por darme la oportunidad de continuar y por guiarme como alumno y como persona.

Al Dr. José Jassón Flores Prieto por su ayuda en la revisión de este trabajo, y por explicarme cosas que solo con peras y manzanas logre comprender.

A la Dra. Yvonne Chávez Chena por apoyar en la revisión de este trabajo y por guiarme como estudiante.

Al Dr. Arturo Abundez Pliego y a la Sra. Rocío Salazar Ruíz, por todo su apoyo en los trámites administrativos a lo largo de mi estancia en CENIDET.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el seguro médico y el apoyo económico otorgado durante mis estudios de posgrado.

A mis compañeros, amigos y hermanos M.C. Miguel Ángel Chagolla, M.C. Lino Escorza del laboratorio de térmica 1, les estoy muy agradecido por que hicieron de ese espacio de estudio un lugar muy agradable y confortable para lograr desarrollar los proyectos de la mejor manera, muchas gracias por todos sus consejos y ánimos, también les agradezco por todas las pizzas, de igual forma, y un agradecimiento especial a la M.C. Alicia Gil Candelario con quien compartí muchas tardes para lograr concluir este trabajo enseñándome el uso de Word, como redactar que fueron indispensables para lograr concluir esta maestría, muchas gracias por escucharme y apoyarme ¡Aneki!.

A Hernan Rosas y Alejandro Sámano por tenerme confianza y por estar conmigo aun después de la universidad.

A Jessica Mata Rubio por apoyarme siempre en todo, por escucharme en las buenas y en las malas, este trabajo en parte es para que sepas que no importa de dónde vengas, siempre se puede cuando se quiere, nunca te rindas pase lo que pase.

Al Ing. José Chávez Álvarez por todo su apoyo en enseñarme la programación de LabVIEW, que sin conocerme no dudo en compartir sus conocimientos, y me demostró que Perú es un lugar donde la gente te extiende la mano cuando la necesitas.

CONTENIDO

CONTENIDO	iii
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	xi
Resumen	xvii
Abstract	xix
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.1.1 El chile habanero	3
1.1.2 Descripción del problema	5
1.2 Revisión bibliográfica	6
1.2.1 Modelos de secado de capa delgada	6
1.2.2 Descriptores visuales en alimentos durante el proceso de secado	10
1.2.3 Conclusiones de la revisión bibliográfica	13
1.3 Objetivos y alcances	14
1.4 Organización de la tesis	15

CAPÍTULO 2	17
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 Conceptos de secado	17
2.1.1 Procesos básicos de secado	19
2.1.2 Parámetros de secado	20
2.2 Modelos de secado	23
2.3 Descriptores Visuales	26
2.4 Descriptores de forma	27
2.4.1 Área	28
2.4.2 Perímetro	28
2.4.3 Compacidad	29
2.4.4 Elongación	29
2.4.5 Eje mayor	29
2.4.6 Eje menor	30
2.5 Descriptores de color	31
2.5.1 Espacio de color	31
2.5.2 Color promedio	35
2.5.3 Gradiente promedio	36
2.6 Análisis de la textura	36
2.6.1 Pre-procesamiento de las imágenes	36
2.6.2 Descriptores de textura	40

CAPÍTULO 3		45
3. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DURANTE EL PROCESO DE DESHIDRATADO		45
3.1	Método	45
3.2	Adquisición de las imágenes	47
3.3	Descripción del deshidratador	48
3.4	Encendido del equipo	52
3.5	Encendido de las cámaras	53
3.6	Ejecución del programa para la adquisición de imágenes	53
3.7	Proceso para la deshidratación del chile habanero	56
CAPÍTULO 4		59
4. PROCESAMIENTO DE LAS IMAGENES		59
4.1	Pre-procesamiento de las imágenes	60
4.2	Etiquetado de regiones	63
4.3	Localización de la región de interés en la imagen original	65
CAPÍTULO 5		67
5 RESULTADOS		67
5.1	Pruebas experimentales	67
5.2	Análisis de los descriptores de color	69
5.3	Análisis de los descriptores de forma	79
5.4	Análisis de los descriptores de textura	85
5.5	Ajuste de los datos visuales respecto al tiempo	94

5.5.1	Ajuste de las constantes empíricas resultantes	102
5.5.2	Relación de la curva de secado experimental con la variable visual	109
5.5.3	Ajuste de las constantes empíricas resultantes de la relación MR-DV (área y color)	113
CAPÍTULO 6		123
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		123
6.1	Conclusiones	123
6.2	Trabajo futuro	126
REFERENCIAS		127
APÉNDICES		131
Apéndice A. Resultados experimentales		131
Apéndice B. Análisis estadísticos		135

Lista de Figuras

Figura 1.1 .Etapas de maduración del chile habanero.	4
Figura 2.1. Carta psicométrica del secado	18
Figura 2.2. Curva normal de secado	20
Figura 2.3. Diagrama del proceso de los descriptores de Forma, Color y Textura.	27
Figura 2.4. Vista del Eje Mayor	30
Figura 2.5. Vista del Eje Menor	30
Figura 2.6. Modelo de Espacio de Color RGB.....	31
Figura 2.7. Modelo de Espacio de Color CYMK.....	32
Figura 2.8. Modelo de Espacio de Color HSV	33
Figura 2.9. Modelos de Espacio de Color XYZ	34
Figura 2.10. Modelo de Espacio de color CIE Lab	35
Figura 2.11. Ejemplo de la construcción de la matriz de co-ocurrencia para una matriz de 4x4 y con 3 niveles de gris a distancia de 1 pixel.....	40
Figura 2.12. Diagrama de flujo del proceso de obtención de los descriptores de textura	41
Figura 3.1. Diagrama del método general.	46
Figura 3.2. Metodología para la captura de imágenes del proceso de deshidratado del chile habanero.....	47
Figura 3.3. Extractor centrifugo de aire.....	48
Figura 3.4. Vista interna y externa del acondicionador de aire	49
Figura 3.5. Parte interior de la tobera con cuatro deflectores y parte exterior de la tobera conectada al codo de 90°.....	49
Figura 3.6. Cámara de secado.....	50
Figura 3.7. Charola	50
Figura 3.8. Diagrama esquemático de la instrumentación del deshidratador (López 2009)	52
Figura 3.9. Código para la adquisición de imágenes.....	53
Figura 3.10. Pruebas de resolución usando el descriptor de color HSI plano H	54
Figura 3.11. Pruebas de resolución usando el descriptor de forma área	55
Figura 3.12. Muestras al inicio del proceso de secado a 1.25 m/s a 50, 55 y 60°C	57
Figura 3.13. Muestras al inicio del proceso de secado a 1.5 m/s a 50, 55 y 60°C	57

Figura 3.14. Muestras al inicio del proceso de secado a 1.75 m/s a 50, 55 y 60°C	57
Figura 3.15. Muestras al inicio del proceso de secado a 1 m/s a 50, 55 y 60°C	58
Figura 4.1. Metodología de la segmentación para la caracterización de forma, color y textura.	59
Figura 4.2. Plano “R” (imagen izquierda), plano “G” (imagen central) y plano “B” (imagen derecha).....	60
Figura 4.3. Plano “L” (imagen izquierda), plano “A” (imagen central) y plano “B” (imagen derecha).....	61
Figura 4.4. Plano “H” (imagen izquierda), plano “S” (imagen central) y plano “I” (imagen derecha).....	61
Figura 4.5. Plano “H” (imagen izquierda), plano “S” (imagen central) y plano “V” (imagen derecha).....	62
Figura 4.6. Imagen binaria.....	63
Figura 4.7. Etiquetado de objetos.	64
Figura 4.8. Demostración del esquema de la búsqueda de la región de interés.	65
Figura 4.9. Imagen segmentada izquierda HSI, Imagen segmentada Derecha HSV	66
Figura 5.1. Diagrama del análisis de los descriptores visuales.	68
Figura 5.2. Diagrama de la obtención de los descriptores de color.....	69
Figura 5.3. Valores de los modelos CIE Lab plano L (a), a (b) y b (c), modelo RGB plano R (d), G (e) y B (f) y el modelo HSI plano I (g) y modelos HSV plano V (h)	70
Figura 5.4. Valores de HSV para el plano H del chile verde a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c)	71
Figura 5.5. Valores de HSV para el plano H del chile Amarillo a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c).....	72
Figura 5.6. Valores de HSV para el plano S del chile Verde a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c).....	73
Figura 5.7. Valores de HSV para el plano S del chile Amarillo a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c).....	74
Figura 5.8. Valores de HSI para el plano H del chile Verde a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c).....	75

Figura 5.9. Valores de HSI para el plano H del chile Amarillo a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c).....	76
Figura 5.10. Valores de HSI para el plano S del chile Verde a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c).....	77
Figura 5.11. Valores de HSI para el plano S del chile Amarillo a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c).....	78
Figura 5.12. Valores de los descriptores de forma; Compacidad (a), Elongación (b), Eje mayor (c) y Eje Menor (d).....	79
Figura 5.13. Valores de área para chile Verde con diferentes condiciones de secado (a) a 60°C, (b) a 55°C y (c) a 50°C.....	80
Figura 5.14. Valores de área para chile Amarillo con diferentes condiciones de secado (a) a 60°C, (b) a 55°C y (c) a 50°C.....	82
Figura 5.15. Valores de perímetro para chile Verde con diferentes condiciones de secado (a) a 60°C, (b) a 55°C y (c) a 50°C.....	83
Figura 5.16. Valores de perímetro para chile Verde con diferentes condiciones de secado (a) a 60°C, (b) a 55°C y (c) a 50°C.....	84
Figura 5.17. Comparación a1) Energía Gabor, a2) Energía Wavelet, b1) Entropía Gabor, b2) Entropía Wavelet, c1) Contraste Gabor, c2) Contraste Wavelet, d1) Prob. Máx. Gabor, d2) Pro. Más. Wavelet, e1) Homog. Gabor y e2) Homog. Wavelet.	86
Figura 5.18. Valores de la Energía para chile Amarillo con diferentes condiciones de secado (a) a 50°C, (b) a 55°C y (c) a 60°C.....	87
Figura 5.19. Valores de la Energía para chile Verde con diferentes condiciones de secado (a) a 50°C, (b) a 55°C y (c) a 60°C.....	88
Figura 5.20. Valores de la Energía para chile Amarillo con diferentes condiciones de secado (a) a 50°C, (b) a 55°C y (c) a 60°C.....	89
Figura 5.21. Valores de la Entropía para chile Verde con diferentes condiciones de secado (a) a 50°C, (b) a 55°C y (c) a 60°C.....	90
Figura 5.22. Valores de la Homogeneidad Local para chile Amarillo con diferentes condiciones de secado (a) a 50°C, (b) a 55°C y (c) a 60°C.....	91

Figura 5.23. Valores de la Homogeneidad Local para chile Verde con diferentes condiciones de secado (a) a 50°C, (b) a 55°C y (c) a 60°C.....	92
Figura 5.24. Comparación de los datos experimentales y los datos predichos del área para el secado de chile habanero amarillo (a) y el chile verde (b).	103
Figura 5.25. Comparación de los datos experimentales y los datos predichos del color para el secado de chile habanero amarillo (a) y el chile verde (b).	104
Figura 5.26. Comparación de los datos experimentales y los datos calculados (área) para la MR del chile amarillo.	114
Figura 5.27. Comparación de los datos experimentales y los datos calculados (área) para la MR del chile verde.....	115
Figura 5.28. Comparación de los datos experimentales y los datos calculados (color) para la MR del chile amarillo.	116
Figura 5.29. Comparación de los datos experimentales y los datos calculados (color) para la MR del chile verde.....	116

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Composición nutricional y físico-química del chile habanero.	5
Tabla 2.1.. Modelos de secado de capa delgada.....	25
Tabla 5.1. Valores de selección de R^2 y RMSE para los descriptores visuales.....	94
Tabla 5.2. Datos de la relación adimensional del Área para las diversas temperaturas, velocidades y tiempos para el chile Amarillo.	96
Tabla 5.3. Datos de la relación adimensional del Área para las diversas temperaturas, velocidades y tiempos para el chile Verde.....	97
Tabla 5.4. Datos de la relación adimensional del modelo de color HSV, plano H, para las diversas temperaturas, velocidades y tiempos para el chile Amarillo.	97
Tabla 5.5. Datos de la relación adimensional del modelo de color HSV, plano H, para las diversas temperaturas, velocidades y tiempos para el chile Verde.	98
Tabla 5.6. Valores de las constantes empíricas del modelo de Page, Page Modificado y EP para el área para el chile amarillo.	99
Tabla 5.7. Valores de las constantes empíricas del modelo de Page, Page Modificado y EP para el área, para el chile verde.....	99
Tabla 5.8. Valores de las constantes empíricas del modelo de Page, Page Modificado y EP para el color, para el chile amarillo.....	100
Tabla 5.9. Valores de las constantes empíricas del modelo de Page, Page Modificado y EP, para el color para el chile verde.	100
Tabla 5.10. Valores de los parámetros de la ecuación tipo Arrhenius para el área del chile amarillo y verde.	102
Tabla 5.11. Valores de los parámetros de la ecuación tipo Arrhenius para el color, del chile amarillo y verde.	103
Tabla 5.12. Datos de la relación adimensional del Área para las diversas temperaturas, velocidades y tiempos para el chile Amarillo.	107
Tabla 5.13. Datos de la relación adimensional del Área para las diversas temperaturas, velocidades y tiempos para el chile Verde.....	107

Tabla 5.14. Datos de la relación adimensional del modelo de color HSV plano H para las temperaturas, velocidades y tiempos usadas para el chile Amarillo.....	108
Tabla 5.15. Datos de la relación adimensional del modelo de color HSV plano H para las temperaturas, velocidades y tiempos usadas para el chile Verde.	108
Tabla 5.16. Datos de la humedad del chile amarillo para diversas temperaturas y velocidades.....	110
Tabla 5.17. Datos de la humedad del chile verde para diversas temperaturas y velocidades.	111
Tabla 5.18. Valores de las constantes empíricas de la ecuación polinomial para la relación MR-Área del chile amarillo y verde.	112
Tabla 5.19. Valores de las constantes empíricas de la ecuación polinomial para la relación MR-Color del chile amarillo y verde.	112
Tabla 5.20. Valores de los parámetros de la ecuación tipo polinomial para la MR del área, para el chile amarillo.....	113
Tabla 5.21. Valores de los parámetros de la ecuación tipo polinomial para la MR del color, para el chile amarillo.....	114
Tabla 5.22. Datos arrojados por la ecuación general (área) para la MR del chile amarillo.	118
Tabla 5.23. Datos arrojados por la ecuación general (área) para la MR del chile verde. ..	119
Tabla 5.24. Datos arrojados por la ecuación general (color) para la MR del chile amarillo.	120
Tabla 5.25. Datos arrojados por la ecuación general (color) para la MR del chile verde. .	121
Tabla A.1 Valores del área normalizados para el chile habanero verde.....	131
Tabla A.2. Valores del área normalizados para el chile habanero amarillo.	132
Tabla A.3. Valores del plano H normalizados para el chile habanero verde.	132
Tabla A.4. Valores del plano H normalizados para el chile habanero amarillo.	133
Tabla B.1. Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.25 m/s. para el chile habanero verde.....	135

Tabla B.2. Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.5 m/s. para el chile habanero verde.	136
Tabla B.3 .Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.75 m/s. para el chile habanero verde.....	136
Tabla B.4. Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1 m/s. para el chile habanero verde.	137
Tabla B.5. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.25 m/s. para el chile habanero verde.	137
Tabla B.6. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.5 m/s. para el chile habanero verde.	138
Tabla B.7. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.75 m/s. para el chile habanero verde.	138
Tabla B.8. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1m/s. para el chile habanero verde.	139
Tabla B.9. Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.25 m/s. para el chile habanero amarillo.	140
Tabla B.10. Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.5 m/s. para el chile habanero amarillo.	140
Tabla B.11. Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.75 m/s. para el chile habanero amarillo.	141
Tabla B.12 Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1 m/s. para el chile habanero amarillo.	141

Tabla B.13. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.25 m/s. para el chile habanero amarillo.....	142
Tabla B.14. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.5 m/s. para el chile habanero amarillo.....	142
Tabla B.15. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.75 m/s. para el chile habanero amarillo.....	143
Tabla B.16. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1 m/s. para el chile habanero amarillo.....	143

NOMENCLATURA

Latinas

$a, b, c, g, h,$	Constantes empíricas de los modelos de capa delgada (adimensionales)
k, k_0, k_1, L y n	
<i>CIE</i>	<i>Computer integrated electronics</i>
<i>DV</i>	Datos visuales (Adimensionales)
<i>EP</i>	Ecuación propuesta
h	Entalpía del aire (kJ/kg)
h_{fg}	Calor latente de vaporización (J/kg)
H_{bh}	Humedad en base húmeda (decimal b.h.)
H_{bs}	Humedad en base seca (decimal b.s.)
<i>HR</i>	Humedad relativa del aire (decimal)
<i>HSI</i>	<i>Hue, Saturation, intensity</i>
<i>HSV</i>	<i>Hue, Saturation, Value</i>
<i>HSVH</i>	<i>Plano H del modelo de color HSV</i>
$i - j$	Distancia de la matriz de coocurrencia
i, j	Contadores
$Max(i, j)$	Mayor elemento
<i>MR</i>	Relación de humedad del producto (adimensional)
R^2	Coefficiente de determinación
<i>RMSE</i>	Raíz media de los errores cuadrados
<i>RGB</i>	<i>Red, Green and Blue</i>
<i>SAGARPA</i>	Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación.
t	Tiempo (h)
T	Temperatura del aire (Kelvin)
<i>Vel</i>	Velocidad del aire (m/s)

Griegas

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ Constantes empíricas de la ecuación tipo Arrhenius (Adimensionales)

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ Constantes empíricas de la ecuación tipo Polinomial de la relación Variables de secado DV (Adimensionales)

$\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ Constantes empíricas de la ecuación tipo Polinomial de la relación MR-DV (Adimensionales)

RESUMEN

En este trabajo se presenta el estudio de los descriptores visuales durante el proceso de deshidratado del chile habanero. El proceso se llevó a cabo en un secador de charolas con convección forzada.

La información de las curvas de secado se tomaron de los datos experimentales de Gil. (2016) quien realizó 12 corridas con diferentes condiciones y se realizaron 12 corridas para la obtención de los descriptores visuales. Se obtuvo la información de 23 descriptores visuales, 12 de color, 6 de forma y 5 de textura con ayuda de un programa usando el software LabVIEW 2014 para la adquisición de las imágenes y un código en Matlab R15 para el procesamiento de las imágenes.

Para relacionar los datos visuales con las curvas de secado, se propusieron dos ecuaciones, basadas en modelos de secado de capa delgada y proponiendo una nueva ecuación denominada EP. Con estas ecuaciones y los datos visuales, curva de secado y parámetros de secado (temperatura y velocidad del aire, humedad del aire y humedad del producto) y con ayuda del software SPSS Statistics V23, se realizaron los ajustes necesarios para encontrar el valor de las constantes empíricas de las ecuaciones propuestas.

Finalmente, los resultados indican que es posible determinar la humedad del producto por medio de los cambios en sus características visuales durante el proceso de deshidratado, siendo el descriptor de color *HSV* plano *H* el que mejor resultado tiene al obtener una R^2 de 0.978 y un RMSE de 0.034.

La ecuación propuesta para determinar la humedad del chile habanero durante el proceso de deshidratado es válida a partir 70% del contenido de humedad del 100% inicial.

ABSTRACT

The study of the visual descriptors during the dehydration process of habanero chili is presented in this paper. The process was carried out in a tray dryer with forced convection.

The information of the drying curves were taken from the experimental data of Gil. (2016), who made 12 experiments with different conditions, and, we carried out 12 experiments for obtaining the visual descriptors. The information of 23 visual descriptors, 12 of color, 6 of form and 5 of texture was obtained using a program in LabVIEW 2014 software for image acquisition and a code in Matlab R15 for the image processing.

To relate the visual data with the drying curves, two equations were proposed based on models of thin layer drying and a new proposed equation named EP was proposed. With these equations, visual data, drying curve and drying parameters (temperature and air velocity, humidity and moisture of the product) and using the SPSS V23 software, the necessary adjustments were made to find the value of empirical constants of the proposed equations.

Finally, the results indicate that it is possible to determine the moisture of the product through changes in their visual characteristics during the dehydration process, being the *HSV* color descriptor plane *H* obtained the best result with a R^2 of 0.978 and an RMSE of 0.034.

The proposed equation to determine the habanero chili moisture during the dehydration process is valid when the product has 70% humidity of 100% initial.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los antecedentes para realizar el análisis del proceso de secado y cambios visuales durante el mismo en los alimentos. Se comienza comentando acerca del impacto que existe sobre la productividad nacional del Chile Habanero (*Capsicum Chinense*). Posteriormente se presenta la revisión bibliográfica de trabajos reportados, dividiéndolos en dos categorías: modelos de secado de capa delgada y descriptores visuales en alimentos durante el proceso de secado. Finalmente, se presentan las conclusiones de la revisión bibliográfica, el objetivo general, los objetivos específicos, y el alcance que se tiene en este trabajo.

1.1 Antecedentes

El chile ha formado parte de la alimentación de los mexicanos desde hace muchos años, y en la actualidad se utiliza en la mayoría de los platillos de la comida mexicana. Además, el chile no solo es utilizado para la elaboración de alimentos sino también es usado en la medicina gracias a las propiedades que éste contiene, en especial a su picor (capsaicina) que es la característica primordial del chile. Dicha sustancia ayuda también como anti-inflamatorio y para la buena circulación sanguínea, previniendo la formación de coágulos y el endurecimiento de arterias; es un antioxidante que retarda el envejecimiento; contiene mayor cantidad de vitamina C que los cítricos; y son ricos en potasio, hierro y magnesio. Asimismo, promueven la buena digestión, pues aumenta la producción de saliva y jugos gástricos. En la actualidad, se ha utilizado experimentalmente como tratamiento contra algunos tipos de cáncer (INAH 2013). Otro producto que utiliza al chile como su principal ingrediente es el

gas lacrimógeno (OC; oleorresina de capsicum) que son usados para dispersar manifestaciones

Actualmente, México posee una amplia variedad de producción de chiles (nombre científico Capsicum) los cuales oscilan entre 50 tipos diferentes, siendo los más utilizados en las cocinas mexicanas el jalapeño, serrano, guajillo, chipotle, chile de árbol, pasilla y habanero. Por otra parte, México sobresale en la generación de variedades de chile en el mundo, alrededor del 90% del chile que se consume a nivel mundial es de origen mexicano. Las condiciones del suelo del sureste de México junto con las costumbres y la gastronomía típica permiten que esta zona sea uno de los principales productores de chile habanero(SAGARPA. 2012).

En 2011, el sureste de México, registró una producción de poco más de tres mil cuatrocientas toneladas. El 80% de la producción de chile habanero se comercializa como fruto fresco y el 20% restante se dirige a la elaboración de salsas, pastas y deshidratados; exportándose principalmente a Estados Unidos, Japón, Corea del Sur, Italia y Alemania. (SAGARPA (2012)

Una de las principales formas de exportación es en su presentación deshidratada, ya que de esta manera se reduce el espacio de almacenaje y su tiempo de vida aumenta debido a la poca cantidad de agua que contiene, inhibiendo así el crecimiento de hongos o bacterias que podrían deteriorar la calidad y las propiedades del chile.

Durante el deshidratado del producto se presentan dos procesos: transferencia de calor del aire caliente o una fuente de energía alterna hacia el producto, y la transferencia de masa (humedad) desde el interior del producto hacia la superficie y de ahí hacia el aire circundante. La esencia básica de secado es reducir el contenido de humedad del producto a un nivel que impida el deterioro dentro de un cierto período de tiempo.

El proceso de secado de frutas y verduras involucra varios parámetros tales como: las propiedades mecánicas, físicas y termo-físicas del producto a secar, así como las condiciones de secado como es la velocidad, temperatura y humedad del aire de secado; el contenido de humedad inicial, final y de equilibrio del producto a secar; el grado de madurez; su forma y tamaño, entre otras.

El inconveniente de cualquier método para deshidratar, es que para saber el nivel de humedad del producto, es necesario tomar algunas muestras y pesarlas para realizar un comparativo de su peso inicial hasta su peso actual y de esta forma obtener el porcentaje de agua que se ha extraído. Estudios previos han demostrado que durante el deshidratado de productos agrícolas la forma, la textura y el color cambian durante el proceso de deshidratado. [Mendoza *et al.* (2006) , Kim *et al.* (2006), Arslan y Özcan (2011)].

1.1.1 El chile habanero

Soria *et al.* (2002), citan que Laborde indicó desde 1982 que probablemente el Capsicum chinense era originario de América del Sur, de donde fue introducido a Cuba, aunque en la isla no se siembra ni se consume. De ahí se cree que fue traído a la Península de Yucatán. Esta hipótesis se refuerza al comprobar que C. chinense es el único chile que no tiene nombre maya, a diferencia de otros.

En Yucatán el chile Capsicum chinense es comúnmente llamado “habanero”. Este chile se encuentra distribuido en toda la península, donde se observan diferentes formas, colores y tamaños del fruto. Es una planta de ciclo anual, que puede alcanzar hasta 12 meses de vida, dependiendo del manejo agronómico. Su altura es variable: puede oscilar de 75 y 120 centímetros en condiciones de invernadero. Su tallo es grueso, erecto y robusto; con un crecimiento semideterminado. Las hojas son simples, lisas, alternas y de forma lanceolada, de tamaño variable, lo mismo que su color, el cual puede presentar diferentes tonos de verde, dependiendo de la variedad. Tiene una raíz principal de tipo pivotante, que profundiza de 0.40 a 1.20 metros, con un sistema radicular bien desarrollado, cuyo tamaño depende de la edad de la planta, las características del suelo y las prácticas de manejo que se le proporcionen; puede alcanzar longitudes mayores a los dos metros.

El fruto es una baya poco carnosa y hueca; tiene entre tres y cuatro lóbulos, las semillas se alojan en las placentas y son lisas y pequeñas, con testa de color café claro a oscuro, y su periodo de germinación varía entre ocho y quince días.

Las plantas presentan en promedio hasta seis frutos por axila; éstos son de un tamaño entre dos y seis centímetros. El color es verde cuando son tiernos, y cuando están maduros pueden ser anaranjados, amarillos y rojos (Figura 1.1) y su sabor siempre es picante, aunque el grado de picor depende del cultivar (Medina *et al.* 2008).

El interés por cultivo del chile habanero como producto funcional se centra en aspectos como los capsaicinoides, es especial, la capsaicina que es un compuesto activo de este producto que causa el picor, así mismo se ha demostrado que el chile es una excelente fuente de colorantes naturales, vitaminas, y minerales como se muestra en la Tabla 1.1. (SAGARPA 2012)



Figura 1.1 .Etapas de maduración del chile habanero.

Tabla 1.1. Composición nutricional y físico-química del chile habanero.

Componente	Valores del Chile Habanero
Energía (Kcal)	31.00
Proteínas (mg)	2.20
Grasas (g)	0.80
Carbohidratos (mg)	5.30
Calcio (mg)	18.00
Hierro (mg)	2.40
Capsaicina (mg/g*PS)	44.56
Azucares Totales (mg)	9.20
Ac. Ascórbico (mg)	94.00

1.1.2 Descripción del problema

La conservación de los alimentos en especial vegetales y frutas es un tema de gran importancia en la actualidad, ya que debido al crecimiento en la población mundial, se buscan alternativas para que su vida de almacén sea lo más larga posible esto con el fin de almacenar el alimento que no se consuma inmediatamente para después tener acceso a él ya sea días, meses y quizás años después de su cosecha.

La deshidratación es un método que retira el agua de los alimentos manteniendo casi en su totalidad las propiedades (nutrientes, minerales, vitaminas, entre otros) y otro efecto de este método es que el volumen del producto se reduce significativamente.

Sin embargo, hasta el momento no se ha encontrado un procedimiento documentado, de un estudio formal que muestre alguna mejora para reducir el consumo de energía durante el proceso de deshidratado del chile habanero sin realizar modificaciones significativas al deshidratador.

Por esta razón en este trabajo se propone desarrollar un sistema de visión artificial que analice las características visuales del chile habanero durante el proceso de secado con el fin de conocer el contenido de humedad del producto y así saber en qué etapa del dicho proceso se entra sin la necesidad de hacerlo de manera invasiva que es la de extraer una muestra y pesarla, ya que al realizar esto, el resto de las muestras entran en contacto con la humedad del aire ambiente, rehidratándose parcialmente y esto se ve reflejado en el consumo de energía total al final del proceso de deshidratado..

1.2 Revisión bibliográfica

En esta sección se presenta la descripción de algunos trabajos relacionados con el problema estudiado en esta tesis. La información se clasificó en estudio de los modelos de secado de capa delgada y el estudio de los descriptores visuales en alimentos durante el proceso de secado.

También se presentan algunas normas referentes a la manipulación e higiene de los alimentos y se finaliza con las conclusiones de la revisión bibliográfica.

1.2.1 Modelos de secado de capa delgada

Hossain y Bala (2002) realizaron experimentos de secado del chile verde con temperaturas del aire de secado desde 40 a 65 °C, humedad relativa que de 10 a 60% y la velocidad del aire de 0,10 a 1.0 m/s. Para determinar las características de secado del chile verde, utilizaron las ecuaciones de exponencial simple y de Page. Las dos ecuaciones se acoplaron a los datos experimentales. De acuerdo a los resultados, determinaron que la ecuación de Page describe mejor el secado en capa delgada del chile que la ecuación de exponencial simple.

Akpinar et al. (2003) realizaron una investigación experimental acerca del modelo de secado de capa delgada del pimiento rojo, el cual fue deshidratado en rodajas deshidratadas con ayuda de un deshidratador convectivo. Los experimentos de secado se llevaron a cabo a temperaturas de entrada de aire de 55, 60 y 70 °C y a una velocidad de aire de 1.5 m/s. Se compararon once modelos matemáticos de secado de capa delgada, en función de su coeficiente de correlación para estimar las curvas de secado. De acuerdo con los resultados, una aproximación del modelo de difusión puede describir satisfactoriamente la curva de secado de pimientos rojos con un coeficiente de correlación (R^2) de 0.9987.

Arora et al. (2006) realizaron un estudio acerca de la cinética de secado con cuatro variedades de chiles. Se prepararon dos tipos de muestras (Una perforada y otra sin perforar), ambas fueron tratadas bañándolas con una solución química. Se utilizaron cinco temperaturas para el secado de las muestras (45, 50, 55, 60, y 65 °C). Usaron tres modelos de secado (Page, Page Modificado y Midilli) para describir el comportamiento de secado de chiles. También reportaron que al incrementar la temperatura se reduce considerablemente el tiempo de secado. Las muestras que no fueron perforadas, tomaron más tiempo para alcanzar el nivel de deshidratado que se propuso en comparación con las muestras perforadas. El modelo que mejor describió el proceso de secado fue el de Page y la dependencia de la constante de secado de la temperatura se analizó utilizando una Ecuación de tipo Arrhenius.

Kaleemullah y Kailappan (2006) analizaron la cinética de secado de chiles rojos, usando el modelo de capa delgada. El tiempo necesario para deshidratar los chiles desde un contenido inicial de humedad de alrededor de 35 (B.S.) hasta contenido final de humedad de alrededor de 10.5 (d.b.) fue de 26, 20, 16 y 13 h a una temperatura de aire de secado de 50, 55, 60 y 65 °C. El contenido medio de capsaicina y el valor para las coordenadas cromáticas color rojo/verde de los chiles secos disminuyó de 0.60% a 0.34% y de 25.77 a 14.73%, respectivamente, conforme la temperatura del aire de secado aumentó de 50 a 65 °C. El mejor rendimiento global de los chiles secos fue a la temperatura de 55 °C. Las curvas de secado obtenidas, fueron ajustadas con cuatro modelos de secado (Kaleemullah, Lewis, Hustrulid y Page), determinando que la ecuación de Page es la apropiada para predecir la cantidad de humedad de los chiles en estos experimentos.

Hemis et al. (2009) estudiaron el secado del trigo utilizando el modelo de secado de capa delgada, y para caracterizar el proceso de secado en este modelo se utilizó el fenómeno de flujo másico de evaporación de agua. Las temperaturas de aire para el secado fueron de 40 a 60 °C, la humedad relativa del aire de secado de 10 a 30 %, la velocidad del aire de 0.7 m/s y la humedad inicial del grano se encontraba entre 26 y 31 % (B.S.). El modelo desarrollado fue validado mediante el secado de trigo en un secador usando diferentes temperaturas del aire y los contenidos iniciales de humedad.

Erbay e Icier (2010) realizaron una investigación acerca del modelo de secado de capa delgada para alimentos, abarcando más de 50 modelos diferentes con resultados teóricos y experimentales. Los modelos de interés para realizar el trabajo, son los que se derivan de la segunda ley de Newton (Ley de enfriamiento) los cuales son el modelo de Midilli, Page y Page modificado, que son los que se han trabajado para analizar el proceso de secado de diferentes variedades de chiles con temperaturas de secado de 40 a 65 °C. El modelo que mejor describe el fenómeno es el de Page.

Vega y Lemus. (2011), estudiaron y modelaron el proceso de secado por aire caliente de la papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*) a diferentes temperaturas 40, 50, 60, 70 y 80° C con velocidad de aire de 2 m/s. Durante las pruebas experimentales se observaron las etapas de la curva de secado, inducción, velocidad constante y decreciente. Se aplicaron los modelos de capa delgada de Newton, Henderson y Pabis, Page Modificado y Page. Además se evaluó la calidad de ajuste de estos modelos por medio de la regresión lineal, suma de errores cuadrados, raíz media de los errores cuadrados y Chi-cuadrado. Los parámetros cinéticos de cada modelo presentaron la dependencia normal con la temperatura, y fueron evaluadas con la ecuación de Arrhenius. Al comparar los valores experimentales con los calculados, se demostró que el modelo de Page obtuvo la mejor calidad de ajuste en cada curva de secado, representando una excelente herramienta para estimar el tiempo de secado de este producto.

Mendoza et al. (2014), analizaron el proceso de secado de yuca (*Manihot esculenta* Crantz), las pruebas se realizaron en un secador de charolas convectivo. Las muestras fueron rebanadas de 0.2cm de espesor y de 0.4 cm de largo por ancho. Analizaron el efecto de la temperatura de secado 35, 45 y 55°C y la velocidad del aire de 1, 2 y 3 m/s sobre el tiempo de secado y la difusividad efectiva. Los resultados obtenidos indicaron que a una temperatura y velocidad de aire de 55°C y 3 m/s, el tiempo de secado fue de 4.5 h, alcanzándose una humedad de 4.87%. Los datos derivados de las curvas de secado fueron ajustados por los modelos propuestos de Newton, Dos términos exponencial, Wang y Singh, Henderson y Pabis modificado y Aproximación de Difusión. De acuerdo con los resultados el modelo matemático que describió mejor el comportamiento cinético de las curvas de secado fue el modelo Aproximación de Difusión.

Cruz et al. (2014) estudiaron el secado convectivo de rebanadas de dos tipos de manzanas Golden Delicious y Granny Smith, con temperaturas del aire de secado de 30, 40, 50 y 60°C. Usaron el modelo de capa delgada con cuatro diferentes ecuaciones Page, Henderson y Pabis, Logaritmica y Vega-Lemus, para estudiar la cinética de secado. Llegaron a la conclusión de que al final del proceso, las muestras tuvieron una reducción tanto de acidez como de azúcar, esto para ambos tipos de manzanas. De acuerdo a los resultados, de las cuatro ecuaciones usadas solo la de Vega-lemus no describió de manera apropiada el proceso de secado y determinaron que las tres ecuaciones restantes lo describieron; pero de manera particular, la ecuación de Page fue la mejor. Al final del proceso, observaron que las muestras eran menos duras y menos cohesivas. Además, encontraron que el coeficiente de difusión aumentó con la temperatura, esto fue analizado con una ecuación de tipo Arrhenius.

1.2.2 Descriptores visuales en alimentos durante el proceso de secado

Mendoza *et al.* (2006) desarrollaron e implementaron un sistema de visión por computadora (SVC) para cuantificar el color estándar de frutas y verduras con ayuda de los modelos de espacio de color *RGB*, *HSV* y *Lab*. Evaluaron los espacios, y las condiciones de captura de imagen que afectan los resultados. Estos tres espacios de color fueron comparados en términos de su idoneidad para la cuantificación de color en superficies curvas. Los resultados mostraron que las señales (lineales) estándar *RGB* son eficientes para definir el mapeo entre *RGB* (señales no lineales) de la cámara y un sistema independiente del dispositivo como *CIE XYZ*. El SVC se adaptó bien a cambios en la muestra de la orientación, la resolución y el zoom. El color promedio demostró ser afectado significativamente por la curvatura de la superficie y el brillo de las muestras. Dados los resultados, sugieren que para el análisis del color promedio, el modelo de espacio de color *Lab* es el más apropiado para la cuantificación del color en alimentos con superficies curvas

Quin *et al.* (2008) desarrollaron un sistema de visión artificial, basado en un método para la detección de diversas enfermedades de piel en cítricos utilizando características de textura y de color. Usaron 180 muestras de toronja de la variedad *Ruby Red*. Las muestras se clasificaron en toronjas sanas y toronjas que presentan enfermedades en la cáscara. El método de análisis de imágenes implicó los siguientes procedimientos: selección de la región de interés (ROI); transformación de formato *RGB* a *HSI*; generación de matrices de dependencia espacial a nivel de gris (la SGDM); cálculo de las características de textura; selección de características de textura útil y análisis discriminante para la clasificación de las enfermedades. El procesamiento de las imágenes y el análisis de datos se llevaron a cabo en programas desarrollados en Matlab 7.0. Los cálculos de los descriptores de textura se realizaron para cada plano del modelo de espacio de color *HSI* y obtuvieron 39 características de textura de las cuales seleccionaron 34, 14 del modelo *HSI*, 9 de los planos *HS* y 11 del plano *I*. El modelo de clasificación que utiliza la intensidad de las características de textura (*I*) dio el peor resultado (81,7%) y el modelo que selecciona 14 características de textura del modelo *HSI* logró la mejor clasificación (96,7%).

Bingol et al. (2012) analizaron el cambio de color de uvas Thompson (*Vitis vinifera*) sin semillas, durante el proceso de secado convectivo y el efecto de un pre-tratamiento en solución química a diferentes temperaturas. Las muestras fueron pre-tratadas en una solución química con temperaturas de 30, 40, 50 y 60 °C. La temperatura del aire de secado fue de 60°C con una velocidad de 0.6 m/s usando siete modelos de capa delgada para analizar el proceso de secado (Lewis, Page, Henderson y Pabis, Logarítmico, Aproximación de difusión, Wang y Singh, y Midilli). Para analizar los cambios de color usaron el modelo de espacio de color *CIElab* programado en el software Matlab. Los resultados demostraron que las muestras que fueron pre-tratadas con una temperatura de 60°C se secaron más rápido en comparación de las otras muestras. El modelo de Midilli es el que mejor describe el proceso de secado. Los valores de *L* y *b* decrecieron durante el proceso de secado, y el valor de *a* incrementó. Todas las muestras tendieron a adoptar un color café, pero las muestras que fueron pre-tratadas en la solución química con temperatura superior a los 40°C, tendieron a adoptar un café más claro.

Guiné y Barroca (2012) evaluaron el efecto de diferentes tratamientos de secado sobre los valores de color y de textura de pimientos verdes y calabaza, utilizando dos métodos diferentes de secado: por convección y por congelamiento. Las temperaturas de aire para el secado convectivo fueron de 30 y 70 °C. Concluyeron que el aumento de la temperatura de secado reduce drásticamente la dureza de los pimientos verdes. Por otra parte, la elasticidad fue mayor en los pimientos verdes secos y se observó un efecto contrario en la masticabilidad. También reportaron que el aumento de temperatura de 30 a 70 °C reduce particularmente la dureza y la masticabilidad en el producto seco; la cohesividad y elasticidad se mantienen prácticamente constantes. En cuanto al color, se pudo concluir que el secado convectivo con una temperatura del aire de 30 °C produce pequeños cambios en el color de verde pimienta mientras que el secado al aire a 70 °C y el secado por congelamiento originaron cambios de color más intensos. El aumento de la temperatura en el secado convectivo aumentó la saturación de color de calabaza, mientras que disminuyó el ángulo de tono. Además, la cromaticidad de la calabaza seca disminuyó significativamente con el secado por congelación, mientras que el ángulo *HUE* se mantuvo constante en comparación con el de las verduras frescas.

Wu y Sun (2013) realizaron una recopilación de las mediciones de color para controlar la calidad de los alimentos. Mencionan que el color es el primer atributo de calidad de los alimentos evaluados por los consumidores. Describen los espacios de color más usados (*RGB, YIQ, CMY, HSV, XYZ, LAB* y *LUV*), sus aplicaciones y la transformación de un modelo de espacio de color a otro. Ellos concluyen que el uso de inspección visual computarizada en alimentos, es una forma eficaz y fiable para analizar la calidad de los alimentos a bajo costo, aumentando el rendimiento de la producción y reduciendo el coste de esta misma.

Shahabi et al. (2013) realizaron un estudio para investigar el efecto del proceso de secado convectivo sobre el color del té verde. Las temperaturas de secado fueron de 50, 60, 70, 80 y 90 °C, y las velocidades de secado fueron de 0.5, 1 y 1.5 m/s. Aplicaron un sistema de visión por computadora para estudiar los cambios de color durante el secado. Las imágenes las tomaron con el modelo de color RGB, después las transformaron al modelo de color XYZ y finalmente al modelo de color CIElab. Los parámetros de color obtenidos de *L, a* y *b* se calibraron con ayuda del colorímetro Hunter-Lab. Los resultados mostraron que el plano de brillo (*L*) disminuyó durante el proceso de secado y está directamente relacionado con la temperatura. El menor cambio en los parámetros de color se registró con una temperatura de 50°C a 0.5 m/s de velocidad de aire y los mayores cambios se registraron a una temperatura de 70°C con una velocidad de aire de secado de 1.5 m/s.

Chen y Martynenko (2013) analizaron el efecto de la temperatura de secado de moras azules sobre su forma y los cambios de color durante el proceso de secado. Colocaron aproximadamente 50 g de moras azules distribuidas en la cámara de secado y se secaron a temperaturas de 40, 50, 60, 70 y 80 °C, con una velocidad de aire de secado de 0.9 m/s. Para el análisis del color, usaron el modelo de espacio de color *CIELab*, y para analizar la forma usaron el software LabVIEW 2011 con el complemento de Visión. De acuerdo a los resultados concluyeron que el proceso de secado de las moras azules puede ser analizado en tiempo real con ayuda de la visión computarizada. El aumento de la temperatura se ve reflejado en el tiempo de secado (40°C en 8.8 h y 80°C en 3.1 h), afectando de igual forma a la densidad final de 40 °C a 1.26 g/m³ y a temperaturas de 60 a 80 °C tienen una densidad final de 0.38 g/ m³. Para el color, los valores de *a* y *b* incrementaron significativamente

mientras que el valor de L decreció. También se observó que los valores de color no tuvieron tanta diferencia entre las muestras secadas a una temperatura de 40 y 50 °C, pero al aumentar la temperatura de 60 °C en adelante, el valor del color entre muestras varió significativamente.

Swain et al. (2014) realizaron experimentos para estudiar la cinética del cambio de color en 10 rebanadas de diferentes medidas de pimiento dulce amarillo durante el secado por convección con temperaturas de 60, 45 y 30 °C y una velocidad de aire constante de 1.5 m/s, el proceso de secado fue asistido por un microondas con una potencia de 280, 210, 140 y 70 W. El cambio de color en las cinéticas se determinó utilizando los valores de L , a y b , chroma, matiz y color total de cambio (ΔE). Los resultados indicaron que la degradación de a , ΔE , y el matiz siguieron un orden de cero en su cinética y L , b y chroma siguieron una cinética de primer orden. Se asume que la constante de velocidad tiene una dependencia de la temperatura de tipo Arrhenius. Los resultados indican que basados en la energía de activación, los valores de b y los parámetros del matiz demostraron ser las medidas más sensibles de cambio de color, lo que podría tenerse en cuenta durante el proceso térmico del pimiento amarillo para obtener un producto de calidad.

1.2.3 Conclusiones de la revisión bibliográfica

De la revisión bibliográfica se llegaron a las siguientes conclusiones:

- El aumento de la temperatura del aire tiene un efecto directo sobre el tiempo de secado al reducirlo considerablemente.
- Las pruebas realizadas demuestran que, de los tres parámetros de secado: temperatura del aire, humedad relativa del aire y velocidad de secado, la temperatura del aire es la que mayor impacto tiene sobre el proceso de secado.
- De los modelos de secado de capa delgada que se encontraron, los más usados para chiles y pimientos son el de Midilli, Page y Page Modificado.
- Los modelos de color más usados para el análisis de alimentos durante el proceso de secado son RGB , HSV , HSI y $CIELab$. Los cuales describen el cambio de color en las

muestras y como pre-tratamiento para otros descriptores como los de forma y de textura.

- La temperatura tiene un efecto directo sobre el cambio de color en las muestras.
- Durante la revisión no se encontraron trabajos que utilizaran algún descriptor visual para análisis el proceso de secado del chile habanero (*Capsicum chinense*).

1.3 Objetivos y alcances

Objetivo general

Determinar la humedad del chile habanero durante el proceso de deshidratado mediante el estudio de los descriptores visuales.

Objetivos particulares

- Determinar el comportamiento de los descriptores visuales durante el proceso de deshidratado.
- Relacionar los descriptores visuales con las variables de secado (velocidad, temperatura, humedad relativa del aire y humedad del producto).
- Determinar la humedad del producto con base a una imagen.

Alcances

- Obtener al menos seis descriptores visuales (dos de forma, dos de textura y dos de color) del chile habanero durante su proceso de deshidratado en un deshidratador de charolas convectivo hasta alcanzar una humedad aproximada del producto de 4%.
- Las pruebas se realizarán para dos tipos de madurez del chile habanero (verde y amarillo).
- Relacionar los descriptores visuales con las variables de secado utilizando el software IBM SPSS Statistics V23.

- La metodología descrita en este trabajo sólo es válida para muestras de chile habanero con 12 perforaciones deshidratadas con el método de capa delgada.

1.4 Organización de la tesis

En el Capítulo 2 se presenta una revisión de los trabajos que se encuentran en la literatura relacionados a este estudio. La información está dividida en dos secciones, la primera acerca de los procesos y parámetros de secado, la segunda acerca de los tipos de descriptores visuales más usados en el análisis de alimentos.

En el Capítulo 3 se muestra la metodología seguida para la adquisición de las imágenes e instrumentación del equipo deshidratador.

En el Capítulo 4 se presenta la metodología seguida para el procesamiento de las imágenes antes de obtener la información de los descriptores visuales.

En el Capítulo 5 se presenta de forma detallada los descriptores visuales y las ecuaciones que los gobiernan para la adquisición de la información de la imagen.

En el Capítulo 6 se presentan los resultados experimentales y los ajustes de tres ecuaciones propuestas para los ajustes de dichos datos y se muestra la metodología seguida para la selección de una ecuación que relacionara los datos visuales experimentales con la humedad del producto.

En el Capítulo 7 se presentan las conclusiones del trabajo presentado, así como las recomendaciones para los trabajos futuros relacionados con este trabajo.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los principios, los parámetros y los periodos del proceso de secado.

2.1 Conceptos de secado

La disminución de la humedad de los alimentos es uno de los métodos más antiguos utilizados para su conservación. Al reducir el contenido de agua en un alimento hasta un nivel muy bajo, se elimina la posibilidad de su deterioro biológico. Además del efecto conservante, mediante la deshidratación, se reduce el peso y el volumen del alimento, aumentando la eficacia de los proceso de transporte y almacenaje. La deshidratación de un alimento produce a menudo otro más apto para el consumo como es el caso de alimentos en polvo que al mezclarse con agua se puede ingerir como cualquier bebida, lo que reduce su tiempo y facilita su preparación entregando una cantidad similar de nutrientes como un producto fresco.

La conservación de frutas y hortalizas mediante su deshidratación supone un importante desafío, pues debido a la estructura de estos productos la eliminación del agua debe de hacerse de modo que el perjuicio sobre su calidad sea mínimo. El mecanismo que regula el proceso de secado de un producto en forma de partículas depende de la madurez y de los parámetros de secado como: el contenido de humedad, la forma y tamaño del producto, la temperatura del medio de calentamiento, las velocidades de transferencia superficiales y contenido de humedad en equilibrio, el control de estos parámetros dependerá para poder tener un resultado aceptable (Singh; 2001).

El proceso de secado se divide en dos etapas (Figura 2.1):

La primera etapa inicia en el punto 1 donde el aire comienza a calentarse, es aquí donde el aire tiene una temperatura de bulbo seco T_1 mientras se mantiene constante su contenido de humedad relativa HR_1 y una entalpia h_1 . Al aumentar más la temperatura del aire, sus

propiedades se desplazan del punto 1 al punto 2 donde aumenta la temperatura de bulbo seco T_2 , aumenta su entalpia h_2 y disminuye su humedad relativa HR_2 .

La segunda etapa inicia en el punto 2, donde el aire que tiene una temperatura de bulbo seco T_2 , una humedad relativa HR_2 y una entalpia h_2 . Al entrar el aire caliente en contacto con el producto a secar, las propiedades del aire se desplazan del punto 2 al punto 3, donde disminuye la temperatura de bulbo seco T_3 , mantiene constante su entalpia h_3 y aumenta su humedad relativa HR_3 .

El proceso de secado de producto se realiza en la segunda etapa y se realiza dentro de la cámara de secado del secador (Simá 2009).

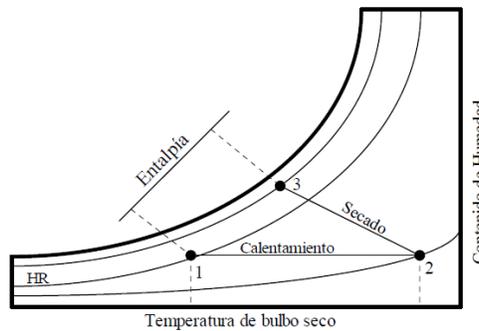


Figura 2.1. Carta psicrométrica del secado

2.1.1 Procesos básicos de secado

Para reducir de forma adecuada el contenido de humedad en los alimentos, se deben considerar los diversos procesos y mecanismos que tienen lugar en el producto a deshidratar. Estos procesos y mecanismos tienen particular importancia en el caso de frutas y verduras, en las que la retirada del agua puede modificar su estructura.

2.1.1.1 *Difusión de humedad*

Una cantidad importante del agua será eliminada de los alimentos mediante su difusión, en fase líquida y/o vapor, a través de su estructura interior y al movimiento del agua líquida le seguirá su evaporación en algún punto en el interior del alimento. La eliminación de la humedad del producto dependerá, en parte de la transferencia de materia por convección hacia la superficie del producto. Aunque este proceso puede no ser el limitante de la velocidad, no debe olvidarse la importancia de mantener las condiciones límite óptimas para el transporte de la humedad.

2.1.1.2 *Curva de velocidad de secado*

La eliminación de agua en un alimento se realizará normalmente en una serie de etapas diferenciadas entre sí por la velocidad de secado (Figura 2.2). La etapa inicial

(A-B) se considera como el calentamiento, debido a que el agua y alimento se calienta ligeramente. Posteriormente se produce una reducción importante del contenido de agua a velocidad de secado constante (B-C); en esta etapa tiene lugar una temperatura constante. En la mayoría de los casos esta etapa de velocidad de secado constante finalizará al alcanzarse la humedad crítica (X_{cr}); posteriormente existirán uno o varios periodos de velocidad de secado decreciente (C-D). La humedad crítica suele estar claramente identificada debido al cambio brusco de la pendiente de la curva de velocidad de secado. La humedad que se alcanza en tiempos prolongados de secado es conocida como humedad de equilibrio (X_{eq}) debido a que su valor tiene cambios muy pequeños (E), (Singh, 2001).

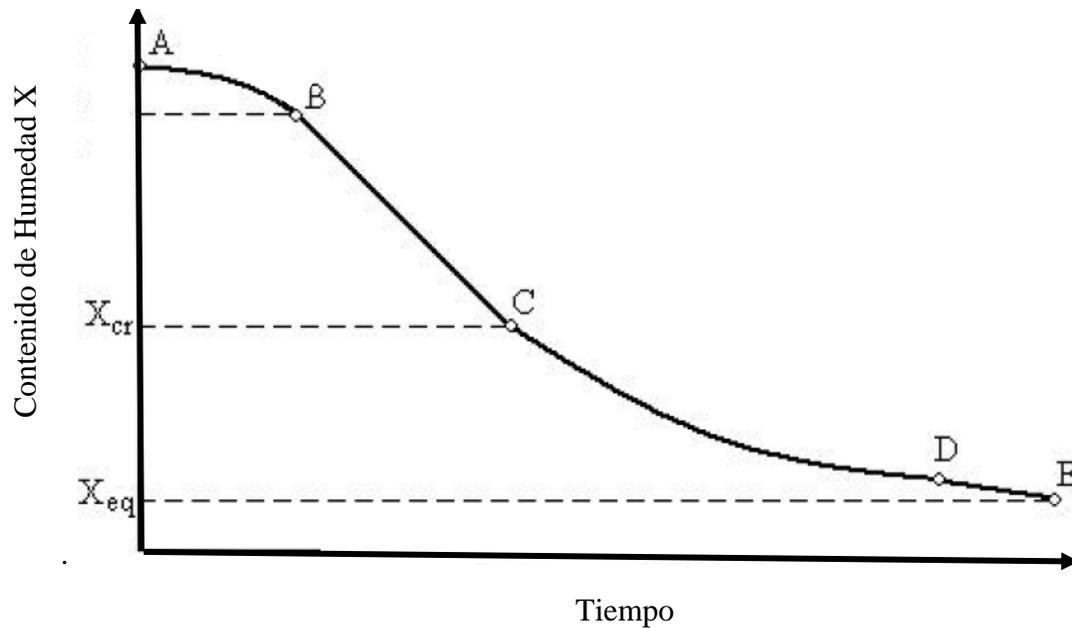


Figura 2.2. Curva normal de secado

El comportamiento de la curva de secado variará dependiendo del tipo de alimento, el tipo de deshidratador y de las condiciones de las variables de secado: temperatura, humedad relativa del aire, de la dirección del aire y de la velocidad de este.

2.1.2 Parámetros de secado

Durante el proceso de secado varios parámetros influyen en el tiempo de secado, como son: la temperatura del aire, la velocidad del aire, la humedad relativa del aire, el contenido inicial de humedad del producto, contenido final, contenido de humedad de equilibrio y el contenido de humedad crítica.

➤ **Temperatura del aire**

La temperatura del aire desempeña un papel importante en los procesos de secado. En forma general, conforme se incrementa el valor de esta, el tiempo para retirar la humedad se acelera dentro de los límites posibles. En la práctica de secado, la elección de la temperatura se lleva a cabo tomando en cuenta el producto a secar.

Existen diversos niveles de temperatura que se mantienen durante el proceso de secado:

- Temperatura de bulbo seco: es aquella temperatura del ambiente que se mide con instrumentación ordinaria (generalmente con un termómetro de mercurio) ya que no toma en cuenta factores como la radiación solar, la humedad del aire, entre otros.
- Temperatura de bulbo húmedo: es la temperatura de equilibrio que se alcanza cuando la mezcla de aire seco y vapor de agua pasa por un proceso de enfriamiento adiabático hasta llegar a la saturación.

➤ **Velocidad del aire**

La velocidad del aire de secado tiene como funciones principales, en primer lugar, pasar a través del producto a secar con el fin de transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el producto facilitando su evaporación, y en segundo lugar, transportar la humedad saliente del material hacia el exterior de la cámara de secado. A mayor velocidad, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y en caso contrario, si se disminuye la velocidad del aire de secado la tasa de evaporación también disminuye, alargando el tiempo de secado.

➤ **Humedad relativa del aire**

Se define como la razón de la presión de vapor de agua presente, con respecto a la presión de vapor de agua a la misma temperatura expresada en porcentaje (%). Cuando se eleva la temperatura del aire, aumenta la capacidad de absorción de humedad y viceversa. Cuando el aire contiene su máxima capacidad, se dice que se

trata de un aire completamente saturado y por lo tanto incapaz de absorber más humedad, por el contrario, un aire no saturado tiene la posibilidad de absorber una cantidad determinada de humedad hasta lograr su saturación.

➤ **Contenido de humedad inicial**

Es la humedad que tiene el producto de cosecha (recién cosechado) y esta depende de la madurez del mismo, este parámetro influye en el tiempo de secado ya que entre mayor contenido de humedad del producto, mayor será la cantidad de agua a evaporar por unidad de área.

El contenido de humedad se define como la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco y las unidades con las que se expresan son kg de agua/ kg de aire seco. La cantidad de humedad inicial de los productos se puede expresar en base húmeda y en base seca.

- Humedad en base húmeda: es la cantidad de agua por unidad de masa de muestra húmeda.

$$H_{bh} = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa de muestra húmeda}} \quad \text{Ec. 2. 1}$$

Humedad en base seca: Es la cantidad de agua por unidad de masa de sólido seco en la muestra.

$$H_{bs} = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa de Sólido seco}} \quad \text{Ec. 2. 2}$$

➤ **Contenido de humedad final**

Se refiere a la humedad que tiene el producto una vez terminado el proceso de secado. Este parámetro depende del tiempo en que se desee almacenar el producto seco y la calidad que se quiera obtener. En caso de no tener una humedad mínima para almacenarlo, el producto se verá afectado por la proliferación de microorganismos.

➤ **Contenido de humedad de equilibrio**

La humedad de equilibrio, es la humedad que existe cuando la presión de vapor del agua en el alimento está en equilibrio, con la presión parcial del vapor de agua en el aire, cuando se expone el alimento en un ambiente de humedad relativa a temperatura constante por un periodo de tiempo largo. La humedad de equilibrio se expresa en base seca y sus unidades son kg de agua/ kg de sólido seco.

Existen modelos teóricos para expresar el contenido de humedad de equilibrio en los alimentos, los cuales están en función básicamente de la humedad relativa, y, en algunos casos incluyen la temperatura.

➤ **Contenido de humedad crítica**

Es la humedad que tiene el producto cuando la resistencia interna al transporte de humedad es igual a la resistencia externa a la remoción de vapor de agua de la superficie del producto, depende de las condiciones de secado, y de las características físicas del producto.

2.2 Modelos de secado

En la literatura existen modelos teóricos de secado entre los que destacan son: el modelo de secado logarítmico y el modelo de secado de capa delgada. El modelo de secado de capa delgada es el que utiliza con frecuencia para predecir la cinética de secado de los alimentos.

Modelo de capa delgada

De acuerdo con la literatura, la cinética de secado de los alimentos es un fenómeno complejo y requiere representaciones simples para predecir el comportamiento del proceso de secado. Los modelos matemáticos de secado de capa delgada describen el fenómeno de secado de algunos alimentos, y estos modelos están divididos en tres categorías: Teórico, semi-teórico y empírico (Krokida *et al.* 2003).

- Los modelos teóricos se refieren a la solución de la ecuación de difusión o de las ecuaciones de transferencia de energía y masa.
- Los modelos semi-teóricos, se obtienen gracias a la simplificación general de las series de solución de la segunda ley de Fick (Erbay e Icier, 2010)
- Los modelos empíricos, se obtienen de la relación entre el contenido de humedad y el tiempo de secado (Kucuk *et al.* 2014).

El secado en capa delgada, es el proceso de remoción de agua de un medio poroso por evaporación, en la que el flujo de aire de secado pasa a través de una capa delgada de producto hasta que el contenido de humedad de equilibrio se alcanza, ésta remoción depende de la temperatura de secado, la velocidad del aire, la humedad relativa del aire y la madurez del producto (Kucuk *et al.* 2014) .

Gil. (2016), menciona que existen múltiples modelos de secado de capa delgada utilizados para predecir la cinética de los alimentos, ella estudió 17 modelos más aplicados (Tabla 2.1) determinando que los modelos de Page, Page Modificado y Midilli son los que mejor describen el secado del chile habanero

Tabla 2.1.. Modelos de secado de capa delgada

No. De Modelo	Nombre	Ecuación	Año
1	Newton	$MR = e^{-kt}$	1921
2	Page	$MR = e^{-kt^n}$	1949
3	Henderson y Pabis	$MR = ae^{-kt}$	1961
4	Thompson et al	$MR = e^{(-a-(a^2+4bt)^{\frac{1}{2}}/2b)}$	1968
5	Page ¹ Modificado	$MR = e^{[(-kt)^n]}$	1973
6	Dos términos	$MR = ae^{-k_0t} + be^{-k_1t}$	1974
7	Henderson	$MR = ae^{-k_0t} + be^{-k_1t}$	1974
8	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	1978
9	Dos términos exponencial	$MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kat}$	1980
10	Peleg	$MR = 1 - t(a + bt)$	1988
11	Page ² Modificado	$MR = e^{(-kt)^n}$	1991
12	Page ³ Modificado	$MR = e^{[-k(\frac{t}{L^2})^n]}$	1991
13	Aproximación de difusión.	$MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kbt}$	1998
14	Henderson y Pabis Modificado	$MR = ae^{-kt} + be^{-gt} + ce^{-ht}$	1999
15	Midilli	$MR = ae^{-kt^n} + bt$	2002
16	Akpinar y Bicer	$MR = ae^{-kt} + b$	2005
17	Silva et al	$MR = e^{-at-b\sqrt{t}}$	2012b

donde $a, b, c, g, h, k, k_0, k_1, L$ y n son constantes empíricas de secado.

Los parámetros de secado más importantes en el proceso de secado de capa delgada son: la temperatura, la velocidad y la humedad relativa del aire de secado, los cuales deben ser incluidos en los modelos de capa delgada. Estos parámetros se relacionan con las constantes empíricas $a, b, c, g, h, k, k_0, k_1, L$ y n por medio de la ecuación de tipo Arrhenius (Sawhney *et al.* 2000).

$$a, b, c, g, h, k, k_0, k_1, L \text{ y } n = \alpha_0 v^{\alpha_1} HR^{\alpha_2} \exp\left(-\frac{\alpha_3}{T_{abs}}\right) \quad \text{Ec. 2. 3}$$

donde $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$, y α_3 son constantes que se determinarán con los parámetros experimentales, para después aplicar una regresión no lineal, v es la velocidad del aire de secado, HR es la humedad relativa del aire de secado y T_{abs} es la temperatura absoluta del aire de secado.

2.3 Descriptores Visuales

Una vez analizado la información del estado del arte se encontró que la mayoría de los estudios que han realizado describen procedimientos manuales para caracterizar el proceso de deshidratado de pimientos y chiles verdes y rojos, y se encontró un trabajo que analiza el comportamiento del proceso de deshidratado del chile habanero mediante el modelado de su curva de secado, pero no se encontró un estudio que describa la caracterización de la deshidratación del chile habanero por medio de visión artificial. Esta visión se centra en las características de forma y una representación interna cuando el principal interés se presente en las propiedades de reflectividad como lo son el color y la textura (López 2009).

Para este trabajo se tomaron en cuenta ambas descripciones (de forma y reflectivas) las cuales se presentan a continuación:

- **Forma:** Las muestras de chile habanero sufren un encogimiento conforme pasa el tiempo de deshidratado, lo que indica una reducción en su área y perímetro y una modificación en su eje mayor y menor.

- **Textura:** La superficie de las muestras tienden a ser lisas con poca rugosidad pero al avanzar el proceso de deshidratado la superficie tiende a mostrar mayor rugosidad.
- **Color:** Conforme las muestras pierden agua también su color varía, de un verde brillante a un café opaco y lo mismo ocurre con las muestras amarillas.

En este capítulo se presenta el marco teórico de los descriptores de forma, color y textura. El cálculo de dichos descriptores se muestra en la Figura 2.3.

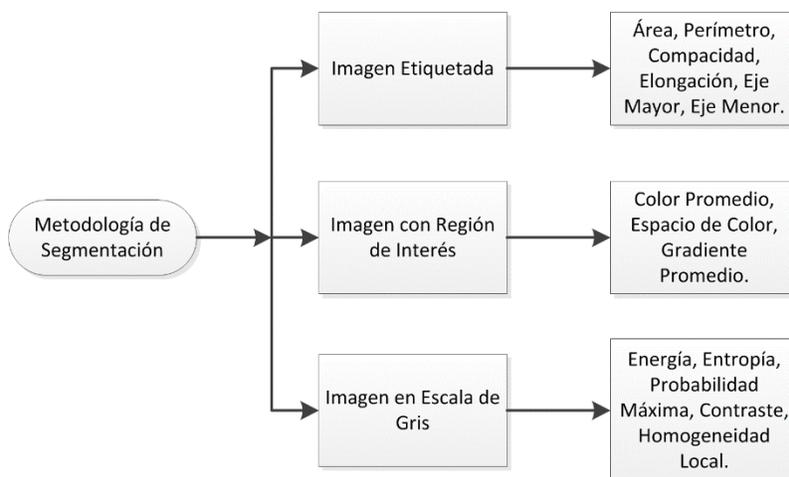


Figura 2.3. Diagrama del proceso de los descriptores de Forma, Color y Textura.

2.4 Descriptores de forma

Las características geométricas contienen información de forma, posición, tamaño y orientación de la región.

El cálculo de los descriptores de forma se hizo para tres muestras de chile habanero verde y tres muestras de chile habanero amarillo para cada una de las doce diferentes condiciones de

deshidratado que se realizaron para este trabajo. Los descriptores que se usaron se describen a continuación:

2.4.1 Área

El área de una región se define como el número de píxeles que integran la región y se calcula mediante la Ecuación 2.3 (López 2009)

$$A = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_{ij} \quad \text{Ec. 2.3}$$

donde b_{ij} es el pixel perteneciente a la región.

2.4.2 Perímetro

El perímetro de una región se define como el número de píxeles que pertenecen al borde de la región. Se calcula mediante la Ecuación 2.4.

$$P = \sum_{i=1}^n * \sum_{j=1}^m br_{ij} \quad \text{Ec. 2.4}$$

donde br_{ij} es el pixel perteneciente a la región del borde.

2.4.3 Compacidad

La compacidad es un descriptor de regiones frecuentemente usado como característica de un objeto y está definido por la Ecuación 2.5 (López 2009).

$$F = \frac{P^2}{4 * \pi * A} \quad \text{Ec. 2.5}$$

donde P es el perímetro y A es el área.

2.4.4 Elongación

La elongación o alargamiento, es un parámetro que no depende del tamaño de la región y viene dado por la Ecuación 2.6 (López 2009).

$$E = \frac{A}{P^2} \quad \text{Ec. 2.6}$$

donde P es el perímetro y A es el área.

2.4.5 Eje mayor

El diámetro de un contorno viene dado por la distancia euclídea entre los dos píxeles del contorno más alejados (Figura 2.4). La recta que pasa por dichos puntos se llama eje mayor de la región. Se representa por la Ecuación 2.7 (López 2009).

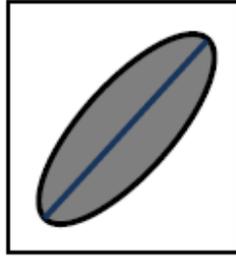


Figura 2.4. Vista del Eje Mayor

$$\text{Eje mayor} = \sqrt{[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]} \quad \text{Ec. 2.7}$$

donde (x_2, x_1) y (y_2, y_1) son puntos del eje mayor.

2.4.6 Eje menor

Eje perpendicular al eje mayor su resultado está dado en pixeles (Figura 2.5) y es calculado mediante la ecuación 2.8. (Mery 2006).

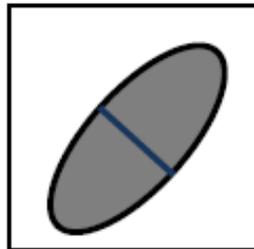


Figura 2.5. Vista del Eje Menor

$$\text{Eje menor} = \sqrt{[(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2]} \quad \text{Ec. 2.8}$$

donde (x_4, x_3) y (y_4, y_3) son puntos del eje menor.

2.5 Descriptores de color

El color es la característica más básica del contenido visual, por lo tanto, es posible utilizar colores para describir y representar una imagen. El estándar MPEG-7 ha probado el procedimiento más eficaz para describir el color y se han seleccionado los que han dado los mejores resultados. Este estándar propone distintos métodos para obtener los descriptores, y una de las herramientas definidas para describir el color es el DDC, que permite describir la relación de color entre secuencias o grupo de imágenes (Wu y Sun, 2013).

2.5.1 Espacio de color

Los espacios de color que contemplaron para este trabajo son los siguientes:

2.5.1.1 RGB (Red, Green, Blue)

Las imágenes RGB utilizan tres colores para reproducir en pantalla hasta 16.7 millones de colores. En la Figura 2.6 se muestra este modelo el cual asigna un valor de intensidad a cada píxel que oscile entre 0 y 255 para cada uno de los componentes RGB de una imagen en color. Por ejemplo, un color rojo brillante podría tener un valor R de 246, un valor G de 20 y un valor B de 50. El rojo más brillante que se puede conseguir es el R: 255, G: 0, B: 0. Cuando los valores de los tres componentes son idénticos, se obtiene un matiz de gris. Si el valor de todos los componentes es de 255, el resultado será blanco puro y será negro puro si todos los componentes tienen un valor 0.

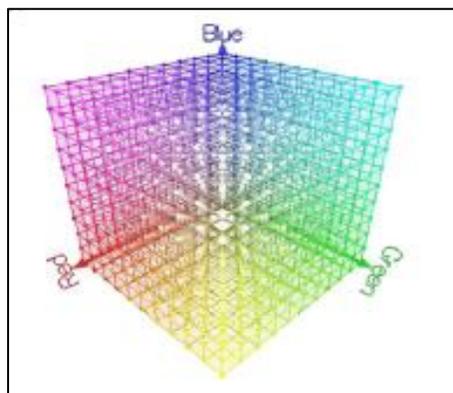


Figura 2.6. Modelo de Espacio de Color RGB.

2.5.1.2 *CMYK (Cyan, Magenta, Amarillo y Negro)*

El modelo CMYK se basa en la cualidad de absorber y rechazar luz de los objetos. Si un objeto es rojo esto significa que el mismo absorbe todas las componentes de la luz exceptuando la componente roja. En el modelo CMYK (Figura 2.7) da a cada píxel un valor de porcentaje para las tintas de cuatricromía. Los colores más claros (iluminados) tienen un porcentaje pequeño de tinta, mientras que los más oscuros (sombras) tienen porcentajes mayores (López 2009).

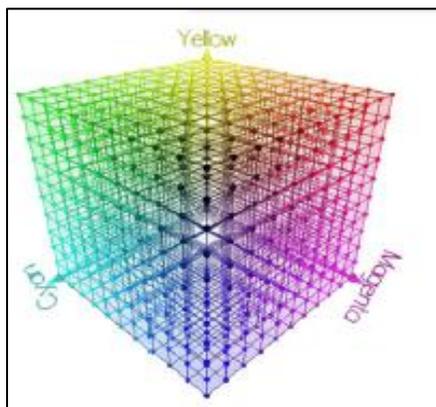


Figura 2.7. Modelo de Espacio de Color CMYK

2.5.1.3 *HSV (Tono, Saturación, Brillo)*

Es la representación tridimensional del color basado en los componentes de tinte, matiz o tonalidad (hue), saturación (saturation) y brillo o valor (value). El color HSV (Figura 2.8) sigue una representación más parecida a las coordenadas cilíndricas. Además, es una representación más cercana a la forma en que los humanos perciben los colores y sus propiedades, pues se agrupan las tonalidades de color, lo cual es distinto al caso RGB donde los colores no están necesariamente tan agrupados (Wu y Sun, 2013).

El modelo de color HSV es una transformación no lineal del modelo RGB en coordenadas cilíndricas de manera que cada color viene definido por las siguientes dimensiones:

- Tinte o matiz: Ángulo que representa el matiz, normalmente definido entre 0° y 360° .
- Saturación: Nivel saturación del color, dado entre 0 y 1, 0 representa sin saturación alguna (blanco), hasta 1 que sería el matiz en toda su intensidad. Es común también darlo en percentiles 0%-100%.
- Brillo: Nivel del brillo entre 0 y 1. 0 es negro; 1, blanco. Al igual que la saturación puede darse en porcentos entre 0% y 100%. De esta forma el 50% indica el nivel medio o normal del brillo del color.

Las amplitudes para cada tonalidad de color abarcan 120° . Por ejemplo los rojizos (255,0,0) se disponen a ambos lados de 0° , mientras los verdes (0,255,0) lo hacen alrededor de 120° y por último los tonos azules (0,0,255) se distribuyen alrededor de 240° .

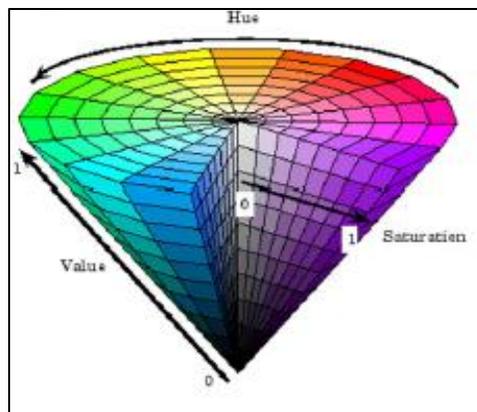


Figura 2.8. Modelo de Espacio de Color HSV

2.5.1.4 CIE XYZ (Rojo, Verde y Azul)

Fue diseñado en 1931 por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) para describir el color, acorde con la manera en que un observador humano estándar lo percibe. En la Figura 2.9 se muestra el modelo de color CIE XYZ que se interpreta en un gráfico llamado Diagrama de Cromaticidad CIE que representa el conjunto de colores que el ser humano puede potencialmente visualizar (colores del espectro visible), en el que cada color absoluto está representado matemáticamente a través de 3 coordenadas X, Y y Z, para la luminosidad.

Aunque no se utiliza como modelo de color en los programas de edición de imágenes, es la base de la mayoría de los sistemas de gestión de color (Wu y Sun, 2013).

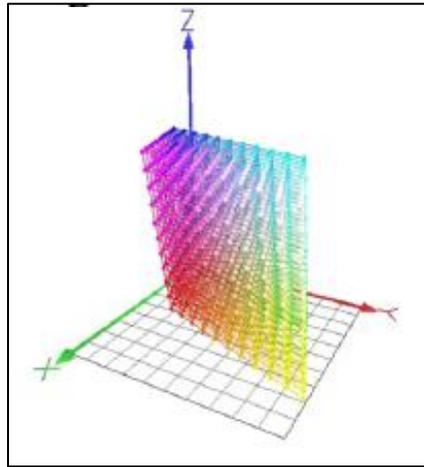


Figura 2.9. Modelos de Espacio de Color XYZ

2.5.1.5 CIE Lab

CIE Lab percibe tres colores de luz medidos en el contexto de una iluminación específica y todos los demás son considerados como una combinación de color, iluminación y superficie reflectante. Considera el espacio en forma uniforme y despliega tres ejes espaciales: L (luz, blanco - negro), a (rojo - verde), b (amarillo - azul) (Wu y Sun, 2013).

El color CIE Lab es independiente del dispositivo de salida, es decir, crea colores coherentes con independencia de los dispositivos concretos, como monitores, impresoras u ordenadores utilizados para crear o reproducir la imagen. El componente de luminosidad (L) oscila entre 0 y 100. El componente a (eje verde - rojo) y el componente b (eje azul - amarillo) pueden estar comprendidos entre + 120 y - 120 (Figura 2.10).

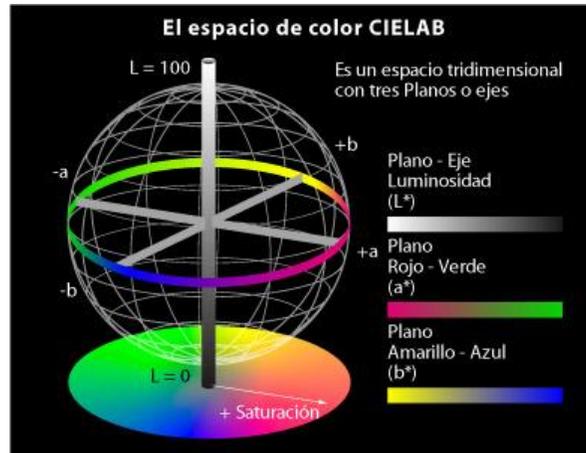


Figura 2.10. Modelo de Espacio de color CIE Lab

Los modelos de color CYMK y XYZ son modelos que no se aplicaron directamente sobre las imágenes, estos modelos se usaron para pasar del formato original a CYMK y después a HSV y HSI y de RGB a XYZ para convertirlo a CIE Lab.

2.5.2 Color promedio

Este descriptor de color, es el promedio del valor del color de una región determinada y se calcula con la Ecuación 2.9 (López 2009).

$$G = \frac{1}{A} \sum_{ij \in R} x(i, j) \quad \text{Ec. 2.9}$$

donde R denota el conjunto de píxeles de la región y $x(i, j)$ el valor de la variable de color en el píxel (i, j) , A es el área de la región.

2.5.3 Gradiente promedio

Esta característica toma el valor promedio del gradiente de la variable de color en el borde de la región. Con esta característica se puede medir qué tan abrupto es el cambio en la coloración de la región respecto a su entorno (Ballesteros 2006). El gradiente promedio se calcula con la ecuación 2.10.

$$GP = \frac{1}{L} \sum_{ijR} x'(i, j) \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde $x'(i, j)$ es el modulo del gradiente de la variable de color del pixel (i, j) . El número de píxeles del conjunto L es el perímetro de la región.

2.6 Análisis de la textura

En esta sección se muestran los descriptores de textura contemplados para este trabajo. Para calcular estos descriptores se usaron las imágenes en su formato original RGB sólo en las zonas de interés (muestras de chile habanero) que fueron segmentadas previamente. Las imágenes recibieron un pre-procesamiento antes de aplicar los descriptores de textura, dicho proceso se muestra a continuación.

2.6.1 Pre-procesamiento de las imágenes

Se realizó la conversión de la imagen en RGB a escala de grises usando el rango de 0 a 255, ya que abarca una mayor cantidad de valores de los píxeles sin la necesidad de normalizar y redondear el valor del pixel como es el caso del intervalo de 0 a 1 con un paso de 0.1.

Los filtros usados en el análisis de imágenes por lo general se usan para quitar el ruido de las mismas haciendo más claras las imágenes. Para este caso, se busca mediante el uso de filtros, el resaltar la rugosidad de los chiles, facilitando así el análisis de su comportamiento a lo largo del proceso de secado. Es este caso se utilizaron dos filtros, el filtro Gabor y el filtro Wavelet, los cuales se describen a continuación.

2.6.1.1 Filtro Gabor

Gabor es un filtro en 2D, se le asigna una determinada frecuencia y dirección para obtener una reducción del ruido a la vez de preservar una dirección de la imagen original. La forma general del filtro de Gabor está dada por la Ecuación 2.11. (Gonzalo 2003).

$$G = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_{\theta_k}^2}{\sigma_x^2} + \frac{Y_{\theta_k}^2}{\sigma_y^2}\right)} * e^{(i*\pi*2*f*X_{\theta_k})} \quad \text{Ec. 2.11}$$

con $k = 1, \dots, m$

donde $X_{\theta_k} = x\text{Cos}(\theta_k) + y\text{Sen}(\theta_k)$

$$Y_{\theta_k} = -x\text{Sen}(\theta_k) + y\text{Cos}(\theta_k)$$

f es la frecuencia de la onda sinusoidal plana, que en este caso es la frecuencia de los surcos y crestas de la superficie del chile, m es la cantidad de orientaciones, θ_k es la k -ésima orientación del filtro de gabor y finalmente σ_x y σ_y son las desviaciones estándar de la envolvente Gaussiana a lo largo de los ejes “ x ” y “ y ” respectivamente.

2.6.1.2 Filtro Wavelet

La Transformada Wavelet se utiliza para la compresión tanto de imágenes como de audio. En el proceso de análisis de la Wavelet, las señales son representadas utilizando un grupo de funciones básicas producidas por el desplazamiento y el escalado de una función madre o función principal. La transformada Wavelet es una descomposición de una señal en frecuencias (Colom *et al.* 2001).

La Transformada Wavelet Discreta en 1D descompone recursivamente la señal de entrada, $S_0(n)$, en una parte de detalle y otra de promedio en cada iteración. Sea $S_i(n)$ y $W_i(n)$ el promedio y el detalle respectivamente, y sea i el nivel de aplicación de la transformada. La aproximación de la señal en el nivel $i + 1$ se calcula usando la Ecuación 2.12:

$$S_{i+1}(n) = \sum_k g(k)S_i(2n - k) \quad \text{Ec. 2.12}$$

Y el detalle de la señal en el nivel $i + 1$ se calcula usando la Ecuación 2.13:

$$W_{i+1}(n) = \sum_k h(k)S_i(2n - k) \quad \text{Ec. 2.13}$$

donde k es el pixel a analizar.

Para 2D la imagen $S_i(n_1, n_2)$ se descompone en una imagen promedio y tres imágenes detalle, de acuerdo con las Ecuaciones 2.14 a la 2.17

$$S_{i+1}(n_1, n_2) = \sum_{k_x} \sum_{k_y} g(k_x)g(k_y)S_i(2n_1 - k_x, 2n_2 - k_y) \quad \text{Ec. 2.14}$$

$$W^1_{i+1}(n_1, n_2) = \sum_{k_x} \sum_{k_y} g(k_x)h(k_y)S_i(2n_1 - k_x, 2n_2 - k_y) \quad \text{Ec. 2.15}$$

$$W^2_{i+1}(n_1, n_2) = \sum_{k_x} \sum_{k_y} h(k_x)g(k_y)S_i(2n_1 - k_x, 2n_2 - k_y) \quad \text{Ec. 2.16}$$

$$W^3_{i+1}(n_1, n_2) = \sum_{k_x} \sum_{k_y} g(k_x)h(k_y)S_i(2n_1 - k_x, 2n_2 - k_y) \quad \text{Ec. 2.17}$$

donde g y h son los filtros wavelet en 1D.

2.6.1.3 Matriz de Coocurrencia

Para caracterizar la información contenida en la textura de una imagen, o en general la ocurrencia de cierto evento de una variable aleatoria, se procede a calcular sus momentos estadísticos de segundo orden, lo que se conoce como extraer información de su matriz de coocurrencia (López 2009).

Para el procesamiento de imágenes, los parámetros a tener en cuenta para la construcción de la matriz de coocurrencia (Figura 2.11) están ligados a la disposición de los píxeles en la imagen. Estos parámetros están basados en la ubicación espacial de los píxeles, las relaciones con su vecindario y el valor de su intensidad, al final definen la construcción de la matriz de la siguiente forma (Sarría 2007):

- *Condición:* Se refiere a la regla que debe cumplir un determinado píxel para ser cuantificado con relación a un vecino, usualmente esta condición se toma como la ubicación del píxel de determinada intensidad que se encuentra en la dirección del vecino.
- *Dirección:* Es la orientación espacial en la que se evalúa la condición, como casos generales se utilizan direcciones como 0, 45, 90 y 135 grados.

- **Distancia:** Es el número de píxeles en los que se encuentra el par de píxeles evaluados en la condición, como distancias típicas se utilizan 1, 3 y 5 píxeles de distancia.

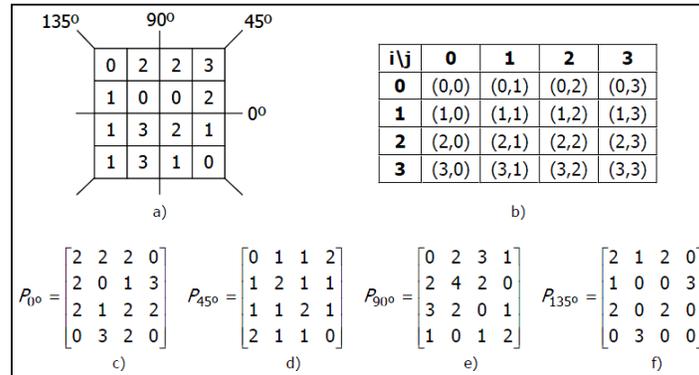


Figura 2.11. Ejemplo de la construcción de la matriz de co-ocurrencia para una matriz de 4x4 y con 3 niveles de gris a distancia de 1 pixel.

Para este trabajo la orientación que se usó fue a 0 y 90° y la distancia fue de 1 pixel.

Para elegir que filtro sería el adecuado para la obtención de la información, se realizaron tres pruebas, la primera fue realizando todo el proceso sin filtrar las imágenes, la segunda usando el filtro Gabor y la tercera usando el filtro Wavelet (Colom *et al.* 2001).

En este trabajo se analizaron cinco descriptores de textura que se describen a continuación.

2.6.2 Descriptores de textura

Los descriptores de textura son los que dan la información necesaria para conocer los cambios que existen sobre la superficie de un objeto ya sea en un momento en específico o durante el tiempo del proceso de deshidratado. Cada descriptor informa sobre un cambio en particular que puede ser si el objeto se torna liso, rugoso, que tan profundas son las rugosidades, la dirección de estas, entre otras. El proceso de la obtención de los descriptores de textura se muestra en la Figura 2.12.

Para trabajar con los datos experimentales de todos los descriptores visuales fue necesario normalizarlos, para normalizar los datos se requiere tomar el valor máximo (se encuentra dentro de los primeros valores obtenidos al inicio del proceso de secado) y dividir todos los demás datos entre este valor, esto para facilitar su manejo al tener todos los datos en un rango de entre 1 y 0.

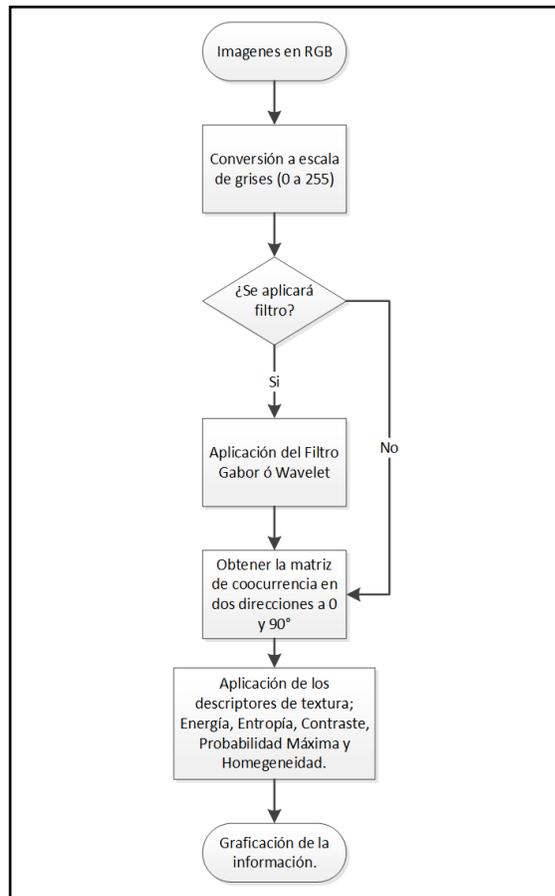


Figura 2.12. Diagrama de flujo del proceso de obtención de los descriptores de textura

A continuación, se presentan a detalle los descriptores de textura usados para este trabajo:

2.6.2.1 *Energía*

El descriptor de energía proporciona información sobre un conjunto de píxeles, la cual indica que cuanto más lisa es la textura mayor es el valor del resultado. Éstos se calculan con la Ecuación 2.18 (López 2009).

$$Energía = \sum_{i=1}^{255} \sum_{j=1}^{255} c(i,j)^2 \quad Ec. 2.18$$

donde c_{ij} es cada elemento de la matriz de coocurrencia, i y j varían desde 0 hasta n en el número de niveles de gris.

2.6.2.2 *Entropía*

Mide la aleatoriedad contenida en la matriz, su valor aumenta a medida que todos los elementos de la matriz son similares, siendo el valor máximo en el caso de que todos los elementos de la matriz de coocurrencia fueran iguales. A medida que se tengan mayores probabilidades de ocurrencia el valor de la entropía va descendiendo por que la textura es más uniforme. Por lo tanto si el valor de la entropía es alto la textura es rugosa. Este descriptor se define mediante la ecuación 2.19 (Avellaneda 2009).

$$Entropía = - \sum_i \sum_j c_{ij} \log c_{ij} \quad Ec. 2.19$$

donde c_{ij} es cada elemento de la matriz de coocurrencia, i y j varían desde 0 hasta n en el número de niveles de gris.

2.6.2.3 *Contraste*

El contraste de una textura proporciona información acerca de las variaciones bruscas de color en la imagen. En una textura suave y uniforme su contraste será bajo, mientras que para una textura rugosa o irregular su contraste presentará un valor alto. El contraste está definido mediante la ecuación 2.20 (Avellaneda 2015).

$$\text{Contraste} = \sum_i \sum_j (i - j)^2 c_{ij} \quad \text{Ec. 2.20}$$

donde c_{ij} es cada elemento de la matriz de coocurrencia, i y j es el valor de la posición que varía desde 0 hasta n en el número de niveles de gris.

2.6.2.4 *Probabilidad Máxima*

Provee información sobre la frecuencia más grande de un par de píxeles en la matriz de coocurrencia. Este descriptor es útil para percibir la predominación de un color en la textura, por lo tanto, para una textura fina su valor será cercano a 1. La probabilidad máxima está definida por la ecuación 2.21 (López 2009).

$$\text{Proba Max} = \max_{i,j}(c_{ij}) \quad \text{Ec. 2.21}$$

donde c_{ij} es cada elemento de la matriz de coocurrencia, i y j es el valor de la posición que varía desde 0 hasta n en el número de niveles de gris.

2.6.2.5 Homogeneidad Local

Este descriptor proporciona información sobre la irregularidad local de la textura. Por lo tanto, para una textura regular o fina, el valor de la homogeneidad es alto. La homogeneidad local está definida mediante la Ecuación 2.22 (Avellaneda 2009).

$$\text{Homogeneidad Local} = \sum_i \sum_j \frac{1}{1 + (i - j)^2} c_{ij} \quad \text{Ec. 2.22}$$

donde c_{ij} es cada elemento de la matriz de coocurrencia, i y j es el valor de la posición que varía desde 0 hasta n en el número de niveles de gris.

CAPÍTULO 3

ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DURANTE EL PROCESO DE DESHIDRATADO

En este capítulo se describe el procedimiento de la de la adquisición de las imágenes durante el proceso de secado del chile habanero y de la instrumentación usada.

3.1 Método

En esta sección se presenta el diagrama del método general (Figura 3.1) seguido para la realización de este trabajo, cada una de las actividades mostradas en este diagrama se verán a detalle en las siguientes secciones.

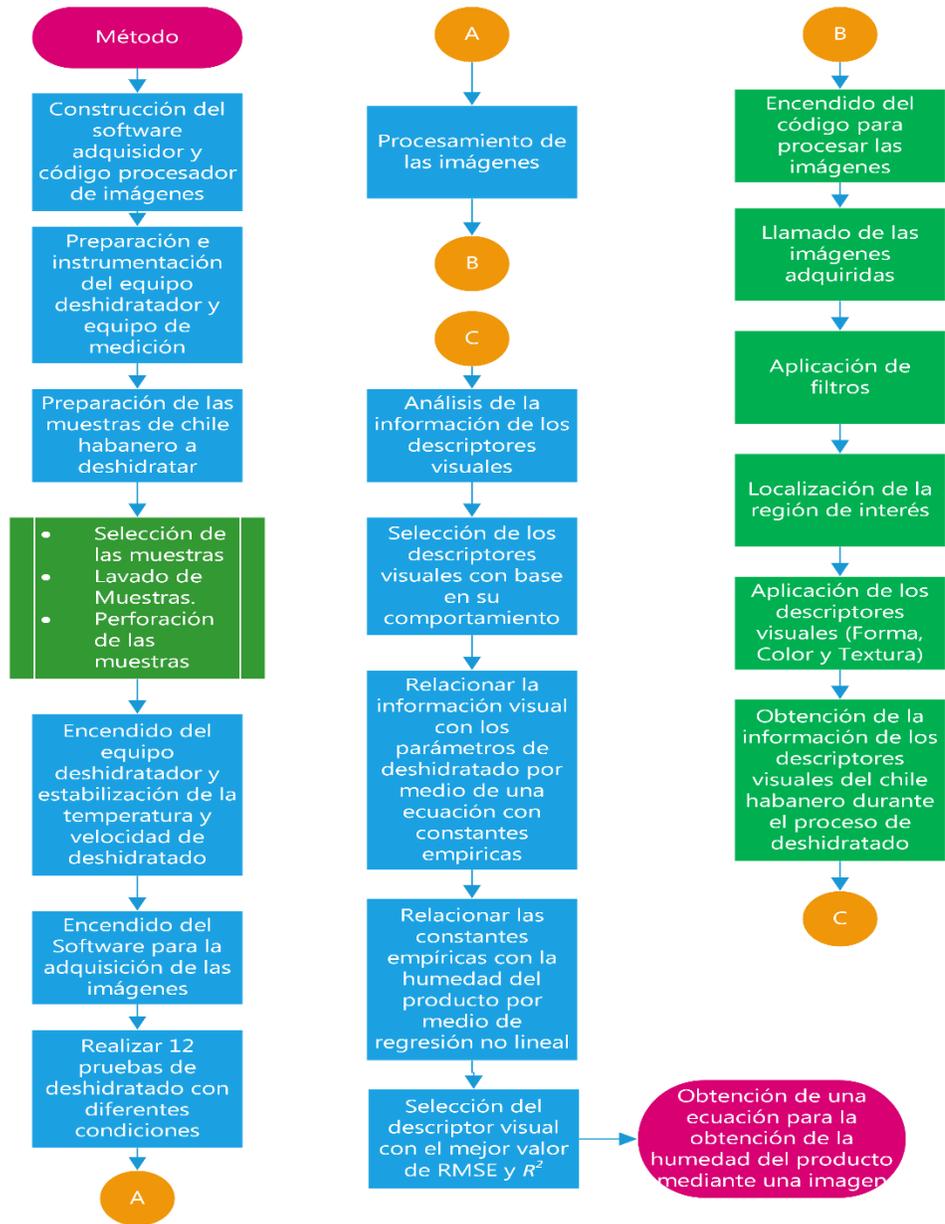


Figura 3.1. Diagrama del método general.

3.2 Adquisición de las imágenes

La captura de las imágenes es uno de los pasos fundamentales para este trabajo, la captura se realizó cada 30 s durante todo el proceso de deshidratado para cada experimento. En total se realizaron 12 experimentos para diferentes velocidades de aire (1, 1.25, 1.5 y 1.75 m/s) y temperaturas (50, 55 y 60 °C) de deshidratado.

Debido a que no se encontró en el estado del arte un método que describa cómo realizar la adquisición del banco de imágenes del chile habanero durante el proceso de deshidratado, en La Figura 3.2 se presenta el diagrama de la metodología propuesta para realizar la adquisición del banco de imágenes.

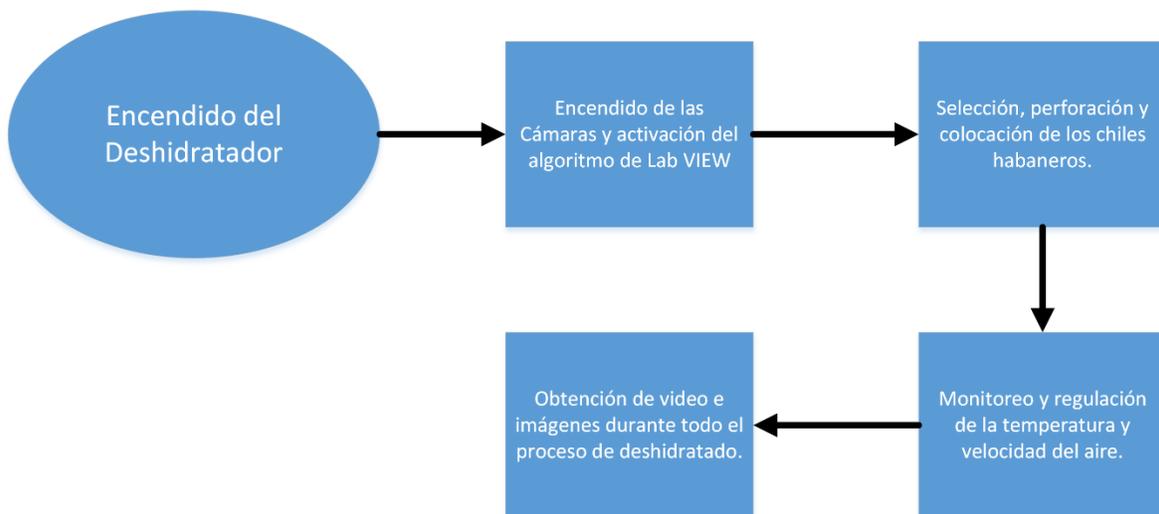


Figura 3.2. Metodología para la captura de imágenes del proceso de deshidratado del chile habanero.

3.3 Descripción del deshidratador

Para realizar los experimentos de secado de capa delgada del chile habanero, se utilizó un secador de charolas por convección forzada el cual consta de un extractor centrifugo de aire, un acondicionador de aire, un codo cuadrado 90°C, una tobera con cuatro deflectores en su interior, una cámara de secado y las charolas en el interior de la cámara (Díaz 2009). A continuación, se expresan a detalle.

- **Extractor centrifugo de aire**

Es el encargado de suministrar de aire al deshidratador a la velocidad que el experto humano requiera, esto gracias a un regulador de RPM. Sus características son las siguientes (Figura 3.3): marca Elicent, Modelo AXC315B, Potencia 300W, Voltaje 120 ± 10 V, Corriente: 1.30 A, Caudal máximo $1850\text{ m}^3/\text{h}$, Velocidad 2630 rpm y Peso 9 kg.



Figura 3.3. Extractor centrifugo de aire

- **Acondicionador de aire**

Es una caja rectangular de 90 cm de longitud, 25 cm de ancho y 25 cm de altura como se muestra en la Figura 3.4. En el interior se encuentran colocadas 5 resistencias eléctricas, las cuales calientan el aire ingresado por el extractor de aire. Una de las resistencias está conectada a un variador del voltaje, esto para tener un mejor control de la temperatura.



Figura 3.4. Vista interna y externa del acondicionador de aire

- **Codo cuadrado y tobera**

Estos acoples se utilizaron para conectar el acondicionador del aire con la cámara de secado. El codo tiene un ángulo de 90° con entrada y salida de 25 cm de ancho y 25 cm de alto, éste se conecta al acondicionador de aire con la base inferior de la tobera. La tobera tiene dimensiones de 25 cm x 25 cm de base inferior, 55 cm x 55 cm de base superior y una altura de centro de base inferior a superior de 50 cm (Figura 3.5). En su interior contiene 4 deflectores para lograr una mejor distribución de aire.



Figura 3.5. Parte interior de la tobera con cuatro deflectores y parte exterior de la tobera conectada al codo de 90°

- **Cámara de secado**

Está elaborada de acrílico de 12 mm de espesor con forma cuadrada, las dimensiones son de 55 cm x 55 cm de base y 60 cm de altura (Figura 3.6). La cámara cuenta con tres paredes fijas y una pared móvil que realiza la función de puerta.



Figura 3.6. Cámara de secado

- **Charola**

La charola está compuesta con tela metálica de criba de acero inoxidable con una área abierta del 75%. Las dimensiones que tiene son de 30 cm de largo x 30 cm de ancho, el espesor del marco es de 4 cm y la altura de la charola es de 2.5 cm (Figura 3.7).



Figura 3.7. Charola

Instrumentación del deshidratador

Para realizar las mediciones de las variables de secado, se instrumentó el deshidratador con lo siguiente:

- Una tarjeta adquisidora de datos, marca National Instruments modelo NI USB-6218 que fue controlada por un algoritmo construido con el software LabView para registrar de datos.
- Un termo anemómetro calibrado marca TSI ALNOR Instruments, modelo AVM430-A, de alta precisión en un intervalo amplio de 0-30m/s.
- Dieciocho sensores de temperatura modelo LM35 con una exactitud de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, de los cuales dos se usaron para medir la temperatura ambiente, tres para medir la temperatura inferior de la cámara, cinco en el primer nivel de la cámara, cuatro en el nivel medio de la cámara, tres en la parte superior de la cámara y uno en la salida de la cámara.
- Seis sensores de humedad HIH-4000-004, marca Honeywell, con una exactitud de $\pm 3.5\%$ de la lectura.
- Dos reguladores de voltaje para variar la velocidad del aire y la temperatura del aire a la entrada de la cámara de secado.
- Cinco resistencias eléctricas de 600 W cada una, para calentar el aire en el acondicionador de aire.
- Una báscula digital marca Digital Scale, con capacidad de 200 g y exactitud de ± 0.01 g para pesar el chile habanero.
- Una computadora personal ensamblada, procesador Intel Core i7-4770k 3.40GHz con 16 GB en memoria RAM.

En la Figura 3.8 se presenta el diagrama de la instrumentación el deshidratador.

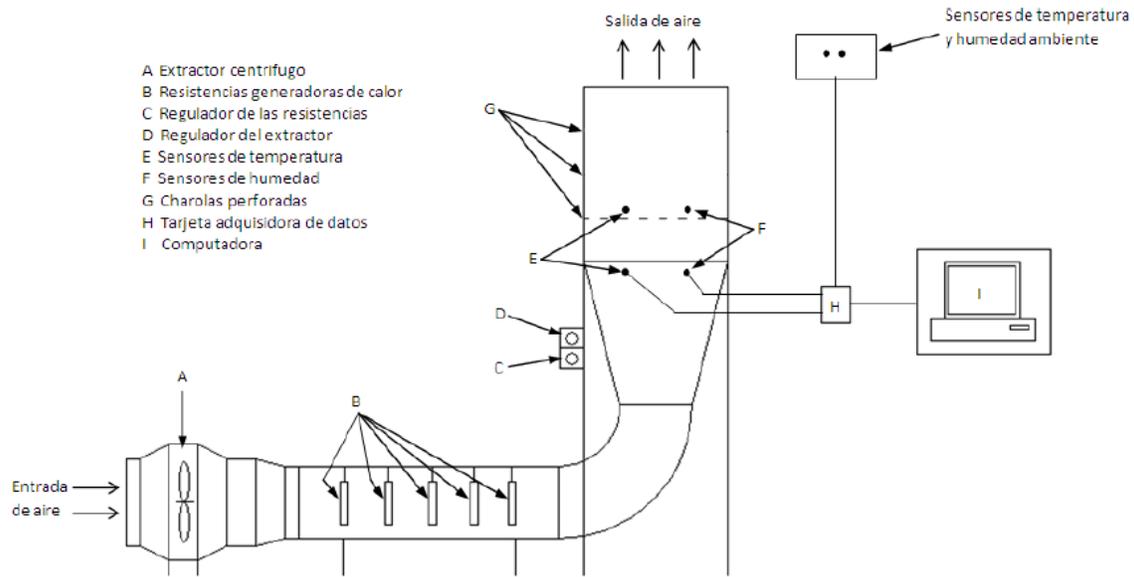


Figura 3.8. Diagrama esquemático de la instrumentación del deshidratador (López 2009)

3.4 Encendido del equipo

Para comenzar con la adquisición de imágenes, se deben tener en cuenta los procedimientos ajenos a una captura de imágenes y grabación de video normal, pero propios al proceso de deshidratación. Los pasos para comenzar el proceso de deshidratado son los siguientes:

1. Se enciende el extractor de aire y las resistencias, se da un tiempo de aproximadamente 5 min para comenzar el proceso de estabilización de temperatura y velocidad del aire con ayuda de los reguladores de temperatura, velocidad y el termómetro.
2. Con el encendido del deshidratador y durante el proceso de estabilización se ejecuta programa construido en el software LabVIEW 2014 para activar la tarjeta adquisidora y comenzar el registro de los datos de la temperatura en la cámara de secado, humedad relativa del aire y la temperatura ambiente.

3.5 Encendido de las cámaras

Una vez iniciado el registro de datos, se activan las dos cámaras marca Logitech modelo Pro 9000 de 8 megapíxeles, una se conectó a la computadora controlada por el software Logitech Webcam para tomar video de todo el proceso de secado, y la segunda cámara se conectó a la computadora portátil marca Gateway controlándose por medio del programa construido en el software LabVIEW para adquirir imágenes cada 10 s durante todo el proceso de secado.

3.6 Ejecución del programa para la adquisición de imágenes

La ejecución del programa para la adquisición de imágenes se realiza al mismo tiempo que el encendido de las cámaras porque estas no cuentan con un interruptor de encendido/apagado, sino que comienzan a funcionar por medio del software LabVIEW.

Para lograr la construcción del código (Figura 3.9) se tuvo que haber realizado la instalación de los controladores de dispositivos periféricos y los toolkit de *Image Acquisition*, *Real Time* y *Vision*. La construcción del código consta de tres bloques básicos que es el de adquisición de imágenes, escritura de las imágenes y el ciclo que repite las dos tareas anteriores con un intervalo de tiempo que el experto humano elija, en este caso, el ciclo se declaró detenerse hasta finalizar el proceso de deshidratado y repetirse cada 10 segundos.

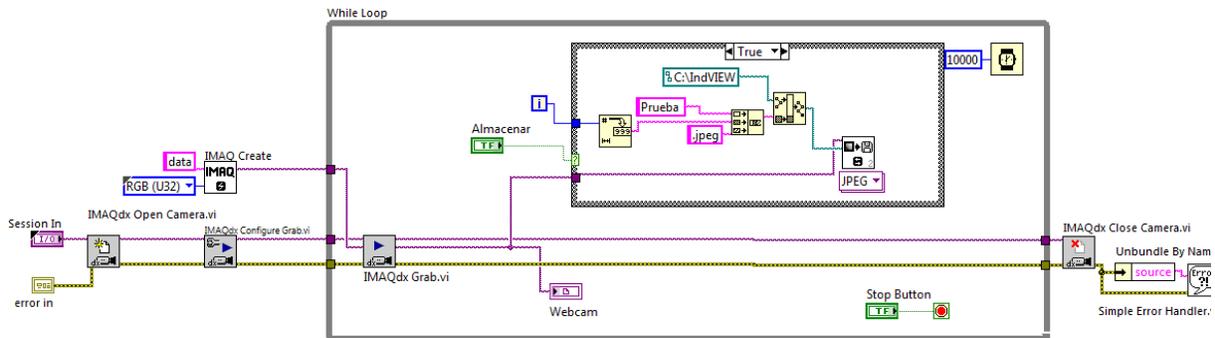


Figura 3.9. Código para la adquisición de imágenes.

Una decisión para digitalizar las imágenes fue el saber a qué resolución tomar cada fotograma, la literatura indica diferentes tamaños de imagen con los que trabajó cada autor; sin embargo, no indican alguna metodología para obtener la resolución ideal, por lo que en este trabajo se realizó la comparación con las 3 resoluciones que permite tomar la cámara usada en este trabajo, las cuales fueron de 2000*1200, 720*1080 y de 480*640 pixeles.

Para elegir la mejor resolución, se realizaron dos pruebas con dos descriptores visuales (Capítulo 6) Modelo HSI y Área, las muestras fueron secadas a una velocidad de 1.25 m/s y una temperatura de 50°C, usando las 3 resoluciones disponibles, los resultados se muestran en las figuras 3.10 y 3.11.

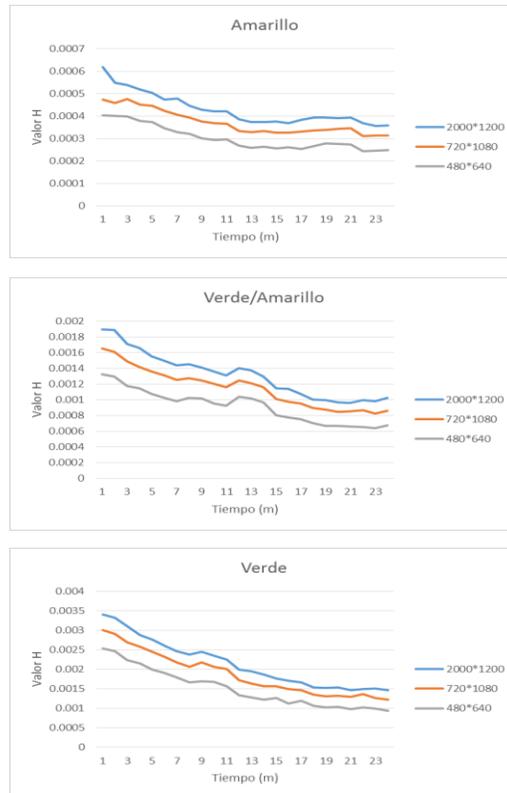


Figura 3.10. Pruebas de resolución usando el descriptor de color HSI plano H

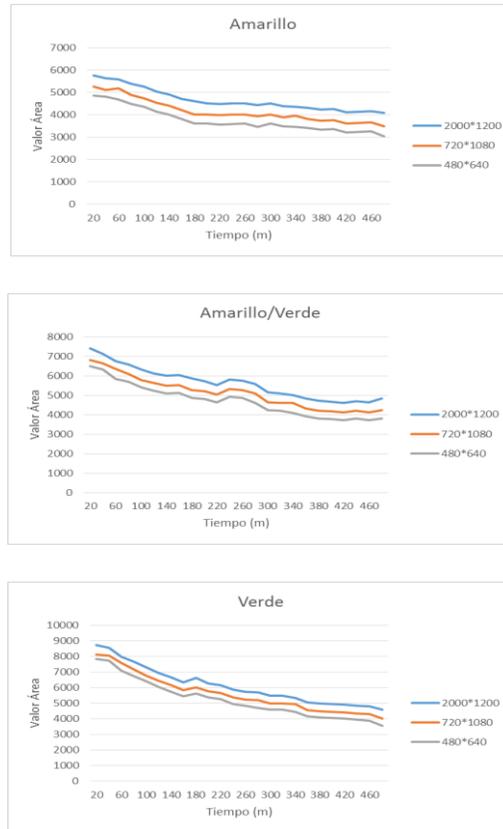


Figura 3.11. Pruebas de resolución usando el descriptor de forma área

De forma cualitativa se puede observar que el comportamiento de las tres resoluciones es muy similar; sin embargo, para analizarlo de forma cuantitativa se realizó una normalización de los datos, para lograr esto se usó la Ecuación 3.1, que es dividir cada elemento de la matriz de la imagen entre el valor máximo (que por lo general se encuentra entre los primeros 5 valores obtenidos de la imagen) y con ello se comprobó que existe una diferencia de 0.3% en promedio. También se analizó el tiempo de cómputo que le toma a cada una de las pruebas con diferente resolución llegar a un resultado. Los datos indicaron que para la resolución de 2000*1200 se necesitó de 1 h y 27 minutos, para la resolución de 720*1080 tomó un tiempo de 1 h 5 minutos y para la resolución de 480*640 tomó un tiempo de 45 minutos, por lo cual se eligió la resolución de 480*640 para el análisis de los descriptores visuales de este trabajo. La normalización se realizó para toda la información recaba de los descriptores visuales ya que facilita el procesamiento de la misma al analizar valores de entre 0 y 1 para todos los casos.

$$Norm = \frac{M_{ij}}{Max(M_{ij})} \quad Ec. 3.1$$

donde M_{ij} es la matriz de imagen y $MAX(M_{ij})$ es valor máximo de la imagen.

3.7 Proceso para la deshidratación del chile habanero

El proceso de deshidratación se compone de varios pasos que se mencionan a continuación:

1. Se inicia con la selección de la muestra de chile habanero a deshidratar, se lava con agua potable y se le realizan 12 perforaciones de aproximadamente 4 mm de diámetro.
2. Se pesan las muestras a deshidratar para tener su peso inicial.
3. Las nueve muestras se colocan uniformemente sobre la malla de la charola, separadas en tres filas y cada fila será de un color de maduración del chile habanero.
4. La charola se coloca dentro de la cámara de secado, y se posiciona sobre la salida de aire.
5. El aire atraviesa las muestras removiendo el agua del producto efectuando una transferencia de calor y masa, hasta llegar al contenido de humedad final.
6. Se monitorea y regula la temperatura de la cámara de deshidratado, durante el transcurso del proceso de deshidratación.
7. El producto se saca de la cámara de deshidratado y se pesa cada hora.
8. Finalmente, de acuerdo a lo sugerido por Gil. (2016), después de que el producto ha alcanzado el contenido de humedad de aproximadamente 5% se retira el producto de la cámara de deshidratado.

Para este trabajo se realizaron un total de 24 corridas, esto debido a que 12 fueron realizadas por Gil. (2016) de las cuales se tomó la información para la obtención de las curvas de secado, lo cual se logró pesando las muestras cada hora durante el proceso de deshidratado, y las 12 corridas (figuras 3.11 a 3.14) restantes se realizaron para obtener las imágenes sin que se

tuviera contacto con las muestras hasta que finalizó el proceso de deshidratado. No se realizó alguna corrida en la que las mismas muestras fueran pesadas y usadas para la adquisición de las imágenes porque al ser colocadas las muestras de vuelta en la cámara de secado, estas podrían ser colocadas de forma diferente e incluso rotadas por lo cual la información arrojada por los descriptores visuales sería poco fiable.

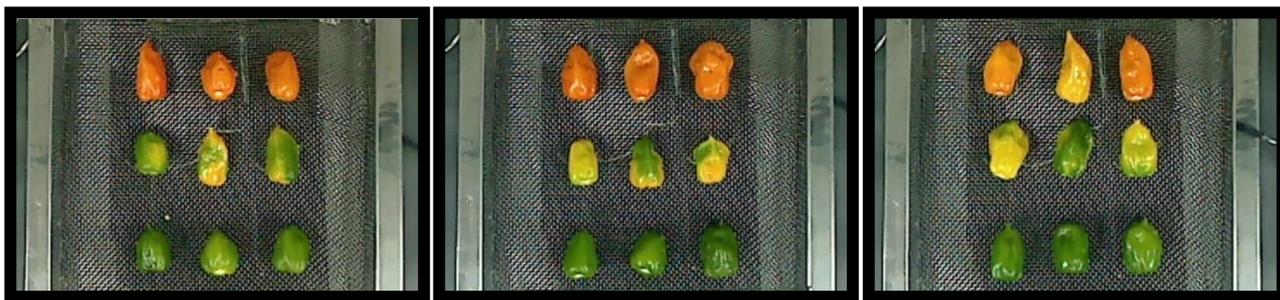


Figura 3.12. Muestras al inicio del proceso de secado a 1.25 m/s a 50, 55 y 60°C



Figura 3.13. Muestras al inicio del proceso de secado a 1.5 m/s a 50, 55 y 60°C



Figura 3.14. Muestras al inicio del proceso de secado a 1.75 m/s a 50, 55 y 60°C



Figura 3.15. Muestras al inicio del proceso de secado a 1 m/s a 50, 55 y 60°C

CAPÍTULO 4

PROCESAMIENTO DE LAS IMAGENES

En este capítulo se presenta la segmentación, la cual se usa para descomponer una imagen y extraer la o las zonas de interés, es decir, los objetos de interés y el fondo. En la Figura 4.1 se presenta la metodología realizada para el proceso de la segmentación, los pasos que se observan en el diagrama se explican a detalle en la siguiente sección.

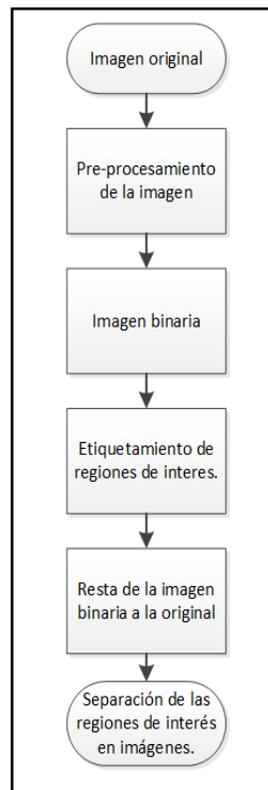


Figura 4.1. Metodología de la segmentación para la caracterización de forma, color y textura.

4.1 Pre-procesamiento de las imágenes

El pre-procesamiento de una imagen es la aplicación de algoritmos y técnicas que tienen como objetivo el mejorar la calidad de la imagen (eliminando la mayor cantidad de ruido) y destacar características importantes de la misma. Esta etapa consta del proceso para encontrar las zonas de interés dentro de la imagen original, eliminando las partes externas de la charola que cuentan con tonos diferentes a las muestras.

Transformación del modelo de color de la imagen original

La primera parte del pre-procesamiento es el de convertir el formato original de RGB a otro modelo de color, los cuales son formatos que se dividen en tres planos, cada uno de estos planos representa una características única de la imagen, como puede ser color, saturación, luminosidad, intensidad, entre otros, para este trabajo se probaron los modelos HSV, HSI y CIE Lab (Estos modelos se describen a detalle en el Capítulo 5.3), una vez realizada la conversión se continuo con la separación de los tres planos que componen a la imagen, esto con el fin de encontrar algún plano que marque un contraste entre las muestras (zona de interés) y el fondo (charola).

RGB

Al usar el modelo RGB (figura 4.2) se observa que el contraste del producto con el medio no es suficiente por lo cual este modelo se descartó para el proceso de segmentación.

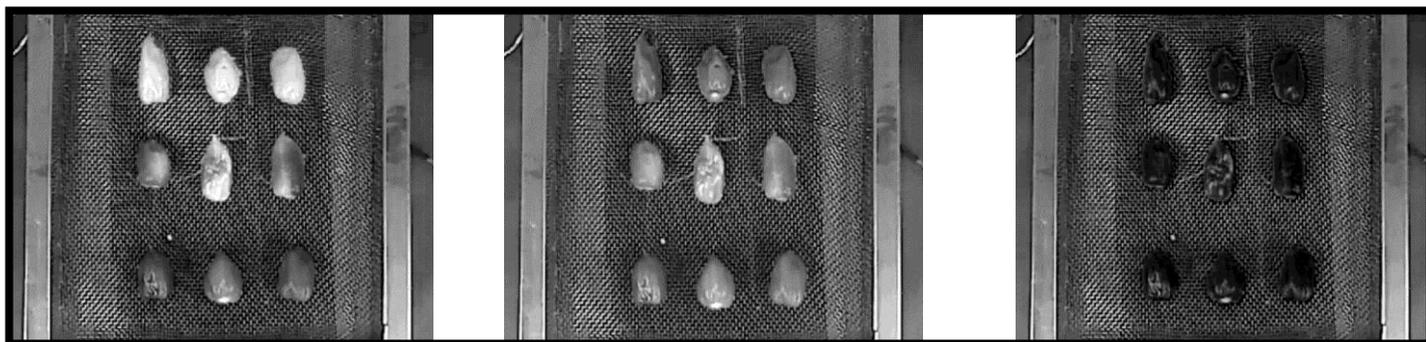


Figura 4.2. Plano "R" (imagen izquierda), plano "G" (imagen central) y plano "B" (imagen derecha)

Cie LAB

Al dividir la imagen en sus tres planos usando el modelo Cie LAB se obtienen tres imágenes (figura 4.3) las cuales en su análisis cualitativo parecen ser buena opción a excepción del plano *L* que solo muestra la luminosidad; sin embargo, al finalizar la etapa de segmentación no se obtuvieron buenos resultados dada la naturaleza de los planos *b* y *a* del este modelo de color.

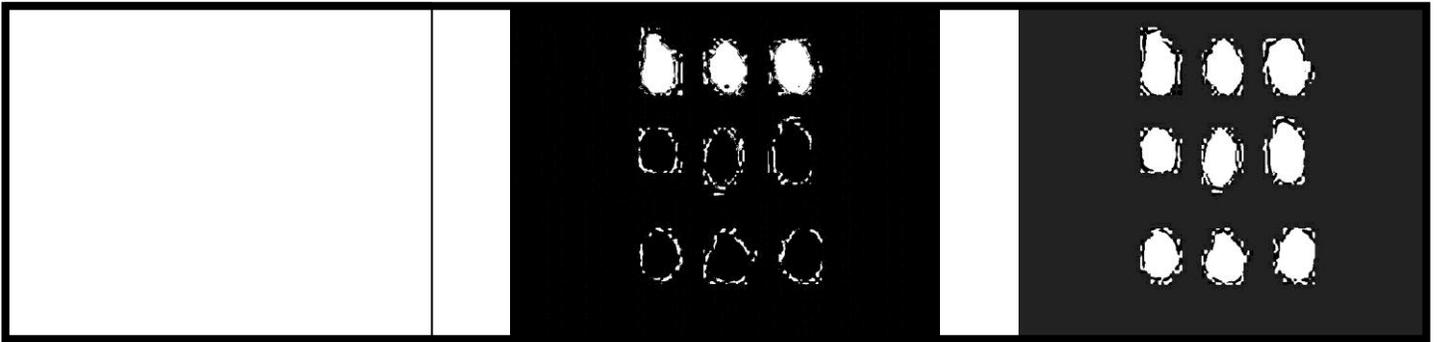


Figura 4.3. Plano "L" (imagen izquierda), plano "A" (imagen central) y plano "B" (imagen derecha)

HSI

Usando el modelo HSI para la división de planos (Figura 4.5) se obtuvieron resultados cualitativos favorables, esto debido a que el plano de *S*, mostró un buen contraste entre las muestras y el medio, por lo cual se eligió esa imagen para el proceso de segmentación.



Figura 4.4. Plano "H" (imagen izquierda), plano "S" (imagen central) y plano "I" (imagen derecha)

HSV

Usando el modelo *HSV* para la división de planos (Figura 4.5.) se obtuvieron resultados favorables al igual que el modelo *HSI*, en el plano de saturación *S*, el cual mostró un buen contraste entre las muestras y el medio, por lo cual también se eligió para el proceso de segmentación.

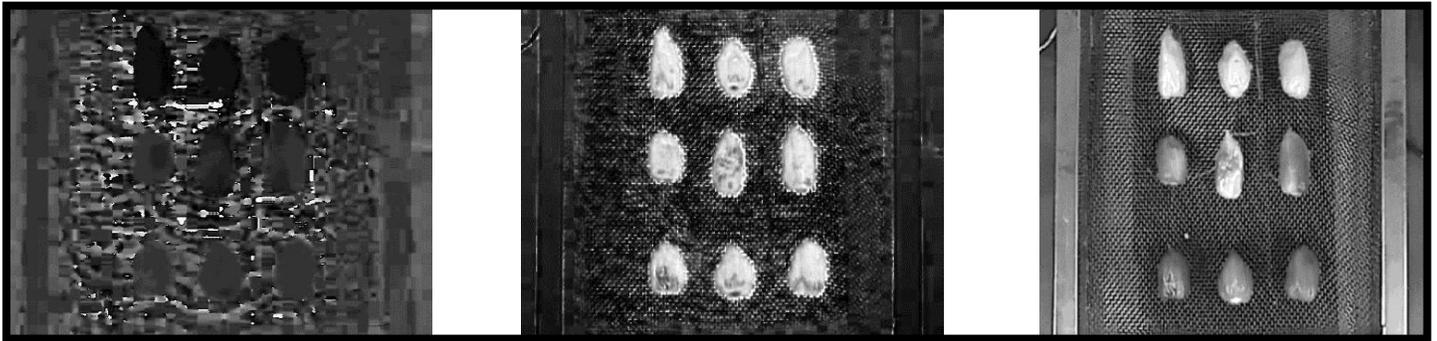


Figura 4.5. Plano “H” (imagen izquierda), plano “S” (imagen central) y plano “V” (imagen derecha)

Para la parte del procesamiento de la imagen se aplica una serie de filtros como dilatación, erosión, filtro Gaussiano, media, entre otros, cuyo objetivo fundamental es obtener, a partir de la imagen original, otra final mejorando ciertas características de la misma que posibilite efectuar operaciones del procesado sobre ella.

Los principales objetivos de la aplicación de filtros son:

- *Suavizar la imagen*: reducir la cantidad de variaciones de intensidad entre píxeles vecinos.
- *Eliminar ruido*: eliminar aquellos píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente al de sus vecinos y cuyo origen puede estar tanto en el proceso de adquisición de la imagen como en el de transmisión.
- *Realzar bordes*: destacar los bordes que se localizan en una imagen.
- *Detectar bordes*: detectar los píxeles donde se produce un cambio brusco en la función de intensidad.

Una vez que se aplicaron los filtros para mejorar la imagen, lo siguiente fue transformar la imagen resultante a una imagen en blanco y negro o binaria (compuesta de 0 y 1) en la que solo quede marcada en color blanco la zona de interés como se muestra en la Figura 4.6.

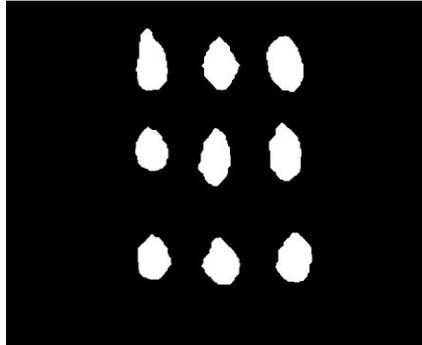


Figura 4.6. Imagen binaria

Esta imagen binaria será la encargada de eliminar el medio de la imagen original, dejando solo la zona de interés, que para este trabajo son las muestras de chile habanero, esto se logra restando la imagen binaria, a la imagen original elemento a elemento, pero limitando dicha resta a solo el color negro (valor 0).

En las pruebas se evaluaron 17 280 imágenes mediante el algoritmo de la segmentación para las condiciones antes mencionadas. Del total de imágenes analizadas solo el 6% mostraron algún error esto debido a alteraciones en la luz (sombras o destellos), introducción de instrumentación de medición (Termo-anemometro o recolocación de sensores de temperatura).

4.2 ETIQUETADO DE REGIONES

Esta etapa recibe como entrada una imagen binaria (blanco y negro) donde los objetos son delimitados y separados del fondo, de manera que los pixeles pertenecientes a las regiones de interés son etiquetados con un uno lógico y el resto con un cero lógico.

El objetivo es etiquetar cada uno de los objetos (chiles) presentes en la imagen, separándolo respecto del fondo y de las otras regiones. Esta actividad se realiza con la operación de etiquetamiento y se fundamenta en la continuidad de los objetos en el espacio.

El proceso es sencillo, partiendo de la esquina superior izquierda de la imagen, se realiza un barrido de izquierda a derecha y de arriba abajo buscando pixeles con el valor de uno lógico. Cuando se encuentra con el primer pixel con ese valor, el algoritmo automáticamente le reasigna el valor de “1”, los vecinos que tenga a la distancia de un pixel y que tengan el valor de uno también les reasignará el valor de “1”.

Al continuar con el análisis de la imagen, si el algoritmo se encuentra con un pixel de valor cero lógico el barrido comenzará a partir del último pixel con el valor de uno y ahora el barrido será de derecha a izquierda. Al llegar el análisis de esta región de etiqueta “1 reasignada” el programa volverá a comenzar desde el primer pixel en la esquina superior izquierda y correrá de izquierda a derecha de arriba abajo, para este momento el algoritmo cambiará automáticamente el número de etiqueta de uno a dos, por lo cual, cuando se vuelva a encontrar con otro pixel de valor uno que no sea el reasignado, le asignará el valor “2” y realizará el mismo proceso así consecutivamente hasta que termine de analizar la imagen completa (López 2009).

Una vez finalizada esta etapa, cada objeto de la imagen tendrá un identificador numérico que le hace ser distinto respecto del fondo y de los demás objetos (figura 4.7).

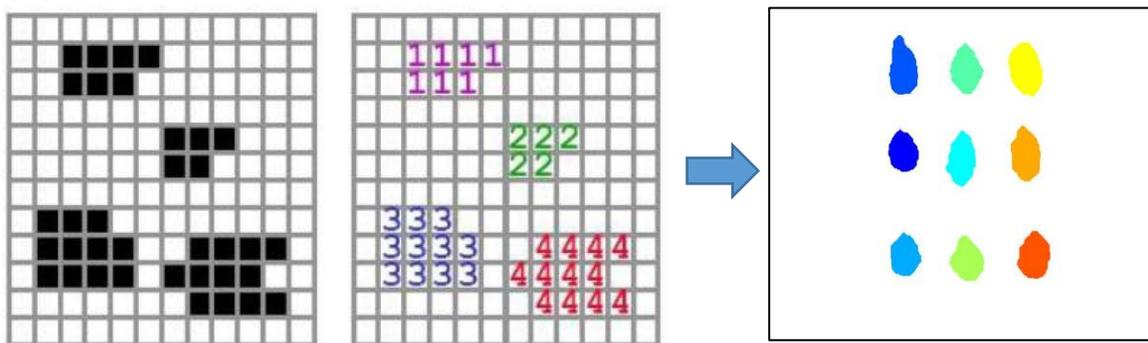


Figura 4.7. Etiquetado de objetos.

4.3 Localización de la región de interés en la imagen original

Este método se refiere a la localización de las regiones correspondientes a las muestras de chile habanero en la imagen original, para lograr esto a la imagen original se le resta las zonas que tienen cero, que equivale al color negro de la imagen segmentada erosionada.

En la Figura 4.3 se muestra el efecto de restar una imagen a otra, lo cual se realizó aplicando la ecuación 4.1, (Gamino 2002).

$$C(x, y) = A(x, y) - B(x, y) \quad \text{Ec. 4.1}$$

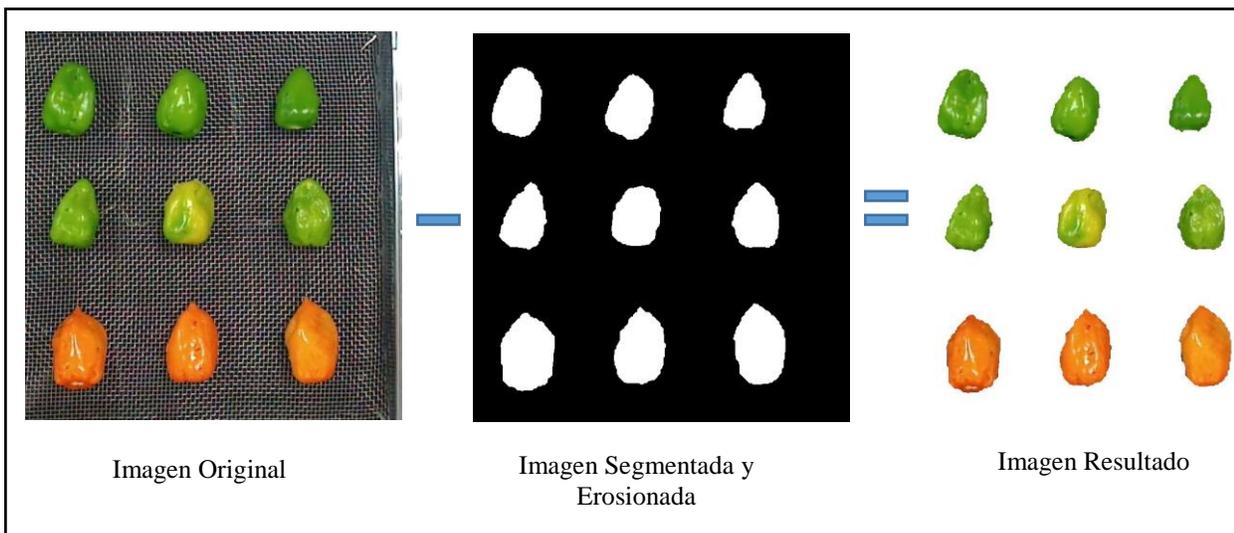


Figura 4.8. Demostración del esquema de la búsqueda de la región de interés.

En esta etapa, se probaron los planos S de los modelos de color HSI y HSV (figura 4.9)

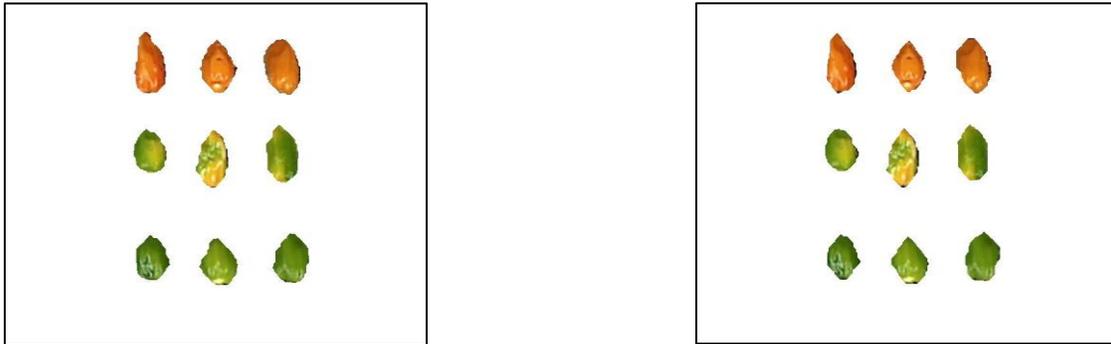


Figura 4.9. Imagen segmentada izquierda HSI , Imagen segmentada Derecha HSV

Una vez obtenidos los resultados de la segmentación, se encontró que el plano S del modelo de color HSI es el mejor para el proceso de segmentación, esto debido a que se pierden menos zonas de interés y el medio es eliminado de forma más uniforme.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

En esta sección se muestra la información obtenida de los descriptores de textura, la relación que existe entre los datos visuales y el tiempo y los parámetros de secado, así como la búsqueda de una ecuación que relacione a los datos visuales con la humedad del producto durante el proceso de secado.

5.1 Pruebas experimentales

Como se menciona en el Capítulo 3 se realizaron doce pruebas de deshidratado de chile habanero con una temperatura de secado de 50, 55 y 60 °C y una velocidad de 1, 1.25, 1.5 y 1.75 m/s. Las pruebas se realizaron para los tres colores de maduración, verde, amarillo con verde y amarillo, sin embargo, conforme se desarrollaba este trabajo, las pruebas se volvieron cada vez más complejas y el tiempo que tomó cada una de ellas se incrementó de manera considerable, por lo cual, se decidió acortar el alcance de analizar tres colores de maduración a analizar dos colores, el color verde y amarillo, lo que significa que para el análisis de la información obtenida de los descriptores visuales se tomó la información de los colores extremos de la maduración del chile habanero (amarillo y verde), esto se decidió debido a que el tercer color es una combinación del amarillo y verde.

Una vez obtenida la información de las imágenes, se continuó con el proceso siguiendo la metodología mostrada en la Figura 5.1, en la cual muestra el orden en el que se analizó la información y la forma en la que se seleccionó el descriptor que mejor se relacionó con la humedad del producto durante y al final del proceso de deshidratado.

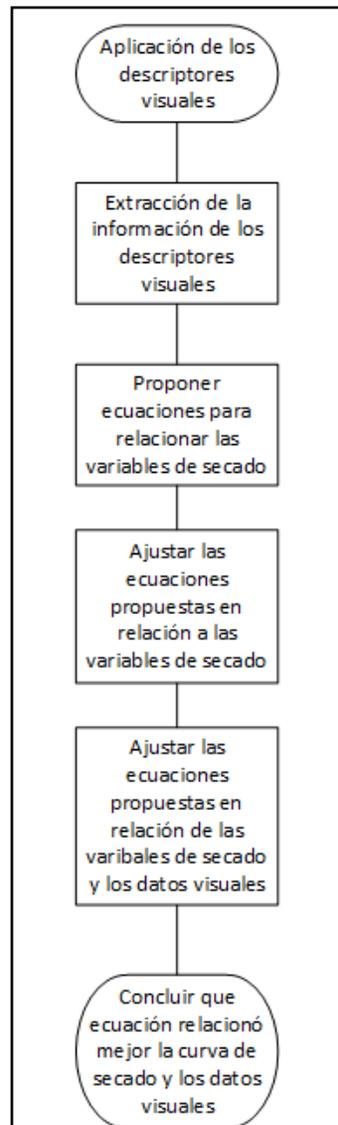


Figura 5.1. Diagrama del análisis de los descriptores visuales.

5.2 Análisis de los descriptores de color

Para la obtención de los descriptores de color se analizó Chile por Chile aplicando todos los descriptores de color descritos en la sección 2. (Figura 5.2).

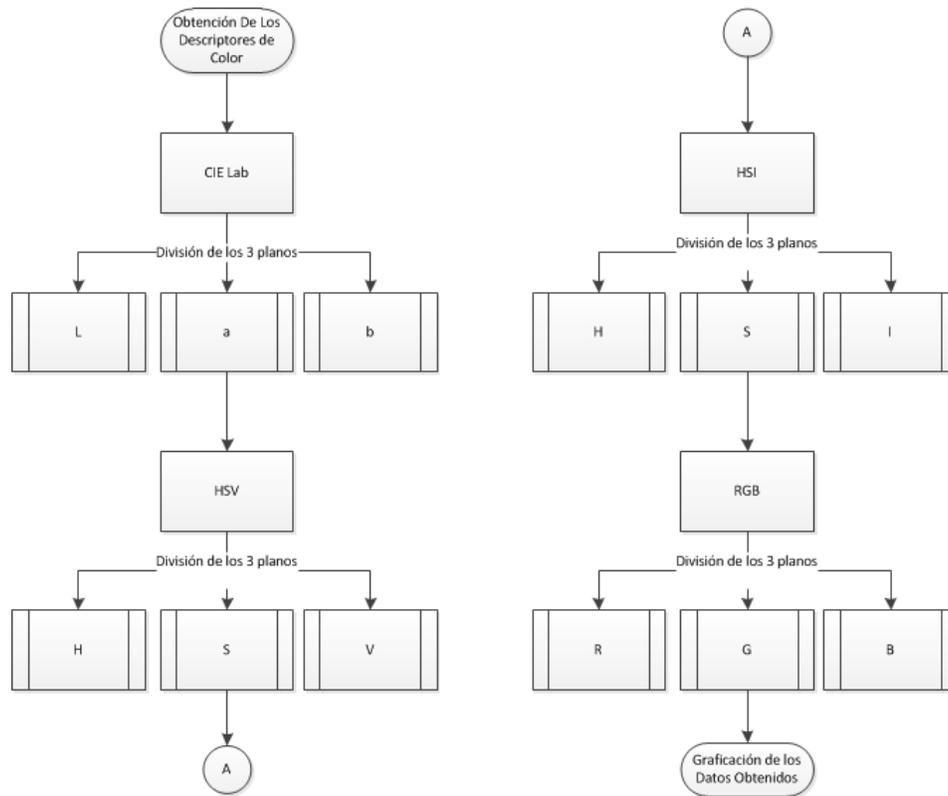


Figura 5.2. Diagrama de la obtención de los descriptores de color.

La forma en la que se aplicaron los descriptores de color, y su almacenamiento fue ordenado conforme a las condiciones a las que fueron secadas. Para observar el comportamiento de los valores obtenidos, se procedió a realizar una gráfica por cada muestra, por cada modelo de color y por cada plano correspondiente al modelo, aplicando al final el color promedio.

Para realizar el análisis del comportamiento de cada color en condiciones de secado diferente, se agruparon las muestras del mismo color y se construyeron las gráficas correspondientes promediando el valor de las 3 muestras del mismo color y sin normalizar.

Después de esto se observó que los modelos de color CIE Lab, RGB, el plano V de los modelos HSV y el plano I del modelo HSI no presentaban un comportamiento estable (Figura 5.3) que pudiera ser usado para aplicar una ecuación del tipo Arrhenius.

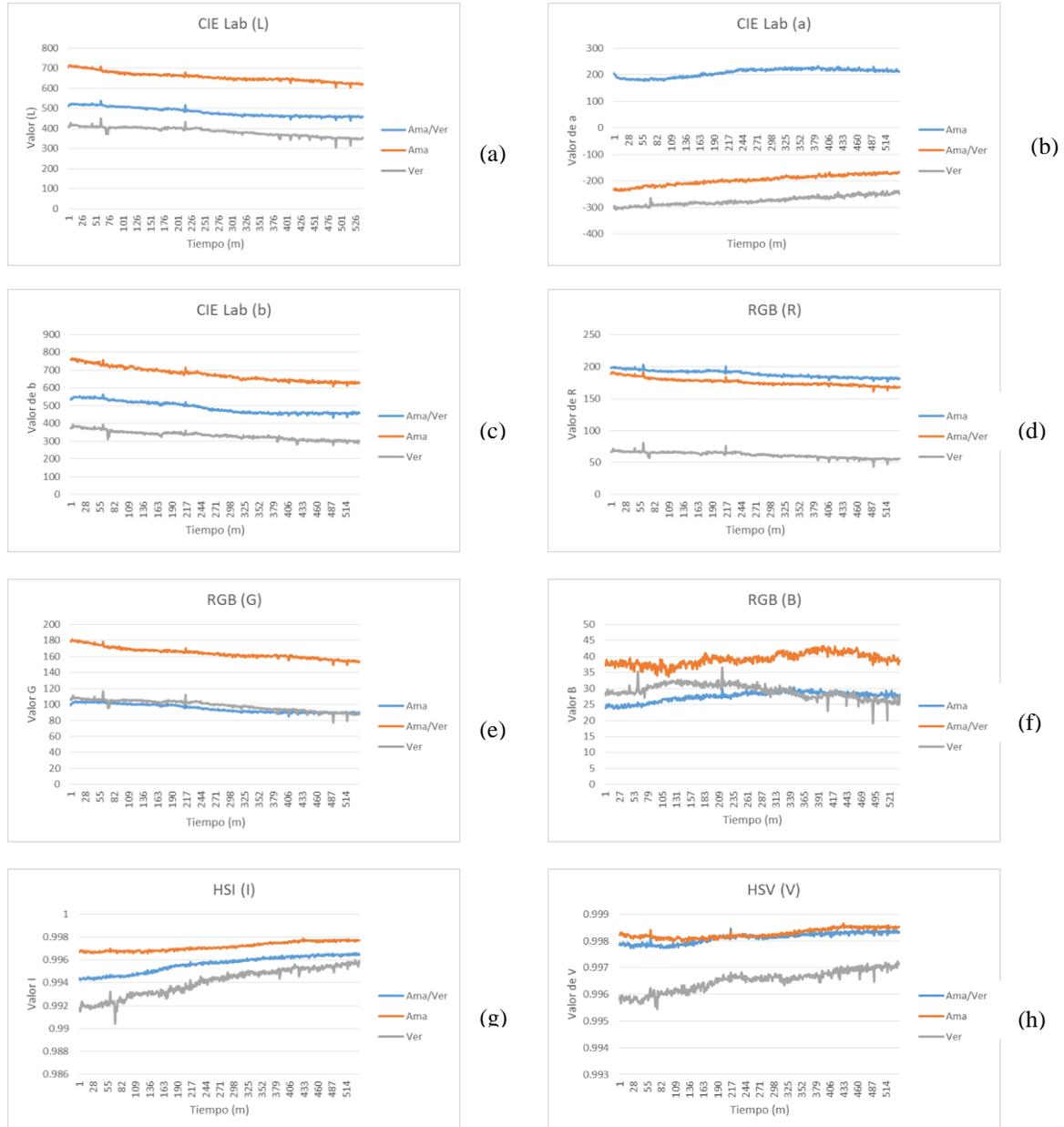


Figura 5.3. Valores de los modelos CIE Lab plano L (a), a (b) y b (c), modelo RGB plano R (d), G (e) y B (f) y el modelo HSI plano I (g) y modelos HSV plano V (h)

Las gráficas anteriores muestran un comportamiento poco estable, de igual forma, la orientación de las líneas (naranja, azul y gris) varían dependiendo de la condición a la que

fueron deshidratadas las muestras, por lo cual su comportamiento entre cada corrida es muy diferente y esta es una característica por lo cual no se continuo con su análisis.

A continuación, se muestran los datos graficados de los planos “H” y “S” de los modelos de Color HSV y HSI, los cuales fueron seleccionados para continuar con el proceso de análisis de su información la cual se puede observar en la Figura 5.4 a la 5.11.

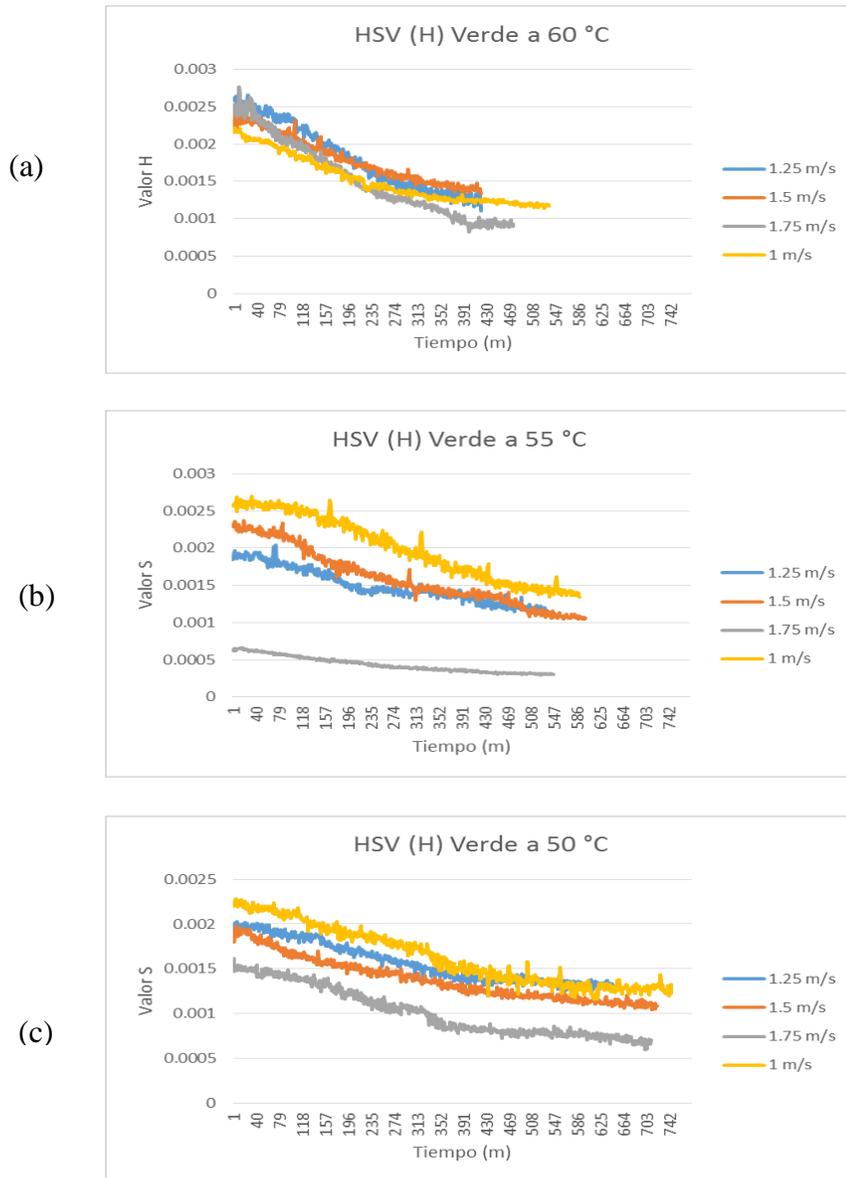


Figura 5.4. Valores de HSV para el plano H del chile verde a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c)

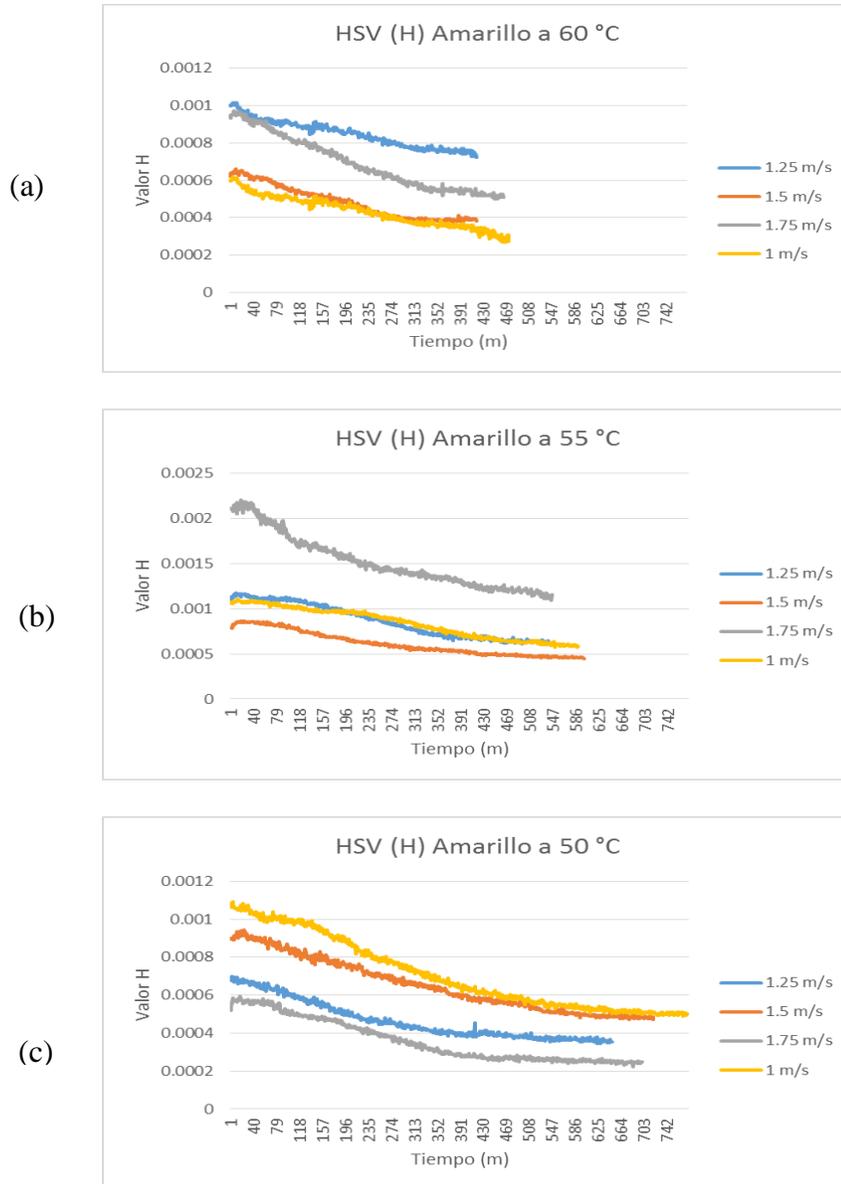


Figura 5.5. Valores de HSV para el plano H del chile Amarillo a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c)

En las Figuras 5.4 y 5.5 se observó que, al inicio, los valores de cada chile comienzan a diferentes alturas, esto es debido a que cada uno tiene un valor de color diferente de los demás, y para este paso los datos no han sido normalizados con el fin de observar las escalas de color reales y observar su comportamiento sin alteración alguna de los datos. El

comportamiento mostrado, es similar en todas las corridas, sin importar las condiciones de deshidratado.

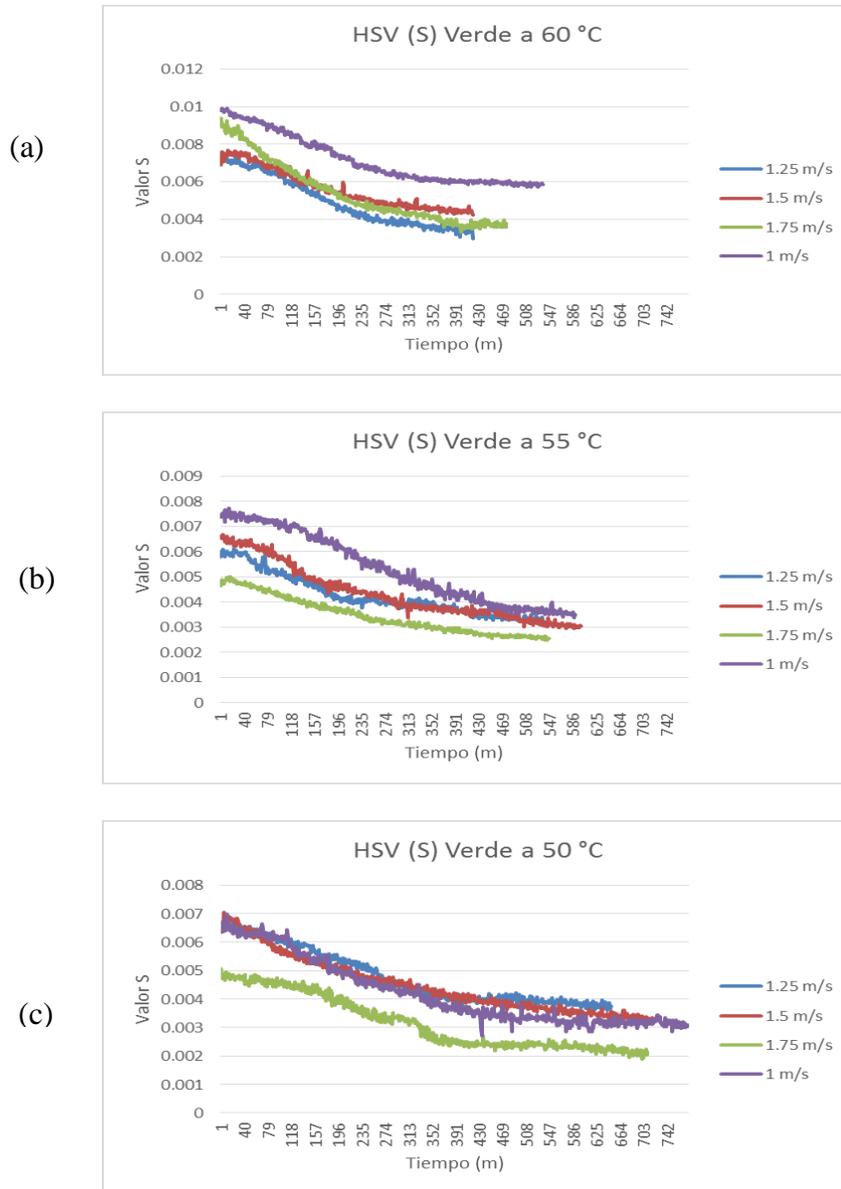


Figura 5.6. Valores de HSV para el plano S del chile Verde a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c)

La información mostrada en las gráficas anteriores, tiene un comportamiento parecido a una curva de secado, y este comportamiento se mantiene en todas las condiciones de deshidratado.

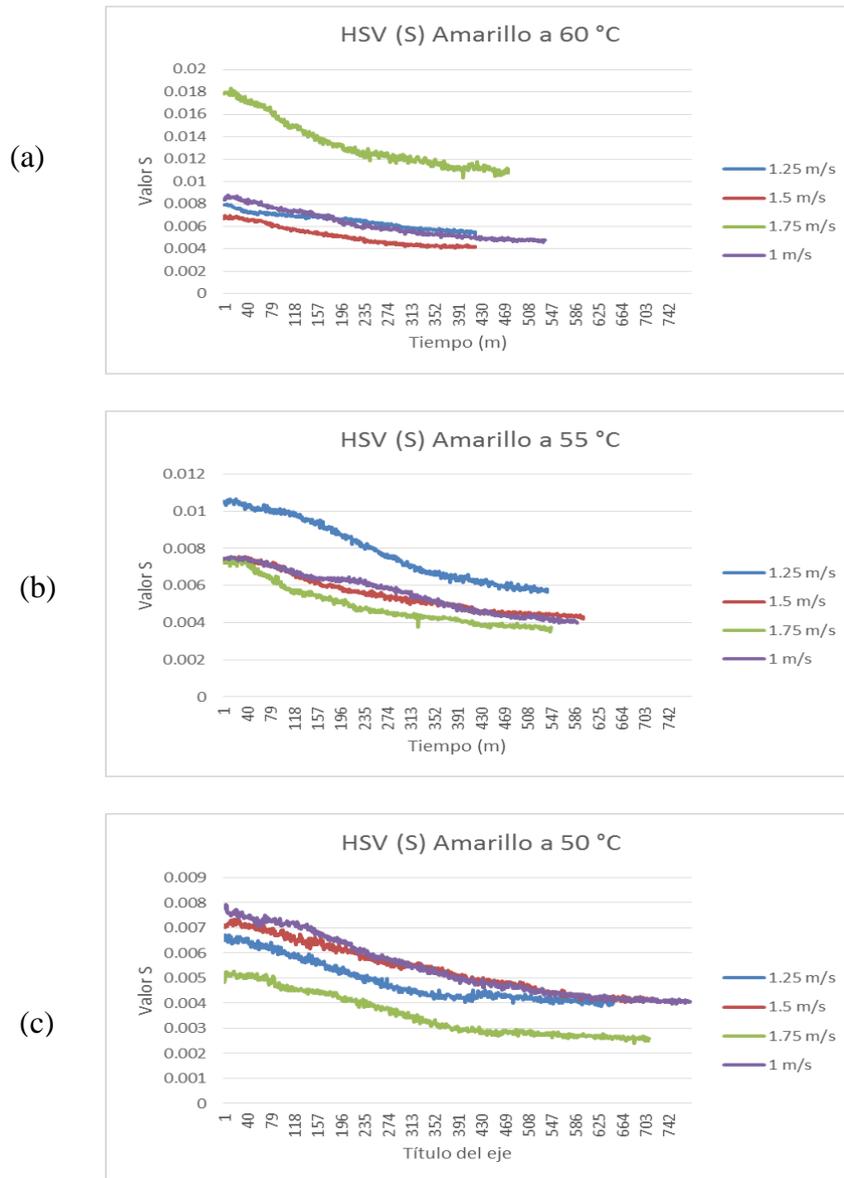


Figura 5.7. Valores de HSV para el plano S del chile Amarillo a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c)

El comportamiento observado en los datos de este descriptor tiene un parecido a una curva de secado, esto debido a que, tiene un cambio muy notorio al principio y durante el proceso, pero en la etapa final, el cambio se vuelve más lento, y se gráfica como una línea casi recta.

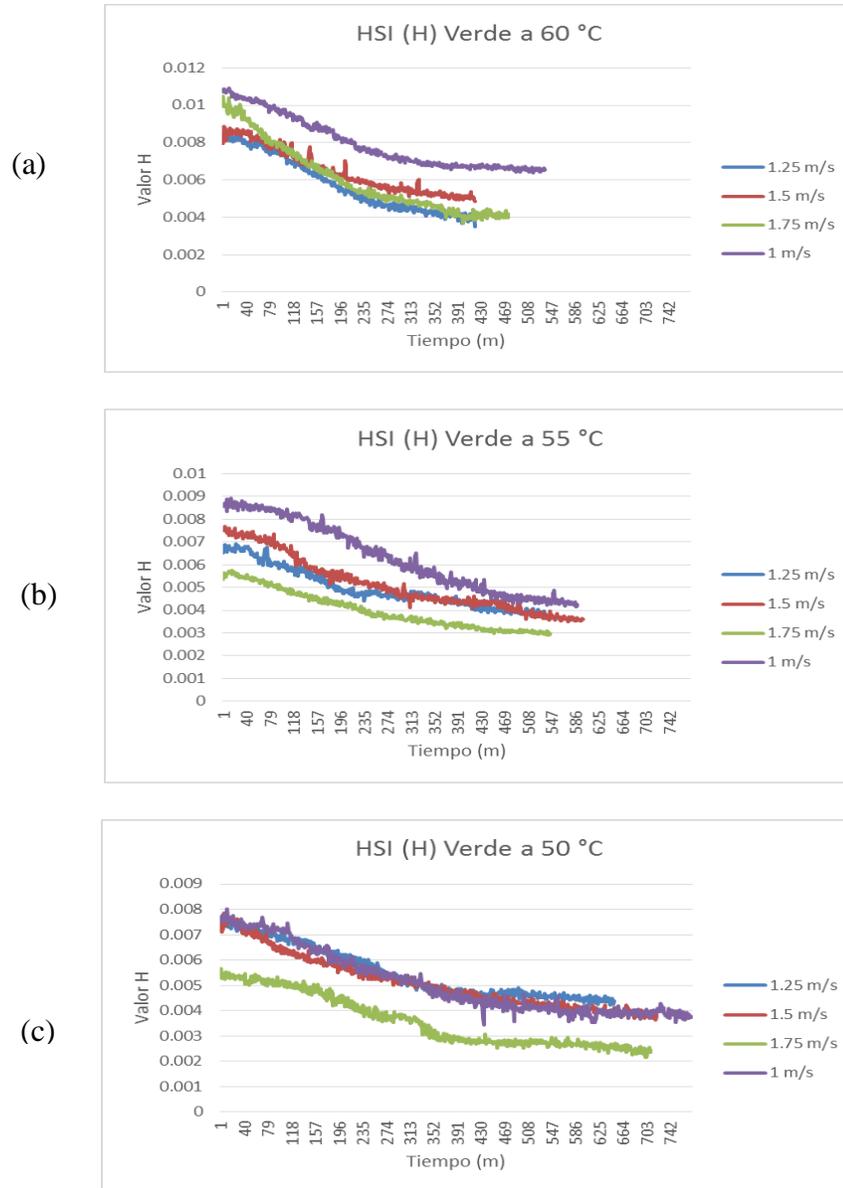


Figura 5.8. Valores de HSI para el plano H del chile Verde a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c)

Los saltos o picos mostrados en las gráficas se deben a variaciones en la luz y a cambios bruscos en la coloración de las muestras. Sin embargo, el comportamiento se mantiene a lo largo de todo el proceso, siendo muy similar entre las muestras.

Existe un gran parecido en cuanto al comportamiento entre los datos obtenidos con el modelo de color HSV plano H y el modelo de color HSI plano H.

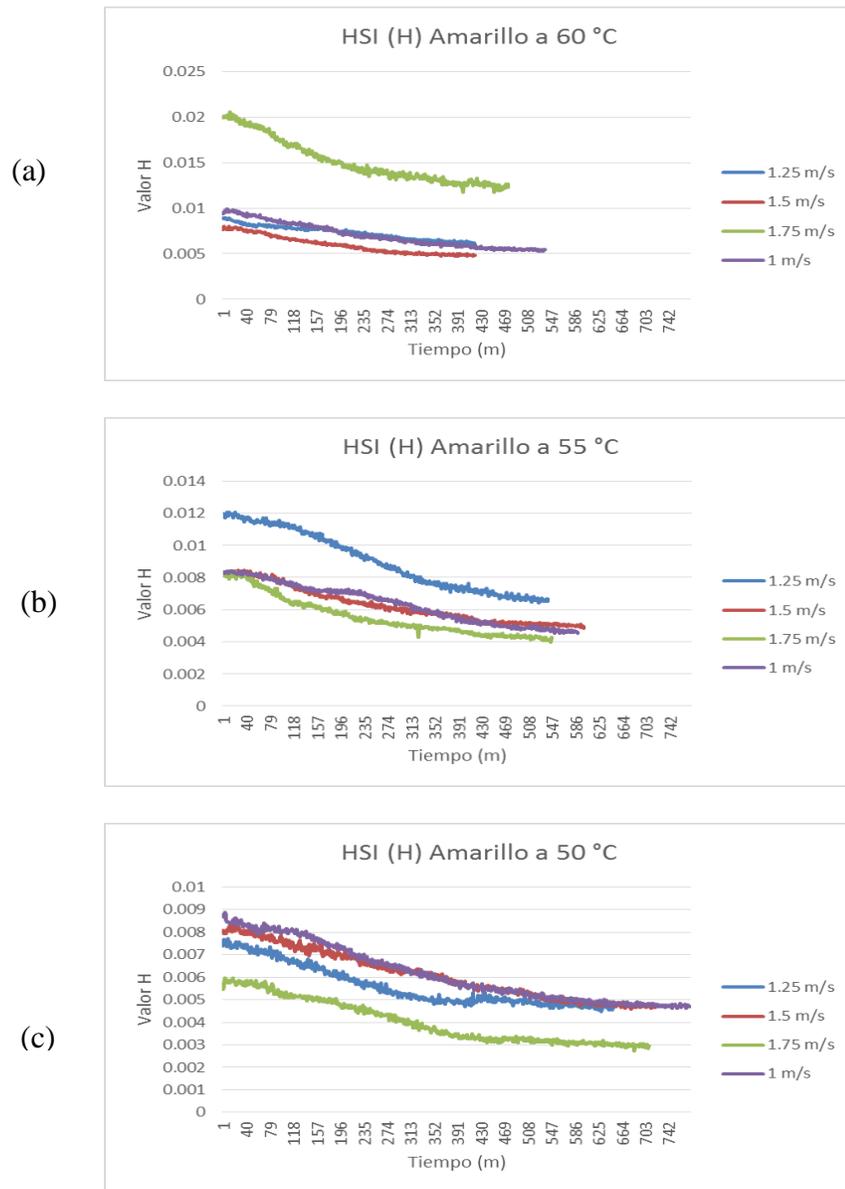


Figura 5.9. Valores de HSI para el plano H del chile Amarillo a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c)

Al observar los planos H y S del modelo HSV y los planos H y S del modelo HSI se puede apreciar que su comportamiento tiene cambios con respecto al tiempo y su forma tiende a parecer una curva de secado.

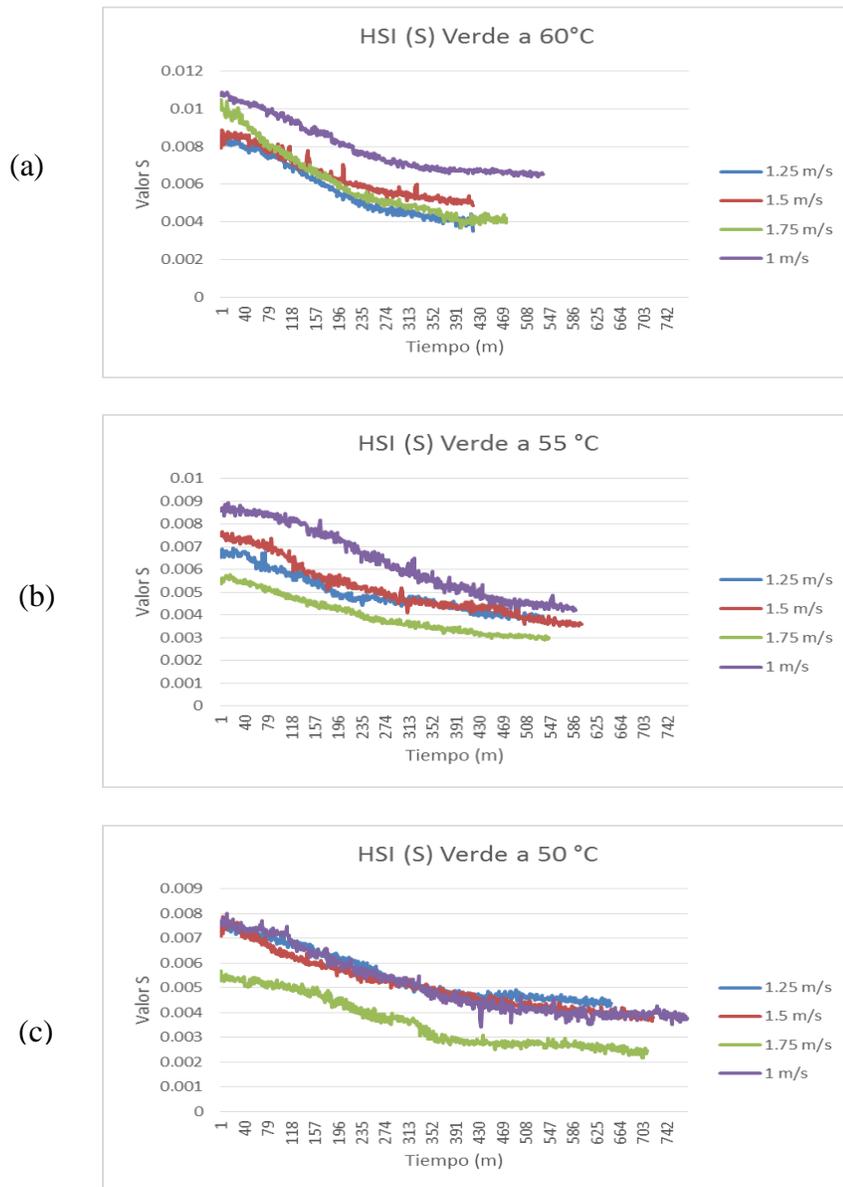


Figura 5.10. Valores de HSI para el plano S del Chile Verde a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c)

La información de la gráfica anterior, al igual que las anteriores, tiene forma de curva de secado, muestra cambios muy marcados en su color. Este tipo de descriptor es muy sensible a las variaciones de luz, en comparación con la forma o la textura, que siendo descriptores visuales, las variaciones de luz no les afecta tanto, sin embargo, la información recabada, es bastante clara y se logra observar un comportamiento muy marcado.

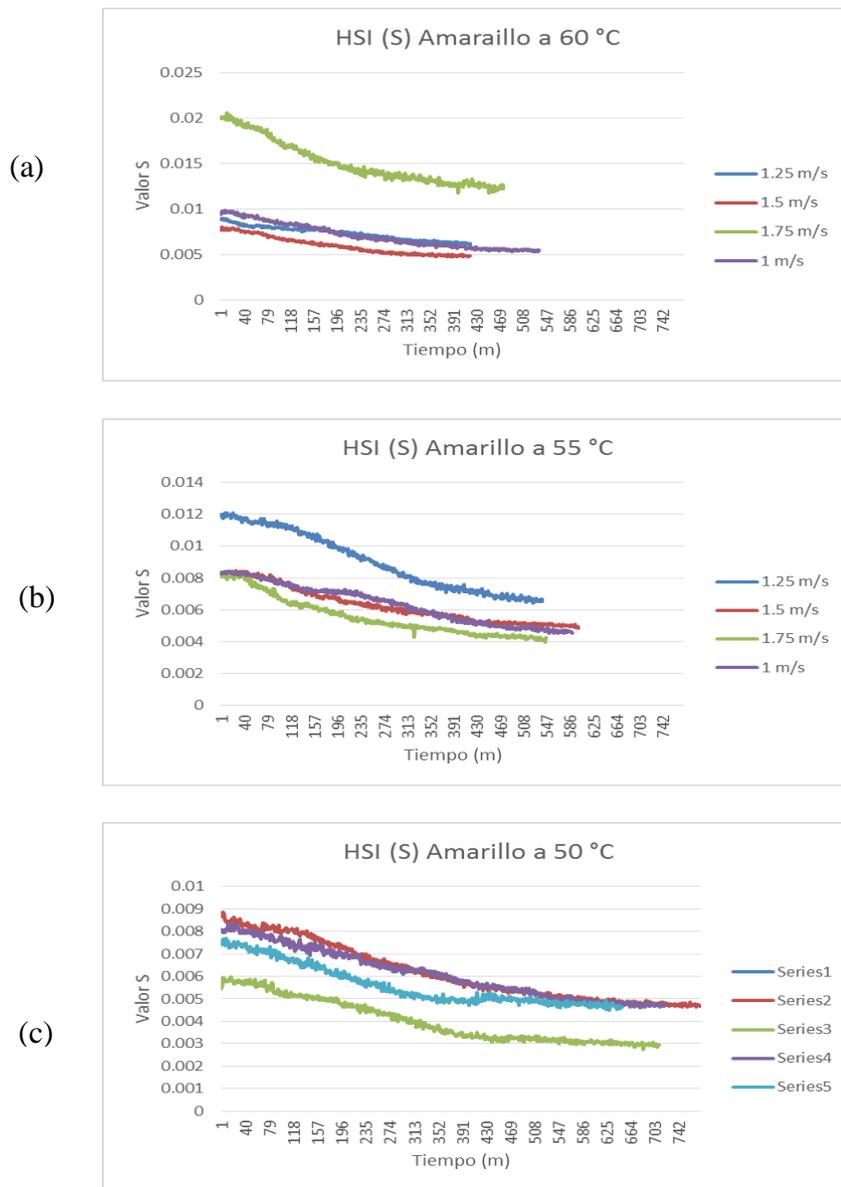


Figura 5.11. Valores de HSI para el plano S del chile Amarillo a diferentes condiciones de secado; 60 °C (a), 55 °C (b) y 50 °C (c)

Los datos obtenidos de los descriptores de color mostraron un comportamiento estable a lo largo del proceso de deshidratado del chile habanero, tanto para el chile verde como para el amarillo y el comportamiento es similar entre ellos a pesar de las diferentes condiciones de deshidratado a la que se sometió cada muestra.

5.3 Análisis de los descriptores de forma

En esta sección se aplicaron los descriptores de forma (área, perímetro, elongación, compacidad, eje mayor y eje menor) a cada muestra, para cada prueba realizada y observar su comportamiento físico durante el proceso de secado

La manera en la que se aplicaron los descriptores de forma, y su almacenamiento fue ordenado conforme a las condiciones a las que fueron secadas. Para observar el comportamiento de los valores obtenidos, se realizó una gráfica por cada muestra para cada descriptor de forma. Para analizar el comportamiento de cada descriptor de forma en condiciones de secado diferentes, se agruparon las muestras del mismo color y se construyeron las gráficas correspondientes.

Después de esto se observó que los descriptores de forma Elongación, Compacidad, Eje menor y Eje mayor no presentaban un comportamiento estable (Figura 5.12).

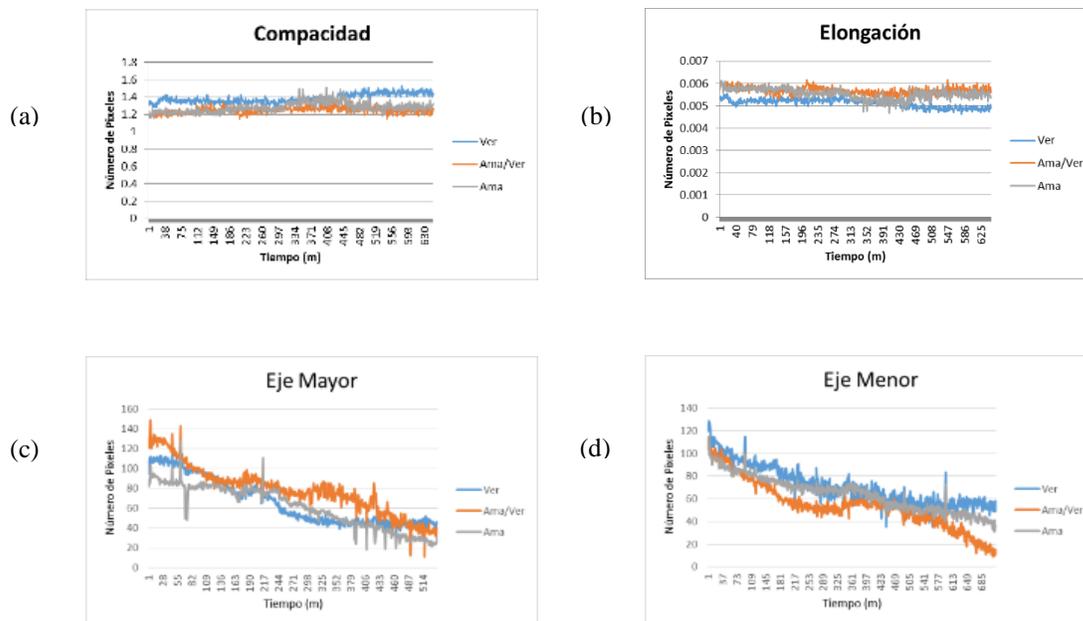


Figura 5.12. Valores de los descriptores de forma; Compacidad (a), Elongación (b), Eje mayor (c) y Eje Menor (d)

Después de analizar el comportamiento de las gráficas de los valores de cada descriptor, se observó que los descriptores de forma como área y perímetro mostraron valores más estables en comparación del resto de los descriptores. A continuación, se muestran las gráficas de los valores de área para el chile verde (Figura 5.13).

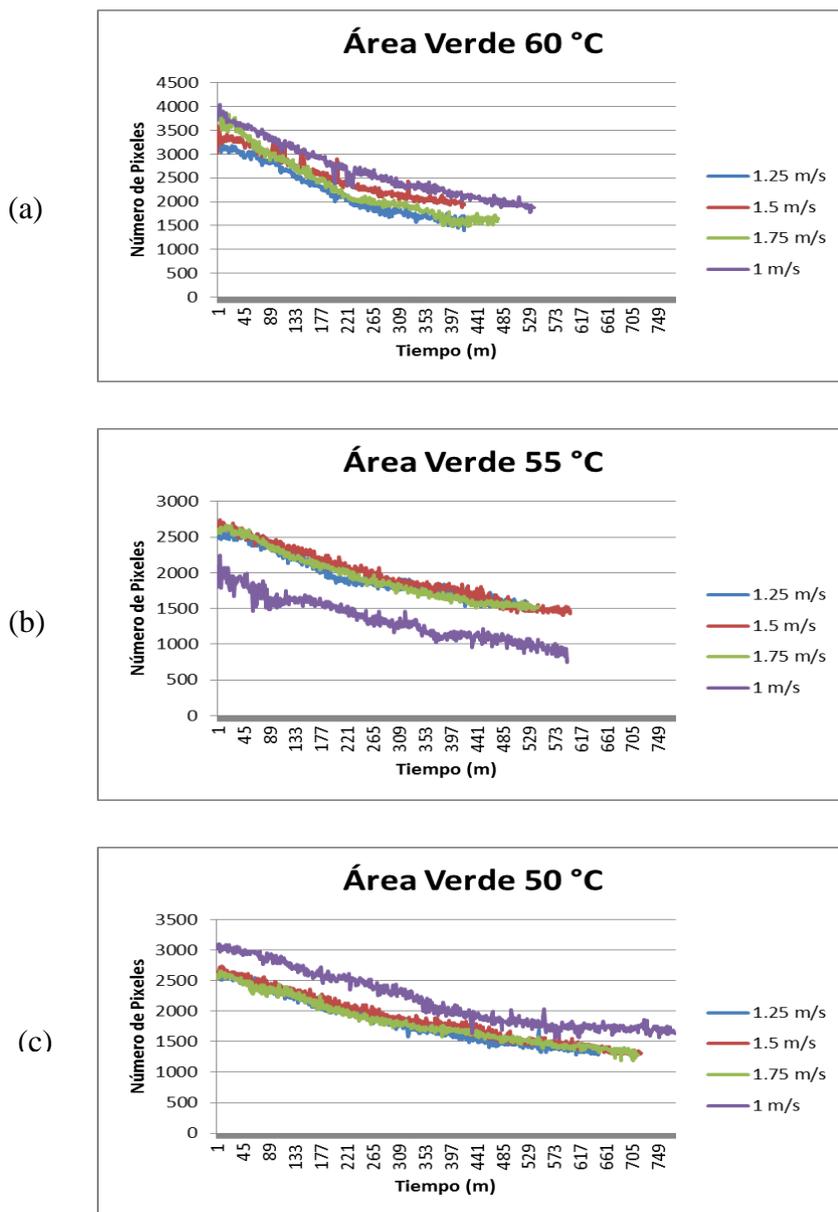
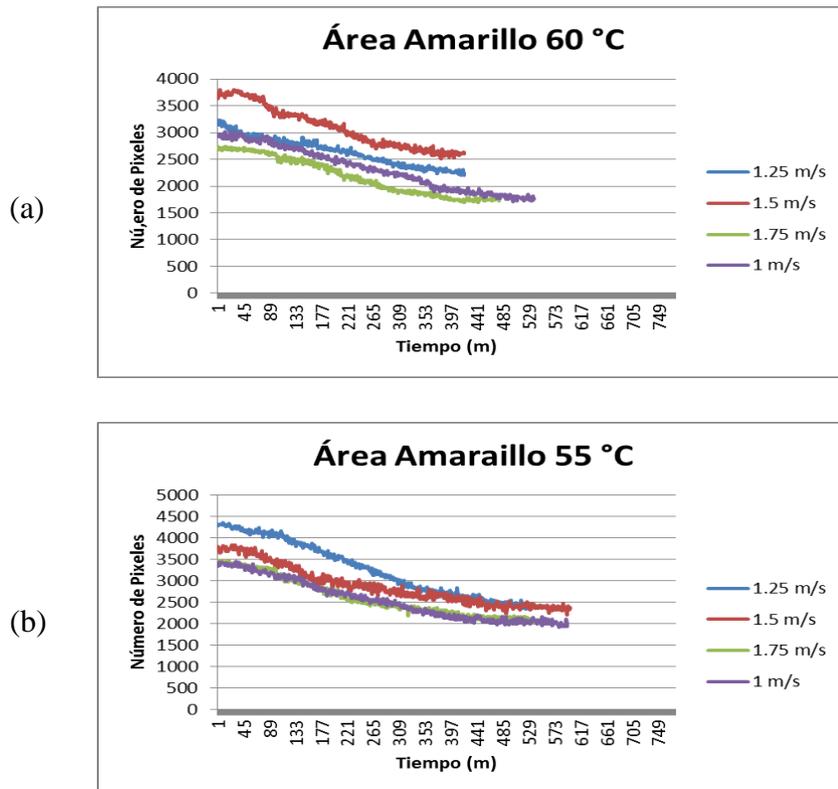


Figura 5.13. Valores de área para chile Verde con diferentes condiciones de secado (a) a 60°C, (b) a 55°C y (c) a 50°C.

En las gráficas anteriores se muestra el comportamiento que tuvo el cambio en el área de las muestras de chile verde. El valor inicial de cada muestra fue diferente debido a que cada una

tiene un área diferente lo que significa que cada chile es más grande o más pequeño que otro, pero lo importante es el comportamiento que tuvieron todas las muestras durante el proceso de deshidratado, que fue el tomar una forma decreciente, un poco parecida a lo que es una curva de secado.

A continuación, se muestran las gráficas (Figura 5.14) de los valores del área para el chile amarillo.



(c)

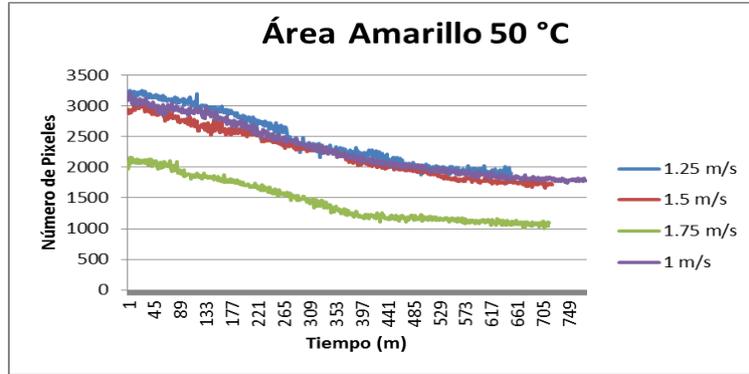
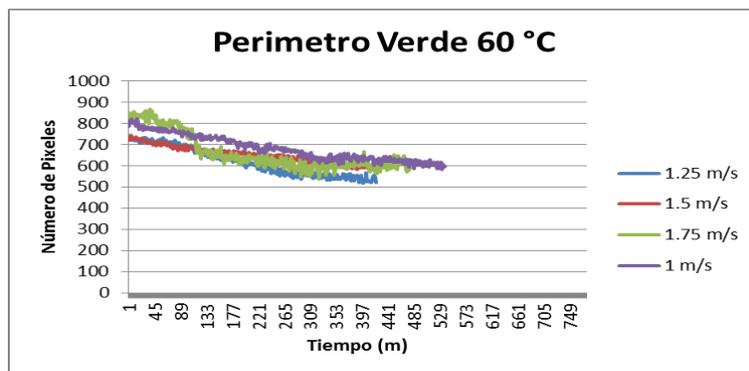


Figura 5.14. Valores de área para chile Amarillo con diferentes condiciones de secado (a) a 60°C, (b) a 55°C y (c) a 50°C.

Como se observó en las gráficas que corresponden a los valores del área de las muestras de chile amarillo, el comportamiento es decreciente a lo largo del proceso de deshidratado, teniendo valores iniciales diferentes debido a la diferencia de tamaños entre las muestras. Del mismo modo, la información indica que los chiles verdes tenían entre 3500 y 4000 píxeles al inicio y entre 1000 y 2000 píxeles al final del proceso, mientras que los chiles amarillos tenían entre 3500 y 4500 píxeles al inicio y entre 1500 y 2500 píxeles al final del proceso de deshidratado.

Continuando con el análisis de la información de los descriptores de forma, se muestra en la Figura 5.15 las gráficas de los valores del perímetro de las muestras de chile verde, deshidratadas a cuatro diferentes velocidades y a tres diferentes temperaturas.

(a)



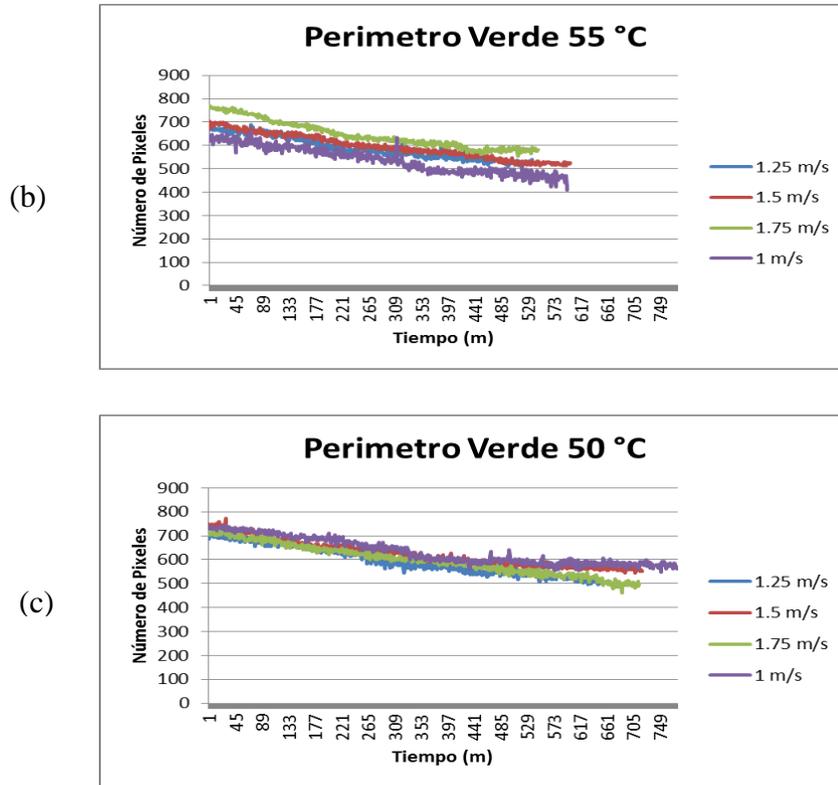


Figura 5.15. Valores de perímetro para chile Verde con diferentes condiciones de secado (a) a 60°C, (b) a 55°C y (c) a 50°C.

La información de las gráficas muestra que el perímetro decreció de una forma casi lineal sin tener variaciones significativas como las tiene una curva de secado. Los datos iniciales al igual que en el área son diferentes para cada muestra y esto se debe a la diferencia de tamaños entre ellas.

Continuando con los descriptores de forma, la información de las muestras de chile amarillo para el análisis del perímetro se muestra en la Figura 5.16.

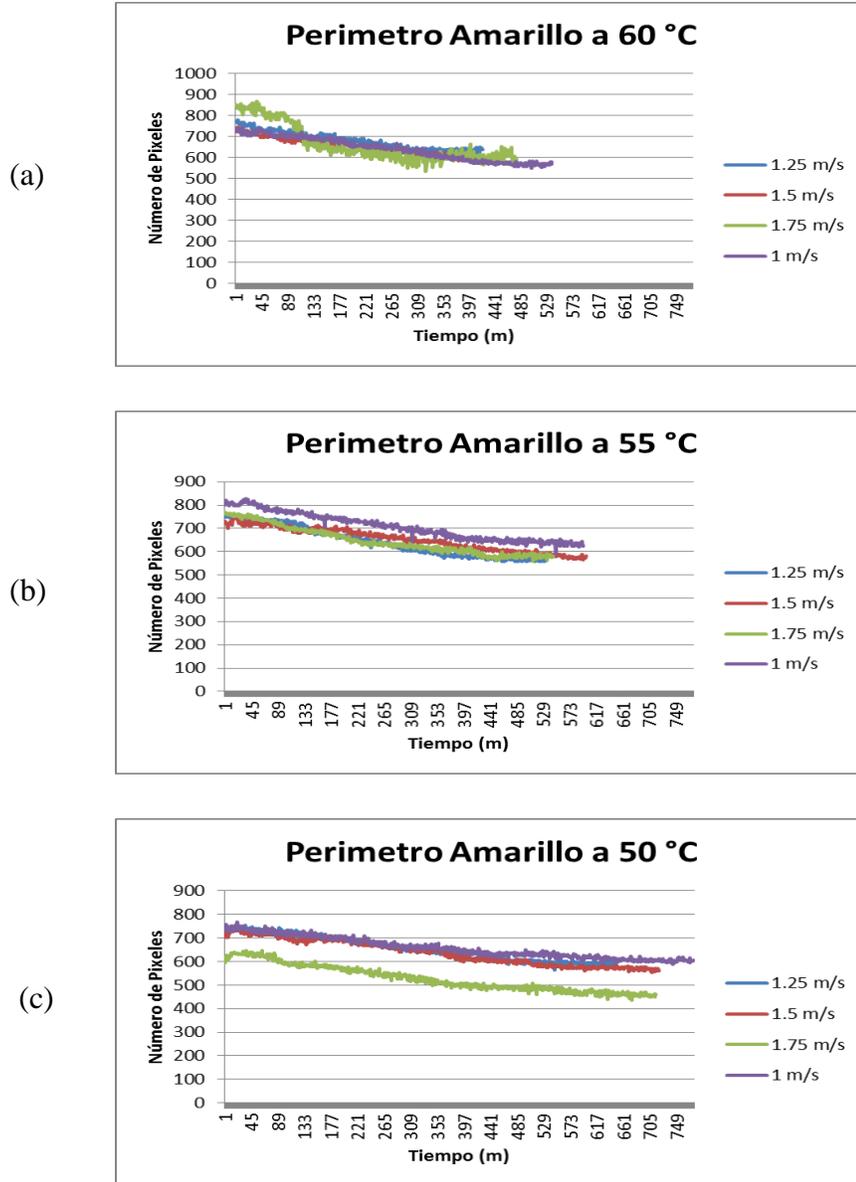


Figura 5.16. Valores de perímetro para Chile Verde con diferentes condiciones de secado (a) a 60°C, (b) a 55°C y (c) a 50°C.

Como se muestra en la Figura 5.16 el valor del perímetro disminuyó conforme transcurría el tiempo del proceso de deshidratado y esto fue igual para todas las muestras deshidratadas a diferentes temperaturas y velocidades de aire. Del mismo modo, las gráficas muestran que los perímetros de los chiles amarillos están entre 900 y 600 píxeles y al final del proceso están entre 650 y 450 píxeles, mientras que los chiles verdes están entre los 825 y 600 píxeles al inicio y tienen entre 600 y 415 píxeles al final del proceso. ,

5.4 Análisis de los descriptores de textura

Para la obtención de la información se realizaron tres pruebas, la primera fue sin aplicar ningún tipo de filtrado (Pre-procesamiento de las Imágenes), la segunda fue usando el filtro Gabor y la tercera usando el filtro Wavelet. En cuanto se realizó la primera prueba se observó que los datos contaban con mucho ruido debido a que, sin el uso de filtros, no se hace un contraste entre las crestas y canales que se forman en la superficie, por lo cual se decidió descartar esa opción.

En la Figura 5.17 se presenta la comparación del uso del filtro Gabor y el filtro Wavelet se observó que los datos obtenidos por el filtro Gabor presentan más ruido que los obtenidos por Wavelet, y que los datos de los descriptores Contraste y Probabilidad Máxima presentan comportamientos muy irregulares por lo cual se decidió descartar estos dos descriptores para la extracción de la información de la textura de las muestras.

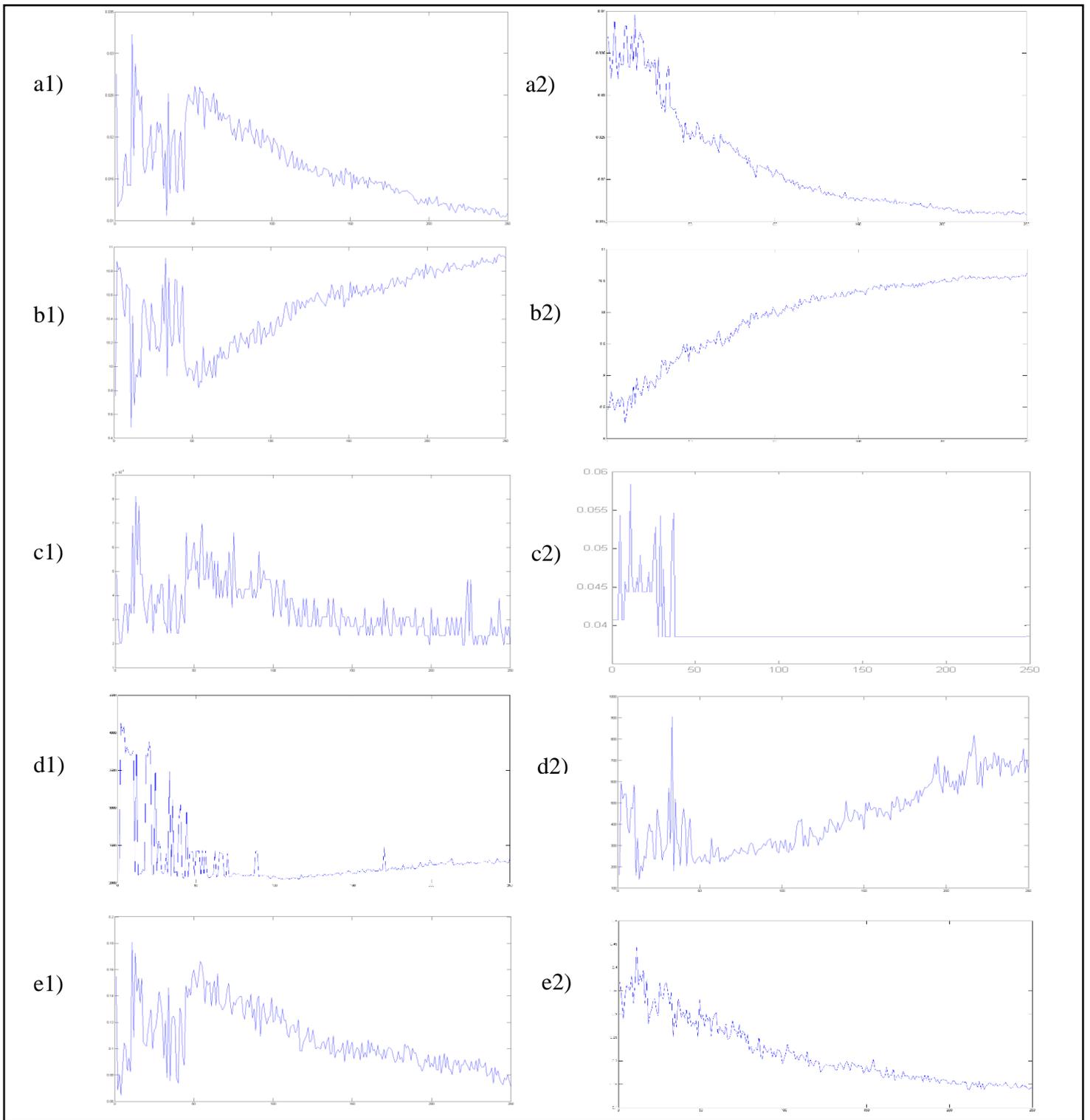


Figura 5.17. Comparación a1) Energía Gabor, a2) Energía Wavelet, b1) Entropía Gabor, b2) Entropía Wavelet, c1) Contraste Gabor, c2) Contraste Wavelet, d1) Prob. Máx. Gabor, d2) Pro. Más. Wavelet, e1) Homog. Gabor y e2) Homog. Wavelet.

La forma en la que se aplicaron los descriptores de textura y su almacenamiento fue ordenado conforme a las condiciones a las que fueron secadas. Para observar el comportamiento de los valores obtenidos, se procedió a realizar una gráfica por cada muestra, por cada modelo de textura. Para analizar el comportamiento de cada textura en condiciones de secado diferente, se agruparon las muestras del mismo color y se construyeron las gráficas correspondientes a los valores de la Energía de la Figura 5.18 a la 5.19.

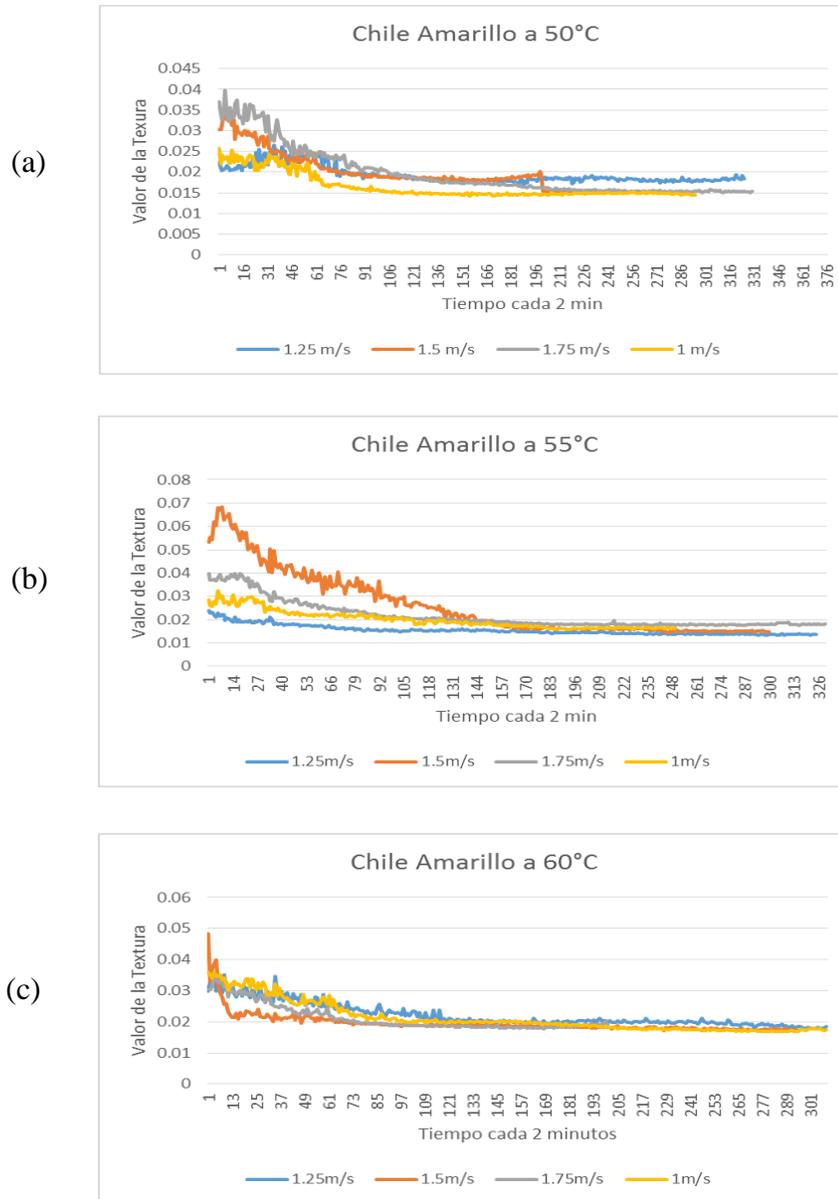


Figura 5.18. Valores de la Energía para Chile Amarillo con diferentes condiciones de secado (a) a 50°C, (b) a 55°C y (c) a 60°C.

La información mostrada en las gráficas indica cambio en la textura de las muestras de chile amarillo debido al decrecimiento en el valor de la energía, lo cual de acuerdo con su definición (Descriptores de Textura) significa que la superficie de las muestras se volvió más rugosa.

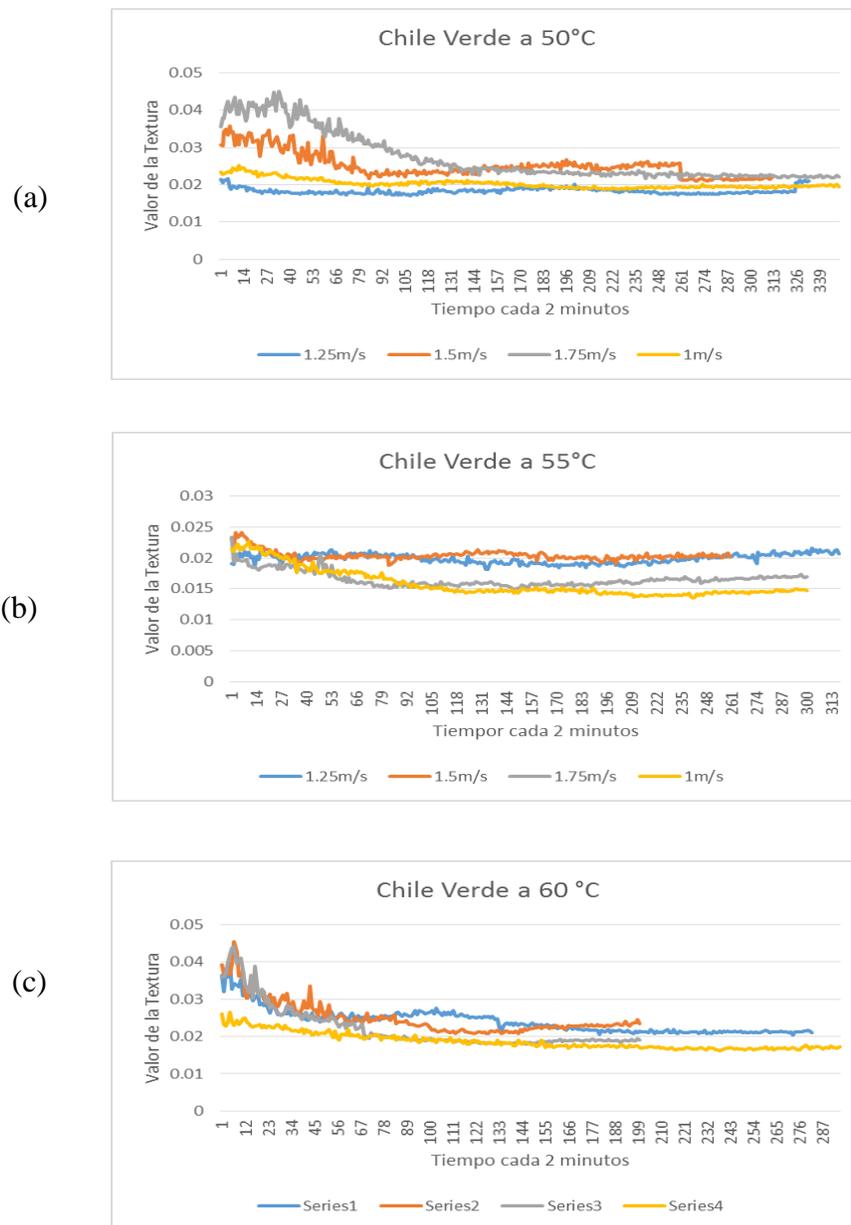


Figura 5.19. Valores de la Energía para chile Verde con diferentes condiciones de secado (a) a 50°C, (b) a 55°C y (c) a 60°C.

Las gráficas muestran que el comportamiento en el cambio de la textura analizada con la Energía concuerda con su definición, al disminuir su valor significa que la superficie es más rugosa. A continuación, se muestra la información del descriptor de textura Entropía de la Figura 5.20 y 5.21.

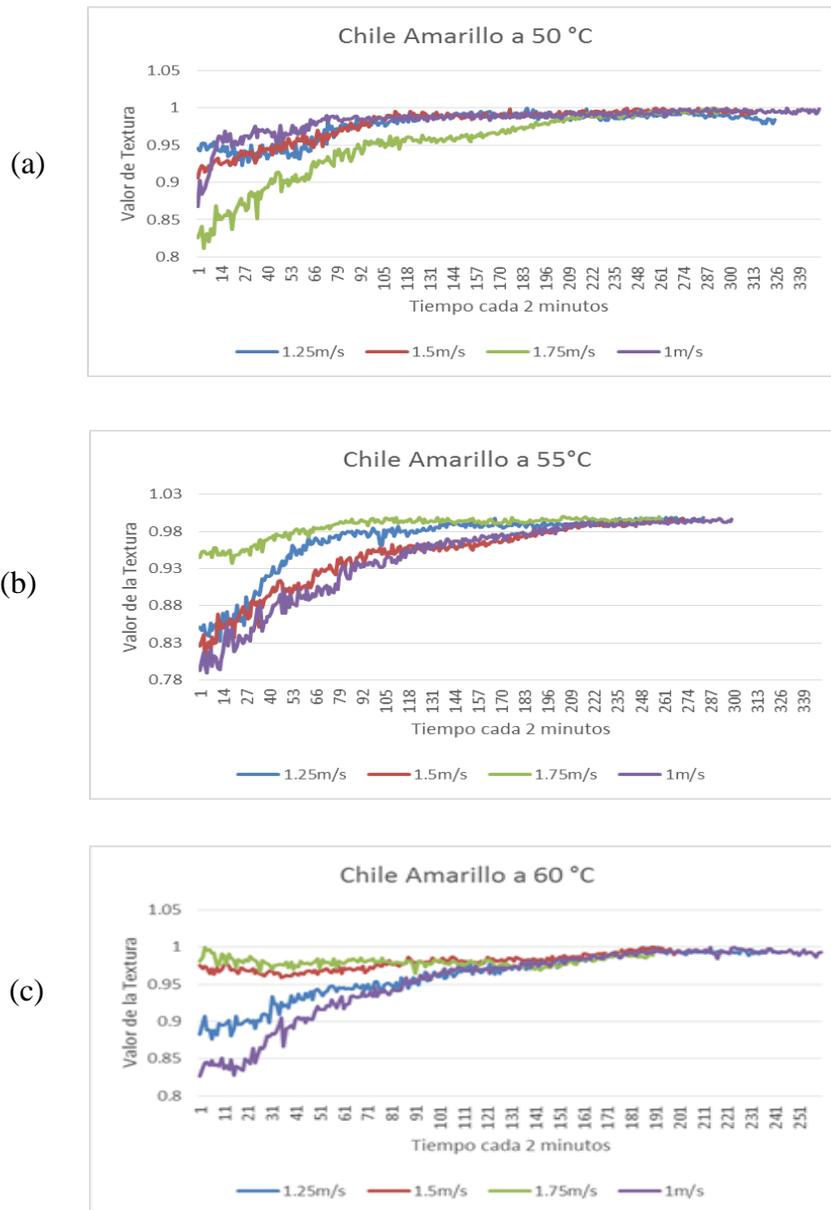


Figura 5.20. Valores de la Energía para Chile Amarillo con diferentes condiciones de secado (a) a 50°C, (b) a 55°C y (c) a 60°C.

La información mostrada en las gráficas indica que, si se está llevando a cabo un cambio en la textura de las muestras y de acuerdo con el significado de este descriptor, los chiles tendieron a ser más rugosas conforme avanzó el proceso de deshidratado, sin embargo, existe una mayor diferencia en los datos iniciales de cada muestra.

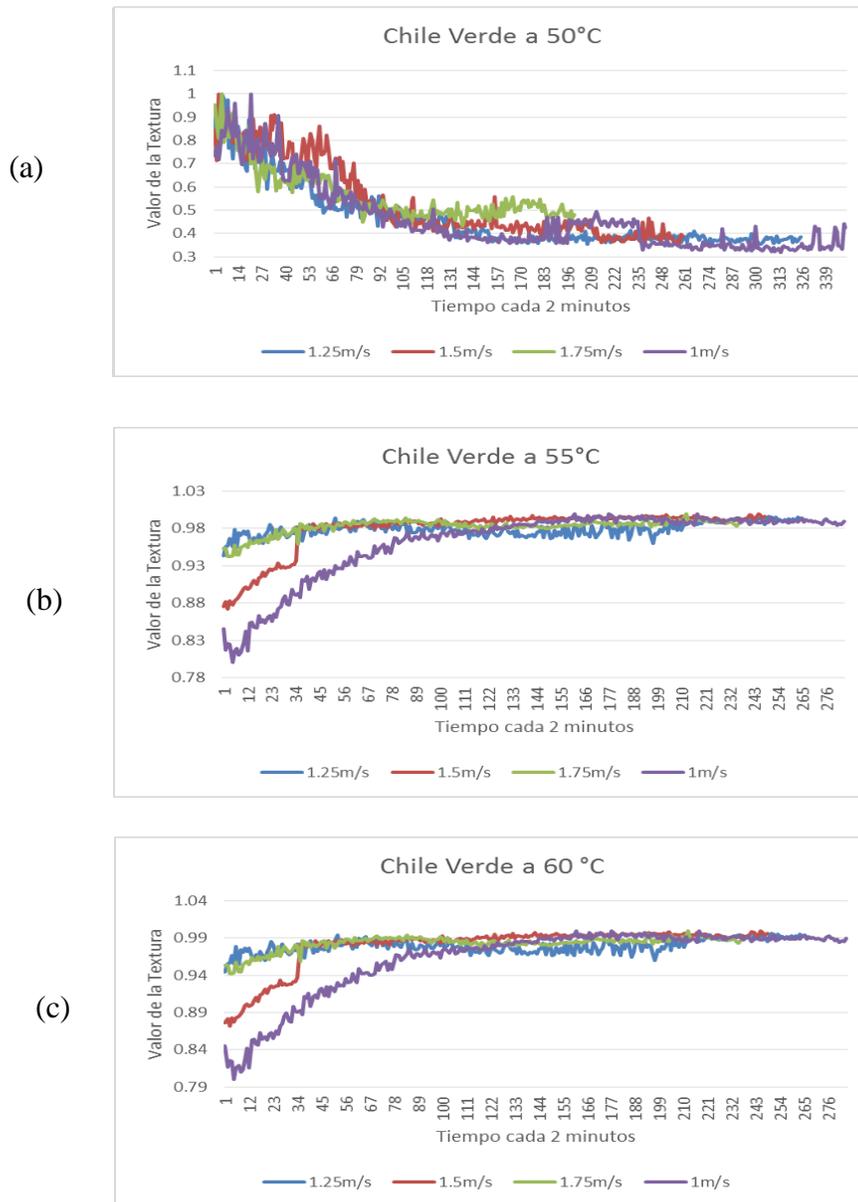


Figura 5.21. Valores de la Entropía para Chile Verde con diferentes condiciones de secado (a) a 50°C, (b) a 55°C y (c) a 60°C.

Las Figuras 5.20 y 5.21 indican que también existe un cambio en la superficie de los chiles, pasando de ser lisas a rugosas. En este caso, conforme se analizan los datos, se observa que el cambio en los chiles verdes sucede de manera menos uniforme en comparación de los chiles amarillos.

La información del descriptor de textura Homogeneidad local, se expone en la Figura 5.22 y 5.23.

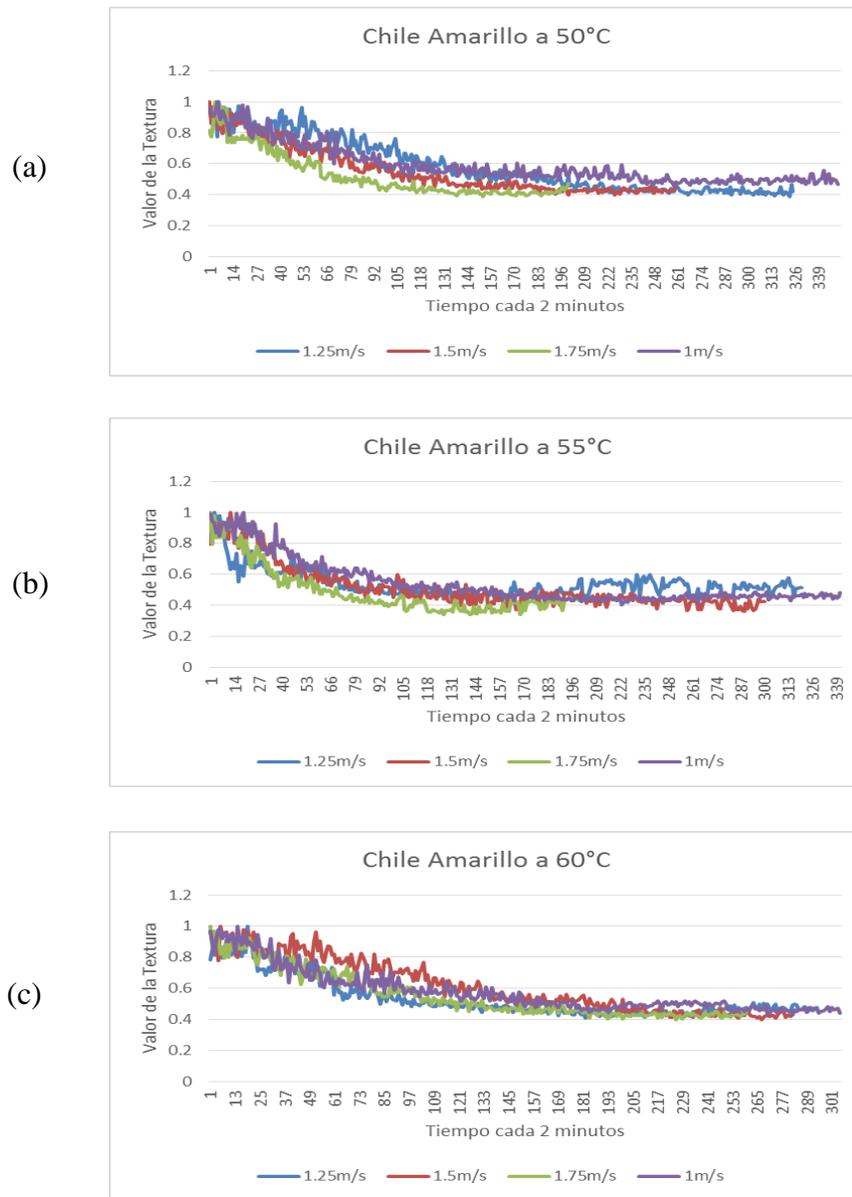


Figura 5.22. Valores de la Homogeneidad Local para Chile Amarillo con diferentes condiciones de secado (a) a 50°C, (b) a 55°C y (c) a 60°C.

De acuerdo con la información mostrada en las gráficas, este descriptor encontró que la superficie de la muestra cambio de ser lisa a adoptar una textura rugosa; de igual forma en la gráfica se puede observar el comportamiento tiene una forma decreciente y se asemeja a una curva de secado.

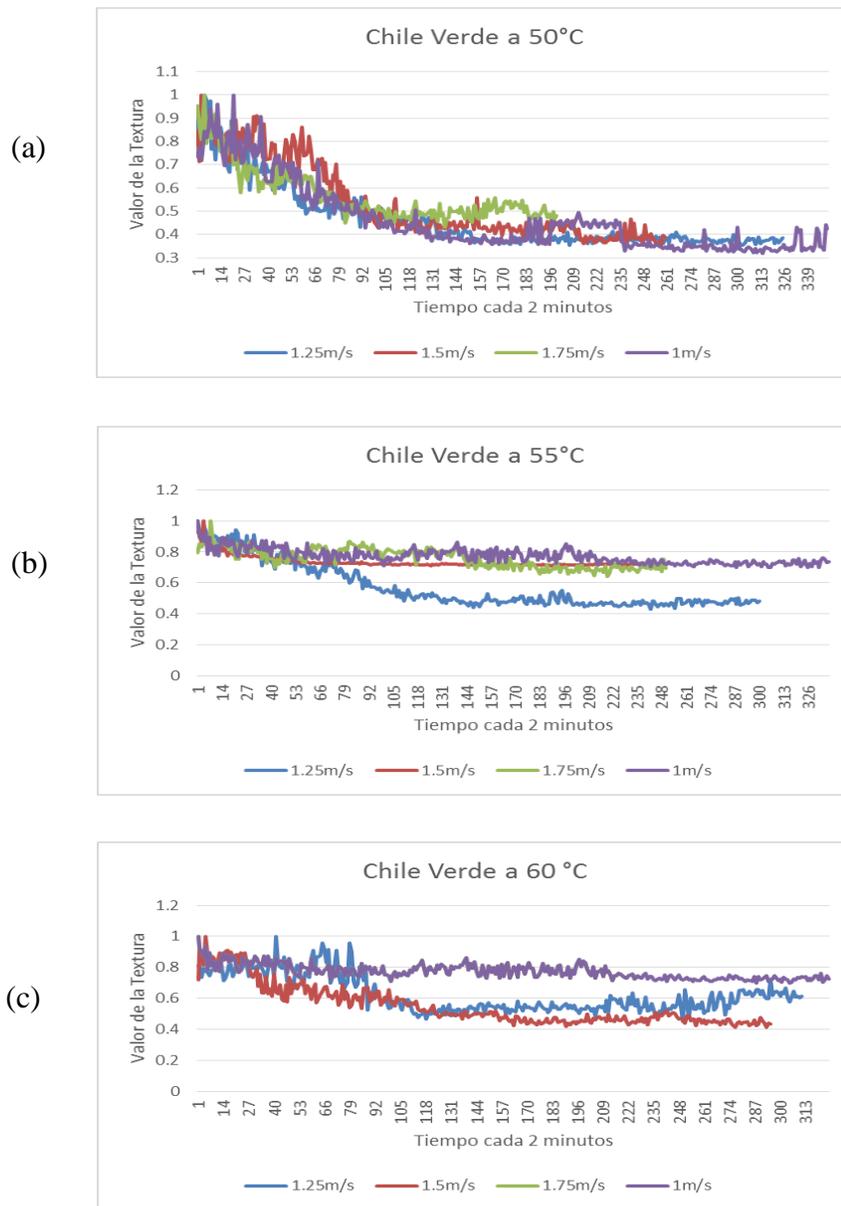


Figura 5.23. Valores de la Homogeneidad Local para Chile Verde con diferentes condiciones de secado (a) a 50°C, (b) a 55°C y (c) a 60°C.

De los tres descriptores usados para recabar la información acerca de los cambios en la textura de las muestras, el descriptor Homogeneidad Local fue el que mayores variaciones tuvo durante el análisis de las muestras a lo largo del proceso de secado. No se mostró algún comportamiento regular en las doce pruebas realizadas, por lo que se decidió no usar este descriptor para la etapa de ajuste.

En los resultados obtenidos sobre la textura del producto se observó que presenta cambios muy grandes a lo largo del proceso de secado y no muestran algún comportamiento claro que lo asemeje a una curva de secado sin tener una alta cantidad de saltos a lo largo de todo el proceso de deshidratado. Este comportamiento se debió posiblemente a la preparación de las muestras, ya que se les realizaron doce perforaciones de 4.07 mm de diámetro a cada muestra. Este procedimiento se lleva a cabo debido a que durante la experimentación se realizó una prueba con perforaciones en los chiles y otra sin perforarlos, dando como resultado que las muestras sin perforar tuvieron un tiempo de secado mayor a 48 h lo que significa que tomó un 300% más de tiempo lograr el secado del producto en comparación con el secado de las muestras perforadas. Sin embargo, al realizar este procedimiento, influye mucho en el comportamiento de la superficie de las muestras, ya que las perforaciones tienden a ser de mayor diámetro conforme avanza el proceso de secado y esto afecta directamente sobre la información obtenida por los descriptores de textura.

De forma cualitativa se concluyó que el descriptor de textura, no podría ser de apoyo dado el comportamiento que muestra durante el proceso de deshidratado, sin embargo, en la siguiente sección, se realizó una serie de pruebas para seleccionar los descriptores visuales que mejor comportamiento tuvieron a lo largo del proceso de deshidratado mediante resultados cuantitativos, ya que, en esta sección, la discusión de los datos se dio de forma cuantitativa.

5.5 Ajuste de los datos visuales respecto al tiempo

En esta etapa se llevó a cabo el ajuste de los datos visuales de los tres tipos de descriptores visuales (Color, Forma y Textura) con respecto al tiempo y posteriormente se realizó el ajuste para relaciones los datos visuales con la humedad del producto durante el proceso de secado.

Para este paso, se realizó una prueba preliminar en los descriptores de color, forma y textura, para obtener los valores del coeficiente (R^2) de determinación de ajuste por mínimos cuadrados y la raíz media de los errores cuadrados (RMSE) los cuales se muestran en la Tabla 5.1. Se muestran los más altos valores de cada uno de los tres descriptores.

Tabla 5.1. Valores de selección de R^2 y RMSE para los descriptores visuales.

Descriptor	Valor de R^2	Valor de RMSE
Plano S del modelo HSI	0.874	0.59
Plano S del modelo HSV	0.878	0.56
Plano H del modelo HSI	0.965	0.037
Plano H del modelo HSV	0.978	0.034
Perímetro	0.883	0.064
Área	0.945	0.052
Energía	0.721	0.63
Entropía	0.625	0.58
Homogeneidad	0.738	0.42

Con base en estos resultados se decidió conservar el plano H del modelo de color HSV , el descriptor de forma Área, y dados los resultados de los descriptores de textura que no alcanzaron el valor mínimo que marca la literatura que es de 0.85 para considerar un buen ajuste, se descartaron, por lo que para continuar con el ajuste de los datos y buscar una relación con los parámetros de secado del chile habanero se usó un descriptor de forma y uno de color.

Se realizó un primer ajuste de datos para obtener la relación entre los datos visuales y el tiempo. Para ello se utilizaron los tres modelos que marca la literatura que mejor se ajustan al proceso de secado de pimientos rojos y verdes, chiles verdes y rojos y el chile habanero, que son el modelo de Page (Ecuación 5.1), Page Modificado (Ecuación 5.2), (Gil. 2016) y una ecuación propuesta (EP) basada en el modelo de capa delgada de Midilli (Ecuación 5.3).

$$DV(t) = e^{-k*t^n} \quad (5.1)$$

$$DV(t) = e^{(-k*t)^n} \quad (5.2)$$

$$DV(t) = a * e^{-k*t^n} + b \quad (5.3)$$

donde a , b , k y n son constantes empíricas en función de la velocidad del aire, temperatura del aire y la humedad relativa; t es el tiempo en horas y DV son los datos visuales normalizados.

Por otra parte, se realizó un análisis de regresión no lineal mediante el software SPSS 23.0 para determinar el valor de las constantes empíricas. Se utilizó la raíz media de los errores cuadrados (RMSE) cuyo valor se calcula con la Ecuación 5.4 y el coeficiente (R^2) de determinación de ajuste por mínimos cuadrados (Ecuación 5.5).

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Valor_{cal} - Valor_{exp})^2 \right]^{1/2} \quad (5.4)$$

$$R^2 = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2 * n(\sum y_i^2) - (\sum y_i)^2]}} \quad (5.5)$$

donde n es el número de datos, x_i es el dato experimental y y_i es el dato ajustado. El valor de R^2 puede ir de 1 a 0, siendo que mientras más cercano sea el valor a 1 significa que su ajuste es mejor. En las tablas 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 se observan los datos experimentales adimensionalizados de los datos visuales (*HSVH*, Área) respecto al tiempo de secado, para cada una de las diferentes condiciones experimentales.

Tabla 5.2. Datos de la relación adimensional del Área para las diversas temperaturas, velocidades y tiempos para el chile Amarillo.

Curva Experimental	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.9421	0.9478	0.9364	0.9516	0.9482	0.9476	0.9521	0.9231	0.9609	0.9265	0.9592	0.9666
3	0.9065	0.9038	0.9032	0.8623	0.8849	0.8681	0.8611	0.8487	0.8852	0.8566	0.8841	0.9269
4	0.8417	0.8059	0.8412	0.8063	0.8288	0.8381	0.7929	0.7703	0.8258	0.8247	0.8056	0.8747
5	0.7963	0.7667	0.7942	0.7306	0.7223	0.7958	0.7409	0.7109	0.7593	0.7771	0.7229	0.7737
6	0.7439	0.7154	0.7481	0.6948	0.7035	0.7292	0.6977	0.6912	0.7386	0.6994	0.6828	0.6943
7	0.6791	0.6636	0.6821	0.6524	0.6887	0.6949	0.6531	0.6409	0.7002	0.6022	0.6522	0.6537
8	0.6522	0.6327	0.6327	0.6249	0.6537	0.6509	0.6198	0.5983	0.6852	0.55	0.615	0.6301
9	0.6262	0.5992	0.597	0.6024	0.6423	0.6295	0.6066	0.5877	0.6788	0.5412	0.5836	0.6291
10	0.5944	0.5813	0.5847	0.5806	0.638		0.6033	0.5747		0.5378	0.5727	0.6177
11	0.5882	0.5619	0.5602	0.5738	0.6224		0.5965	0.5582		0.5257	0.5624	
12	0.5745	0.5585		0.5626			0.5891	0.5526		0.5206		
13	0.5604			0.5515			0.5843			0.5156		
14	0.5545						0.5789			0.5065		

Tabla 5.3. Datos de la relación adimensional del Área para las diversas temperaturas, velocidades y tiempos para el chile Verde.

Curva Experimental	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.9810	0.9574	0.9800	0.9810	0.9574	0.9800	0.9542	0.9558	0.8922	0.9767	0.9183	0.9669
3	0.9540	0.91958	0.9427	0.9544	0.9194	0.9427	0.9445	0.931	0.8410	0.9564	0.8697	0.8376
4	0.8615	0.9024	0.8154	0.8615	0.9024	0.8154	0.8323	0.9052	0.7907	0.9025	0.7839	0.7273
5	0.7663	0.8219	0.7111	0.7663	0.8219	0.7111	0.7982	0.7825	0.7021	0.7912	0.7261	0.6255
6	0.7525	0.7150	0.6065	0.7552	0.7150	0.6065	0.7232	0.7188	0.6487	0.7854	0.6645	0.5532
7	0.6714	0.6953	0.5739	0.6714	0.6953	0.5739	0.6872	0.6846	0.6045	0.7431	0.5957	0.5178
8	0.6418	0.6798	0.5139	0.6418	0.6798	0.5139	0.6310	0.6536	0.5635	0.6847	0.5531	0.4571
9	0.5948	0.6322	0.4303	0.5948	0.6321	0.4303	0.6149	0.5911	0.5396	0.6121	0.5170	0.4377
10	0.5614	0.6174	0.4287	0.5614	0.6174		0.5834	0.577		0.6140	0.5051	0.4169
11	0.5417	0.5913	0.4224	0.5417	0.5918		0.5778	0.5555		0.5882	0.4926	
12	0.5745	0.5585		0.5626			0.5891	0.5526		0.5206		
13	0.5604			0.5515			0.5843			0.5156		
14	0.5545						0.5789			0.5065		

Tabla 5.4. Datos de la relación adimensional del modelo de color HSV, plano H, para las diversas temperaturas, velocidades y tiempos para el chile Amarillo.

Curva Experimental	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.9516	0.9482	0.9076	0.9521	0.9231	0.9609	0.9265	0.9592	0.9609	0.9421	0.9478	0.9364
3	0.8623	0.8849	0.8681	0.8611	0.8487	0.8852	0.8566	0.8541	0.8852	0.9065	0.9038	0.9032
4	0.8063	0.8288	0.8381	0.7929	0.7703	0.8258	0.8247	0.8056	0.8258	0.8417	0.8059	0.8412
5	0.7306	0.7223	0.7458	0.7409	0.7109	0.7593	0.7771	0.7229	0.7593	0.7963	0.7667	0.7942
6	0.6948	0.7035	0.7192	0.7031	0.6912	0.7386	0.6994	0.7028	0.7386	0.7439	0.7154	0.7481
7	0.6524	0.6887	0.6849	0.6577	0.6409	0.7002	0.6022	0.6822	0.7002	0.6791	0.6636	0.6821
8	0.6412	0.6537	0.6609	0.6398	0.5983	0.6852	0.55	0.645	0.6852	0.652	0.6027	0.6327
9	0.6306	0.648	0.6418	0.62	0.5877	0.6761	0.5412	0.6136	0.6761	0.6262	0.5892	0.587
10	0.6249	0.6423	0.6338	0.6166	0.5647		0.5347	0.5877		0.5944	0.5713	0.5647
11	0.6188	0.6313	0.6289	0.6033	0.542		0.5236	0.5624		0.5882	0.5619	0.5487
12	0.6106	0.6257		0.5981			0.5157	0.5532		0.5745	0.5519	
13	0.5926			0.5873			0.5065			0.5604		
14	0.5585						0.4874			0.5545		

Tabla 5.5. Datos de la relación adimensional del modelo de color HSV, plano H, para las diversas temperaturas, velocidades y tiempos para el Chile Verde.

Curva Experimental	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.9621	0.9052	0.9754	0.9556	0.9697	0.8592	0.9523	0.9549	0.9687	0.9760	0.9549	0.9191
3	0.9597	0.8571	0.9188	0.9358	0.9187	0.8993	0.9162	0.9021	0.8984	0.9020	0.9389	0.8846
4	0.9109	0.8094	0.7880	0.8596	0.8931	0.7811	0.8563	0.8007	0.7213	0.8881	0.9030	0.8056
5	0.8676	0.7545	0.7265	0.7735	0.8043	0.7015	0.8299	0.7471	0.6799	0.7989	0.8136	0.7544
6	0.8189	0.6874	0.6281	0.7285	0.7179	0.6660	0.6938	0.6489	0.5741	0.7799	0.7839	0.67952
7	0.7695	0.6785	0.5707	0.6976	0.6419	0.6091	0.6741	0.5873	0.4939	0.7455	0.7599	0.5941
8	0.6869	0.6573	0.5435	0.6609	0.5830	0.5759	0.5061	0.5512	0.4838	0.6982	0.7253	0.5881
9	0.6748	0.6040	0.5190	0.6210	0.5383	0.5294	0.5036	0.5201	0.4799	0.6332	0.6704	0.5412
10	0.6628	0.5886	0.5053	0.5667	0.5023		0.4935	0.4919		0.6241	0.6305	0.5186
11	0.6569	0.5591	0.4912	0.5326	0.4784		0.4832	0.4850		0.6080	0.6217	0.5036
12	0.6428	0.545		0.5091			0.4673	0.4643		0.5771	0.5940	
13	0.6389			0.4956			0.4367			0.5527		
14	0.5585						0.4362			0.5401		

Al realizar el dimensionamiento de los valores de los descriptores visuales, se observó que el área y el color tienden a tener un comportamiento decreciente con valores muy similares, ya que ambos comienzan con el valor de 1 (el valor máximo) para todas las muestras y sus valores finales oscilan entre 0.55 y 0.50 para el caso del Chile amarillo y entre 0.55 a 0.41 para el caso del Chile verde.

En las Tablas 5.6 a la 5.9 se muestran los valores de las constantes empíricas de los modelos de secado de capa delgada de los chiles, descrito por las Ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3, obtenidas mediante el ajuste con el software SPSS 23.0 de los datos experimentales de las curvas características visuales.

Tabla 5.6. Valores de las constantes empíricas del modelo de Page, Page Modificado y EP para el área para el chile amarillo.

Modelo	Constantes	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
Page	k	0.4	0.313	0.17	0.228	0.22	0.309	0.045	0.199	0.393	0.309	0.298	0.309
	n	1.432	1.5	1.504	-0.32	1.206	1.449	1.465	1.248	1.367	1.488	-0.14	1.01
	R^2	0.91	0.732	0.76	0.861	0.832	0.878	0.819	0.865	0.829	0.823	0.894	0.796
	RMSE	0.11	0.15	0.17	0.14	0.15	0.17	0.20	0.12	0.11	0.12	0.13	0.18
Page Modificado	K	0.047	0.024	0.07	0.005	0.053	0.044	0.009	0.072	0.06	0.03	0.203	0.081
	N	0.657	-0.12	1.057	1.234	-0.79	0.189	1.052	1.148	1.526	1.526	1.206	1.415
	R^2	0.845	0.814	0.898	0.792	0.853	0.862	0.89	0.872	0.878	0.862	0.893	0.833
	RMSE	0.13	0.12	0.10	0.21	0.14	0.12	0.15	0.13	0.13	0.12	0.10	0.11
EP	A	-0.09	-0.09	-0.03	-0.16	-0.12	-0.17	2.923	-0.15	-0.03	-0.048	-0.083	3.219
	K	0.339	0.316	16.89	0.412	0.423	0.333	2.085	0.59	0.356	0.404	0.425	1.271
	N	1.779	1.86	0.845	1.203	1.4	1.607	-0.01	1.001	2.27	1.718	1.607	-0.001
	B	0.634	0.652	-15.9	0.577	0.546	0.655	-37.8	0.438	0.627	0.55	0.56	-30.88
	R^2	0.98	0.988	0.975	0.976	0.991	0.982	0.825	0.984	0.991	0.994	0.989	0.954
	RMSE	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05

Tabla 5.7. Valores de las constantes empíricas del modelo de Page, Page Modificado y EP para el área, para el chile verde.

Modelo	Constantes	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
Page	k	1.564	1.85	1.055	0.952	1.892	0.989	1.45	0.852	0.24	1.79	1.287	0.963
	n	0.232	0.153	0.045	0.123	0.625	-0.49	0.165	0.182	0.363	0.523	0.425	0.512
	R^2	0.892	0.824	0.864	0.878	0.729	0.763	0.852	0.843	0.855	0.732	0.904	0.856
	RMSE	0.13	0.16	0.17	0.15	0.18	0.22	0.14	0.13	0.13	0.21	0.13	0.15
Page Modificado	k	1.365	1.396	1.431	1.465	1.498	1.538	1.565	1.598	1.637	1.665	1.698	1.736
	n	0.073	0.85	0.095	0.052	0.093	0.029	-0.02	0.128	0.065	0.060	0.102	0.052
	R^2	0.898	0.845	0.869	0.724	0.897	0.832	0.865	0.792	0.857	0.898	0.847	0.738
	RMSE	0.14	0.13	0.11	0.22	0.14	0.13	0.14	0.22	0.14	0.11	0.12	0.12
Midilli	a	0.581	0.402	-0.45	0.457	0.435	0.482	-0.28	8.699	-	0.223	0.373	3.219
	k	0.368	0.417	0.892	0.375	0.471	0.568	0.934	-0.53	0.923	0.573	0.427	0.415
	n	-0.54	3.737	-0.76	-0.16	-0.17	-0.21	-1.22	0.013	-0.32	17.169	-0.221	-0.044
	b	0.973	-0.02	-1.09	1.95	1.796	-1.36	-1.41	-1.86	-0.99	-76.63	1.127	2.671
	R^2	0.948	0.922	0.887	0.906	0.961	0.987	0.865	0.951	0.921	0.882	0.907	0.967
	RMSE	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04	0.05	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04	0.06

Después de realizar el ajuste del área del chile amarillo y verde, se observó que el modelo que mejor se ajustó fue el modelo de EP, al presentar en todas las corridas una R^2 mayor a

0.85 y RMSE de entre 0.07 y 0.03, mientras que los otros modelos, en algunas de sus corridas, quedaron por debajo de este valor.

Tabla 5.8. Valores de las constantes empíricas del modelo de Page, Page Modificado y EP para el color, para el chile amarillo.

Modelo	Constantes	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
Page	k	-0.09	-0.09	-0.16	-0.12	-0.17	-0.15	-0.03	-0.04	-0.08	-0.087	-0.071	-0.171
	n	0.339	0.316	0.412	0.423	0.333	0.59	0.356	0.404	0.425	0.389	0.416	0.472
	R^2	0.869	0.853	0.816	0.876	0.823	0.843	0.812	0.865	0.722	0.824	0.852	0.9
	RMSE	0.13	0.15	0.17	0.17	0.15	0.15	0.14	0.13	0.21	0.14	0.13	0.11
Page Modificado	k	0.634	0.652	0.577	0.546	0.655	0.438	0.627	0.55	0.56	0.634	0.652	0.577
	n	1.779	1.86	1.203	1.4	1.607	1.001	2.27	1.718	1.607	1.779	1.86	1.203
	R^2	0.754	0.85	0.782	0.512	0.795	0.902	0.759	0.832	0.92	0.862	0.869	0.743
	RMSE	0.20	0.13	0.21	0.28	0.20	0.13	0.21	0.12	0.11	0.14	0.12	0.22
EP	a	0.484	0.492	0.476	-0.47	1	0.537	-0.48	0.596	0.566	1.297	-0.374	-0.538
	k	-0.06	-0.25	-0.43	-1.89	-0.45	-0.64	-0.30	-0.55	-0.35	-0.614	-3.82	-1.437
	n	1.89	1.37	1.405	-1.16	1.309	1.394	1.101	1.205	1.152	-0.003	-2.468	-1.03
	b	0.416	0.417	0.41	0.905	0.431	0.392	0.971	0.51	0.878	0.780	0.818	0.937
	R^2	0.955	0.961	0.955	0.931	0.925	0.942	0.921	0.998	0.975	0.986	0.928	0.928
	RMSE	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04	0.04	0.08	0.03	0.04	0.04	0.04	0.07

Tabla 5.9. Valores de las constantes empíricas del modelo de Page, Page Modificado y EP, para el color para el chile verde.

Modelo	Constantes	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
Page	k	-0.28	-0.55	-0.20	-1.55	-0.21	-31.3	-0.44	-0.33	-16.9	-0.074	-0.221	-0.044
	n	1.21	1.625	1.446	-0.75	0.666	30.566	1.418	1.461	-0.09	1.771	1.217	2.671
	R^2	0.562	0.623	0.746	0.866	0.805	0.764	0.563	0.445	0.72	0.642	0.867	0.953
	RMSE	0.23	0.25	0.21	0.18	0.15	0.22	0.32	0.41	0.21	0.27	0.14	0.04
Page Modificado	k	0.33	0.44	0.49	-0.43	0.65	0.133	0.57	0.42	-312	0.497	0.373	0.472
	n	0.52	0.44	0.393	0.927	0.298	0.757	0.378	0.785	0.76	0.381	0.427	0.415
	R^2	0.85	0.78	0.92	0.96	0.87	0.895	0.92	0.853	0.87	0.888	0.906	0.874
	RMSE	0.14	0.23	0.05	0.04	0.14	0.14	0.05	0.16	0.17	0.17	0.05	0.14
Midilli	a	0.58	0.40	-0.45	0.45	0.43	0.265	-0.28	8.699	-0.21	0.223	0.373	0.472
	k	0.36	0.41	0.89	0.37	0.47	0.578	0.93	-0.53	0.92	0.573	0.427	0.415
	n	0.97	-0.02	-1.09	1.95	1.79	1.523	-1.41	-1.86	-0.99	-76.63	1.127	2.671
	b	-0.54	3.73	-0.76	-0.16	-0.17	-0.15	-1.22	0.013	-0.32	17.16	-0.221	-0.044
	R^2	0.94	0.92	0.89	0.90	0.96	0.952	0.96	0.976	0.92	0.918	0.907	0.967
	RMSE	0.04	0.04	0.06	0.05	0.03	0.04	0.08	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04

Una vez finalizados los ajustes de los datos visuales del color para el chile amarillo y verde, se observó que de igual manera que para los datos visuales del área, el modelo que mejor se ajustó fue el de EP, al cumplir con tener un valor de R^2 mayor a 0.85, este valor fue usado por Díaz. (2009) y Gil. (2016) y se usó como el valor mínimo de R^2 como indicador de un buen ajuste, y el valor de RMSE según la literatura, mientras su valor este más cercano a 0 es mejor.

La información mostrada sólo representa la relación que existe entre los datos visuales y el tiempo del proceso de secado. Al ajustar con estos modelos de secado, se obtuvieron las constantes empíricas del modelo, que posteriormente se relacionaran con las variables del secado que son, temperatura, velocidad del aire y humedad relativa del aire.

La elección de la ecuación para ajustar las variables de secado se realizó tomando en cuenta la que tuvo un valor mayor en R^2 ya que esto indica que tiene una mejor relación entre el comportamiento de los datos visuales y la pérdida de humedad del producto. Esto debido a que el proceso de secado presenta variaciones con valores altos en cuanto a la pérdida de humedad pero en su etapa final (2 a 3 horas antes de la finalización del proceso de secado) presenta reducciones en el porcentaje de humedad del producto pequeños (menores al 5%) y se requiere de más tiempo para lograr disminuir el valor de este porcentaje, lo que repercute en un mayor consumo de energía si el proceso de secado se alarga por un error en la exactitud mayor al 1% de humedad del producto. Por lo que se ha elegido la EP para continuar con el proceso de relación entre los datos visuales y la humedad del producto ya que en promedio se obtuvo un valor de bueno de R^2 al ajustar los dos descriptores visuales (área y color). Es importante tener un valor alto de R^2 en los ajustes realizados ya que mientras más alto sea, la información obtenida del modelo de capa delgada seleccionado, representará mejor el comportamiento real de la curva de secado.

5.5.1 Ajuste de las constantes empíricas resultantes

Al obtener la relación con el tiempo en la Ecuación 5.3, se obtuvieron las constantes empíricas a , k , n y b , que fueron relacionadas con variables representativas del proceso de secado como lo son: la velocidad, temperatura y humedad relativa del aire.

La relación se realizó mediante la ecuación del tipo Arrhenius (Ecuación 5.6).

$$a, k, n, b = \alpha_0 * vel^{\alpha_1} * HR^{\alpha_2} * exp\left(\frac{\alpha_3}{T}\right) \quad (5.6)$$

donde a , k , n y b son constantes del modelo de secado de capa delgada, vel es la velocidad del aire de secado, HR es la humedad relativa del aire de secado y T es la temperatura absoluta del aire de secado.

En las tablas 5.10 y 5.11 se muestran los valores de los parámetros de la Ecuación 5.6 obtenidos mediante el ajuste con los datos del modelo de secado de capa delgada.

En dichas tablas se muestran los valores de las constantes α_0 , α_1 , α_2 y α_3 de la ecuación Arrhenius, para cada constante empírica del modelo de capa delgada (a , k , n y b) para los descriptores de área y color.

Tabla 5.10. Valores de los parámetros de la ecuación tipo Arrhenius para el área del chile amarillo y verde.

Color del chile	Constantes	α_0	α_1	α_2	α_3	R^2
Amarillo	a	2.17 ⁻⁴	16.018	-15.513	40.667	0.988
	k	2197.64	52.892	-134.863	18.256	0.992
	n	7421.842	-1.267	0.905	38.387	0.912
	b	2.222	-125.93	39.521	72.2	0.889
Verde	a	4633.345	3.786	-1.091	39.637	0.879
	k	0.011	0.015	-0.322	20.021	0.915
	n	1.77 ⁻⁴	21.493	-0.731	14.146	0.983
	b	-0.132	-19.619	3.695	34.574	0.889

Tabla 5.11. Valores de los parámetros de la ecuación tipo Arrhenius para el color, del chile amarillo y verde.

Color del chile	Constantes	α_0	α_1	α_2	α_3	R^2
Amarillo	a	8084.841	-4.243	0.049	47.475	0.996
	k	-3160.278	1.006	2.039	22.703	0.954
	n	3.34	-7.061	0.103	16.955	0.974
	b	$4.58 \cdot 10^{-3}$	1.167	-0.206	73.559	0.923
Verde	a	0.012	1.709	-0.437	93.91	0.978
	k	6551.676	0.486	-0.48	43.867	0.958
	n	0.132	-19.619	3.695	34.574	0.924
	b	$1.77 \cdot 10^{-3}$	21.493	-0.731	14.146	0.905

En las Figuras 5.24 y 5.25 se muestra la comparación de los datos para la curva experimental de área y color de los chiles amarillo y verde secados a una temperatura de 50°C y velocidad del aire de 1 m/s. Con lo que se demuestra que la ecuación general experimental representa de manera favorable los datos visuales.

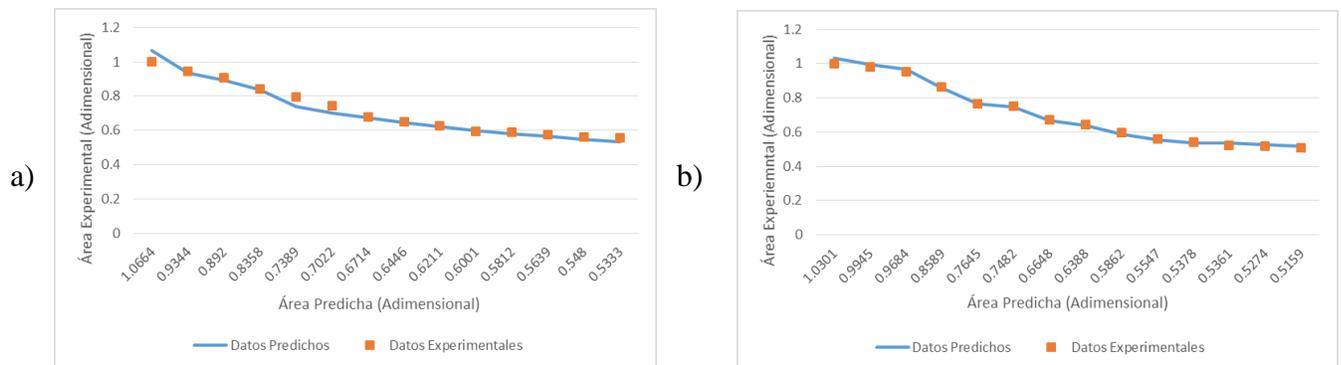


Figura 5.24. Comparación de los datos experimentales y los datos predichos del área para el secado de chile habanero amarillo (a) y el chile verde (b).

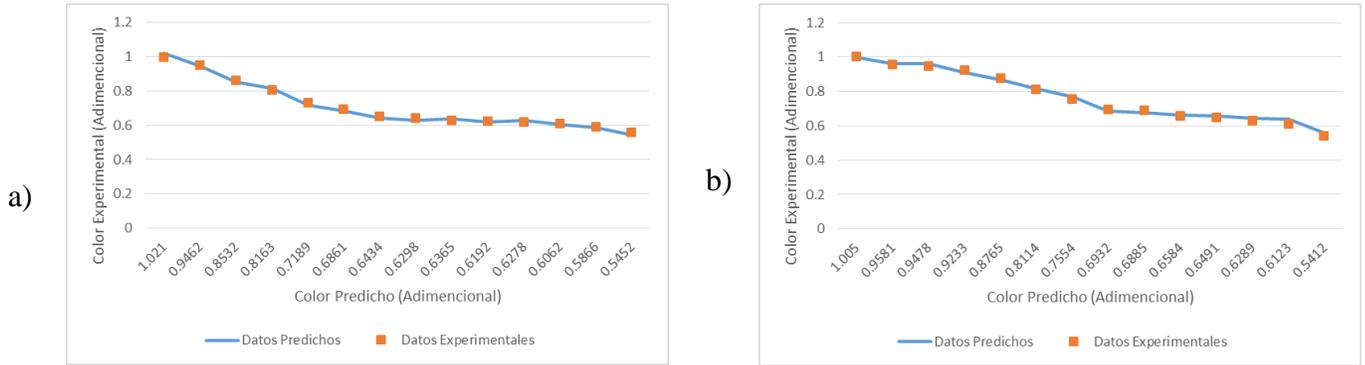


Figura 5.25. Comparación de los datos experimentales y los datos predichos del color para el secado de chile habanero amarillo (a) y el chile verde (b).

Con la realización de esta comparación, las constantes empíricas de la EP aplicada al secado del chile habanero quedaron en función de la temperatura, velocidad y humedad relativa del aire de secado, las cuales se presentan a continuación:

Valores de las constantes empíricas para la ecuación general de Área del chile amarillo expresados en las Ecuaciones 5.7 a la 5.10.

$$a = 2.17^{10-4} * vel^{16.018} * HR^{-15.513} * exp\left(\frac{40.667}{T}\right) \quad (5.7)$$

$$k = 2197.64 * vel^{-1.267} * HR^{-134.863} * exp\left(\frac{11.256}{T}\right) \quad (5.8)$$

$$n = 7421.842 * vel^{-1.267} * HR^{0.905} * exp\left(\frac{38.387}{T}\right) \quad (5.9)$$

$$b = 2.222 * vel^{-125.93} * HR^{39.521} * exp\left(\frac{72.2}{T}\right) \quad (5.10)$$

Valores de las constantes empíricas para la ecuación general de Área del chile verde expresados en las Ecuaciones 5.11 a la 5.14.

$$a = 4633.345 * vel^{3.786} * HR^{-1.091} * exp\left(\frac{39.637}{T}\right) \quad (5.11)$$

$$k = 0.011 * vel^{0.015} * HR^{-0.322} * exp\left(\frac{20.021}{T}\right) \quad (5.12)$$

$$n = 1.77^{10} * vel^{21.493} * HR^{-0.731} * exp\left(\frac{14.146}{T}\right) \quad (5.13)$$

$$b = -0.132 * vel^{-19.619} * HR^{3.695} * exp\left(\frac{34.574}{T}\right) \quad (5.14)$$

Valores de las constantes empíricas para la ecuación general de Color del chile amarillo expresados en las Ecuaciones 5.15 a la 5.18.

$$a = 8084.841 * vel^{-4.243} * HR^{0.049} * exp\left(\frac{47.475}{T}\right) \quad (5.15)$$

$$k = -3160.278 * vel^{1.006} * HR^{2.039} * exp\left(\frac{22.703}{T}\right) \quad (5.16)$$

$$n = 3.34 * vel^{-7.061} * HR^{0.103} * exp\left(\frac{16.955}{T}\right) \quad (5.17)$$

$$b = 4.58^{10-3} * vel^{1.167} * HR^{-0.206} * exp\left(\frac{73.559}{T}\right) \quad (5.18)$$

Valores de las constantes empíricas para la ecuación general de Color del chile verde expresados en las Ecuaciones 5.19 a la 5.22.

(5.19)

$$a = 0.012 * vel^{1.709} * HR^{-0.437} * exp\left(\frac{93.91}{T}\right)$$

(5.20)

$$k = 6551.676 * vel^{0.4867} * HR^{-0.48} * exp\left(\frac{34.574}{T}\right)$$

(5.21)

$$n = 0.132 * vel^{-19.619} * HR^{3.695} * exp\left(\frac{34.574}{T}\right)$$

(5.22)

$$b = 1.77^{10-3} * vel^{21.493} * HR^{-0.731} * exp\left(\frac{14.146}{T}\right)$$

donde a , k , n y b son constantes empíricas, vel es la velocidad del aire de secado, HR es la humedad relativa del aire de secado y T es la temperatura del aire.

Las constantes a , k , n y b posteriormente se sustituyen en la Ecuación 5.3.

En las tablas 5.12 a la 5.15 se muestra el funcionamiento de las ecuaciones generales para la constante visual experimental del área y color para el chile amarillo y verde.

Tabla 5.12. Datos de la relación adimensional del Área para las diversas temperaturas, velocidades y tiempos para el chile Amarillo.

Curva Experimental	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1.0664	1.068	1.0054	1.0457	1.0012	0.9981	1.001	1.0389	1.065	1.0064	0.9875	0.9952
2	0.9344	0.93	0.9396	0.9226	0.9498	0.9566	0.9213	0.9238	0.9111	0.9503	0.9592	0.9666
3	0.892	0.8499	0.8686	0.8512	0.882	0.8581	0.8447	0.8569	0.8219	0.9139	0.8841	0.9269
4	0.8358	0.7934	0.8012	0.8009	0.8122	0.8159	0.7771	0.8095	0.759	0.8487	0.8056	0.8747
5	0.7389	0.7497	0.7419	0.762	0.7512	0.7963	0.7203	0.7473	0.7103	0.7679	0.7229	0.7737
6	0.7022	0.7141	0.6923	0.7303	0.7043	0.7321	0.6742	0.7236	0.6708	0.6853	0.6828	0.6943
7	0.6714	0.6841	0.6526	0.7035	0.672	0.6862	0.6376	0.6982	0.6374	0.6478	0.6522	0.6537
8	0.6446	0.6581	0.6219	0.6804	0.6521	0.6687	0.6094	0.6723	0.6085	0.6389	0.615	0.6301
9	0.6211	0.6353	0.599	0.6601	0.6408	0.62132	0.5879	0.6698	0.5831	0.6185	0.5836	0.6291
10	0.6001	0.6149	0.5823	0.642	0.635		0.5718		0.5604	0.6132	0.5727	0.6177
11	0.5812	0.5964	0.5704	0.6256	0.6323		0.5599		0.54		0.5624	
12	0.5639	0.5796		0.6106			0.5513					
13	0.548			0.5969			0.5451					
14	0.5333						0.5407					

Tabla 5.13. Datos de la relación adimensional del Área para las diversas temperaturas, velocidades y tiempos para el chile Verde.

Curva Experimental	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1.1201	1.0878	1.1421	1.003	0.9921	1.122	1.082	1.102	0.9985	1.0952	1.0771	1.1252
2	0.9945	0.951	0.9312	0.9751	0.9486	0.9889	0.9472	0.9485	0.9023	0.9772	0.9223	0.9789
3	0.9684	0.8749	0.8241	0.9454	0.9024	0.9367	0.9511	0.9199	0.8342	0.9663	0.8725	0.8294
4	0.8589	0.8161	0.738	0.8513	0.8835	0.8054	0.8273	0.9013	0.7799	0.9124	0.7904	0.7333
5	0.7645	0.7724	0.6738	0.7845	0.8192	0.7153	0.7826	0.7759	0.7114	0.7834	0.7173	0.6154
6	0.7482	0.7396	0.6274	0.7629	0.7253	0.5963	0.735	0.7034	0.6325	0.7789	0.6549	0.5168
7	0.6648	0.7278	0.5754	0.6596	0.6837	0.5592	0.6923	0.6723	0.6152	0.7314	0.5827	0.5035
8	0.6388	0.6863	0.5132	0.631	0.6852	0.5094	0.6417	0.6368	0.5548	0.6761	0.5419	0.4316
9	0.5862	0.6521	0.4568	0.5852	0.6219	0.4284	0.6095	0.5812	0.542	0.6015	0.5217	0.4225
10	0.5547	0.6382	0.4423	0.5431	0.6042		0.5941	0.5478		0.5924	0.511	0.4056
11	0.5378	0.6021	0.4226	0.5288	0.5889		0.5801	0.5631		0.5801	0.4862	
12	0.5361	0.5621		0.5606			0.5723	0.5492		0.5473		
13	0.5274			0.5453			0.5498			0.5281		
14	0.5159						0.5223			0.5094		

Tabla 5.14. Datos de la relación adimensional del modelo de color HSV plano H para las temperaturas, velocidades y tiempos usadas para el chile Amarillo.

Curva Experimental	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1.021	1.031	1.014	1.045	1.003	1.025	1.032	1.019	1.008	1.011	1.029	1.033
2	0.9462	0.942	0.9162	0.9481	0.9324	0.9791	0.9358	0.9623	0.9695	0.9315	0.9682	0.9457
3	0.8532	0.8792	0.8814	0.8516	0.8576	0.872	0.8674	0.8481	0.8721	0.9159	0.9183	0.9102
4	0.8163	0.8387	0.8197	0.7893	0.7693	0.8387	0.8401	0.8273	0.8383	0.8389	0.8198	0.8327
5	0.7189	0.7345	0.7451	0.7299	0.7224	0.7434	0.7824	0.7195	0.7631	0.7835	0.7715	0.7846
6	0.6861	0.7265	0.7021	0.7114	0.6789	0.7296	0.6932	0.7086	0.7266	0.7393	0.7223	0.7213
7	0.6434	0.6784	0.6925	0.6672	0.6392	0.712	0.6129	0.6725	0.715	0.6814	0.6566	0.6781
8	0.6298	0.647	0.6712	0.6428	0.5854	0.6912	0.5421	0.6152	0.6841	0.6298	0.6174	0.6294
9	0.6365	0.6348	0.6357	0.6322	0.5727	0.6658	0.5357	0.6069	0.6691	0.6182	0.5982	0.5695
10	0.6192	0.6317	0.6285	0.6056	0.5563		0.5275	0.5789		0.5971	0.5676	0.5108
11	0.6278	0.6235	0.6191	0.5963	0.5322		0.5163	0.5449		0.582	0.5509	0.5327
12	0.6062	0.6204		0.5901			0.505	0.5392		0.565	0.5397	
13	0.5866			0.5724			0.4995			0.5546		
14	0.5452						0.4841			0.5405		

Tabla 5.15. Datos de la relación adimensional del modelo de color HSV plano H para las temperaturas, velocidades y tiempos usadas para el chile Verde.

Curva Experimental	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1.005	1.023	1.018	1.031	1.013	1.008	1.028	1.005	1.007	1.026	1.014	1.029
2	0.9581	0.9256	0.9845	0.9589	0.9697	0.8956	0.9731	0.9398	0.9897	0.9658	0.9692	0.931
3	0.9478	0.8721	0.9065	0.9263	0.9187	0.8723	0.9227	0.9116	0.8874	0.9185	0.9419	0.8762
4	0.9233	0.8124	0.7778	0.8652	0.8931	0.7952	0.8484	0.8172	0.7132	0.8927	0.9185	0.8147
5	0.8765	0.7454	0.7152	0.7624	0.8043	0.7172	0.8123	0.7299	0.6845	0.7814	0.8163	0.7441
6	0.8114	0.6749	0.6183	0.7157	0.7179	0.6495	0.6788	0.6573	0.5617	0.7655	0.7782	0.6536
7	0.7554	0.6823	0.5654	0.6851	0.6419	0.6137	0.6665	0.5727	0.4899	0.7318	0.7498	0.5949
8	0.6932	0.663	0.5388	0.6712	0.583	0.5691	0.5184	0.5409	0.4715	0.672	0.7082	0.5716
9	0.6885	0.6187	0.5128	0.6109	0.5383	0.516	0.4961	0.5384	0.4642	0.6181	0.6857	0.5392
10	0.6584	0.5762	0.4936	0.5618	0.5023		0.4574	0.4893		0.6011	0.6274	0.5071
11	0.6491	0.5497	0.4852	0.5247	0.4784		0.4412	0.4752		0.5988	0.6128	0.4967
12	0.6289	0.5439		0.4984			0.4323	0.4536		0.5627	0.5885	
13	0.6123			0.4863			0.4279			0.5431		
14	0.5412						0.4023			0.5298		

Como se puede observar, los valores de las Tablas 5.12 a la 5.15 contienen la información obtenida al ajustar la EP con las variables de secado (temperatura absoluta, velocidad y humedad relativa del aire de secado) y el tiempo. La R^2 promedio de la Tabla 5.12 fue de 0.932, de la Tabla 5.13 de 0.941, de la Tabla 5.14 de 0.968 y de la Tabla 5.15 de 0.969., y los valores de RMSE osciló entre 0.05 y 0.03. Así mismo, se determinó que el descriptor de color se ajusta ligeramente mejor que el descriptor de forma para el chile habanero amarillo y verde.

Con esos valores de R^2 y RMSE, se confirma que las ecuaciones y la metodología que se siguió para encontrar el área y color (adimensional) se ajustan muy bien a los datos visuales experimentales.

5.5.2 Relación de la curva de secado experimental con la variable visual

En la sección anterior se mostró la forma de relacionar un descriptor visual con parámetros no visuales como lo son la temperatura, la velocidad, el tiempo y la humedad relativa del aire. Esta relación fue satisfactoria para el área (descriptor de forma) y el plano H del modelo de color HSV (descriptor de color) para el chile habanero amarillo y verde, lo que indica que estos rasgos tienen una relación con la humedad del producto.

En esta sección se explica cómo se relaciona un parámetro visual (área y color) con la humedad del producto (chile habanero). El contar con este proceso es de gran ayuda ya que la persona encargada de monitorear el proceso de secado no tendrá que hacer mediciones para conocer la humedad del producto. Para lograr esto, se relacionó las ecuaciones generales (área y color) con la humedad relativa experimental del producto, con la que se obtuvo una segunda ecuación general (para cada descriptor visual) para obtener la humedad del producto de manera automática sin la necesidad de pesar el producto.

La humedad del producto (MR) es lo que define el momento en el que se debe retirar éste del deshidratador (de charolas para este caso). La humedad se calcula dividiendo el peso del agua que contiene el producto entre el peso inicial del producto. La cantidad de agua que contiene el producto se obtiene restando el peso del producto seco al peso inicial.

El peso seco se obtiene mediante el método del horno que consiste en dejar el producto en un horno (Termo-balanza) a 110° C durante 2 a 3 h aproximadamente de tal manera que no quede alguna partícula de agua en el producto (Candelario 2016).

En las Tablas 5.16 y 5.17 se muestran los datos adimensionales de la humedad relativa experimental del producto (MR) los cuales fueron relacionados con los datos visuales de área y color de las Tablas 5.2 a la 5.5.

Tabla 5.16. Datos de la humedad del chile amarillo para diversas temperaturas y velocidades.

Curva Experimental	MR1	MR2	MR3	MR4	MR5	MR6	MR7	MR8	MR9	MR10	MR11	MR12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
Tiempo (h)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.8625	0.9104	0.8907	0.8639	0.8734	0.8619	0.8554	0.8933	0.8814	0.8698	0.8646	0.8634
3	0.7791	0.6289	0.6512	0.6863	0.6753	0.6160	0.6405	0.6910	0.5417	0.6437	0.5880	0.6228
4	0.5393	0.4743	0.4726	0.5465	0.5133	0.4248	0.4774	0.5331	0.3803	0.4929	0.4191	0.4173
5	0.4263	0.3584	0.3618	0.4376	0.3881	0.2783	0.3678	0.4070	0.2494	0.3783	0.3058	0.2637
6	0.3332	0.2587	0.2597	0.3470	0.2853	0.1732	0.2777	0.3228	0.1468	0.2959	0.2069	0.1670
7	0.2679	0.1940	0.1738	0.2666	0.2069	0.0848	0.2153	0.2499	0.0945	0.2261	0.1526	0.1016
8	0.2370	0.1448	0.1123	0.1999	0.1424	0.0523	0.1710	0.1897	0.0583	0.1839	0.1003	0.0650
9	0.1583	0.1069	0.0743	0.1566	0.0962	0.0303	0.1323	0.1427	0.0383	0.1437	0.0604	0.0458
10	0.1360	0.0846	0.0527	0.1162	0.0681		0.1028	0.0971		0.1115	0.0388	0.0327
11	0.1016	0.0627	0.0424	0.0880	0.0457		0.0788	0.0698		0.0879	0.0288	
12	0.0597	0.0582		0.0605			0.0598	0.0515		0.0693		
13	0.0477			0.0480			0.0446			0.0547		
14	0.0374						0.0328			0.0432		

Tabla 5.17. Datos de la humedad del chile verde para diversas temperaturas y velocidades.

Curva Experimental	MR1	MR2	MR3	MR4	MR5	MR6	MR7	MR8	MR9	MR10	MR11	MR12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.8968	0.9122	0.9060	0.9130	0.9232	0.9129	0.9335	0.9052	0.9184	0.8986	0.9044	0.9002
3	0.7086	0.7019	0.6129	0.7412	0.6942	0.5788	0.7043	0.6338	0.6706	0.6977	0.6483	0.6642
4	0.5425	0.5098	0.3976	0.5632	0.5249	0.4178	0.5622	0.4640	0.5108	0.5550	0.5202	0.4842
5	0.4115	0.3733	0.2490	0.4405	0.3964	0.2775	0.4512	0.3455	0.3705	0.4434	0.4082	0.3717
6	0.3128	0.2710	0.1319	0.3319	0.3098	0.1621	0.3737	0.2513	0.2567	0.3578	0.3126	0.2620
7	0.2360	0.1962	0.0847	0.2583	0.2339	0.0837	0.2862	0.1992	0.1556	0.2936	0.2389	0.1778
8	0.1744	0.1318	0.0543	0.2034	0.1661	0.05612	0.2230	0.1489	0.0726	0.2365	0.1701	0.1041
9	0.1324	0.0893	0.0492	0.1551	0.1104	0.0364	0.1795	0.1055	0.0374	0.1926	0.1115	0.0531
10	0.0938	0.0607	0.0427	0.1156	0.0606		0.1421	0.0683		0.1520	0.0672	0.0364
11	0.0679	0.0389	0.0375	0.0827	0.0463		0.1113	0.0423		0.1167	0.0370	
12	0.0491	0.0342		0.0578			0.0727	0.0382		0.0668		
13	0.0424			0.0486			0.0572			0.0488		
14	0.0385						0.0467			0.0356		

Una vez obtenidos los datos iniciales se realizó la relación de MR-Datos Visuales mediante una regresión no lineal con el software SPSS 23.0, para determinar las constantes empíricas. En este caso se usó de igual forma el coeficiente de determinación de mínimos cuadrados R^2 mostrado en la Ecuación 6.4., como criterio para la evaluación de los ajustes realizados.

De acuerdo con el comportamiento que presentaron los datos de MR, se usó una ecuación polinomial (Ecuación 5.23) para ajustar los datos visuales con la MR (López 2009).

$$MR = \varphi_0 + \varphi_1 * DV + \varphi_2 * DV^2 + \varphi_3 * DV^3 \quad (5.23)$$

donde MR es la humedad relativa del producto y DV son los datos visuales (área y color).

En las Tablas 5.18 y 5.19 se muestran los valores de las constantes empíricas de la ecuación polinomial (Ecuación 5.23) obtenidas mediante la relación de MR-DV.

Tabla 5.18. Valores de las constantes empíricas de la ecuación polinomial para la relación MR-Área del chile amarillo y verde.

Color del chile	Constantes	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
Amarillo	φ_0	-9.352	-12.36	11.58	0.707	0.97	-1.689	-1.48	1.613	-1.817	-0.627	1.939	1.219
	φ_1	32.84	43.44	-46.00	-4.033	-6.21	5.249	6.181	-7.445	6.43	2.434	-7.442	31.271
	φ_2	-37.86	-50.74	58.38	6.196	10.91	-6.969	-8.667	9.997	-7.97	-3.799	8.286	7.911
	φ_3	15.86	20.68	-22.94	-1.868	-4.668	4.426	5.008	-3.168	4.386	3.014	-1.742	-15.88
	R^2	0.995	0.992	0.978	0.996	0.997	0.996	9.83	0.996	0.993	0.989	0.989	0.954
Verde	φ_0	-2.94	-6.395	-1.282	0.869	-2.29	8.754	-4.638	-7.624	2.755	-8.119	1.939	-1.461
	φ_1	12.10	25.52	8.578	-4.103	9.109	-33.75	17.90	32.15	-13.73	33.11	-7.442	6.007
	φ_2	-16.69	-34.52	-11.13	5.616	-12.62	41.17	-22.90	-44.94	21.03	-44.54	8.286	-7.254
	φ_3	8.466	16.43	6.807	-1.368	6.621	-15.15	10.64	21.44	-9.038	20.52	-1.742	3.701
	R^2	0.991	0.979	0.983	0.995	0.995	0.993	9.83	0.971	0.985	0.987	0.985	0.995

Tabla 5.19. Valores de las constantes empíricas de la ecuación polinomial para la relación MR-Color del chile amarillo y verde.

Color del chile	Constantes	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
Amarillo	φ_0	-11.39	-12.36	40.09	-0.427	0.97	-2.785	-1.48	1.613	-8.509	-1.817	-0.618	1.931
	φ_1	40.01	43.44	-149.9	-0.036	-6.21	9.059	6.181	-7.445	34.37	6.43	2.321	-7.442
	φ_2	-46.21	-50.74	182.8	1.516	10.91	-11.35	-8.667	9.997	-46.78	-7.97	-3.57	8.286
	φ_3	18.59	20.68	-71.98	-0.056	-4.668	6.101	5.008	-3.168	21.94	4.386	2.89	-1.742
	R^2	0.987	0.992	0.99	0.992	0.997	0.996	0.983	0.996	0.995	0.993	0.989	0.989
Verde	φ_0	-3.421	-17.95	-14.82	8.639	-22.91	-4.744	-3.284	17.24	12.45	-8.962	21.79	-1.987
	φ_1	7.147	5.261	15.78	4.326	9.942	-3.821	-1.972	15.78	-3.873	13.11	-7.421	14.58
	φ_2	-6.912	-22.29	20.38	-4.186	-2.612	17.75	-2.914	4.195	21.83	-3.544	18.86	-7.458
	φ_3	9.563	-6.387	8.617	-14.63	14.61	-5.185	10.04	-18.45	19.38	-2.052	-11.72	13.21
	R^2	0.991	0.997	0.993	0.995	0.992	0.991	9.991	0.997	0.995	0.997	0.993	0.995

Como se puede observar en las Tablas 5.18 a la 5.19 la relación de la MR con los DV y que cuentan con una R^2 superior a 0.990 lo cual indica que la Ecuación 5.23 se ajustó muy bien para los chiles amarillo y verde en todas las pruebas.

5.5.3 Ajuste de las constantes empíricas resultantes de la relación MR-DV (área y color)

Después de obtener la relación MR-DV se obtuvieron las constantes empíricas φ_0 , φ_1 , φ_2 y φ_3 que están relacionadas con la velocidad y temperatura de secado. La relación se llevó a cabo mediante la Ecuación 5.24.

$$\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 = \beta_0 + \beta_1 * vel + \beta_2 * vel^{\beta_3} + \beta_4 * T \quad (5.24)$$

donde β_0 , β_1 , β_2 y β_3 son constantes de la relación MR-DV, vel es la velocidad del aire de secado y T es la temperatura del aire de secado.

En las Tablas 5.20 y 5.21 se muestran los valores de los parámetros de la Ecuación 5.23 obtenidos mediante la relación de la Ecuación 5.23.

Tabla 5.20. Valores de los parámetros de la ecuación tipo polinomial para la MR del área, para el chile amarillo.

Color del chile	Constantes	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	R^2
Amarillo	φ_0	-260.786	10.831	5.696	0.25	0.744	0.936
	φ_1	-8325.317	-206.139	9464.934	0.027	-2.84	0.915
	φ_2	8044.12	200.965	-9368.018	0.026	3.415	0.945
	φ_3	-3058.035	-63.294	3564.17	0.021	-1.342	0.947
Verde	φ_0	-18.558	-9.983	-7.44	-127.645	0.549	0.916
	φ_1	469.027	-6013.78	5683.313	-123.044	-2.298	0.887
	φ_2	-96.769	-51.783	-40.432	-133.259	3.058	0.924
	φ_3	271.337	6720.317	-2911.267	-137.853	-1.298	0.895

Tabla 5.21. Valores de los parámetros de la ecuación tipo polinomial para la MR del color, para el chile amarillo.

Color del chile	Constantes	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	R^2
Amarillo	φ_0	88.347	964.485	-110.335	0.902	1.146	0.969
	φ_1	5364.473	-295.947	-4862.305	0.993	-4.162	0.961
	φ_2	-8310.297	373.616	7699.145	0.740	4.857	0.944
	φ_3	185.270	-798.385	-4073.455	0.951	-1.840	0.953
Verde	φ_0	5492.660	-77.480	-5425.675	0.276	0.520	0.924
	φ_1	1227.869	110.625	1329.175	0.111	-2.427	0.881
	φ_2	-2128.051	28.872	-0.091	0.261	4.751	0.936
	φ_3	-3277.560	24.945	3344.900	0.115	-0.828	0.888

Como se puede observar en las Tablas 5.20 y 5.21 la relación de la velocidad y la temperatura cuentan con un R^2 superior a 0.880 para cuatro de las constantes y el resto tiene un valor mayor a 0.910, lo que indica que se realizó un buen ajuste, ya que la literatura marca que el valor mínimo de R^2 para considerarse aceptable el ajuste debe de ser mayor 0.850.

En las Figuras 5.26 a la 5.29 se muestra la comparación de los datos experimentales de la MR para una temperatura de 50° a 1 m/s de velocidad de aire con los datos obtenidos de las ecuaciones.

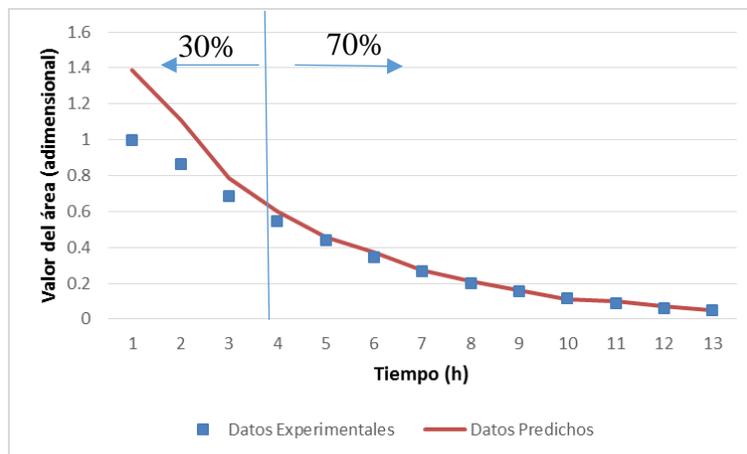


Figura 5.26. Comparación de los datos experimentales y los datos calculados (área) para la MR del chile amarillo.

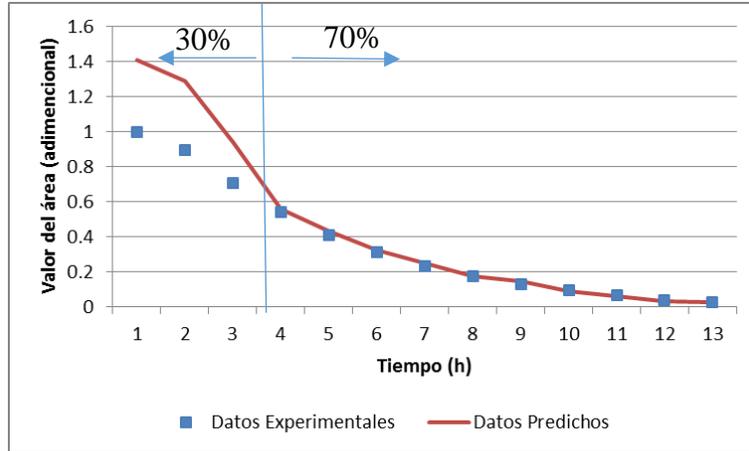


Figura 5.27. Comparación de los datos experimentales y los datos calculados (área) para la MR del chile verde.

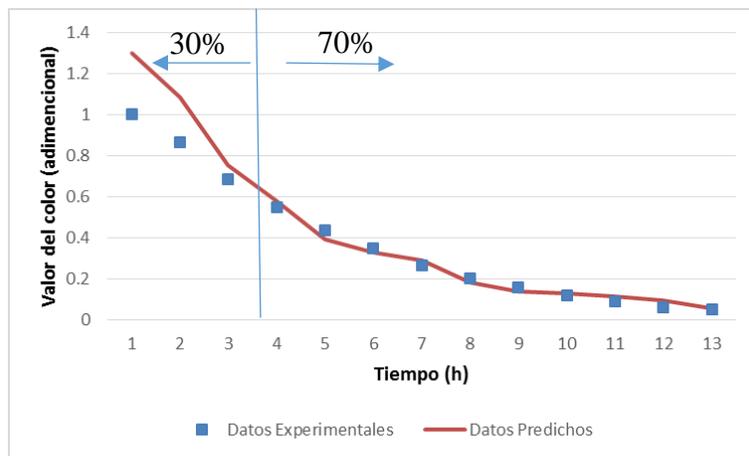


Figura 5.28. Comparación de los datos experimentales y los datos calculados (color) para la MR del chile amarillo.

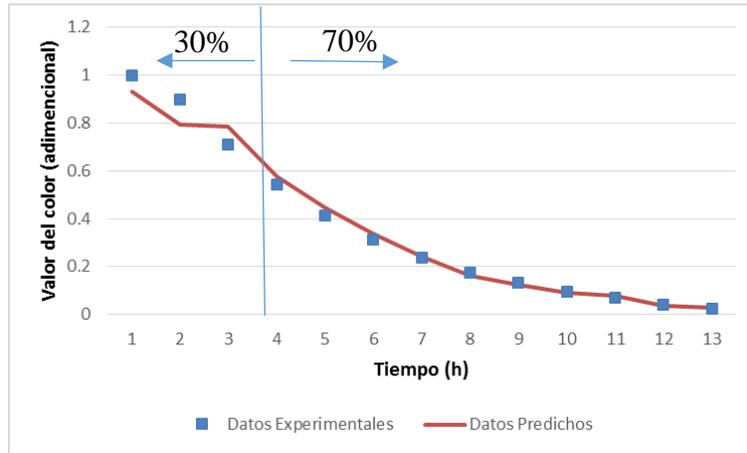


Figura 5.29. Comparación de los datos experimentales y los datos calculados (color) para la MR del chile verde.

En la comparación de los datos experimentales de MR con los datos predichos se observó que el ajuste correcto comienza después de que ha pasado un 30% aproximadamente del tiempo total de secado, que es cuando el producto ha perdido cerca del 35% de humedad. La ecuación no logró estimar la humedad del producto antes del 30% debido quizás a los cambios que tiene en su color durante este lapso, y requiere de más tiempo para estabilizarse y cambiar de una manera más uniforme.

En el último proceso de ajuste, las constantes empíricas de la relación MR-DV quedaron en función de la temperatura y velocidad del aire de secado, y el valor de estas constantes se muestra en las Ecuaciones 5.25 a la 5.40.

Valores de las constantes empíricas para la ecuación general de Área del chile amarillo.

$$\varphi_0 = -260.786 + 10.831 * vel + 5.696 * vel^{0.25} + 0.744 * T \quad (5.25)$$

$$\varphi_1 = -8325.317 + -206.139 * vel + 9464.934 * vel^{\beta_{0.0273}} + 3.415 * T \quad (5.26)$$

$$\varphi_2 = 8044.12 + 200.965 * vel + -9368.018 * vel^{0.026} + 3.415 * T \quad (5.27)$$

$$\varphi_3 = -3058.035 + -63.294 * vel + 3564.17 * vel^{0.021} + -1.342 * T \quad (5.28)$$

Valores de las constantes empíricas para la ecuación general de Área del chile verde.

$$\varphi_0 = -18.558 + -9.983 * vel + -7.44 * vel^{-127.645} + 0.549 * T \quad (5.29)$$

$$\varphi_1 = 469.027 + -6013.78 * vel + 5683.313 * vel^{-123.044} + -2.298 * T \quad (5.30)$$

$$\varphi_2 = -96.769 + -51.783 * vel + -40.432 * vel^{-133.259} + 3.058 * T \quad (5.31)$$

$$\varphi_3 = 271.337 + 6720.317 * vel + -2911.267 * vel^{-137.853} + -1.298 * T \quad (5.32)$$

Valores de las constantes empíricas para la ecuación general de Color del chile amarillo.

$$\varphi_0 = 88.347 + 964.485 * vel + -110.335 * vel^{0.902} + 1.146 * T \quad (5.33)$$

$$\varphi_1 = 5364.473 + -295.947 * vel + -4862.305 * vel^{0.993} + -4.162 * T \quad (5.34)$$

$$\varphi_2 = -8310.297 + 373.616 * vel + 7699.145 * vel^{0.740} + 4.857 * T \quad (5.35)$$

$$\varphi_3 = 185.270 + -798.385 * vel + -4073.455 * vel^{0.951} + -1.840 * T \quad (5.36)$$

Valores de las constantes empíricas para la ecuación general de Color del chile verde.

$$\varphi_{0,} = 5492.660 + -77.480 * vel + -5425.675 * vel^{0.276} + 0.520 * T \quad (5.37)$$

$$\varphi_1 = 1227.869 + 110.625 * vel + 1329.175 * vel^{0.111} + -2.427 * T \quad (5.38)$$

$$\varphi_2 = -2128.051 + 28.872 * vel + -0.091 * vel^{0.261} + 4.751 * T \quad (5.39)$$

$$\varphi_3 = -3277.560 + 24.945 * vel + 3344.900 * vel^{0.115} + -0.828 * T \quad (5.40)$$

donde φ_0 , φ_1 , φ_2 y φ_3 son constantes de la relación MR-DV, vel es la velocidad del aire de secado y T es la temperatura absoluta del aire de secado.

En las Tablas 5.22 a la 5.25 se muestran los valores obtenidos a partir de la ecuación general para la humedad del producto, así como la R^2 (que se calculó usando la Ecuación 5.4) resultante de la comparación de los datos experimentales con los datos arrojados de la ecuación.

Tabla 5.22. Datos arrojados por la ecuación general (área) para la MR del chile amarillo.

Curva Experimental	MR1	M ²	M ^{R3}	MR4	MR5	MR6	MR7	MR8	MR9	MR10	MR11	MR12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1.3707	1.3707	1.3157	1.3857	1.2257	0.9557	1.3107	1.3857	1.0907	1.3207	1.3457	1.2207
2	1.114	1.1383	1.0367	1.1092	0.9950	0.7633	1.096	1.0544	0.9136	1.1063	1.0613	1.0683
3	0.9760	0.7660	0.9088	0.7857	0.7522	0.5237	0.7067	0.7913	0.6156	0.7667	0.6215	0.7275
4	0.7540	0.4958	0.5975	0.6020	0.5690	0.4468	0.4986	0.5615	0.4248	0.5586	0.4699	0.4557
5	0.4683	0.3768	0.4573	0.4587	0.3081	0.3485	0.4097	0.4103	0.2372	0.4197	0.3596	0.3256
6	0.3773	0.28628	0.291	0.3717	0.2325	0.1825	0.3036	0.3632	0.1838	0.3136	0.2635	0.1859
7	0.2999	0.24416	0.1919	0.2736	0.1973	0.1088	0.2002	0.2476	0.0856	0.2102	0.1835	0.1115
8	0.2577	0.17416	0.1391	0.2116	0.1165	0.0507	0.1252	0.1523	0.0541	0.1352	0.1295	0.0583
9	0.1996	0.13935	0.0571	0.161	0.0907	0.0334	0.0958	0.1287	0.0392	0.1052	0.0795	0.0560
10	0.1286	0.09944	0.0520	0.1128	0.0810		0.0884	0.0996		0.0989	0.0552	0.0306
11	0.1148	0.0559	0.0419	0.0976	0.0461		0.0733	0.0626		0.0833	0.0325	
12	0.0842	0.04829		0.0725			0.0562	0.0499		0.0655		
13	0.0525			0.0474			0.0461			0.0561		
14	0.0392						0.0340			0.0440		
R ²	0.961	0.953	0.943	0.975	0.982	0.971	0.961	0.987	0.955	0.974	0.942	0.955
RMSE 1	0.32	0.33	0.32	0.29	0.29	0.30	0.31	0.30	0.33	0.31	0.31	0.32
RMSE 2	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04

Tabla 5.23. Datos arrojados por la ecuación general (área) para la MR del chile verde.

Curva Experimental	MR1	MR2	MR3	MR4	MR5	MR6	MR7	MR8	MR9	MR10	MR11	MR12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C	50			55			60			60		
Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1.3957	1.3607	1.3957	1.4075	1.1237	1.2892	1.3528	1.313	1.1957	1.3957	1.3607	1.3957
2	1.0376	1.1622	0.9511	1.2891	0.9705	1.1270	1.0382	1.0692	0.9671	1.0376	1.1622	0.9511
3	0.7497	0.6154	0.6771	0.9432	0.8605	0.6688	0.8720	0.8364	0.5587	0.7497	0.6154	0.6771
4	0.5350	0.4614	0.5275	0.5608	0.5381	0.4909	0.4921	0.5662	0.3710	0.5350	0.4611	0.5275
5	0.4189	0.3697	0.3940	0.4305	0.3604	0.2808	0.3630	0.4311	0.2864	0.4189	0.3697	0.3940
6	0.3506	0.2204	0.2753	0.3266	0.3030	0.1806	0.2850	0.3182	0.1551	0.3506	0.2204	0.2753
7	0.3240	0.1529	0.1618	0.2498	0.2166	0.0318	0.2502	0.2658	0.1134	0.3240	0.1525	0.1618
8	0.2545	0.1140	0.0647	0.1746	0.1580	0.0249	0.1947	0.1741	0.0558	0.2545	0.1145	0.0647
9	0.2159	0.0666	0.0456	0.1499	0.0951	0.0194	0.1353	0.1025	0.0267	0.2159	0.0666	0.0452
10	0.1519	0.0365	0.0372	0.0935	0.0680		0.1171	0.0683		0.1919	0.0365	0.0305
11	0.1162	0.0346	0.0305	0.0624	0.0449		0.0801	0.0451		0.1662	0.0316	
12	0.0743	0.0316		0.0321			0.0614	0.0251		0.1143		
13	0.0523			0.0290			0.0324			0.0923		
14	0.0381						0.0297			0.0719		
R^2	0.974	0.965	0.947	0.978	0.952	0.983	0.954	0.979	0.956	0.981	0.948	0.949
RMSE 1	0.34	0.38	0.32	0.25	0.29	0.30	0.33	0.31	0.26	0.28	0.30	0.33
RMSE 2	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04

Tabla 5.24. Datos arrojados por la ecuación general (color) para la MR del chile amarillo.

Curva Experimental	MR1	MR2	MR3	MR4	MR5	MR6	MR7	MR8	MR9	MR10	MR11	MR12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1.2163	1.3958	1.3858	1.3008	1.2046	1.1685	1.3035	1.4035	1.0958	1.5008	1.3408	1.3867
2	1.2357	1.1634	1.1068	1.0842	0.9739	0.7778	1.0891	1.0719	0.9187	1.1824	1.1564	0.9618
3	0.8965	0.8911	0.8789	0.7508	0.7317	0.6376	0.7492	0.8087	0.6240	0.9320	0.7638	0.6851
4	0.6070	0.5709	0.5268	0.5770	0.5476	0.4500	0.5407	0.5785	0.4299	0.6316	0.4150	0.5195
5	0.4400	0.3919	0.3727	0.3938	0.3266	0.2791	0.4016	0.4272	0.2423	0.3949	0.3247	0.3951
6	0.3823	0.2713	0.2532	0.3268	0.2969	0.2124	0.3085	0.3802	0.1889	0.2777	0.2458	0.2603
7	0.2843	0.2292	0.1930	0.2886	0.1866	0.1304	0.2028	0.2649	0.0946	0.2460	0.1972	0.1538
8	0.2419	0.1522	0.1292	0.1833	0.1552	0.0751	0.1625	0.1703	0.0592	0.1591	0.1146	0.0632
9	0.1582	0.1121	0.0872	0.1395	0.0823	0.0320	0.1183	0.1469	0.0380	0.1390	0.0715	0.0472
10	0.1375	0.0921	0.0773	0.1267	0.0694		0.1108	0.0960		0.1242	0.0437	0.0311
11	0.1170	0.0610	0.0411	0.1131	0.0448		0.0814	0.0453		0.0985	0.0271	
12	0.0623	0.0584		0.0948			0.0699	0.0367		0.0801		
13	0.0544			0.0547			0.0460			0.0584		
14	0.0349						0.0394			0.0415		
R^2	0.978	0.959	0.978	0.987	0.978	0.989	0.984	0.989	0.986	0.991	0.988	0.989
RMSE 1	0.29	0.25	0.33	0.26	0.27	0.29	0.32	0.30	0.31	0.32	0.34	0.29
RMSE 2	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03

Tabla 5.25. Datos arrojados por la ecuación general (color) para la MR del chile verde.

Curva Experimental	MR1	MR2	MR3	MR4	MR5	MR6	MR7	MR8	MR9	MR10	MR11	MR12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	0.6928	0.6558	0.7458	0.9308	1.0958	0.9758	0.7578	0.8238	0.7038	0.8508	0.7598	0.7958
2	0.6295	0.6413	0.5541	0.7916	0.7579	0.8934	0.6451	0.7448	0.5323	0.7304	0.6454	0.7143
3	0.6786	0.6375	0.4895	0.7836	0.6190	0.4275	0.6008	0.6312	0.4738	0.6532	0.5350	0.5642
4	0.5632	0.5328	0.4723	0.5751	0.4980	0.2927	0.4599	0.5826	0.2988	0.5478	0.3788	0.3255
5	0.4958	0.4316	0.3404	0.4475	0.3763	0.2408	0.3440	0.4474	0.2137	0.5087	0.3165	0.2846
6	0.3863	0.3541	0.2342	0.3391	0.2438	0.1771	0.2948	0.3501	0.1791	0.3531	0.2186	0.1788
7	0.2768	0.2265	0.2001	0.2399	0.2271	0.1047	0.2331	0.2759	0.1235	0.3345	0.1570	0.1194
8	0.2295	0.1596	0.1438	0.1607	0.1580	0.0730	0.1820	0.2165	0.0888	0.1515	0.1170	0.0648
9	0.1965	0.0854	0.0712	0.1228	0.0911	0.0395	0.1493	0.1661	0.0348	0.1480	0.0789	0.0590
10	0.1275	0.0665	0.0621	0.0890	0.0630		0.1027	0.1193		0.0886	0.0406	0.0382
11	0.1113	0.0380	0.0356	0.0790	0.0456		0.0927	0.0848		0.1039	0.0306	
12	0.0791	0.0321		0.0352			0.0625	0.0327		0.1249		
13	0.0518			0.0286			0.0439			0.0433		
14	0.0369						0.0313			0.0424		
R^2	0.965	0.959	0.965	0.971	0.957	0.949	0.956	0.969	0.964	0.971	0.958	0.960
RMSE 1	0.29	0.30	0.31	0.28	0.31	0.31	0.30	0.28	0.30	0.29	0.30	0.31
RMSE 2	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04

Como se puede observar en las Tablas 5.22 a la 5.25, la R^2 promedio de la efectividad de la ecuación general es de 0.968 para todas las temperaturas y velocidades usadas en la investigación e incluyen los colores de madures verde y amarillo. Para este paso, se usaron la RMSE 1 y RMSE 2, la RMSE 1 se obtuvo al tomar el 100% de los valores de la MR calcula, mientras que el RMSE 2 se obtuvo tomando solo el 70% de los valores finales, esto con lograr conocer la incertidumbre que tiene la ecuación si se desea analizar todo el proceso, cuyo valor está entre 0.25 y 0.38, mientras que el valor para el 70% del proceso, que es el lapso que mejor describe la ecuación, la incertidumbre baja a los valores de entre 0.05 y 0.03.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este Capítulo se presentan las conclusiones más relevantes del presente trabajo y se proponen algunas recomendaciones para mejorar y realizar trabajos futuros relacionados con el proceso de secado de chile habanero.

6.1 Conclusiones

- Se realizaron pruebas usando un total de 12 planos de color provenientes de los modelos *RGB*, *CIE Lab*, *HSV* y *HSI*; 6 descriptores de forma que fueron Compacidad, Elongación, Eje Mayor, Eje Menor, Área y Perímetro; y se probaron 5 descriptores de textura Energía, Entropía, Contraste, Probabilidad Máxima y Homogeneidad Local, con esto se cumple el alcance de usar al menos 6 descriptores visuales. Siendo el plano *H* del modelo de color *HSV* el que mejor relación tiene con la humedad del producto y el descriptor de forma Área, es que segundo mejor descriptor para estimar la humedad del producto durante el proceso de deshidratado.
- La primera aproximación a esta metodología fue hecha con valores originales de los descriptores visuales (datos extraídos directamente de la imagen); sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios, ya que se encontraban influenciados por las diferencias de tonos y tamaños (ejemplo los valores del área oscilan entre 1890 a 520 pixeles y para el color dependen del modelo con el que se trabaje) que se trabajaron en las diversas imágenes tomadas de los chiles. El problema fue resuelto adimensionalizando (dividiendo todos los datos entre el dato de mayor valor que por lo general se encuentra al inicio de proceso de secado) los datos para obtener el porcentaje de decremento o incremento de los mismos dependiendo el descriptor visual analizado.

- El programa de adquisición y procesamiento de imagen, tiene la capacidad de funcionar y proporcionar información en tiempo real realizando las adaptaciones correspondientes y tiene la robustez para trabajar bajo condiciones de luz variable dentro de un espacio cerrado.
- Para cada ajuste hecho en la metodología, inicialmente se evaluaron diversas ecuaciones del tipo Arrhenius y Polinomial reportados por [Díaz 2009, Martínez 2009] que no lograron un buen ajuste ya que su R^2 fue menor al 0.850. Analizando la revisión bibliográfica se probaron y evaluaron los tres modelos característicos de secado (Page, Page Modificado y EP) estudiados que mejor se ajustan al proceso de secado del chile habanero. Se encontró que con la EP se obtienen los mejores resultados, bajo las condiciones en las que se realizaron las pruebas en este trabajo.
- El plano H y el área son parámetros visuales que están estrechamente relacionados con la temperatura, velocidad y humedad relativa del aire. En este apartado se formalizó dicha relación logrando una ecuación general para cada descriptor y cada color de madurez del chile para obtener la humedad del producto mediante las variables antes mencionadas.
- Para las condiciones en las que se realizaron las pruebas experimentales de este trabajo, la información obtenida de los descriptores de textura usados no tiene una relación cercana con los parámetros de secado del chile habanero.
- Se encontró una relación estrecha entre los parámetros del área y el plano H con la humedad relativa del producto, sin tener variaciones significativas ante las diferentes condiciones de secado (temperatura, velocidad y tiempo de secado).
- Las ecuaciones generales tienen una efectividad promedio de R^2 del 0.963 y un RMSE de 0.03, esto indica la estrecha relación que existe entre el parámetro visual en particular el plano H del modelo de color HSV , las variables de secado y la humedad

relativa del producto. Dado que las ecuaciones y sus ajustes realizados en este trabajo si se relacionaron con la humedad del producto, se da por alcanzado el objetivo propuesto.

- La EP puede predecir el contenido de humedad una vez que durante el proceso de deshidratado tenga el producto contenga un aproximado de 70% de humedad, es en este punto cuando la EP sirve de apoyo para conocer el contenido de agua de las muestras.
- Las ecuaciones generales de cada área y color para el chile amarillo y verde tuvieron valores altos de R^2 , sin embargo, debido al comportamiento observado de los datos de estos descriptores y a los valores encontrados usando la ecuación general se recomienda usar el descriptor de color para determinar la humedad del producto, ya que de igual forma se ve menos influenciado por algún cambio en la posición de las muestras, es debido a que el producto tiende a cambiar de color de manera muy uniforme en toda su superficie.

6.2 Trabajo futuro

- Se recomienda realizar pruebas de deshidratado de chile habanero y poner en marcha el programa para realizar las correcciones necesarias que demande el uso en tiempo real.
- Diseñar un equipo que use la información proporcionada por el programa con el fin de detener el proceso de deshidratado de forma automática al llegar al nivel de humedad en el producto deseado.
- Realizar pruebas de deshidratado de chile habanero en un secador tipo túnel para comprobar si el programa puede acoplarse a este tipo de secado.
- Realizar estudios del comportamiento de los descriptores visuales durante el proceso de deshidratado de otros alimentos, siguiendo la metodología descrita en este trabajo.
- Realizar pruebas de deshidratado del chile habanero con el método de cama gruesa para comprobar la compatibilidad de este trabajo en la predicción de la humedad del producto.

REFERENCIAS

- Akpinar, Ebru Kavak, Yasar Bicer, and Cengiz Yildiz. 2003. "Thin Layer Drying of Red Pepper." *Journal of Food Engineering* 59 (1): 99–104.
- Arora, Sadhna, Shelly Bharti, y Sehgal V. K. 2006. "Convective Drying Kinetics of Red Chillies." *Drying Technology* 24 (2): 189–93.
- Arslan, D., y Özcan M. M. 2011. "Dehydration of Red Bell-Pepper (*Capsicum Annum L.*): Change in Drying Behavior, Colour and Antioxidant Content." *Food and Bioprocess Technology* 89 (4). Institution of Chemical Engineers: 504–13.
- Avellaneda, Diana Avellaneda. 2009. "Caracterización de Texturas Naturales." *Caracterización de Texturas Naturales*. Centro Nacional de Investigación Y Desarrollo Tecnológico. Tesis de maestría.
- Ballesteros, Jordi Delcor. 2006. "Descripción, Indexación, Búsqueda Y Adquisición de Secuencia de Video Mediante Descriptores MPEG-7." *Universidad UPC*, 102.
- Bingol, Gokhan, John S. Roberts, Murat O. Balaban, y Onur Devres Y. 2012. "Effect of Dipping Temperature and Dipping Time on Drying Rate and Color Change of Grapes." *Drying Technology* 30 (6): 597–606.
- Chen, Yougui, y Alex Martynenko. 2013. "Computer Vision for Real-Time Measurements of Shrinkage and Color Changes in Blueberry Convective Drying." *Drying Technology* 31 (10): 1114–23.
- Colom, RJ, Rafael Gadea, Ángel Sebastiá, Marcos Martínez. 2001a. "Transformada Discreta Wavelet 2-D Para Procesamiento de Video En Tiempo Real." *XII Jornadas de Paralelismo*, 1–6.
- Cruz, Ana Catarina, Raquel P. F. Guiné, y João Carlos Gonçalves. 2014. "Drying Kinetics and Product Quality for Convective Drying of Apples (cvs. Golden Delicious and Granny Smith)." *International Journal of Fruit Science* 15 (1): 54–78.
- Díaz, Felipe. 2009. "Estudio Del Proceso de Secado de Nopal En Una Columna de Charolas." Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Tesis de maestría.
- Erbay, Zafer, and Filiz Icier. 2010. "A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 50 (5): 441–64.
- Gamino, A. 2002. "Operaciones Morfológicas Rápidas Por Descomposición Del Elemento de Estructura Mediante Discos." CINVESTAV-IPN. Tesis de maestría.
- Gil, Alicia. 2016. "Estudio Teórico-Experimental Del Proceso de Secado Del Chile Habanero." Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Tesis de maestría.
- Gonzalo, G. 2003. "Tratamiento de Imágenes Por Computadora." *Instituto de Investigaciones Eléctricas*, Reporte de maestría pp.11.

- Guiné, Raquel P F, y Maria João Barroca. 2012. "Effect of Drying Treatments on Texture and Color of Vegetables (pumpkin and Green Pepper)." *Food and Bioproducts Processing* 90 (1). Institution of Chemical Engineers: 58–63.
- Hemis, M., a. Bettahar, Singh C. B., Bruneau D., y Jayas D. S. 2009. "An Experimental Study of Wheat Drying in Thin Layer and Mathematical Simulation of a Fixed-Bed Convective Dryer." *Drying Technology* 27 (10): 1142–51.
- Hossain, M. a., y Bala B. K. 2002. "Thin-Layer Drying Characteristics for Green Chilli." *Drying Technology* 20 (2): 489–505.
- INAH, Instituto Nacional de Antropología e Historia. 2013. "Chiles Y Salsas En México. Un Sabor a Identidad." Reporte. <http://www.inah.gov.mx/reportajes/6627-chiles-y-salsas-en-mexico-un-sabor-a-identidad>.
- Kaleemullah, S., y Kailappan R. 2006. "Modelling of Thin-Layer Drying Kinetics of Red Chillies." *Journal of Food Engineering* 76 (4): 531–37.
- Kim Suna, Lee Ki Won, Park Jaebok, Lee Hyong J., Hwang, y In K. 2006. "Effect of Drying in Antioxidant Activity and Changes of Ascorbic Acid and Colour by Different Drying and Storage in Korean Red Pepper (*Capsicum Annuum*, L.)." *International Journal of Food Science and Technology* 41 (SUPPL. 1): 90–95.
- Krokida, M. K., Karathanos V. T., Maroulis Z. B., y Marinos-Kouris D. 2003. "Drying Kinetics of Some Vegetables." *Journal of Food Engineering* 59 (4): 391–403.
- Kucuk, Haydar, Adnan Midilli, Aydin Kilic, y Ibrahim Dincer. 2014. "A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations." *Drying Technology* 32 (7): 757–73.
- López, Cinthya. 2009. "Visión Artificial Para La Obtención de Un Modelo Experimental de Deshidratado Del Nopal." Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Tesis de Maestría.
- Medina Lara, F., Echevarría Machado I., Pacheco Arjona R., Ruiz Lau N., Guzmán Antonio y Mar tínez Estévez M. 2008. "Influence of Nitrogen and Potassium Fertilization on Fruiting and Capsicum Content in Habanero Pepper (*Capsicum Chinense* Jacq.)." *HortScience* 1: 1549–54.
- Mendoza, Fernando, Petr Dejmek, y José M. Aguilera. 2006. "Calibrated Color Measurements of Agricultural Foods Using Image Analysis." *Postharvest Biology and Technology* 41 (3): 285–95.
- Mendoza M. J., Martínez S. G., Alcántara G. M., y López O. M. 2006. "Modelos Aplicados Al Proceso de Secado Del Chile Poblano'." *VII Congreso Nacional de Ciencia de Los Alimentos. Guanajuato, México*.
- Mendoza, Salcedo, Mercado B., José L., Vanegas B., Fernández Q., Vertel M., y Melba L. 2014. Drying Kinetics of Cassava (*Manihot Esculenta* Crantz) Variety Corpoica M-Tai Depending on the Temperature and Air Velocity Cinética Da Secagem Da Mandioca (*Manihot*." *Universidad Industrial de Santander*, 15.

- Mery D. 2006. "Extracción de Características." Primer congreso internacional del *Departamento de Ciencia de La Computación. Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile.*, 27.
- Quin J., Burks T. F., Gwan K., Dae M., y Bulanon D.; 2008. "Classification of Citrus Peel Diseases Using Color Texture Feature Analysis." *IV Food Processing Automation Conference. ASABE Publication. Estados Unidos de América.*, 21.
- SAGARPA. 2012. "Secretaria de Agricultura, Ganaduría, Desarrollo Rural, Pesca Y Alimentación. MÉXICO, POTENCIA PRODUCTORA DE CHILE." <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/yucatan/Boletines/Paginas/201208B058.aspx#>.
- Sarría, Alfonso Fernández. 2007. "Estudio De Técnicas Basadas En La Transformada Wavelet Y Optimización De Sus Parametros Para La Clasificación Por Texturas De Imágenes Digitales." Universidad Politecnica de Valencia. Tesis doctoral.
- Shahabi, Mohammad, Shahin Rafiee, Seyed Saeid Mohtasebi, y Soleiman Hosseinpour. 2013. "Image Analysis and Green Tea Color Change Kinetics during Thin-Layer Drying." *Food Science and Technology International = Ciencia Y Tecnologia de Los Alimentos Internacional*.
- Simá, M. Efraín. 2009. "Estudio Teórico-Experimental de Un Prototipo de Secador Solar Industrial." *Centro Nacional de Investigación Y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)*. Tesis doctoral.
- Singh, R. Paul. 2001. *Introducción a La Ingeniería de Los Alimentos*. Segunda Ed. Zaragoza, España: Acribia, S.A.
- Soria, F. M., Trejo A., Tun J., Saldívar R. 2002. "Paquete Tecnológico Para La Producción de Chile Habanero (Capsi - Cum Chinense Jacq.)." *Instituto Tecnológico Agropecuario de Conkal, Yucatán. Secretaría de Educación Pública.*, pp 1-21.
- Swain, Sachidananda, D.V.K. Samuel, Lalit M. Bal, y Abhijit Kar. 2014. "Thermal Kinetics of Colour Degradation of Yellow Sweet Pepper (Capsicum Annum L.) Undergoing Microwave Assisted Convective Drying." *International Journal of Food Properties* 17 (9): 1946–64.
- Vega, Antonio A., y Roberto A. Lemus. 2011. "Modelado de La Cinetica de Secado de La Papaya Chilena (vasconcellea Pubescens)." *Informacion Tecnologica* 17 (3): 47–66.
- Wu, Di, y Da Wen Sun. 2013. "Colour Measurements by Computer Vision for Food Quality Control - A Review." *Trends in Food Science and Technology* 29 (1): 5–20.

APÉNDICES

Apéndice A. Resultados experimentales

En esta sección se muestra los datos experimentales del área del chile habanero verde y amarillo deshidratados bajo diferentes condiciones. Los datos originales se registraron cada 30 s, pero para fines prácticos, se presentan cada hora en las Tablas A1 y A2. Los datos experimentales pertenecientes al plano H del modelo de color HSV del chile habanero verde y amarillo, se muestran en las Tablas A3 y A4.

Tabla A.1 Valores del área normalizados para el chile habanero verde.

V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.9810	0.9574	0.9800	0.9572	0.9690	0.8487	0.9559	0.9543	0.8411	0.9768	0.9852	0.9184
3	0.9541	0.9195	0.9428	0.9030	0.9087	0.8662	0.9313	0.9445	0.8928	0.9564	0.8377	0.8698
4	0.8923	0.8773	0.8068	0.8383	0.8389	0.8385	0.8696	0.8541	0.7737	0.8974	0.7311	0.7743
5	0.7663	0.8219	0.7112	0.7592	0.7831	0.8392	0.7825	0.7983	0.7022	0.7912	0.6256	0.7262
6	0.7500	0.7151	0.6066	0.7351	0.7316	0.7759	0.7188	0.7233	0.6488	0.7854	0.5133	0.6645
7	0.7204	0.6957	0.5451	0.6762	0.6822	0.7146	0.6540	0.6685	0.5939	0.7493	0.4878	0.5698
8	0.6419	0.6798	0.5140	0.6597	0.6622	0.6655	0.6536	0.6310	0.5636	0.6847	0.4572	0.5957
9	0.6043	0.6148	0.5257	0.6385	0.6326	0.6223	0.6245	0.6277	0.5408	0.6299	0.4098	0.5298
10	0.5448	0.6264		0.5895	0.5990		0.5643	0.5688	0.5358	0.5915	0.4169	0.4998
11	0.5649	0.5819		0.5306	0.5332		0.4960	0.5647		0.5486	0.4132	0.4620
12	0.5231			0.5221	0.5223		0.4768	0.5834		0.5544	0.4098	
13	0.5087			0.5126			0.4733			0.5463		
14				0.5078			0.5334			0.5379		

Apéndice A Resultados Experimentales

Tabla A.2. Valores del área normalizados para el chile habanero amarillo.

Curva Experimental	DV1	DV2	DV3	DV4	DV5	DV6	DV7	DV8	DV9	DV10	DV11	DV12
V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.9509	0.9896	0.9981	0.9431	0.9515	0.9559	0.9117	0.9993	0.9971	0.9632	0.9783	0.9771
3	0.9516	0.9482	0.9076	0.9521	0.9231	0.9609	0.9265	0.9592	0.9666	0.9421	0.9478	0.9364
4	0.8623	0.8849	0.8681	0.8611	0.8487	0.8852	0.8566	0.8541	0.9269	0.9065	0.9038	0.9032
5	0.8063	0.8288	0.8381	0.7929	0.7703	0.8258	0.8247	0.8056	0.8747	0.8417	0.8059	0.8412
6	0.7306	0.7223	0.7958	0.7409	0.7109	0.7593	0.7771	0.7229	0.7737	0.7963	0.7667	0.7942
7	0.6948	0.7035	0.7492	0.6977	0.6912	0.7386	0.6994	0.7028	0.6943	0.7439	0.7154	0.7481
8	0.6524	0.6887	0.7349	0.7031	0.6409	0.7002	0.6022	0.6822	0.6837	0.6791	0.6636	0.6821
9	0.6349	0.6537	0.6809	0.6198	0.5983	0.6852	0.5500	0.6150	0.6177	0.6520	0.5992	0.6327
10	0.6524	0.6480		0.6066	0.5877		0.5412	0.6136	0.6022	0.6262	0.5813	0.5870
11	0.6406	0.6214		0.6100	0.5647		0.5412	0.5877		0.5944	0.6027	0.6177
12	0.6288			0.5891	0.5782		0.5157			0.5882	0.5624	
13	0.6126			0.6072			0.5120			0.5776		
14				0.5843			0.4987			0.5604		

Tabla A.3. Valores del plano H normalizados para el chile habanero verde.

V(m/s)	1			1.25			1.5			1.75		
Temperatura °C Tiempo (h)	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.9621	0.9053	0.9754	0.9557	0.9698	0.8593	0.9887	0.9550	0.9687	0.9761	0.9049	0.9192
3	0.9798	0.8572	0.9189	0.9359	0.9687	0.8993	0.9162	0.9021	0.8984	0.9620	0.9289	0.8846
4	0.9109	0.8493	0.7881	0.8596	0.8931	0.7811	0.8564	0.8008	0.7214	0.8882	0.9330	0.8066
5	0.8677	0.7945	0.7265	0.7736	0.8044	0.7015	0.8299	0.7472	0.7199	0.7990	0.8137	0.7544
6	0.8189	0.6875	0.6282	0.7785	0.7180	0.6660	0.6939	0.6489	0.6741	0.7799	0.7839	0.6795
7	0.7696	0.6785	0.5707	0.6971	0.6920	0.6092	0.6747	0.5874	0.4939	0.7456	0.7899	0.5941
8	0.6870	0.6774	0.5036	0.6609	0.5831	0.5760	0.5062	0.5512	0.4438	0.6983	0.7253	0.5882
9	0.6748	0.6040	0.4190	0.6210	0.5386	0.5295	0.5036	0.5201	0.3499	0.6032	0.6705	0.5413
10	0.6626	0.5814		0.5567	0.4884		0.5001	0.4857	0.3204	0.6276	0.6292	0.4955
11	0.6709	0.5865		0.5716	0.4719		0.4922	0.4738		0.5849	0.6251	0.4716
12	0.6569			0.5626	0.5024		0.4733			0.6080	0.6217	
13	0.6403			0.5328			0.5118			0.5679		
14				0.5143			0.4460			0.5416		

Tabla A.4. Valores del plano H normalizados para el chile habanero amarillo.

V(m/s) Temperatura °C Tiempo (h)	1			1.25			1.5			1.75		
	50	55	60	50	55	60	50	55	60	50	55	60
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.9651	0.9417	0.9872	0.9510	0.9460	0.9480	0.8803	0.9577	0.9782	0.9646	0.9753	0.9651
3	0.9301	0.9467	0.9146	0.9232	0.9640	0.9680	0.9315	0.8750	0.9106	0.9300	0.9152	0.9458
4	0.8313	0.8790	0.8721	0.8399	0.8857	0.8788	0.8322	0.7787	0.8915	0.9193	0.8269	0.9125
5	0.7371	0.8189	0.8707	0.7763	0.8772	0.8086	0.7832	0.7281	0.8331	0.8002	0.7556	0.8582
6	0.6669	0.6818	0.8091	0.6997	0.8125	0.7483	0.6833	0.6801	0.7542	0.7656	0.6720	0.7912
7	0.6326	0.6606	0.7683	0.6612	0.7542	0.7236	0.6107	0.6365	0.7007	0.7157	0.5986	0.7398
8	0.5785	0.6580	0.7703	0.6314	0.7354	0.6870	0.5017	0.6123	0.6220	0.6622	0.5724	0.6832
9	0.5718	0.6268	0.7093	0.5785	0.7117	0.6846	0.4641	0.5568	0.5732	0.6080	0.5382	0.6274
10	0.5492	0.6294		0.5830	0.7052		0.4584	0.5319	0.5551	0.5958	0.5367	0.5903
11	0.5346	0.6091		0.5794	0.6912		0.4553	0.5335		0.5887	0.5353	0.5827
12	0.5323			0.5694	0.6927		0.4478			0.5792	0.5277	
13	0.5254			0.5596			0.4361			0.5678		
14				0.5502			0.4356			0.5624		

Apéndice B. Análisis estadísticos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de calcular la humedad del chile habanero verde por medio del área y el color del plano H y se compara con la obtenida experimentalmente, esta información se muestra de la Tabla B1 a la B8.

Tabla B.1. Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.25 m/s. para el chile habanero verde.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	0.93075623	1	1.09575623	1	0.97575623
2	0.89687195	0.79160669	0.91225337	0.75788491	0.90601852	0.89342497
3	0.7086999	0.78361538	0.701973	0.61899064	0.61296296	0.72752756
4	0.54252199	0.57508657	0.50986501	0.49795272	0.39768519	0.44270609
5	0.4115347	0.44745603	0.37331256	0.37627609	0.24907407	0.24080878
6	0.31280547	0.33908025	0.27102804	0.24383579	0.13194444	0.14712288
7	0.23607038	0.23987073	0.19626168	0.22711372	0.03472222	0.03474693
8	0.1744868	0.16071867	0.13187954	0.157966	0.01435185	0.01703457
9	0.13245357	0.12275558	0.08930426	0.09109551	0.00925926	0.00948799
10	0.09384164	0.08903917	0.06074766	0.06300613		
11	0.06793744	0.07903409	0.03894081	0.04555572		
12	0.03910068	0.03522357				
13	0.02541544	0.02858513				

Tabla B.2. Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.5 m/s. para el chile habanero verde.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	0.7577562	1	0.8237562	1	0.7037562
2	0.91306156	0.64507738	0.89336493	0.74475151	0.90601852	0.53231278
3	0.74126456	0.60083533	0.69103172	0.6311751	0.61296296	0.47383906
4	0.56322795	0.45993463	0.53317536	0.58255091	0.39768519	0.29877056
5	0.44051581	0.34399147	0.40703609	0.4474274	0.24907407	0.21366572
6	0.33194676	0.29484876	0.32282173	0.35011094	0.13194444	0.17913579
7	0.25831947	0.23307578	0.24990886	0.27591007	0.03472222	0.12351075
8	0.20341098	0.18204157	0.18975574	0.21645475	0.01435185	0.08878131
9	0.15515807	0.14934928	0.14272694	0.16606137	0.00925926	0.03479065
10	0.1156406	0.10267183	0.0971564	0.11929464		
11	0.0827787	0.09270656	0.06981407	0.08476388		
12	0.0578203	0.06246328	0.03158585	0.03273976		
13	0.03868552	0.04387864				
14	0.02620632	0.03125683				

Tabla B.3. Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.75 m/s. para el chile habanero verde.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	0.85075623	1	0.75975623	1	0.79575623
2	0.86984925	0.73043101	0.86461834	0.64542918	0.86349093	0.71426896
3	0.64371859	0.65321367	0.5880941	0.53502398	0.62282261	0.5641693
4	0.49296482	0.54783001	0.41910706	0.37881309	0.41734803	0.32551921
5	0.37839196	0.50871083	0.30580893	0.31650915	0.26377533	0.28457008
6	0.2959799	0.35314348	0.20691311	0.21862238	0.16708141	0.17878277
7	0.22613065	0.33448156	0.15266443	0.15701518	0.10167081	0.11942686
8	0.1839196	0.15145093	0.10033605	0.11701418	0.0650551	0.0647889
9	0.14371859	0.14800001	0.06048968	0.0788954	0.04585851	0.05899913
10	0.11155779	0.0886323	0.03888622	0.04062213	0.0327053	0.00822261
11	0.0879397	0.10390921	0.02880461	0.0306386		
12	0.06934673	0.12491768				
13	0.05477387	0.04330649				
14	0.04321608	0.04241168				

Tabla B.4. Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1 m/s. para el chile habanero verde.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	0.69275623	1	0.65575623	1	0.74575623
2	0.89861059	0.62945654	0.90443425	0.64132957	0.90027701	0.55410259
3	0.69770935	0.67860285	0.64831804	0.63752698	0.66426593	0.48947712
4	0.55501314	0.5631996	0.52025994	0.53275549	0.48421053	0.47228863
5	0.44348479	0.4957771	0.40825688	0.43156046	0.37174515	0.34038341
6	0.35786707	0.38634061	0.31269113	0.35414457	0.26260388	0.23417755
7	0.29365377	0.27677555	0.23891437	0.22647302	0.17783934	0.20008683
8	0.23657529	0.22946639	0.17010703	0.15956945	0.10415512	0.14384973
9	0.19263988	0.19646112	0.11123853	0.11542372	0.0531856	0.0512224
10	0.15208412	0.12748685	0.06727829	0.09654125	0.02714681	0.029989
11	0.11678558	0.11132939	0.03707951	0.03803693	0.01551247	0.01301136
12	0.06684191	0.07911202	0.01949541	0.00197859		
13	0.04881712	0.05178475				
14	0.03567405	0.03692255				

Tabla B.5. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.25 m/s. para el chile habanero verde.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	1.40753699	1	1.12376258	1	1.28927251
2	0.89687195	1.28970671	0.91225337	0.97015643	0.90601852	1.12700048
3	0.7086999	0.94320896	0.701973	0.86051799	0.61296296	0.66882103
4	0.54252199	0.56085621	0.50986501	0.53814354	0.39768519	0.49099354
5	0.4115347	0.43051827	0.37331256	0.36045567	0.24907407	0.2808082
6	0.31280547	0.32661632	0.27102804	0.30301236	0.13194444	0.18068866
7	0.23607038	0.24982303	0.19626168	0.21663808	0.03472222	0.03188468
8	0.1744868	0.17464711	0.13187954	0.15807086	0.01435185	0.02499203
9	0.13245357	0.14995838	0.08930426	0.09515296	0.00925926	0.0195171
10	0.09384164	0.09352484	0.06074766	0.06805224		
11	0.06793744	0.06245534	0.03894081	0.04496488		
12	0.03910068	0.03217227				
13	0.02541544	0.02901221				

Tabla B.6. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.5 m/s. para el chile habanero verde.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	1.35280955	1	1.31365644	1	1.19575623
2	0.91306156	1.03825378	0.92321509	1.06925245	0.91297209	0.96715944
3	0.74126456	0.87208227	0.69420745	0.83644192	0.57881773	0.55870693
4	0.56322795	0.49213039	0.52492142	0.56624652	0.41789819	0.37109818
5	0.44051581	0.36300388	0.39649753	0.43117339	0.27750411	0.28658832
6	0.33194676	0.28506051	0.30983386	0.31825611	0.16215107	0.15514859
7	0.25831947	0.25027754	0.23394701	0.26587265	0.08374384	0.1134259
8	0.20341098	0.19478188	0.16614279	0.17417116	0.03612479	0.05584938
9	0.15515807	0.13534307	0.11046251	0.10254121	0.01642036	0.02679381
10	0.1156406	0.11719669	0.06061967	0.06833984		
11	0.0827787	0.08012099	0.0363718	0.04516529		
12	0.0578203	0.06140164	0.0233498	0.02516529		
13	0.03868552	0.03244142				
14	0.02620632	0.03244142				

Tabla B.7. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.75 m/s. para el chile habanero verde.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	1.39575623	1	1.36075623	1	1.39575623
2	0.93352192	1.03760095	0.90520446	1.16228072	0.91841317	0.9511938
3	0.70438472	0.74975789	0.633829	0.61540629	0.67065868	0.67714277
4	0.5625884	0.53500773	0.46406444	0.46145251	0.51085329	0.5275243
5	0.45120226	0.41892934	0.34551838	0.36974482	0.37050898	0.39405555
6	0.37376238	0.35062384	0.25134242	0.22046782	0.25673653	0.27537058
7	0.30622348	0.32407638	0.19929781	0.1529954	0.15568862	0.16187242
8	0.26308345	0.25458619	0.14890541	0.11404453	0.07260479	0.06477314
9	0.21958982	0.21594042	0.1055349	0.06662498	0.03143713	0.04520105
10	0.1821075	0.19194132	0.06836018	0.03655456	0.0123503	0.03052011
11	0.15134371	0.16628495	0.04233788	0.03165989		
12	0.12270156	0.11436975				
13	0.09724187	0.09232834				
14	0.07673267	0.07191591				

Tabla B.8. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1m/s. para el chile habanero verde.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	1.39075623	1	1.53075623	1	1.23088764
2	0.89861059	1.18330836	0.90443425	1.18084803	0.90027701	1.04797156
3	0.69770935	0.94612235	0.64831804	0.74471451	0.66426593	0.74337616
4	0.55501314	0.84573138	0.52025994	0.54363152	0.48421053	0.51061271
5	0.44348479	0.46239799	0.40825688	0.42826497	0.37174515	0.39733413
6	0.35786707	0.37077767	0.31269113	0.34629408	0.26260388	0.25513688
7	0.29365377	0.29544512	0.23891437	0.24157963	0.17783934	0.20102067
8	0.23657529	0.25309361	0.17010703	0.19615434	0.10415512	0.11234844
9	0.19263988	0.18818057	0.11123853	0.11318811	0.0531856	0.06770462
10	0.15208412	0.14792764	0.06727829	0.07530058	0.02714681	0.04747967
11	0.11678558	0.13496499	0.03707951	0.05525003	0.01551247	0.0296837
12	0.06684191	0.05897044	0.01949541	0.03307789		
13	0.04881712	0.04507492				
14	0.03567405	0.03531134				

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de calcular la humedad del chile habanero amarillo por medio del área y el color del plano H y se compara con la obtenida experimentalmente, esta información se muestra de la Tabla B9 a la B16.

Tabla B.9. Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.25 m/s. para el chile habanero amarillo.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	1.30075623	1	1.20460623	1	1.16845623
2	0.86390315	1.08420612	0.87342363	0.97389144	0.86191733	0.7777887
3	0.68635363	0.75075372	0.67538533	0.73171757	0.61609499	0.63756726
4	0.54658841	0.57701164	0.51331154	0.54763349	0.42480211	0.45004204
5	0.43763756	0.39378431	0.38813638	0.32662676	0.27836412	0.27911299
6	0.34702861	0.32679047	0.28538066	0.29686577	0.17326297	0.21244023
7	0.26669112	0.28862191	0.20691266	0.18656757	0.08487247	0.13044157
8	0.19992663	0.18328618	0.1424568	0.15517155	0.05233069	0.07511368
9	0.15663977	0.13945822	0.09621672	0.08227119	0.03034301	0.03195666
10	0.1162876	0.12669201	0.06819243	0.06942259		0.04747967
11	0.08804109	0.11305774	0.045773	0.04475184		
12	0.06052825	0.09476255				
13	0.04805576	0.05465364				

Tabla B.10. Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.5 m/s. para el chile habanero amarillo.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	1.30345623	1	1.40345623	1	1.09575623
2	0.85545723	1.08905006	0.89336493	1.07185573	0.88145347	0.91867117
3	0.6405394	0.74915731	0.69103172	0.80867873	0.54176258	0.624018
4	0.4774547	0.54071308	0.53317536	0.57845724	0.38030253	0.42989293
5	0.36788875	0.40159805	0.40703609	0.4272264	0.24942453	0.24229095
6	0.27770754	0.30845834	0.32282173	0.38021679	0.1468267	0.18889858
7	0.21533923	0.20283628	0.24990886	0.26493812	0.09454127	0.09463
8	0.17109145	0.1624726	0.18975574	0.17034043	0.05836896	0.05917767
9	0.13232196	0.11834693	0.14272694	0.14693231	0.03830977	0.03797262
10	0.10282343	0.11080822	0.0971564	0.09601492		0.04747967
11	0.0788032	0.08138483	0.06981407	0.04529001		
12	0.05983987	0.06989874	0.05158585	0.03672704		
13	0.0446692	0.04604878				
14	0.03286979	0.0394211				

Tabla B.11. Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.75 m/s. para el chile habanero amarillo.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	1.50075623	1	1.34075623	1	1.23088764
2	0.86984925	1.18244876	0.86461834	1.15638372	0.86349093	1.04797156
3	0.64371859	0.93196771	0.5880941	0.76381219	0.62282261	0.74337616
4	0.49296482	0.63155742	0.41910706	0.41498161	0.41734803	0.51061271
5	0.37839196	0.39492588	0.30580893	0.324675	0.26377533	0.39733413
6	0.2959799	0.27772213	0.20691311	0.24584472	0.16708141	0.25513688
7	0.22613065	0.2460434	0.15266443	0.19716348	0.10167081	0.20102067
8	0.1839196	0.15906682	0.10033605	0.11457567	0.0650551	0.11234844
9	0.14371859	0.13903846	0.06048968	0.07145248	0.04585851	0.06770462
10	0.11155779	0.12415206	0.03888622	0.04372877	0.0327053	0.04747967
11	0.0879397	0.09852113	0.02880461	0.02708213		0.0296837
12	0.06934673	0.08009797				
13	0.05477387	0.05842957				
14	0.04321608	0.04153522				

Tabla B.12 Comparación de los datos calculados usando el plano H y los datos experimentales secados a una velocidad de 1 m/s. para el chile habanero amarillo.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	1.21633319	1	1.39575623	1	1.38575623
2	0.86259018	1.23565962	0.91049634	1.16336043	0.89072744	1.10677486
3	0.77911371	0.89654979	0.62896664	0.89106881	0.65126444	0.87885481
4	0.53933356	0.6069609	0.47436941	0.57085123	0.47268186	0.52675212
5	0.42631398	0.44002134	0.35842148	0.3918893	0.36184827	0.37273638
6	0.33321883	0.38229944	0.25874695	0.27128438	0.25975648	0.25315125
7	0.26794916	0.28428033	0.19406021	0.22916499	0.17389947	0.19300869
8	0.23703195	0.24189179	0.1448332	0.15215734	0.11239463	0.12916909
9	0.15836482	0.15817362	0.10699756	0.11207398	0.07430534	0.08716736
10	0.13603573	0.13746971	0.08462164	0.0920713	0.05276303	0.07725618
11	0.10168327	0.1169573	0.06875509	0.0609565	0.04246019	0.04111645
12	0.05977327	0.06229742	0.06122864	0.05837402		
13	0.04774991	0.05436834				
14	0.03744418	0.03492348				

Tabla B.13. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.25 m/s. para el chile habanero amarillo..

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	1.38575623	1	1.22575623	1	0.95575623
2	0.86390315	1.10920612	0.87342363	0.99502084	0.86191733	0.76335258
3	0.68635363	0.78575372	0.67538533	0.7529628	0.61609499	0.52370842
4	0.54658841	0.60201164	0.51331154	0.56903404	0.42480211	0.44682658
5	0.43763756	0.45878431	0.38813638	0.30819585	0.27836412	0.34857326
6	0.34702861	0.37179047	0.28538066	0.23252165	0.17326297	0.18259898
7	0.26669112	0.27362191	0.20691266	0.19739164	0.08487247	0.10887302
8	0.19992663	0.21169201	0.1424568	0.11657524	0.05233069	0.05074937
9	0.15663977	0.16148898	0.09621672	0.09076659	0.03034301	0.03348422
10	0.1162876	0.11288048	0.06819243	0.08107922		0.04747967
11	0.08804109	0.09767201	0.045773	0.04610111		
12	0.06052825	0.07253229				
13	0.04805576	0.04746771				

Tabla B.14. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.5 m/s. para el chile habanero amarillo.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	1.31075623	1	1.38575623	1	1.09075623
2	0.85545723	1.09630306	0.89336493	1.05417918	0.88145347	0.91367117
3	0.6405394	0.70677645	0.69103172	0.79136793	0.54176258	0.619018
4	0.4774547	0.49869608	0.53317536	0.56152765	0.38030253	0.42489293
5	0.36788875	0.40973282	0.40703609	0.41034968	0.24942453	0.23729095
6	0.27770754	0.30367456	0.32282173	0.36327974	0.1468267	0.18389858
7	0.21533923	0.20021182	0.24990886	0.24760998	0.09454127	0.08963
8	0.17109145	0.12529119	0.18975574	0.15235481	0.05836896	0.05417767
9	0.13232196	0.095847	0.14272694	0.12872877	0.03830977	0.03924234
10	0.10282343	0.0884941	0.0971564	0.09968694		0.04747967
11	0.0788032	0.07334444	0.06981407	0.06261701		
12	0.05983987	0.056851	0.05158585	0.04995946		
13	0.0446692	0.04614272				
14	0.03286979	0.0340815				

Tabla B.15. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1.75 m/s. para el chile habanero amarillo.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	1.32075623	1	1.34575623	1	1.22075623
2	0.86984925	1.10630306	0.86461834	1.06138372	0.86349093	1.06834857
3	0.64371859	0.76677645	0.5880941	0.62152903	0.62282261	0.72756336
4	0.49296482	0.55869608	0.41910706	0.46998161	0.41734803	0.45576489
5	0.37839196	0.41973282	0.30580893	0.359675	0.26377533	0.32569488
6	0.2959799	0.31367456	0.20691311	0.26356442	0.16708141	0.18560613
7	0.22613065	0.21021182	0.15266443	0.1831678	0.10167081	0.11157524
8	0.1839196	0.13529119	0.10033605	0.12957567	0.0650551	0.05833721
9	0.14371859	0.105847	0.06048968	0.07958018	0.04585851	0.05609591
10	0.11155779	0.0984941	0.03888622	0.05520838	0.0327053	0.03060162
11	0.0879397	0.08334444	0.02880461	0.03208213		
12	0.06934673	0.066851				
13	0.05477387	0.05614272				
14	0.04321608	0.0440815				

Tabla B.16. Comparación de los datos calculados usando el área y los datos experimentales secados a una velocidad de 1 m/s. para el chile habanero amarillo.

Temp Tiempo	50°C Experimental	50°C Calculado	55°C Experimental	55°C Calculado	60°C Experimental	60°C Calculado
1	1	1.37075623	1	1.37075623	1	1.31575623
2	0.86259018	1.11489088	0.91049634	1.13836043	0.89072744	1.03677486
3	0.77911371	0.97607494	0.62896664	0.76606881	0.65126444	0.90885481
4	0.53933356	0.75409738	0.47436941	0.49585123	0.47268186	0.59752116
5	0.42631398	0.46831072	0.35842148	0.3768893	0.36184827	0.45736383
6	0.33321883	0.37737831	0.25874695	0.28628438	0.25975648	0.2915125
7	0.26794916	0.29994009	0.19406021	0.24416499	0.17389947	0.19193009
8	0.23703195	0.25771376	0.1448332	0.17416909	0.11239463	0.13916909
9	0.15836482	0.19960116	0.10699756	0.13935989	0.07430534	0.05716736
10	0.13603573	0.12866514	0.08462164	0.09944422	0.05276303	0.05203548
11	0.10168327	0.11484394	0.05875509	0.0559565	0.04246019	0.04198677
12	0.05977327	0.08423923	0.05122864	0.04829385		
13	0.04774991	0.05257774				
14	0.03744418	0.03925907				

