



**UNIVERSIDAD TECNÓLOGICA DE LA MIXTECA**

**COMPARATIVO DEL PROCESO DE SECADO Y LA  
CALIDAD FUNCIONAL DEL CHILE DE AGUA (*Capsicum  
annuum* L.) USANDO UN SECADOR DE CHAROLAS  
VERSUS UN SECADOR SOLAR MIXTO**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO EN ALIMENTOS**

**PRESENTA:  
GERMÁN DE JESÚS PÉREZ GONZÁLEZ**

**DIRECTOR:  
DR. RAÚL SALAS CORONADO**

Huajuapán de León, Oaxaca, México, diciembre de 2021

Este trabajo se realizó en las instalaciones de los laboratorios de Bromatología y Análisis Instrumental de la Universidad Tecnológica de la Mixteca

## RESUMEN

El chile de agua (*C. annuum* L.) es endémico del estado de Oaxaca y tiene una vida media de aproximadamente dos semanas, por lo que es necesario desarrollar métodos para su conservación minimizando los cambios en sus propiedades físicas y químicas. Por consiguiente, en el presente proyecto se realizó un análisis comparativo de dos métodos de secado (secador de charolas giratorias y secador solar mixto) de chile de agua. En el secado se utilizaron rajadas de  $1.75 \pm 0.11$  mm de grosor, con y sin pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5%. Las curvas de secado obtenidas se modelaron con las ecuaciones de Newton, Page y Midilli, para predecir el comportamiento del proceso de secado. El modelo de Midilli mostró el mejor ajuste a todas las cinéticas de secado experimentales, con valores de  $R^2 > 0.99$ . A las muestras estudiadas se les determinó el color y el contenido de fenoles y flavonoides totales. El escaldado condujo a una mayor retención de fenoles totales con respecto a las muestras frescas durante su almacenamiento. Las mejores concentraciones de fenoles totales se obtienen en el secador de charolas giratorias. En cambio, la retención más alta de flavonoides se obtuvo en el proceso de secado de chile escaldado sin pretratamiento en el secador solar mixto (CESP-SSM). Adicionalmente, una prueba de Spearman permitió identificar una correlación alta ( $\rho = 0.8$ ) entre el parámetro de color  $b^*$  (verde) y el contenido de fenoles totales en las muestras deshidratadas. En general, el secado en charolas permitió obtener un producto deshidratado con una mayor retención de fenoles totales y flavonoides que en un secador solar mixto a un  $p < 0.05$ .

## AGRADECIMIENTOS

Dedico este trabajo a Dios por guiarme a lo largo de mi existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad. Por darme la dicha de contar con personas muy importantes y maravillosas, y por los logros obtenidos a lo largo de mi vida. En especial, esta tesis está dedicada en memoria de mi hermano Alexander Froylan Bravo González, ya que desafortunadamente se fue poco antes de que pudiera ver culminado mi trabajo de investigación. Siempre te recordaré por todos los momentos que pasamos juntos, por todo tu apoyo, pero sobre todo por tu alegría, esa chispa que te representaba a dónde quiera que fueras. La fuerza y la fe de Alexander durante su último año de vida me dio una nueva apreciación del significado y la importancia de la vida. Vivió su vida, actuando concienzudamente sobre sus creencias, ayudando tanto a familiares como a extraños necesitados. Se enfrentó valientemente a su muerte prematura. Su ejemplo me mantuvo soñando cuando quise rendirme.

A toda mi familia por su amor incondicional, en especial a mi padre, Gabriel Francisco Pérez Martínez, por enseñarme el valor del trabajo y sacrificio en todos estos años. Y mi madre, Cristina Rosa González Herrera, por cariño y ser la principal promotora de mis sueños, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me ha inculcado. Gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido un orgullo y privilegio ser su hijo, son los mejores padres.

A mis Abuelos, Perfecto Amador González Soriano y Micaela Guadalupe Herrera, Adelfo Pérez Cruz y Juana Margarita Martínez Rojas, por ser ejemplos de vida y pilares importantes en mi formación personal y profesional, incentivándome a prepararme en la vida. Por todo su cariño, sabios consejos, valores y principios inculcados.

A mis amigas Ángela Martínez Monterroza, Miryam Janet Martínez Pérez, Viviana Atenas Gómez Lara, Gladis Itzel Herrera Ortiz, Itzel Eugenio Avendaño, Marlitt Sánchez Cruz y María del Pilar Ruiz Villalobos, por todo su apoyo brindado, en particular por todos los conocimientos compartidos durante la licenciatura. Porque con su carisma, alegría y cariño

los días de la licenciatura se hicieron más amenos.

A mis mejores amigos José Luis Pérez Ramírez, Gabriel Arellanes Jiménez y Raúl Jiménez Hernández, por la hermandad tan característica que nos unió durante toda la universidad y formar parte fundamental de mi vida con su amistad tan leal y sincera. En particular por todas las experiencias vividas, porque sin su compañía durante la universidad no hubiera podido lograr este sueño. Siempre les estaré agradecido por todo su apoyo y les aguardare un enorme cariño y afecto.

A mis amigos Miguel Arturo Jácome Silva y Cristian Zarate Cruz, quienes me animaron a seguir creciendo en este campo de estudio y, durante varios años me facilitaron mi investigación compartiendo su hogar conmigo cuando necesité un lugar para quedarme.

A mis amigos Juan Carlos Barragán Ambrosio, Julio César García Revilla, Héctor Manuel Arreaga González, Jorge Carrasco, Germán Serra, que siempre me han prestado un gran apoyo moral y humano, necesarios en los momentos difíciles de este trabajo y profesión.

Al Ing. Noel Santamaría Mendoza, técnico del taller de electrónica, por su apoyo en la reparación del sistema electrónico y mecánico del secador de charolas giratorias.

De igual manera mis agradecimientos a la Universidad Tecnológica de Mixteca, al instituto de agroindustrias, a mis profesores en especial a la Dra. Norma Francenia Santos Sánchez, Dra. Beatriz Hernández Carlos y Dra. Mirna Patricia Santiago Gómez quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Dr. Raúl Salas Coronado, principal colaborador durante todo este proceso, quien, con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo. Siempre le estaré eternamente agradecido por todo su apoyo incondicional, sus sabios consejos y

recomendaciones, por ser parte fundamental de mi formación personal, profesional y ser un ejemplo a seguir.

A quien ha hecho posible que yo siga aquí...

# ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN .....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIV
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. ORIGINALIDAD</b> .....	3
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	3
<b>4. OBJETIVOS</b> .....	4
<b>4.1. Objetivo general</b> .....	4
<b>4.2. Objetivos específicos</b> .....	4
<b>5. HIPÓTESIS</b> .....	5
<b>6. MARCO TEÓRICO</b> .....	6
<b>6.1. Origen e importancia del chile (<i>Capsicum spp</i>)</b> .....	6
6.1.1. Descripción botánica del género <i>Capsicum</i> .....	6
6.1.2. Producción de chile a nivel mundial.....	7
6.1.3. <i>Capsicum annuum</i> en México.....	10
<b>6.1.4. Composición química del chile</b> .....	11
<b>6.2. Chile de agua (<i>Capsicum annuum</i> L.)</b> .....	13
<b>6.2.1. Morfología del chile de agua</b> .....	14
6.3. Compuestos fenólicos.....	15
6.3.1. Propiedades funcionales de los compuestos fenólicos .....	16
6.4. Flavonoides.....	17
6.4.1. Propiedades funcionales de los flavonoides .....	18
<b>6.5. Métodos de conservación del chile</b> .....	19
<b>6.6. Secado</b> .....	20
6.6.1. Secado mediante secador de charolas.....	21
6.6.2. Secado solar.....	21
6.6.3. Parámetros que afectan el proceso de secado .....	23
<b>6.7. Modelos para la cinética de secado</b> .....	25

6.8. Parámetros de calidad en chile deshidratado.....	26
6.9. Determinación de color .....	27
7. ESTADO DEL ARTE.....	30
7.1. Análisis de compuestos bioactivos en fruto de chile deshidratado.....	30
7.1.1. Interpretación de la concentración de fenoles totales en variedades del género <i>Capsicum</i> .....	30
7.2. Aprovechamiento de la energía solar para el secado de chile.....	33
7.3. Aplicación de modelos matemáticos y difusividad efectiva en la cinética de secado del chile .....	35
7.4. Determinación de color en chile .....	39
8. METODOLOGÍA .....	42
8.1. Obtención de las muestras .....	43
8.2. Selección y preparación del chile.....	43
8.3. Escaldado, determinación de humedad de las muestras de chile fresco y escaldado con y sin pretratamiento .....	43
8.4. Secado de las muestras .....	44
8.4.1. Secado de las muestras mediante un secador de charolas giratorias .....	44
8.4.2. Secado de las muestras mediante un secador solar mixto indirecto .....	45
8.5 Molienda de las muestras secas .....	47
8.6 Determinación de humedad final de los polvos de chile por termobalanza .....	47
8.7 Obtención de cinéticas de secado.....	47
8.8. Cálculo de difusividad efectiva .....	47
8.9. Modelos matemáticos aplicados a la cinética de secado .....	49
8.10. Cuantificación de color del fruto fresco y deshidratado .....	50
8.11. Cuantificación de fenoles totales .....	50
8.11.1. Preparación de disoluciones.....	51
8.11.2. Prueba de fenoles totales.....	51
8.12. Determinación del contenido de flavonoides totales.....	53
8.12.1. Preparación de disoluciones.....	54
8.12.2. Cuantificación de flavonoides totales .....	55
8.13. Análisis estadístico comparativo.....	56
9. RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	58
9.1. Características del chile.....	58
9.2. Características del secado en un secador de charolas giratorias y un secador solar mixto .....	58



9.3. Cinéticas de secado .....	60
9.4. Difusividad efectiva.....	61
9.5. Modelos matemáticos aplicados a las cinéticas de secado.....	63
9.5.1 Comparativo secador solar mixto vs otros secadores solares .....	78
9.6. Determinación de color .....	80
9.7. Fenoles totales y flavonoides .....	89
10. CONCLUSIONES .....	97
11. PERSPECTIVAS.....	98
12. REFERENCIAS.....	99
13. APÉNDICES .....	108
<b>Apéndice A. Proceso en Minitab para la obtención de la difusividad efectiva mediante los datos estadísticos de la regresión lineal .....</b>	<b>108</b>
<b>Apéndice B. Proceso de regresión no lineal en InterReg 2014 Arbitrary Precision Edition – Interpolation/Regression para la obtención de los la constante de velocidad de secado (k) y parámetros de modelos de Newton, Page y Midilli aplicados a las cinéticas de secado de chile de agua (<i>C. annuum</i> L.).....</b>	<b>112</b>
<b>Apéndice C. Análisis estadístico de los datos obtenidos .....</b>	<b>117</b>
<b>Apéndice D. Curvas de humedad vs velocidad de secado o tiempo de secado de chile de agua (<i>C. annuum</i> L.) escaldado y escaldado pretratado con Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> al 0.5% deshidratados en un secador de charolas giratorias o en un secador solar mixto..</b>	<b>126</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Producción mundial de chile fresco en 2019 (FAOSTAT, 2021).....	8
<b>Figura 2.</b> Principales países productores de chile fresco en 2019 (FAOSTAT, 2021).....	8
<b>Figura 3.</b> Producción mundial de chile seco en 2019 (FAOSTAT, 2021). ....	9
<b>Figura 4.</b> Principales países productores de chile seco en 2019 (FAOSTAT, 2021). ....	9
<b>Figura 5.</b> Producción mundial de chile fresco y seco (FAOSTAT, 2021). ....	10
<b>Figura 6.</b> Cultivo de chile de agua a cielo abierto (izquierda) y morfología del chile de agua ( <i>C. annuum</i> L.) (derecha). ....	14
<b>Figura 7.</b> Estructuras químicas de los compuestos fenólicos. ....	16
<b>Figura 8.</b> Estructuras químicas de flavonoides encontrados en <i>C. annuum</i> (Antonio et al., 2018). ....	18
<b>Figura 9.</b> Secador solar mixto. ....	23
<b>Figura 10.</b> Espacio de color óptico compuesto por los planos de constantes de luminosidad ( $L^*$ ) con un espacio $\Delta L^* = 5$ unidades. La red indicada en cada plano representa las líneas de los parámetros $a^*$ y $b^*$ con una línea de espacio de 20 unidades (Hill, Roger y Vorhagen, 1997). ....	28
<b>Figura 11.</b> Vista superior del espacio de color óptico CIE $L^*a^*b^*$ . El plano superior corresponde a la luminosidad de $L^* = 95$ . Con referencia de $L^* = 100$ como punto blanco (Hill et al., 1997). ....	29
<b>Figura 12.</b> Diagrama general experimental. ....	42
<b>Figura 13.</b> Secador de charolas giratorias. ....	45
<b>Figura 14.</b> Secador solar mixto (izquierda) y cámara de secado con muestras de chile de agua ( <i>C. annuum</i> L.) (derecha). ....	46
<b>Figura 15.</b> Reacción del reactivo de Folin-Ciocalteu con fenoles mediante una transferencia de electrones (Prior, Wu y Schaich, 2005). ....	51
<b>Figura 16.</b> Curva de calibración de ácido gálico. ....	52
<b>Figura 17.</b> Mecanismo de acción del método del tricloruro de aluminio con flavonoides (Zhu et al., 2010). ....	54
<b>Figura 18.</b> Curva de calibración de catequina. ....	56
<b>Figura 19.</b> Morfología de la muestra de chile de agua obtenida. ....	58
<b>Figura 20.</b> Deshidratado de chile de agua ( <i>C. annuum</i> L.) en un secador de charolas giratorias y un secador solar mixto. ....	59
<b>Figura 21.</b> Curva de humedad vs velocidad de secado de chile de agua ( <i>C. annuum</i> L.) sin pretratamiento deshidratado en un secador de charolas giratorias (CESP-SCG). ....	61
<b>Figura 22.</b> Curva de tiempo vs velocidad de secado de chile de agua ( <i>C. annuum</i> L.) sin pretratamiento deshidratado en un secador de charolas giratorias (CESP-SCG). ....	61
<b>Figura 23.</b> Regresión lineal de la réplica uno de CESP-SCG en período de velocidad constante. ....	62
<b>Figura 24.</b> Regresión lineal de la réplica uno de CESP-SCG en período de velocidad decreciente. ....	63
<b>Figura 25.</b> Gráfico de cajas y bigotes de la constante de velocidad de secado en el período de velocidad de secado decreciente del modelo de Newton (k-Newton) obtenida en cada proceso. ....	68
<b>Figura 26.</b> Gráfico de cajas y bigotes de la constante de velocidad de secado decreciente del modelo de Page (k-Page) obtenida en cada proceso. ....	69

<b>Figura 27.</b> Gráfico de cajas y bigotes de la constante de velocidad de secado decreciente del modelo de Midilli (k-Midilli) obtenida en cada proceso. ....	71
<b>Figura 28.</b> Relación de MR vs tiempo de datos experimentales y obtenidos de los modelos de Newton, Page y Midilli de chile de agua sin pretratamiento ( <i>C. annuum</i> L.) deshidratado en un secador de charolas giratorias. ....	72
<b>Figura 29.</b> Gráfica de cajas y bigotes de las velocidades de secado constante ( $R_C$ ) obtenidas en las muestras de CESP-SCG y CECF-SCG. ....	73
<b>Figura 30.</b> Gráfica de cajas y bigotes de la difusividad efectiva ( $D_{eff}$ ) obtenida para cada proceso y de acuerdo al período de velocidad de secado constante o decreciente. ....	75
<b>Figura 31.</b> Chile de agua fresco (izquierda), chile de agua escaldado sin pretratamiento (centro), chile de agua escaldado con pretratamiento de $Na_2S_2O_5$ al 0.5% (derecha). ....	80
<b>Figura 32.</b> Gráfica de cajas y bigotes del parámetro $L^*$ . ....	83
<b>Figura 33.</b> Gráfico de cajas y bigotes del parámetro $a^*$ . ....	84
<b>Figura 34.</b> Gráfico de cajas y bigotes del parámetro $b^*$ . ....	86
<b>Figura 35.</b> Gráfico de cajas y bigotes del parámetro $C^*$ . ....	88
<b>Figura 36.</b> Gráfico de cajas y bigotes del contenido de fenoles totales presente en las muestras. ....	93
<b>Figura 37.</b> Gráfico de cajas y bigotes del contenido de flavonoides presente en las muestras. ....	95

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación general por jerarquías taxonómicas para <i>Capsicum</i> (Comisión del Codex Alimentarius, 2008).....	7
<b>Tabla 2.</b> Composición química de chile dulce verde ( <i>C. annuum</i> L.), (Baenas et al., 2019). .....	12
<b>Tabla 3.</b> Contenido de materia seca y compuestos bioactivos de los cultivares de chile en cinco etapas de desarrollo y maduración (Ionică et al., 2017).....	13
<b>Tabla 4.</b> Modelos matemáticos empleados en las cinéticas de secado de frutas y hortalizas (Castillo-Téllez et al., 2017). ....	26
<b>Tabla 5.</b> Contenido de fenoles totales en chile <i>C. annuum</i> L. var. Yalova Yaglik verde y rojo (fresco y seco) (Ozgur et al., 2011). ....	31
<b>Tabla 6.</b> Contenido de fenoles totales en chile <i>C. chinense</i> Jacqui var. Cumari de Pára fresco y seco (Reis et al., 2013). ....	31
<b>Tabla 7.</b> Efecto de diferentes pretratamientos sobre el contenido de fenoles totales del chile seco en polvo <i>C. annuum</i> L. var. California Wonder (Sharma et al., 2015).....	32
<b>Tabla 8.</b> Contenido de fenoles totales de chile ( <i>C. annuum</i> ) verde y rojo var. Almuden (Lutz et al., 2015). ....	32
<b>Tabla 9.</b> Evaluación del rendimiento del secador solar de doble paso respecto a un secador de gabinete y el secado tradicional al aire libre (Banout et al., 2011). ....	33
<b>Tabla 10.</b> Evaluación del rendimiento de un secador solar con convección forzada (Fudholi et al., 2014). ....	34
<b>Tabla 11.</b> Resumen del rendimiento del secador solar de túnel con convección forzada (Rabha et al., 2017a). ....	35
<b>Tabla 12.</b> Estadísticas de ajuste de los modelos de aplicados a la cinética de secado de chile rojo fresco ( <i>C. annuum</i> L.), (Arslan y Özcan, 2011). ....	36
<b>Tabla 13.</b> Estadísticas de ajuste de los modelos de aplicados a la cinética de secado del de chile fantasma ( <i>C. chinense</i> Jacq.), (Rabha et al., 2017b). ....	37
<b>Tabla 14.</b> Parámetros de ajuste de los modelos matemáticos aplicados a la cinética de secado del chile ( <i>C. annuum</i> L.), (Silva et al., 2018).....	38
<b>Tabla 15.</b> Parámetros de ajuste de los modelos matemáticos aplicados a la cinética de secado del chile jalapeño rojo ( <i>C. annuum</i> L.), (Alvarez-Parrilla et al., 2019). ....	39
<b>Tabla 16.</b> Difusividad efectiva de diferentes variedades de chile ( <i>C. annuum</i> L.) en el mundo. ....	39
<b>Tabla 17.</b> Valores de color en el sistema CIE $L^*a^*b^*$ para el chile fresco y escaldado (Ornelas-Paz et al., 2010). ....	40
<b>Tabla 18.</b> Valores de color en el sistema CIE $L^*a^*b^*$ para el chile fresco y escaldado (Ramos-Aguilar et al., 2015). ....	40
<b>Tabla 19.</b> Parámetros de color CIE $L^*a^*b^*$ evaluados en chile seco por diferentes métodos de secado (Al-Sebaei et al., 2017).....	41
<b>Tabla 20.</b> Parámetros obtenidos durante el proceso de secado en un secador solar. ....	46
<b>Tabla 21.</b> Comparativo de las constantes de velocidad de secado obtenidas a partir de los modelos matemáticos aplicados a las cinéticas de secado.....	64
<b>Tabla 22.</b> Análisis estadístico inferencial de los parámetros de los modelos matemáticos aplicados a las cinéticas de secado. ....	66
<b>Tabla 23.</b> Comparativo múltiple de medias por el método de Dunn para la k-Newton. ....	67

<b>Tabla 24.</b> Comparativo múltiple de medias por el método de Dunn para la k-Page. ....	69
<b>Tabla 25.</b> Comparativo múltiple de medias por el método de Tukey para la k-Midilli.....	70
<b>Tabla 26.</b> Comparativo múltiple de medias por el método de Dunn para la difusividad efectiva.....	75
<b>Tabla 27.</b> Valores de color en el sistema CIE $L^*a^* b^*$ para el chile fresco, escaldado con y sin pretratamiento y deshidratadas.....	81
<b>Tabla 28.</b> Análisis estadístico inferencial de los parámetros de color CIE $L^*a^*b^*$ de muestras de chile de agua chile fresco, escaldado con y sin pretratamiento y deshidratadas. ....	81
<b>Tabla 29.</b> Prueba de Dunn para el parámetro $L^*$ . ....	82
<b>Tabla 30.</b> Prueba de Dunn para el parámetro $a^*$ .....	84
<b>Tabla 31.</b> Prueba de Dunn para el parámetro $b^*$ .....	86
<b>Tabla 32.</b> Prueba de Dunn para el parámetro $C^*$ .....	87
<b>Tabla 33.</b> Contenido de fenoles totales de la muestra fresca, escaldada y escaldada pretratada, así como en los polvos obtenidos a partir de los secados. ....	90
<b>Tabla 34.</b> Análisis estadístico inferencial del contenido de fenoles totales y flavonoides en muestras de chile de agua chile fresco, escaldado con y sin pretratamiento y deshidratadas. ....	91
<b>Tabla 35.</b> Prueba de Dunn para fenoles totales.....	92
<b>Tabla 36.</b> Coeficientes de correlación de Spearman ( $\rho$ ) para los parámetros de color CIE $L^*a^*b^*$ . ....	93
<b>Tabla 37.</b> Prueba de Tukey para flavonoides totales. ....	94

## LISTA DE ABREVIATURAS

CECP	Chile escaldado con pretratamiento de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ al 0.5%
CECP-SCG	Chile escaldado con pretratamiento de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ al 0.5% deshidratado en un secador de charolas giratorias
CECP-SSM	Chile escaldado con pretratamiento de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ al 0.5% deshidratado en un secador solar mixto
CECP-SSM1	Chile escaldado con pretratamiento de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ al 0.5% deshidratado en un secador solar mixto en el día 1
CECP-SSM2	Chile escaldado con pretratamiento de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ al 0.5% deshidratado en un secador solar mixto en el día 2
CESP	Chile escaldado sin pretratamiento
CESP-SCG	Chile escaldado sin pretratamiento deshidratado en un secador de charolas giratorias
CESP-SSM	Chile escaldado sin pretratamiento deshidratado en un secador solar mixto
CESP-SSM1	Chile escaldado sin pretratamiento deshidratado en un secador solar mixto en el día 1
CESP-SSM2	Chile escaldado sin pretratamiento deshidratado en un secador solar mixto en el día 2
$D_{\text{eff}}$	Difusividad efectiva
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
Mdp	Millones de pesos
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SCG	Secador de charolas giratorias
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
SNICS	Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas
SSM	Secador solar mixto
ton	Toneladas

# 1. INTRODUCCIÓN

El chile (*Capsicum spp*) está ampliamente distribuido en nuestro país y presenta una variabilidad genética y morfológica alta (Hernández-Verdugo, Luna-Reyes y Oyama, 2001). Este género es muy importante, debido a que agrupa la mayor diversidad de chiles cultivados o silvestres del país. México se ha caracterizado por ser uno de los principales productores y consumidores de este producto, el cual es un ingrediente fundamental en la gastronomía mexicana. Por tal motivo, el chile tiene un gran impacto social y económico, con una amplia distribución, demanda y un consumo cada vez más generalizado. En el año 2019, en el mundo se produjeron 42,282,184 ton de este fruto en estado fresco y seco, de las cuales aproximadamente el 89.94 % de la producción total la constituye el fruto fresco. En ese mismo año México ocupó el segundo lugar a nivel mundial en la producción de chile fresco aportando 3,238,245 ton de este producto. Mientras que, en el caso de la producción del chile seco, México ocupó el décimo cuarto lugar produciendo 60,706 ton, todo este producto se obtuvo de una superficie total de 179,317 hectáreas (FAO, 2021).

El chile contiene compuestos bioactivos beneficiosos para la salud humana, entre estos componentes se encuentran la vitamina C, capsaicinoides y fenoles, los cuales dependen del desarrollo del fruto, del genotipo, de la etapa de la cosecha, de las condiciones del cultivo y de los procesos de transformación, como el deshidratado (Topuz y Ozdemir, 2007). Todo esto define la composición nutrimental del chile y por tal motivo es de suma importancia identificar estos constituyentes. Los compuestos bioactivos dependiendo de su concentración, otorgan características sensoriales específicas al fruto, las cuales definen la calidad del producto. El chile se considera el vegetal con mayor concentración de vitamina C, en fresco contiene más del doble de vitamina C que el limón y la naranja y casi seis veces más que la toronja (Aguirre-Hernández y Muñoz-Ocoter, 2015).

El chile de agua (*Capsicum annuum* L.) tiene gran importancia social y económica principalmente en los mercados de la capital oaxaqueña perteneciente a la región de valles centrales. Debido a que este alimento es un producto perecedero con una vida media de aproximadamente dos semanas se vuelve necesario buscar alternativas para su conservación. Sin embargo, el chile no se encuentra disponible en todas las regiones del país debido a que es un fruto endémico del estado de Oaxaca limitado a las condiciones

geográficas específicas para su cosecha. Por lo que se ha recurrido al secado de este producto para su mayor disponibilidad y durabilidad. El secado es uno de los primeros métodos para la conservación de los alimentos y debido a sus características es uno de los métodos más utilizados en la actualidad. Este método consiste en eliminar la mayor cantidad de agua de los alimentos para reducir el deterioro enzimático y biológico con el fin de preservar los alimentos el mayor tiempo posible y tratando de conservar las propiedades del producto.

Tradicionalmente el secado de los alimentos se realiza mediante la exposición al sol, debido a que es un método barato, pero se encuentra limitado a climas calurosos y humedades relativas bajas (40-60%) con vientos fuertes (Motevali et al., 2014). Aunado a esto, el proceso presenta grandes desventajas como la exposición al medio ambiente lo que facilita la proliferación de los microorganismos, la exposición a la radiación ultravioleta directa que ocasiona la degradación de los compuestos bioactivos del alimento, obteniéndose así productos de calidad baja, pérdida de producto debido a insectos y aves, así como el tiempo prolongado de secado (Rabha, Muthukumar y Somayaji, 2017a). Debido al agotamiento de los combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural y gas licuado del petróleo) y a su precio variante en el mercado se han buscado alternativas que utilicen energías renovables para disminuir el costo operacional y obtener métodos más eficientes y amigables con el ambiente.

El objetivo primordial del presente trabajo consistió en comparar los procesos de secado de chile de agua (*Capsicum annuum* L.) escaldado con y sin pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5 %. Así como, la variación en el color, contenido de fenoles y flavonoides totales de los distintos productos obtenidos de los procesos de secado estudiados.



## 2. ORIGINALIDAD

Actualmente no existen reportes relacionados con métodos de conservación del chile de agua, entre ellos el secado. Por lo tanto, el presente proyecto que consistió en el uso de dos equipos de secado diseñados y contruidos en la Universidad Tecnológica de la Mixteca (un secador de charolas giratorias y un secador solar mixto) para deshidratar chile de agua escaldado con y sin pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% es el primer estudio relacionado con el procesado de chile de agua. Además, se realizó un análisis comparativo de color, fenoles y flavonoides totales presentes en los productos frescos, escaldados, escaldados pretratados y deshidratados.

## 3. JUSTIFICACIÓN

El chile de agua (*Capsicum annuum* L.) es endémico del estado de Oaxaca y tiene gran importancia social y económica principalmente en los mercados de la capital oaxaqueña perteneciente a la región de valles centrales. Debido a que este alimento es un producto perecedero con una vida media de aproximadamente dos semanas se vuelve necesario buscar alternativas para su conservación. Por otra parte, el método de secado de chile más utilizado por los productores es el secado por exposición directa al sol. Sin embargo, este método a pesar de ser barato, involucra pérdidas de producto debido a las malas condiciones a las que es expuesto, lo que ocasiona la proliferación de microorganismos. Adicionalmente, la calidad del producto es limitada debido a que, durante el secado, el chile sufre una pérdida importante de vitamina C, compuestos fenólicos y flavonoides. Por lo tanto, es importante llevar a cabo la búsqueda de nuevos métodos de secado que ayuden a minimizar la pérdida de principios bioactivos y que los costos del proceso no sean altos.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1. Objetivo general

Comparar los procesos de secado de chile de agua (*Capsicum annuum* L.) escaldado con y sin pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5 %. Así como, la variación en el color, contenido de fenoles y flavonoides totales de los distintos productos obtenidos de los procesos de secado estudiados.

### 4.2. Objetivos específicos

1. Deshidratar chile de agua escaldado sin pretratamiento y pretratado con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% mediante el uso de un secador charolas de giratorias (SCG) y un secador solar mixto (SSM).
2. Obtener los parámetros cinéticos de los procesos de secado.
3. Determinar el modelo matemático con mejor predicción de las curvas de velocidad de secado de chile de agua.
4. Evaluar el cambio de color y contenido de fenoles y flavonoides totales por métodos espectrofotométricos del chile fresco, escaldado, escaldado pretratado y deshidratado.
5. Evaluar el efecto de las condiciones de secado en los productos deshidratados a través de un análisis estadístico comparativo del contenido de los fenoles y flavonoides totales.
6. Encontrar el tratamiento y proceso de secado que muestre la mejor retención de color y contenido de fenoles y flavonoides totales en el chile de agua deshidratado a partir de un análisis estadístico comparativo.

## **5. HIPÓTESIS**

El secado de chile de agua en un secador solar mixto permitirá obtener un producto deshidratado con una mayor retención de color, fenoles y flavonoides totales que en un secador de charolas giratorias a un  $p < 0.05$ .

## 6. MARCO TEÓRICO

En la presente sección se abordarán generalidades acerca del origen e importancia, características taxonómicas, producción y composición química de especies domesticadas del género *Capsicum*. Posteriormente se describirá el chile de agua (*Capsicum annuum* L.). También se tratará el proceso de secado del chile, especialmente con el enfoque particular del secado solar y secado en charolas; así como, los aportes que esta operación tiene en la industria alimentaria. Se mencionarán los factores que afectan a este proceso y los parámetros de calidad del producto deshidratado.

### 6.1. Origen e importancia del chile (*Capsicum spp*)

Todas las especies del género *Capsicum* son originarias de América. El chile junto con la calabaza, el maíz y el frijol, conformaron la base de la alimentación de las culturas de Mesoamérica. En las regiones de Tehuacán, Puebla y en Ocampo, Tamaulipas existen evidencias arqueológicas que indican que el chile empezó a cultivarse entre los años 7000 al 2555 antes de Cristo (a. C.), (Aguirre-Hernández y Muñoz-Ocotero, 2015).

La palabra “chile” proviene del Náhuatl “*chilli*” o “*xilli*” que significa cosa que quema (Mazetto, 2017) y se utiliza para denominar a todas las especies del género *Capsicum*. En el resto del mundo el chile tiene sinónimos como pimiento, cayena, ají o morrón. En el México prehispánico se utilizaban los términos en náhuatl *cococ*, *cocopotic* y *cocopolatic* para clasificar la variedad de los chiles según el grado de picor o pungencia en picantes, muy picantes y picantísimos, respectivamente. En ese tiempo, el chile logró convertirse en uno de los tributos más solicitados en culturas indígenas, por lo que se supone que ellos iniciaron la domesticación con varias variedades con diferente grado de pungencia. Desde América, el chile fue llevado a Europa, Asia y África por los conquistadores españoles y portugueses, y se convirtió en un cultivo de uso mundial.

#### 6.1.1. Descripción botánica del género *Capsicum*

El género *Capsicum* pertenece a la familia *Solanaceae*, la cual está conformada por aproximadamente 96 géneros y 2,300 especies. El género *Capsicum* incluye 33 especies y 10 variedades, las cuales se pueden diferenciar por su forma, tamaño, color y grado de

pungencia. De estas especies, cinco se han domesticado, *C. annuum* L., *C. baccatum* L., *C. chinense* Jacq., *C. frutescens* L. y *C. pubescens* (Pérez et al., 2015). En la Tabla 1, se presenta la clasificación taxonómica de *Capsicum* que está de acuerdo a la descripción que hace la Comisión del Codex Alimentarius (2008).

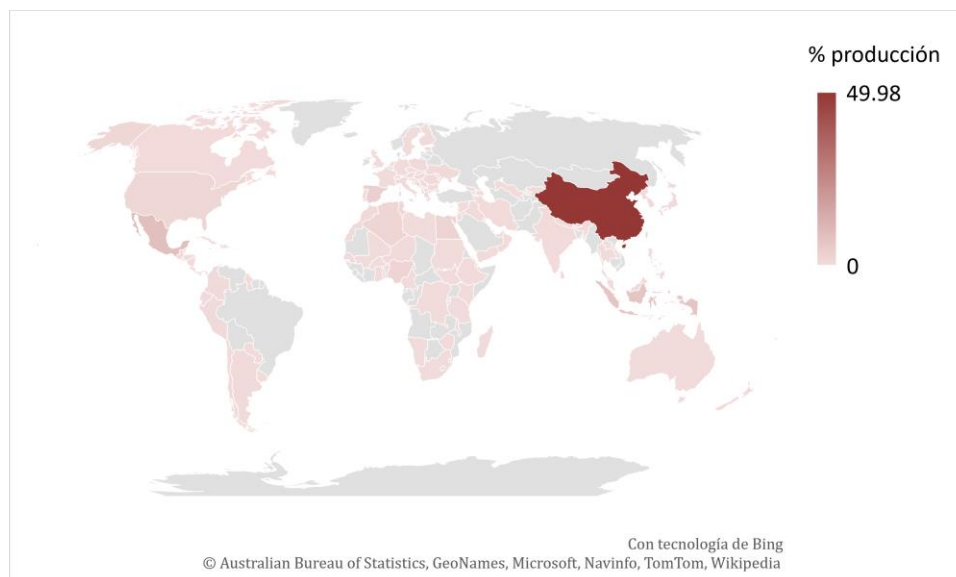
**Tabla 1.** Clasificación general por jerarquías taxonómicas para *Capsicum* (Comisión del Codex Alimentarius, 2008)

Reino	<i>Plantae</i>
Subreino	<i>Tracheobionta</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Subclase	<i>Asteridae</i>
Orden	<i>Solanales</i>
Familia	<i>Solanaceae</i>
Subfamilia	<i>Solanoideae</i>
Género	<i>Capsicum</i>

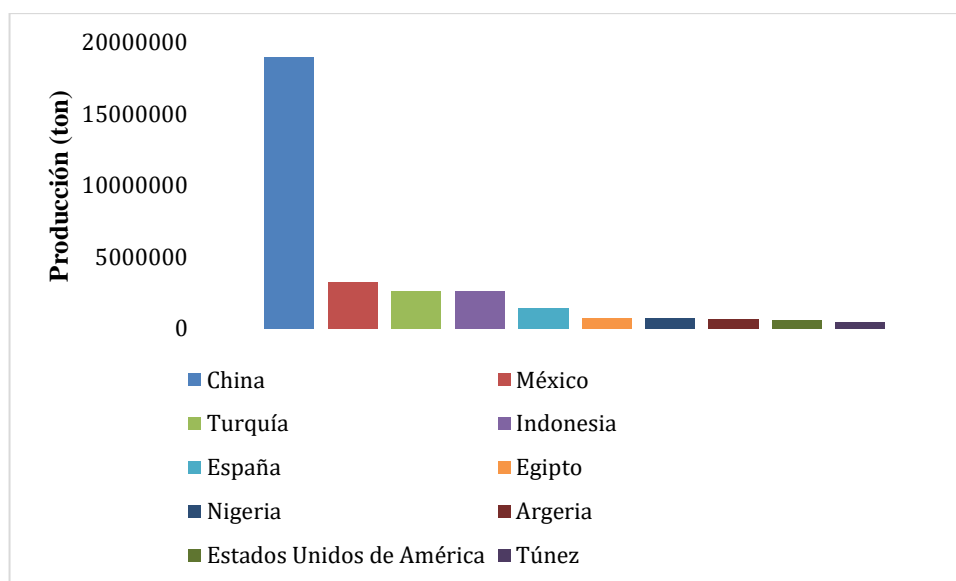
### 6.1.2. Producción de chile a nivel mundial

Hoy en día el chile tiene gran importancia social y económica debido a que es un ingrediente fundamental utilizado ampliamente en diversos platillos en la gastronomía mundial. Esto ha traído como consecuencia que la producción mundial de chile se incremente de manera importante en los últimos años, conduciendo a una amplia distribución y demanda, así como un consumo cada vez más generalizado.

Este incremento en la producción está asociado principalmente a los chiles con un grado de pungencia alto. Esto se debe a la creciente demanda del producto en todas sus presentaciones (fresco y procesado), para la industria alimentaria y para consumo directo. De acuerdo a la FAO, en el 2019 se produjeron 42,282,184 ton de este fruto fresco y seco. Cabe resaltar que cerca del 89.94% (38,027,134 toneladas) de la producción total la constituye el fruto fresco. China ocupa el primer lugar en producción de chile fresco con un 49.98% de la producción mundial (Figura 1). México ocupa el segundo lugar con el 8.52%, siguiéndole Turquía con un 6.90%, Indonesia 6.81%, España 3.69% y Egipto 2.01%, (FAOSTAT, 2021), Figura 2.

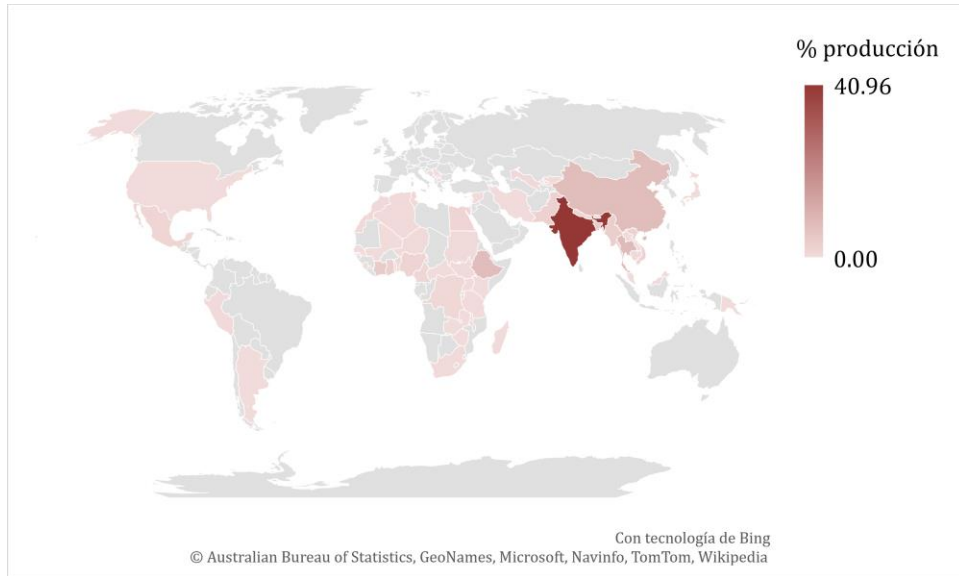


**Figura 1.** Producción mundial de chile fresco en 2019 (FAOSTAT, 2021).

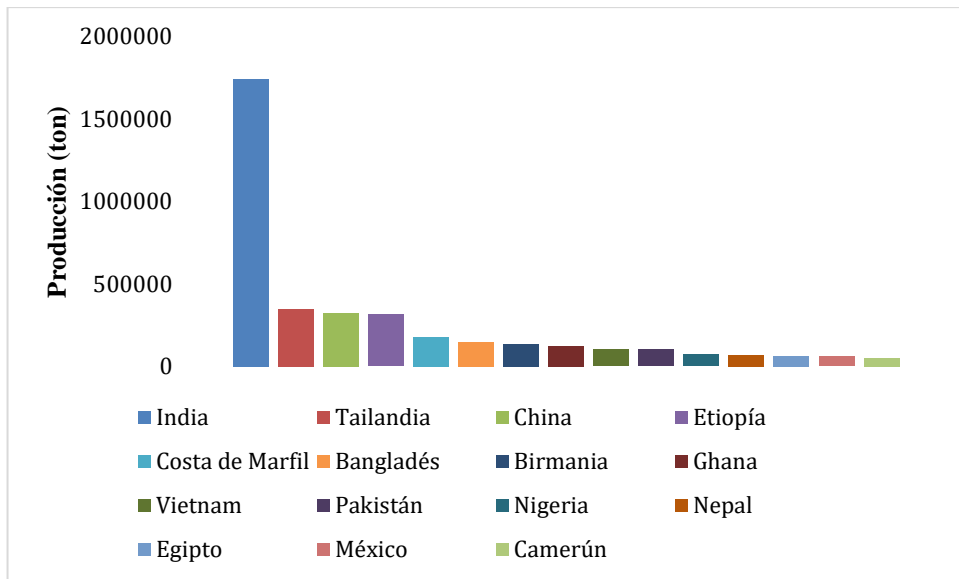


**Figura 2.** Principales países productores de chile fresco en 2019 (FAOSTAT, 2021).

Para el caso del chile seco, la producción es de 4,255,050 ton, las cuales representan el 10.1% de la producción total mundial. De acuerdo con la FAO en 2019 México ocupó el décimo cuarto lugar en la producción de este producto, con un total de 60,706 ton que equivalen al 1.43% de la producción total de chile seco, obtenidas de una superficie de 18,443 hectáreas, y se encuentra por debajo de India que produce el 40.96% (Figuras 3 y 4).

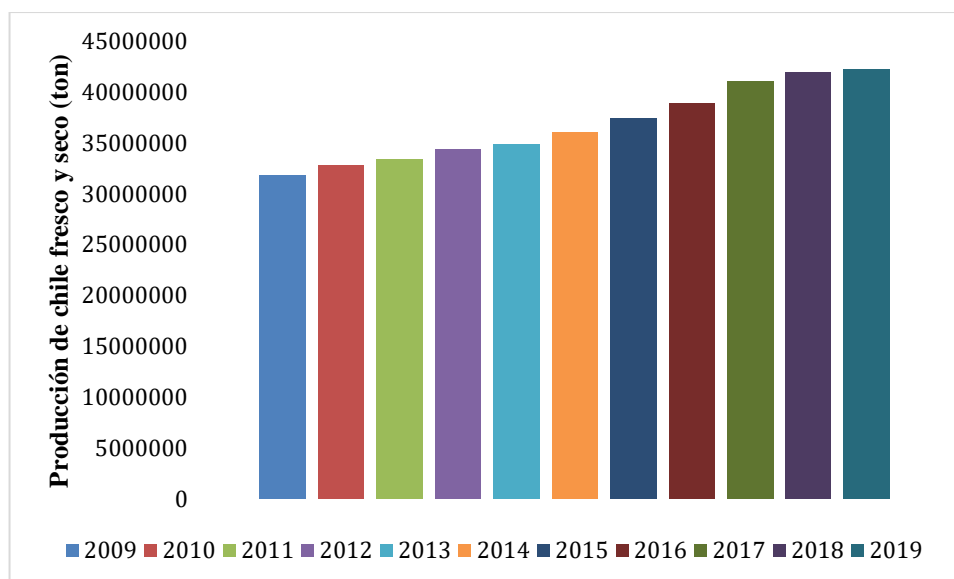


**Figura 3.** Producción mundial de chile seco en 2019 (FAOSTAT, 2021).



**Figura 4.** Principales países productores de chile seco en 2019 (FAOSTAT, 2021).

En los últimos años se ha visto un incremento considerable en la producción de chile en sus diferentes presentaciones (FAOSTAT, 2021), Figura 5.



**Figura 5.** Producción mundial de chile fresco y seco (FAOSTAT, 2021).

### 6.1.3. *Capsicum annuum* en México

La especie *C. annuum* está ampliamente distribuida en todo el mundo, esta especie es la más importante, debido a que agrupa la mayor diversidad de chiles cultivados o silvestres en nuestro país, los cuales varían en color, tamaño, morfología y composición química. México se ha caracterizado por ser uno de los principales productores y consumidores de este producto.

De acuerdo con SADER (2015) el chile fue el 8° cultivo con mayor valor generado en la agricultura nacional, alcanzando alrededor de 13,000 a 14,268 mdp anualmente, con un volumen de producción de 2,389,829 ton según la FAO (2015), de las cuales se exportaron cerca de 900,000 ton de chiles frescos, secos y en preparaciones.

De acuerdo con la FAO (2016) la producción de chile en México alcanzó las 2,737,028 ton, con una aportación de aproximadamente de 22,500 mdp ocupando el 5° puesto dentro de los 20 productos principales que el país comercializa a nivel internacional.

El consumo de chile per cápita en México es de 16 kg anualmente, abarcando aproximadamente el 20% de la producción de hortalizas. Los principales destinos de exportación del chile mexicano son Estados Unidos, Canadá y España. Dentro del sector agrícola, la exportación de chiles y pimientos ocupa el tercer lugar, antecedido sólo por la venta de tomate y aguacate. En el periodo comprendido de enero a agosto del 2016 se



obtuvieron 789 millones de dólares por exportaciones de chile y pimientos. Esto representó un aumento en las exportaciones de chile del 31.6% en ese año (SADER, 2016). Las principales variedades de chile cultivadas son el jalapeño, serrano, poblano, morrón y habanero.

Los principales productores de chile verde fueron los estados de Chihuahua, Sinaloa y Zacatecas, quienes aportaron más de un tercio de la producción total nacional, con una producción de 2,177,000 ton con un valor de 14,268 mdp. Los estados de Guanajuato, Jalisco, Querétaro, Durango y Coahuila son los productores principales de chile verde morrón con una producción de 104,400 ton con un equivalente de 1,491 mdp. Los principales estados productores de chile habanero son Yucatán, Tabasco y Campeche produciendo 98,127 ton de este producto con un valor de 166.9 mdp en el 2019. La producción de chile seco, alcanzó las 98,127 ton con un valor de 6,658 millones de pesos. Los estados que aportan un mayor volumen a la producción nacional son Chihuahua, Zacatecas, San Luis Potosí y Durango (SADER, 2016). De acuerdo con SIAP (2010), Oaxaca en el 2009 ocupó el 20° lugar de la producción nacional de chile representando el 0.5% de la producción total de ese año con un aporte de 11,000 toneladas.

#### **6.1.4. Composición química del chile**

La composición de los frutos del género *C. annuum* es resultado de los constituyentes bioactivos que contiene, los cuales dependen del desarrollo del fruto, del genotipo, de la etapa de la cosecha, de las condiciones del cultivo y de los procesos de transformación, tal como el deshidratado. Todo esto define la composición nutrimental del chile y por tal motivo es importante identificar estos constituyentes. Entre estos componentes se encuentran la vitamina C, capsaicinoides y fenoles (Topuz y Ozdemi, 2007). Este último grupo de compuestos incluye a los flavonoides. Los compuestos bioactivos, dependiendo de su concentración, otorgan características sensoriales específicas al fruto, las cuales definen la calidad del producto. Baenas et al. (2019) llevaron a cabo una recopilación de información de la composición química del chile dulce fresco (*C. annuum* L.), incluyendo micronutrientes y compuestos bioactivos, Tabla 2.

**Tabla 2.** Composición química de chile dulce verde (*C. annuum* L.), (Baenas et al., 2019).

<b>Componente químico</b>	<b>mg/100 g de muestra base húmeda</b>
<b>Minerales</b>	
Calcio (Ca)	7–18
Hierro (Fe)	0.3–1.2
Magnesio, (Mg)	12–25
Fósforo (P)	26–46
Potasio (K)	211–340
Sodio (Na)	4–7
Zinc (Zn)	0.2–0.7
Cobre (Cu)	0.015–0.07
Manganeso (Mn)	0.05–0.16
Boro (B)	0.05–0.16
Selenio (Se)	0.0001–0.001
<b>Vitaminas y compuestos bioactivos</b>	
Vitamina C (ácido ascórbico total)	127–300
Tiamina	0.03–0.09
Riboflavina	0.03–0.09
Niacina	0.9
Ácido pantoténico	0.317
Vitamina B6	0.17–0.29
Colina	5.6
Vitamina A	0.01–0.16
Vitamina E ( $\alpha$ -tocoferol)	0.7–1.6
Vitamina K	0.005–0.014
$\alpha$ -caroteno	0.020
$\beta$ -caroteno	0.5–1.64
$\beta$ -criptoxantina	0.5–1.2
Quercetina	0.2
Flavonoles totales	5–20
Ácidos fenólicos totales	50–500
Antocianinas totales	0.5–28
Capsaicina	0.07–0.1
Dihidrocapsaicina	0.07–0.1
Capsainoides totales	3.0–50

Los datos se reportan como el valor promedio de tres réplicas y los autores no presenta los valores de las desviaciones estándar.

Ionică, Nour y Trandafir (2017) reportaron la concentración de materia seca, ácido ascórbico, compuestos fenólicos, flavonoides totales y capsaicina en cinco etapas de desarrollo y maduración de los cultivares de chile Drácula, Pinteá, Pepperone, zanahoria búlgara (*C. annuum*) y campana de Navidad (*C. baccatum* var. péndulo), los resultados se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Contenido de materia seca y compuestos bioactivos de los cultivares de chile en cinco etapas de desarrollo y maduración (Ionică et al., 2017).

Chile	Drácula	Pintea	Pepperone	Zanahoria Búlgara	Campana de navidad
<b>Materia seca (%)</b>					
F1	10.11±1.41 <sup>c</sup>	11.38±1.09 <sup>b</sup>	11.80±1.41 <sup>ab</sup>	12.39±1.36 <sup>a</sup>	12.53±1.62 <sup>a</sup>
F2	9.99±1.19 <sup>c</sup>	10.65±1.17 <sup>bc</sup>	10.50±1.29 <sup>b</sup>	10.1±1.11 <sup>bc</sup>	12.13±1.49 <sup>a</sup>
F3	10.86±1.75 <sup>c</sup>	11.47±1.37 <sup>b</sup>	13.31±1.73 <sup>a</sup>	10.57±1.26 <sup>c</sup>	12.73±1.52 <sup>ab</sup>
F4	15.96±2.01 <sup>b</sup>	14.17±1.73 <sup>bc</sup>	15.42±2.15 <sup>b</sup>	18.00±2.52 <sup>a</sup>	13.66±1.77 <sup>c</sup>
F5	17.43±2.26 <sup>b</sup>	16.16±2.02 <sup>c</sup>	18.71±2.6 <sup>a</sup>	18.09±2.48 <sup>a</sup>	17.53±2.38 <sup>ab</sup>
<b>Ácido ascórbico (mg/kg peso fresco)</b>					
F1	170.3±15.4 <sup>a</sup>	152.8±12.8 <sup>b</sup>	169.8±14.2 <sup>ab</sup>	173.6±13.6 <sup>a</sup>	105.4±90.8 <sup>c</sup>
F2	1186.5±108.7 <sup>a</sup>	1102.±97.3 <sup>d</sup>	1188.2±99.1 <sup>a</sup>	1178.9±86.7 <sup>b</sup>	1158.4±109.2 <sup>c</sup>
F3	1104.6±100.4 <sup>c</sup>	1123.2±104.1 <sup>bc</sup>	1191.0±110.5 <sup>b</sup>	1289.2±116.9 <sup>a</sup>	1259.5±114.9 <sup>a</sup>
F4	1211.2±109.6 <sup>c</sup>	1149.5±98.3 <sup>de</sup>	1176.2±105.8 <sup>d</sup>	1297.6±113.7 <sup>b</sup>	1393.6±121.4 <sup>a</sup>
F5	1383.1±118.7 <sup>c</sup>	1161.3±106.1 <sup>d</sup>	1387.1±120.8 <sup>bc</sup>	1603.6±147.5 <sup>a</sup>	1446.5±137.3 <sup>b</sup>
<b>Fenoles totales (mg de ácido gálico/kg peso seco)</b>					
F1	3074.3±284.1 <sup>b</sup>	3210.3±301.2 <sup>a</sup>	3087.0±287.6 <sup>ab</sup>	3299.9±301.1 <sup>a</sup>	2768.2±265.3 <sup>c</sup>
F2	3358.9±297.2 <sup>b</sup>	3253.2±298.7 <sup>bc</sup>	3462.8±300.9 <sup>b</sup>	3779.3±369.3 <sup>a</sup>	2878.9±279.6 <sup>c</sup>
F3	3450.0±300.1 <sup>cd</sup>	4965.7±405.9 <sup>a</sup>	3525.1±312.6 <sup>c</sup>	3758.1±358.5 <sup>b</sup>	3267.7±311.4 <sup>d</sup>
F4	3645.6±315.1 <sup>d</sup>	7026.6±691.4 <sup>a</sup>	4435.5±403.1 <sup>c</sup>	6476.1±609.3 <sup>b</sup>	3248.3±311.7 <sup>d</sup>
F5	5146.4±463.7 <sup>c</sup>	8331.3±786.7 <sup>a</sup>	6433.5±503.8 <sup>b</sup>	2964.2±275.3 <sup>c</sup>	3744.8±350.2 <sup>d</sup>
<b>Flavonoides totales (mg equivalentes de quercetina/kg peso seco)</b>					
F1	1896.9±176.5 <sup>c</sup>	1853.8±171.3 <sup>c</sup>	2218.3±199.8 <sup>bc</sup>	4532.9±432.0 <sup>a</sup>	2415.1±230.2 <sup>b</sup>
F2	1422.6±139.7 <sup>d</sup>	1996.3±183.7 <sup>c</sup>	2286.1±202.1 <sup>b</sup>	4569.7±408.2 <sup>a</sup>	2001.4±198.7 <sup>b</sup>
F3	1868.2±183.1 <sup>b</sup>	1819.6±167.9 <sup>bc</sup>	1849.4±169.8 <sup>b</sup>	3397.9±311.3 <sup>a</sup>	1774.0±163.5 <sup>c</sup>
F4	1633.0±156.7 <sup>d</sup>	2726.1±222.6 <sup>a</sup>	2340.4±201.5 <sup>b</sup>	2382.7±202.9 <sup>b</sup>	1844.2±187.3 <sup>c</sup>
F5	5461.9±497.8 <sup>b</sup>	5247.3±497.9 <sup>bc</sup>	7666.1±700.8 <sup>a</sup>	1435.6±122.7 <sup>d</sup>	2848.8±256.4 <sup>c</sup>
<b>Capsaicina (mg/kg peso seco)</b>					
F1	4.98±0.45 <sup>c</sup>	37.57±3.28 <sup>b</sup>	45.16±5.03 <sup>a</sup>	0	0
F2	5.19±0.49 <sup>c</sup>	705.90±56.91 <sup>a</sup>	429.55±40.89 <sup>b</sup>	11.10±0.98 <sup>d</sup>	38.07±3.77 <sup>e</sup>
F3	24.85±2.89 <sup>e</sup>	2229.8±220.4 <sup>a</sup>	777.49±75.69 <sup>b</sup>	438.46±39.69 <sup>c</sup>	126.78±11.59 <sup>d</sup>
F4	16.89±1.56 <sup>e</sup>	1814.9±179.6 <sup>a</sup>	405.90±38.45 <sup>c</sup>	990.37±93.15 <sup>b</sup>	187.90±17.73 <sup>d</sup>
F5	18.64±1.72 <sup>e</sup>	1797.5±17.0 <sup>a</sup>	501.07±48.71 <sup>c</sup>	656.13±62.99 <sup>b</sup>	30.46±2.86 <sup>d</sup>

F1=14 días, F2=20 días, F3=30 días, F4=40 días, F5=50 días, después de la floración (madurez fisiológica). Los datos se reportan como el valor promedio de tres replicas ± desviación estándar y diferentes letras dentro de la misma fila, indican diferencias significativas entre cultivares ( $p<0.05$ ).

## 6.2. Chile de agua (*Capsicum annuum* L.)

Según el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS) (2017) en el país se han identificado 64 variedades de chiles, siendo Oaxaca el estado con mayor diversidad con al menos 25, seguido de Guerrero con 12, Puebla con 10 y Veracruz con nueve. Debido a esta variedad de especies de chiles, se ha desarrollado una economía local de la que dependen familias de productores para sobrevivir o mejorar el bienestar familiar. Muchas de estas variedades de chile, se continúan cultivando gracias a la gran interrelación

con la riqueza culinaria, inmersa en el complejo étnico cultural que caracteriza a México.

Los cultivos de chile de mayor importancia en el estado de Oaxaca son el habanero, seco, costeño, pasilla, jalapeño, serrano, chile de agua y soledad. Específicamente en la región de los valles centrales se realiza el cultivo del chile de agua, el cual es nativo del estado de Oaxaca (Vera-Guzmán et al., 2011). El chile de agua se comercializa en fresco principalmente en los mercados de la capital oaxaqueña. En 2010 se cosecharon 249.2 hectáreas con una producción de 1,584 toneladas de este chile en la región de los Valles Centrales de Oaxaca (Castellón et al., 2012). Cabe hacer mención que el chile de agua también se cultiva en la región mixteca oaxaqueña.

### 6.2.1. Morfología del chile de agua

El chile de agua es una baya de una forma cónica alargada con un diámetro promedio de 6 cm en su base y 15 cm de largo. Este chile adquiere distintos colores, los cuales dependen de su estado de madurez, estos colores pueden ser verde amarillo, verde oscuro, rojo intenso y brillante. Posee un pericarpio que mide entre 1 y 3 mm de espesor y tiene un pedúnculo de entre 3 a 6 mm de diámetro y 3 cm de largo. Sus semillas son de color blanco en fruto seco y amarillas en fruto fresco, son de forma reniforme, lisas y sin brillo, con un diámetro promedio de 4 mm (Aguilar-Rincón et al, 2010), Figura 6.

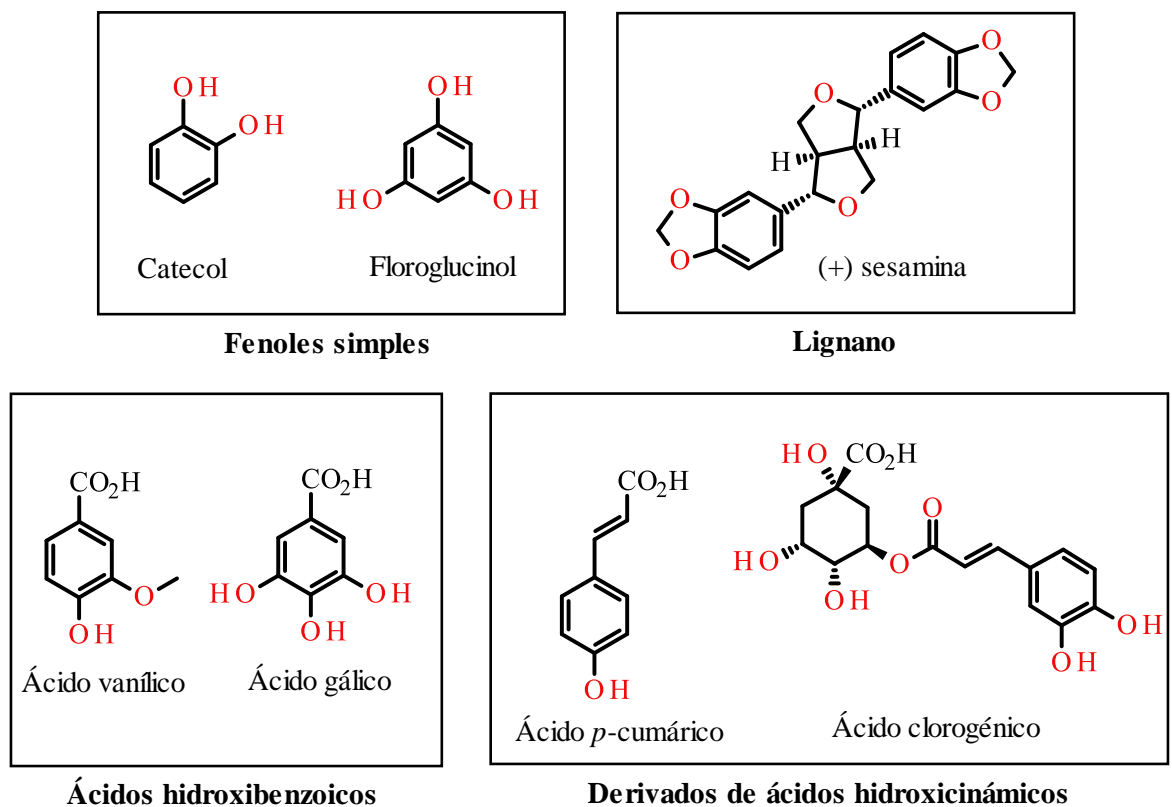


**Figura 6.** Cultivo de chile de agua a cielo abierto (izquierda) y morfología del chile de agua (*C. annuum* L.) (derecha).

### **6.3. Compuestos fenólicos**

Los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios derivados de las vías de la pentosa fosfato, el shikimato y el fenilpropanoide de las plantas. Constituyen un grupo extenso de componentes químicos, con diferentes estructuras y son responsables de la pigmentación de los alimentos. Estos compuestos son resultado de la adaptación de la planta a las condiciones de estrés biótico y abiótico (infecciones, heridas, estrés hídrico, estrés por frío, incidencia de radiación solar alta) a las que está sometida (De la Rosa, Moreno-Escamilla y Rodrigo-García, 2019). Por lo cual están relacionados con la calidad sensorial de los alimentos de origen vegetal. Químicamente, estos compuestos están constituidos por un anillo aromático y con uno o más grupos hidroxilo y sus derivados funcionales (glicósidos, ésteres y metilésteres, etc.), englobando más de 8000 compuestos distintos (Martínez, Periago y Ros, 2000; Reynaud et al., 2010).

Según Harborne (1989), los compuestos fenólicos se pueden clasificar de acuerdo a su estructura, los grupos de mayor interés nutrimental son los fenoles simples, ácidos fenólicos y fenilacéticos, los ácidos hidroxicinámicos, ácidos hidroxibenzoicos, cumarinas, isocumarinas y cromonoles, lignanos y ligninas, flavonoides, taninos, benzofenonas, xantonas, estilbenos, quinonas y betacianinas, Figura 7. De este conjunto de fenoles, el chile contiene flavonoides y su concentración está determinada por el genotipo, la etapa de madurez y las condiciones durante el crecimiento y después de la cosecha. Por lo tanto, en la sección siguiente se describirán con más detalle.



**Figura 7.** Estructuras químicas de los compuestos fenólicos.

### 6.3.1. Propiedades funcionales de los compuestos fenólicos

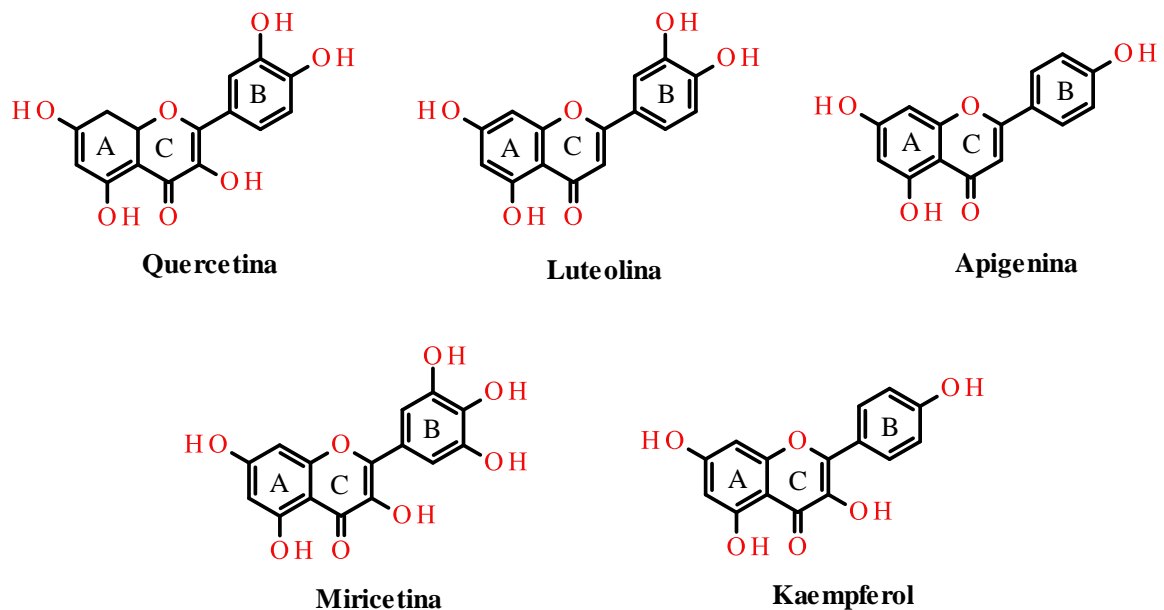
El chile además de sus características sensoriales, como la pungencia, el aroma y el color, son fuentes importantes de compuestos bioactivos, los compuestos fenólicos y los flavonoides, que ofrecen beneficios para la salud de los consumidores. Estos metabolitos secundarios debido a sus propiedades funcionales podrían utilizarse como fuente de nutrientes en la industria alimentaria o servir como metabolitos naturales en la industria farmacéutica.

En la última década se han realizado estudios intensivos de estos compuestos en relación a sus propiedades antioxidantes. Esto se debe a que pueden inactivar a los radicales libres, los cuales alteran el equilibrio homeostático del cuerpo humano. Además, los compuestos fenólicos están relacionados con propiedades funcionales contra el desarrollo de infecciones y enfermedades como el cáncer, diabetes, asma, enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas (Pandey y Rizvi, 2009). Adicionalmente estos compuestos presentan efectos antimicrobianos, antivirales, antiinflamatorios,

hipolipidémicos e hipoglucémicos (Lima et al., 2019).

#### **6.4. Flavonoides**

Los flavonoides son compuestos con una potente actividad antioxidante, constituyen el grupo más importante dentro de la clasificación de los fenoles, dividiéndose en varias subclases con más de 5000 compuestos, encontrándose distribuidos en la mayoría de las plantas. Los flavonoides son compuestos fenólicos de peso molecular bajo, constituidos por dos anillos de benceno (A y B) unidos a través de un anillo de pirona o pirano heterocíclico (C), esto permite encontrar distintas variaciones estructurales. Dentro de este grupo se encuentran los flavonoles, flavonas, flavanoles, isoflavonoides, catequinas, chalconas, dihidrochalconas, antocianidinas, leucoantocianidinas y proantocianidinas (Reynaud et al., 2010). El chile (*C. annuum*) contiene flavonoides como quercetina (flanovol), luteolína (flavona), apigenina (flavona), kaempferol (flanovol) y miricetina (flanovol) con sus respectivas variantes glicosiladas, Figura 8. De las cuales, la quercetina y la luteolina particularmente en su forma hidrolizada representan aproximadamente el 41% del contenido total de flavonoides. Generalmente, el contenido de flavonoides se cuantifica como la suma de todo el conjunto de los compuestos y están reportados dos métodos espectrofotométricos para su cuantificación (Antonio, Wiedemann y Veiga, 2018).



**Figura 8.** Estructuras químicas de flavonoides encontrados en *C. annuum* (Antonio et al., 2018).

#### 6.4.1. Propiedades funcionales de los flavonoides

Los flavonoides tienen la capacidad de eliminar radicales libres y quelar metales, por lo que, dada la relación hipotética entre la diabetes, la inflamación y el potencial de los flavonoides para proteger el cuerpo contra los radicales libres y otros compuestos prooxidativos, es biológicamente plausible que el consumo de flavonoides o alimentos ricos en flavonoides puede reducir el riesgo de diabetes (Vinayagam y Xu, 2015). Además, los flavonoides se relacionan con propiedades preventivas en procesos inflamatorios, hipertensión, artritis y cáncer, principalmente debido a su actividad antioxidante (Antonio et al., 2018).

La quercetina es uno de los flavonoles más utilizados en la nutrición dietética humana y se encuentra en varias especies del género *Capsicum*. Diversos estudios se han centrado en la quercetina para desarrollar fármacos antidiabéticos para prevenir y controlar la diabetes mellitus tipo 2. Estudios en murinos permitieron conocer el mecanismo de acción de la quercetina en la diabetes, así como la disminución de la peroxidación de lípidos, el aumento en la actividad de las enzimas antioxidantes (tal como, la superóxido dismutasa, glutatión peroxidasa y catalasa), la inhibición de la activación insulino dependiente del



fosfoinositol 3-quinasa y la reducción de la absorción intestinal de glucosa al inhibir el transportador de glucosa 2. La apigenina, otro flavonoide encontrado en el chile ha demostrado la mejora de la hiperglucemia y niveles de antioxidantes en ratones diabéticos. Además, el kaempferol, es capaz de disminuir el aumento del nivel de glucosa en suero y aumentar la captación de glucosa en el músculo sóleo de ratas con tanta eficacia como la insulina. Los resultados *in vitro* demostraron que el tratamiento con kaempferol (10  $\mu$ M) promovió la viabilidad, inhibió la apoptosis celular y redujo la actividad de caspasa-3 en células- $\beta$  e islotes de Langerhans humanos expuestos crónicamente a condiciones hiperglucémicas (Vinayagam y Xu, 2015).

### **6.5. Métodos de conservación del chile**

La mayor parte de la producción de chile se consume en fresco, *vide supra*; sin embargo, el chile se puede conservar mediante varios métodos de conservación, entre ellos se puede encontrar el uso de atmósferas modificadas o métodos de secado, tales como el secado en tambor rotatorio, tambor rotatorio al vacío y en presencia de microondas y liofilizado. Estos métodos se describen a continuación:

Respecto al uso de atmósferas modificadas, Coop-Gamas et al. (2011) utilizaron una mezcla de gases de 5% de O<sub>2</sub>, 5% de CO<sub>2</sub> y 90% de N<sub>2</sub> a condiciones de refrigeración de 10 $\pm$ 1 °C para conservar chile habanero fresco entero y encontraron que se puede conservar durante 16 días. Por otra parte, Tagong et al. (2016) reportaron el secado de chile Chinda entero mediante un secador de tambor rotatorio con dimensiones de 60 cm de largo x 120 cm de ancho utilizando la energía térmica de gas LP. Este secado se realizó con dos diseños de experimentos, el primero a diversas velocidades de rotación 3, 5 y 7 rpm a una temperatura constante de 105 °C y un tiempo de 6 h. El segundo diseño consistió en variar la temperatura en intervalos de 10 °C, desde 60 hasta 110 °C, a una velocidad de rotación constante de 5 rpm con tiempos de secado que oscilan entre las 4 y 14 h.

También se tiene reportado por Kaensup, Chutima y Wongwises (2002) el secado de chile rojo fresco entero con una longitud promedio de 70 mm, mediante un secador de tambor rotatorio al vacío con velocidades de rotación del tambor de 10, 20 y 25 rpm a presiones reducidas de 60, 160 y 260 mmHg. Mientras que Guiné y Borroca (2012) realizaron el secado de chile verde fresco con muestras de 2 x 2 cm en un liofilizador (modelo Table

Top TFD5505) durante 38 h a una temperatura entre -47 °C y -50 °C y una presión de 5 mTorr (0.666 Pa).

Sin embargo, los métodos más utilizados son el deshidratado en secadores de charolas y el deshidratado al sol, *vide infra*. La importancia de los distintos métodos de conservación radica en mantener las propiedades sensoriales y químicas del producto, por ello estas propiedades del producto dependen de los parámetros que están asociados a los métodos, tales como la temperatura, humedad del producto, humedad relativa del aire, velocidad de aireación, presión, tiempo de secado, etc. De aquí la importancia de determinar las condiciones óptimas para la conservación de los alimentos, *vide infra*.

## **6.6. Secado**

El secado es uno de los primeros métodos empleados para la conservación de los alimentos y debido a sus características es uno de los métodos más utilizados en la actualidad. Este método consiste en eliminar la mayor cantidad de agua de los alimentos para reducir el deterioro enzimático y biológico con el fin de preservar los alimentos el mayor tiempo posible y tratando de conservar las propiedades del producto. El secado se basa en la aplicación de calor al producto para evaporar el agua que contiene. Esta energía calorífica se puede obtener de la quema de combustibles fósiles, biocombustibles y energía solar.

Tradicionalmente el secado de los alimentos se realiza por exposición directa al sol a cielo abierto. Este secado es un método de costo bajo; sin embargo, este proceso presenta desventajas como la exposición al medio ambiente lo que facilita la proliferación de los microorganismos, pérdida de producto debido a insectos y aves, y un prolongado tiempo de secado con exposición a radiación ultravioleta directa, lo que ocasiona la degradación de los compuestos bioactivos del alimento, obteniéndose así productos de calidad baja (Rabha et al., 2017a).

Sin embargo, el agotamiento de los combustibles fósiles y su precio variante en el mercado, en la actualidad se requieren de alternativas que utilicen energías renovables para disminuir el costo operacional y obtener métodos más eficientes y amigables con el ambiente.

Existen diferentes secadores que utilizan transferencia de calor mediante aire como el secador de túnel, secador rotatorio, secador de cilindro rotatorio, secador de tambor

rotatorio, secador por aspersión, secador de lechos fluidizados y secador de charolas estáticas y charolas giratorias.

A continuación, se describen los métodos de secado que se utilizarán en el presente proyecto.

#### **6.6.1. Secado mediante secador de charolas**

El método de secado más utilizado en la industria es por convección mediante aire caliente. Uno de los métodos más utilizados para secado de frutas y hortalizas implica el uso de un secador de charolas estático, este equipo también es llamado secador de anaqueles, de gabinete o de compartimentos. Este equipo es de funcionamiento discontinuo (por lotes) y calentamiento directo por convección de aire caliente. El aire es calentado mediante resistencias eléctricas, vapor de agua o un gas inerte y después es distribuido en el interior de la cámara de secado. Estos secadores presentan varios inconvenientes, el producto no se seca uniformemente debido a que no existe una buena circulación. Consecuentemente, las charolas tienen que moverse de lugar cada determinado tiempo para obtener un producto homogéneo (Pérez-Herrera, 2006). Aunado a lo anterior, al utilizar aire caliente como agente secante existen desventajas como pérdidas de energía térmica, conductividad térmica baja, formación de costras en el alimento, tiempos de secado relativamente largos, así como una calidad deficiente y la contracción del producto seco (Motevali et al., 2014). Por tales razones se han buscado alternativas para mejorar este tipo de equipos, una alternativa directa a este problema son los secadores de charolas giratorias. Santos-Sánchez et al. (2012) determinaron que el secador de charolas giratorias facilita el proceso de secado. Se encontró que el tomate secado en este equipo contiene mayor cantidad de antioxidantes, color y relación de rehidratación que un secador de charolas estáticas, esto debido a que el aire caliente del equipo se distribuye mejor a causa de la rotación de las charolas, lo que implica una mejor superficie de contacto y esto a su vez acelera la evaporación del agua desde el alimento.

#### **6.6.2. Secado solar**

Los secadores son los equipos más comunes utilizados en la industria alimentaria para reducir el contenido de humedad de los alimentos (Ghasemkhani et al., 2016). Sin

embargo, a pesar de ser el método más utilizado para conservar los alimentos, es un proceso costoso debido al consumo elevado de energía que se necesita. Por lo tanto, se han buscado alternativas innovadoras y nuevas técnicas de secado para ahorrar energía y minimizar los costos de producción en la operación de secado. Una alternativa renovable es el secado mediante secadores solares debido a que es una forma eficiente de utilizar la energía solar. En estos secadores los productos se secan en un espacio cerrado aprovechando la energía solar durante el día, lo cual facilita obtener temperaturas relativamente altas que permiten la evaporación de la humedad del producto, disminuyendo la humedad relativa del aire (Rabha et al., 2017a).

El secador solar mixto con flujo direccionado de aire es una alternativa renovable para el deshidratado de productos alimenticios frescos, con la finalidad de conseguir productos deshidratados de calidad. Este secador cuenta con una distribución homogénea de aire secante desde la parte inferior o desde las paredes laterales de la cámara de secado. Este equipo tiene dos colectores solares y un sistema de inclinación para mejorar la captación de radiación solar durante el día permitiendo que el aire se caliente dentro de los colectores solares y haciendo los tiempos de secado más cortos respecto a otros secadores solares. El colector y la cámara de secado están conectados a través de un ducto circular flexible termoaislante que transporta el aire caliente desde el colector hacia el difusor de aire y al subsistema de distribución de aire dentro de la cámara de secado. La extracción de la humedad dentro de la cámara se realiza por convección natural y forzada (López-Luis et al., 2018), Figura 9. Cabe mencionar que este equipo se utilizó en el secado de las muestras de chile de agua en el presente estudio.



**Figura 9.** Secador solar mixto.

### 6.6.3. Parámetros que afectan el proceso de secado

El proceso de secado de los alimentos está limitado por varios parámetros que en conjunto definen las características finales del producto seco. Estos parámetros son la temperatura de secado, el tiempo de secado, la velocidad del aire secante, humedad relativa del aire, la actividad acuosa ( $A_w$ ) y un pretratamiento del alimento.

El contenido de agua de los alimentos define sus propiedades coligativas, reológicas y de textura e influye en las reacciones físicas, químicas, enzimáticas y microbiológicas. El agua de un alimento se puede dividir en dos estados, el agua libre disponible para el crecimiento de los microorganismos, y el agua ligada no disponible o inmóvil. La actividad acuosa ( $A_w$ ), es una fracción del agua que tiene movilidad o disponibilidad y está estrechamente relacionada con el agua libre del alimento, dependiendo de ésta se puede predecir la estabilidad y la vida útil de un producto. Este parámetro está relacionado con el control de los procesos de deshidratación y de rehidratación (Badui-Dergal, 2006).

El tiempo de secado puede ser reducido si la temperatura del secado es relativamente alta, ya que conforme se incrementa la temperatura se acelera la eliminación de humedad del alimento; sin embargo, a temperaturas de entre 60 y 90 °C las verduras experimentan

cambios físicos, estructurales, químicos y nutrimentales que pueden afectar los atributos de calidad como la textura, firmeza, el color, sabor, calidad nutrimental y valor comercial del producto (Vega-Gálvez et al., 2009).

Durante un proceso de secado lento se han identificado cambios significativos en la composición del chile seco. Un ejemplo representativo de esto es la reducción del contenido de ácido ascórbico, el cual puede disminuir hasta en un 66% durante las primeras 24 h de secado y perderse totalmente durante un período de secado de 72 h. Cabe señalar que el tiempo de secado se reduce de manera significativa al exponer el chile en rebanadas o rajas a una corriente de aire forzada con temperaturas de 50 a 60 °C permitiendo obtener un producto con un contenido de humedad final de 7-8% (Kuchi, Gupta y Kachwaya, 2014). Esto se debe a que se aumenta la superficie de contacto del producto, es decir, cuanto menor sea el espesor de la capa límite, más rápida será la remoción de humedad.

Otro parámetro que afecta el secado es la velocidad del aire dentro del secador, debido a que el aire transfiere la energía requerida para calentar el agua contenida en el alimento y de esa manera facilitar su evaporación. Adicionalmente, el aire caliente ayuda a transportar la humedad saliente del material. Sin embargo, a mayor contenido de agua, se necesitará una mayor temperatura, un tiempo más prolongado en el proceso de secado y una velocidad de aire secante más elevada, lo que afectará las características finales del producto seco. Además, cabe mencionar que el aire también transporta la humedad relativa del ambiente, por lo cual este parámetro también se vuelve un factor relevante dentro del proceso. Es decir, cuando la temperatura del aire de secado es alta y su humedad relativa es baja, existe el riesgo de que la humedad de la superficie del alimento se elimine más rápido de lo que el agua puede difundirse del interior húmedo a la superficie del alimento. Esto provoca la formación de costras en la superficie del alimento, limitando la evaporación del agua localizada en el interior del alimento (Andritsos, Dalampakis y Kolios, 2003).

Como ya se mencionó anteriormente, los alimentos sometidos a un secado están propensos a cambios deplorables en el producto seco, para reducir estos efectos, se utilizan pretratamientos que consisten en disoluciones de  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$  y  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ , entre otros (Lewicki y Michaluk, 2004). A nivel industrial se utilizan disoluciones de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  como pretratamiento de los alimentos a secar, ya que éste compuesto inhibe el oscurecimiento

enzimático y no enzimático, previene el deterioro oxidativo, inhibe enzimas como las proteasas, oxidasas y peroxidasas, así como el oscurecimiento por la exposición a bacterias y hongos (Latapi y Barrett, 2006).

La elección de los parámetros de secado está definida por las características del alimento que se vaya a procesar. Industrialmente se requiere el control de los parámetros de secado para minimizar los efectos adversos del proceso y así mantener las propiedades del alimento (Nijhuis et al., 1998).

### **6.7. Modelos para la cinética de secado**

El establecimiento de los modelos de secado en la industria permite predecir las condiciones de almacenamiento y empaquetado. Aunado a esto, proporcionan los requisitos energéticos del proceso de secado para un contenido final de humedad de los productos. Existen distintos modelos, los cuales en su mayoría son isotérmicos lo que implica un proceso de transferencia de masa por difusión (Castillo-Téllez et al., 2017).

La complejidad de las isoterms de absorción y desorción hace difícil establecer un modelo cinético de secado definido, por lo que se aplican diferentes modelos teóricos, empíricos y semi-empíricos a la cinética de secado, los modelos más utilizados en frutas y hortalizas se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Modelos matemáticos empleados en las cinéticas de secado de frutas y hortalizas (Castillo-Téllez et al., 2017).

Nombre del modelo	Modelo	Referencia
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Mejía-Toriz, 2015.
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Ren y Chen, 1998, Santos-Sánchez et al, 2012.
Page modificado	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Mohanraj y Chandrasekar, 2009.
Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli, Kucuk y Yapar, 2002.
Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Overhults, White, Hamilton y Ross, 1973.
Logarítmico	$MR = a \exp(kt) + c$	Page, 1949.
Two-term	$MR = a \exp(k_0 t) + b \exp(k_1 t)$	Togrul y Pehlivan, 2002.
Exponencial de Two-term	$MR = a \exp(kt) + (1 - a)\exp(-kat)$	Tunde-Akintunde, 2011.
Wang y Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang y Singh, 1978.
Weibull	$MR = \exp(-t/\beta)^\alpha$	Yaldiz, Ertekin y Uzun, 2001.

MR: Razón de humedad; t: tiempo; k: constante de velocidad de secado decreciente; a, b, c, n,  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $\beta$  y  $\alpha$ : constantes de los modelos matemáticos.

### 6.8. Parámetros de calidad en chile deshidratado

En la industria alimentaria, la composición química (pérdida de componentes bioactivos), propiedades sensoriales (color, sabor, olor, textura) y propiedades físicas (tamaño, forma, textura y color), son los principales indicadores de calidad en los productos deshidratados. Estos parámetros se ven afectados por el aire caliente a temperaturas relativamente altas y tiempos prolongados que se requieren en el proceso de secado.

La determinación del contenido de sustancias funcionales en los productos deshidratados es un indicador de calidad del producto; además, nos permite calcular la efectividad del proceso de secado. La calidad funcional-nutricional de los frutos de chile seco toma como referencia la concentración de capsaicinoides, carotenoides, vitamina C, compuestos fenólicos y flavonoides (Kowalski et al., 2016). También se toman en cuenta la firmeza, la capacidad de rehidratación, la actividad enzimática residual y la actividad microbiana del alimento después del secado, ya que definen la vida útil del producto final. Existen reportes de cambios importantes a nivel enzimático y de contenido de nutrientes a temperaturas de



60 °C o superiores, Andritsos et al. (2003) determinaron que deshidratar chile rojo (*C. annuum* L.) variedad Lamuyo a estas temperaturas tiene un efecto perjudicial sobre la retención de ácido ascórbico, ya que el aire caliente promueve su oxidación, reduciendo el contenido de ácido ascórbico en el producto final. Por otro lado, los productos secados a estas temperaturas pueden conducir al endurecimiento de la capa externa del alimento, lo que impide el secado de la parte interior del producto (Vega-Gálvez et al., 2008).

Todas estas propiedades, en conjunto, son un factor importante para los consumidores; por lo que, es necesario un control de los parámetros de secado (*vide infra*) para evaluar los efectos adversos del proceso y así caracterizar las propiedades del alimento (Nijhuis et al., 1998).

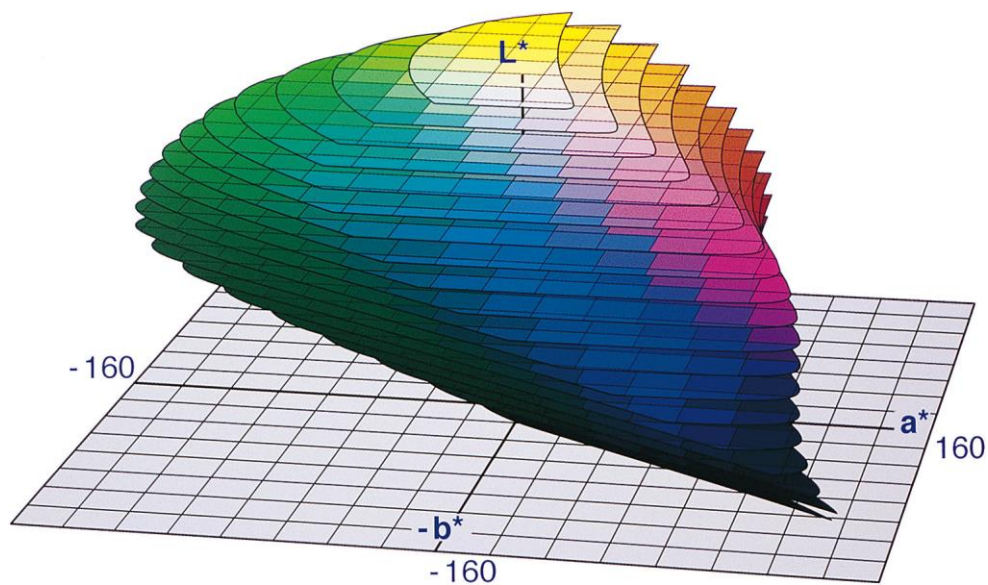
### **6.9. Determinación de color**

El color de los alimentos frescos y procesados es el primer parámetro de calidad que los consumidores evalúan en los alimentos. En el proceso de secado, el color está relacionado con defectos sensoriales y nutrimentales de los productos secos. El color de los frutos está determinado por los pigmentos naturales de la planta, y su concentración varía durante el proceso de maduración. De acuerdo con Barrett, Beaulieu y Shewfelt (2010) los principales compuestos que imparten el color son las clorofilas (verde), los carotenoides (amarillo, naranja y rojo), las antocianinas (rojo, azul), los flavonoides (amarillo) y las betalaínas (rojo).

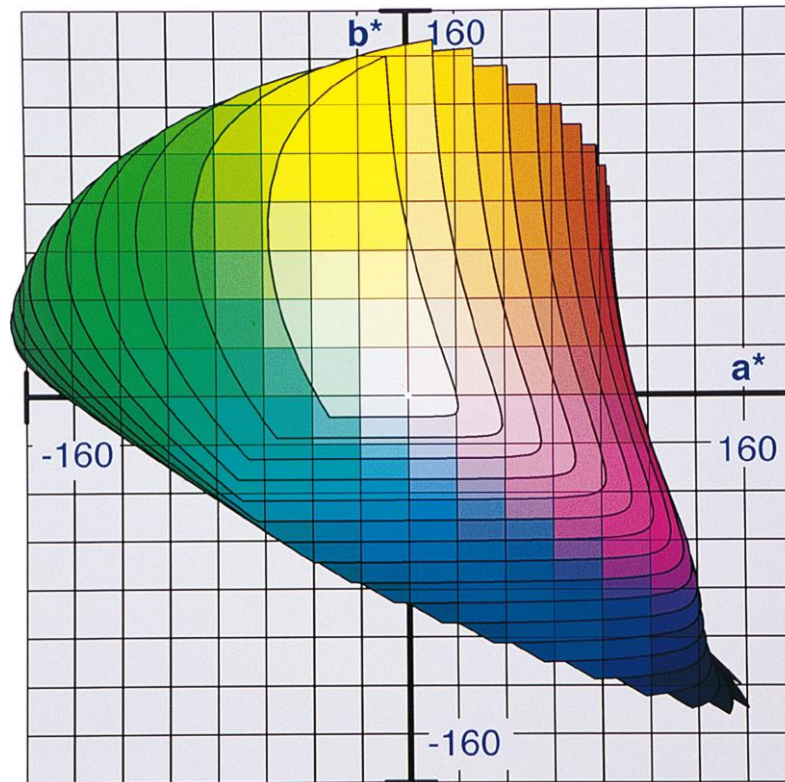
El color es un método subjetivo de calidad, es decir, depende del observador y de las condiciones en que se observa y solo puede ser definido para el ser humano en el espectro de radiación electromagnética, en el intervalo de longitud de onda de 400 a 700 nm.

Actualmente, el color también se puede medir de forma cuantitativa en términos de la intensidad y la longitud de onda. Debido a estas propiedades, el color se puede determinar con base a diversos sistemas de coordenadas de color. Los sistemas más comunes son el RGB (rojo, verde y azul) por sus siglas en inglés, Hunter Lab, CIE  $L^*a^*b^*$ , CIE XYZ, CIE  $L^*u^*v^*$  y CIE  $L^*C^*h$ . Cada uno de estos métodos espectrofotométricos difieren en el sistema de coordenadas utilizado para definir puntos dentro de ese espacio y en la simetría del espacio de color. Sin embargo, el método espectrofotométrico más empleado en la industria alimentaria para determinar color es el CIE  $L^*a^*b^*$ , donde se determinan los

parámetros  $a^*$  (rojo-verde),  $b^*$  (amarillo-azul) y  $L^*$  (luminosidad) que son representados en una esfera de color. Estos valores determinan la cromaticidad ( $C^*$ ) y la tonalidad ( $hue^\circ$ ). El parámetro  $a^*$  tiene valores positivos para colores rojizos y negativos para los verdosos; mientras que  $b^*$  adquiere valores positivos para colores amarillentos y negativos para los azules (Pathare, Opara y Al-Said, 2013). El parámetro  $L^*$  es una medida aproximada de la luminosidad, equivalente en la escala de grises, donde 0 es negro y 100 es blanco. El ángulo  $hue^\circ$  es un ángulo con valores según la tonalidad, de  $0^\circ$  cuando es rojo,  $90^\circ$  cuando es amarillo,  $180^\circ$  cuando es verde y  $270^\circ$  cuando es azul. Mientras que la cromaticidad ( $C^*$ ) indica la saturación del color, cuando los colores están cercanos al eje central tienen valores de cromaticidad bajos, los colores localizados en la periferia tienen colores más intensos (Wall y Bosland, 1998), Figuras 10 y 11.



**Figura 10.** Espacio de color óptico compuesto por los planos de constantes de luminosidad ( $L^*$ ) con un espacio  $\Delta L^*=5$  unidades. La red indicada en cada plano representa las líneas de los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  con una línea de espacio de 20 unidades (Hill, Roger y Vorhagen, 1997).



**Figura 11.** Vista superior del espacio de color óptico CIE  $L^*a^*b^*$ . El plano superior corresponde a la luminosidad de  $L^*=95$ . Con referencia de  $L^*=100$  como punto blanco (Hill et al., 1997).

## 7. ESTADO DEL ARTE

En la presente sección se presenta información recabada en la literatura sobre el proceso de secado del chile, especialmente con el enfoque particular del secado solar y secado en charolas; así como, los factores que afectan a este proceso, los parámetros de calidad y el contenido de compuestos bioactivos (compuestos fenólicos y flavonoides) del producto deshidratado.

### 7.1. Análisis de compuestos bioactivos en fruto de chile deshidratado

#### 7.1.1. Interpretación de la concentración de fenoles totales en variedades del género *Capsicum*

En el caso específico del chile, Ozgur et al., (2011) establecieron la concentración de fenoles totales en chile fresco y seco (verde y rojo) de *C. annuum* L. var. Yalova Yaglik obtenidos de una planta comercial que procesa frutas y verduras secas en Bursa, Turquía. El proceso de secado se realizó en un secador de charolas de aire forzado a una temperatura de  $63\pm 2$  °C con una velocidad de aire secante de 2.5 m/s. La cuantificación se realizó con el método del reactivo de Folin-Ciocalteu, los datos recopilados se encuentran en la Tabla 5. Es notorio que el proceso de secado disminuye la concentración de estos compuestos en el producto final con respecto al chile fresco, debido a que las muestras se expusieron a una temperatura de secado alta. Por otra parte, se encontró una mayor concentración de fenoles en chile rojo fresco, por lo que el producto deshidratado también presenta un mayor contenido de estos compuestos. Por consiguiente, el proceso de maduración incrementa el contenido de fenoles totales en el chile (*C. annuum*).

Sumado a este trabajo, Reis et al. (2013) determinaron la concentración de fenoles totales en chile Cumari de Pará, Brasil (*C. chinense* Jacqui) fresco y seco. Los chiles se deshidrataron en un secador de lecho fijo a una temperatura constante de 65 °C y una velocidad de aire de 1 m/s. La extracción para la cuantificación de fenoles totales se realizó con metanol al 50% (v/v) seguido de extracción con acetona al 70% (v/v) mediante el método colorimétrico del reactivo de Folin-Ciocalteu a una longitud de onda de 750 nm,

los datos recopilados se encuentran en la Tabla 6. Como ya se mencionó con anterioridad, el proceso de secado disminuye drásticamente la concentración de estos compuestos en el producto final con respecto al fresco, debido a la exposición a una temperatura de secado alta.

**Tabla 5.** Contenido de fenoles totales en Chile *C. annuum* L. var. Yalova Yaglik verde y rojo (fresco y seco) (Ozgun et al., 2011).

Muestra		Fenoles totales (mg EAG/100 g peso seco)
<i>C. annuum</i> L. var. Yalova Yaglik verde	Fresco	9604±128.2 <sup>b</sup>
	Seco	5547±311.8 <sup>d</sup>
<i>C. annuum</i> L. var. Yalova Yaglik rojo	Fresco	13079±214.0 <sup>a</sup>
	Seco	8982±472.1 <sup>c</sup>

Los datos se reportan como valor promedio de tres réplicas ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indican que los valores son significativamente diferentes ( $p \leq 0.01$ ).

**Tabla 6.** Contenido de fenoles totales en Chile *C. chinense* Jacqui var. Cumari de Pára fresco y seco (Reis et al., 2013).

Tratamiento	Fenoles totales (mg EAG/100 g peso seco)
Fresco	9748.22±0.91 <sup>a</sup>
Seco	1415.44±0.88 <sup>b</sup>

Los datos se reportan como el valor promedio de tres réplicas ± desviación estándar. Diferentes superíndices en una columna indican diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) basado en la prueba de comparativo de medias de Tukey.

Por otra parte, Sharma, Joshi y Kaushal (2015) deshidrataron Chile rojo var. California Wonder (*C. annuum* L.) fresco, escaldado y escaldado pretratado con  $K_2S_2O_5$ , además, determinaron el contenido de fenoles totales presentes en las muestras. Los chiles rojos en rajas fueron sometidos a un proceso de escaldado y diferentes pretratamientos. El proceso de secado se llevó a cabo en un secador de bandejas de laboratorio (Widson Scientific Works). El proceso de escaldado se realizó sumergiendo las rajas de Chile en agua hirviendo durante 3 min y posteriormente se pretrataron con disoluciones de  $K_2S_2O_5$ . La extracción para la cuantificación de fenoles totales se realizó con etanol al 80% mediante el método del reactivo de Folin-Ciocalteu a una longitud de onda de 675 nm, los datos recopilados se encuentran en la Tabla 7. El proceso de escaldado disminuyó el contenido de fenoles totales en las muestras. Mientras que el pretratamiento con  $K_2S_2O_5$  favoreció

una mayor retención de estos compuestos en las muestras. Adicionalmente, es visible que pretratar con disoluciones más concentradas de  $K_2S_2O_5$  favorecen una mayor retención de compuestos fenólicos.

**Tabla 7.** Efecto de diferentes pretratamientos sobre el contenido de fenoles totales del chile seco en polvo *C. annuum* L. var. California Wonder (Sharma et al., 2015).

Tratamiento	Fenoles totales
	(mg EAG/100 g peso seco)
T <sub>1</sub>	1431.60
T <sub>2</sub>	1297.80
T <sub>3</sub>	1326.15
T <sub>4</sub>	1330.10

T<sub>1</sub>: control (sin ningún tratamiento previo), T<sub>2</sub>: Escaldado, T<sub>3</sub>: Escaldado pretratado con  $K_2S_2O_5$  al 0.25%, T<sub>4</sub>: Escaldado pretratado con  $K_2S_2O_5$  al 0.35%. El autor no presenta los valores de las desviaciones estándar.

Lutz, Hernández y Henríquez (2015) evaluaron el impacto que tiene el proceso de secado sobre el contenido de fenoles totales en chile (*C. annuum*) var. Almuden. Estos chiles se obtuvieron del Valle de Aconcagua, Región de Valparaíso, Chile. La determinación se llevó a cabo en chiles frescos y secos, verdes y rojos sin semillas ni pedúnculo. El proceso de secado se realizó en un horno de convección con una temperatura que osciló entre 40 °C y 130 °C durante un período de 2 h. El contenido de fenoles totales se obtuvo mediante el reactivo Folin-Ciocalteu, los datos obtenidos se presentan en la Tabla 8. El proceso de secado disminuyó la concentración de estos compuestos en el producto final con respecto a la muestra fresca (verde y rojo), debido a que las muestras secas se expusieron a una temperatura de secado alta. Por otra parte, se encontró una mayor concentración de fenoles en chile verde fresco; sin embargo, el chile rojo seco retuvo un mayor contenido de estos compuestos.

**Tabla 8.** Contenido de fenoles totales de chile (*C. annuum*) verde y rojo var. Almuden (Lutz et al., 2015).

Variedad de chile	Fenoles totales	
	(mg EAG/100 g peso seco)	
	Fresco	Seco
Chile verde	10400±60 <sup>b</sup>	6219±154 <sup>b</sup>
Chile rojo	8000±118 <sup>a</sup>	6674±205 <sup>a</sup>

Los datos se reportan como el valor promedio de tres réplicas ± desviación estándar. Diferentes superíndices en una columna indican diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

## 7.2. Aprovechamiento de la energía solar para el secado de chile

Después de plantear la importancia de tomar precauciones para escoger la temperatura adecuada en un proceso de deshidratación, es importante mencionar algunos aspectos del proceso de secado de chile a través de tecnología que aprovecha la radiación solar.

Se han realizado diversos estudios para comparar los beneficios de estos secadores solares, en relación a esto Banout et al. (2011) diseñaron y evaluaron el rendimiento de un secador solar de doble paso contra un secador solar de gabinete y el secado al sol al aire libre para el secado de chiles rojos (*C. annuum* L.), obteniendo mejores resultados en el secador solar de doble paso, Tabla 9. La mejor eficiencia de secado para alcanzar un contenido de humedad final del 10% (en base húmeda) se obtuvo en el secador solar de doble paso, porque estos permiten obtener productos deshidratados de chile en menores tiempos de secado que en secadores solares de gabinete o por secado al sol al aire libre.

**Tabla 9.** Evaluación del rendimiento del secador solar de doble paso respecto a un secador de gabinete y el secado tradicional al aire libre (Banout et al., 2011).

Parámetros	Chile rojo ( <i>C. annuum</i> L.)		
	Día 1	Día 2	Día 3
% de humedad inicial		90.21	
Radiación global en el plano del colector solar (MJ/ m <sup>2</sup> )	22.20	22.30	23.81
Temp. ambiente promedio (°C)	34.65	33.18	34.17
Humedad relativa ambiental media (%)	51.89	59.33	57.76
Parámetro	Secador solar de doble paso	secador de gabinete	Secado al sol al aire libre
Masa inicial (kg)	38.40	3.30	7.20
Densidad de carga (kg/ m <sup>2</sup> )	3.66	3.67	3,67
Espacio colector (m <sup>2</sup> )	10	0.9	ND
Tiempo de secado, incluidas las noches, hasta el 10% de humedad (base húmeda)	32	73	No alcanzado
Temp. máxima de secado sin carga (°C)	70.50	60.10	38.80
Temp. máxima de secado con carga (°C)	64.30	56	38.80
Eficiencia de secado general (%), hasta 10% (base húmeda)	24.04	11.52	ND

Los datos se reportan como el valor promedio de tres réplicas, los autores no presentan los valores de las desviaciones estándar; ND= no disponible.

Aunado a estos trabajos, Fudholi et al. (2014), secaron chile rojo (*C. annuum* L.) proveniente de Malasia. Este proceso se llevó a cabo en un secador solar de convección forzada, los datos recopilados se exponen en la Tabla 10. Se puede comparar la eficiencia

del secador solar de túnel con convección forzada (Rabha et al., 2017a) *versus* el secador solar con convección forzada (Fudholi et al., 2014), encontrando una mayor eficiencia en el segundo secador. Esto se debe a que la humedad inicial de las muestras a secar en el secador solar con convección forzada es menor y la velocidad de secado en este equipo es mayor que en el secador de túnel con convección forzada.

Por otra parte, Rabha et al. (2017a) secaron chile fantasma mediante un secador solar de túnel de convección forzada integrado con un módulo de almacenamiento de calor latente basado en carcasa y tubos que ellos diseñaron y fabricaron. Los resultados se muestran en la Tabla 11. Se puede comparar la eficiencia del secador solar de doble paso *versus* el secador solar de túnel con convección forzada, encontrando una mayor eficiencia en el primero. Esto puede atribuirse al tiempo de secado de las muestras, debido a que en el secador de doble paso la muestra se deshidrata más rápido que en el secador de túnel con convección forzada.

**Tabla 10.** Evaluación del rendimiento de un secador solar con convección forzada (Fudholi et al., 2014).

<b>Parámetros</b>	<b>Cantidad</b>
Peso inicial del producto total (kg)	40
Peso final del producto total (kg)	8
Contenido inicial de humedad (%)	80
Contenido final de humedad (%)	10
Caudal másico de aire (kg/s)	0.07
Radiación solar media (W/m <sup>2</sup> )	420
Temperatura ambiente media (°C)	30
Temperatura media de la cámara de secado (°C)	44
Humedad relativa ambiental media (%)	62
Humedad media de la cámara de secado (%)	33
Tiempo de secado (h)	33
Energía del soplador (kW*h)	4.13
Energía solar (kW*h)	160.43
Capacidad de evaporación (kg / h)	0.97
Consumo energético específico (kW* h/kg)	5.26
Eficiencia total de secado, hasta 10% wb	13

Los datos se reportan como el valor promedio de tres réplicas, los autores no presentan los valores de las desviaciones estándar.



**Tabla 11.** Resumen del rendimiento del secador solar de túnel con convección forzada (Rabha et al., 2017a).

<b>Parámetros</b>	<b>unidades</b>
Masa inicial (kg)	9± 0.5
Contenido de humedad inicial, base húmeda (%)	85.50± 0.5
Contenido final de humedad, base húmeda (%)	9.7± 0.5
Tiempo total de secado (h)	42
Temperatura de secado (°C)	42-61± 0.2
Temperatura ambiente promedio (°C)	30± 0.2
Radiación solar promedio (W/m <sup>2</sup> )	785 ± 5
Espesor de la muestra (mm)	6-7
Eficiencia térmica global del sistema de secado (%)	4.5± 2.5
Consumo energético específico del secador (kWh /kg)	18.7± 5.9
Eficiencia térmica global del sistema de secado (%)	4.05± 2.5

Los datos se reportan como promedio de cinco réplicas ± desviación estándar para un nivel de significancia  $\alpha = 0.01$ .

### 7.3. Aplicación de modelos matemáticos y difusividad efectiva en la cinética de secado del chile

Para representar la cinética de secado de chile se han utilizado distintos modelos matemáticos. Arslan y Özcan (2011) investigaron el ajuste de las cinéticas de secado con ocho modelos matemáticos para describir los comportamientos de secado al sol y al horno de las rodajas de chile rojo fresco (*C. annuum* L.). El proceso de secado en un horno (Nüve FN055 Ankara) se llevó a cabo a una temperatura de entre 50 y 70 °C, y el secado al sol, entre 20 y 30 °C. La masa de la muestra se midió cada hora durante el secado al horno y al sol. Las muestras se distribuyeron uniformemente en bandejas de malla de acero, formando una capa fina. Para los fines de este proyecto se presentan en la Tabla 12, los coeficientes de los modelos de Newton, Page y Midilli aplicados a las cinéticas de secado a 50 y 70 °C. La idoneidad de las ecuaciones de los modelos se evaluó en función del coeficiente de determinación ( $R^2$ ). El modelo de Page mostró el mejor ajuste para el secado del chile rojo fresco (*C. annuum* L.) en un horno, seguido del modelo de Midilli y finalmente el modelo de Newton. Por lo tanto, estos modelos pueden utilizarse para modelar el secado de *C. annuum* L.

**Tabla 12.** Estadísticas de ajuste de los modelos de aplicados a la cinética de secado de chile rojo fresco (*C. annuum* L.), (Arslan y Özcan, 2011).

Secado	Temperatura (°C)	Nombre del modelo	Coefficientes y constantes del modelo	Coefficiente de determinación (R <sup>2</sup> )
Secado al sol abierto	20-30	Newton	k = 0.4305	0.977
		Page	k = 0.6505 n = 0.6054	0.993
		Midilli	a= 1.0108 b= 0.00055 k= 0.6306 n= 0.47526	0.994
	50	Newton	k = 0.3324	0.987
		Page	k = 0.4879 n = 0.7114	0.998
		Midilli	a= 1.0078 b= 0.00022 k= 0.4865 n= 0.7234	0.998
Secado en horno	70	Newton	k = 0.6640	0.991
		Page	k = 0.8309 n = 0.6947	0.999
	70	Midilli	a= 0.7523 b= -0.0558 k= 0.5003 n= 0.000003	0.848

Los datos se reportan como el valor de una réplica. Los autores no presentan los valores de las desviaciones estándar.

Rabha, Muthukumar y Somayaji (2017b) reportaron el ajuste de las cinéticas de secado de chile fantasma (*C. chinense* Jacq.) realizado en un secador solar de túnel de convección forzada de tipo indirecto y bajo exposición directa al sol con 11 modelos matemáticos. El proceso de secado se llevó a cabo a una temperatura ambiental de entre 29 y 37 °C y una humedad relativa del aire en el intervalo de 57.4 a 85.5 %. La velocidad promedio del aire fue de 1.7 m/s. La temperatura del aire de secado estuvo en el intervalo de 44 a 66 °C, con un promedio de 57 °C. Para los fines de este proyecto se presentan en la Tabla 13, los coeficientes de los modelos de Newton, Page y Midilli del proceso de secado por exposición directa al sol y del secado solar por convección forzada. Estos modelos de secado de capa fina, se ajustaron a la curva experimental de la razón de humedad (MR) *versus* el tiempo de secado mediante el análisis de regresión no lineal. La idoneidad de las ecuaciones de los modelos se evaluó en función del coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), cuanto más cerca de 1 se sitúa su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que se

esté intentando explicar. Para el caso particular del proyecto, los resultados mostraron que los modelos de Page y Midilli pueden utilizarse para calcular las constantes de velocidad de secado con muy buenos resultados debido a que sus coeficientes de determinación están cercanos a un valor de uno. Sin embargo, el modelo que mejor se ajustó para el secado al sol fue el modelo de Page; mientras que, para el secado solar por convección forzada fue el modelo de Midilli.

**Tabla 13.** Estadísticas de ajuste de los modelos de aplicados a la cinética de secado del de chile fantasma (*C. chinense* Jacq.), (Rabha et al., 2017b).

Secado	Nombre del modelo	Coefficientes y constantes del modelo	Coefficiente de determinación (R <sup>2</sup> )
Secado al sol abierto	Newton	k = 0.03004	0.9410
	Page	k = 0.00396 n = 1.56825	0.9972
	Midilli	a= 1.13081 b=- 0.00933 k= 0.08239 n= 0.47526	0.9803
Secado solar por convección forzada	Newton	k = 0.04962	0.9833
	Page	k = 0.01300 n = 1.43655	0.9917
	Midilli	a= 1.00206 b=-0.00360 k= 0.02046 n= 1.20216	0.9970

Los datos se reportan como el valor de una réplica. El autor no presenta los valores de las desviaciones estándar.

Por otra parte, Silva et al. (2018) determinaron la cinética de secado del chile verde “aromático” (*C. annuum* L.), ajustando cinco modelos matemáticos a los valores experimentales en función del contenido de agua. Estos modelos de secado de capa fina, se ajustaron a la curva experimental de la razón de humedad (MR) *versus* el tiempo de secado mediante el análisis de regresión no lineal. El proceso de secado se llevó a cabo utilizando un horno de convección forzada con velocidad del aire de 1 m/s a las temperaturas de 60, 70 y 80 °C. Las muestras se distribuyeron uniformemente en bandejas de malla de acero, formando una doble capa de aproximadamente 0.5 cm de espesor. Para los fines de este proyecto se presentan en la Tabla 14, los coeficientes y constantes de los modelos de Wang y Singh, Henderson y Pabis, Newton, Page y Thompson aplicados a las cinéticas de secado

a 60 °C. La idoneidad de las ecuaciones de los modelos se evaluó en función del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y Desviación Cuadrática Media (MSD). El modelo que mejor se ajustó para el secado del chile verde “aromático” (*C. annuum* L.) en un horno fue el modelo de Henderson y Pabis. Sin embargo, los resultados mostraron que tanto el modelo de Newton como de Page pueden utilizarse para calcular las constantes de velocidad de secado en *C. annuum* L. con resultados relativamente buenos.

**Tabla 14.** Parámetros de ajuste de los modelos matemáticos aplicados a la cinética de secado del chile (*C. annuum* L.), (Silva et al., 2018).

Modelo	Coeficientes y constantes del modelo				$R^2$	MSD
	a	k	b	n		
Wang y Singh	-0.006	---	0.0001	---	0.72466	0.245
Henderson y Pabis	1.542	0.012	---	---	0.91778	0.134
Newton	---	0.007	---	---	0.69732	0.257
Page	---	0.00014	---	1.896	0.79541	0.211
Thompson	-3248.27	4.882	---	---	0.69732	0.257

Los datos se reportan como el valor de una réplica. El autor no presenta los valores de las desviaciones estándar.

Alvarez-Parrilla et al. (2019) determinaron la cinética de secado del chile jalapeño rojo (*C. annuum*), ajustando siete modelos matemáticos a los valores experimentales en función del contenido de agua. El proceso de secado se realizó en un horno de convección (Fisher-Scientific 6965) a las temperaturas de 55, 65, 75 y 85 °C durante un período de 105, 60, 54 y 12 h, respectivamente. Para los fines de este proyecto se presentan en la Tabla 15 los coeficientes del modelo de Newton, Page y Midilli aplicados a las cinéticas de secado a 65 °C. La idoneidad de las ecuaciones de los modelos se evaluó en función del coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Los modelos de Newton, Page y Midilli pueden utilizarse para calcular las constantes de velocidad de secado con muy buenos resultados debido a que su  $R^2$  están cerca a un valor de 1. Sin embargo, el modelo que mejor se ajustó para el secado de chile jalapeño rojo (*C. annuum*) en un horno fue el modelo de Midilli.

Por otra parte, en diversas investigaciones se ha reportado la difusividad efectiva en las cinéticas de secado de chile. En la Tabla 16, se muestran los coeficientes de difusividad efectiva obtenidos en cinéticas de secado de chile.

**Tabla 15.** Parámetros de ajuste de los modelos matemáticos aplicados a la cinética de secado del chile jalapeño rojo (*C. annuum* L.), (Alvarez-Parrilla et al., 2019).

Modelo	Coeficientes y constantes del modelo				R <sup>2</sup>	RMSE
	a	k	n	b		
Newton	---	0.037	---	---	0.9278	0.1126
Page	---	0.0385	0.9887	---	0.9279	0.1126
Midilli	1.0526	0.0019	1.2772	0.0018	0.9530	0.0909

Los datos se reportan como el valor de una réplica. El autor no presenta los valores de las desviaciones estándar.

**Tabla 16.** Difusividad efectiva de diferentes variedades de chile (*C. annuum* L.) en el mundo.

Variedad de chile	País	Tipo de secador	Temp. secado (°C)	Vel. aire (m/s)	D <sub>eff</sub> (m <sup>2</sup> /s)	Referencia
Jaranda	España	SACFLPEL	60	0.5	67.57 E-11	Sanjuán et al., 2003
Moroccan	Francia	Secador convectivo	50	1.2	10.16 E-10	Téllez-Pérez et al., 2014.
Chile rojo	China	Secador de aire térmico eléctrico	60	2.5	0.96±0.03 E-9	Cao et al., 2016.
Chile rojo	China	HCEL	60	1.5	3.48 E-10	Deng et al., 2017.
Puya	México	Secador convectivo	65	0.046	6.82E-10	Carrera-Escobedo et al., 2020.
Mulato	México	Secador convectivo	65	0.046	2.55E-9	
Chile verde escaldado a 90 °C (var. SHP4884)	India	Secador solar	17-21	1.2	5.75 E-10	Babar et al., 2021.

SACFLPEL: Secador de Aire Caliente de Flujo de Lecho Pasante a Escala de Laboratorio; HCEL: Horno Convectivo a Escala Laboratorio; D<sub>eff</sub>: Difusividad efectiva.

#### 7.4. Determinación de color en chile

El color de los frutos está determinado por los pigmentos naturales que contiene, *vide supra*. De acuerdo a Sacks y Francis (2001), los compuestos que definen la coloración roja en las frutas son el licopeno, un carotenoide relacionado con el parámetro  $a^*$ , mientras que el color naranja está determinado por la cantidad de  $\beta$ -caroteno, el cual es medido por el parámetro  $b^*$ . Cuantificar los cambios de estos parámetros antes, durante y después del proceso de secado permite medir la calidad del producto final. Ornelas-Paz et al. (2010) determinaron el color mediante el sistema de coordenadas CIE  $L^*a^*b^*$  de muestras de chile habanero (*C. chinense* J.), poblano, chilaca, bell, jalapeño y serrano verde (*C.*

*annuum* L.). El proceso de escaldado se llevó a cabo con agua caliente a una temperatura de 96 °C durante un tiempo de  $7.5 \pm 0.6$ ,  $11.8 \pm 2.2$ ,  $13.5 \pm 1.8$ ,  $11.5 \pm 0.7$  min para el chile habanero, serrano, jalapeño y bell, respectivamente. Los datos reportados en esta investigación se describen en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Valores de color en el sistema CIE  $L^*a^*b^*$  para el chile fresco y escaldado (Ornelas-Paz et al., 2010).

Chile	$L^*$		$a^*$		$b^*$	
	Fresco	Escaldado	Fresco	Escaldado	Fresco	Escaldado
HV	45.8±0.5 <sup>b</sup>	48.0±0.2 <sup>a</sup>	-16.6±0.1 <sup>b</sup>	-8.0±0.1 <sup>a</sup>	29.7±0.5 <sup>a</sup>	28.2±0.4 <sup>a</sup>
SV	44.1 ± 1.1 <sup>a</sup>	45.0 ± 0.4 <sup>a</sup>	-16.0 ± 0.3 <sup>b</sup>	-9.8 ± 0.1 <sup>a</sup>	30.0 ± 0.9 <sup>a</sup>	29.0 ± 0.3 <sup>a</sup>
JV	46.4 ± 1.1 <sup>a</sup>	47.7 ± 0.4 <sup>a</sup>	-20.0 ± 0.3 <sup>b</sup>	-7.6 ± 0.1 <sup>a</sup>	33.6 ± 1.1 <sup>a</sup>	31.9 ± 0.5 <sup>a</sup>
CV	62.5 ± 0.3 <sup>a</sup>	NE	-18.9 ± 0.1 <sup>a</sup>	NE	38.6 ± 0.3 <sup>a</sup>	NE
PV	48.6 ± 0.9 <sup>a</sup>	NE	-18.3 ± 0.3 <sup>a</sup>	NE	32.5 ± 0.7 <sup>a</sup>	NE
BV	62.4 ± 1.0 <sup>a</sup>	55.5 ± 1.0 <sup>b</sup>	-20.9 ± 0.2 <sup>b</sup>	-6.8 ± 0.1 <sup>a</sup>	38.7 ± 0.6 <sup>a</sup>	33.8 ± 0.6 <sup>b</sup>

HV: Habanero verde, SV: Serrano verde, JV: Jalapeño verde, CV: Chilaca verde, PV: Poblano verde y BV: Bell verde y NE: no escaldado.

Los datos se reportan como el promedio nueve mediciones individuales ± error estándar. Los valores en la misma fila, para cada variable de color, no conectados por la misma letra son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ).

Ramos-Aguilar et al. (2015) determinaron el color de chile jalapeño verde (*Capsicum annum* L. var. Marajá) fresco y escaldado mediante el sistema de coordenadas CIE  $L^*a^*b^*$ . Los chiles fueron previamente tratados en agua caliente (escaldado) a una temperatura de 96 °C durante 12.3 min. Los datos reportados de esta investigación se describen en la Tabla 18. Los resultados hacen evidente que el tratamiento de escaldado no altera drásticamente el color en las muestras de chile.

**Tabla 18.** Valores de color en el sistema CIE  $L^*a^*b^*$  para el chile fresco y escaldado (Ramos-Aguilar et al., 2015).

Tratamiento	$L^*$	$a^*$	$b^*$
Chile fresco	46.2 ± 0.8 <sup>a</sup>	-15.8 ± 0.3 <sup>a</sup>	30.5 ± 0.4 <sup>a</sup>
Chile escaldado	45.8 ± 0.7 <sup>a</sup>	-6.9 ± 0.2 <sup>b</sup>	31.8 ± 0.5 <sup>a</sup>

Los datos se reportan como el promedio de varias mediciones individuales ( $n = 6-90$ ) ± error estándar. Las medias en la misma columna que no comparten una letra son significativamente diferentes entre sí, a un nivel de confianza del 95%.

Por otra parte, Al-Sebaei, Kumar, Hemalatha y Yadav (2017) evaluaron el efecto de los métodos de secado en la calidad y caracterización del chile verde en polvo de las variedades, Pusa jwala y Jalapeño M. Entre los parámetros evaluados se encuentran el

color medido en la escala Hunter Lab en chile fresco y chile en polvo secado por liofilización y secado en bandejas. Los datos reportados en esta investigación se describen en la Tabla 19. Los resultados muestran que los procesos de secado afectan significativamente los parámetros de color de ambos chiles. Se puede observar que el proceso de secado que afecta más a estos parámetros es el secado mediante un secador de charolas. En general, las muestras deshidratadas tienden a ser más luminosas, y adquirir coloraciones rojizas y amarillentas.

**Tabla 19.** Parámetros de color CIE  $L^*a^*b^*$  evaluados en chile seco por diferentes métodos de secado (Al-Sebaei et al., 2017).

Tratamiento	Parámetro	Variedad	
		Pusa jwala	Jalapeño M
Chile fresco	$L^*$	47.21±1.39 <sup>a</sup>	52.57 ± 1.34 <sup>b</sup>
	$a^*$	-8.04±0.08 <sup>a</sup>	1.79 ±0.06 <sup>b</sup>
	$b^*$	27.86±1.05 <sup>a</sup>	17.88 ±0.20 <sup>b</sup>
Chile en polvo secado mediante liofilización	$L^*$	52.17±1.21 <sup>a</sup>	61.54± 1.14 <sup>b</sup>
	$a^*$	-2.45±0.12 <sup>a</sup>	3.74 ±0.07 <sup>b</sup>
	$b^*$	22.87±0.44 <sup>a</sup>	19.62 ±0.24 <sup>a</sup>
Chile en polvo secado en un secador de bandeja	$L^*$	57.74±0.23 <sup>a</sup>	66.01 ± 0.82 <sup>b</sup>
	$a^*$	1.27±0.04 <sup>a</sup>	4.65±0.05 <sup>a</sup>
	$b^*$	25.46±0.82 <sup>a</sup>	12.21±0.011 <sup>b</sup>

Los datos se representan como el promedio de tres réplicas± desviación estándar. Diferentes superíndices en filas indican valores promedio que son significativamente diferentes ( $p<0.05$ ).

Los resultados se convirtieron del sistema de coordenadas Hunter Lab al sistema CIE  $L^*a^*b^*$ .

## 8. METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los métodos experimentales que se llevaron a cabo para realizar el trabajo de investigación, véase Figura 12.

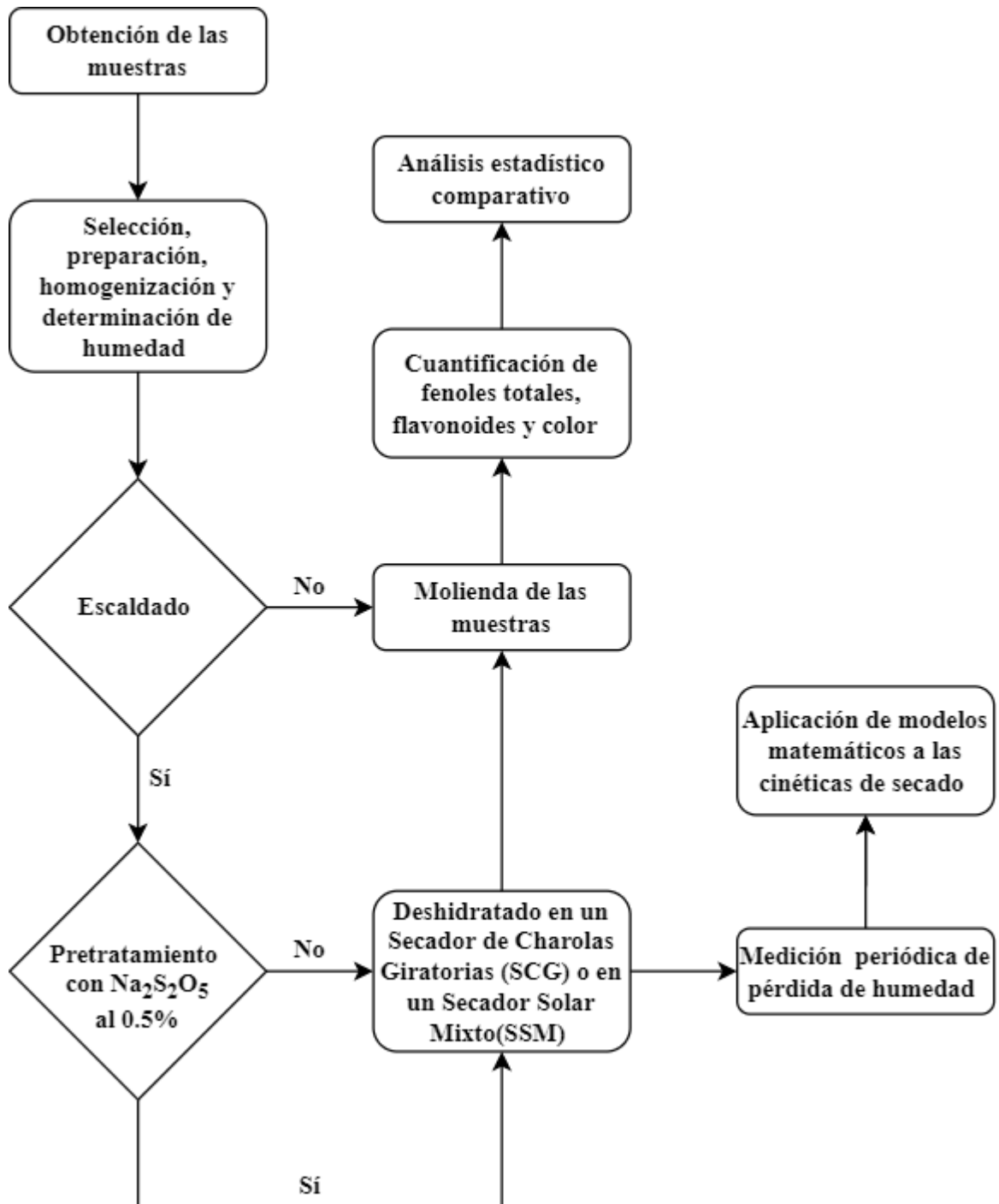


Figura 12. Diagrama general experimental.



### **8.1. Obtención de las muestras**

Una muestra de 10.135 kg de chile de agua (*C. annuum* L.) se obtuvo del plantío del productor Enrique Noriega, en la comunidad de hacienda blanca, San Lorenzo Cacaotepec, Oaxaca con coordenadas geográficas 17°08'20" N y 96°47'09" W a una altitud de 1576 m sobre el nivel del mar.

La siembra del chile fue el 15 de agosto de 2019 a cielo abierto. Las semillas sembradas se obtuvieron a partir de chiles secados a la sombra previamente, seleccionados durante el primer corte del cultivo predecesor. A la planta de chile de agua se le pueden realizar hasta 15 cortes durante su vida de producción, los cuales se hacen cada semana. El riego del cultivo del chile fue de forma automatizada mediante goteo cada dos días. Para el crecimiento de la planta se utilizó fertilizante marca Reasol con una composición de 25% nitrógeno, 10% fósforo y 10% potasio. Como el cultivo de chile a cielo abierto es susceptible a diversas plagas se utilizaron de plaguicidas, en función de la plaga que atacó al cultivo. El fruto de chile obtenido durante la producción se puede clasificar en cuatro calidades, desde primera calidad con frutos grandes con un peso, longitud, diámetro superior e inferior promedio de  $45.05 \pm 5.10$  g,  $127.13 \pm 9.84$  mm,  $42.05 \pm 4.41$  mm,  $16.27 \pm 3.91$  mm, respectivamente, hasta una cuarta calidad con frutos pequeños y atrofiados. Las muestras de primera calidad para la investigación fueron cosechadas el 17 de noviembre de 2019 y se obtuvieron del sexto corte de la planta.

### **8.2. Selección y preparación del chile**

La selección de la muestra se realizó tomando como base el color y tamaño de los frutos obtenidos. Se escogieron los chiles con una superficie de color verde amarillento sin magulladuras y de tamaños similares (aprox. 7 kg). Los chiles se lavaron con una disolución jabonosa, y se dejaron secar.

### **8.3. Escaldado, determinación de humedad de las muestras de chile fresco y escaldado con y sin pretratamiento**

Del total de muestra obtenida se seleccionaron 12 chiles para determinar peso, longitud,

diámetro superior e inferior promedio del fruto, así como el color y contenido de humedad del chile fresco. El resto de los chiles fueron previamente tratados en agua caliente (escaldado) a una temperatura de 90°C durante 3 min. Estos chiles, posteriormente se sometieron a un choque térmico, sumergiéndolos en un baño de agua fría durante 3 min y posteriormente se drenaron para eliminar el agua en exceso (Anoraga, Sabarisman y Ainuri, 2018). La finalidad del escaldado consistió en reducir la actividad enzimática y microbiológica de las muestras. Posteriormente, las muestras se guardaron en recipientes herméticos y se almacenaron a 4 °C para su posterior secado. La determinación del contenido de humedad en el chile fresco y escaldado con y sin pretratamiento se realizó de acuerdo con el método de la AOAC (1999), donde se tomó una muestra de 3 g de chile fresco y escaldado con y sin pretratamiento por separado, después las muestras se secaron a 105 °C en una estufa hasta obtener un peso constante. Esta determinación se hizo por triplicado.

La preparación de los chiles consistió en cortarlos de forma axial en cuatro partes iguales con un espesor promedio de  $1.75 \pm 0.11$  mm. A las rebanadas de chile se les retiró la placenta y semillas, por último, según sea el caso del lote a secar, las muestras de rebanadas de chile se sumergieron en una disolución acuosa de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% durante 3 min a temperatura ambiente y posteriormente, la disolución se drenó por 1 min (Jiménez-Duran, 2015). El pretratamiento se realizó para disminuir el oscurecimiento de las muestras, así como prevenir el deterioro de los compuestos bioactivos objeto del presente estudio.

## **8.4. Secado de las muestras**

### **8.4.1. Secado de las muestras mediante un secador de charolas giratorias**

El deshidratado de las muestras se llevó a cabo de acuerdo con el método descrito por Santos-Sánchez et al. (2012) en un secador de charolas giratorias (Figura 13). Por separado se deshidrataron 36 rebanadas de chile de agua escaldado con y sin pretratamiento en un secador de charolas rotatorias. Las condiciones de secado se mantuvieron a una temperatura de 60 °C, con una velocidad de aire de 1.2 m/s y una velocidad de rotación de charola de 10 rpm hasta que las muestras alcanzaron una humedad final de aproximadamente el 10%. El registro de la pérdida de masa de las muestras se realizó cada

15 min, a partir de la medición de la masa de tres rodajas de chile de cada tratamiento. El secado de las muestras requirió de un tiempo de 240 a 255 min para rebanadas de chile escaldado pretratadas con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% y de 300 min las rebanadas de chile escaldado sin pretratamiento. Los datos recabados se utilizaron para calcular la difusividad efectiva, la constante de velocidad de secado y generar las cinéticas del secado (*vide infra*).



**Figura 13.** Secador de charolas giratorias.

#### **8.4.2. Secado de las muestras mediante un secador solar mixto indirecto**

El secado mediante el secador solar mixto se llevó a cabo a condiciones ambientales y se realizó durante los días 26 y 27 de noviembre de 2019. Este equipo se encuentra localizado en el techo del laboratorio de electrónica avanzada de la Universidad Tecnológica de la Mixteca con coordenadas geográficas  $17^{\circ}49'37''\text{N}$  y  $97^{\circ}48'10''\text{W}$  a una altitud de 1760 m sobre el nivel del mar, véase Figura 14. La medición de la pérdida de humedad se realizó cada 15 min, a partir de la medición de la masa de tres rodajas de chile de cada tratamiento hasta que las muestras de chile alcanzaron una humedad de aproximadamente el 10%, el secado de las muestras requirió de un tiempo de 450 min. El deshidratado del chile se inició el día 26 de noviembre a las 1:25 pm y se detuvo a las 5:25 pm. El secado se reinició el día 27 de noviembre a las 10:25 am y se concluyó a las 1:40 pm. Durante el primer día

de secado, la temperatura ambiental promedio fue de 27.3 °C con una humedad relativa promedio de 15.0%, mientras que durante el segundo día la temperatura ambiental promedio fue de 31.0 °C con la misma humedad relativa (15.0%), manteniéndose en ambos días una velocidad de aire a la salida de la cámara de secado de 1.4 m/s. Los intervalos de temperatura y humedad relativa ambiental durante el proceso de secado del chile se muestran en la Tabla 20.

**Tabla 20.** Parámetros obtenidos durante el proceso de secado en un secador solar.

Fecha	Parámetro	Colectores	Cámara de secado
26 de noviembre $T_{amb}= 27.3^{\circ}C$ $\%H_{rel}= 15.0$	$T_{mín}$ (°C)	27.9±2.5	27.1±1.7
	$T_{máx}$ (°C)	61.6±2.1	42.0±4.0
	$H_{mín}$ (%)	13.0±2.8	25.5±3.0
	$H_{máx}$ (%)	27.5±7.8	40.1±6.8
27 de noviembre $T_{amb}= 31.0^{\circ}C$ $\%H_{rel}= 15.0$	$T_{mín}$ (°C)	64.6±2.1	40.1±5.6
	$T_{máx}$ (°C)	≥70.0±0.0	58.2±6.7
	$H_{mín}$ (%)	15.0±0.0	12.5±5.8
	$H_{máx}$ (%)	15.0±0.0	33.6±14.1

$T_{amb}$ : Temperatura ambiente;  $H_{rel}$ : humedad relativa;  $T_{mín}$ : temperatura mínima;  $T_{máx}$ : temperatura máxima;  $H_{mín}$ : humedad mínima;  $H_{máx}$ : humedad máxima. Los datos se reportan como promedio de tres réplicas ± error estándar para la cámara de secado y dos réplicas ± error estándar para el caso de los colectores.



**Figura 14.** Secador solar mixto (izquierda) y cámara de secado con muestras de chile de agua (*C. annuum* L.) (derecha).

### **8.5 Molienda de las muestras secas**

Las muestras secas se molieron mediante un molino para granos marca SAYONA modelo SY-601220-240 V~50/60 Hz-300W durante 3 min. Posteriormente, el polvo de chile obtenido se tamizó en un cedazo malla #30, la muestra retenida se molió por segunda vez y se tamizó de la misma manera, este proceso se repitió dos veces más. Los polvos de chile se almacenaron en un congelador.

### **8.6 Determinación de humedad final de los polvos de chile por termobalanza**

La determinación de humedad final de muestras molidas se realizó colocando 1 g de polvo de chile en un analizador de humedad marca SARTORIUS MA45, programado para un secado estándar a 105 °C hasta que la lectura de humedad se estabilizó (Ileleji, García, Kingsly y Clairmont, 2010). El tiempo promedio de la prueba fue de  $3.3 \pm 0.2$  min.

### **8.7 Obtención de cinéticas de secado**

La razón de humedad (MR) y la velocidad de secado (DR) de cada una de las muestras se calculó a partir de las ecuaciones siguientes:

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_0 - M_e)} \quad (1)$$

$$DR = \frac{(M_{t+\Delta t} - M_t)}{dt} \quad (2)$$

Dónde:

$M_t$ : Contenido de humedad en el tiempo  $t$  (kg de agua/kg masa seca).

$M_0$ : Contenido de humedad inicial (kg de agua/kg masa seca).

$M_e$ : Humedad en equilibrio de la muestra (kg de agua/kg masa seca).

$dt$ : Diferencial de tiempo.

$\Delta t$ : Incremento de tiempo.

### **8.8. Cálculo de difusividad efectiva**

La determinación de la difusividad efectiva se realizó en las muestras de chile escaldados

con y sin pretratamiento deshidratadas en un secador de charolas giratorias y un secador solar mixto, tomando en cuenta la segunda ley de Fick, partiendo de que la muestra es homogénea en el proceso de secado; es decir, que la muestra tiene un contenido de humedad uniforme y un espesor bien definido ( $1.75 \pm 0.11$  mm). La ecuación de la segunda Ley de Fick está expresada en la Ecuación 3. La solución analítica de esta Ley, propuesta por Crank, se presenta en la Ecuación 4, (Dadali, Demirhan y Özbek, 2007).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{\text{eff}} \nabla^2 M \quad (3)$$

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{\text{eff}}}{L^2} t\right) \quad (4)$$

Dónde:

$D_{\text{eff}}$ : Difusividad efectiva de la humedad ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

L: mitad del grosor de la muestra (m).

t: tiempo de secado (s).

n: Constante que define el truncamiento de la serie.

Cabe resaltar que, para tiempos prolongados de secado,  $n = 1$ , y aplicando el logaritmo natural a la Ecuación 4 se simplifica, obteniéndose la Ecuación 5.

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2} t\right) \quad (5)$$

Los valores de la difusividad efectiva se calcularon, graficando los resultados experimentales del secado en términos del  $\ln(MR)$  *versus* tiempo, tomando en cuenta una gráfica de línea recta, con una pendiente representada por la Ecuación 6:

$$m = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L^2} \quad (6)$$

Finalmente, los datos de la  $D_{\text{eff}}$  se sometieron a una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, una prueba de homocedasticidad de Fligner-Killeen para datos no normales, un comparativo de medianas mediante la prueba de Kruskal-Wallis y una prueba de Dunn para realizar un comparativo múltiple de medias. Todas estas pruebas se realizaron a un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

## 8.9. Modelos matemáticos aplicados a la cinética de secado

Para estimar el valor de la constante de velocidad ( $k$ ), se utilizó una regresión no lineal aplicando los modelos de Newton, Page y Midilli, ecuaciones 7, 8 y 9 respectivamente. Esta regresión no lineal se efectuó mediante el software de estadística InterReg versión 3.2.2. Para la regresión se evaluaron los datos de la razón de humedad (MR) con respecto al tiempo con un nivel de confianza del 95%, empleando el algoritmo de Levenberg-Marquardt. El método Levenberg-Marquardt emplea un algoritmo no lineal ampliamente utilizado en el ajuste por mínimos cuadrados. Este método combina el descenso más pronunciado y el enfoque basado en series de Taylor para obtener una técnica rápida y confiable para la optimización no lineal (Carrera-Escobedo et al., 2020), el proceso para cada modelo se describe en el Apéndice B.

$$MR = \exp(-kt) \quad (7)$$

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (8)$$

$$MR = a \exp(-kt^n) + bt \quad (9)$$

Dónde:

MR: razón de humedad.

t: tiempo de secado.

k: constante de velocidad de secado.

a, b y n: constantes del modelo.

Los parámetros cinéticos calculados con los tres modelos se sometieron a una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. En función del resultado de la prueba de normalidad se aplicaron las pruebas de homocedasticidad, comparativo de medias o medianas y el comparativo múltiple de medias correspondientes. Para datos con distribución no normal se utilizaron las pruebas Fligner-Killeen para evaluar homocedasticidad, la prueba de Kruskal-Wallis para comparar las medianas y la prueba de Dunn para realizar un comparativo múltiple de medias. Mientras que para datos con una distribución normal se utilizaron las pruebas de Levene para evaluar homocedasticidad, de ANOVA de una vía para realizar el comparativo de medias, una prueba de Tukey para llevar a cabo un comparativo múltiple de medias. Todas estas pruebas se realizaron a un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

### **8.10. Cuantificación de color del fruto fresco y deshidratado**

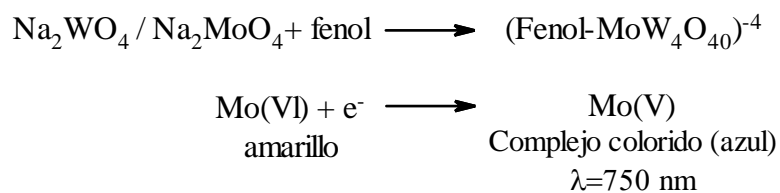
Para cada determinación se utilizaron tres rebanadas de muestra empleando un espectrofotómetro HunterLab Ultra Scan Vis (USA) con el iluminante D65 a un ángulo de observación de  $10^\circ$  y con un orificio de observación de un diámetro de 0.9525 cm. A cada una de las rebanadas se le determinaron los valores de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  en 10 puntos distintos (Santos-Sánchez et al., 2012).

Los datos de color se sometieron a una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, una prueba de homocedasticidad de Fligner-Killeen para datos no normales, un comparativo de medianas mediante la prueba de Kruskal-Wallis y una prueba de Dunn para realizar un comparativo múltiple de medias. Todas estas pruebas se realizaron a un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

### **8.11. Cuantificación de fenoles totales**

La cuantificación de fenoles totales se ejecutó en un lector de microplacas Biotek ELX-808, por el método colorimétrico que usa el reactivo de Folin-Ciocalteu, descrito por Dewanto et al. (2002). Este método se basa en que los compuestos fenólicos reaccionan (reacción redox) con el reactivo de Folin-Ciocalteu, a pH básico. Este reactivo contiene una mezcla de wolframato sódico ( $\text{Na}_2\text{WO}_4$ ) y molibdato sódico ( $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ ) en ácido fosfórico que reacciona con los compuestos fenólicos presentes en la muestra, dando lugar a una coloración azul susceptible de ser determinada espectrofotométricamente a 750 nm y que se cuantifica con base en una curva de calibración de ácido gálico. El ácido fosfomolibdotúngstico (formado por las dos sales en el medio ácido), de color amarillo, al ser reducido por los grupos fenólicos da lugar a un complejo de color azul intenso, cuya intensidad se mide para evaluar el contenido de fenoles totales (García-Martínez, Fernández-Segovia y Fuentes-López, 2015). El mecanismo de reacción del método se presenta en la Figura 15.





**Figura 15.** Reacción del reactivo de Folin-Ciocalteu con fenoles mediante una transferencia de electrones (Prior, Wu y Schaich, 2005).

### 8.11.1. Preparación de disoluciones

Para llevar a cabo la cuantificación de fenoles totales fue necesario preparar previamente las disoluciones siguientes:

**Reactivo de Folin-Ciocalteu 0.1 M.** 2.5 mL del reactivo stock de Folin-Ciocalteu se diluyeron en agua a un volumen de 47.5 mL para obtener la disolución de Folin-Ciocalteu 0.1 M.

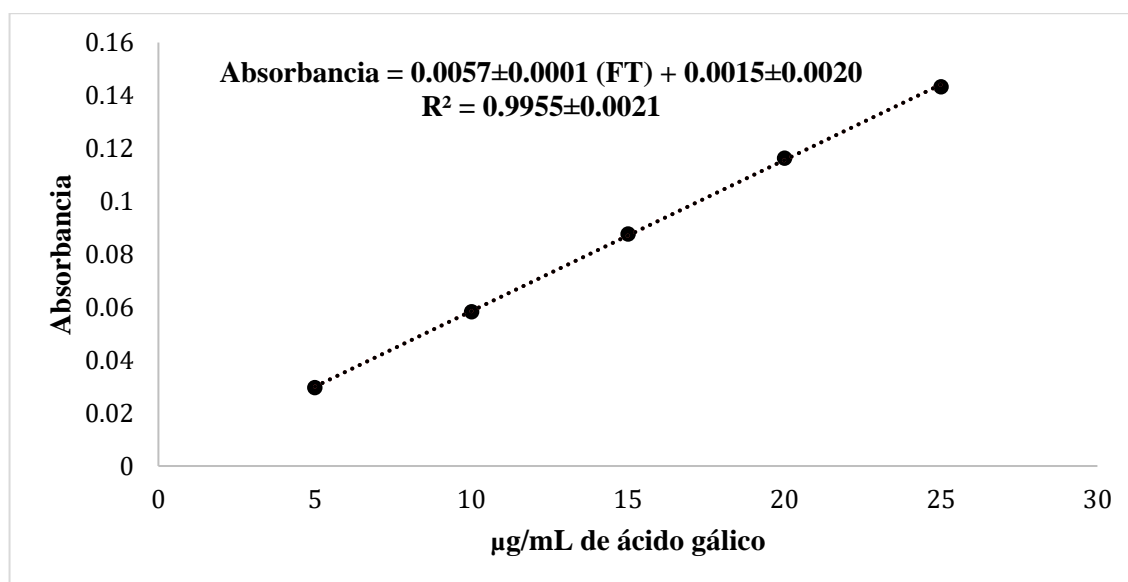
**Carbonato de sodio 0.5%.** En 10 mL de agua se disolvieron 50 mg de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

**Ácido gálico 100  $\mu\text{g/mL}$ .** 1 mg de ácido gálico se disolvió en 10 mL de etanol y esta disolución se diluyó en una relación 1:10. A partir de esta última se prepararon las disoluciones estándar de 5, 10, 15, 20 y 25  $\mu\text{g/mL}$  de ácido gálico para construir la curva de calibración.

### 8.11.2. Prueba de fenoles totales

A 30 mg de muestra deshidratada de chile se le adicionó 1 mL de EtOH/ $\text{H}_2\text{O}$  al 90 % (v/v). La disolución obtenida se llevó a sonicación por 30 min a temperatura ambiente para hacer una extracción, posteriormente se centrifugó a 4000 rpm durante 15 min. A partir de este extracto se realizó una dilución 1:5 para las muestras escaldadas con pretratamiento deshidratadas en un secador de charolas y las muestras escaldadas con y sin pretratamiento deshidratadas en el secador solar; mientras que para las muestras escaldadas sin pretratamiento en un secador de charolas se realizó una dilución 1:16. Alícuotas de 40  $\mu\text{L}$  de las distintas muestras se colocaron por triplicado junto con 40  $\mu\text{L}$  del reactivo de Folin-Ciocalteu 0.1 M en una microplaca. Esta mezcla se dejó reposar durante 3 min en el lector de microplacas marca BioTek, al término del reposo la mezcla se agitó durante 15 s a

velocidad media. Después de esto, la microplaca con las muestras se retiró del lector de microplacas y a cada mezcla de reacción se le adicionaron 40  $\mu\text{L}$  de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 0.5%. Posteriormente, la microplaca con las muestras se dejó reposar a  $40^\circ\text{C}$  durante 30 min dentro del lector de microplacas. Transcurrido este tiempo, se agitó durante 1 min a velocidad media en el lector y se midió la absorbancia a una longitud de onda de 750 nm. La concentración de fenoles totales en estas muestras de chile se determinó usando una curva de calibración de ácido gálico, a partir de disoluciones de ácido gálico a concentraciones de 5, 10, 15, 20 y 25  $\mu\text{g/mL}$ , Figura 16. Para el caso de chile fresco y chile escaldado con y sin pretratamiento se utilizaron 50 mg de muestra húmeda. El resultado de la cuantificación se expresó en miligramos equivalentes de ácido gálico (mg EAG/100g masa seca).



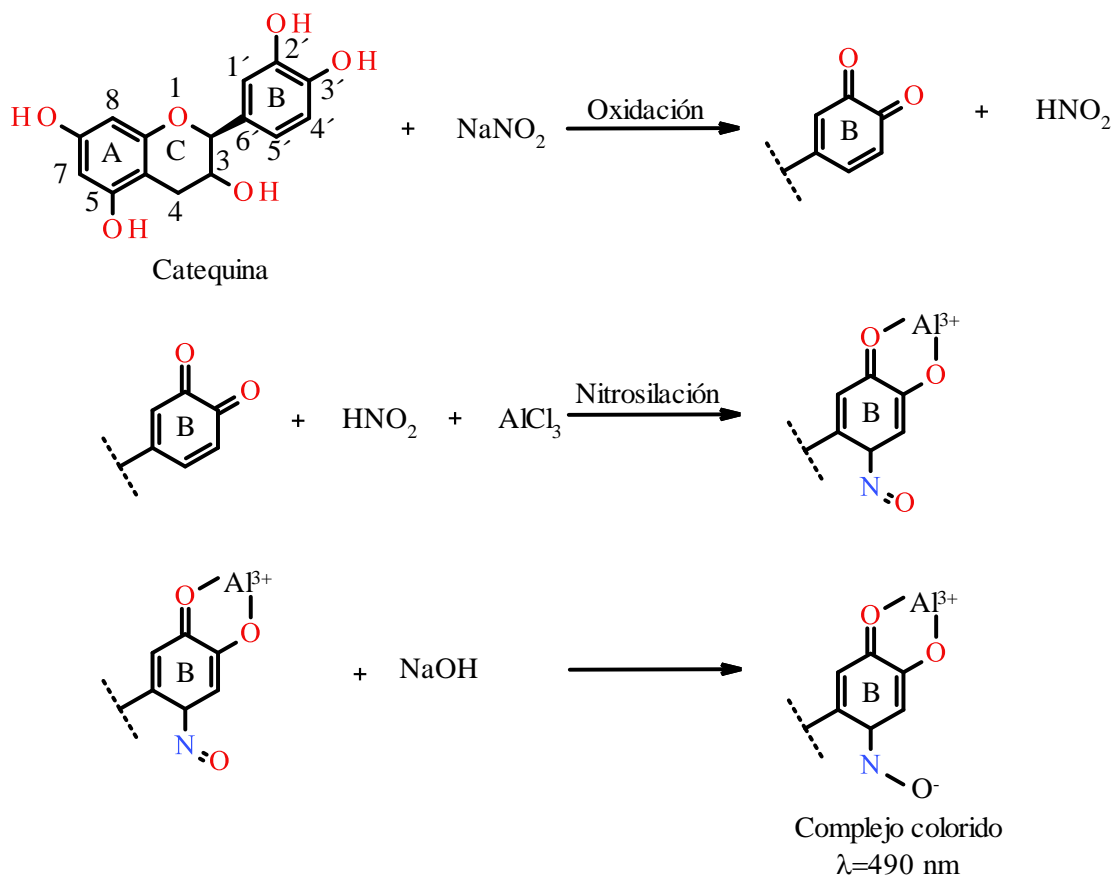
**Figura 16.** Curva de calibración de ácido gálico.

Los datos de fenoles totales se sometieron a una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, una prueba de homocedasticidad de Fligner-Killeen para datos no normales, un comparativo de medianas mediante la prueba de Kruskal-Wallis y una prueba de Dunn para realizar un comparativo múltiple de medias. Todas estas pruebas se realizaron a un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

## 8.12. Determinación del contenido de flavonoides totales

La cuantificación de flavonoides se realizó en un lector de microplacas Biotek ELX-808, por el método descrito por Julián-Loaeza et al. (2011).

El método se fundamenta en la reacción de iones aluminio con los flavonoides presentes en la muestra, en pH básico, formándose un complejo de color rosa salmón, susceptible de ser determinado espectrofotométricamente a 490 nm y que se cuantifica por espectrofotometría con base a una curva de calibración de catequina. Este método se lleva a cabo en tres etapas, en la primera, los grupos hidroxilo del anillo B en las posiciones C2' y C3', en presencia de nitrito de sodio ( $\text{NaNO}_2$ ) se oxidan convirtiéndose en carbonilos, como producto de reacción se genera ácido nitroso ( $\text{HNO}_2$ ). En la segunda etapa, el  $\text{HNO}_2$  en presencia de tricloruro de aluminio ( $\text{AlCl}_3$ ) promueve una nitrosilación del C5' en el anillo B, aunado a esto el aluminio se enlaza con el oxígeno del C4' y se coordina con el grupo carbonilo del C3', en esta etapa se adquiere una coloración amarilla. En la tercera etapa se reduce el oxígeno del grupo nitrosilo mediante la adición de NaOH, formándose una coloración rosa salmón característica de la prueba, el mecanismo de reacción del método se presenta en la Figura 17 (Zhu, Wang, Liu, Xia y Tang, 2010).



**Figura 17.** Mecanismo de acción del método del tricloruro de aluminio con flavonoides (Zhu et al., 2010).

Los datos de flavonoides totales se sometieron a una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, una prueba de homocedasticidad de Levene para datos normales, un comparativo de medias mediante la prueba de ANOVA de una vía y una prueba de Tukey para realizar un comparativo múltiple de medias. Todas estas pruebas se realizaron a un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

### 8.12.1. Preparación de disoluciones

Para llevar a cabo la cuantificación de flavonoides fue necesario preparar previamente las disoluciones siguientes:

*NaNO<sub>2</sub> 1.5% (p/v).* Se disolvieron 375 mg de  $\text{NaNO}_2$  con agua hasta un volumen de 25 mL.

*AlCl<sub>3</sub> al 3% (p/v).* Se disolvieron 300 mg de  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  con agua hasta un volumen de 10

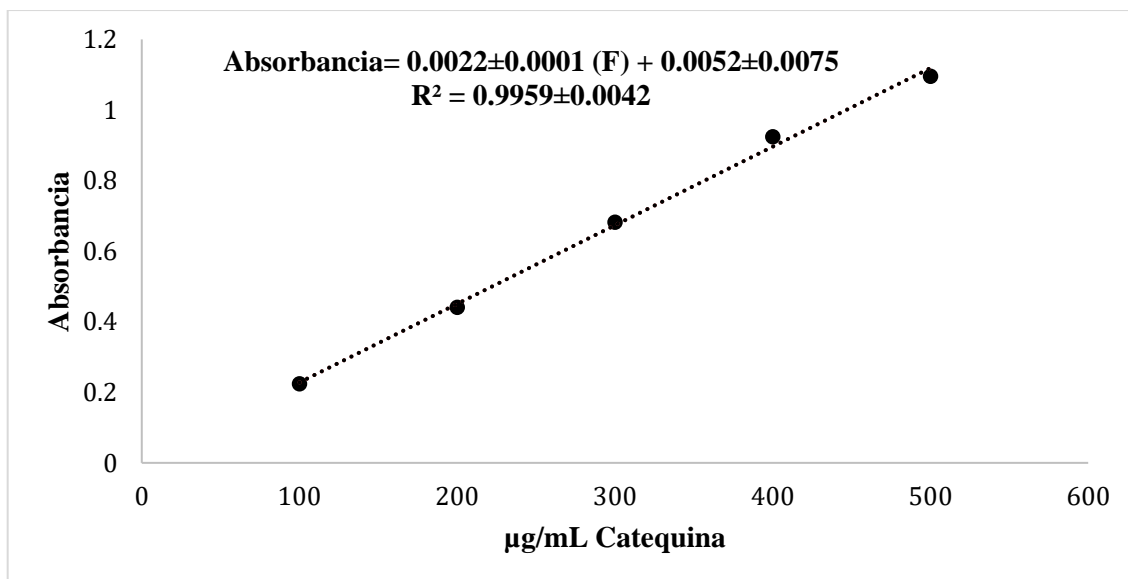
mL.

**NaOH 1 M.** 400 mg de NaOH se disolvieron en agua y se llevaron a un volumen de 10 mL.

**Estándares de catequina.** En ausencia de luz se disolvieron 10 mg de catequina en 10 mL de etanol para obtener una solución stock de 1000 µg/mL. A partir de esta disolución se prepararon estándares de catequina de 100, 200, 300, 400 y 500 µg/mL.

### **8.12.2. Cuantificación de flavonoides totales**

A 30 mg de muestra deshidratada de chile se le adicionó 1 mL de EtOH/H<sub>2</sub>O al 90 % (v/v). La disolución obtenida se llevó a sonicación por 30 min a temperatura ambiente para hacer una extracción, posteriormente se centrifugó a 4000 rpm durante 15 min. 30 µL de extracto y 30 µL de NaNO<sub>2</sub> al 1.5% se colocaron por triplicado (diluido en EtOH) en una microplaca. La mezcla se agitó a velocidad media por 1 min en el lector microplacas BioTek ELX-808 a temperatura ambiente. Posteriormente, a esta mezcla se le agregaron 30 µL de AlCl<sub>3</sub> al 3% y se agitó por 1 min. Transcurrido este tiempo, se le adicionaron 30 µL de NaOH 1 M, ésta mezcla se agitó por 1 min. Por último, las muestras se leyeron a una absorbancia de 490 nm. El blanco de la muestra o del estándar se preparó con agua en lugar de AlCl<sub>3</sub>. La concentración de flavonoides en estas muestras de chile se determinó usando una curva de calibración de catequina utilizando disoluciones a concentraciones de 100, 200, 300, 400 y 500 µg/mL, Figura 18. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado y el resultado se expresó en miligramos equivalentes de catequina (mg EC/100 g de masa seca).



**Figura 18.** Curva de calibración de catequina.

### 8.13. Análisis estadístico comparativo

El análisis estadístico que se implementó en este trabajo se llevó a cabo mediante la interfaz estadística Rstudio (Apéndice C), el análisis estadístico constó de dos etapas. La primera etapa consistió de un análisis estadístico descriptivo el cual se compone de un análisis exploratorio de datos (histogramas, diagramas de densidad y diagramas de cajas y bigotes) y obtención de los gráficos cuantiles-cuantiles (Q-Q) (Becker, Chambers y Wilks, 1988). Posteriormente, se realizó el análisis inferencial empleando las pruebas de Shapiro-Wilk (Royston, 1982a; Royston, 1982b; Royston, 1995) y Fligner-Killeen (Conover, Johnson y Johnson, 1981) o Levene (Fox, 2016; Fox, 2019) para contrastar la normalidad y homogeneidad de varianzas de los conjuntos de datos, respectivamente. La prueba de Fligner-Killeen se ha comprobado en estudios de simulación como una de las pruebas de homogeneidad de las varianzas más robusta para datos no normales (Conover et al., 1981). Además, la prueba de Levene es robusta para determinar la homocedasticidad en muestras con distribución normal (Correa, Iral y Rojas, 2006).

Los datos que presentaron una distribución normal y homocedástica, se examinaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía (Chambers, Freeny y Heiberger, 1992) y una prueba de Tukey (Miller, 1981; Yandell, 1997) para determinar diferencia significativa entre las medias de al menos dos de los procesos y comparar medias,

respectivamente. Además, se llevó a cabo una prueba de Kruskal-Wallis (Kruskal y Wallis, 1952; Hollander y Douglas, 1973) como alternativa no paramétrica al test ANOVA de una vía para datos no pareados, así como también la prueba de Dunn (Dunn, 1964) para determinar inferencias simultáneas entre las medias de los procesos de cada parámetro. Todas las pruebas estadísticas se realizaron a un nivel de significancia del 0.05.

## 9. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 9.1. Características del chile

Se encontró que el peso, la longitud, el diámetro superior e inferior promedio del chile fresco, es de  $45.05 \pm 5.10$  g,  $127.13 \pm 9.84$  mm,  $42.05 \pm 4.41$  mm,  $16.27 \pm 3.91$  mm, respectivamente. Es notorio que existe una variación alta, sin embargo, esto es debido a que el chile de agua presenta una morfología muy variada, por lo que cada fruto es único, véase Figura 19.



**Figura 19.** Morfología de la muestra de chile de agua obtenida.

### 9.2. Características del secado en un secador de charolas giratorias y un secador solar mixto

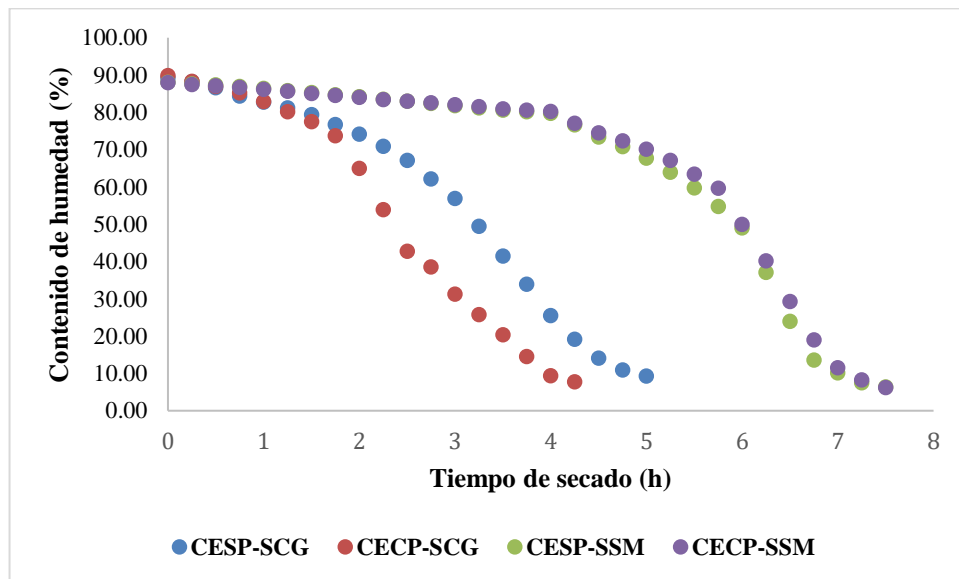
El contenido de humedad inicial de las muestras de chile fresco, escaldado sin pretratamiento y escaldado pretratado fue de  $92.13 \pm 0.15\%$ ,  $90.98 \pm 0.11\%$  y  $91.69 \pm 0.13\%$ , respectivamente. En la Figura 20, se puede observar la pérdida de agua de las muestras con respecto al tiempo de acuerdo al tipo de secado. Las rebanadas secas de chile escaldado pretratadas con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% deshidratadas mediante un secador de charolas giratorias requirieron un tiempo de secado de 240 a 255 min, mientras que las rebanadas secas deshidratadas de chile escaldado sin pretratamiento deshidratadas por el mismo método, necesitaron un tiempo de secado de 300 min. Esto indica que el pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  incrementa la difusión del agua desde el interior de alimento a su superficie, lo



que reduce el tiempo de secado.

Por otro parte, las rebanadas deshidratadas en un secador solar mixto exigieron un tiempo de secado de 450 min tanto para las muestras de chile escaldado sin y con pretratamiento. El prolongado tiempo de secado de estas muestras se debió a la variación de la temperatura de secado y la humedad relativa en la cámara del SSM durante el proceso de secado en ambos días, por lo que la difusión del agua del alimento fue más lenta. Sin embargo, no se observa influencia del  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  como sucede en las muestras deshidratadas en el secador de charolas giratorias.

Los resultados revelaron que la temperatura en la cámara de secado en el SSM fue mayor que la temperatura ambiental, un comportamiento similar se presentó con la humedad relativa. Esto último se debió a la difusión del agua del alimento hacia la cámara de secado. Además, los valores mínimos y máximos de la temperatura de secado y humedad relativa en la cámara de secado del SSM incrementaron significativamente, del día uno al día dos  $\Delta T_{\text{mín}}=13\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{\text{máx}}=16.2\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta H_{\text{mín}}=13\%$  y  $\Delta H_{\text{máx}}=6.5\%$ , respectivamente. Esto indica que la radiación en la cámara de secado del SSM en el día dos fue más alta que en el día uno.



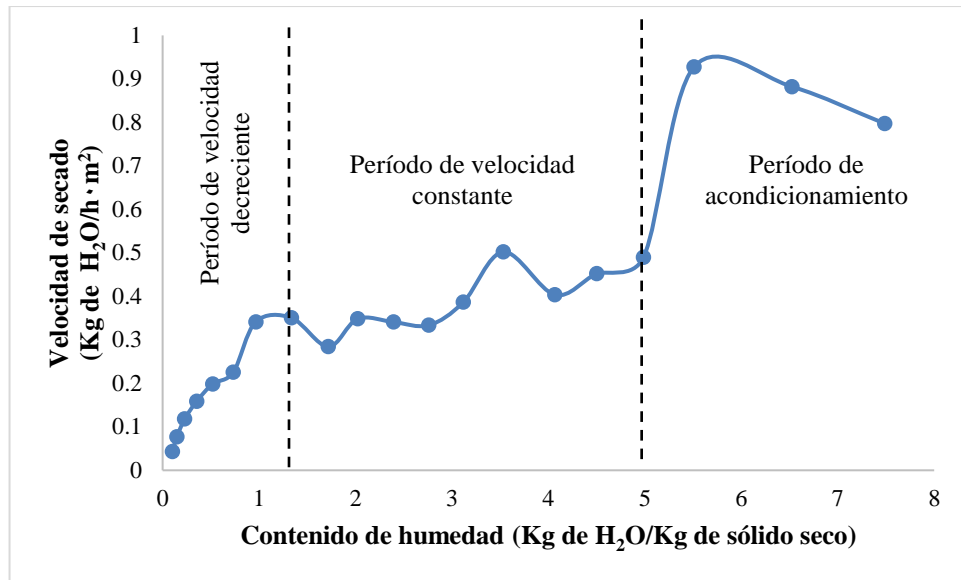
**Figura 20.** Deshidratado de chile de agua (*C. annuum* L.) en un secador de charolas giratorias y un secador solar mixto.

### 9.3. Cinéticas de secado

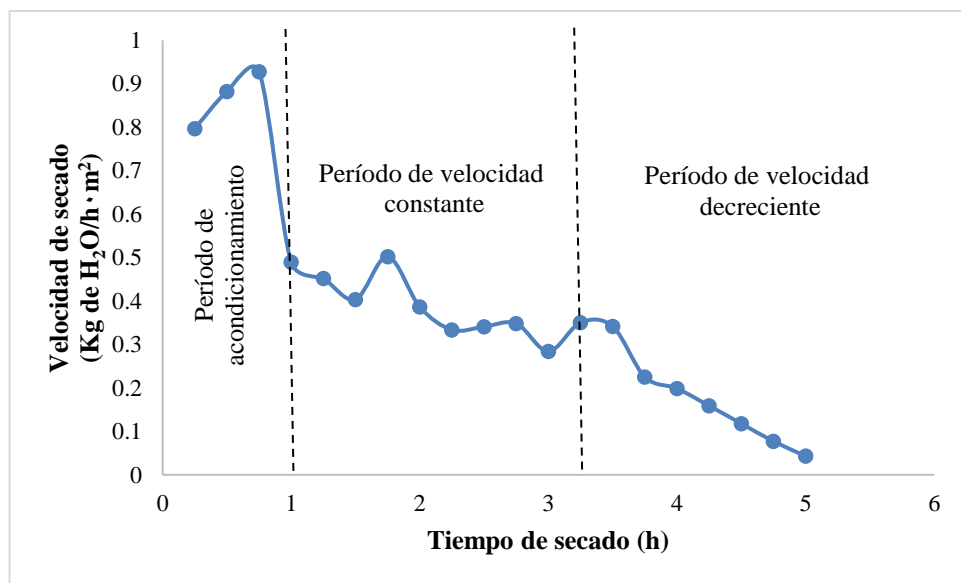
Las cinéticas de secado se obtuvieron graficando la razón de humedad (MR) *versus* la velocidad de secado (DR) de cada una de las muestras. La DR se calculó a partir de las Ecuaciones 1 y 2, respectivamente (*vide supra*). En las curvas de velocidad de secado se identificaron tres períodos de secado de las muestras de CESP-SCG y CECP-SCG. El primero es un período de acondicionamiento que indica un calentamiento de las muestras hasta que la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Posteriormente, el período de velocidad de secado constante donde se inicia una pérdida de agua a velocidad constante, caracterizado por la evaporación de la humedad a partir de una superficie saturada. Esta etapa finaliza cuando se alcanza la llamada humedad crítica. En esta etapa no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La velocidad empieza a decrecer, definiendo a este último como período un de velocidad decreciente. Este período depende de la temperatura del aire, velocidad del aire y del espesor del alimento. Es posible que la cantidad de humedad que se elimina durante el período de velocidad decreciente sea pequeña, Figuras 21 y 22.

El período de acondicionamiento de las muestras de CESP-SCG fue de 60 min, mientras que para el CECP-SCG fue de 15 min. Gómez-Gómez en 2009, también definió en 15 min el período de acondicionamiento para el deshidratado de rebanadas de tomate pretratadas con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 1% deshidratadas en un secador de charolas giratorias. Esto nos indica de manera indirecta que el pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  ayuda a una mejor difusión del agua del alimento hacia el aire de secado.

Para el caso particular de las muestras de chile escaldado con y sin pretratamiento deshidratadas en un secador solar mixto en el día uno y dos no se tiene un período de velocidad de secado constante y decreciente bien definidos (Apéndice D). Además, se logró definir un período de acondicionamiento de 30 y 45 min para las muestras de CESP-SSM2 y CECP-SSM2.



**Figura 21.** Curva de humedad vs velocidad de secado de chile de agua (*C. annuum* L.) sin pretratamiento deshidratado en un secador de charolas giratorias (CESP-SCG).

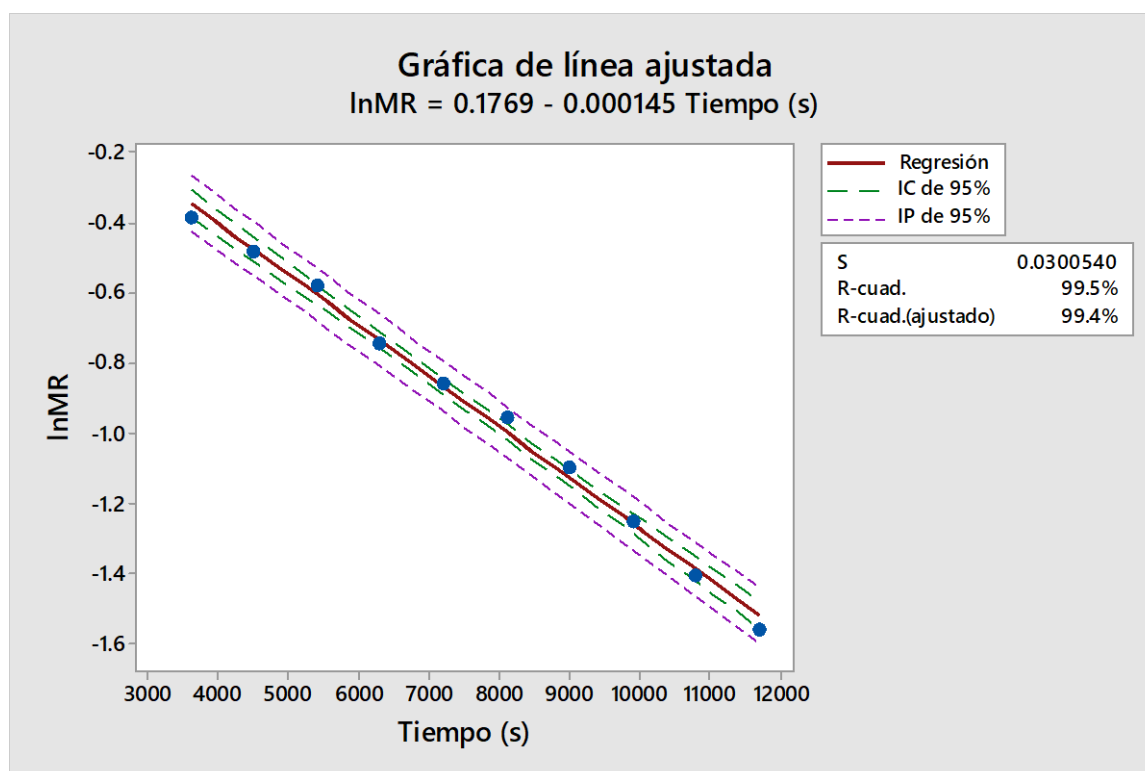


**Figura 22.** Curva de tiempo vs velocidad de secado de chile de agua (*C. annuum* L.) sin pretratamiento deshidratado en un secador de charolas giratorias (CESP-SCG).

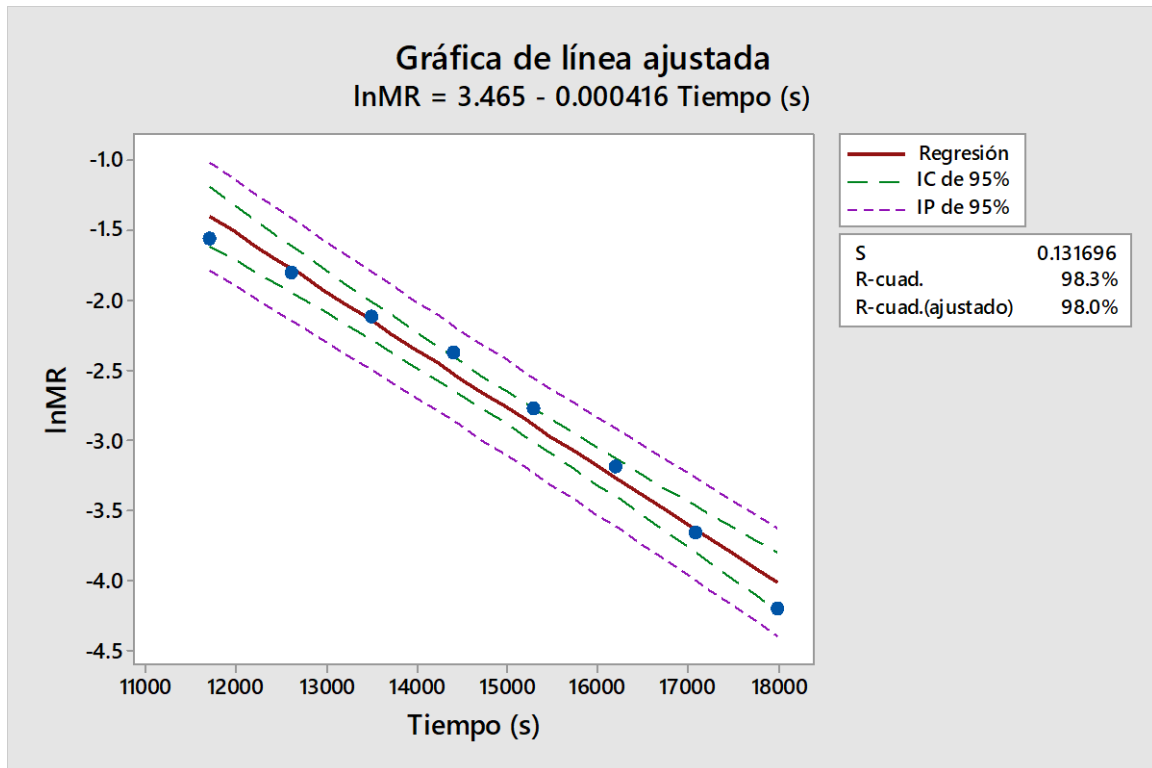
#### 9.4. Difusividad efectiva

Para obtener la difusividad efectiva, se graficaron los resultados experimentales del secado en términos del  $\ln(MR)$  vs tiempo, mediante una regresión lineal en el programa estadístico Minitab 17, con un intervalo de confianza y predictivo del 95%. El programa proporcionó

la ecuación de la línea recta y las gráficas de residuos de  $\ln(\text{MR})$  vs tiempo (s). El procedimiento para su obtención se muestra en el Apéndice A. A partir de la ecuación de regresión lineal correspondiente se extrajeron los valores necesarios para calcular la difusividad efectiva ( $D_{\text{eff}}$ ) mediante la Ecuación 6 (*vide supra*). La  $D_{\text{eff}}$  se determinó para los períodos de velocidad de secado constante (Figura 23) y decreciente (Figura 24) en las muestras con y sin pretratamiento deshidratadas en un SCG, mientras que, para las mismas muestras deshidratadas en un SSM, la  $D_{\text{eff}}$  se calculó a partir de todos los datos experimentales recabados. Esto debido a que no presentan un período de velocidad de secado constante. Los datos presentes en el período de acondicionamiento se excluyeron para las muestras de Chile con y sin pretratamiento deshidratadas en un SCG y un SSM.



**Figura 23.** Regresión lineal de la réplica uno de CESP-SCG en período de velocidad constante.



**Figura 24.** Regresión lineal de la réplica uno de CESP-SCG en período de velocidad decreciente.

### 9.5. Modelos matemáticos aplicados a las cinéticas de secado

Para estimar el valor de la constante de velocidad de secado ( $k$ ), se utilizó una regresión no lineal aplicando los modelos de Newton, Page y Midilli, ecuaciones 7, 8 y 9, respectivamente (*vide supra*), el proceso se describe en el Apéndice B. Las constantes de velocidad de secado decreciente obtenidas a partir de los modelos matemáticos aplicados a las cinéticas de secado se agrupan en la Tabla 21.

**Tabla 21.** Comparativo de las constantes de velocidad de secado obtenidas a partir de los modelos matemáticos aplicados a las cinéticas de secado.

Secado	Nombre del modelo	Coefficientes y constantes del modelo	R <sup>2</sup>
CESP-SCG	Newton	$k = 0.542 \pm 0.073^{abc}$	$0.9914 \pm 0.0026$
	Page	$k = 0.477 \pm 0.115^{abc}$	$0.9956 \pm 0.0012$
		$n = 1.169 \pm 0.119$	
	Midilli et al.	$a = 1.003 \pm 0.006$	$0.9988 \pm 0.0009$
		$k = 0.452 \pm 0.114^{bc}$	
		$n = 0.958 \pm 0.095$ $b = -0.028 \pm 0.005$	
	Velocidad de secado constante	$R_C = 0.389 \pm 0.036$	
Difusividad efectiva en el periodo de velocidad constante	$D_{effC} = 4.62 \pm 0.37E-11 \text{ m}^2/\text{s}$	$0.9831 \pm 0.0107$	
Difusividad efectiva en el periodo de velocidad decreciente	$D_{effD} = 1.21 \pm 0.14E-10 \text{ m}^2/\text{s}$	$0.9887 \pm 0.0055$	
CECP-SCG	Newton	$k = 0.855 \pm 0.078^a$	$0.9904 \pm 0.0058$
	Page	$k = 0.788 \pm 0.070^a$	$0.9975 \pm 0.0020$
		$n = 1.240 \pm 0.113$	
	Midilli et al.	$a = 0.991 \pm 0.004$	
		$k = 0.762 \pm 0.084^a$	$0.9981 \pm 0.0014$
		$n = 1.209 \pm 0.166$ $b = -0.007 \pm 0.005$	
	Velocidad de secado constante	$R_C = 0.712 \pm 0.134$	
Difusividad efectiva en el periodo de velocidad constante	$D_{effC} = 8.59 \pm 1.63E-11 \text{ m}^2/\text{s}$	$0.9803 \pm 0.0084$	
Difusividad efectiva en el periodo de velocidad decreciente	$D_{effD} = 1.30 \pm 0.06 E-10 \text{ m}^2/\text{s}$	$0.9717 \pm 0.0312$	
CESP-SSM1	Newton	$k = 0.162 \pm 0.030^{ab}$	$0.9998 \pm 0.0001$
	Page	$k = 0.159 \pm 0.027^{ab}$	$0.9999 \pm 0.0001$
		$n = 1.018 \pm 0.075$	
	Midilli et al.	$a = 0.995 \pm 0.005$	
		$k = 0.204 \pm 0.030^c$ $n = 1.191 \pm 0.037$ $b = 0.047 \pm 0.008$	$1.000 \pm 0.0000$
Difusividad efectiva	$D_{eff} = 1.53 \pm 0.27 E-11 \text{ m}^2 / \text{s}$	$0.9956 \pm 0.0036$	
CECP-SSM1	Newton	$k = 0.154 \pm 0.032^{ab}$	$0.9997 \pm 0.0002$
	Page	$k = 0.165 \pm 0.039^{ab}$	$0.9999 \pm 0.0001$
		$n = 0.940 \pm 0.106$	
	Midilli et al.	$a = 0.998 \pm 0.003$	$1.000 \pm 0.0000$
		$k = 0.212 \pm 0.026^c$ $n = 1.095 \pm 0.145$ $b = 0.046 \pm 0.020$	
Difusividad efectiva	$D_{eff} = 1.27 \pm 0.20 E-11 \text{ m}^2 / \text{s}$	$0.9942 \pm 0.0028$	
CESP-SSM2	Newton	$k = 1.928 \pm 0.553^{ac}$	$0.8513 \pm 0.0978$
	Page	$k = 1.658 \pm 0.203^{ac}$	$0.9500 \pm 0.0114$
		$n = 0.531 \pm 0.068$	
Midilli et al.	$a = 0.437 \pm 0.057$ $k = 0.558 \pm 0.104^{ab}$	$0.9956 \pm 0.0019$	

		n= 1.327±0.304 b= -0.012±0.003	
	Difusividad efectiva	$D_{\text{eff}} = 1.38 \pm 0.19 \text{ E-10 m}^2$ /s	0.9549±0.0188
	Newton	k = 1.643±0.571 <sup>ac</sup>	0.8842±0.0727
	Page	k = 1.516±0.282 <sup>ac</sup> n = 0.564±0.083	0.9430±0.0049
CECP-SSM2	Midilli et al.	a= 0.447±0.069 k = 0.428±0.135 <sup>bc</sup> n = 1.658±0.284 b = -0.011±0.009	0.9953±0.0014
	Difusividad efectiva	$D_{\text{eff}} = 1.39 \pm 0.23 \text{ E-10 m}^2$ /s	0.9525±0.0204

CESP-SCG= Chile escaldado sin pretratamiento deshidratado en un secador de charolas giratorias; CECP-SCG= Chile escaldado con pretratamiento deshidratado en un secador de charolas giratorias; CESP-SSM1= Chile escaldado sin pretratamiento deshidratado en un secador solar mixto (día 1); CECP-SSM1= Chile escaldado con pretratamiento deshidratado en un secador solar mixto (día 1); CESP-SSM2=secado solar sin pretratamiento (día 2); CECP-SSM2= Chile escaldado con pretratamiento deshidratado en un secador solar mixto (día 2);  $R_c$ : constante de velocidad de secado en el periodo de velocidad constante;  $D_{\text{eff}}$ : difusividad efectiva;  $D_{\text{effC}}$ : difusividad efectiva en el período de velocidad constante;  $D_{\text{effD}}$ : difusividad efectiva en el período de velocidad decreciente.

Los datos se reportan como promedio de tres réplicas ± desviación estándar. Diferentes superíndices en la misma columna indican una diferencia significativa entre las muestras a un  $\alpha= 0.05$  de acuerdo con la prueba de Dunn para Newton y Page, y Tukey para Midilli.

Los modelos matemáticos aplicados a las cinéticas de secado permitieron identificar que el período de velocidad de secado decreciente no solo está en función de la temperatura de secado, Tabla 21. Esto se hace evidente cuando se comparan los valores de las constantes k obtenidas para las muestras sometidas a un secado en el secador de charolas (CESP-SCG y CECP-SCG) con las muestras deshidratadas en el secador solar mixto (CESP-SSM1, CECP-SSM1, CESP-SSM2 y CECP-SSM2). Independientemente del modelo utilizado, Newton (k-Newton), Page (k-Page) y Midilli (k-Midilli) para calcular las constantes de velocidad de secado k, los valores calculados de k son mayores en las muestras deshidratadas en el secador solar mixto en el día dos (CESP-SSM2 y CECP-SSM2). Este comportamiento se puede atribuir a que k en el período de velocidad de secado decreciente también está influenciada por los cambios de temperatura y humedad relativa ambiental y en el interior de la cámara de secado; así como, por la radiación visible que capta la cámara de secado desde la parte superior.

De acuerdo con el análisis estadístico inferencial (Tabla 22) se encontró que los parámetros k-Newton, k-Page, a-Midilli, b-Midilli y difusividad efectiva ( $D_{\text{eff}}$ ) no presentan una distribución normal; sin embargo, si provienen de una distribución homocedástica, es decir,

las varianzas en todos los grupos son estadísticamente iguales. Cabe señalar que la falta de distribución normal en los datos de los parámetros antes mencionados se debió a que los resultados de la pérdida de humedad obtenidos a partir del secado de las muestras en el secador solar mixto se llevaron a cabo en dos días con cambios importantes en la temperatura del aire secante. Por lo que, se optó por realizar un análisis no paramétrico basado en la prueba de Kruskal-Wallis para realizar un comparativo de medianas y una prueba de Dunn para determinar inferencias simultáneas entre las medias de los procesos de cada parámetro, a un  $\alpha = 0.05$ . Por otra parte, los parámetros n-Page, k-Midilli, n-Midilli y  $R_c$  presentan una distribución normal y homocedástica, por consiguiente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y una prueba de Tukey a un  $\alpha = 0.05$  para determinar si existía diferencia significativa entre las medias de al menos dos de los procesos. Estas constantes no fueron tan sensibles a los cambios de temperatura durante el proceso de secado.

**Tabla 22.** Análisis estadístico inferencial de los parámetros de los modelos matemáticos aplicados a las cinéticas de secado.

Parámetro	Prueba de normalidad Shapiro-Wilk	Prueba de homocedasticidad		Prueba no paramétrica Kruskal-Wallis	Prueba paramétrica ANOVA de una vía	$R^2$
		Fligner-killeen	Levene			
k-Newton	2.62E-02	0.78	---	7.35E-03	---	---
k-Page	2.00E-02	0.70	---	7.35E-03	---	---
n-Page	0.08	---	0.99	---	2.45E-06	0.9246
k-Midilli	0.16	---	0.73	---	6.12E-05	0.8693
n-Midilli	0.10	---	0.73	---	1.59E-02	0.6496
a-Midilli	2.74E-05	0.54	---	1.50E-02	---	---
b-Midilli	1.50E-02	0.60	---	1.13E-02	---	---
$R_c$	0.23	---	0.40	---	1.56E-02	0.8030
Def	7.50E-03	0.80	---	4.62E-03	---	---

Si el valor  $p$ -calculado es  $<$  el valor de  $p$ -establecido ( $\alpha= 0.05$ ), se rechaza la hipótesis nula para todas las pruebas.

Hipótesis test de Shapiro-Wilk.  $H_0$ : los datos se distribuyen normalmente,  $H_1$ : los datos no están distribuidos normalmente.

Hipótesis test de Bartlett.  $H_0$ : las varianzas son iguales en todos los grupos o muestras,  $H_1$ : las varianzas no son iguales en todos los grupos o muestras.

Hypothesis test de Kruskal-Wallis.  $H_0$ : los datos provienen de la misma distribución,  $H_1$ : los datos no provienen de la misma distribución.

Conforme a la prueba de Kruskal-Wallis para la k-Newton se encontró que existe

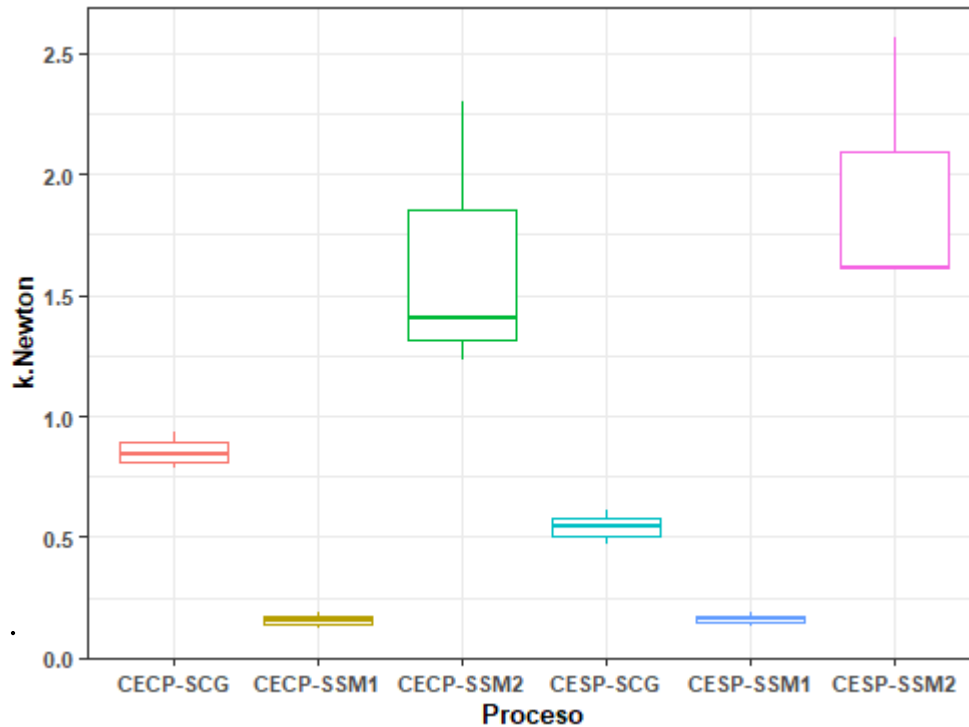


diferencia significativa entre al menos dos de los procesos. Esto se demuestra bajo la condición de que el valor  $p_{\text{calculado}} \ll$  al valor de  $\alpha$ , dado que para k-Newton, ( $7.35E-03 \ll 0.05$ ), por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta que las medias son diferentes para al menos dos de los procesos (Tabla 22). Sumado a esto, de acuerdo al comparativo de pares de medias mediante el método de Dunn se confirmó que efectivamente existe diferencia estadística significativa entre los procesos para el modelo de Newton. Se encontró que los pares de medias que son estadísticamente diferentes son CECP-SSM1 - CECP-SSM2, CECP-SSM2 - CESP-SSM1, CECP-SSM1 - CESP-SSM2 y CESP-SSM1 - CESP-SSM2 (Tabla 23). Por lo tanto, no existe diferencia significativa entre las muestras pretratadas y sin pretratamiento deshidratadas ya sea en el SCG o en el SSM. Esto implica que el pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% no contribuye de manera significativa en la constante de velocidad de secado del modelo de Newton, por lo que estadísticamente no influye de manera significativa en la difusividad del agua del Chile hacia el aire de la cámara de secado de ambos secadores. Sin embargo, si existe diferencia significativa entre las muestras con y sin pretratamiento deshidratadas en el SSM en el día uno y dos. Estos resultados se pueden observar en la Figura 25.

**Tabla 23.** Comparativo múltiple de medias por el método de Dunn para la k-Newton.

	CECP-SCG	CECP-SSM1	CECP-SSM2	CESP-SCG	CESP-SSM1
CECP-SSM1	0.07	---	---	---	---
CECP-SSM2	0.40	7.44E-03	---	---	---
CESP-SCG	0.49	0.25	0.13	---	---
CESP-SSM1	0.11	0.82	1.44E-02	0.36	---
CESP-SSM2	0.22	2.22E-03	0.70	0.06	4.66E-03

Los valores corresponden a un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ ,  $p < 0.05$  indican una diferencia significativa entre muestras de acuerdo con el comparativo múltiple de medias por el método de Dunn.



**Figura 25.** Gráfico de cajas y bigotes de la constante de velocidad de secado en el período de velocidad de secado decreciente del modelo de Newton (k-Newton) obtenida en cada proceso.

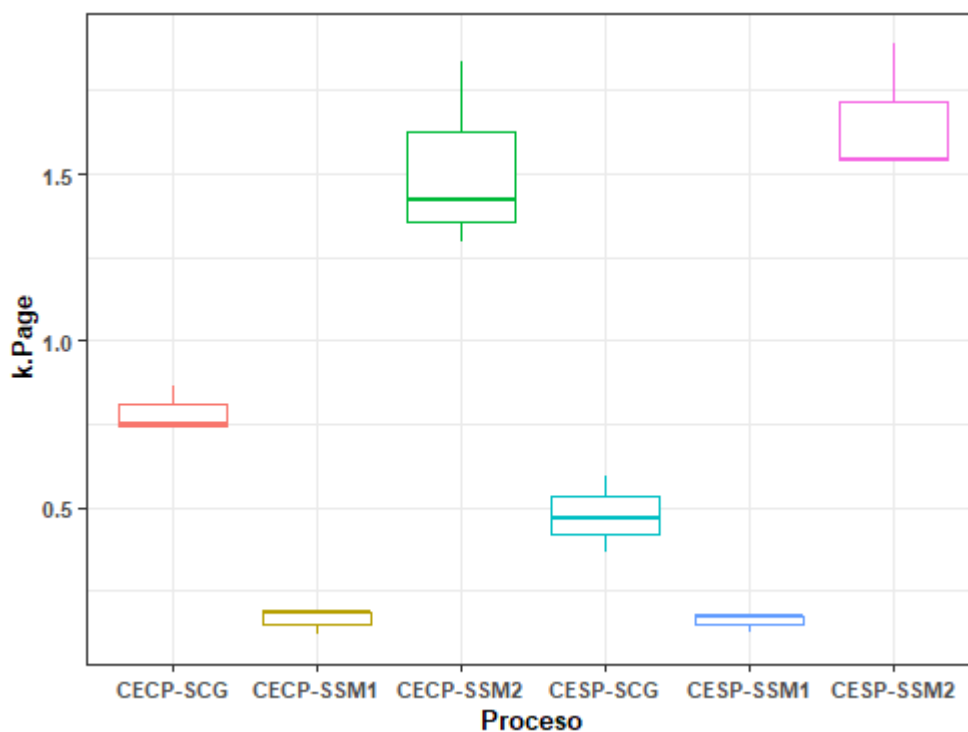
Además, de acuerdo con el test de Kruskal-Wallis para la constante  $k$  de Page se encontró que el valor de  $p_{\text{calculado}} \ll \alpha$ ,  $P(7.35E-03 \ll 0.05)$ , por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta que existe diferencia significativa entre las medias de las muestras pretratadas y sin pretratamiento deshidratadas en el secador de charolas y en el secador solar mixto (Tabla 22). Adicionalmente, de acuerdo al comparativo de pares de medias mediante el método de Dunn se confirmó que efectivamente existe diferencia estadística significativa entre los procesos para el modelo de Page. Se encontró que los pares de medias que son estadísticamente diferentes son CECP-SSM1 - CECP-SSM2, CECP-SSM2 - CESP-SSM1, CECP-SSM1 - CESP-SSM2 y CESP-SSM1 - CESP-SSM2 (Tabla 24). Por lo tanto, no existe diferencia significativa entre las muestras pretratadas y sin pretratamiento deshidratadas ya sea en el SCG o en el SSM. Esto implica que el pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% no contribuye de manera significativa a la constante de velocidad de secado del modelo de Page, por lo que estadísticamente no influye de manera significativa en la difusión del agua del chile hacia el aire de la cámara de secado de ambos secadores.

Sin embargo, si existe diferencia significativa entre las muestras con y sin pretratamiento deshidratadas en SSM en el día uno y dos. Estos resultados se pueden observar en la Figura 26.

**Tabla 24.** Comparativo múltiple de medias por el método de Dunn para la k-Page.

	CECP-SCG	CECP-SSM1	CECP-SSM2	CESP-SCG	CESP-SSM1
CECP-SSM1	0.11	---	---	---	---
CECP-SSM2	0.40	1.44E-02	---	---	---
CESP-SCG	0.49	0.36	0.13	---	---
CESP-SSM1	0.07	0.82	7.44E-03	0.25	---
CESP-SSM2	0.22	4.66E-03	0.70	0.06	2.22E-03

Los valores corresponden a un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ ,  $p < 0.05$  indican una diferencia significativa entre muestras de acuerdo con el comparativo múltiple de medias por el método de Dunn.



**Figura 26.** Gráfico de cajas y bigotes de la constante de velocidad de secado decreciente del modelo de Page (k-Page) obtenida en cada proceso.

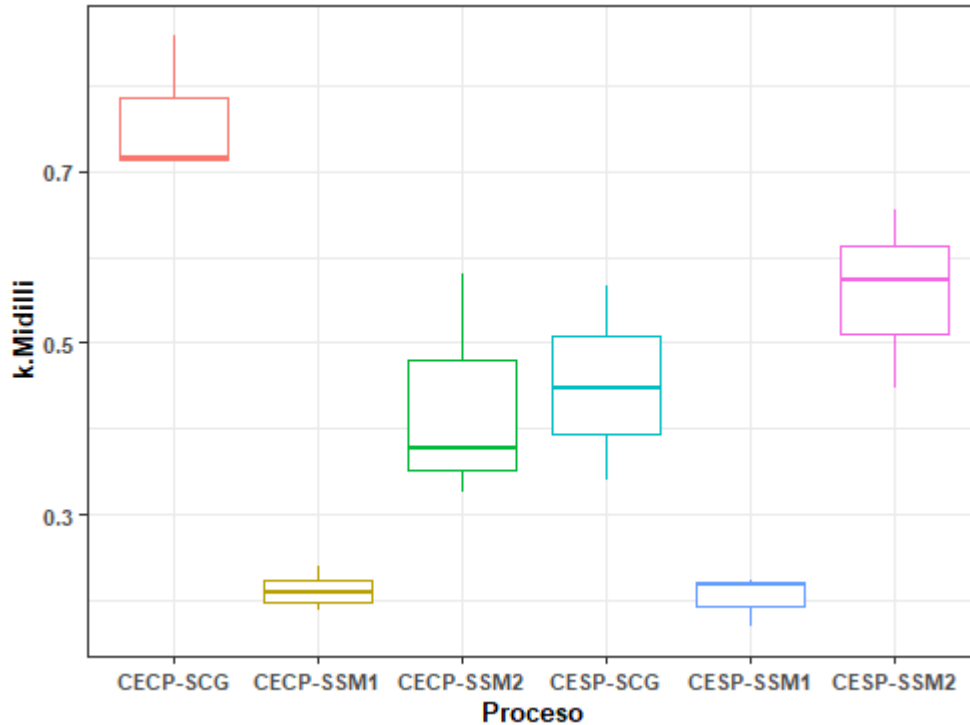
Por otra parte, el análisis de varianza (ANOVA) de una vía para la velocidad de secado decreciente obtenida a partir del modelo de Midilli (Tabla 22), muestra que existe diferencia significativa entre las medias de las muestras pretratadas y sin pretratamiento

deshidratadas en el secador de charolas y en el secador solar mixto. Debido a que, el valor de  $p \ll \alpha$  ( $6.12E-05 \ll 0.05$ ), por lo que se rechaza la hipótesis nula de que las medias de la k-Midilli del secador de charolas y el secador solar en el día uno y dos son iguales. Adicionalmente, de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey se confirmó que existe diferencia estadística significativa entre las medias de las velocidades de secado decreciente en el modelo de Midilli. Se encontró que los pares de medias que son estadísticamente iguales son CESP-SSM2 - CECP-SCG, CECP-SSM2 - CECP-SSM1, CESP-SSM1 - CECP-SSM1, CESP-SCG - CECP-SSM2, CESP - SSM2-CECP-SSM2 y CESP-SSM2 - CESP-SCG (Tabla 25). Por lo tanto, existe diferencia significativa entre las muestras pretratadas y sin pretratamiento deshidratadas en un SCG, mientras que las muestras pretratadas y sin pretratamiento deshidratadas en un SSM en día uno y dos son estadísticamente iguales a un  $\alpha = 0.05$ . Esto implica que el pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% contribuye de manera significativa a la constante de velocidad de secado del modelo de Midilli en las muestras deshidratadas en un SCG, pero no influye en las muestras deshidratadas en el SSM en ambos días. Estos resultados se pueden observar en la Figura 27.

**Tabla 25.** Comparativo múltiple de medias por el método de Tukey para la k-Midilli.

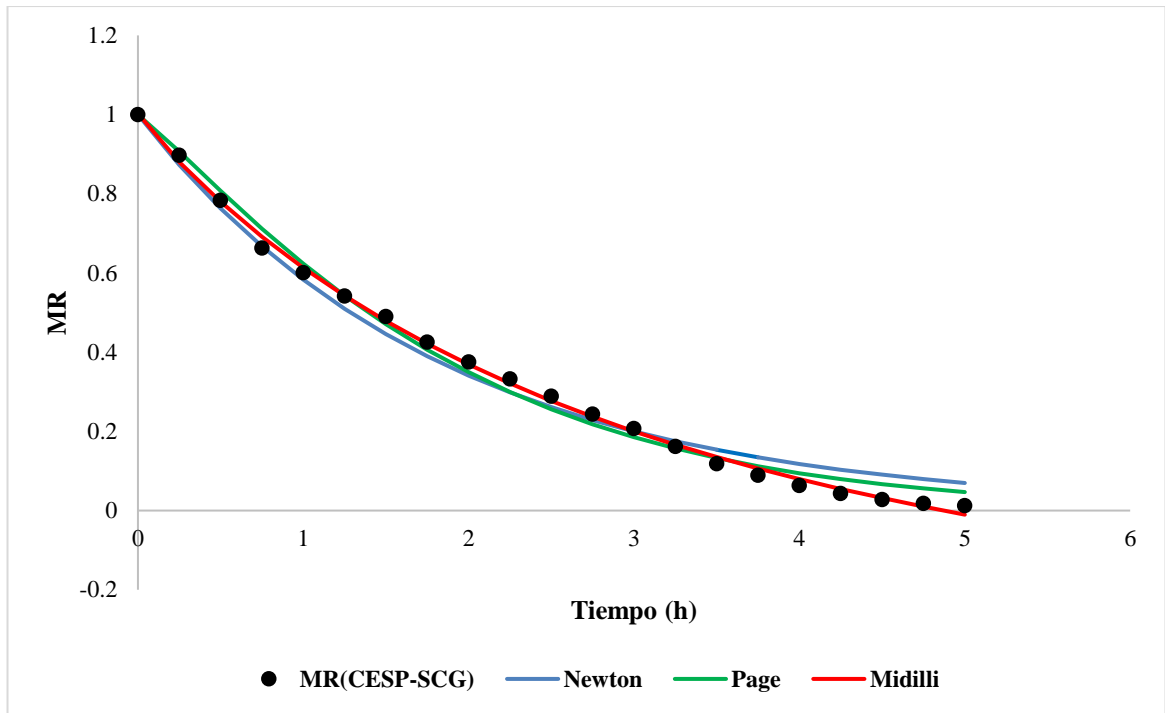
	CECP-SCG	CECP-SSM1	CECP-SSM2	CECP-SSM2	CECP-SSM1
CECP-SSM1	1.06E-04	---	---	---	---
CECP-SSM2	8.08E-03	0.11	---	---	---
CECP-SCG	1.37E-02	6.68E-02	1.00	---	---
CECP-SSM1	9.11E-05	1.00	9.32E-02	5.53E-02	---
CECP-SSM2	0.14	6.16E-03	0.54	0.72	5.11E-03

Los valores corresponden a un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ ,  $p < 0.05$  indican una diferencia significativa entre muestras de acuerdo con el comparativo múltiple de medias por el método de Tukey.



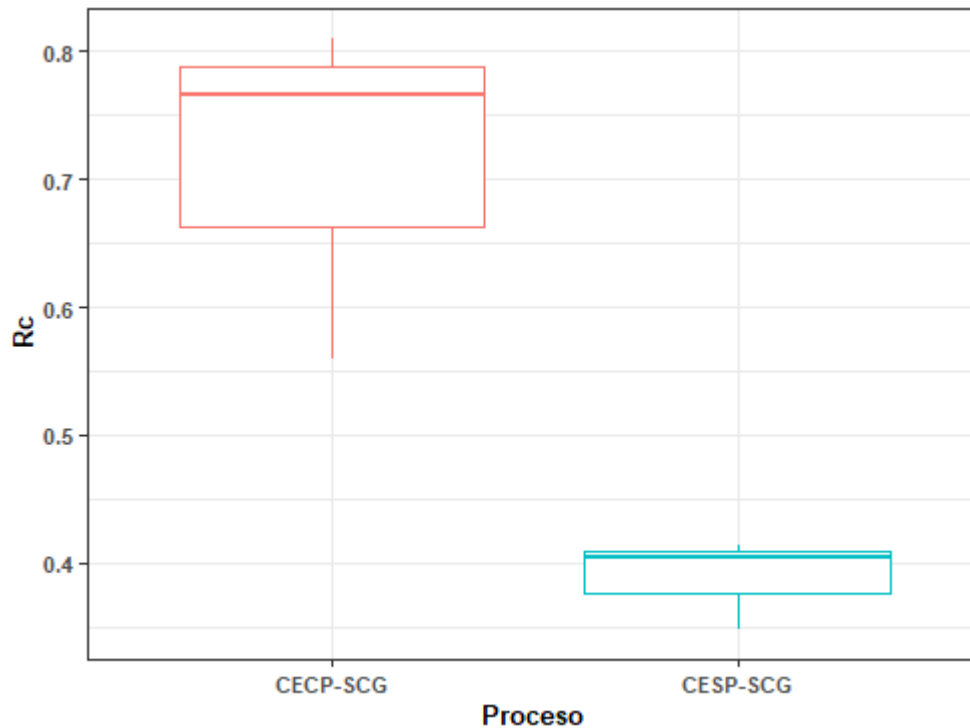
**Figura 27.** Gráfico de cajas y bigotes de la constante de velocidad de secado decreciente del modelo de Midilli ( $k$ -Midilli) obtenida en cada proceso.

La idoneidad de las ecuaciones del modelo se evaluó con base en el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). El modelo que generó el valor más alto de  $R^2$  se seleccionó como el mejor modelo para representar el proceso de secado de *C. annuum* L. variedad Chile de agua. Por lo tanto, se determinó que el modelo de Midilli con el valor de  $R^2$  más alto ( $R^2 > 0.99$ ), es el mejor modelo para representar los datos de MR del secado de chile de agua escaldado con y sin pretratamiento en un secador de charolas giratorias y un secador solar mixto, para los distintos procesos. Adicionalmente, los modelos de Newton y Page también se ajustan bien a la regresión de los datos de MR para algunos de los procesos; sin embargo, para CESP-SSM2 y CECP-SSM2 los valores de  $R^2$  fueron menores del 0.95 (Tabla 21). Por lo que se observa un menor ajuste para estas muestras en los modelos de Newton y Page (Figura 28).



**Figura 28.** Relación de MR vs tiempo de datos experimentales y obtenidos de los modelos de Newton, Page y Midilli de chile de agua sin pretratamiento (*C. annuum* L.) deshidratado en un secador de charolas giratorias.

La velocidad de secado constante ( $R_C$ ) solo se pudo calcular para las muestras con y sin pretratamiento deshidratadas en un SCG, debido a que las muestras con y sin pretratamiento deshidratadas en un SSM no tenían un período de velocidad de secado constante bien definido. El análisis de varianza para la  $R_C$ , revela que existe diferencia significativa entre las muestras pretratadas y sin pretratamiento deshidratadas en el secador de charolas. Esto se demuestra dado que bajo la condición de  $p \ll \alpha$  ( $1.56E-02 \ll 0.05$ ), se rechaza la hipótesis nula y se acepta que la velocidad de secado constante de las muestras CESP-SCG y CECP-SCG son estadísticamente diferentes para un  $\alpha = 0.05$  (Tabla 22). Complementario a esto, en relación al comparativo de pares de medias mediante el método de Tukey,  $p \ll \alpha$  ( $1.56E-02 \ll 0.05$ ) se confirmó que para  $R_C$  existe diferencia estadística significativa entre estos procesos. De modo que, el pretratamiento con  $Na_2S_2O_5$  al 0.5% contribuye estadísticamente en la difusividad del agua del alimento hacia el aire de la cámara de secado del SCG durante el período de velocidad de secado constante,  $R_C$ . Estos resultados se pueden observar en la Figura 29.



**Figura 29.** Gráfica de cajas y bigotes de las velocidades de secado constante ( $R_c$ ) obtenidas en las muestras de CESP-SCG y CECP-SCG.

Por otra parte, el coeficiente de difusividad efectiva ( $D_{eff}$ ) se calculó para los períodos de velocidad de secado constante y decreciente en las muestras con y sin pretratamiento deshidratadas en un SCG, mientras que para las mismas muestras deshidratadas en un SSM se calculó a partir de todos los datos experimentales recabados. Esto debido a que no presentaron un período de velocidad de secado constante. Los datos presentes en el período de acondicionamiento se excluyeron para las muestras de Chile con y sin pretratamiento deshidratadas en un SCG y un SSM.

De acuerdo, con una prueba de Kruskal-Wallis se determinó que existe diferencia significativa entre las muestras pretratadas y sin pretratamiento deshidratadas en el secador de charolas y en el secador solar. Esto se demuestra a partir de un valor de  $p \ll \alpha$  ( $4.62E-03 < 0.05$ ) (Tabla 22). Adicionalmente, acorde al comparativo de pares de medias mediante el método de Dunn se confirmó que efectivamente existe diferencia estadística significativa entre los procesos para el modelo de la  $D_{eff}$ . Se encontró que los pares de

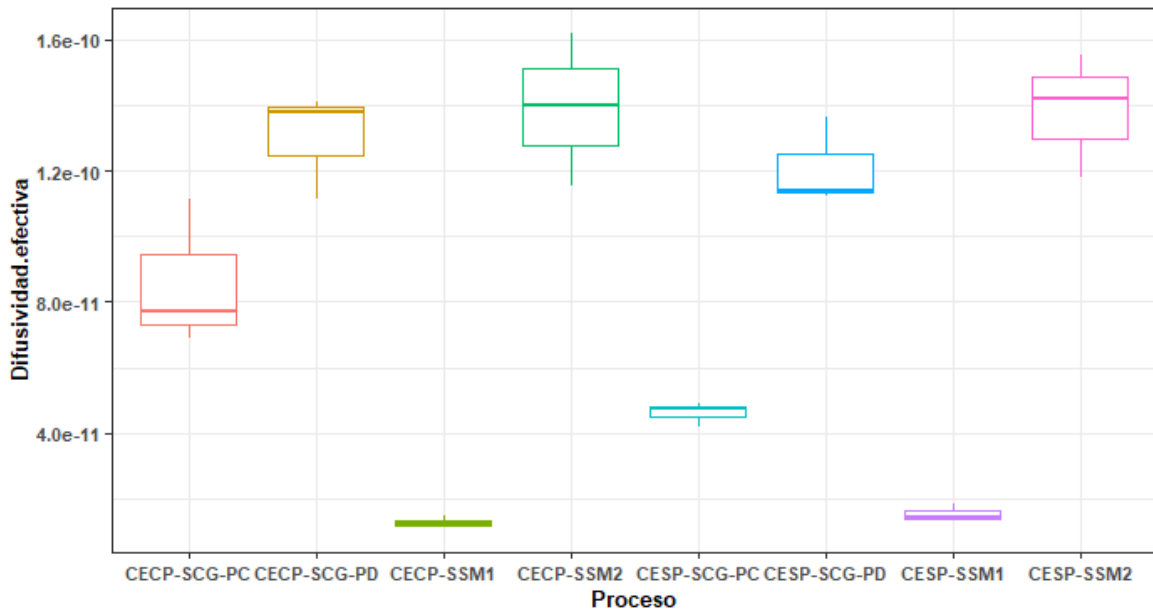
medias que son estadísticamente diferentes son chile escaldado con pretratamiento de deshidratado en un secador de charolas giratorias en el período de velocidad decreciente (CECP-SCG-PD) – CECp-SSM1, CECp-SSM1 - CECp-SSM2, CECp-SSM2 – chile escaldado sin pretratamiento deshidratado en un secador de charolas giratorias en el período de velocidad constante (CESP-SCG-PC), CECp-SSM1 - chile escaldado sin pretratamiento de deshidratado en un secador de charolas giratorias en el período de velocidad decreciente (CESP-SCG-PD), CECp-SCG-PD - CESP-SSM1, CECp-SSM2 - CESP-SSM1, CESP-SCG-PD - CESP-SSM1, CECp-SSM1 - CESP-SSM2, chile escaldado sin pretratamiento deshidratado en un secador de charolas giratorias en el período de velocidad constante (CESP-SCG-PC) - CESP-SSM2 y CESP-SSM1 - CESP-SSM2 (Tabla 26). Por lo tanto, no existe diferencia significativa de la difusividad efectiva en las muestras pretratadas y sin pretratamiento deshidratadas ya sea en un SCG o en un SSM. Asimismo, el coeficiente de  $D_{\text{eff}}$  de las muestras pretratadas y sin pretratamiento deshidratadas en un SCG tampoco se afecta por un período de velocidad de secado, siendo estadísticamente iguales a un  $\alpha = 0.05$ . De modo que, el pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% no contribuyó estadísticamente en la difusión del agua del alimento hacia el aire de la cámara de secado ya sea en un SCG o en un SSM, ni en el período de velocidad de secado constante y decreciente. Es decir, no existe un cambio significativo en la densidad de flujo molar de agua con respecto al gradiente de concentración ya sea en un SCG o en un SSM, ni tampoco en el período de velocidad de secado constante y decreciente. Estos resultados se pueden observar en la Figura 30.



**Tabla 26.** Comparativo múltiple de medias por el método de Dunn para la difusividad efectiva.

	CECP-SCG-PC	CECP-SCG-PD	CECP-SSM1	CECP-SSM2	CESP-SCG-PC	CESP-SCG-PD	CESP-SSM1
CECP-SCG-PD	0.30	---	---	---	---	---	---
CECP-SSM1	0.13	1.11E-02	---	---	---	---	---
CECP-SSM2	0.13	0.64	2.68E-03	---	---	---	---
CESP-SCG-PC	0.56	0.11	0.36	3.77E-02	---	---	---
CESP-SCG-PD	0.45	0.77	2.43E-02	0.45	0.18	---	---
CESP-SS1	0.23	2.43E-02	0.77	6.66E-03	0.53	4.96E-02	---
CESP-SS2	0.11	0.56	1.82E-03	0.91	2.82E-02	0.39	4.67E-03

Los valores corresponden a un nivel de significancia de  $\alpha= 0.05$ ,  $p < 0.05$  indican una diferencia significativa entre muestras de acuerdo con el comparativo múltiple de medias por el método de Dunn.



**Figura 30.** Gráfica de cajas y bigotes de la difusividad efectiva ( $D_{eff}$ ) obtenida para cada proceso y de acuerdo al período de velocidad de secado constante o decreciente.

Se han realizado diversas investigaciones para determinar los ajustes de modelos

matemáticos en las cinéticas de secado de *Capsicum*. Arslan y Özcan (2011) estudiaron el ajuste de las cinéticas de secado con ocho modelos matemáticos para describir los comportamientos de secado al sol y en un horno de las rodajas de chile rojo fresco (*C. annuum* L.). El proceso de secado en un horno (Nüve FN055 Ankara) se llevó a cabo a una temperatura de entre 50 y 70 °C. El proceso de secado al sol se llevó a cabo a una temperatura de entre 20 y 30 °C. La masa de la muestra se midió cada 1 h durante el secado en el horno y al sol. Los valores del parámetro  $n$  del modelo de Page, así como los parámetros  $k$  y  $b$  del modelo de Midilli en el secado al sol de chile rojo fresco (*C. annuum* L.) de Turquía son similares a los valores encontrados en deshidratados de chile de agua (*C. annuum* L.) de México escaldado con y sin pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  y deshidratado en un SSM en el día 2 (CESP-SSM2 y CECP-SSM2) reportados en el presente estudio. Además, si interpolamos los valores de los parámetros de los modelos de Page y Midilli a la temperatura de 60 °C en el secado en un horno, encontramos que los valores de  $k$  de los modelos de Newton y Page en el chile rojo fresco (*C. annuum* L.) son similares a los valores encontrados para el deshidratado de chile de agua (*C. annuum* L.) escaldado sin pretratamiento deshidratado en el SCG (CESP-SCG) y cercanos a los valores determinados para el chile escaldado con pretratamiento deshidratado en un SCG (CECP-SCG) realizados en el presente estudio (Tablas 12 y 21, *vide supra*). Mientras que el parámetro  $n$  del modelo de Page tiene valores cercanos a los valores determinados para CESP-SCG y CECP-SCG. Adicionalmente, los valores de  $a$  y  $k$  del modelo de Midilli determinados para el chile rojo fresco también son similares a los obtenidos en el CESP-SCG y CECP-SCG. Por último, se confirma que los modelos de Page y Midilli son los mejores para representar el proceso de secado de chile debido a que se ajustan al análisis de regresión de los datos de MR del secado de chile, con valores de  $R^2 > 0.99$ .

En otro estudio, Rabha et al. (2017b) reportaron el ajuste de las cinéticas de secado de chile fantasma (*C. chinense* Jacq.) realizado en un secador solar de túnel de convección forzada de tipo indirecto y por exposición directa al sol con el modelo de Newton, Page y Midilli (Tabla 13, *vide supra*). El secador solar de túnel de convección forzada de tipo indirecto empleado por Rabha et al., es similar al SSM aplicado en este proyecto para deshidratar chile de agua (*C. annuum* L.). Las constantes de velocidad de secado,  $k$ , para los modelos

de Newton, Page y Midilli de las cinéticas de secado de chile fantasma (*C. chinense Jacq.*) obtenidas en un secador solar de túnel de convección forzada de tipo indirecto y por exposición directa al sol presentaron valores pequeños en comparación con los obtenidos con el chile de agua escaldado con y sin pretratamiento deshidratados en un secador solar mixto en el día uno y dos. Los valores del parámetro  $n$  del modelo de Page para CECP y CESP deshidratados en el SSM en el día uno y dos son menores a los obtenidos en secador solar de túnel de convección forzada de tipo indirecto y por exposición directa al sol. Sin embargo, los valores de  $n$  del modelo de Page para las muestras de CESP-SCG y CECP-SCG se encuentran cerca de las obtenidas en el secado de chile fantasma en un secador solar de túnel de convección forzada de tipo indirecto y por exposición directa al sol. Por otra parte, los valores de  $b$  y  $n$  del modelo de Midilli en el deshidratado en el secador de túnel de convección forzada de tipo indirecto son muy similares a las obtenidas en deshidratado de chile de agua escaldado con y sin pretratamiento deshidratados en el SCG y el SSM. Además, se confirma que Midilli es el mejor modelo para representar el proceso de secado de chile debido a que se ajusta muy bien a datos de MR del secado de chile, con valores de  $R^2 > 0.99$ . Así mismo, el modelo de Page también se ajusta bien a la regresión de los datos de MR del secado de chile de agua y fantasma.

Por otra parte, Silva et al. (2018) determinaron la cinética de secado del chile verde “aromático” (*C. annuum* L.), evaluando cinco modelos matemáticos a los valores experimentales en función del contenido de agua. El proceso de secado se llevó a cabo utilizando un horno de convección forzada con velocidad de aire de 1 m/s a la temperatura de 60 °C (Tabla 14, *vide supra*). Los valores de la constante de velocidad de secado de Newton y Page para el chile verde (*C. annuum* L.) deshidratado en un horno de convección forzada son pequeños con respecto a los obtenidos para el chile de agua escaldado con y sin pretratamiento deshidratados en un SCG. Además, se afirma que los modelos de Newton y Page se ajustan mejor en la cinética de secado de chile de agua que en el chile “aromático”. Esto se comprueba al observarse valores superiores de  $R^2$  en las muestras de chile de agua escaldado con y sin pretratamiento deshidratados en un SCG para los modelos de Newton y Page.

En otro estudio, Alvarez-Parrilla et al. (2019) ajustaron los modelos de Newton, Page y

Midilli a la cinética de secado del chile jalapeño rojo (*C. annuum*). El proceso de secado se realizó en un horno de convección (Fisher-Scientific 6965) a la temperatura de 65 °C durante un período 60 h (Tabla 15, *vide supra*). Los valores de la constante de velocidad de secado,  $k$ , de Newton, Page y Midilli para el chile jalapeño rojo (*C. annuum*) deshidratado en un horno de convección forzada son menores que los obtenidos en el presente estudio para el chile de agua escaldado con y sin pretratamiento deshidratados en el SCG.

Los valores de  $n$  del modelo de Page para las muestras de chile de agua con y sin pretratamiento deshidratadas en un SCG son similares a las obtenidas en el deshidratado de chile jalapeño rojo en un horno de convección forzada. Por otra parte, los valores de  $b$  y  $n$  del modelo de Midilli en el deshidratado en un horno son muy similares a las obtenidas para el chile de agua escaldado con y sin pretratamiento deshidratados en un SCG. Además, confirma que Midilli es el mejor modelo para representar el proceso de secado de chile. De igual forma, el modelo de Page también muestra un buen ajuste a los datos de MR del secado de chile de agua y jalapeño. Sin embargo, este modelo produce una mayor variabilidad entre muestras.

Por otra parte, Babar et al. (2021) determinaron los coeficientes de difusividad efectiva para la cinética de secado de chile verde (var. SHP4884). Las muestras de chile se sometieron a un proceso de escaldado a 90 °C, previo al secado. El proceso de secado se realizó en un secador solar a una temperatura de entre 17-21 °C, durante un período de 13 h y una velocidad de aire de 1.2 m/s (Tabla 16). Los valores de  $D_{\text{eff}}$  obtenidos en las muestras de chile escaldado con y sin pretratamiento deshidratados en el SSM, realizados en el presente estudio, son similares a los obtenidos por Babar et al. (2021).

En general, se encontró que los valores de  $D_{\text{eff}}$  obtenidos en los períodos de velocidad de secado constante y decreciente en las cinéticas de secado de chile escaldado con y sin pretratamiento deshidratado en un SCG y un SSM se encuentran dentro de los intervalos reportados en la literatura para muestras de chile (Tabla 20, *vide supra*).

### **9.5.1 Comparativo secador solar mixto vs otros secadores solares**

Al comparar el secado del chile rojo (*C. annuum* L.) deshidratado en un secador solar de doble paso (SSDP) evaluado en Hue, Vietnam (Banout et al., 2011) *versus* el secado del

chile de agua (*C. annuum* L.) deshidratado en un secador solar mixto (SSM) del presente estudio, se encontró que se utilizaron muestras con humedades similares con un proceso de escaldado. La temperatura máxima de secado en ambos secadores fue similar, la temperatura ambiente promedio del SSM fue ligeramente menor a la del SSDP. Al comparar los tiempos de secado se observó que el proceso de deshidratado en un SSM fue 14.3% más rápido que el SSDP. Sin embargo, la demora en el secado en un secador solar de doble paso, se puede atribuir a que la humedad relativa donde se realizaron las pruebas fue un  $41.3 \pm 3.9\%$  mayor a la presente durante las pruebas en el secador solar mixto, Tablas 9 y 20 (*vide supra*). Por lo que, posiblemente el contenido de humedad en el aire utilizado en SSDP, afectó la velocidad de evaporación del agua del alimento.

Por otra parte, si se compara el secado de chile rojo (*C. annuum* L.) deshidratado en secador solar de doble paso con convección forzada (SSDPCF) realizado en Selangor, Malasia (Fudholi et al. 2014) *versus* secado de chile de agua (*C. annuum* L.) deshidratado en un secador solar mixto (SSM) del presente estudio, se encontró que el proceso de secado en un SSM fue 17.86% más eficiente que el SSDPCF, lo que representó la reducción de 5 h en el proceso de secado. Cabe aclarar, que las muestras de chile rojo tuvieron una humedad inicial del 80%, es decir, aproximadamente un 11% menor que el chile de agua. La temperatura ambiente promedio en el proceso de secado fue muy similar en ambos secadores. Sin embargo, la temperatura máxima de secado en el SSDPCF fue 20.9 °C menor que la alcanzada en el SSM. Adicionalmente, la humedad relativa reportada para el SSDPCF fue de 62%, esta humedad alta en el aire durante la prueba de secado, generó que el chile rojo (*C. annuum* L.) se deshidratara más lentamente que en el SSM, a pesar de tener un menor contenido de humedad inicial en las muestras de chile. Esto se puede ver reflejado en la humedad promedio de la cámara de secado del SSDPCF fue más elevada en comparación con la humedad medida en el SSM, Tablas 10 y 20 (*vide supra*).

Por último, si se compara el secado de chile fantasma (*C. Chinense* Jacq.) deshidratado en un secador solar de túnel de convección forzada integrado (SSTCF) evaluado en Guwahati, India (Rabha et al. 2017a) *versus* el secado de chile de agua (*C. annuum* L.) deshidratado en el secador solar mixto (SSM), se encontró que el proceso de secado en el SSM fue 50.0% más eficiente que en el SSTCF, Tablas 11 y 20. Esta diferencia se presentó a pesar de que las condiciones climáticas, de proceso y de la preparación de la muestra fueron muy

similares en ambos procesos de secado. El secado de las muestras de chile fantasma (*C. Chinense* Jacq.) requirió de 14 h más que el secado en el SSM para alcanzar una humedad final del 10%. Por lo que, posiblemente el SSTCF, no sea un secador adecuado para deshidratar chile.

De acuerdo con todo lo analizado, se propone que el SSM utilizado en el presente trabajo es una excelente opción para el deshidratado de chile; asimismo, las condiciones climáticas de Huajuapán de León, Oaxaca, México son bastante propicias para el deshidratado de chile.

### 9.6. Determinación de color

De acuerdo con la Tabla 27, se puede establecer que las muestras frescas presentan una coloración ligeramente verdosa con tendencia al amarillo, una luminosidad cercana a la media y con una ligera saturación del color. Asimismo, de acuerdo a los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  de las muestras escaldadas con y sin pretratamiento de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5%, se observó una coloración verde oscura de las muestras, este oscurecimiento se puede atribuir al proceso de escaldado al someterse a una temperatura de 90 °C (Figura 31).

Por otra parte, a partir del análisis estadístico inferencial de los parámetros de color CIE  $L^*a^*b^*$  se encontró que los valores de  $a^*$  (rojo-verde),  $b^*$  (amarillo-azul),  $L^*$  (luminosidad) y  $C^*$  (cromaticidad) mostraron una distribución no normal y heterocedástica. Por tal motivo se realizó un análisis no paramétrico basado en la prueba de Kruskal-Wallis para determinar si las medianas de dos o más grupos difieren y una prueba de Dunn sin ajuste para establecer si existe diferencia entre la media de una o dos poblaciones de muestras relacionadas (Tabla 28).



**Figura 31.** Chile de agua fresco (izquierda), chile de agua escaldado sin pretratamiento (centro), chile de agua escaldado con pretratamiento de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% (derecha).

**Tabla 27.** Valores de color en el sistema CIE  $L^*a^*b^*$  para el chile fresco, escaldado con y sin pretratamiento y deshidratadas.

Muestra	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$
Chile fresco	48.59±1.88 <sup>ab</sup>	-10.06±0.74 <sup>a</sup>	33.97±2.73 <sup>a</sup>	35.43±2.75 <sup>a</sup>
CESP	46.49±2.46 <sup>a</sup>	-7.88±1.04 <sup>ab</sup>	30.23±1.85 <sup>a</sup>	31.26±1.68 <sup>a</sup>
CECP	46.21±1.87 <sup>a</sup>	-7.91±0.58 <sup>a</sup>	30.07±1.56 <sup>a</sup>	31.09±1.57 <sup>a</sup>
CESP-SCG	69.40±0.56 <sup>c</sup>	0.89±0.17 <sup>c</sup>	26.03±0.36 <sup>ab</sup>	26.05±0.37 <sup>ab</sup>
CECP-SCG	67.49±0.92 <sup>b</sup>	-2.07±0.20 <sup>ab</sup>	23.63±0.55 <sup>b</sup>	23.72±0.54 <sup>b</sup>
CESP-SSM	68.91±0.59 <sup>bc</sup>	0.05±0.31 <sup>bc</sup>	20.50±0.44 <sup>bc</sup>	20.50±0.44 <sup>bc</sup>
CECP-SSM	68.55±0.37 <sup>bc</sup>	0.30±0.27 <sup>bc</sup>	19.87±0.35 <sup>c</sup>	19.87±0.35 <sup>c</sup>

CESP= Chile escaldado sin pretratamiento; CECP= Chile escaldado pretratado con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5%;  $C^*$ = cromaticidad; CESP-SCG= chile escaldado sin pretratamiento deshidratado en un secador de charolas giratorias; CECP-SCG= chile escaldado pretratado con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% deshidratado en un secador de charolas giratorias; CESP-SSM= Chile escaldado sin pretratamiento deshidratado en un secador solar mixto; CECP-SSM= chile escaldado pretratado con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% deshidratado en un secador solar mixto.

Los datos se reportan como promedio de tres réplicas  $\pm$  desviación estándar. Diferentes superíndices en la misma columna indican una diferencia significativa entre las muestras a un  $\alpha=0.05$  de acuerdo con la prueba de Dunn.

**Tabla 28.** Análisis estadístico inferencial de los parámetros de color CIE  $L^*a^*b^*$  de muestras de chile de agua chile fresco, escaldado con y sin pretratamiento y deshidratadas.

Parámetro	Prueba de normalidad Shapiro-Wilk	Prueba de homocedasticidad Fligner-killeen	Prueba no paramétrica Kruskal-Wallis	$\chi^2$
$L^*$	7.18E-10	1.95E-03	7.17E-11	59.004
$a^*$	1.53E-07	1.03E-03	4.71E-12	64.812
$b^*$	1.95E-03	4.51E-04	4.90E-12	64.728
$C^*$	7.75E-04	8.48E-05	4.23E-12	65.043

$\chi^2$  crítica= 12.592. Se rechaza la hipótesis nula, si el  $\chi^2$  crítica <  $\chi^2$  obtenido.

La prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro  $L^*$  confirmó una diferencia significativa entre las muestras pretratadas y sin pretratamiento deshidratadas en el secador de charolas y en el secador solar mixto. Esto se demuestra bajo la condición de  $p \ll \alpha$  ( $7.17\text{E}-11 \ll 0.05$ ). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta que las medias son diferentes para al menos dos de los procesos (Tabla 28). Adicionalmente, el comparativo de Dunn sin ajustes permitió comprobar que existe diferencia estadística significativa entre las medias de los procesos en el modelo de  $L^*$  (Tabla 29). Conforme a esta prueba se determinó que no existe diferencia significativa en la luminosidad entre las muestras CESP y CECP, CESP-SSM y CECP-SSM. Sin embargo, entre las muestras de CESP-SCG y CECP-SCG hay diferencia. De modo que, el pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% contribuye de manera significativa en el parámetro de luminosidad en las muestras escaldadas deshidratadas en el SCG, pero no influye significativamente en las escaldadas

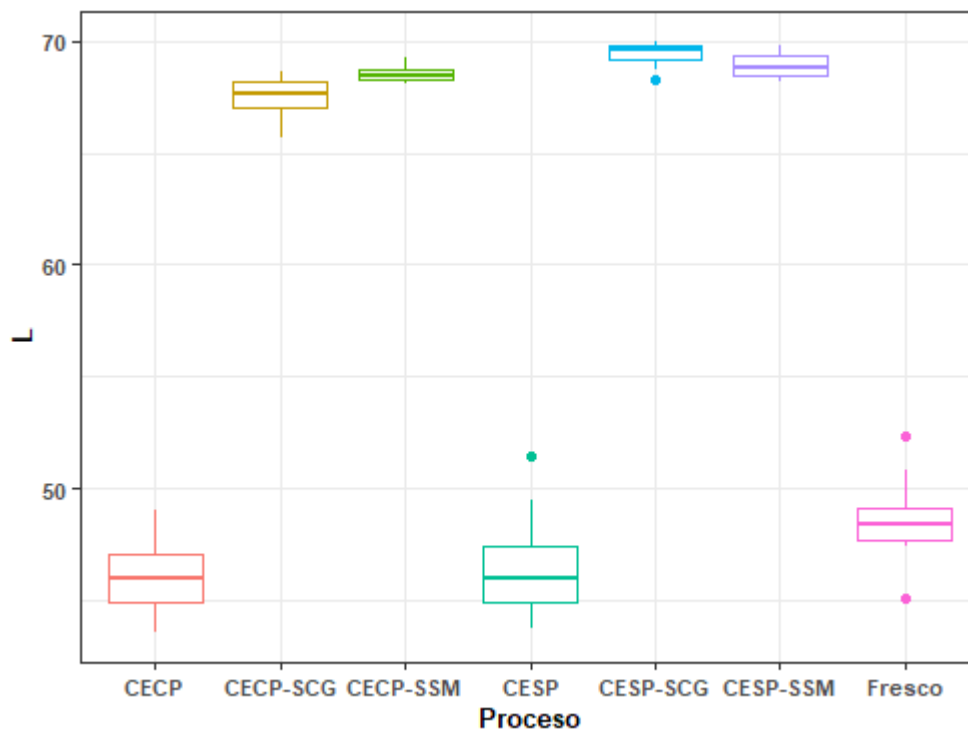
deshidratadas en el SSM. Adicionalmente, el tratamiento de escaldado no influye de manera significativa en el parámetro de luminosidad con respecto a las muestras frescas. A pesar de esto, los valores de  $L^*$  en las muestras de CESP y CECP no se alejan tanto de los valores de  $L^*$  presentes en las muestras frescas. Mientras que los valores de  $L^*$  en las muestras deshidratadas en ambos secadores en comparación con las muestras frescas sufrieron un cambio drástico. Esto se puede atribuir a que el parámetro de  $L^*$  está relacionado con el contenido de humedad de los alimentos. Al realizar el proceso de deshidratado, las muestras pierden agua y cambian de una coloración verde amarillenta con tonalidad oscura a un amarillo claro, por lo que los valores de  $L^*$  en las muestras deshidratadas nos expresan que estas muestras tienen una mayor luminosidad que las muestras frescas (Tabla 27). Estos resultados se pueden apreciar en la Figura 32.

**Tabla 29.** Prueba de Dunn para el parámetro  $L^*$ .

	CECP	CECP-SCG	CECP-SSM	CECP	CECP-SCG	CECP-SSM
CECP-SCG	4.43E-03	---	---	---	---	---
CECP-SSM	6.06E-05	0.24	---	---	---	---
CECP	0.92	6.01E-03	9.16E-05	---	---	---
CECP-SCG	6.06E-08	1.01E-02	0.16	1.05E-07	---	---
CECP-SSM	4.15E-06	0.08	0.55	6.64E-06	0.42	---
Fresco	0.31	0.07	2.80E-03	0.36	1.11E-05	3.41E-04

Los valores corresponden a un nivel de significancia de  $\alpha= 0.05$ ,  $p < 0.05$  indican una diferencia significativa entre muestras de acuerdo con el comparativo múltiple de medias por el método de Dunn.





**Figura 32.** Gráfica de cajas y bigotes del parámetro  $L^*$ .

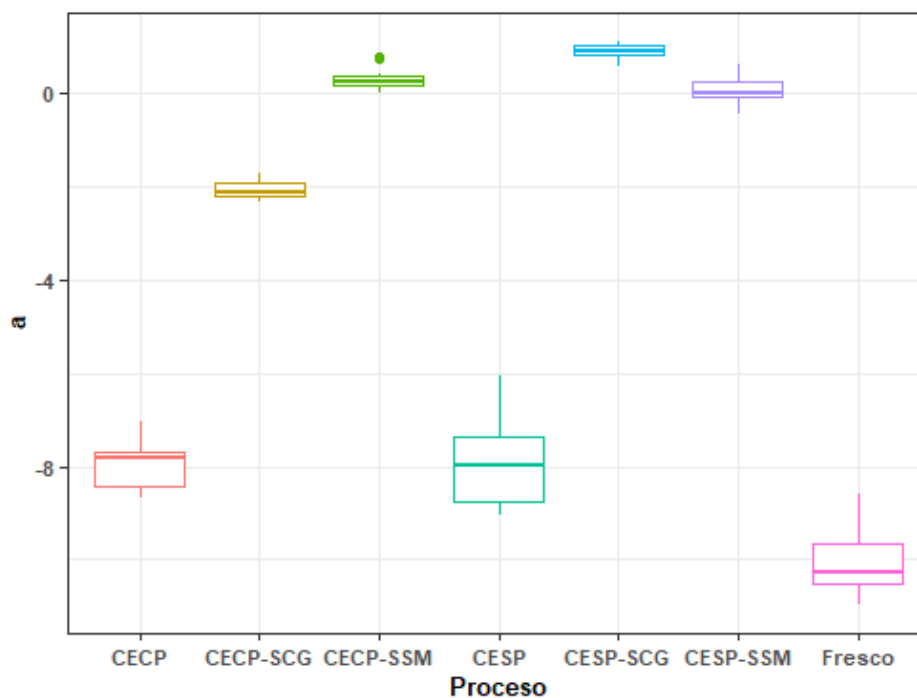
Respecto a la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro  $a^*$  se determinó que existe alguna diferencia significativa entre las medianas de las muestras. Esto se justifica bajo la condición de  $p \ll \alpha$  ( $4.71E-12 \ll 0.05$ ); por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta que las medianas son diferentes para al menos dos de los procesos (Tabla 28). Complementariamente, el comparativo de Dunn sin ajustes reafirma que efectivamente existe diferencia estadística significativa entre las medias de los procesos en el parámetro  $a^*$  (Tabla 30). De acuerdo con la prueba de Dunn no existe diferencia significativa entre los valores de  $a^*$  entre las muestras CESP y CECP, CESP-SSM y CECP-SSM. Sin embargo, entre las muestras de CESP-SCG y CECP-SCG sí hay una diferencia. De modo que, el pretratamiento con  $Na_2S_2O_5$  al 0.5% contribuye significativamente de manera positiva en el parámetro  $a^*$  en las muestras escaldadas deshidratadas en el SCG, pero no, en las escaldadas deshidratadas en el SSM. De acuerdo con Barrett, Beaulieu y Shewfelt (2010) los principales compuestos que imparten el color verde son las clorofilas. En consecuencia, el pretratamiento con  $Na_2S_2O_5$  al 0.5% ayudó a conservar ligeramente el contenido de clorofilas en las muestras deshidratadas en un SCG, lo que se ve reflejado en

un valor  $a^*$  ligeramente menor ( $-2.07 \pm 0.20$ ) en comparación con las demás muestras con valores cercanos a 0, lo cual nos indica que prácticamente se perdió el contenido total de clorofilas y consecuentemente la coloración verde en las muestras CESP-SCG, CESP-SSM y CECP-SSM. Además, el escaldado no influye de manera significativa en el parámetro de  $a^*$  con respecto a las muestras frescas, el efecto no es tan drástico en comparación con las muestras deshidratadas en ambos secadores. Cabe señalar que el deshidratado en un SSM fue el proceso que más afectó la coloración verde de las muestras con una pérdida del 97% del color verde (Tabla 27). Estos resultados se pueden apreciar en la Figura 33.

**Tabla 30.** Prueba de Dunn para el parámetro  $a^*$ .

	CECP	CECP-SCG	CECP-SSM	CESP	CESP-SCG	CESP-SSM
CECP-SCG	0.10	---	---	---	---	---
CECP-SSM	3.63E-04	0.05	---	---	---	---
CESP	0.93	0.09	2.53E-04	---	---	---
CESP-SCG	1.13E-06	1.19E-03	0.19	7.01E-07	---	---
CESP-SSM	2.38E-03	0.16	0.60	1.74E-03	0.07	---
Fresco	0.11	1.17E-03	2.15E-07	0.13	8.68E-11	3.18E-06

Los valores corresponden a un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ ,  $p < 0.05$  indican una diferencia significativa entre muestras de acuerdo con el comparativo múltiple de medias por el método de Dunn.



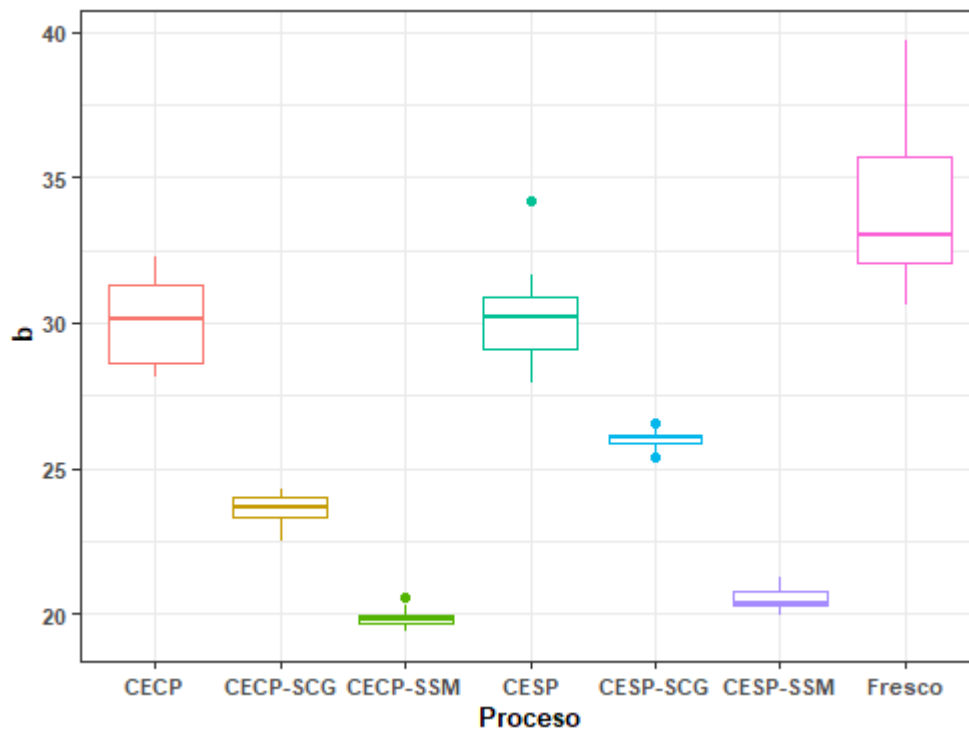
**Figura 33.** Gráfico de cajas y bigotes del parámetro  $a^*$ .

Con base en la prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro  $b^*$  se determinó que existe una diferencia significativa entre las medianas de las muestras. Esto se justifica bajo la condición de  $p \ll \alpha$  ( $4.90E-12 \ll 0.05$ ); por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta que las medianas son diferentes para al menos dos de los procesos (Tabla 28). Asimismo, el comparativo de Dunn sin ajustes confirma que efectivamente existe diferencia estadística significativa entre las medias de los procesos para el parámetro  $b^*$  (Tabla 31). La prueba de Dunn nos indica que no existe diferencia significativa en el parámetro  $b^*$  entre las muestras CESP y CECP, CESP-SCG y CECP-SCG, CESP-SSM y CECP-SSM. Sin embargo, aunque las muestras de Chile escaldado con y sin pretratamiento deshidratadas ya sea en el SCG o el SSM son estadísticamente iguales a un  $\alpha = 0.05$ , las muestras pretratadas deshidratadas en ambos secadores (CECP-SCG y CECP-SSM) presentan valores de  $b^*$  menores a los obtenidos en las muestras sin pretratamiento deshidratadas en ambos secadores (CESP-SCG y CESP-SSM). De acuerdo con Barrett, Beaulieu y Shewfelt (2010) los principales compuestos que imparten el color amarillo son los carotenoides y flavonoides. Por lo tanto, cuando se empleó el pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5%, este provocó un lixiviado del contenido de carotenoides y flavonoides en las muestras deshidratadas tanto en el SCG como en el SSM (CECP-SCG y CECP-SSM), lo que se ve reflejado en un valor  $b^*$  ligeramente menor en comparación con las muestras deshidratadas sin pretratamiento en ambos secadores (CESP-SCG y CESP-SSM). Esto indica una pérdida de carotenoides y flavonoides en las muestras de CECP-SCG y CECP-SSM. Cabe señalar que el deshidratado en un SSM fue el proceso que ejerció el efecto más drástico en la disminución de  $b^*$ , con una disminución del valor en un 41.5% (Tabla 27). Estos cambios se muestran en la Figura 34.

**Tabla 31.** Prueba de Dunn para el parámetro  $b^*$ .

	CECP	CECP-SCG	CECP-SSM	CESP	CESP-SCG	CESP-SSM
CECP-SCG	4.75E-03	---	---	---	---	---
CECP-SSM	1.07E-06	3.99E-02	---	---	---	---
CESP	0.97	4.28E-03	9.04E-07	---	---	---
CESP-SCG	0.08	0.27	1.61E-03	0.08	---	---
CESP-SSM	4.80E-05	0.21	0.42	4.16E-05	1.93E-02	---
Fresco	0.17	2.57E-05	3.78E-10	0.18	1.87E-03	5.04E-08

Los valores corresponden a un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ ,  $p < 0.05$  indican una diferencia significativa entre muestras de acuerdo con el comparativo múltiple de medias por el método de Dunn.



**Figura 34.** Gráfico de cajas y bigotes del parámetro  $b^*$ .

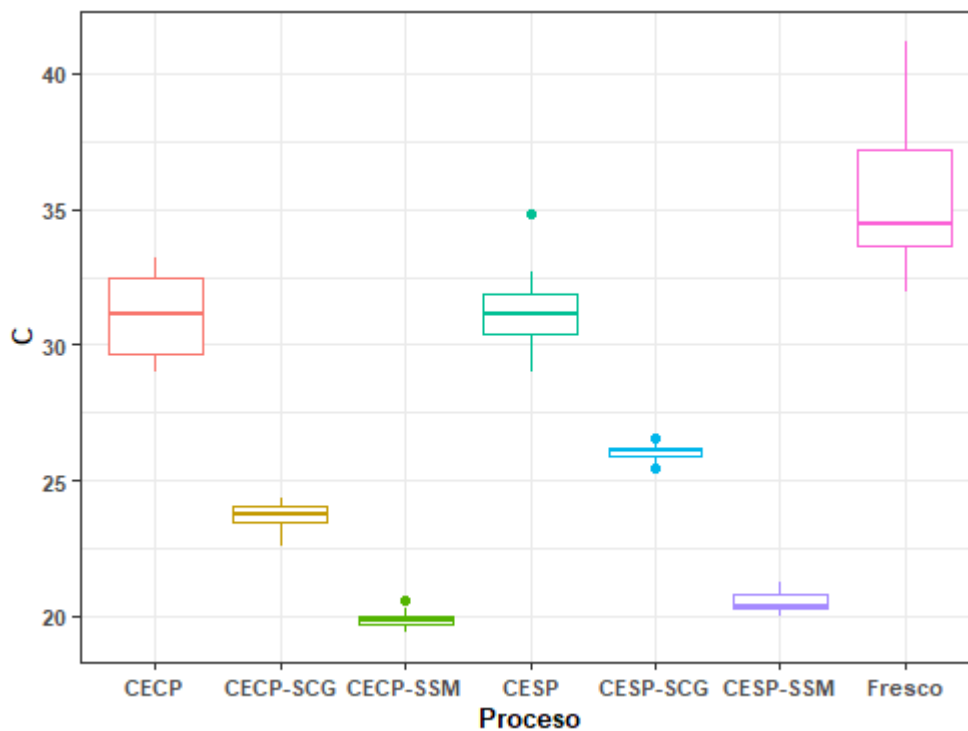
La prueba de Kruskal-Wallis para el parámetro  $C^*$  determinó que existe una diferencia significativa entre las medianas de las muestras. Esto se justifica bajo la condición de  $p \ll \alpha$  ( $4.23E-12 \ll 0.05$ ); por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta que las medianas son diferentes para al menos dos de los procesos (Tabla 28). Asimismo, el comparativo de Dunn sin ajustes confirma que efectivamente existe diferencia estadística significativa entre los procesos en el parámetro  $C^*$  (Tabla 32). La prueba de Dunn nos indica que no

existe diferencia significativa en el parámetro  $b^*$  entre las muestras CESP y CECP, CESP-SCG y CECP-SCG, CESP-SSM y CECP-SSM. Sin embargo, aunque las muestras de Chile escaldado con y sin pretratamiento son estadísticamente iguales para un  $\alpha = 0.05$ , las muestras de CECP-SCG y CECP-SSM presentan valores de  $C^*$  menores a las muestras de CESP-SCG y CESP-SSM, lo que indica que el pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% contribuye de manera negativa en el parámetro  $C^*$  en las muestras escaldadas deshidratadas en un SCG y un SSM. En consecuencia, el pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% provocó una pérdida en la saturación del color en las muestras deshidratadas en el SCG y el SSM (CECP-SCG y CECP-SSM), lo que se ve reflejado en un valor  $C^*$  ligeramente menor en comparación con las muestras deshidratadas sin pretratamiento en ambos secadores (CESP-SCG y CESP-SSM). Consecuentemente, las muestras de CESP-SCG y CESP-SSM presentan ligeramente una coloración con tonos más intensos. Adicionalmente, el escaldado no influye de manera significativa en el parámetro de  $C^*$  con respecto a las muestras frescas. Este tratamiento térmico no tiene un efecto tan drástico en comparación con el proceso de secado. Cabe señalar que el deshidratado en el SSM fue el proceso más drástico en la disminución de la saturación del color con una disminución del 44% en el valor del parámetro  $C^*$  (Tabla 27). Estos resultados se pueden observar de manera gráfica en la Figura 35.

**Tabla 32.** Prueba de Dunn para el parámetro  $C^*$ .

	CECP	CECP-SCG	CECP-SSM	CECP	CECP-SCG	CECP-SSM
CECP-SCG	5.63E-03	---	---	---	---	---
CECP-SSM	1.41E-06	3.99E-02	---	---	---	---
CECP	0.93	4.28E-03	9.04E-07	---	---	---
CECP-SCG	0.09	0.27	1.61E-03	0.08	---	---
CECP-SSM	6.06E-05	0.21	0.42	4.16E-05	1.93E-02	---
Fresco	0.14	2.02E-05	2.65E-10	0.16	1.55E-03	3.70E-08

Los valores corresponden a un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ ,  $p < 0.05$  indican una diferencia significativa entre muestras de acuerdo con el comparativo múltiple de medias por el método de Dunn.



**Figura 35.** Gráfico de cajas y bigotes del parámetro C\*.

Ornelas-Paz et al. (2010) y Ramos-Aguilar et al. (2015) determinaron el color de chile verde (*Capsicum annum* L.) fresco y escaldado mediante el sistema de coordenadas CIE  $L^*a^*b^*$ . En este estudio, el escaldado consistió en sumergir los chiles en agua a una temperatura de 96 °C durante períodos de tiempo distintos para cada chile. Los datos reportados en este estudio se describen en las Tablas 17 y Tabla 18 (*vide supra*). Cabe mencionar que los valores obtenidos para los parámetros de color CIE  $L^*a^*b^*$  en las muestras de chile de agua frescas y escaldadas con y sin pretratamiento son similares a los reportados por Ramos-Aguilar et al., para el chile jalapeño, serrano, habanero y bell verde fresco y escaldado. Además, los valores obtenidos para los parámetros de color CIE  $L^*a^*b^*$  en las muestras de chile de agua frescas y escaldadas con y sin pretratamiento deshidratadas en un SCG son similares a los reportados por Al-Sebaei, Kumar, Hemalatha y Yadav (2017), para el chile jalapeño M y Pusa jwala deshidratado en un secador de bandejas (Tabla 19, *vide supra*). En general, las muestras deshidratadas tienden a ser más luminosas, y adquirir coloraciones rojizas y amarillentas. Los resultados evidenciaron que el tratamiento de escaldado no altera drásticamente el color en las muestras de chile, como

lo hace el proceso de secado.

### **9.7. Fenoles totales y flavonoides**

Las concentraciones de fenoles totales y flavonoides obtenidas en las muestras se presentan en la Tabla 33. De acuerdo con el análisis estadístico inferencial se encontró que las concentraciones de fenoles totales presentes en las muestras no tienen una distribución normal; sin embargo, si provienen de una distribución homocedástica, es decir, las varianzas en todos los grupos son iguales. Por lo que, se optó por realizar un análisis no paramétrico basado en la prueba de Kruskal-Wallis y una prueba de Dunn para determinar inferencias simultáneas entre las medias de los procesos de cada parámetro, a un  $\alpha = 0.05$ . Por otra parte, el contenido de fenoles totales presentes en las muestras tienen una distribución normal y homocedástica; por consiguiente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y una prueba de Tukey a un  $\alpha = 0.05$ , para determinar si existe diferencia significativa entre las medias de al menos dos de los procesos.

De acuerdo con la Tabla 33, la muestra fresca tuvo una disminución de fenoles totales del 21.9% y 13.3% en comparado con las muestras CESP Y CECP, respectivamente. De la misma forma, la muestra fresca presenta una disminución en el contenido de flavonoides del 80.6% y 75.2% en comparado con las muestras CESP Y CECP, respectivamente. Esto se debe a que la muestra fresca sufrió una degradación de estos compuestos durante el almacenamiento a causa del proceso de molienda y descongelación, ya que las muestras estuvieron en congelación durante cuatro meses hasta su análisis. Asimismo, las muestras CECP presentaron 9.92% y 21.97% menor retención de fenoles totales y flavonoides en comparación con las muestras CESP, respectivamente. Esta disminución se atribuye a una difusión de estos compuestos durante su pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5%.

**Tabla 33.** Contenido de fenoles totales de la muestra fresca, escaldada y escaldada pretratada, así como en los polvos obtenidos a partir de los secados.

<b>Proceso</b>	<b>Fenoles totales (mg EAG/100 g peso seco)</b>	<b>Flavonoides (mg EC/100 g peso seco)</b>
Chile fresco	408.92±3.05 <sup>ab</sup>	52.03±3.05 <sup>a</sup>
CESP	523.27± 11.60 <sup>a</sup>	268.49±13.34 <sup>b</sup>
CECP	471.37± 23.40 <sup>a</sup>	209.49±8.86 <sup>c</sup>
CESP-SCG	455.14±22.28 <sup>ab</sup>	454.44±5.63 <sup>d</sup>
CECP-SCG	250.14±10.31 <sup>b</sup>	404.05±11.98 <sup>e</sup>
CESP-SSM	255.72± 10.40 <sup>ab</sup>	481.71±23.50 <sup>d</sup>
CECP-SSM	154.36± 6.60 <sup>b</sup>	342.68± 16.67 <sup>f</sup>

Los datos se reportan como promedio de tres réplicas ± error estándar. Diferentes superíndices en la misma columna indican una diferencia significativa entre las muestras a un  $\alpha= 0.05$  de acuerdo con la prueba de Dunn para fenoles totales y Tukey para flavonoides totales.

EAG: equivalentes de ácido gálico.

EC: equivalentes de catequina.

Las muestras frescas, así como las muestras escaldadas CESP y CECP presentaron una mayor concentración de compuestos fenólicos totales que las muestras con y sin pretratamiento deshidratadas en el SCG y el SSM. Esto se debe a que durante el proceso de secado estos compuestos se degradan debido a su exposición a las corrientes de aire caliente. Comparando las muestras deshidratadas en el mismo secador observamos que las muestras CESP-SCG retienen 45.0% más fenoles totales que las muestras de CECP-SCG, respectivamente. Mientras que su contra parte, en el secador solar mixto, las muestras CESP-SSM retienen 39.6% más fenoles totales en relación a la muestra de CECP-SSM. La disminución de la concentración de estos compuestos fenólicos en las muestras CECP-SCG y CECP-SSM posiblemente se debió a que al someter las muestras escaldadas a las disoluciones de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% se provocó una lixiviación de los fenoles totales durante el pretratamiento.

Comparando los resultados de acuerdo al secado, las muestras de CESP-SSM y CECP-SSM tuvieron 51.1% y 70.5%, menos fenoles totales que la muestra de CESP-SCG, respectivamente. Asimismo, la muestra CESP-SSM tuvo un contenido de fenoles totales de 2.2% mayor que CECP-SCG. Sin embargo, la muestra CECP-SCG tuvo una concentración de fenoles totales 38.3% mayor que CECP-SSM.

Por otra parte, si comparamos el contenido de flavonoides totales en las muestras deshidratadas en el mismo secador, observamos que las muestras CESP-SCG retienen 11.1% más flavonoides que las muestras de CECP-SCG. Mientras que, la muestra CESP-SSM



retiene un 28.9% más flavonoides que CESP-SSM. Estos resultados confirman que el pretratamiento de las muestras de chile escaldadas con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% influyó tanto en el contenido de fenoles como flavonoides totales. Por lo que la concentración de estos compuestos en las muestras de chile está en función del tipo de tratamiento al que sean sometidas. Por consiguiente, se cumple la hipótesis estadística alterna para los tratamientos, obteniéndose mayores concentraciones de flavonoides en las muestras sin pretratamiento. Por otra parte, al comparar los resultados de acuerdo al secado, se tiene que las muestras de CESP-SCG y CECP-SCG presentan 5.7% y 16.0%, respectivamente, menos flavonoides que la muestra de CESP-SSM. Sin embargo, las muestras de CESP-SCG y CECP-SCG contienen 24.6% y 15.2%, respectivamente, más flavonoides que las muestras de CECP-SSM.

**Tabla 34.** Análisis estadístico inferencial del contenido de fenoles totales y flavonoides en muestras de chile de agua chile fresco, escaldado con y sin pretratamiento y deshidratadas.

Parámetro	Prueba de normalidad Shapiro-Wilk	Prueba de homocedasticidad		Prueba no paramétrica Kruskal-Wallis	Prueba paramétrica ANOVA de una vía	R <sup>2</sup>
		Fligner-Killeen	Levene			
Fenoles totales	0.021	0.85	---	4.14E-03	---	---
Flavonoides	0.053	---	0.84	---	1.10E-14	0.9939

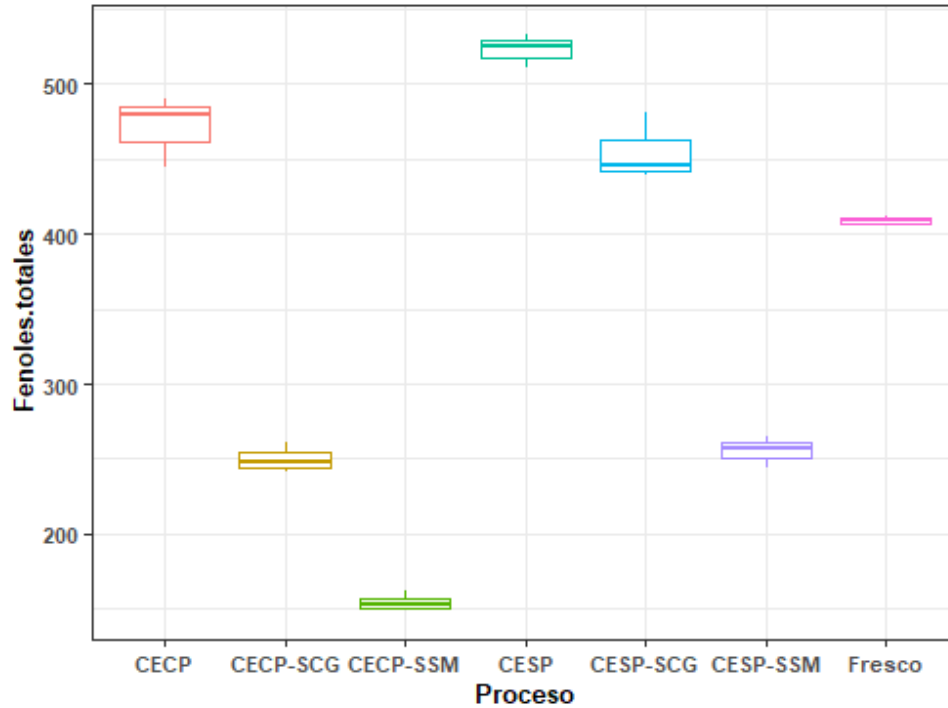
La prueba de Kruskal-Wallis para el contenido de fenoles totales evidenció que existe una diferencia significativa entre las medianas de las muestras. Esto se justifica bajo la condición de  $p \ll \alpha$  ( $4.14\text{E}-03 \ll 0.05$ ), por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta que las medianas son diferentes para al menos dos de los procesos (Tabla 34). Asimismo, el comparativo de Dunn sin ajustes confirma que efectivamente existe una diferencia estadística significativa entre el contenido en fenoles totales para al menos dos de los procesos (Tabla 35). La prueba de Dunn indicó que no existe diferencia significativa en el contenido de compuestos fenólicos entre las muestras CESP y CECP, CESP-SCG y CECP-SCG, CESP-SSM y CECP-SSM. Sin embargo, aunque el contenido de fenoles totales en las muestras de chile escaldado con y sin pretratamiento deshidratadas ya sea en el SCG o el SSM son estadísticamente iguales para un  $\alpha = 0.05$ , las muestras pretratadas deshidratadas en ambos secadores (CECP-SCG y CECP-SSM) presentan concentraciones

menores de fenoles totales a los obtenidos en las muestras sin pretratamiento deshidratadas en ambos secadores (CESP-SCG y CESP-SSM). Previamente en la sección 9.6 (*vide supra*), se mencionó una posible correlación entre los parámetros de color y la concentración de compuestos fenólicos, por lo que se realizó una correlación de Spearman entre estas dos variables y de acuerdo con el coeficiente de correlación de Spearman ( $\rho = 0.8$ ) a un nivel de confianza del 95% se encontró que efectivamente el contenido de fenoles totales está relacionado directamente con el parámetro  $b^*$  de color CIE  $L^*a^*b^*$  (Tabla 36). Consecuentemente, el pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% provocó un lixiviado del contenido de compuestos fenólicos en las muestras deshidratadas en un SCG y un SSM (CECP-SCG y CECP-SSM). Cabe señalar que el deshidratado en un SSM fue el proceso que influyó más drásticamente en la disminución del contenido fenoles totales con una pérdida de alrededor del 70.5% de estos compuestos respecto a las muestras frescas, CESP y CECP (Tabla 33). Estos resultados se pueden observar de manera gráfica en la Figura 36.

**Tabla 35.** Prueba de Dunn para fenoles totales.

	CECP	CECP-SCG	CECP-SSM	CESP	CESP-SCG	CESP-SSM
CECP-SCG	4.84E-02	---	---	---	---	---
CECP-SSM	5.72E-03	0.43	---	---	---	---
CESP	0.43	5.72E-03	3.81E-04	---	---	---
CESP-SCG	0.84	0.08	1.03E-02	0.32	---	---
CESP-SSM	0.08	0.84	0.32	1.03E-02	0.11	---
Fresco	0.32	0.32	7.57E-02	0.08	0.43	0.43

Los valores corresponden a un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ ,  $p < 0.05$  indican una diferencia significativa entre muestras de acuerdo con el comparativo múltiple de medias por el método de Dunn.



**Figura 36.** Gráfico de cajas y bigotes del contenido de fenoles totales presente en las muestras.

**Tabla 36.** Coeficientes de correlación de Spearman ( $\rho$ ) para los parámetros de color CIE  $L^*a^*b^*$ .

	L*	a*	b*	C*	Fenoles totales	Flavonoides
L*	1.0	---	---	---	---	---
a*	0.8	1.0	---	---	---	---
b*	0.4	0.2	1.0	---	---	---
C*	0.4	0.2	1.0	1.0	---	---
Fenoles totales	0.8	0.4	0.8	0.8	1.0	---
Flavonoides	0.6	0.0	0.4	0.4	0.8	1.0

$\rho > 0.8$  indican correlaciones altas,  $\rho < 0.5$  indican correlaciones bajas.

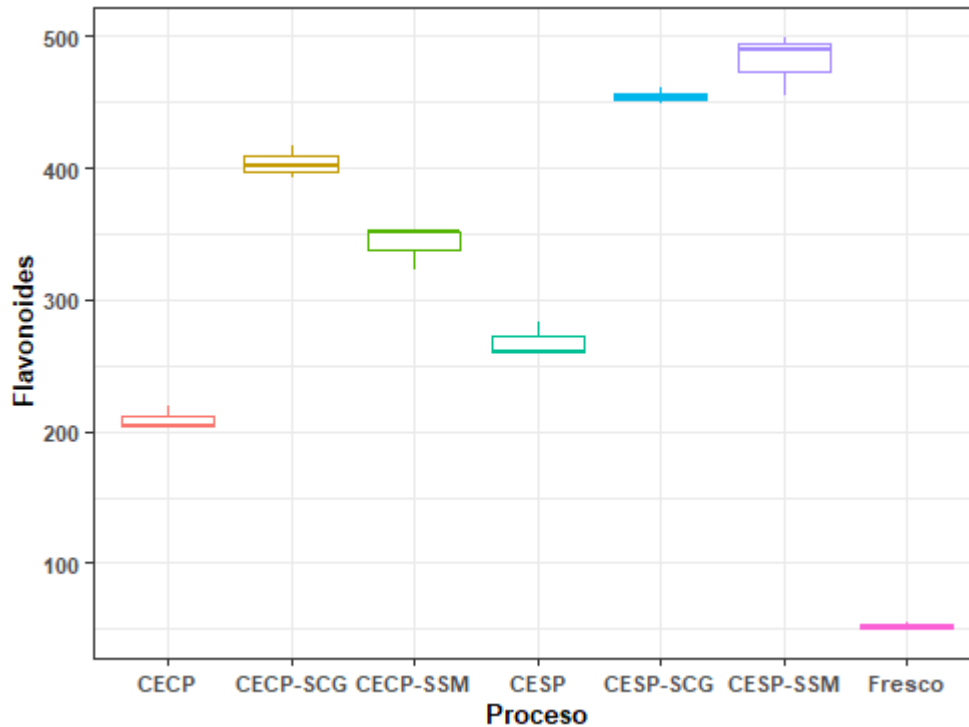
La prueba de ANOVA de una vía para el contenido de flavonoides totales permitió establecer que existe una diferencia significativa entre las medianas de las muestras. Esto se justifica bajo la condición de  $p \ll \alpha$  ( $1.10E-14 \ll 0.05$ ); por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta que las medias son estadísticamente diferentes para al menos dos de los procesos (Tabla 34). Asimismo, el comparativo múltiple de medias de Tukey confirmó una diferencia estadística significativa entre las medias del contenido de flavonoides totales para al menos dos de los procesos (Tabla 37). La prueba de Tukey indica que existe diferencia significativa en el contenido de flavonoides totales entre las

muestras CESP y CECP, CESP-SCG y CECP-SCG, CESP-SSM y CECP-SSM. Adicionalmente, previamente en la Sección 9.6 (*vide supra*), se mencionó una posible correlación entre el parámetro de color  $b^*$  y flavonoides totales. Esto debido a que los flavonoides, junto con los carotenoides, son los principales compuestos que imparten el color amarillo de los alimentos (Barrett et al., 2010) los cuales tienen una relación directa con el parámetro  $b^*$ . Esto se confirmó con base a una correlación de Spearman con un  $\rho = 0.4$  a un nivel confianza del 95% (Tabla 36). Adicionalmente, es importante señalar que se encontró una mayor concentración de flavonoides en las muestras deshidratadas que en la muestra fresca y escaldadas. Esto se puede atribuir a que estas muestras sufrieron una degradación de estos compuestos durante el almacenamiento a causa del proceso de molienda y descongelación, ya que las muestras estuvieron en congelación durante cuatro meses hasta su análisis. Estos resultados se pueden observar de manera gráfica en la Figura 37.

**Tabla 37.** Prueba de Tukey para flavonoides totales.

	CECP	CECP-SCG	CECP-SSM	CESP	CESP-SCG	CESP-SSM
CECP-SCG	0.00	---	---	---	---	---
CECP-SSM	0.00	1.03E-03	---	---	---	---
CESP	1.50E-03	1.00E-07	1.50E-04	---	---	---
CESP-SCG	0.00	6.04E-03	1.30E-06	0.00	---	---
CESP-SSM	0.00	9.13E-05	1.00E-07	0.00	0.24	---
Fresco	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Los valores corresponden a un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ ,  $p < 0.05$  indican una diferencia significativa entre muestras de acuerdo con el comparativo múltiple de medias por el método de Tukey.



**Figura 37.** Gráfico de cajas y bigotes del contenido de flavonoides presente en las muestras.

De acuerdo con todo lo anterior, las mejores concentraciones de fenoles totales se obtienen en el secador de charolas giratorias, dado que este proceso de secado mantiene las condiciones de secado controladas, disminuyendo el tiempo de secado y la exposición al aire caliente. Contrario a esto, la mayor concentración de flavonoides se obtiene en el CESP-SSM; sin embargo, el CECP-SSM que involucró un pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% tuvo un contenido bajo de flavonoides. En general, los tratamientos que involucraron un secado en el secador de charolas giratorias permitieron obtener productos con una mejor retención de compuestos bioactivos.

El tratamiento de escaldado (CESP y CECP) permitió una mayor retención de fenoles totales con respecto a las muestras frescas durante el almacenamiento, esto se debe a una inactivación enzimática (lipooxigenasas, peroxidasas y polifenoloxidasas; Schweiggert, Schieber y Carle, 2005) que evitó una degradación de estos compuestos en el alimento. De la misma forma se encontró que existe una mayor concentración de flavonoides en las muestras deshidratadas que en las muestras de CESP-SCG y CECP-SCG, por lo que también se atribuye este comportamiento a las mismas causas que afectan el contenido de

fenoles totales en las muestras frescas.

El contenido de fenoles totales presente en las muestras de chile de agua (*C. annuum* L.) escaldadas con y sin pretratamiento son mucho menores a los reportados por Ozgur et al. (2011) para chile Yalova Yaglik (*C. annuum* L.) fresco y seco (verde y rojo) deshidratado en un secador de charolas de aire forzado a una temperatura de  $63\pm 2$  °C con una velocidad de aire de 2.5 m/s, para chile Cumari de Pára (*C. chinense* Jacq.) fresco y seco deshidratado en un secador de lecho fijo a una temperatura constante de 65 °C y una velocidad de aire de 1 m/s reportado por Reis et al. (2013); para el chile Almuden (*C. annuum*) fresco y seco (verde y rojo) deshidratado en un horno de convección a una temperatura que osciló entre 40 °C y 130 °C durante un período de 2 h (*vide supra*) reportado por Lutz et al., (2015).

Por otra parte, Sharma et al. (2015) evaluaron el contenido de fenoles totales presentes en chile rojo var. California Wonder (*C. annuum* L.) fresco, escaldado y escaldado pretratado con  $K_2S_2O_5$  al 0.25% y 0.35% deshidratados en un secador de bandejas. El proceso de deshidratado se realizó a una temperatura constante de  $58\pm 2$  °C en el secador de bandejas (*vide supra*). Observándose una retención alta de fenoles totales en las muestras chile California Wonder (*C. annuum* L.) escaldadas pretratadas con  $K_2S_2O_5$  al 0.25% y 0.35%. Sin embargo, en el caso del chile de agua no se observó este comportamiento tanto en el SCG como en el SSM (CECP-SCG y CECP-SSM).

## 10. CONCLUSIONES

Derivado del estudio del efecto del secado en rajitas de chile de agua (*C. annuum* L.) escaldado con y sin pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% en un secador de charolas giratorias y un secador solar mixto, se tienen las conclusiones siguientes:

Las muestras de chile de agua deshidratadas en el secador solar mixto en el día uno y dos no mostraron un período de velocidad de secado constante y decreciente bien definidos. Esto se debe a que en el secador solar mixto la temperatura de secado varió considerablemente durante el proceso y entre días.

La difusividad efectiva ( $D_{\text{eff}}$ ) de las muestras pretratadas y sin pretratamiento deshidratadas con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% ya sea en un SCG o en un SSM son iguales a un  $\alpha = 0.05$ .

El modelo matemático que mejor se ajustó a los datos experimentales de las cinéticas de secado de chile de agua para todos los procesos fue el modelo de Midilli, con valores del  $R^2 > 0.99$ .

El deshidratado en el secador solar mixto influyó fuertemente en la disminución del color verde.

El parámetro de color  $b^*$  y el contenido de fenoles totales en las muestras deshidratadas mostraron una correlación de Spearman alta ( $\rho = 0.8$ ).

Las mejores concentraciones de fenoles totales se obtuvieron en el SCG. Mientras que, la mejor concentración de flavonoides totales se obtuvo en el proceso de chile escaldado sin pretratamiento deshidratado en el secador solar mixto (CESP-SSM).

El secado en charolas permitió obtener un producto deshidratado con una mayor retención de principios bioactivos (fenoles totales y flavonoides) que en un secador solar mixto. Consecuentemente, se rechaza la hipótesis nula propuesta en el presente trabajo.

## 11. PERSPECTIVAS

- 1) Optimizar el proceso de deshidratado en un secador solar mixto, con la finalidad de obtener un producto deshidratado con un mejor color y una mayor retención de fenoles totales y flavonoides en rajas deshidratadas de Chile.
- 2) Evaluar los costos totales de energía y materia prima para hacer rentable el proceso de secado en el secador solar mixto y su posterior aplicación a nivel comercial.
- 3) Evaluar el efecto del secado en rajas de Chile de agua (*C. annuum* L.) fresco con y sin pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% deshidratadas en un secador de charolas giratorias y un secador solar mixto. Esto puede permitir confirmar si el pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% provoca un lixiviado del contenido de compuestos antioxidantes en las muestras de Chile de agua deshidratadas sin un proceso de escaldado.
- 4) Evaluar otros pretratamientos tales como el ácido cítrico o ascórbico combinado con  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$  y  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$  para mejorar el color del producto y minimizar efectos secundarios del proceso de secado en el producto deshidratado.



## 12. REFERENCIAS

- Aguilar-Rincón, V. H., Corona-Torres, T., López-López, P., Latournerie-Moreno, L., Ramírez-Meraz, M., Villalón-Mendoza, H., & Aguilar-Castillo, J. A. (2010). *Los chiles de México y su distribución*. (U. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, ITConkal, UANL, Ed.). México. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Luis\\_Latournerie/publication/235657255\\_Los\\_chiles\\_de\\_Mexico\\_y\\_su\\_distribucion/links/553c39f70cf2c415bb0b2c2b/Los-chiles-de-Mexico-y-su-distribucion.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Luis_Latournerie/publication/235657255_Los_chiles_de_Mexico_y_su_distribucion/links/553c39f70cf2c415bb0b2c2b/Los-chiles-de-Mexico-y-su-distribucion.pdf)
- Aguirre-Hernández, E., & Muñoz-Ocotero, V. (2015). El chile como alimento. *Ciencia*, 66(3), 16-23. Recuperado de [https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/66\\_3/PDF/Chile.pdf](https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/66_3/PDF/Chile.pdf)
- Al-Sebaei, M. A., Kumar, A. C., Hemalatha, A. S., & Yadav, P. (2017). Effect of the drying methods on the quality and characterization of green chilli powder. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 2(6), 18-23. Recuperado de <http://www.foodsciencejournal.com/archives/2017/vol2/issue6/2-5-57>
- Alvarez-Parrilla, E., Contreras-Muñiz, F., Rodrigo-García, J., De la Rosa, L. A., García-Fajardo, J. A., y Núñez-Gastélum, J. A. (2019). Cinética de secado y efecto de la temperatura sobre las características físicas y compuestos fenólicos de chile jalapeño rojo (*Capsicum annuum* L.), *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 21(2), 139-147.
- Andritsos, N., Dalampakis, P., & Kolios N. (2003). Use of geothermal energy for tomato drying. *GHC Bulletin*, 24(1), 9-13. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.525.635&rep=rep1&type=pdf>
- Anoraga, S. B., Sabarisman, I., & Ainuri, M. (2018). Effect of different pretreatments on dried chilli (*Capsicum annum* L.) quality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 131(1), 012014. Recuperado de <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/131/1/012014/meta>
- Antonio, A. S., Wiedemann, L. S. M., & Veiga Junior, V. F. (2018). The genus: *Capsicum*: a phytochemical review of bioactive secondary metabolites. *RSC Advances*, 8(45), 25767-25784.
- AOAC: Official Methods of Analysis. (1999). AOAC International.
- Arslan, D., & Özcan, M. M. (2011). Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annum* L.): Change in drying behavior, colour and antioxidant content. *Food and Bioproducts Processing*, 89(4), 504-513.
- Azevedo-Meleiro, C. H., & Rodriguez-Amaya, D. B. (2009). Qualitative and quantitative differences in the carotenoid composition of yellow and red peppers determined by HPLC-DAD-MS. *Journal of Separation Science*, 32(21), 3652-3658.
- Babar, O. A., Arora, V. K., Nema, P. K., Kasara, A., & Tarafdar, A. (2021). Effect of PCM assisted flat plate collector solar drying of green chili on retention of bioactive compounds and control of aflatoxins development. *Solar Energy*, 229, 102-111.
- Badui-Dergal, S. (2006). *Química de los alimentos*. Estado de México, México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Baenas, N., Belović, M.; Ilic, N., Moreno, D. A., & García-Viguera, C. (2019). Industrial use of pepper (*Capsicum annum* L.) derived products: Technological benefits and

- biological advantages. *Food Chemistry*, 274, 872-885.
- Banout, J., Ehl, P., Havlik, J., Lojka, B., Polesny, Z., & Verner, V. (2011). Design and performance evaluation of a Double-pass solar drier for drying of red chilli (*Capsicum annuum* L.). *Solar Energy*, 85(3), 506-515.
- Barrett, D.M., Beaulieu, J.C., & Shewfelt, R. (2010). Color, flavor, texture, and nutritional quality of fresh-cut fruits and vegetables: Desirable levels, instrumental and sensory measurement, and the effects of processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 369-389.
- Becker, R. A., Chambers, J. M. and Wilks, A. R. (1988) *The New S Language*. Wadsworth & Brooks/Cole.
- Cao, Z., Zhou, L., Bi, J., Yi, J., Chen, Q., Wu, X., ... Li, S. (2016). Effect of different drying technologies on drying characteristics and quality of red pepper (*Capsicum frutescens* L.): a comparative study. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(10), 3596–3603.
- Carrera-Escobedo, J., Cruz-Domínguez, O., Guzmán-Valdivia, C., Carrera-Escobedo, V., García-Ruiz, M., & Durán-Muñoz, H. (2020). Cost analysis of drying process by studying its kinetic parameters: A new study in Mexican chillies. *Czech Journal of Food Sciences*, 38(6), 375-387.
- Castellón, E., Chávez, J. L., Carrillo, J. C., & Vera, A. M. (2012). Preferencias de consumo de chiles (*Capsicum annuum* L.) nativos en los valles centrales de Oaxaca, México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 35(5), 27-35. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v35nspe5/v35nspe5a7.pdf>
- Castillo-Téllez, M., Pilatowsky-Figueroa, I., López-Vidaña, E. C., Sarracino-Martínez, O., & Hernández-Galvez, G. (2017). Dehydration of the red chilli (*Capsicum annuum* L., costeño) using an indirect-type forced convection solar dryer. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1137-1144. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116314740>
- Chambers, J. M., Freeny, A., & Heiberger, R. M. (1992). *Analysis of variance; designed experiments*. Chapter 5 of *Statistical Models in S*. eds J. M. Chambers and T. J. Hastie, Wadsworth & Brooks/Cole.
- Comisión del codex alimentarius. (2008). *Programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias*. Ciudad de México, México. Recuperado de [http://www.fao.org/tempref/codex/Meetings/CCFFV/ccffv14/ff14\\_10s.pdf](http://www.fao.org/tempref/codex/Meetings/CCFFV/ccffv14/ff14_10s.pdf)
- Conover, W. J., Johnson, M. E., y Johnson, M. M. (1981). A comparative study of tests for homogeneity of variances, with applications to the outer continental shelf bidding data. *Technometrics*, 23(4), 351-361.
- Coop-Gamas, F. Y., Corona-Cruz, A. I., Rodríguez-Rivera, R. & Herrera-Rodríguez, F. J. (2011). Conservación de la calidad postcosecha en chile habanero (*Capsicum chinense* J.) mediante atmósferas modificadas. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 12(1), 80-86.
- Correa, J. C., Iral, R., & Rojas, L. (2006). Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza. *Revista Colombiana de Estadística*, 29(1), 57-76.
- Cruz-Pérez, A. B., González-Hernández, V. A., Soto-Hernández, R. M., Gutiérrez-Espinosa, M. A., Gardea-Béjar, A. A., & Pérez-Grajales, M. (2007). Capsaicinoides, vitamina C y heterosis durante el desarrollo del fruto del chile manzano. *Agrociencia*, 41(6), 627-635.
- Dadali, G. Demirhan, E., & Özbek, B. (2007). Microwave heat treatment of spinach:

- drying kinetics and effective moisture diffusivity. *Drying Technology*, 25(10), 1703-1712.
- De la Rosa, L. A., Moreno-Escamilla, J. O., Rodrigo-García, J., & Alvarez-Parrilla, E. (2019). Phenolic Compounds. *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*, 253-271.
- Deng, L.-Z., Yang, X.-H., Mujumdar, A. S., Zhao, J.-H., Wang, D., Zhang, Q., ... Xiao, H.-W. (2017). Red pepper (*Capsicum annuum* L.) drying: Effects of different drying methods on drying kinetics, physicochemical properties, antioxidant capacity, and microstructure. *Drying Technology*, 36(8), 893-907.
- Dewanto, V., Wu, X., Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002). Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 50(10), 3010-3014.
- Dey, R.M., y Harborne J. B. (1989). General procedures and measurements of total phenolics. En Harborne J. B. (Ed. Plant Phenolics), *Methods in Plant Biochemistry Series* (pp. 1-28). Londres, Inglaterra: AcademicPress.
- Domínguez-Martínez, I., Meza-Márquez, O.G., Osorio-Revilla, G., Proal-Nájera, J., & Gallardo-Velázquez, T. (2014). Determination of capsaicin, ascorbic acid, total phenolic compounds and antioxidant activity of *Capsicum annuum* L. var. serrano by mid infrared spectroscopy (Mid-FTIR) and chemometric analysis. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 57(1), 133-142.
- Doymaz, I. (2008). Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(5), 914-919.
- Dunn, O. J. (1964). Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, 6(3), 241-252.
- Eggersdorfer, M., & Wyss, A. (2018). Carotenoids in human nutrition and health. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 652, 18-26. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003986118301656>
- Eissa, H.A., Mostafa, B.M., & Hussein, A.S. (2007). Capsaicin content and quality characteristics of different local pepper varieties (*Capsicum annuum*) and acid-brine pasteurized puree. *Journal of Food Technology*, 5(3), 246-255. Recuperado de <http://docsdrive.com/pdfs/medwelljournals/jftech/2007/246-255.pdf>
- Fiedor, J., & Burda, K. (2014). Potential role of carotenoids as antioxidants in human health and disease. *Nutrients*, 6(2), 466-488.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). FAOSTAT. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Fox, J. (2016). *Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models*. London, United Kingdom: Third Edition. Sage Publications, Inc.
- Fox, J. y Weisberg, S. (2019). *An R Companion to Applied Regression*. London, United Kingdom: Third Edition. Sage Publications, Inc.
- Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M. H., Hafidz M.R., Gabbasa, M., & Kazem, H. A. (2014). Performance analysis of solar drying system for red chili. *Solar Energy*, 99, 47-54.
- García-Martínez, E.M., Fernández-Segovia, I., & Fuentes-López, A. (2015). Determinación de polifenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10251/52056>
- Ghasemkhani, H., Keyhani, A., Aghbashlo, M., Rafiee, S., & Mujumdar, A. S. (2016). Improving exergetic performance parameters of a rotating-tray air dryer via a simple heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 94, 13-23.

- Gómez-Gómez, M. S. (2009). *Deshidratado de tomate saladette en un secador de charolas giratorias* (Tesis de licenciatura). Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México.
- Guiné, R. P. F., & Barroca, M. J. (2012). Effect of drying treatments on texture and color of vegetables (pumpkin and green pepper). *Food and Bioprocess Processing*, 90(1), 58-63.
- Gutiérrez-Pulido, H.; & Vara-Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México, DF: McGraw-Hill Interamericana.
- Ha, S.-H., Kim, J.B., Park, J.S., Lee, S.-W., & Cho, K.J. (2007). A comparison of the carotenoid accumulation in Capsicum varieties that show different ripening colours: Deletion of the capsanthin-capsorubin synthase gene is not a prerequisite for the formation of a yellow pepper. *Journal of Experimental Botany*, 58(12), 3135-3144.
- Harborne, J. B. (1989). General Procedures and Measurement of Total Phenolics. *Plant Phenolics*, 1-28. <https://doi:10.1016/b978-0-12-461011-8.50007-x>
- Heredia-Léon, J. C., Talamás-Abbud, R., Mendoza-Guzmán, V. Solís-Martínez, F., Jiménez-Castro, J., Barnard, J.; & Quintero-Ramos, A. (2004). Structural and physical properties of dried Anaheim chilli peppers modified by low-temperature blanching. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(1), 59-65.
- Hernández-Verdugo, S., Luna-Reyes, R., & Oyama, K. (2001) Genetic structure and differentiation of wild and domesticated populations of *Capsicum annum* (Solanaceae) from Mexico. *Plant Systematics and Evolution*, 226(3-4), 129-142.
- Hill, B., Roger, Th., & Vorhagen F. W. (1997). Comparative analysis of the quantization of color spaces on the basis of the CIELAB color-difference formula. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 16(2), 109-154.
- Hollander, M., y Douglas A. W. (1973). *Nonparametric Statistical Methods*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Horuz, E., Bozkurt, H., Kataras, H., & Maskan, M. (2017). Effects of hybrid (microwave-convectonal) and convectonal drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. *Food Chemistry*. 230, 295-305.
- Ileleji, K. E., Garcia, A. A., Kingsly, A. R. P., & Clementson, C. L. (2010). Comparison of standard moisture loss-on-drying methods for the determination of moisture content of corn distillers dried grains with soluble. *Journal of AOAC International*, 93(3), 825-832(8).
- Ionică, M. E., Nour, V., & Trandafir, I. (2017). Bioactive compounds and antioxidant activity of hot pepper fruits at different stages of growth and ripening. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 90, 232-237.
- Jimenez-Duran, A. (2015). *Deshidratación de rebanadas de mango Tommy Atkins utilizando extractos de sus semillas y metabisulfito de sodio como pretratamientos* (tesis de posgrado). Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México.
- Julián-Loaeza, A. (2009). *Propiedades físicas y químicas de tres variedades del fruto de annona diversifolia* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México.
- Julián-Loaeza, A. P., Santos-Sánchez, N. F., Valadez-Blanco, R., Sánchez-Guzmán, B. S., & Salas-Coronado, R. (2011). Chemical composition, color, and antioxidant activity of three varieties of *Annona diversifolia* Safford fruits. *Industrial Crops and*

- Products*, 34(2), 1262-1268.
- Kaensup, W., Chutima, S., & Wongwises, S. (2002). Experimental study on drying of chilli in a combined microwave-vacuum-rotary drum dryer. *Drying Technology*, 20(10), 2067-2079.
- Kowalski, S. J., Pawłowski, A., Szadzińska, J., Łechtańska, J., & Stasiak, M. (2016). High power airborne ultrasound assists in combined drying of raspberries. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, 225-233.
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583-621.
- Kuchi, V. S., Gupta, R., & Kachwaya, D. S. (2014). A review on dehydration of chilli. *Plant Archives*, 14(2), 637-642.
- Latapi, G., & Barrett, D. (2006). Influence of pre-drying treatments on quality and safety of sun-dried tomatoes. Part I: Use of steam blanching, boiling brine blanching, and dips in salt or sodium metabisulfite. *Journal of Food Science*, 71(1), 24-31. Recuperado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2621.2006.tb12402.x>
- Lewicki, P. P., & Michaluk, E. (2004). Drying of tomato pretreated with calcium. *Drying Technology*, 22(8), 1813-1827.
- Lima, M. C., Paiva de Sousa, C., Fernandez-Prada, C., Harel, J., Dubreuil, J. D., & de Souza, E. L. (2019). A review of the current evidence of fruit phenolic compounds as potential antimicrobials against pathogenic bacteria. *Microbial Pathogenesis*, 130, 259-270.
- López-Luis, A., Hernández-Carlos, B., Miguel-Zuñiga, F., Santos-Sánchez, N. F., & Salas-Coronado, R. (2018). Secador solar mixto con flujo direccionado de aire (Patente de México. No. MX/a/2018/012339). Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI).
- Lutz, M., Hernández, J., & Henríquez, C. (2015). Phenolic content and antioxidant capacity in fresh and dry fruits and vegetables grown in Chile. *CYTA – Journal of Food*, 13(4), 541-547.
- Martínez-Valverde, I., Periago, M. J., & Ros, G. (2000). Significado nutricional de los compuestos fenólicos de la dieta. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición (ALAN)*. 50(1), 5-18.
- Mazzetto, E. (2017). Un acercamiento al léxico del sabor entre los antiguos nahuas. *Anales de antropología*, 51(2), 154-170.
- Mejía-Toriz, G.R. (2015). *Estudio teórico y experimental de un termoconvertor solar para el calentamiento de aire y su integración en procesos agroindustriales* (Tesis de Maestría en Ingeniería). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single layer drying. *Drying technology*, 20(7), 1503-1513.
- Miller, R. G. (1981). *Simultaneous Statistical Inference*. USA: Springer.
- Mohanraj, M., & Chandrasekar, P. (2009). Performance of a forced convection solar drier integrated with gravel as heat storage material for chili drying. *Journal of Engineering Science and Technology*, 4(3), 305-314.
- Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., & Khoshtaghaza, M.H. (2014). Comparison of energy parameters in various dryers. *Energy Conversion and Management*, 87, 711–725.
- Nijhuis, H. H., Topping, H.M., Muresan, S., Yuksel, D., Leguijt, C., & Kloek, W. (1998).



- Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*, 9(1), 13-20.
- Orellana-Escobedo, L., Garcia-Amezquita, L. E., Olivas, G. I., Ornelas-Paz, J. J., & Sepulveda, D. R. (2013). Capsaicinoids content and proximate composition of Mexican chili peppers (*Capsicum spp.*) cultivated in the State of Chihuahua. *CYTA – Journal of Food*, 11(2), 179-184.
- Ornelas-Paz, J. de J., Martínez-Burrola, J. M., Ruiz-Cruz, S., Santana-Rodríguez, V., Ibarra-Junquera, V., Olivas, G. I., & Pérez-Martínez, J. D. (2010). Effect of cooking on the capsaicinoids and phenolics contents of Mexican peppers. *Food Chemistry*, 119(4), 1619-1625.
- Overhults, D.G., White, G.M., Hamilton, H.E., & Ross, I.J. (1973). Drying soybeans with heated air. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 16(1), 112-113.
- Ozgun, M., Ozcan, T., Akpinar-Bayizit, A., & Yilmaz-Ersan, L. (2011). Functional compounds and antioxidant properties of dried green and red peppers. *African Journal of Agricultural Research*, 6(25), 5638-5644.
- Page, G. E. (1949). *Factor influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layer* (Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica). Purdue University, Pro Quest Dissertations Publishing, 1300089. Recuperado de <https://search.proquest.com/docview/301817819>
- Pandey, K. B., & Rizvi, S. I. (2009). Plant Polyphenols as Dietary Antioxidants in Human Health and Disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2(5), 270-278.
- Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A. -J. (2013). Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(1), 36-60.
- Perez, L., Castañón, G., Ramírez, M., & Mayek, N. (2015). Avances y perspectiva sobre el estudio del origen y la diversidad genética de *Capsicum spp.* *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 2(4), 117-128.
- Pérez-Herrera, A. (2006). *Construcción de un secador de charolas giratorias y su valoración con ajo (Allium Sativum L.)* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México.
- Prior, R.L., Wu, X., & Schaich, K. (2005). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(10), 4290-4302.
- Pugliese, A., O'Callaghan, Y., Tundis, R., Galvin, K., Menichini, F., O'Brien, N., & Loizzo, M. R. (2014). In vitro Assessment of the Bioaccessibility of Carotenoids from Sun-Dried Chilli Peppers. *Plant Foods for Human Nutrition*, 69(1), 8-17.
- Rabha, D. K., Muthukumar, P., & Somayaji, C. (2017b). Experimental investigation of thin layer drying kinetics of ghost chilli pepper (*Capsicum Chinense Jacq.*) dried in a forced convection solar tunnel dryer. *Renewable Energy*, 105, 583-589.
- Rabha, D.K., Muthukumar, P., & Somayaji, C. (2017a). Energy and exergy analyses of the solar drying processes of ghost chilli pepper and ginger. *Renewable Energy*, 105, 764-773.
- Ramos-Aguilar, O. P., Ornelas-Paz, J. de J., Ruiz-Cruz, S., Zamudio-Flores, P. B., Cervantes-Paz, B., Gardea-Béjar, A. A., ... Reyes-Hernández, J. (2015). Effect of ripening and heat processing on the physicochemical and rheological properties of pepper pectins. *Carbohydrate Polymers*, 115, 112–121.

- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. G., & Dutter, R. (2008). Comparing data using statistical tests. *Statistical data analysis explained*. England: John Wiley & Sons Ltd, Sussex.
- Reis, R. C., Castro, V. C., Devilla, I. A., Oliveira, C. A., Barbosa, L. S., & Rodovalho, R. (2013). effect of drying temperature on the nutritional and antioxidant qualities of cumari peppers from par  ( *Capsicum chinense* Jacqui). *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30(2), 337-343.
- Ren, G., & Chen, F. (1998). Drying of American ginseng (*Panax quinquefolium*) roots by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*, 35(4), 433-443.
- Reynaud, A., Fraisse, D., Cornu, A., Farruggia, A., Pujos-Guillot, E., Besle, J. -M., ... Graulet, B. (2010). Variation in Content and Composition of Phenolic Compounds in Permanent Pastures According to Botanical Variation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(9), 5485-5494.
- Royston, P. (1995). Remark AS R94: A remark on Algorithm AS 181: The W test for normality. *Applied Statistics*, 44(4), 547-551
- Royston, P. (1982a). An extension of Shapiro and Wilk's W test for normality to large samples. *Applied Statistics*, 31(2), 115-124.
- Royston, P. (1982b). Algorithm AS 181: The W test for Normality. *Applied Statistics*, 31(2), 176-180.
- Sacks, E. J., & Francis, D. M. (2001). Genetic and environmental variation for tomato flesh color in a population of modern breeding lines. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126(2), 221-226.
- Salazar, M.A., & Ortega, J.M. UK Ed. (2012). *Peppers: Nutrition, Consumption and Health*. New York, USA: Nova Science Publishers Inc.
- Sanju n, N., Lozano, M., García-Pascual, P., & Mulet, A. (2003). Dehydration kinetics of red pepper (*Capsicum annuum* L var Jaranda). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(7), 697-701.
- Santos-Sánchez, N.F., Valadez-Blanco, R., Gómez-Gómez, M.S., Pérez-Herrera, A., & Salas-Coronado, R. (2012). Effect of rotating tray drying on antioxidant components, color and rehydration ratio of tomato saladette slices. *LWT-Food Science and Technology*, 46(1), 298-304.
- Schweiggert, U., Schieber, A., & Carle, R. (2005). Inactivation of peroxidase, polyphenoloxidase, and lipoxygenase in paprika and chili powder after immediate thermal treatment of the plant material. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 6(4), 403-411.
- Schweiggert, U., Kurz, C., Schieber, A., & Carle, R. (2007). Effects of processing and storage on the stability of free and esterified carotenoids of red peppers (*Capsicum annuum* L.) and hot chilli peppers (*Capsicum frutescens* L.). *European Food Research and Technology*, 225(2), 261-270.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2015). El chile de México para el mundo [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/el-chile-de-mexico-para-el-mundo>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2016). Producción nacional de chile alcanza 2.3 millones de toneladas [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/produccion-nacional-de-chile-alcanza-2-3-millones-de-toneladas>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2010). Un panorama del

- cultivo del chile [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://infosiap.siap.gob.mx/images/stories/infogramas/100705-monografia-chile.pdf> 23 de noviembre de 2018.
- Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS). (2017). Chile (*Capsicum* spp.): Generalidades de la Red Chile [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.gob.mx/snics/acciones-y-programas/chile-capsicum-spp> el 26 de marzo del 2019.
- Sharma, R., Joshi, V., & Kaushal, M. (2014). Effect of pre-treatments and drying methods on quality attributes of sweet bell-pepper (*Capsicum annuum*) powder. *Journal of Food Science and Technology*, 52(6), 3433-3439.
- Silva, S. N., Matos, J. D. P., Silva, P. B., Costa, Z. R. T., Gomes, J. P., Silva, L. P. F. R., Vieira, A. F., Melo, B. A., Primo, D. M. B. & Alexandre, H. V. (2018). Prediction of mathematical models of the drying kinetics and physicochemical quality of the chili pepper. *Journal of Agricultural Science*, 10(12), 377-384.
- Sora, G. T. S., Haminiuk, C. W. I., da Silva, M. V., Zielinski, A. F., Gonçalves, G. A., Bracht, A., & Peralta, R. M. (2015). A comparative study of the capsaicinoid and phenolic contents and in vitro antioxidant activities of the peppers of the genus *Capsicum*: an application of chemometrics. *Journal of Food Science and Technology*, 52(12), 8086-8094.
- Sridhara, P.B., Guravaiah, M., Hatti, I., & Srikanth, K. (2014). Evaluation of colour value from chillies and chili powder by spectrophotometric method. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 1(2), 184-191. Recuperado de <https://www.ijarbs.com/pdfcopy/may2014/ijarbs22.pdf>
- Tagong, K., Phanlek, C., Jindarak, S., & Ammatachaya, P. (2016). Rotary dryer and roaster for fresh chili by using heat energy from LPG. *Proceedings of the 2016 International Conference on Cogeneration, Small Power Plants and District Energy*, ICUE 20167728953.
- Télliez-Pérez, C., Sobolik, V., Montejano-Gaitán, J. G., Abdulla, G., & Allaf, K. (2014). Impact of Swell-Drying Process on Water Activity and Drying Kinetics of Moroccan Pepper (*Capsicum annuum*). *Drying Technology*, 33(2), 131-142.
- Togrul, I.T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55(3), 209-216.
- Topuz, A., & Ozdemir, F. (2007). Assessment of carotenoids, capsaicinoids and ascorbic acid composition of some selected pepper cultivars (*Capsicum annum* L.) grown in Turkey. *Journal of Food Composition and Analysis*, 20(7), 596-602.
- Tunde-Akintunde, T.Y. (2011). Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. *Renewable Energy*, 36(8), 2139-2145.
- Vega-Gálvez, A., Lemus-Mondaca, R., Bilbao-Sáinz, C., Fito, P., & Andrés, A. (2008). Effect of air-drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper (var. Lamuyo). *Journal of Food Engineering*, 85(1), 42-50.
- Vega-Gálvez, A.; Di Scala, K., Rodríguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., López, J., & Pérez-Won, M. (2009). Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annum*, L. var. Hungarian). *Food Chemistry*, 117(4), 647-653.
- Vera-Guzmán, A.M., Chávez-Servia, J.L., Carrillo-Rodríguez, J.C., & López, M.G. (2011). Phytochemical evaluation of wild and cultivated pepper (*Capsicum annum* L. and *C. pubescens* Ruiz & Pav.) from Oaxaca, México | [México evaluación fitoquímica en

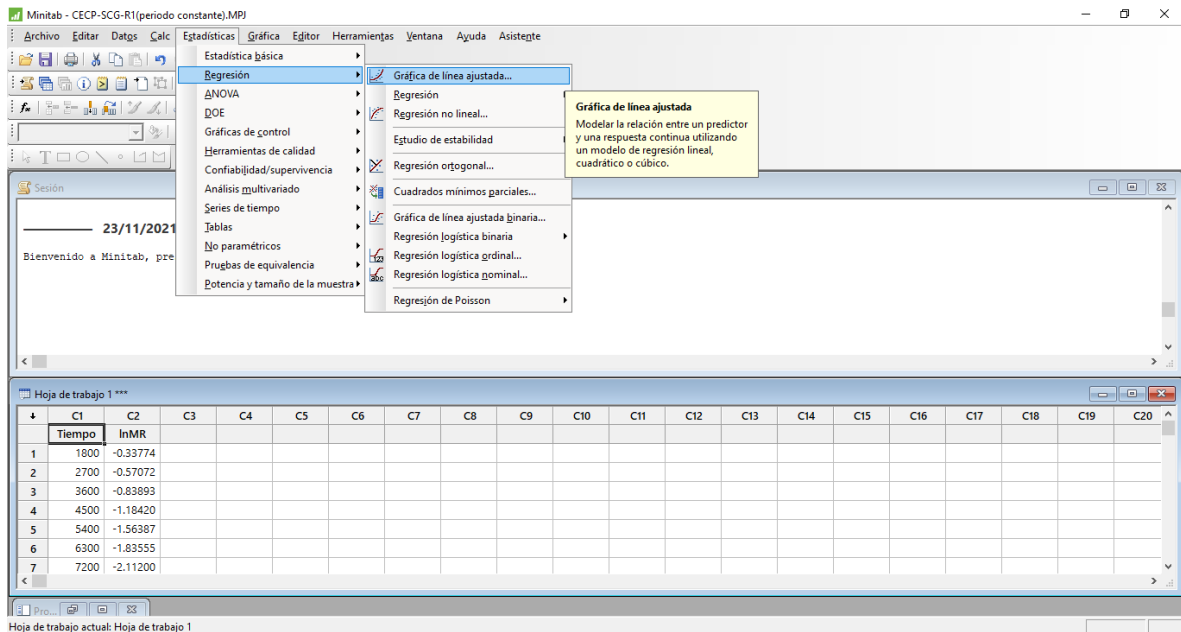


- chile (*Capsicum annuum* L. and *C. pubescens* Ruiz & Pav.) silvestre y cultivado en Oaxaca, México]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 71(4), 578-585.
- Vinayagam, R., & Xu, B. (2015). Antidiabetic properties of dietary flavonoids: a cellular mechanism review. *Nutrition & Metabolism*, 12(1), 1-20.
- Wall, M.M., & Bosland, P.W. (1998). Analytical methods for color and pungency of chiles (*Capsicums*). *Developments in Food Science*, 39(C), 347-373.
- Wang, G. Y., & Singh, R.P. (1978). A single layer drying equation for rough rice. *ASAE Paper, American Society Agricultural Engineering*.
- Yaldiz, O., Ertekin, C., Uzun, & Ibrahim, H. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26(5), 457-465.
- Yandell, B. S. (1997). *Practical Data Analysis for Designed Experiments*. Boca Raton, USA: Chapman & Hall.
- Zago, K. I., García, M. Y., Di Bernardo, M. L., Vit, P., Luna, J. R., & Gualtieri, M. (2010). Determinación del contenido de vitamina C en miel de abejas venezolanas por volumetría de óxido-reducción. *Revista del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel*, 41(1), 25-30.
- Zhu, H., Wang, Y., Liu, Y., Xia, Y., & Tang, T. (2010). Analysis of flavonoids in *Portulaca oleracea* L. by UV-vis spectrophotometry with comparative study on different extraction technologies. *Food Analytical Methods*, 3(2), 90-97.

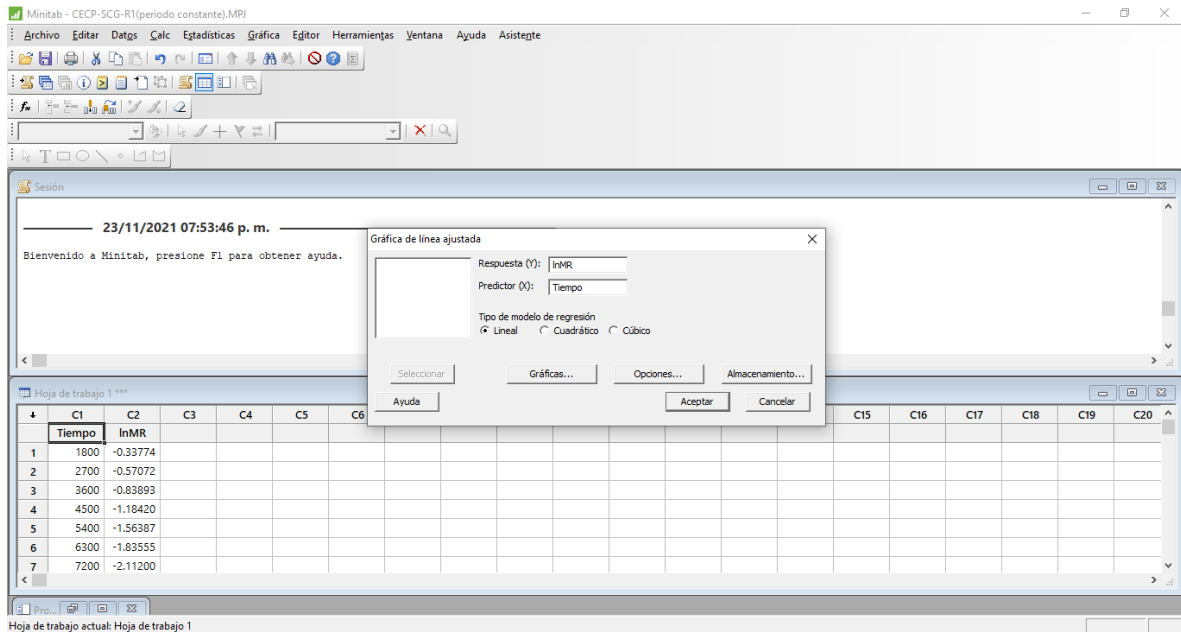
## 13. APÉNDICES

### Apéndice A. Proceso en Minitab para la obtención de la difusividad efectiva mediante los datos estadísticos de la regresión lineal

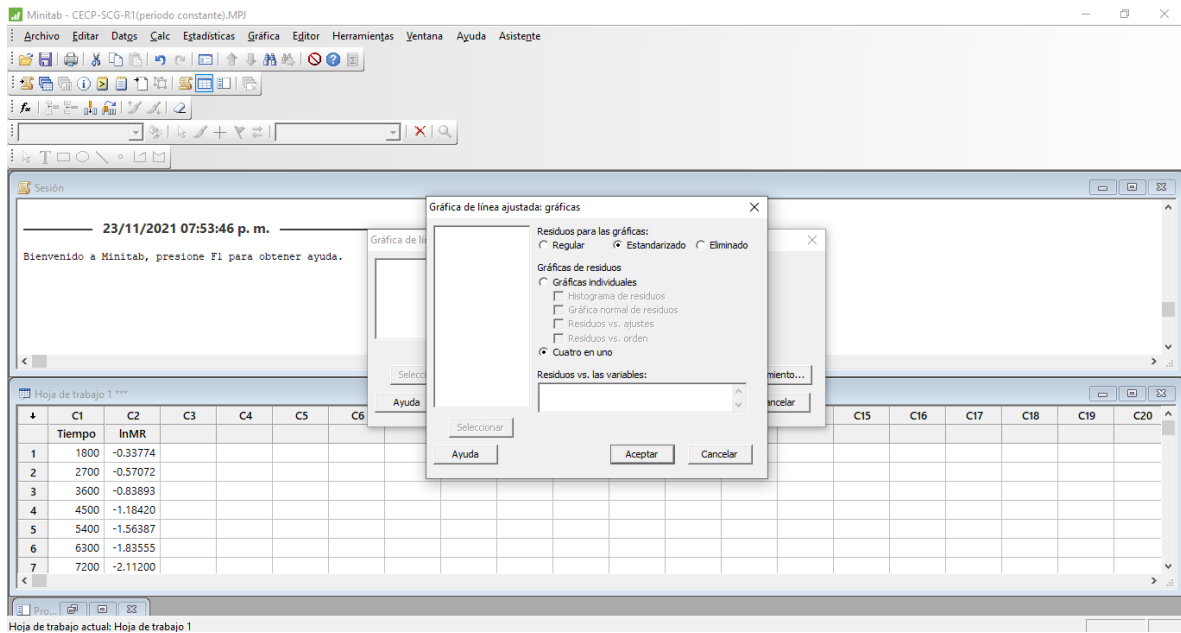
1. En la ventana de hoja de trabajo de Minitab 17 insertar los valores de MR con respecto al tiempo de acuerdo al período de velocidad constante o decreciente. En seguida ir a la opción de “Estadísticas”, luego dar clic en la opción de “Regresión” y, por último, dirigirse a la opción de “Gráfica de línea ajustada”.



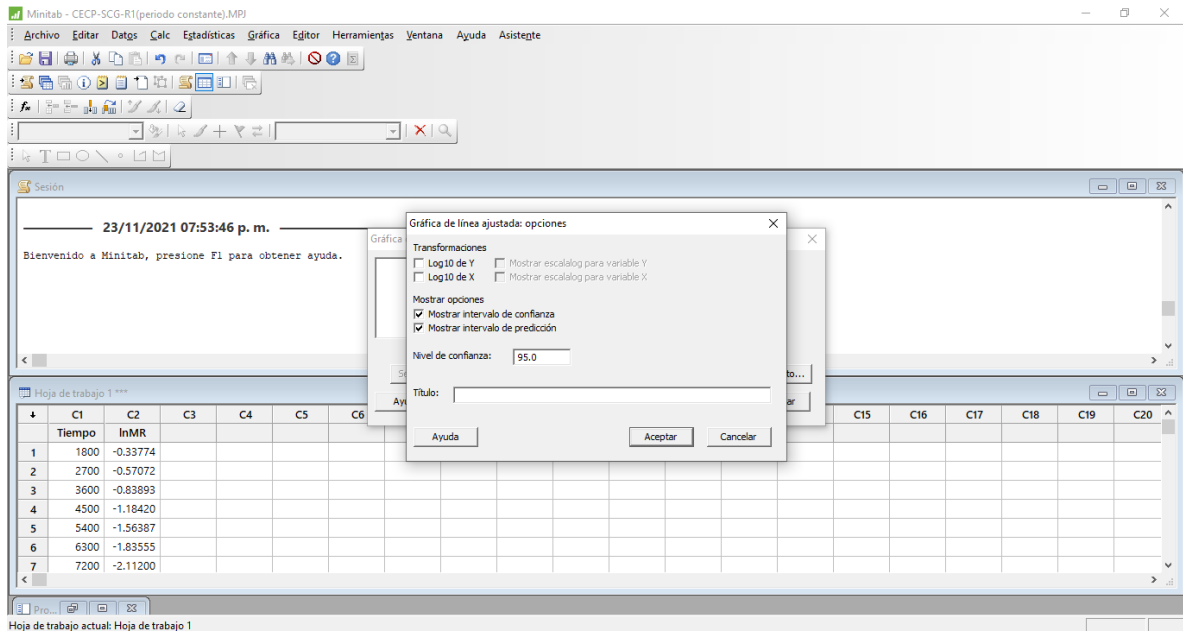
2. Seleccionar en el recuadro “Respuesta (Y)” la opción lnMR y posteriormente seleccionar la opción de Tiempo en el recuadro de “Predictor (X)”. Posteriormente dar clic en la casilla de Lineal en la opción de “Tipo de modelo de regresión”.



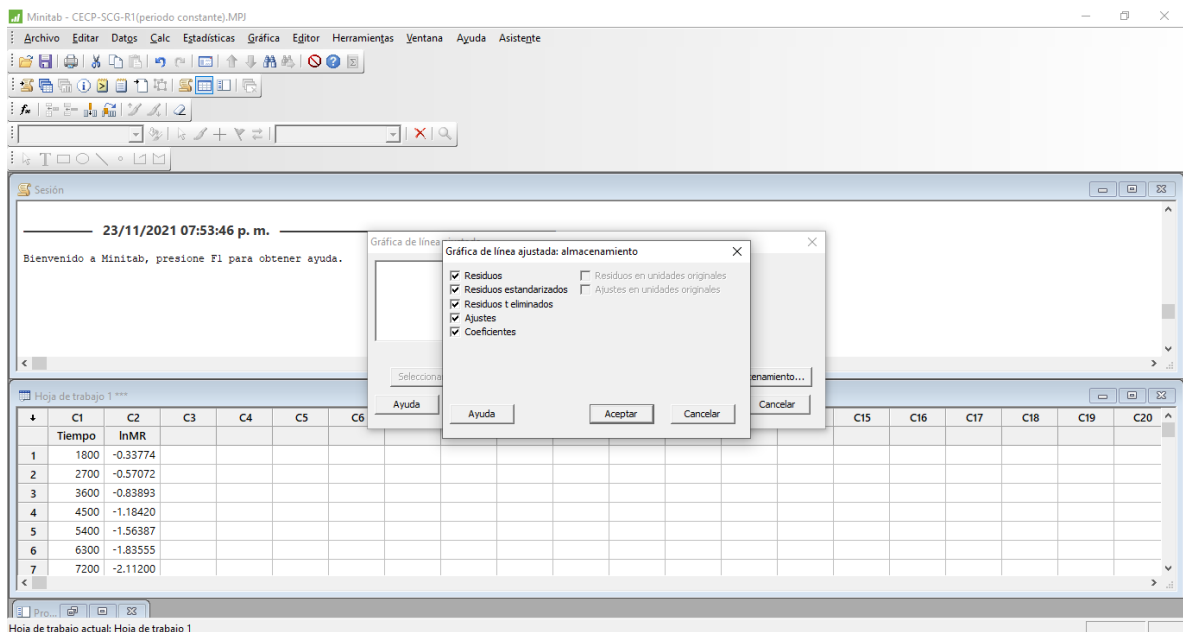
3. Acceder al icono “Gráficas” y dar clic en los espacios de las opciones “Estandarizado” y “Cuatro en uno”, seguidamente dar clic en la opción “Aceptar”.



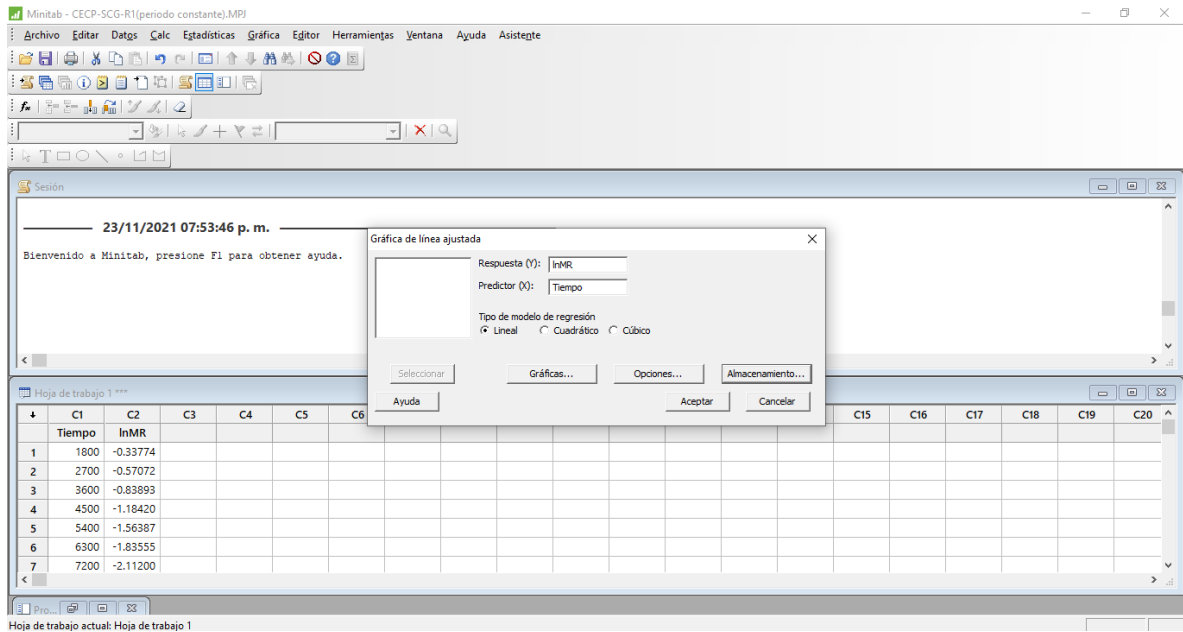
4. Acceder al icono de “Opciones” y dar clic en los espacios de “Mostrar intervalo de confianza” y “Mostrar intervalo de predicción”, seguidamente dar clic en la opción “Aceptar”.



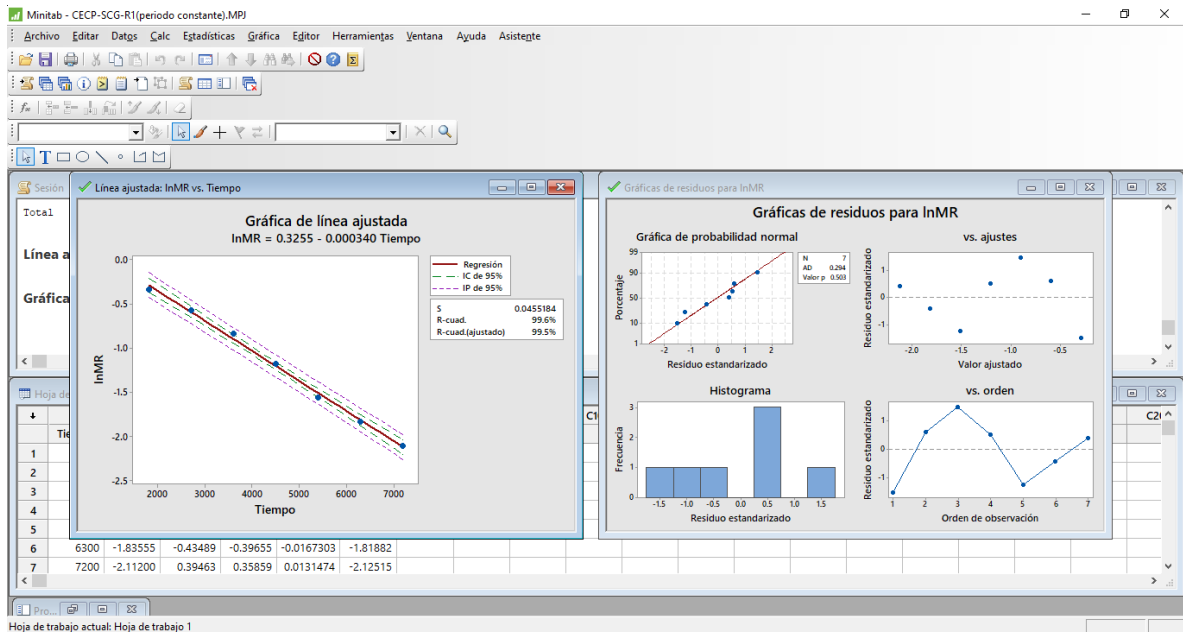
- Acceder al icono de “Almacenamiento” y dar clic en los espacios de las opciones “Residuos”, “Residuos estandarizados”, “Residuos t eliminados”, “Ajustes” y “Coeficientes”, seguidamente dar clic en la opción “Aceptar”.



- Por último, en el recuadro de “Grafica de línea ajustada” dar clic en la opción “Aceptar”.



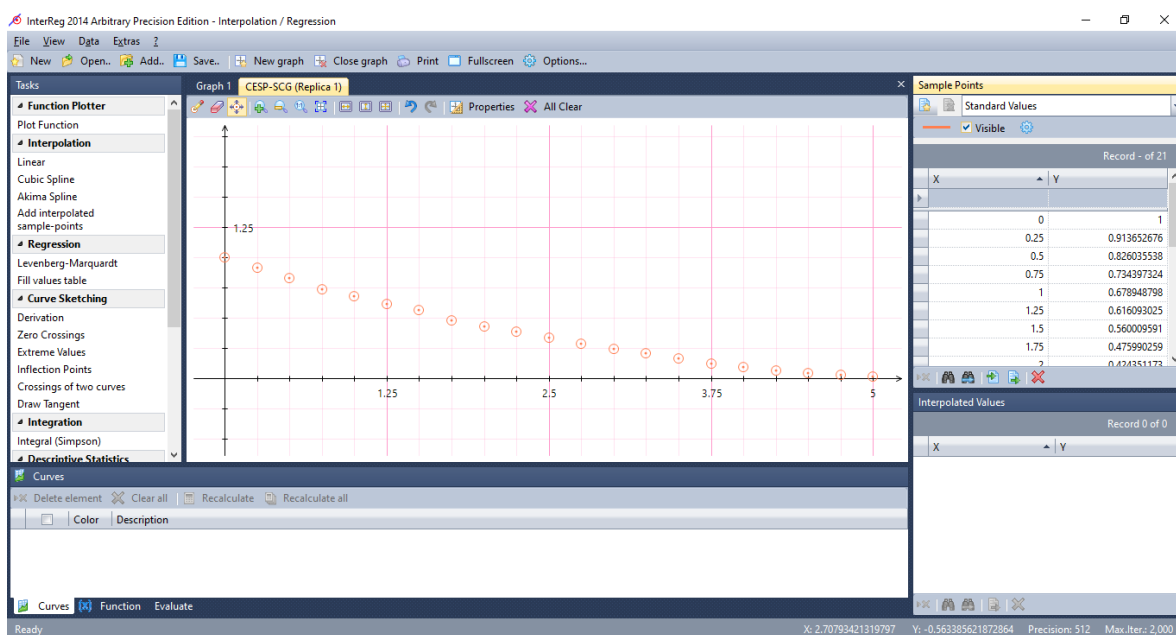
7. Los resultados de la regresión lineal de MR vs obtenidos mediante el programa estadístico Minitab 17.



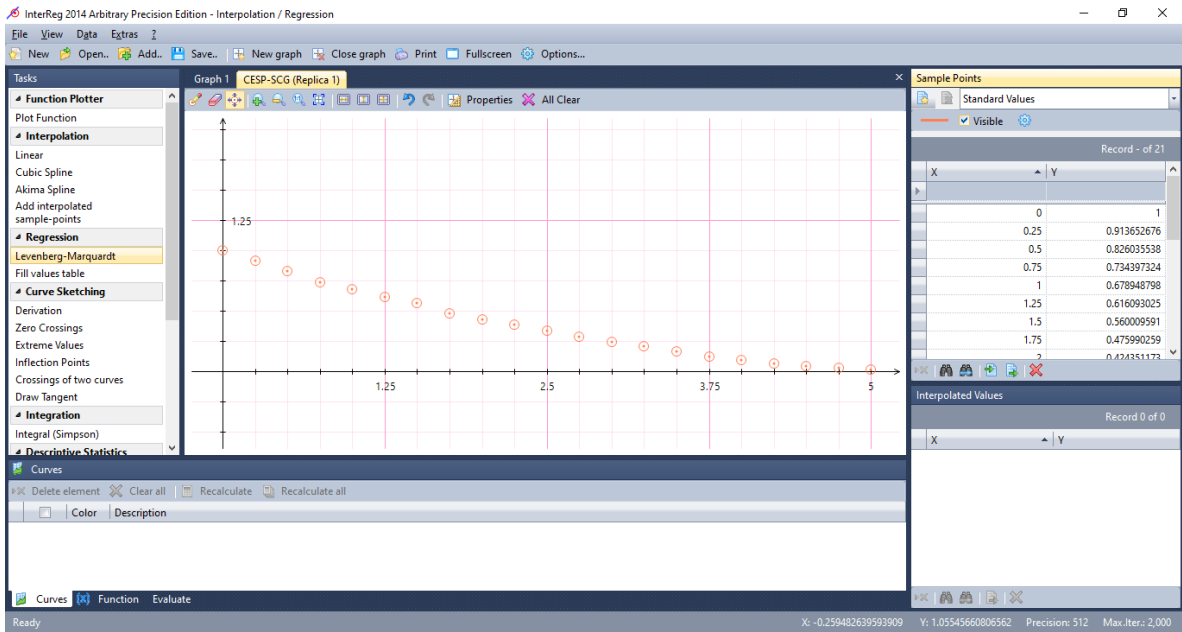
8. Esta metodología se siguió para cada una de las réplicas de las muestras de Chile de agua escaldadas con y sin pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% deshidratadas en un SCG y un SSM en el día uno y dos.

**Apéndice B. Proceso de regresión no lineal en InterReg 2014 Arbitrary Precision Edition – Interpolation/Regression para la obtención de los la constante de velocidad de secado (k) y parámetros de modelos de Newton, Page y Midilli aplicados a las cinéticas de secado de chile de agua (*C. annum L.*)**

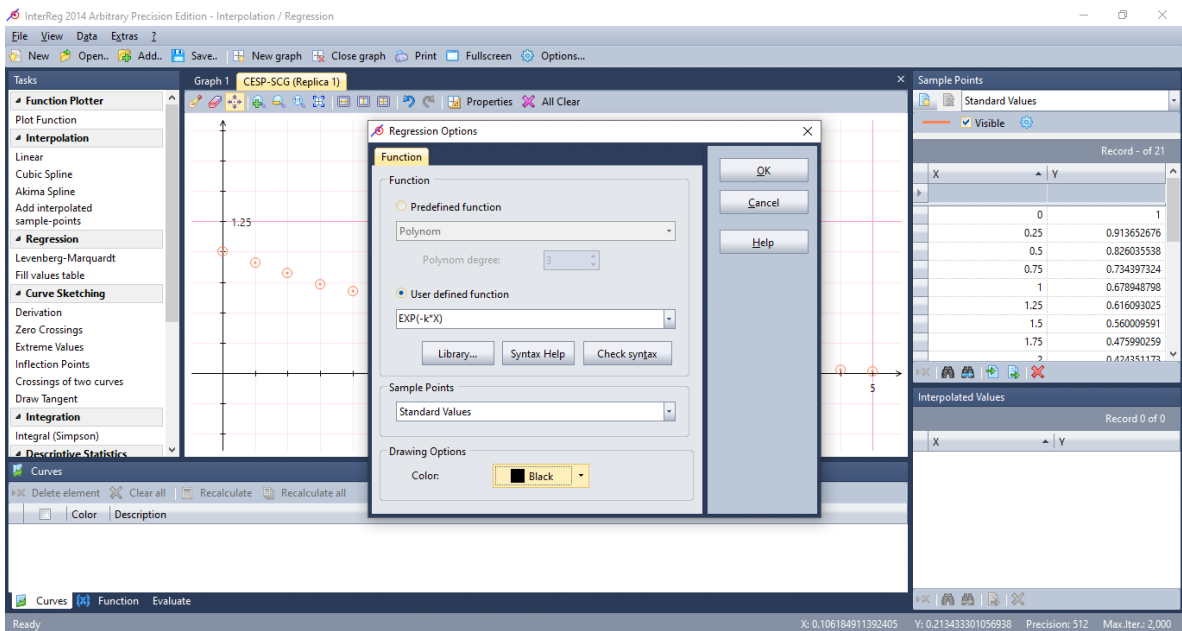
1. En la sección “Sample Points” de la ventana de trabajo de la interfaz estadística InterReg 2014 Arbitrary Precision Edition – Interpolation/Regression introducir en la variable “X” los valores del tiempo de secado, posteriormente colocar en la variable “Y” los valores de MR obtenidos en la experimentación para cada replica.



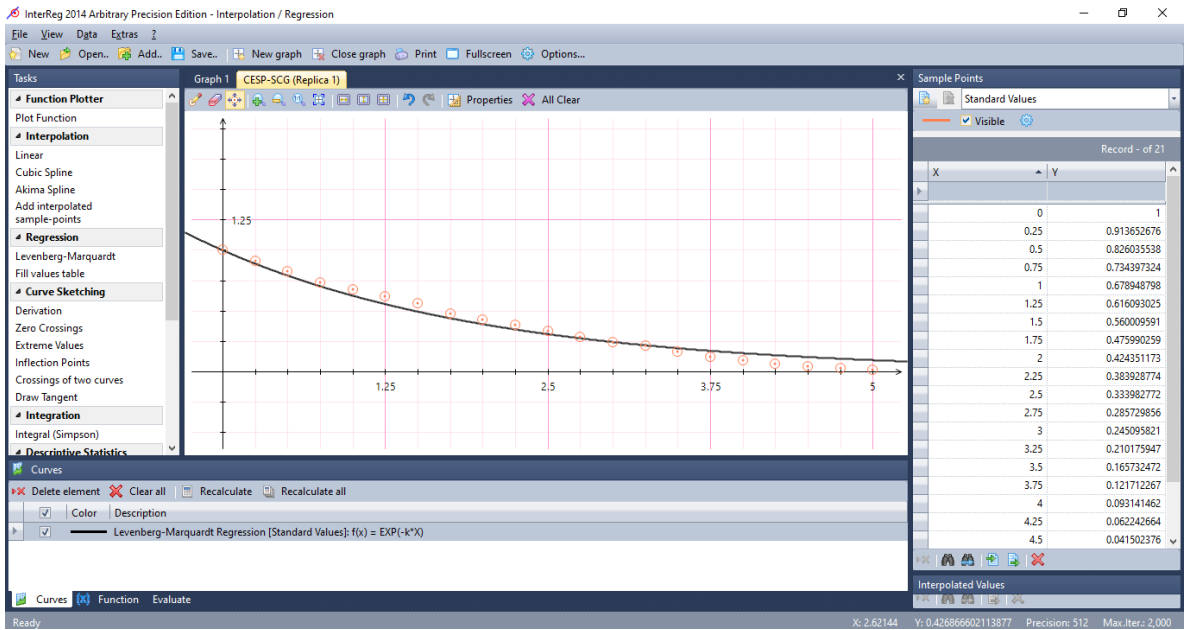
2. En seguida, ir a la opción de “Regression”, luego dar clic en la opción de “Levenberg-Marquardt”.



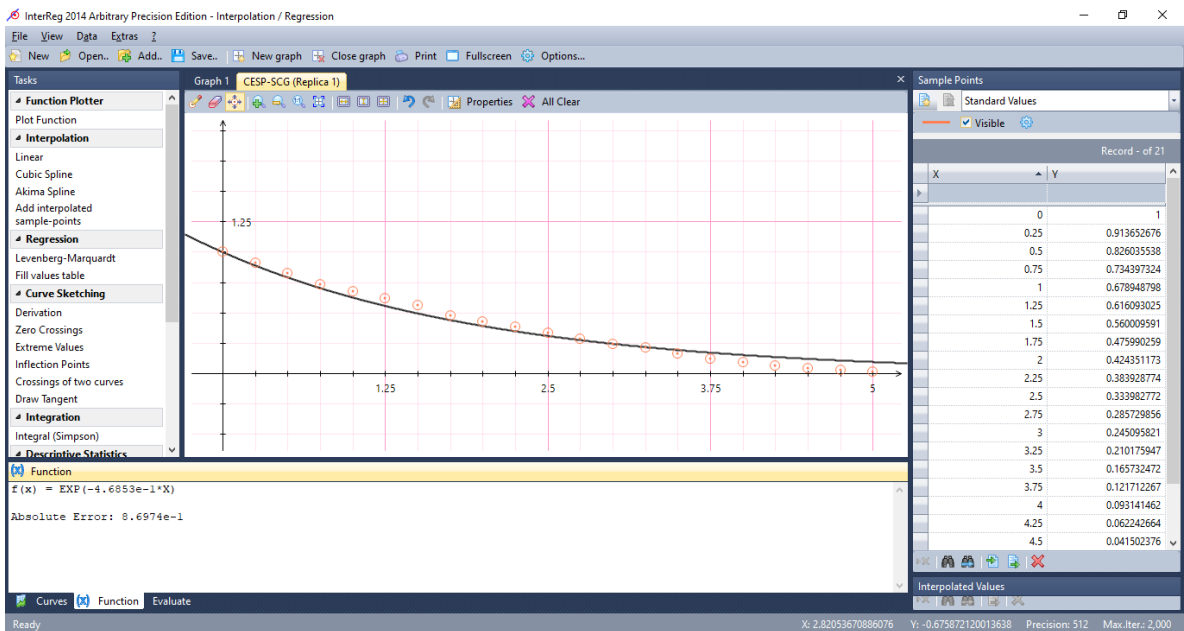
3. En el recuadro de “Function” seleccionar la opción de “User defined function” y posteriormente escribir en la casilla la ecuación del modelo de Newton denotada por EXP (-k \* X), donde X=Tiempo.



4. Obtención de la regresión no lineal del modelo de Newton basado en la regresión no lineal del algoritmo de Levenberg-Marquardt.



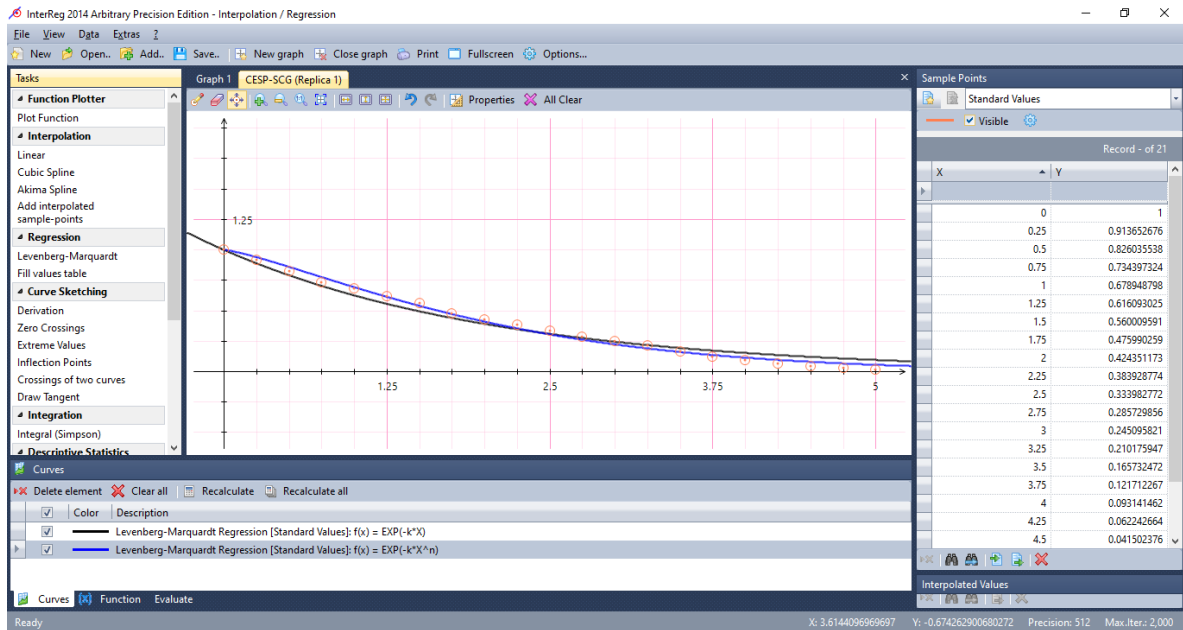
- Posteriormente para obtener el coeficiente de velocidad de secado decreciente ( $k$ ) del modelo de Newton acceder al icono de "(X) Function" ubicado en la parte inferior izquierda, por debajo de la regresión no lineal del modelo de Newton.



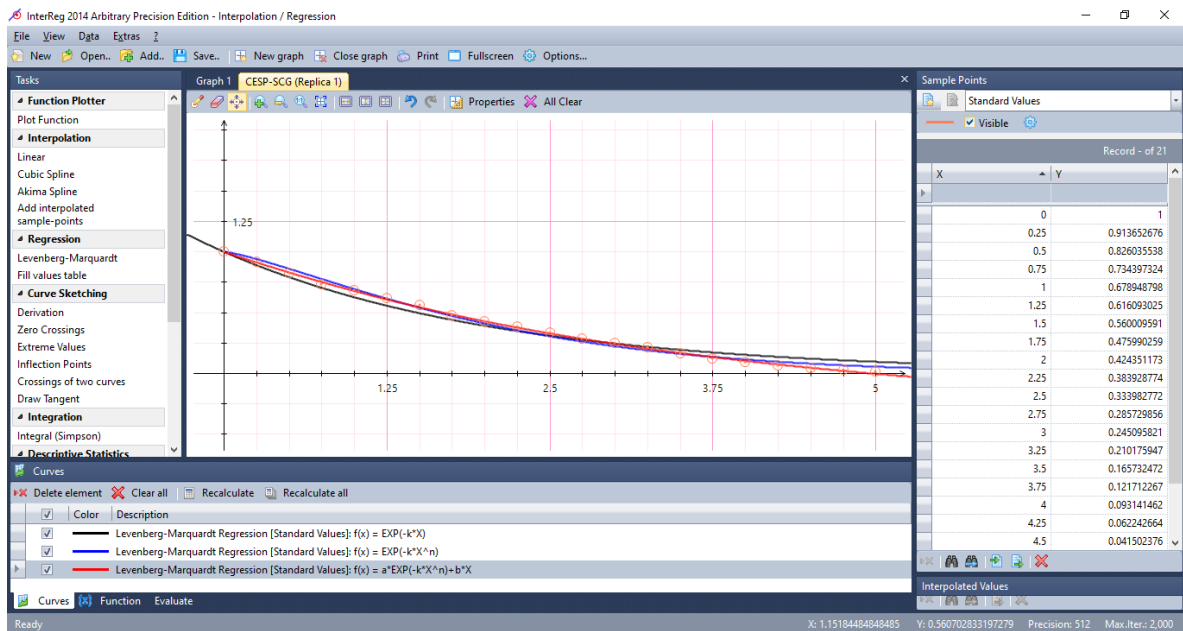
- Para obtener la regresión no lineal para los modelos de Page y Midilli se repitieron



los pasos del 2-4, pero colocando las ecuaciones EXP  $(-k \cdot X^n)$  y  $a \cdot \text{EXP}(-k \cdot X^n) + b \cdot X$  correspondientes a los modelos de Page y Midilli.

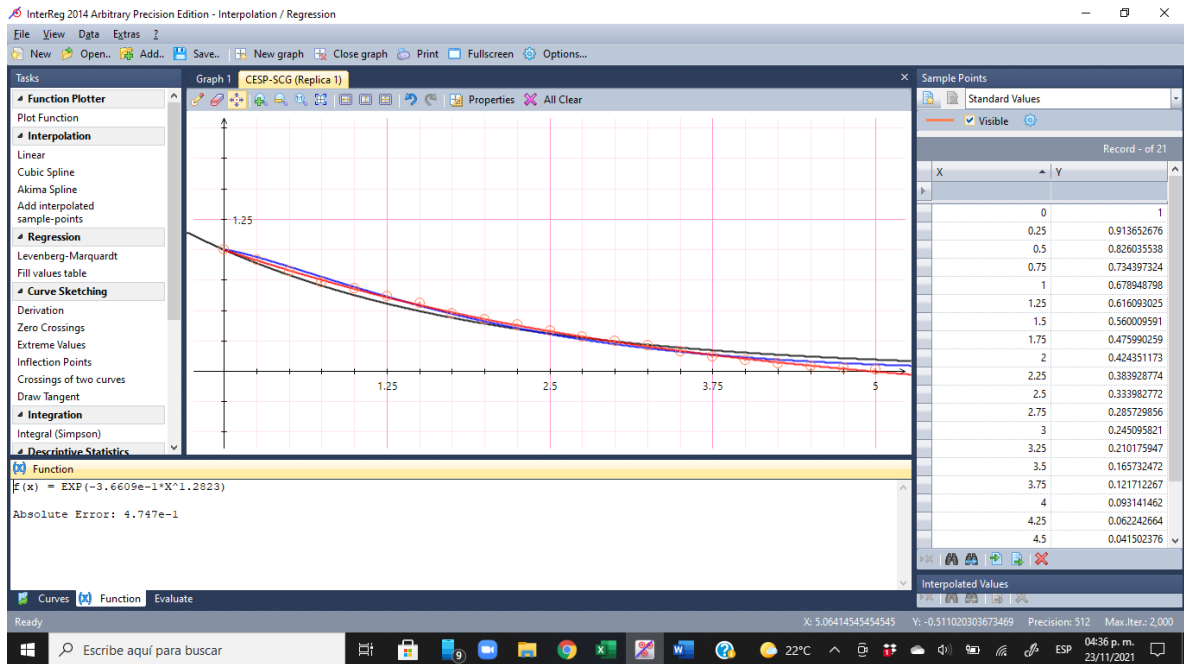


Regresión no lineal del modelo de Page para la réplica uno del CESP-SCG.

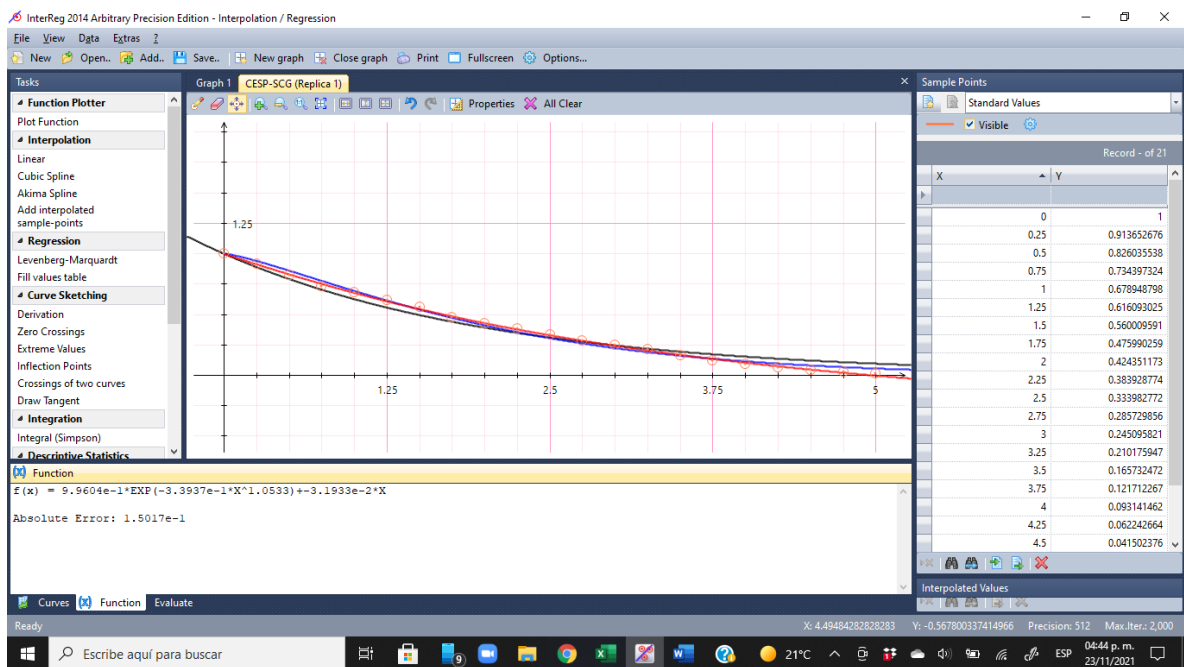


Regresión no lineal del modelo de Midilli para la réplica uno del CESP-SCG.

7. Posteriormente, para obtener los resultados de los parámetros de secado de los modelos de Page y Midilli se repitió el paso 5.



Resultados de los parámetros de secado del modelo de Page.



Resultados de los parámetros de secado del modelo de Midilli.

8. Esta metodología se siguió para cada una de las réplicas de las muestras de Chile de agua escaldadas con y sin pretratamiento con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% deshidratadas en un

SCG y un SSM en el día uno y dos.

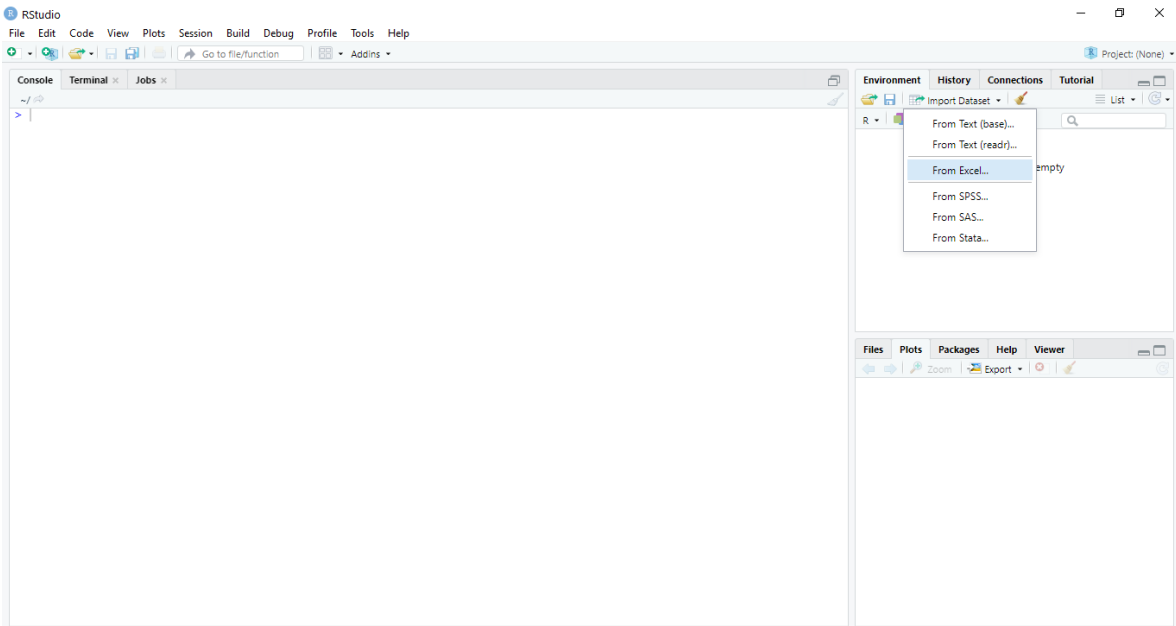
### **Apéndice C. Análisis estadístico de los datos obtenidos**

Para el análisis estadístico que se implementó en este trabajo se llevó a cabo mediante la interface estadística Rstudio, el análisis estadístico constó de dos etapas. La primera etapa consistió de un análisis estadístico descriptivo el cual se compone de un análisis exploratorio de datos (histogramas, diagramas de densidad y diagramas de cajas y bigotes) y obtención de los gráficos cuantiles-cuantiles (Q-Q).

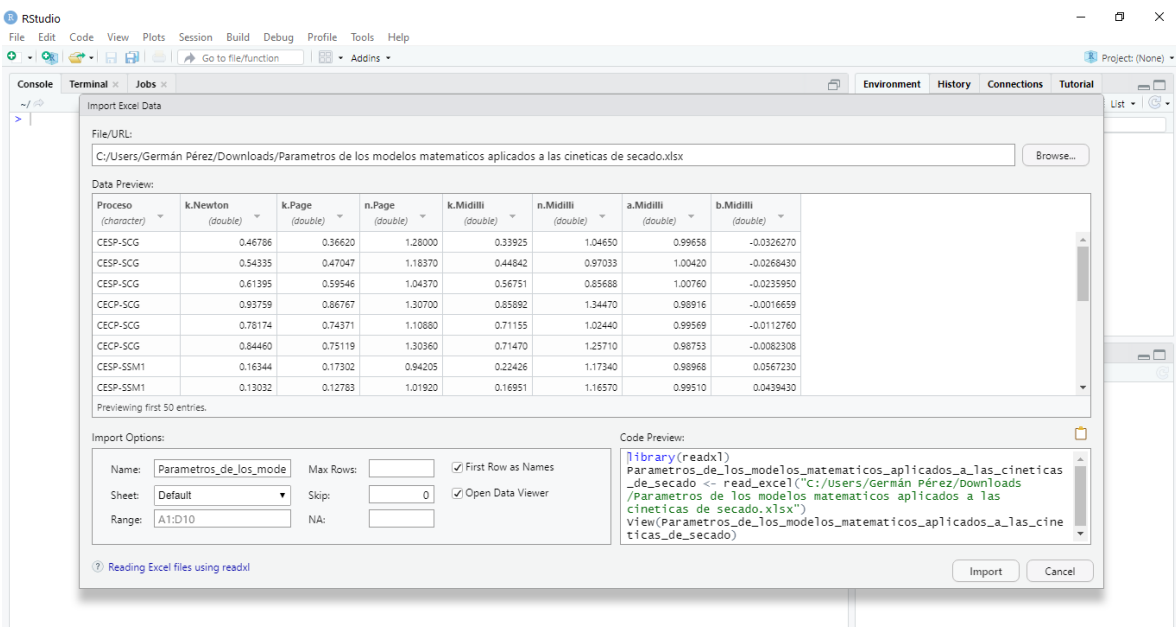
Los datos que presentaban una distribución normal y homocedástica, se examinaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y una prueba de Tukey a un nivel de  $\alpha=0.05$  para determinar si existe diferencia significativa entre las medias de al menos dos de los procesos. Además, se llevó a cabo una prueba de Kruskal-Wallis como alternativa no paramétrica al test ANOVA de una vía para datos no pareados. Así como la prueba de Dunn para determinar inferencias simultáneas entre las medias de los procesos de cada parámetro. Todas las pruebas estadísticas se realizaron a un  $\alpha=0.05$ . A continuación se describen los pasos para la realización de estos.

#### **I. Análisis estadístico descriptivo**

1. Importar en la ventana de trabajo de la interfaz estadística Rstudio los resultados de los parámetros de los modelos matemáticos obtenidos a partir de las cinéticas de secado para cada proceso (CESP-SCG, CECP-SCG, CESP-SSM1, CECP-SSM1, CESP-SSM2 y CECP-SSM2). Para importar los datos, primero se guardaron en un archivo Excel. Seguidamente, en la interfaz de Rstudio ir a la pestaña “Environment” colocada en la parte superior derecha y dar clic en la opción de “Import Dataset”. Seleccionar la opción de “From Excel”.



2. Seleccionar la opción de “Browse...” y seleccionar el archivo Excel dónde se guardaron los datos experimentales. Posteriormente, una vez seleccionado el archivo a importar dar clic en la pestaña “Import”.



3. El nombre del archivo para ejecutar los comandos en la consola es “Parametros\_de\_los\_modelos\_matematicos\_aplicados\_a\_las\_cineticas\_de\_secado”. Los datos importados se presentaron de la siguiente manera:

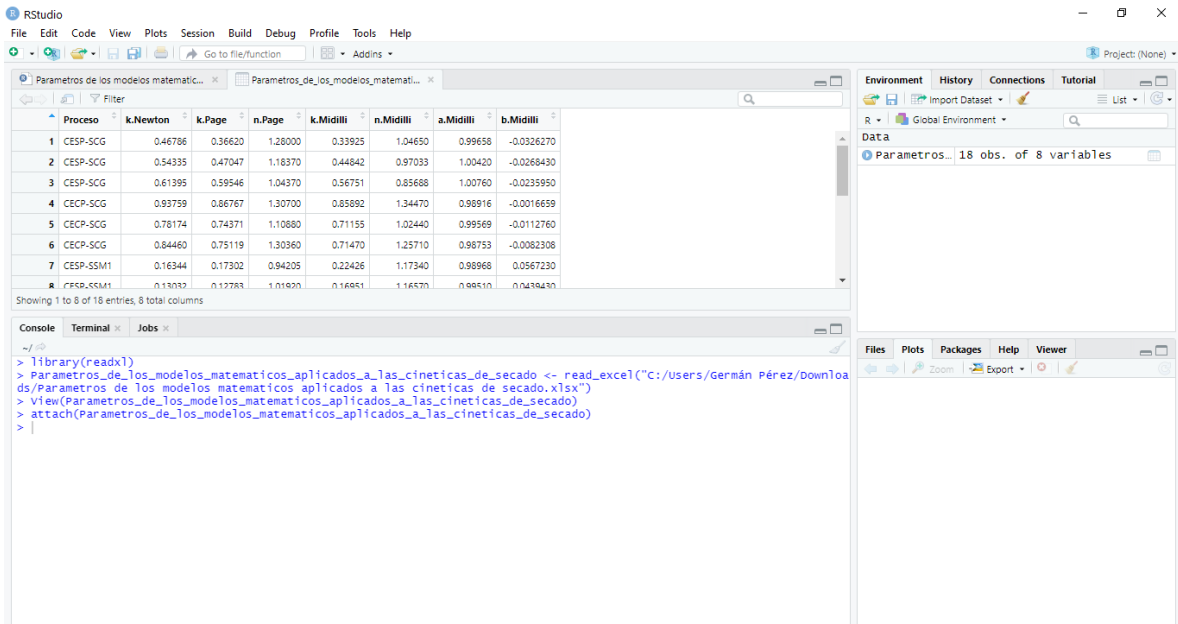
The screenshot shows the RStudio interface with a data frame loaded. The data frame has 17 rows and 8 columns. The columns are: Proceso, k.Newton, k.Page, n.Page, k.Midilli, n.Midilli, a.Midilli, and b.Midilli. The rows are numbered 1 to 17. The console shows the following R code:

```

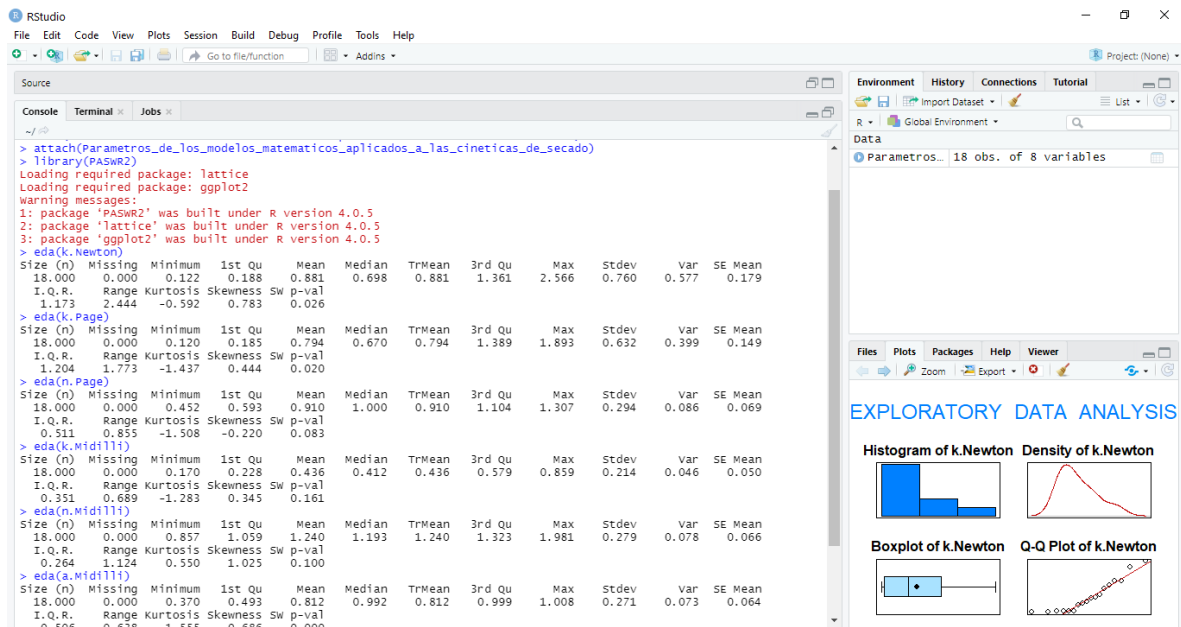
> library(readxl)
> Parametros_de_los_modelos_matematicos_aplicados_a_las_cineticas_de_secado <- read_excel("C:/users/Germán Pérez/Downloads/Parametros de los modelos matematicos aplicados a las cineticas de secado.xlsx")
> view(Parametros_de_los_modelos_matematicos_aplicados_a_las_cineticas_de_secado)
>

```

4. Colocar en la consola de Rstudio el comando “`attach(Kruskal_Wallis_test_parametros_de_secado)`”. La función `attach` permite crear un entorno en la ruta de búsqueda (search path) y convierte los elementos de la lista o columnas del data frame. El “search path” es la ruta que R siguió en la búsqueda de objetos y variables. El orden es importante: si el objeto lo encuentra en un entorno, no pasará al siguiente. Con `attach`, hace ese data frame accesible a R, y será posible referirse a sus variables directamente sin especificar el nombre del data frame.



5. Seguidamente, llamar a la librería PASWR2 mediante el comando “library(PASWR2)”. Luego colocar el comando “eda(parámetro)”. Donde la variable parámetro puede ser: k.Newton, k.Page, n.Page, k.Midilli, n.Midilli, a.Midilli y b.Midilli para obtener el análisis estadístico descriptivo para cada parámetro de los modelos matemáticos aplicados a las cinéticas de secado.

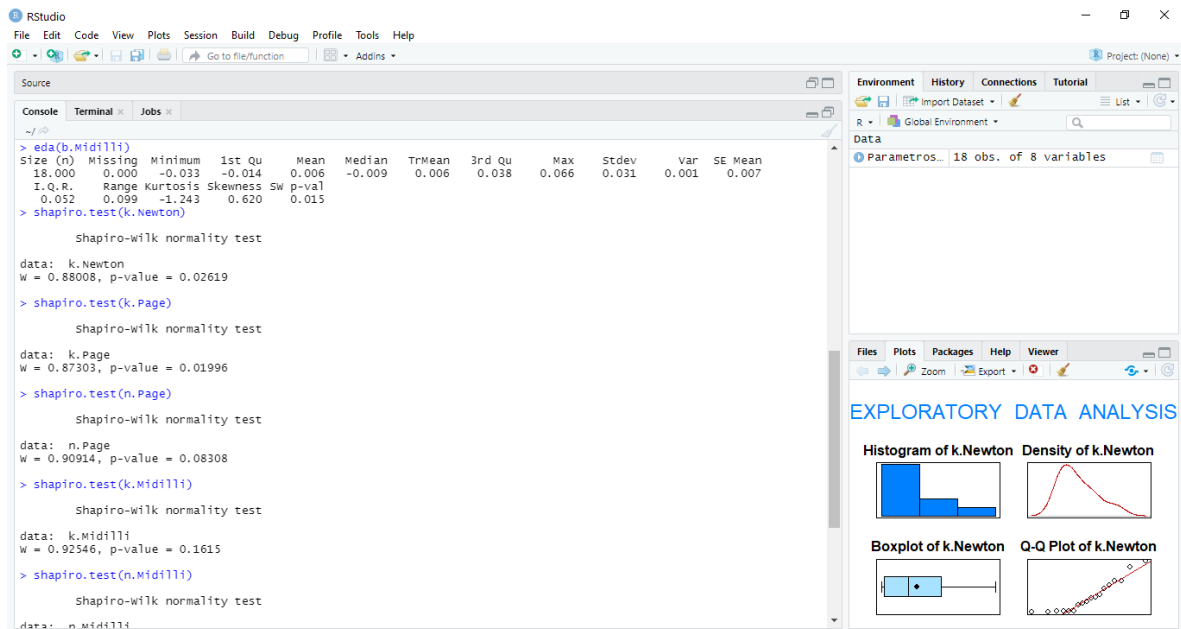


6. Este procedimiento también se siguió para la difusividad efectiva ( $D_{eff}$ ), constante de velocidad de secado constante ( $R_C$ ), parámetros de color Cie  $L^*a^*b^*$  y contenido

de fenoles totales y flavonoides.

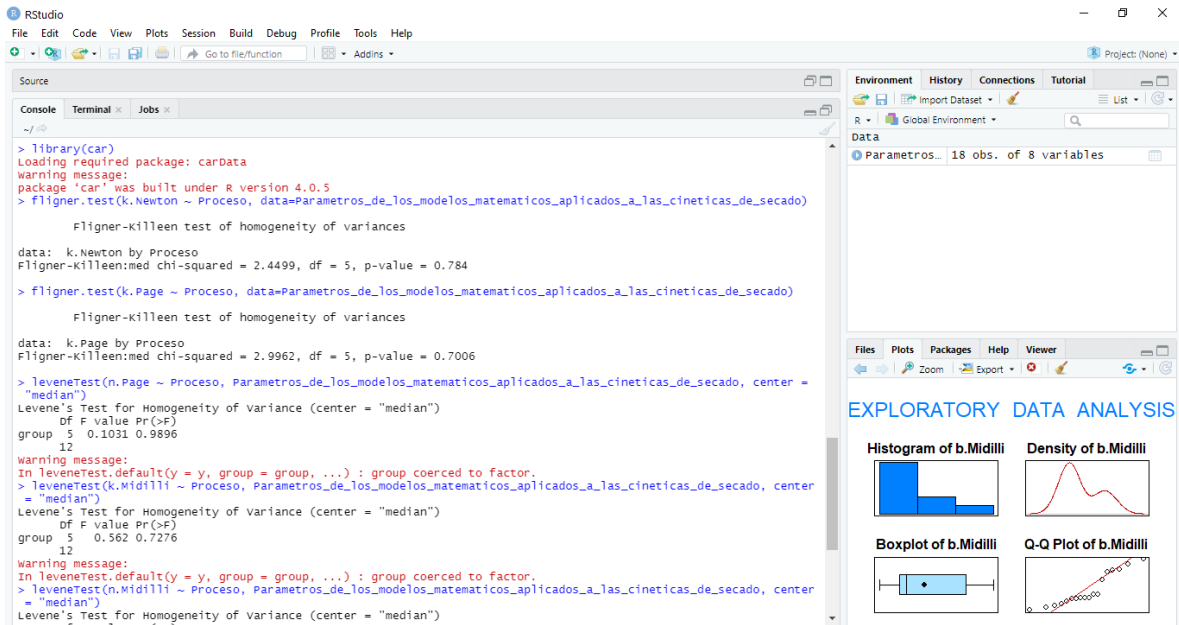
## I. Análisis estadístico inferencial

1. Para contrastar si los conjuntos de datos siguen una distribución normal o no, se empleó la prueba de Shapiro-Wilk para cada parámetro mediante el comando `shapiro.test(parámetro)`, por ejemplo, `shapiro.test(k.Newton)`.



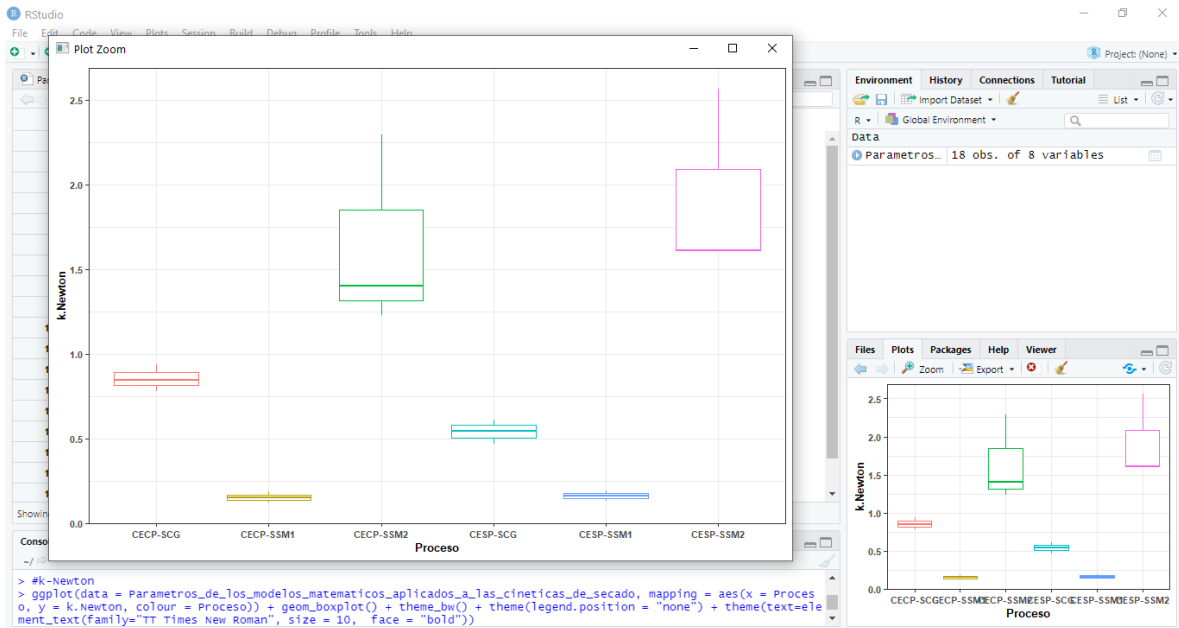
2. Para evaluar la homocedasticidad de los grupos de datos se utilizaron las pruebas de Fligner-Killeen y Levene. Fligner-Killeen se trata de una prueba no paramétrica que compara las varianzas basándose en la mediana. Es también una alternativa cuando no se cumple la condición de normalidad en las muestras. Mientras que la prueba de Levene ofrece una alternativa más robusta que el procedimiento de Bartlett para grupos de datos con distribución normal. Llamar a la librería “car” mediante la función “`library(car)`”. Se aplicó la prueba de Fligner-Killeen a los parámetros k-Newton, k-Page, a-Midilli, b-Midilli mediante la función `fligner.test(Parametro~Proceso, data=Kruskal_Wallis_test_parametros_de_secado)`, por ejemplo, `fligner.test(k-Newton~Proceso, data=Kruskal_Wallis_test_parametros_de_secado)`. Por otra parte, se empleó la prueba de Levene para los parámetros n-Page, k-Midilli, n-Midilli la prueba de Levene mediante el comando `leveneTest(Parámetro~Proceso,`

Parametros\_de\_los\_modelos\_matematicos\_aplicados\_a\_las\_cineticas\_de\_secado, center = "median"), por ejemplo, leveneTest(Parámetro~Proceso, Parametros\_de\_los\_modelos\_matematicos\_aplicados\_a\_las\_cineticas\_de\_secado, center = "median").

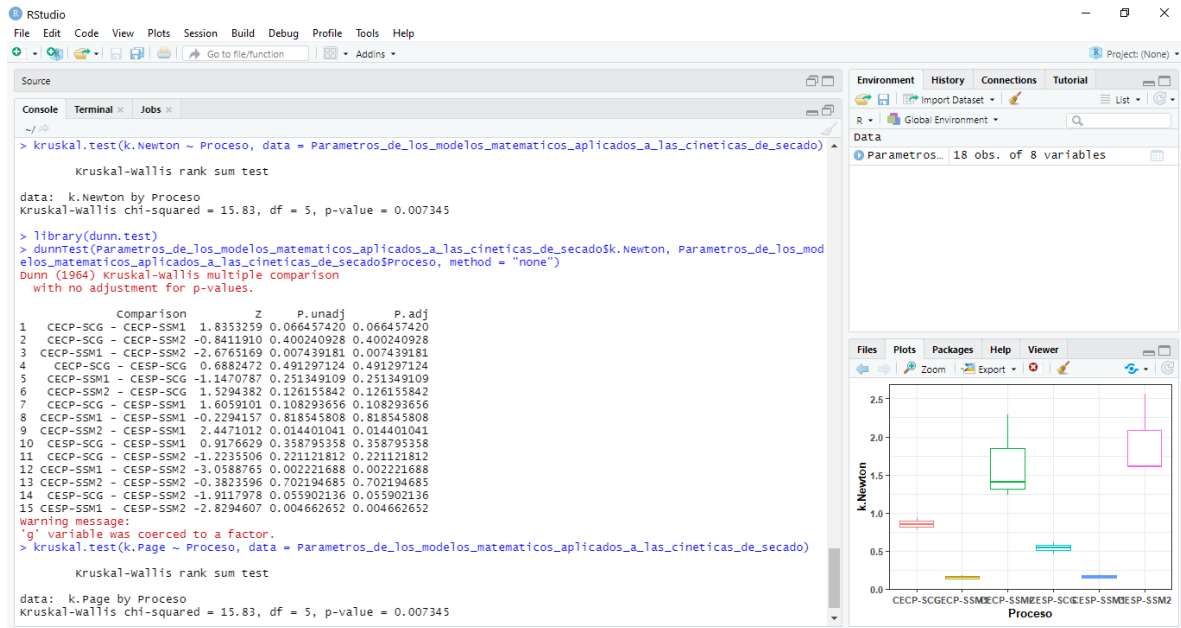


3. Para la obtención de las gráficas de cajas y bigotes, primero llamar a librería ggplot2 con la función “library(ggplot2)”, seguidamente colocar el comando `ggplot(data = Parametros_de_los_modelos_matematicos_aplicados_a_las_cineticas_de_secado, mapping = aes(x = Proceso, y = parámetro, colour = Proceso)) + geom_boxplot() + theme_bw() + theme(legend.position = "none") + theme(text=element_text(family="TT Times New Roman", size = 10, face = "bold"))` para cada parámetro, por ejemplo, `ggplot(data = Parametros_de_los_modelos_matematicos_aplicados_a_las_cineticas_de_secado, mapping = aes(x = Proceso, y = k.Newton, colour = Proceso)) + geom_boxplot() + theme_bw() + theme(legend.position = "none") + theme(text=element_text(family="TT Times New Roman", size = 10, face = "bold"))`.

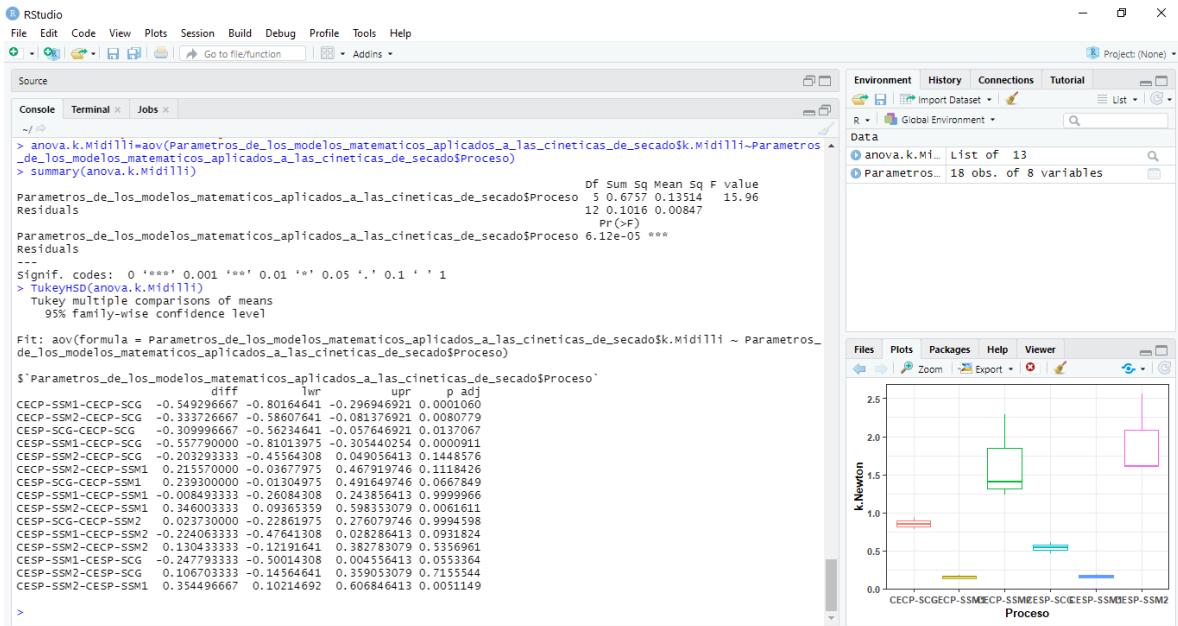




4. Para las muestras que no siguen una distribución normal, pero si presentan homocedasticidad (o heterocedasticidad) en sus varianzas se optó por realizar un análisis no paramétrico basado en la prueba de Kruskal-Wallis y una prueba de Dunn. La prueba de Kruskal-Wallis se puede ejecutar con el comando `kruskal.test(parámetro~Proceso, data = Parametros_de_los_modelos_matematicos_aplicados_a_las_cineticas_de_secado)`, ej. `kruskal.test(parámetro~Proceso, data = Parametros_de_los_modelos_matematicos_aplicados_a_las_cineticas_de_secado)`. Para realizar la prueba de comparaciones múltiples de prueba de Dunn, primero llamar a la librería `dunn.test` mediante la función “`library(dunn.test)`”, luego ejecutar el comando `dunnTest(Parametros_de_los_modelos_matematicos_aplicados_a_las_cineticas_de_secado$parámetro, Parametros_de_los_modelos_matematicos_aplicados_a_las_cineticas_de_secado$Proceso, method = "none")` para cada parámetro, por ejemplo `dunnTest(Parametros_de_los_modelos_matematicos_aplicados_a_las_cineticas_de_secado$k.Newton, Parametros_de_los_modelos_matematicos_aplicados_a_las_cineticas_de_secado$Proceso, method = "none")`.

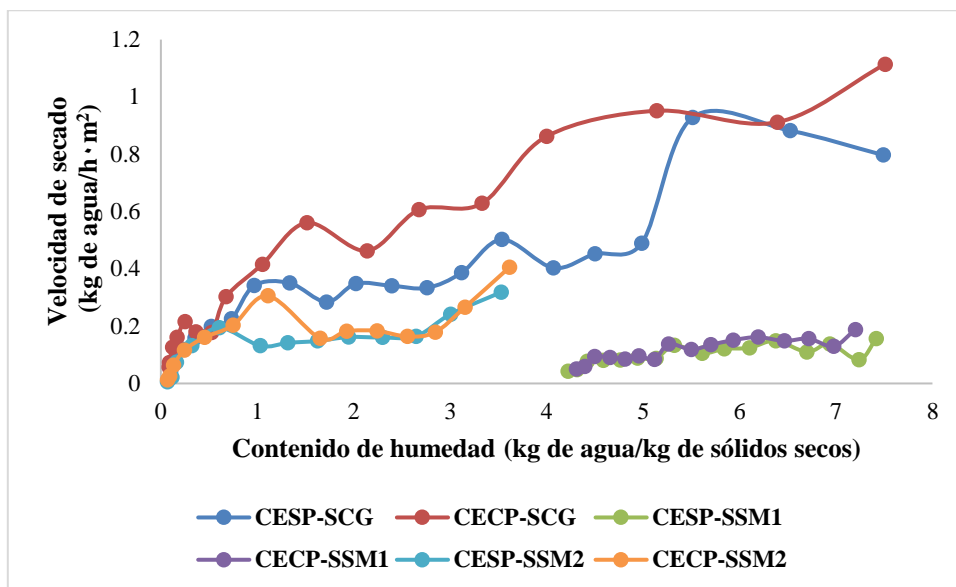


5. Mientras que para las muestras normales y homocedásticas se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y una prueba de Tukey. Para ejecutar la prueba de Kruskal-Wallis se puede ejecutar con el comando `anova.parámetro=aov(Parametros_de_los_modelos_matematicos_aplicados_a_las_cineticas_de_secado$parámetro~Parametros_de_los_modelos_matematicos_aplicados_a_las_cineticas_de_secado$Proceso)`, después ejecutar el comando `summary(anova.parámetro)` para obtener el resumen de la ANOVA; por ejemplo `anova.k.Midilli=aov(Parametros_de_los_modelos_matematicos_aplicados_a_las_cineticas_de_secado$k.Midilli~Parametros_de_los_modelos_matematicos_aplicados_a_las_cineticas_de_secado$Proceso)`. Para realizar la prueba de comparaciones múltiples de prueba de Tukey ejecutar el comando `TukeyHSD(anova.parámetro)`, por ejemplo, `TukeyHSD(anova.k.Midilli)`.

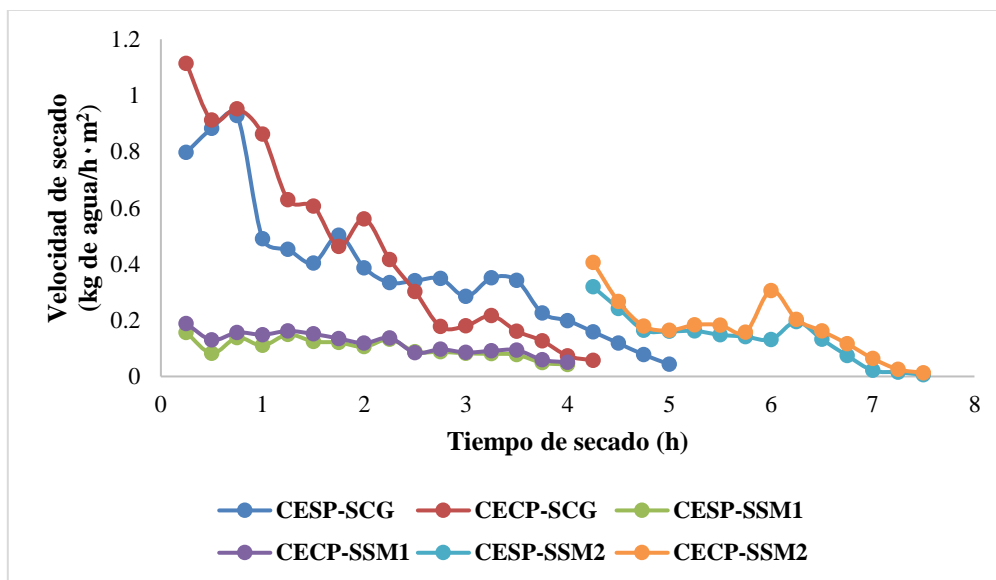


6. Este procedimiento también se siguió para la difusividad efectiva ( $D_{\text{eff}}$ ), constante de velocidad de secado constante ( $R_c$ ), parámetros de color Cie  $L^*a^*b^*$  y contenido de fenoles y flavonoides totales.

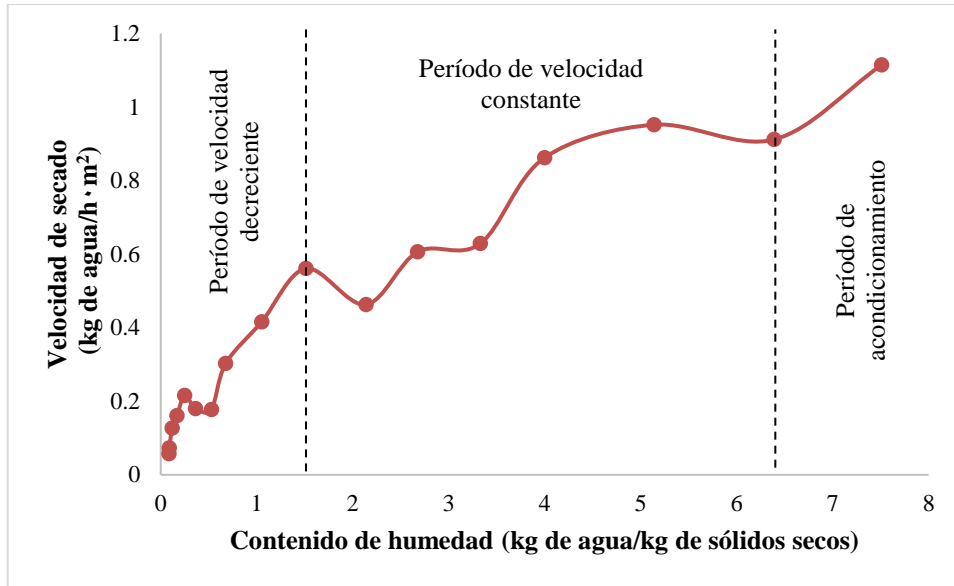
**Apéndice D. Curvas de humedad vs velocidad de secado o tiempo de secado de chile de agua (*C. annuum* L.) escaldado y escaldado pretratado con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% deshidratados en un secador de charolas giratorias o en un secador solar mixto**



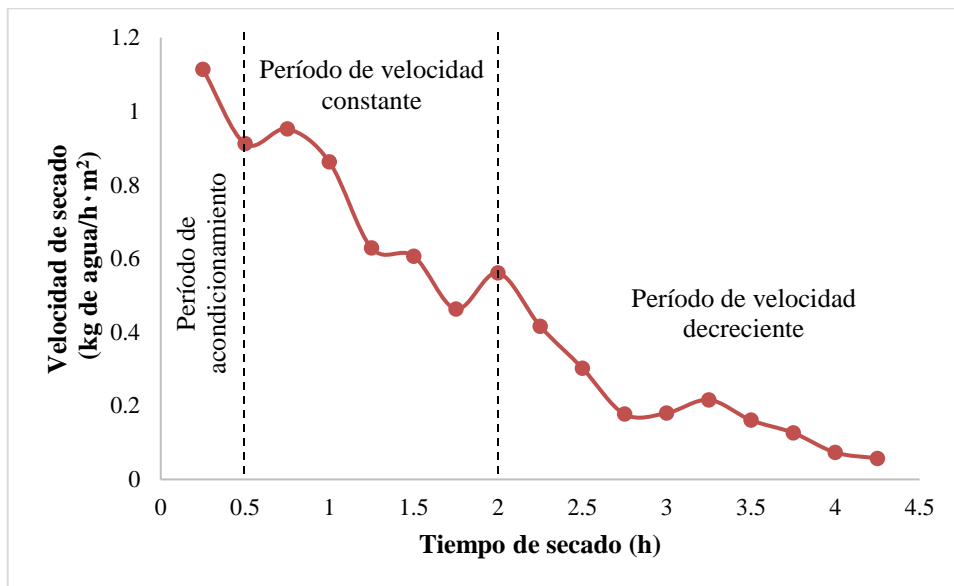
Curvas de humedad vs velocidad de secado de chile de agua (*C. annuum* L.) para los diferentes procesos.



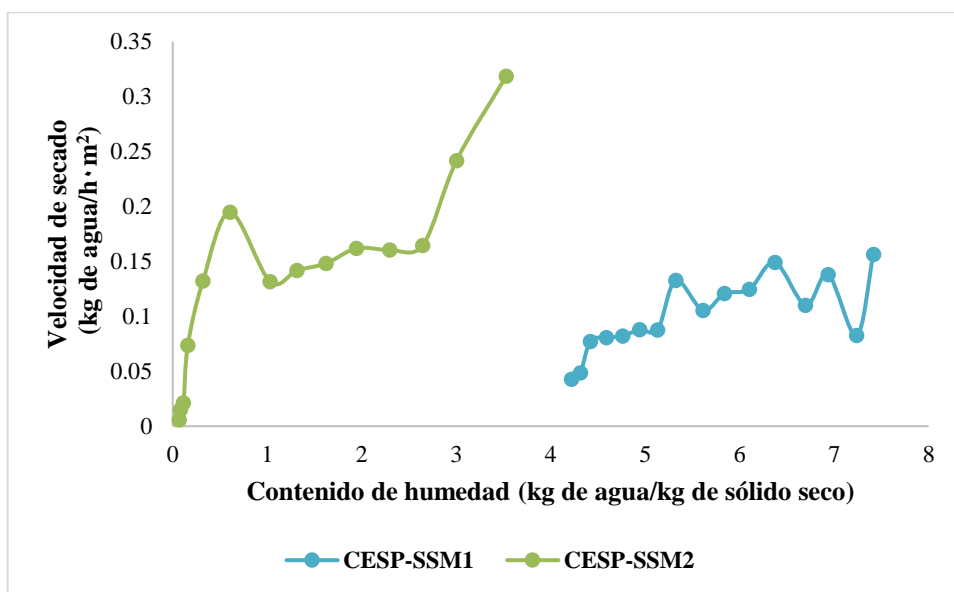
Curvas de humedad vs tiempo de secado de chile de agua (*C. annuum* L.) para los diferentes procesos.



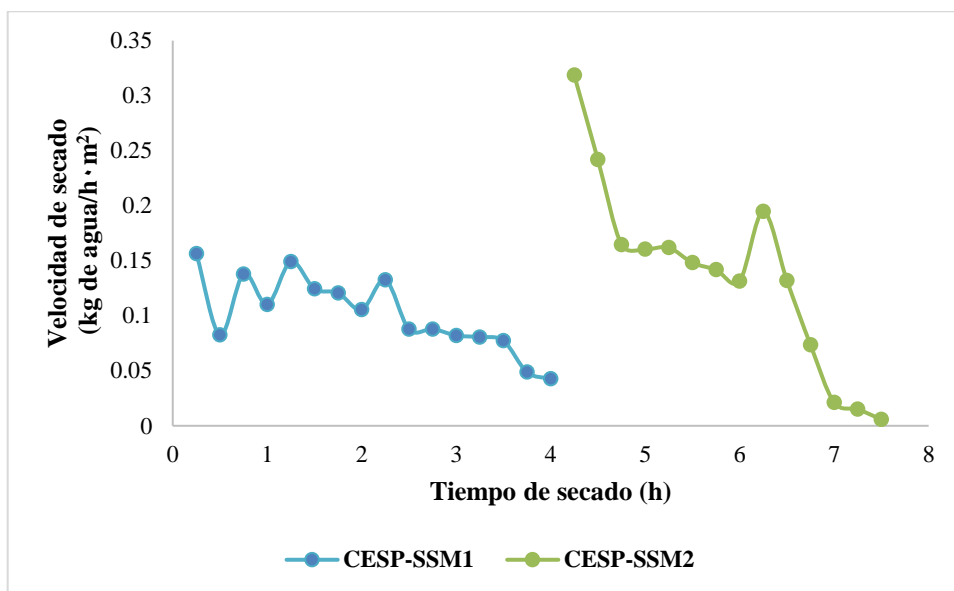
Curva de humedad vs velocidad de secado de chile de agua (*C. annuum* L.) pretratado con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% deshidratado en un secador de charolas giratorias.



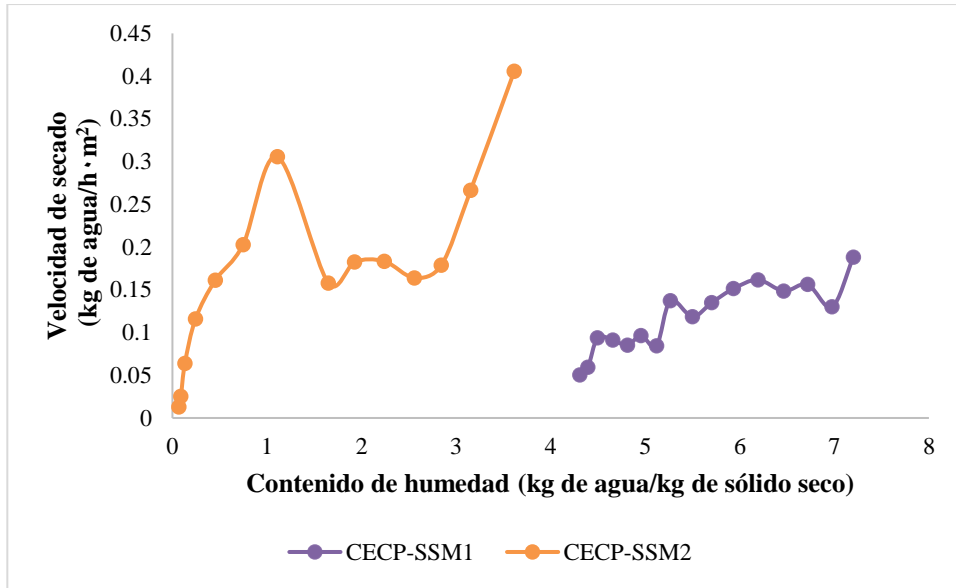
Curva de humedad vs tiempo de secado de chile de agua (*C. annuum* L.) pretratado con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% deshidratado en un secador de charolas giratorias.



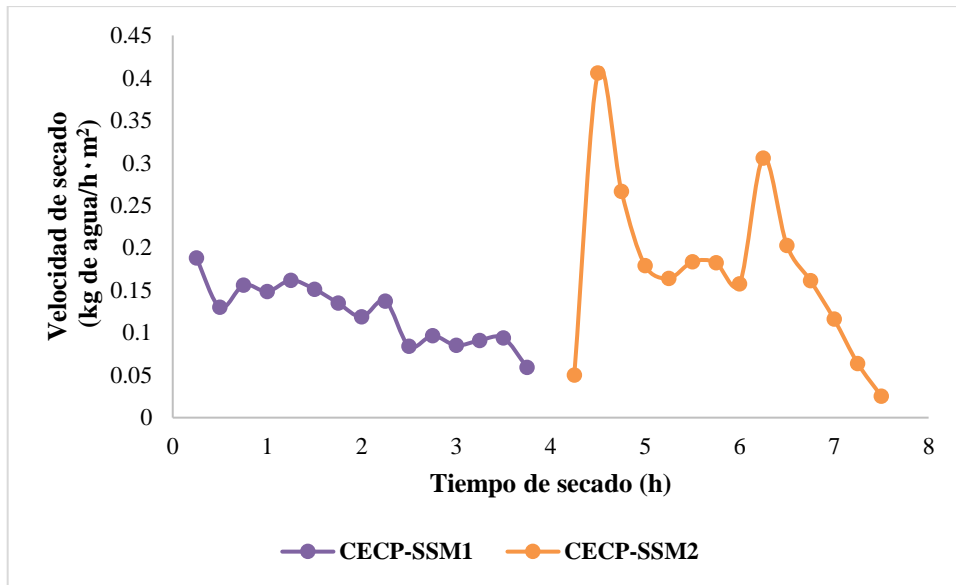
Curvas de humedad vs velocidad de secado de chile de agua (*C. annuum* L.) sin pretratamiento deshidratado en un secador solar mixto en el día uno y dos.



Curvas de humedad vs tiempo de secado de chile de agua (*C. annuum* L.) sin pretratamiento deshidratado en un secador solar mixto en el día uno y dos.



Curvas de humedad vs velocidad de secado de chile de agua (*C. annuum* L.) pretratado con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% deshidratado en un secador solar mixto en el día uno y dos.



Curvas de humedad vs tiempo de secado de chile de agua (*C. annuum* L.) pretratado con  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 0.5% deshidratado en un secador solar mixto en el día uno y dos.