

UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ MARÍA ARGUEDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



**COEFICIENTE DE DIFUSIVIDAD Y ENERGÍA DE
ACTIVACIÓN EN EL SECADO DE AGUAYMANTO
(*Physalis peruviana L*) TRATADO CON
METABISULFITO DE SODIO.**

Presentado por:

Br. ALEXÁNDER ALCARRÁZ HUAMÁN

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

ANDAHUAYLAS – APURÍMAC – PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ MARÍA ARGUEDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



Presentado por:
Br. ALEXÁNDER ALCARRÁZ HUAMÁN

**COEFICIENTE DE DIFUSIVIDAD Y ENERGÍA DE
ACTIVACIÓN EN EL SECADO DE AGUAYMANTO
(*Physalis peruviana* L) TRATADO CON METABISULFITO
DE SODIO.**

Asesor:
Mg. Fredy Taípe Pardo

ANDAHUAYLAS – APURÍMAC – PERÚ
2019



Universidad Nacional José María Arguedas

Identidad y Excelencia para el Trabajo Productivo y el Desarrollo



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

APROBACION DEL ASESOR

Quién suscribe:

Magister, Ingeniero en Industrias Alimentarias, Fredy Taipe Pardo identificado con CIP N° 88460, Profesor Nombrado a tiempo completo, adscrito al Departamento Académico de Ingeniería y Tecnología Agroindustrial, por la presente:

CERTIFICA,

Que, el Bachiller en **INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL** Alexander Alcarraz Huamán, ha culminado satisfactoriamente el informe final de tesis intitulado: **“COEFICIENTE DE DIFUSIVIDAD Y ENERGIA DE ACTIVACION EN EL SECADO DE AGUAYMANTO (*physalis peruviana* L) TRATADO CON METABISULFITO DE SODIO**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Agroindustrial**.

Andahuaylas, 12 de diciembre del año 2019.

Mg. Ing. Fredy Taipe Pardo
Asesor

Alexander Alcarraz Huamán
Tesista



Universidad Nacional José María Arguedas

Identidad y Excelencia para el Trabajo Productivo y el Desarrollo



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD

Yo, Alexander Alcarraz Huamán identificado con DNI N° 46856852 de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional José María Arguedas de Andahuaylas.

Declaro bajo juramento que el Proyecto Titulado: "COEFICIENTE DE DIFUSIVIDAD Y ENERGIA DE ACTIVACION EN EL SECADO DE AGUAYMANTO (*physalis peruviana* L) TRATADO CON METABISULFITO DE SODIO". Es auténtico y no vulnera los derechos de autor. Además, su contenido es de entera responsabilidad del autor del proyecto, quedando la UNAJMA exenta de toda responsabilidad en caso de atentar contra la Ley de propiedad intelectual y derechos de autor.

Andahuaylas, 12 de diciembre del 2019

.....
Firma

N° DNI: 46856852

E-mail: Alexcis.15ah@gmail.com

N° Celular: 997959278



APROBACION DEL JURADO EVALUADOR

LA TESIS: "COEFICIENTE DE DIFUSIVIDAD Y ENERGÍA DE ACTIVACIÓN EN EL SECADO DE AGUAYMANTO (*Physalis peruviana* L) TRATADO CON METABISULFITO DE SODIO". para optar el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial, ha sido evaluada por el Jurado Dictaminador conformado por:

PRESIDENTE: Ing. MSc. Fidelia Tapia Tadeo

PRIMER MIEMBRO: Ing. MSc. David Choque Quispe

SEGUNDO MIEMBRO: Ing. MSc. Carlos Alberto Ligarda Samanez

Habiendo sido aprobado por UNANIMIDAD/MAYORIA, en la ciudad de Andahuaylas el día 10 de diciembre de 2019.

Andahuaylas, 12 de diciembre de 2019

Ing. MSc. Fidelia Tapia Tadeo
Presidente Jurado Evaluador

Ing. MSc. David Choque Quispe
Primer Miembro Jurado Evaluador

Ing. MSc. Carlos Alberto Ligarda Samanez
Segundo Miembro Jurado Evaluador



FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

En la Av. 28 de julio N° 1103 del Local Académico SL02 (Santa Rosa) en el Salón de Grados de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional José María Arguedas ubicado en el distrito de Talavera de la Reyna de la Provincia de Andahuaylas, siendo las 9:00 horas del día martes 10 de diciembre del año 2019, se reunieron los docentes: MSc. Fidelia Tapia Tadeo, MSc. David Choque Quispe, MSc. Carlos Alberto Ligarda Samanez, en condición de integrantes del Jurado Evaluador del Informe Final de Tesis intitulado: "COEFICIENTE DE DIFUSIVIDAD Y ENERGÍA DE ACTIVACIÓN EN EL SECADO DE AGUAYMANTO (*PHYSALIS PERUVIANA*) TRATADO CON METABISULFITO DE SODIO", cuyo autor es el Bachiller en Ingeniería Agroindustrial **ALEXANDER ALCARRAZ HUAMÁN**, el asesor Mg. Fredy Taipe Pardo con el propósito de proceder a la sustentación y defensa de dicha tesis.

Luego de la sustentación y defensa de la tesis, el Jurado Evaluador **ACORDÓ: APROBAR** por **UNANIMIDAD** al Bachiller en Ingeniería Agroindustrial **ALEXANDER ALCARRAZ HUAMÁN**, obteniendo la siguiente calificación y mención:

Nota escala vigesimal		Mención
Números	Letras	
17	Diezsete	Muy BUENO

En señal de conformidad, se procedió a la firma de la presente acta en 03 ejemplares.

MSc. Fidelia Tapia Tadeo
Presidente del Jurado Evaluador

MSc. David Choque Quispe
Primer Miembro del Jurado Evaluador

MSc. Carlos Alberto Ligarda Samanez
Segundo Miembro del Jurado Evaluador

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida y permitirme llegar a este momento tan especial de mi vida. A mi madre Candelaria, por su inmensa preocupación que tuvo en mi educación y por inculcarme principios y valores; que hoy gracias a Dios me acompaña.

Mamá éste es el logro que quiero compartir contigo, gracias por ser mi madre y por creer en mí, quiero que sepas que ocupas un lugar muy especial en mi vida.

A mis docentes y amigos, que gracias a su apoyo incondicional han hecho posible alcanzar mi meta.

Alexander A.

AGRADECIMENTOS

A mi mamá y mis hermanos (as), por haberme brindado su apoyo incondicional durante toda mi vida universitaria.

A la Universidad Nacional José María Arguedas y a la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, por haberme permitido formarme en ella y brindarme las facilidades para la ejecución de esta Tesis.

A mis asesores, Ing. Mg. Fredy Taipe Pardo y Ing. MSc. Julio Cesar Sichez Muñoz, por haberme brindado su apoyo y orientación en todas las etapas del desarrollo de la presente Tesis.

A los miembros del jurado evaluador, MSc. David Choque Quispe, MSc Carlos Alberto Ligarda Samanez e Ing. MSc. Fidelia Tapia Tadeo, por sus relevantes aportes, comentarios y sugerencias durante el desarrollo de esta investigación.

A todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, por su infinita paciencia en la contribución de sus conocimientos y experiencias a lo largo de toda mi formación profesional.

A mis amigos (as) y compañeros(as) que siempre estuvieron en los buenos y malos momentos durante mi vida universitaria

A la Estación Experimental Agraria INIA-Cumbiamba-Talavera, por facilitarme la materia prima para el desarrollo de la investigación.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CHUMASQA QILLQA.....	3
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	5
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.3. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES E INDICADORES	6
1.4. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	7
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
2.2. BASES TEORICAS.....	11
2.2.1. Secado	11
2.2.2. Fundamentos de Eliminación de Agua.	12
2.2.3. Parámetros en el secado.....	12
2.2.4. Transferencia de Calor	15
2.2.5. Modelos cinéticos en deshidratación de secado de alimentos	15
2.2.6. Modelos difusionales.....	16
2.2.7. Transferencia de masa	18
2.2.8. Coeficiente de difusividad efectiva.....	19
2.2.9. Determinación de la difusividad efectiva.....	20
2.2.10. Factores que afectan a la difusividad efectiva	21
2.2.11. Energía de activación	22
2.2.12. Modelización de la difusión considerando contracción.....	23
2.2.13. Métodos de resolución de los modelos de secado	23
2.2.14. Modelado.....	24
2.2.15. Modelo matemático	25
2.2.16. Ajuste de modelos.....	26
2.2.17. Aguaymanto	28
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN	31
3.2. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	31
3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA	32
3.3.1. Población	32
3.3.2. Selección de la muestra	32
3.3.3. Tamaño de muestra.....	32

3.3.4. Unidad de análisis	32
3.4. TIPO DE INVESTIGACIÓN	32
3.5. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS.....	33
3.5.1. Acondicionamiento de las muestras.....	33
3.5.2. Tratamiento con metabisulfito de sodio.....	33
3.5.3. Determinación de humedad inicial	34
3.5.4. Operación de secado	34
3.6. MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y ANÁLISIS.....	35
3.6.1. Determinación de coeficiente de difusividad efectiva.....	35
3.6.2. Determinación de la energía de activación	36
3.7. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	36
3.7.1. Análisis de varianza.....	37
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1. CARACTERÍSTICAS DEL FRUTO DE AGUAYMANTO	38
4.2. EVALUACIÓN DE LA CURVAS DE SECADO	38
4.3. EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIDAD	43
4.4. DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN	46
CONCLUSIONES.....	48
RECOMENDACIONES	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
ANEXOS	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	7
Tabla 2. Composición química del aguaymanto	30
Tabla 3. Clasificación según tamaño	30
Tabla 4. Matriz de diseño para el secado de frutos de aguaymanto	31
Tabla 5. Características del fruto de aguaymanto	38
Tabla 6. Valores finales de secado para los tratamientos	39
Tabla 7. ANOVA para humedad final	40
Tabla 8. Difusividad efectiva del agua a 50 °C	44
Tabla 9. Difusividad efectiva del agua a 60 °C	44
Tabla 10. Difusividad efectiva del agua a 70 °C	44
Tabla 11. ANOVA para D_{ef}	45
Tabla 12. Valores de la energía de activación	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Difusividad efectiva para varios alimentos a distintas temperaturas	22
Figura 2. Esquema de proceso	24
Figura 3. Fruto de aguaymanto (<i>Physalis peruviana</i> L) en el cáliz abierto.	29
Figura 4 Esquema de la operación de secado	34
Figura 5. Diagrama de efectos para la humedad	40
Figura 6. Diagrama de efectos para el tiempo	40
Figura 7. Curva de secado para el aguaymanto a 50°C	41
Figura 8. Curva de secado para el aguaymanto a 60°C	42
Figura 9. Curva de secado para el aguaymanto a 70°C	43
Figura 10. Variación de la D_{ef} con la temperatura	45
Figura 11. Diagrama de efectos para la D_{ef}	46

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

h_{bh}	: humedad en base humedad
h_{bs}	: humedad en base seca
m_w	: masa de agua, m_s es la masa de producto seco
m_t	: masa total del producto.
D_{ef}	: Difusividad efectiva del agua (m^2/s)
D_0	: parámetro de difusividad (m^2/s)
E_a	: energía de activación (kJ/mol)
R	: constante de los gases perfectos ($8,314 \cdot 10^{-3}$ kJ/mol K)
T	: temperatura (K)
RX_{exp}	: razón de humedad experimental, adimensional
X_t	: contenido de agua del producto en el tiempo t , en b.s
X_0	: contenido de agua inicial del producto, en b.s
$X_{e,mod}$: contenido de agua en el equilibrio, en b.s.
m_t	: masa de la muestra en el tiempo t en g , durante el secado
m_s	: masa de la muestra seca, (g).
RX	: la fuerza impulsora reducida o razón de humedad (b.s.)
r	: es el radio del fruto de aguaymanto fresco (m).
X_t	: contenido de agua del producto en el tiempo t , en b.s
X_0	: contenido de agua inicial del producto, en b.s

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo por objetivo determinar el coeficiente de difusividad efectiva y la energía de activación en el secado de aguaymanto (*Physalis peruviana L*) tratado con metabisulfito de sodio, se recolectaron frutos de aguaymanto del ecotipo alargado, selección Canaán procedente del centro experimental INIA, Andahuaylas, Apurímac. Se realizó el secado del fruto de aguaymanto a 50, 60 y 70 °C, en un secador de bandejas a una velocidad de 1.5 m/s, se determinó el coeficiente de difusividad efectiva (D_{ef}) a través del modelo difusional de Crank, mientras que la energía de activación (E_a) se calculó a través de la ecuación de Arrhenius, para el ajuste se consideró el coeficiente de ajuste (R^2) y el error medio relativo (EMR), el diseño correspondió a un DBCA, y se aplicó un ANOVA bifactorial al 5% de significancia. Los frutos de aguaymanto presentan un diámetro medio de 1.75 ± 0.03 cm y humedad media de 0.797 ± 0.002 b.h., durante el secado se reportó tiempos de 1320, 700 y 600 min a 50, 60 y 70°C respectivamente, se observó que los valores de D_{ef} para el agua durante el secado, se incrementa significativamente con el aumento de la temperatura (p -value < 0.05), encontrándose en el intervalo de 1.201×10^{-10} a 7.496×10^{-10} m²/s, mientras que la adición de metabisulfito de sodio no mostró efecto significativo (p -value > 0.05), por otra parte la E_a , disminuye de 64.43 a 61.19 kJ/mol con el incremento de la concentración de metabisulfito de sodio del 3, 4 y 5%, del mismo modo el factor de Arrhenius D_0 disminuye de 3.241 a 1.007 m²/s. Se concluye que la adición de metabisulfito de sodio no influye en el D_{ef} , aunque si lo hace para la E_a .

Palabras clave: aguaymanto, coeficiente de difusividad, energía de activación.

ABSTRACT

The objective of this research work was to determine the coefficient of effective diffusivity and the activation energy in the drying of aguaymanto (*Physalis peruviana*) treated with sodium metabisulfite, fruits of aguaymanto were collected from the elongated ecotype, Canaan selection from the INIA experimental center, Andahuaylas, Apurímac. Drying of the aguaymanto fruit was performed at 50, 60 and 70 ° C, in a tray dryer at a speed of 1,5 m / s, the effective diffusivity coefficient (D_{ef}) was determined through the Crank diffusional model, while the activation energy (E_a) was calculated through the Arrhenius equation, for the adjustment the adjustment coefficient R^2 and the relative mean error (RME) were considered, the design corresponded to DBCA, and a bifactor ANOVA was applied at 5% significance. The fruits of aguaymanto have an average diameter of $1,75 \pm 0,03$ cm and average humidity of $0,797 \pm 0,002$ b.h., During drying times of 1320, 700 and 600 min were reported at 50, 60 and 70 ° C respectively, it was observed that the D_{ef} values for the water during drying, increases significantly with the increase in temperature (p-value <0,05), being in the range of $1,201E-10$ to $7,496E-10$ m²/s, while the addition of sodium metabisulfite showed no significant effect (p-value > 0.05), on the other hand, the E_a decreases from 64,43 to 61,19 kJ / mol with the increase in the concentration of sodium metabisulfite from 3% to 5%, in the same way the Arrhenius D_0 factor decreases from 3,241 to 1,007 m²/s. It is concluded that the addition of sodium metabisulfite does not influence D_{ef} , although it does for E_a .

Keywords: aguaymanto, diffusivity coefficient, activation energy.

CHUMASQA QILLQA

Kay llamkaymi taqwiriyninpi qatipaspa aypayta munarqa churananpaq chiqapchayta imaynatachus coeficientenisqa chay difusividadnisqa chiqapchasqa hinataq rupay akchichik rupaninpaq awaymantu (*Physalis peruviana L*) chakichiypi, qatipakurqa puririyninpi chay puchqusqa metabisulfitonisqawan, chaypaqmi suytuniraq awaymantu ruruta huñukamurqa, Canaánnisqa akllasqa rurumanta chawpi taqwiriynin INIAnisqa, Antawayllas, Apurímaqpi. Apakurqam awaymantu ruru chakichiy chay 50, 60 hinaspa 70 °C, rupaypi, huk chakichina ruranapi kallpachasqa 1.5 m/s, chaypi qawachikurqa coeficientenisqa chay difusividadnisqa chaninchasqa (D_{ef}) qatipakurqa chay difusionalnisqa Crankisqawan, chaykaman rupaypa quñirimuynin (E_a) qawarikurqa kallpachasqa yupaypa chay Arrheniusnisqawan, matipaypaqtaq qawarikurqa chay uraychasqa matipaywan (R^2)

Pantayninmi karqa chawpichasqa (EMR), ruranapaqkaqmi kutichirqa huk DBCAnisqawan, rurakurqataq huk ANOVA bifactorialnisqawan 5% chay riqsichikuyninpi. Awaymantupa rurunkuna tarikun chitqasqa chawpichasqa 1.75 ± 0.03 cm nisqapi, chawpichasqa apikaynintaq utaq uquyaynintaq 0.797 ± 0.002 b.h., Chakiy pacha willakurqa 1320, 700 chaynataq 600 tuyti 50, 60 hinaspa 70°C rupaypi qawakusqanmanhina, rikukurqataqmi wichariynin D_{ef} yakupa chakichisqa pacha, wiñarirqam allinta rupay yapakuptin (p -value < 0.05), tarikurqataqmi tipisqahina chay 1.201×10^{-10} hina 7.496×10^{-10} m²/s, chaymanta puchquynin metabisulfitonisqapa yapakurqa ichaqa manam rikukurqachu munasqamanhina (p -value > 0.05), chaymanta huklawinman E_a , uraykurqa 64.43 a 61.19 kJ/mol chaytaq yapakuykurqa puchqu metabisulfitonisqa yupayninpi 3, 4 hinaspa 5%, chayhinallataq Arrheniusnisqa D_0 uraykurqa 3.241 yupaymanta 1.007 m²/s.chaykama. chuymasqa tukupayman chayakun puchquynin metabisulfitonisqapa manam imananchu utaq atinchu chay D_{ef} , rurasqa E_a . chaypaq kachkaspanpas.

Pisiy rimayllapi riksichiy: awaymantu, coeficientenisqa chay difusividadnisqapi, rupapakuy qallariy.

INTRODUCCIÓN

El secado, es un método ampliamente utilizado en la conservación de productos agrícolas. El contenido de humedad final del producto debe tener un valor tal que éste sea estable durante un tiempo prolongado.

El trabajo estuvo orientado a evaluar características termodinámicas del secado del aguaymanto (*Physalis peruviana L*), como el coeficiente de difusividad efectiva y la energía de activación, parámetros que permiten conocer el comportamiento de un material durante el secado.

La determinación del coeficiente de difusividad efectiva y la energía de activación, se realizará utilizando técnicas de regresión no lineal, para los procesos de secado por convección forzada a 50, 60 y 70°C del aguaymanto tratado con metabisulfito de sodio.

La importancia de proponer un sistema real de ingeniería consiste en representarlo de una manera adecuada, de tal forma de lograr una sustitución del sistema real por uno más adecuado para el tratamiento formal o práctico, esto se logra a través de un modelo matemático, el cual se aplicó para la determinación del coeficiente de difusividad y energía de activación.

Por otra parte, el trabajo comprende el capítulo I, aborda la situación problemática del secado del aguaymanto, el capítulo II considera la revisión bibliográfica de temas sobre el aguaymanto, secado, difusividad, energía de activación; asimismo el capítulo III trata sobre las metodologías empleadas para abordar los objetivos planteados; por otra parte el capítulo IV describe, analiza y discute los resultados encontrados en la experimentación la cual es contrastada con los antecedentes.

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Un aspecto crítico de calidad en los frutos es mantener el color tan posible como sea al del fruto natural, por lo que es importante buscar la combinación adecuada de tiempo, temperatura y velocidad de aire, para minimizar su pérdida ya que esta es la principal característica de calidad de los frutos deshidratados.

El secado es un método de conservación basado en la disminución de la actividad acuosa de los alimentos para prolongar el período de vida útil de estos. Además, reduce el peso y el volumen, lo cual facilita el transporte y el almacenamiento. Este método es muy utilizado en la conservación de productos agrícolas. El contenido de humedad final del producto debe tener un valor tal que éste sea estable durante un tiempo prolongado.

Durante el secado se manifiesta la variación de la humedad del material (intensidad de evaporación) con el tiempo, y esta depende de numerosos factores termodinámicos, entre ella la más importante es la difusividad del agua a través del material, este parámetro permite tener idea del gasto energético puesto que valores altos de difusividad son indicativos de tiempos prolongados de secado, y esto trae como consecuencia no solo el gasto energético sino alteraciones de las propiedades funcionales y nutricionales del alimentos o producto.

Así para considerar la determinación de la difusividad, es necesario tener en cuenta el mecanismo de transferencia de agua y de calor, los cuales están influenciados por las variables de proceso tales como: la temperatura, humedad relativa y la velocidad del aire, asimismo de la geometría y espesor del producto que se pretende secar (Krokida *et al.*, 2003)

Por otra parte el incremento de la temperatura puede disminuir el tiempo de secado, sin embargo podría suceder la excesiva eliminación del agua en el alimento, por lo que este adquiriría comportamiento de fragilidad además de la pérdida completa de los nutrientes y propiedades funcionales, por ese

motivo es imprescindible conocer la energía de activación, como indicador de la máxima energía que puede aplicar durante el secado de un alimento, y así de esta manera el alimento pueda contener una mínima cantidad de agua permisible.

1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

General

- Evaluar el coeficiente de difusividad efectiva y la energía de activación en el secado de aguaymanto (*Physalis peruviana*) tratado con metabisulfito de sodio.

Específicos

- Evaluar el coeficiente de difusividad efectiva durante el secado a 40, 50 y 60°C para el aguaymanto (*Physalis peruviana*) tratado con metabisulfito de sodio.
- Evaluar la energía de activación del secado a 50, 60 y 70°C para el aguaymanto (*Physalis peruviana*) tratado con metabisulfito de sodio.

1.3. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES E INDICADORES

Variables independientes:

- Temperatura: 50°C, 60°C y 70°C.
- Porcentaje de metabisulfito en pretratamiento: 3%, 4% y 5%

Variables dependientes:

- Coeficiente de difusividad efectiva
- Energía de activación

1.4. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

En la Tabla 1, se muestra la operacionalización de variables.

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variables	Dimensión	Indicador	Escal a	Método	Instrumento
Independiente					
Temperatura de secado	Temperatura de secado	Temperatura	°C	Térmico	Termómetro
Porcentaje de metabisulfito	Porcentaje	Porcentaje	%	Aplicación en solución	Balanza
Dependientes					
Coefficiente de difusividad efectiva	Difusividad	Coefficiente de difusividad	m ² /s	Iterativo matemático	Calculo/determinación indirecta
Energía de activación	Energía de activación	Energía de activación	KJ/mol	Iterativo matemático	Calculo/determinación indirecta

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Moreno y Díaz-Moreno (2016), en el trabajo de investigación Cinética del proceso de secado por aire caliente en tomate chonto (*Lycopersicum esculentum*), realizaron el modelamiento del proceso de secado de tomate chonto mediante relaciones empíricas a tres temperaturas (50, 60 y 70°C) y dos velocidades de aire (3 y 4 m/s) con el fin de predecir el comportamiento del proceso, se verificó la influencia de cada una de las variables. Finalmente se halló la difusividad efectiva mediante la segunda ley de Fick adaptada para una lámina infinita. Como resultados, el modelo de Page es el que mayor ajuste tiene con los datos experimentales, obteniendo valores de coeficientes de correlación de 0,99. Adicionalmente se concluyó que el parámetro temperatura influye de manera decisiva en el secado y la velocidad no tiene una influencia significativa en el proceso.

Hernández-Rodríguez et al. (2011), en la investigación titulada estudio de la cinética de secado de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*), se presenta un análisis del proceso de secado del jitomate en rodajas. Para llevar a cabo este estudio, se realizaron pruebas de secado de jitomate en rodajas de 5 mm de espesor, a las temperaturas de 50, 55 y 60°C; con dos velocidades diferentes del medio secante de 1.5 y 2.5 m/s; y utilizando un pretratamiento de escaldado. Los resultados experimentales se han comparado con respecto a los obtenidos a través del modelo analítico de Page, encontrándose en general una buena concordancia entre ambos resultados.

García *et al.*, (2007). Desarrollaron la investigación de la cinética de secado de ciertas hortalizas y aromáticas cultivadas en Misiones - Argentina. Se determinaron las isotermas de adsorción y la cinética de secado de las hortalizas: cebollita de verdeo (*Allium cepa L.*), puerro (*Allium porrum L.*) y pimiento verde (*Capsicum annum L.*), y las plantas aromáticas: orégano (*Origanum mejorana L*) y perejil (*Petroselinum sativus Hoffm*). Se aplicó un modelo denominado «una aproximación a la difusión» presentó mejor ajuste para la cebollita de verdeo, el puerro, y el pimiento verde; y el modelo de Midilli

para el orégano y el perejil. Los tiempos de secado para los materiales estudiados variaron entre 82 y 250 minutos.

Da Rocha *et al.*, (2012). En la investigación Cinética del secado de tomillo, tuvieron como objetivos estudiar la cinética del secado de tomillo con posterior ajuste de diferentes modelos matemáticos a los datos experimentales determinar los valores de la difusividad efectiva y energía de activación. Para el desarrollo del experimento de secado fueran utilizadas las temperaturas 30, 40, 50, 60 y 70 °C. El diseño experimental fue de bloques completamente aleatorizados, con tres repeticiones. Para el ajuste de los modelos matemáticos a los datos experimentales fue realizado el análisis de regresión no lineal, por el método Simplex-Quasi-Newton. Los resultados mostraron que el modelo de Page obtuvo un mejor ajuste a los datos experimentales, los valores de los coeficientes de difusividad efectiva variaron entre $3,69 \times 10^{-12}$ a $1,19 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ y el valor de la energía de activación fue de 77,16 kJ/mol.

Giraldo-Zuniga *et al.*, (2010), en la investigación Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu o copoazu (*Theobroma grandiflorum*), se realizó el secado utilizándose un secador laboratorial de bandejas, a las temperaturas de 50, 60 y 70 °C y a la velocidad del aire de secado de 1,5 m/s. De acuerdo con los datos de la cinética del secado se puede observar que cuanto mayor es la temperatura del secado mayor es la velocidad del secado. El tiempo requerido para secar el producto hasta una humedad del 20%, fueron 9,2, 8,1 y 7,3 horas para las temperaturas de secado de 50, 60 y 70 °C respectivamente. Las curvas experimentales del secado fueron ajustados al modelo difusional de Fick considerándose la muestra como una lámina infinita y al modelo de Page. Los dos modelos se ajustaron bien a los datos experimentales. Los coeficientes de difusión del modelo de Fick variaron de 1.171 a 1.561 m^2/s .

Ferreira y Costa (2009). En la investigación Parámetros de Transferencia de Materia en el Secado de Frutas, desarrollaron un modelo analítico para obtención de parámetros de transferencia de materia en el secado de frutas. El modelo considera la disminución del radio de las frutas durante el proceso de secado. Con el modelo matemático se predice simultáneamente el

coeficiente externo de transferencia de materia k_m y la difusividad de agua en los frutos DAB. Para probar el modelo se obtuvo en forma experimental datos de masa de agua MA en la fruta versus el tiempo de secado t, además del radio inicial R_0 y el radio al final del proceso R_f .

Corzo et al. (2011), en la investigación determinación experimental del coeficiente de difusión del agua durante el secado de láminas de Coroba (*Attalea maripa*), determinaron el coeficiente de difusión efectivo del agua (D_{ef}) en láminas de coroba con 1,86 mm de espesor promedio durante el secado con aire. Las láminas se colocaron en el secador formando una capa delgada y se secaron con aire a temperaturas de 71, 82 y 93 °C y velocidades de 0,82; 1,00 y 1,18 m/s. Se midieron los cambios de peso cada 3 min hasta alcanzar un peso constante y se calcularon los contenidos de agua durante el secado. Se ajustaron los datos a la ecuación de Fick para determinar D_e cuyos valores variaron aproximadamente entre $2,68 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ y $4,53 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. En general, D_e aumentó al incrementar la temperatura y la velocidad del aire. La dependencia con la temperatura siguió la relación de Arrhenius para todas las velocidades del aire. Se encontró que D_e a la velocidad de 1,18 m/s era más sensible a la temperatura ($E_a = 16,64 \text{ kJ/mol}$) mientras que a la velocidad de 1,00 m/s era menos sensible ($E_a = 10,20 \text{ kJ/mol}$). El valor de D_{ef} se correlacionó empíricamente con la temperatura y velocidad del aire.

Díaz (2018), evaluó el efecto de pre-tratamiento y temperatura en la cinética de secado y variación de color en el aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) del ecotipo alargado selección canaán. Se realizó un pre-tratamiento con 3, 4 y 5 % de metabisulfito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) y temperaturas de secado de 50, 60 y 70 °C, evaluando la cinética de secado. Para el análisis estadístico se empleó un diseño experimental de tipo factorial 3^2 , y se aplicó el análisis de varianza ANOVA con un nivel de confianza del 95 %. Se observó que los tiempos empleados durante el secado son: 21.7, 21.3 y 22.0 horas a 50 °C; 15.0, 14.3 y 14.3 horas a 60 °C; 10.0, 9.3 y 9.0 horas a 70 °C demostrándose que a mayores temperaturas y concentraciones de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ los tiempos de secado son menores. Las curvas de velocidad de secado muestran claramente dos periodos, el periodo de velocidad constante y decreciente.

2.2. BASES TEORICAS

2.2.1. Secado

El secado es un procedimiento de conservación, cuyo objetivo es eliminar la totalidad del agua libre de un alimento hasta la monocapa de BET.

La deshidratación de alimentos no es una operación unitaria trivial. Son varios los factores que afectan al rendimiento de un secadero, así como a la calidad del producto durante la operación de secado. Los cambios físicos y químicos del alimento durante una operación de secado pueden potenciar ciertas características deseadas de los productos, pero también puede disminuir la cantidad de nutrientes y cambiar las propiedades organolépticas. Sin embargo, con un adecuado manejo, estas reacciones y cambios físicos pueden asegurar un alimento con un alto contenido en nutrientes y aumentar significativamente su vida comercial (Geankoplis, 1998).

Además de la conservación, el secado que convierte el alimento en un producto seco, se utiliza para reducir el coste o dificultad en el embalaje, manejo, almacenamiento y transporte, pues el secado reduce el peso y a veces el volumen.

Existen diferentes denominaciones de este sistema de conservación: desecación, secado y deshidratación; pueden considerarse sinónimos aunque algunos autores establecen diferencias, únicamente cuantitativas, entre ellos (Toledo, 2007):

- A. **Desecación:** es la eliminación de agua hasta la humedad final, en que el producto esté en equilibrio con el aire de secado. Esta humedad final oscila entre 0.12 y 0.14 kg de agua por kg de producto húmedo. El valor de a_w alcanzado, debe ser lo suficientemente bajo para inhibir el crecimiento microbiano, así como para limitar las reacciones enzimáticas.
- B. **Secado:** es la eliminación de agua de un alimento, con una humedad final mayor al 2.5% de agua (base seca).

C. **Deshidratación:** es cuando se tiene la finalidad de alcanzar una eliminación de agua, no más del 2.5% hasta un nivel próximo al 0% de agua (base seca), sin lograr llegar a este, sino hasta la monocapa.

2.2.2. Fundamentos de Eliminación de Agua.

El secado es descrito como operaciones simultáneas de transferencia de calor y masa (transporte interno). Estas dos operaciones controlan la velocidad de secado de la mayoría de los alimentos. La difusión de la masa (humedad y soluto) y la conductividad térmica, afectan fuertemente la velocidad de secado, y es aquí donde se denota la importancia de la determinación experimental de estos parámetros para cada alimento. En general, ambos, transferencia de masa y calor, son afectados fuertemente por la estructura física del alimento (porosidad), en menor grado por la temperatura y el contenido de humedad. En la interfase (superficie), la transferencia de masa y calor son importantes en las primeras etapas de secado, cuando las condiciones de secado (velocidad del aire, temperatura y humedad) tienen efectos decisivos en la velocidad de secado (Wolti-Chanes *et al.*, 2003).

2.2.3. Parámetros en el secado

A. Humedad relativa

La humedad relativa del aire se define como la razón de la presión de vapor de agua presente en ese momento, con respecto a la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura. Generalmente, se expresa en porcentaje (%), a medida que se incrementa la temperatura del aire aumenta su capacidad de absorción de humedad y viceversa.

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

B. Temperatura del aire

La temperatura del aire desempeña un papel importante en los procesos de secado. En forma general, conforme se incrementa su valor se acelera la eliminación de humedad dentro de los límites posibles. En la práctica de secado, la elección de la temperatura se lleva a cabo tomando en consideración el producto que se vaya a someter al proceso.

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

- Temperatura de bulbo seco: es aquella del ambiente, se mide con instrumentación ordinaria como por ejemplo un termómetro de mercurio.
- Temperatura de bulbo húmedo: es la temperatura de equilibrio que se alcanza cuando la mezcla de aire seco y vapor de agua pasa por un proceso de enfriamiento adiabático hasta llegar a la saturación.

C. Velocidad del aire

La velocidad del aire de secado tiene como funciones principales, en primer lugar, transmitirle energía requerida para calentar el agua contenida en el material facilitando su evaporación, y en segundo lugar, transportar la humedad saliente del material hacia el exterior del secador.

Durante las primeras etapas del secado, la velocidad del aire desempeña un papel muy importante, sobre todo cuando el material contiene un alto contenido de humedad. A mayor velocidad, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y viceversa, si la velocidad del aire disminuye la tasa de evaporación disminuye y el tiempo de secado aumenta.

Por tal razón, para asegurar un secado rápido y uniforme es indispensable tener una buena circulación del aire constante y regular.

En la práctica, la economía del proceso determina la velocidad del aire. Se utiliza velocidades mayores a 3 m/s solo en casos excepcionales (productos con alto contenido de humedad), pero en general, la velocidad se considera

entre 0.2 y 3m/s. En algunos casos, es recomendable utilizar velocidades de secado altas al inicio del proceso de secado, pero a medida que disminuye la humedad se sugiere disminuir la velocidad. Lo anterior es posible si se cuenta con extractores de velocidad variable.

D. Contenido de humedad inicial

El contenido de humedad inicial del producto, es la humedad que tiene el producto al cosecharse y depende del tiempo de cosecha. El contenido de humedad inicial también influye en la tasa de secado. Cuanto más elevado sea el contenido de humedad del producto, mayor será la cantidad de agua evaporada por unidad de energía.

La cantidad de humedad inicial de algún producto puede ser expresada en base húmeda, es decir, la cantidad de agua que tiene el producto en total sobre su peso de materia seca más agua; o en base seca, que es la cantidad de agua que tiene el producto en relación solamente a la cantidad de materia seca; pueden ser expresadas como un porcentaje o decimal. Ambas expresiones pueden representarse de la siguiente forma:

$$h_{bh} = \frac{m_w}{m_w+m_s} = \frac{m_w}{m_t} \quad (\text{Ec. 01})$$

$$h_{bs} = \frac{m_w}{m_s} \quad (\text{Ec. 02})$$

Donde h_{bh} es la humedad en base húmeda, h_{bs} es la humedad en base seca, m_w es la masa de agua, m_s es la masa de producto seco y m_t es la masa total del producto.

E. Contenido de humedad final

El contenido de humedad final del producto, es la humedad que tiene el producto después de secarlo. La humedad final depende del tiempo que se desea almacenar el producto, así como la calidad que se desea obtener en el mismo. Si el producto no tiene la humedad final mínima que se requiere para almacenarlo, se presenta un ambiente favorable para la proliferación de microorganismos.

2.2.4. Transferencia de Calor

El calor necesario para el proceso de secado, puede ser calculado por medio de la Ley de Fourier's. Para materiales homogéneos (Geankoplis, 1998, pag 123-125).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{k}{\rho \cdot C_p} \right) \nabla^2 \quad (\text{Ec. 03})$$

Donde: k : Es la conductividad térmica (kW/(m °K)), ρ : densidad (kg/m³), C_p : Calor específico del material (kJ/(kg°K)), T : temperatura (K), t : tiempo (s)

Los parámetros $k/\rho C_p$ constituyen la difusividad térmica. Para materiales heterogéneos, la conductividad térmica efectiva, es usada dentro de la Ley de Fourier.

2.2.5. Modelos cinéticos en deshidratación de secado de alimentos

La deshidratación de productos alimenticios higroscópicos es rápida y simple, su estudio es complicado por su estructura interna compleja. Muchos estudios se han realizado sobre el fenómeno de transferencia de humedad, para una gran variedad de productos alimenticios y considerando diferentes tipos de cinética. De hecho, la literatura científica en esta área es fértil en modelos cinéticos, mecanísticos, empíricos o una combinación de ambos (Vázquez y Chenlo, 1997).

Debido a la complejidad de los fenómenos de transferencia de materia se han desarrollado una serie de modelos empíricos sencillos para simular la transferencia de agua en sólidos higroscópicos como son los alimentos (Sharaf-Eldeen *et al.*, 1979). La mayoría de estos modelos consideran que el contenido de humedad inicial es uniforme, que el comportamiento de las piezas es isótropo y que la resistencia interna es predominante al transporte del agua.

La forma general de estas relaciones empíricas según propuso Lewis (1921) representa matemáticamente una relación de proporcionalidad directa entre la velocidad de secado y la diferencia de humedad entre el material que se

está secando y la del mismo en condiciones de equilibrio con el aire de secado:

$$\frac{dW}{dt} = -k_c(W - W_e) \quad (\text{Ec. 04})$$

Siendo W la humedad media del sólido en el instante t , W_e la humedad que tendría una vez alcanzado el equilibrio con el aire de secado y k_c un coeficiente cinético del modelo. Integrando se obtiene la siguiente expresión:

$$\phi = \exp(-k_c \cdot t) \quad (\text{Ec. 05})$$

Donde ϕ es la humedad adimensional definida como $(W - W_e)/(W_i - W_e)$ siendo W_i la humedad inicial del sólido. O bien según Jayaraman y Das Gupta (1992) con una constante de ajuste C más:

$$\phi = C \cdot \exp(-k_c \cdot t) \quad (\text{Ec. 06})$$

Ambas expresiones son conocidas como modelo exponencial, en las que k_c es un coeficiente cinético que tiene en cuenta la influencia de la temperatura, pero también incluye el efecto conjunto del tamaño y forma de las partículas, la velocidad del aire, etc.

Posteriormente Henderson y Pabis (1961) relacionaron el valor de k_c con la temperatura mediante una ecuación tipo Arrhenius:

$$k_c = a \cdot \exp(-b/T) \quad (\text{Ec. 07})$$

Donde a y b son constantes del material y T es la temperatura absoluta del producto. Todas estas expresiones sin embargo son incapaces de describir el proceso completo de secado y tienen una validez muy restringida debido a su limitación a tamaños y formas concretas de partículas y condiciones de operación.

2.2.6. Modelos difumíales

Estos modelos están basados en los mecanismos difusionales. En casi todos ellos se emplea como fuerza impulsora el gradiente de humedades de modo

que la ecuación del balance microscópico de materia es común a todos ellos. Esta ecuación, considerando el transporte isotrópico, toma la forma siguiente:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right) \quad (\text{Ec. 08})$$

Por lo general estos modelos se apoyan en una serie de suposiciones que simplifican la complejidad matemática de las ecuaciones diferenciales planteadas.

Entre estas suposiciones se pueden encontrar:

Homogeneidad y geometría de las piezas: Generalmente se considera que el material a nivel macroscópico ese comporta como un cuerpo homogéneo (Crank, 1975). En cuanto a la forma del sólido, solamente tiene soluciones analíticas para geometrías sencillas tales como láminas, cilindros o esferas.

Contracción: Otra suposición bastante frecuente es considerar que la contracción del producto no tiene lugar. Sin embargo, esta simplificación no es siempre asumible dado que los cambios de volumen son importantes en productos con un gran contenido en agua, como es el caso de las frutas y hortalizas. Así, Madarro *et al.*, (1981) demostraron que la variación del volumen de los cubos de zanahoria durante el secado guarda una relación lineal con el contenido en humedad (base seca).

Influencia de la temperatura en los diferentes modelos: La influencia de la temperatura sobre la difusividad se expresa en la gran mayoría de los modelos consultados haciendo uso de la expresión de Arrhenius (ecuación 09), estando dicha influencia caracterizada por una energía de activación (E_a) propia de cada producto (Mulet *et al.*, 1989; Waananen *et al.*, 1993).

$$D_{ef} = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{Ec. 09})$$

Donde D_{ef} y D_0 tienen unidades de m^2/s , E_a kJ/mol, R es la constante de los gases perfectos ($8,314 \cdot 10^{-3}$ kJ/mol K) y T la temperatura (K).

A continuación se van a describir tres modelos que se proponen teniendo como base el difusional (Mulet *et al.*, 1989):

A. Modelo difusional sin contracción y D_{ef} constante.

Este modelo es el más simple, en él se supondrá:

- La transferencia de materia se debe a un fenómeno difusional
- No se consideran los balances de energía en la modelización.
- Las piezas no sufren contracciones durante el secado.
- La difusividad efectiva permanece constante.

Al considerar que la contracción es inapreciable, la difusividad efectiva se calcula fácilmente por el método de separación de variables (Lomauro et al., 1985; Suarez y Viollaz, 1982; Rosselló et al., 1992). También se considera que el producto alcanza muy rápidamente la temperatura de secado, de este modo la transferencia de calor entre el sólido y el aire es muy rápida.

B. Modelo difusional con contracción y D_{ef} constante

En este modelo se mantienen las consideraciones anteriores salvo que se supone que las piezas se contraen durante el secado. Al incluir la contracción, el problema se complica con lo que la solución solamente es posible mediante técnicas numéricas, como el método de diferencias finitas (Balaban y Pigott, 1988; Mulet *et al.*, 1989).

C. Modelo difusional con contracción y D_{ef} en función de las propiedades estructurales

Este modelo es más complejo, la transferencia de calor y de materia se tienen en cuenta, así como también se tiene en cuenta que la difusividad varía en función de la temperatura y humedad del producto. De este modo el modelo difusional va variando con el tiempo y la posición (Mulet *et al.*, 1989). En este modelo la resolución se lleva a cabo también utilizando técnicas como diferencias finitas.

2.2.7. Transferencia de masa

La transferencia de masa dentro del proceso de secado, está basado en la evaporación de agua, ubicada solamente en la superficie. Se usa un coeficiente de transferencia de masa, el cuál es análogo a la convección en la

transferencia de calor. El flujo de masa se da por la diferencia de presión de vapor en la superficie del alimento, y la presión de vapor en el aire que rodea la superficie. El agua del interior se difunde hacia la capa superficial y de ahí hacia el aire caliente. Una vez finalizado esto, la difusión es similar a la conducción (Geankoplis, 1998).

La transferencia de humedad en un medio heterogéneo, puede ser convenientemente analizado usando la Ley de Fick de materiales homogéneos, en el cual la heterogeneidad de los alimentos es compensado por el uso del Coeficiente de Difusividad efectiva.

La difusión de la humedad en sólidos durante el secado, es un proceso complejo, que puede envolver varios mecanismos, tales como difusión molecular, flujo capilar, flujo de Knudsen, flujo hidrodinámico o difusión superficial. Si se combina todos estos estudios en uno, la difusión efectiva, puede ser definida desde la segunda Ley de Fick, como se denota en la siguiente ecuación (10), la cual nos muestra el cambio de distribución la humedad del material, que describe el movimiento de humedad en el alimento a medida que transcurre el, proceso de secado.

$$\frac{\partial y}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

D_{ef} , es la difusividad efectiva (m^2/s)

X , Es la humedad del alimento ($\text{kg agua}/\text{Kg s.s.}$)

T , tiempo (s)

X , es la longitud característica (m)

2.2.8. Coeficiente de difusividad efectiva

Conocer el coeficiente de difusión del agua o difusividad efectiva es importante para analizar o modelizar un sistema (Ruiz-Cabrera *et al.*, 2004). Uno de los pioneros en la determinación de la difusividad del agua en productos cárnicos fue Radford (1975). Este autor evaluó el efecto de la temperatura en la difusividad del agua en muestras de magro de oveja por absorción con agua tritiada. La difusión es un fenómeno muy complejo debido

tanto a la multitud de compuestos químicos que forman los alimentos como a su complicada estructura.

Por ello son necesarios datos fiables de propiedades de transferencia de materia en alimentos que permitan diseñar y controlar los procesos industriales en los que tenga lugar dicho fenómeno (Mittal, 1999).

Normalmente, se asume que el coeficiente de difusividad efectiva es el mismo en todas las direcciones, ya que al modelizarse la operación de secado se suele considerar que el producto es isótropo. Sin embargo existen trabajos en los que se ha estudiado el efecto de la anisotropía en los valores de difusividad efectiva (Gisbert, 2001)

2.2.9. Determinación de la difusividad efectiva

La determinación de la difusividad en productos sólidos o semisólidos es esencial para cuantificar analizar y controlar las operaciones de transferencia de materia que tienen lugar en la industria agroalimentaria, como por ejemplo secado, absorción, extracción, separación con membranas etc. Es especialmente importante la difusividad de agua en alimentos ya que el agua, tanto en forma líquida como en forma de vapor está involucrada en multitud de operaciones de procesado de alimentos, así como en las reacciones que pueden sufrir los alimentos durante su envasado y almacenamiento (Saravacos y Maroulis, 2001). No existe un método standard para determinarla experimentalmente, aunque generalmente suele utilizarse uno de los siguientes métodos: cinéticas de sorción, medidas de permeabilidad o análisis de cinéticas de deshidratación (Mittal, 1999).

Otros métodos que pueden ser utilizados son las curvas distancia-concentración (Marinos-Kouris y Maroulis, 1995) o la resonancia magnética nuclear (RuizCabrera, 2004). Como norma general, el método de medida debe estar relacionado con el proceso para el que se determina el valor de difusividad. Por ejemplo, los métodos basados en las cinéticas de deshidratación deben utilizarse cuando el valor de la difusividad se precise en aplicaciones de secado y las cinéticas de sorción se utilizarán en el caso de aplicaciones relacionadas con la adsorción de humedad durante el almacenamiento de alimentos (Saravacos y Maroulis, 2001).

2.2.10. Factores que afectan a la difusividad efectiva

Dado que la difusividad efectiva es una propiedad de transporte influenciada por la temperatura, frecuentemente se considera constante durante el procesado a una misma temperatura, aunque también existen otros factores que pueden influir en mayor o menor medida en ella, tales como el contenido en sal o la humedad de las muestras.

Contenido en sal

El contenido en sal puede afectar a la transferencia de agua debido a dos mecanismos diferentes. Por un lado tiene un efecto sobre las proteínas y por lo tanto sobre su capacidad de retención de agua. Por otro, al aumentar la cantidad de sólidos disueltos se afecta a la actividad de agua.

Así, Palmia et al. (1993) observaron que la difusividad efectiva disminuía al aumentar el contenido en salen alimentos, observándose mayores efectos a elevadas temperaturas y bajo contenido en humedad. Comaposada (1999) encontró una relación exponencial entre el contenido en sal y la difusividad efectiva, de manera que al aumentar el contenido en sal, se observó una disminución de los valores de difusividad efectiva.

Temperatura

La influencia de la temperatura en la difusividad efectiva tiene su origen en la mayor movilidad (energía cinética) de las moléculas de agua que se origina al aumentar la temperatura. Así, un aumento de la temperatura provoca una mayor movilidad de las moléculas de agua, con lo cual la difusividad efectiva aumenta o lo que es lo mismo, disminuye la resistencia interna a la transferencia de materia.

Saravacos y Maroulis (2001) recopilaron valores de difusividad efectiva para distintos alimentos en función de la temperatura. En la Figura 01, se muestran los valores obtenidos por estos autores para los distintos alimentos estudiados.

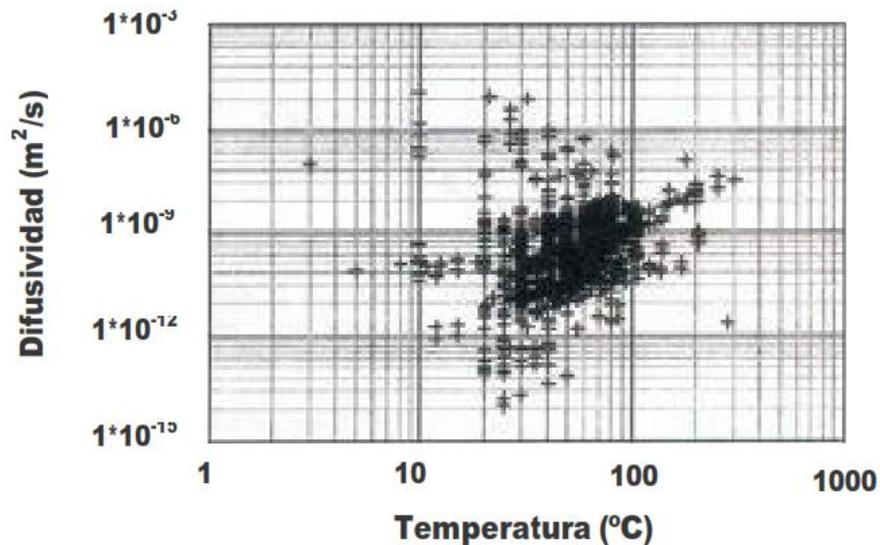


Figura 1. Difusividad efectiva para varios alimentos a distintas temperaturas (Saravacos y Maroulis, 2001).

Contenido en humedad

Puesto que la difusividad efectiva es una propiedad de transporte, el contenido en humedad no debería influir en la misma. Sin embargo, dado que cambia la microestructura del alimento durante la deshidratación, en algunos casos esto da lugar a que se observen cambios en la difusividad efectiva. La dependencia de la difusividad efectiva del contenido en humedad se puede tener en cuenta bien considerando la energía de activación o el factor preexponencial D_0 como una función empírica dependiente de la temperatura y/o de la humedad.

También pueden utilizarse otras ecuaciones empíricas no basadas en la ecuación de Arrhenius.

2.2.11. Energía de activación

La energía de activación se puede determinar a partir de la representación gráfica del $\ln(D)$ frente a $(1/T)$. Es la mínima energía necesaria que debe poseer el agua para poder ser eliminada durante el proceso de secado. Representa una barrera energética que debe ser sobrepasada para que el proceso tenga lugar (Saravacos y Maroulis, 2001).

Así, cuanto mayor sea el valor de energía de activación en un alimento, mayor será la dificultad del mismo para deshidratarse.

Además, tal y como puede comprobarse en la Figura 01., se observara una tendencia de aumento general en los valores de difusividad efectiva al aumentar la temperatura. El efecto de la temperatura en la difusividad efectiva de los alimentos ha sido ampliamente descrito en la bibliografía mediante la ecuación de Arrhenius (Ecuación 09).

2.2.12. Modelización de la difusión considerando contracción

Aunque al secar se produce contracción, muchos de los modelos que se proponen en la bibliografía para predecir la distribución de temperatura y humedad durante el secado no la tienen en cuenta. Además, suelen despreciarse también los cambios en las características físicas y propiedades térmicas. Estas simplificaciones se realizan generalmente para obtener modelos más sencillos y fáciles de resolver. Además, cuando la contracción es considerada normalmente se supone que ésta es perfectamente homogénea, es decir, se considera una contracción media del producto (Ruiz-Cabrera *et al.*, 2004), aunque en la bibliografía se encuentran trabajos en los que se pone de manifiesto que esta hipótesis no es cierta, incluso en alimentos de estructura homogénea. Por ejemplo, durante el secado de cubos, paralelepípedos y cilindros de patata Mulet et al. (2000) observaron que la contracción variaba según la forma de las partículas y según la dirección, constatando que la dirección mayor encogía menos que la menor. No obstante y dada la complejidad del fenómeno resulta necesario realizar una serie de simplificaciones, con el fin de poderlo incluir en los modelos de deshidratación.

2.2.13. Métodos de resolución de los modelos de secado

Una vez planteado el modelo matemático que describa la realidad experimental, se procederá a su resolución. Tal y como se ha visto hasta ahora, al modelizar la operación de secado se pueden o no realizar una serie de simplificaciones. El tener o no en cuenta ciertos aspectos tales como la contracción y/o la resistencia externa a la transferencia de materia, condiciona qué métodos pueden ser utilizados para resolver los modelos y cuáles no. Los métodos que pueden ser utilizados son analíticos o numéricos, en función de las características de los modelos a resolver. En Tecnología de Alimentos, el

método analítico más utilizado es el método de separación de variables (Frías et al., 2003). Dentro de los métodos numéricos que se usan para la resolución de modelos que no permiten la obtención de una solución analítica, se encuentran el método de las diferencias finitas (Viollaz y Rovedo, 2002) y el método de los elementos finitos (Wang y Sun, 2002).

2.2.14. Modelado

Modelar es la acción de construir un modelo, de encorsetar la realidad, como se muestra en la Figura 02 (Ramos *at al.*, 2010), el modelado es una herramienta muy útil para averiguar rápidamente el efecto de los parámetros en un sistema de procesos sobre el resultado de este mismo. Es así que minimiza el número de experimentos que necesitan ser transmitidos para determinar la influencia de parámetros diversos sobre un proceso (Jun y Irudayaraj, 2009).

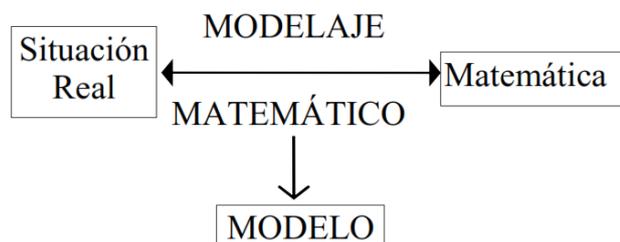


Figura 2. Esquema de proceso (Biembengut y Hein, 1995)

Los sistemas a resolver durante la tarea de modelado son muy diversos. Por ejemplo, todo problema de diseño se caracteriza, entre muchos aspectos, por la necesidad de seleccionar una opción óptima (estructura a diseñar, por ejemplo, un edificio, un proceso, un circuito electrónico, etc.) de entre el número (generalmente enorme en problemas reales) de alternativas posibles. Esto implica, por un lado, la necesidad de dominar métodos matemáticos para optimizar una función objetivo, por lo general fuertemente no lineal, con restricciones de todo tipo (desigualdades e igualdades, generalmente no lineales), con variables continuas (reales) o discontinuas (enteras), y por supuesto de muy elevada dimensión. Por otra parte, será necesario comprender conceptualmente algunos de los métodos formales, para generar

las alternativas estructurales posibles para un diseño dado y seleccionar una de acuerdo con ciertos criterios de óptimo impuestos por el diseñador (Scena, 1999)

2.2.15. Modelo matemático

El modelo es un esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento. Un modelo es, en definitiva, una herramienta de ayuda a la toma de decisiones. Por esta razón, sus resultados deben ser inteligibles y útiles (Ramos *at al.*, 2010)

Existen diferentes métodos aproximados para solucionar problemas de modelado de procesos, los cuales son descritos por ecuaciones matemáticas algunas incluyen derivadas parciales por las razones del proceso; la falta de disponibilidad de soluciones analíticas a las correlaciones o ecuaciones empíricas, hace que se requieran de datos experimentales sobre todo para propósitos de diseño, así estos modelos o ecuaciones, presentan simplicidad de solución, facilidad para determinar rápidamente un paramétrico,

Hay tres categorías principales en las cuales modelado matemático puede describirse: un método diferencial, método integral, y método estocástico. (Jun y Irudayaraj, 2009)

La solución de una ecuación no lineal o de una función trascendente, como método, supone la búsqueda de un valor tal que satisfaga la ecuación o función en cuestión. (Scenna, 1999), lo cual implica la optimización de tal solución.

Los métodos analíticos imponen demasiadas restricciones a las funciones objetivos. Además, no siempre es posible resolver el sistema de ecuaciones analíticamente. Por este motivo se desarrollaron los métodos numéricos.

Se han utilizado diversos modelos matemáticos para describir la cinética de secado de productos agrícolas. Estos modelos son utilizados para estimar el tiempo de secado de los diferentes productos en relación con las curvas de secado. Existen tres tipos de modelos de secado usados para describir la

cinética de secado en capa fina de productos agrícolas. El modelo teórico, que solo considera la resistencia interna, la transferencia de calor y el agua entre el producto y el aire caliente, los modelos semiteóricos y los empíricos, que presentan una relación directa entre la humedad del producto y el tiempo de secado (Midilli *et al.*, 2002).

Entre los modelos semiteóricos tenemos los modelos de Page, Page modificado, Henderson y Pabis, Logarítmico, Aproximación a la difusión, Dos términos y Exponencial de dos términos, que se utilizan para la cinética del secado de productos agrícolas (Corrêa *et al.*, 2007)

Los modelos empíricos no forman una perspectiva de los importantes procesos que suceden durante el secado, aunque en algunos casos pueden de

scribir las curvas de secado para determinadas condiciones experimentales (Keey, 1972). Entre estos modelos, el que más ha sido utilizado en estudios de cinética de secado de productos agrícolas es el modelo propuesto por Thompson.

2.2.16. Ajuste de modelos

En general, los métodos de ajuste de mayor orden de convergencia llegan a la solución en un número menor de iteraciones.

Los métodos iterativos hallan la solución exacta (si eso ocurre) sólo en un número infinito de iteraciones. En la práctica, las iteraciones se detienen cuando el error es menor que una adecuada tolerancia, impuesta por el usuario. El valor exacto del error no puede usarse como criterio de terminación, porque normalmente no se conoce. (Scenna, 1999). En este caso, además del orden interviene el costo computacional por iteración que es importantísimo para definir la eficiencia de un método.

Método de Newton

Encuentra la raíz de la derivada de la función objetivo. Para ello, utiliza el método numérico para encontrar raíces de Newton. En este caso en particular, la ecuación de interacción es:

$$x_{k+1} = x_k + \frac{f(x_k)}{f'(x_{k+1})} \quad (\text{Ec. 11})$$

Se debe verificar continuamente si realmente el nuevo punto es mejor que el anterior. La desventaja de este método es que converge lentamente cuando la derivada segunda tiende a cero. Además, necesita conocer la derivada primera y la derivada segunda (Tarifa, 2000).

Métodos Quasi-Newton

Tarifa (2000), estos métodos imitan el método de Newton pero calculan numéricamente las derivadas.

En este caso se utilizan diferencias centrales para estimar las variables, pero también es posible utilizar diferencias hacia adelante $([f(x+h)-f(x)]/h)$ o hacia atrás $([f(x)-f(x-h)]/h)$.

La única desventaja de este método es que requiere más evaluaciones de la función objetivo que el anterior.

ETAPAS PARA MODELAR

Las etapas que componen el modelado son las siguientes (Ramos *et al.*, 2010).

IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Consiste en la recolección y análisis de la información relevante para el problema (datos). Esta etapa es fundamental para que las soluciones proporcionadas y las conclusiones obtenidas sean útiles, las decisiones adoptadas sean correctas. Los datos suelen ser vitales para conseguir un realismo o aplicabilidad en las soluciones. A menudo representan el cuello de botella del proceso de modelado.

ESPECIFICACIÓN MATEMÁTICA Y FORMULACIÓN

Escritura y/o aplicación matemática del problema de modelación, definiendo sus variables, sus ecuaciones, su función objetivo, sus parámetros. En esta etapa se analiza el tamaño del problema, la estructura de la matriz de restricciones, su tipo (LP, NLP). Es una etapa de creación donde se debe prestar especial atención a la precisión en la formulación, a la escritura o utilización de las ecuaciones que describen el problema o fenómeno.

RESOLUCIÓN

Se trata de implantar un algoritmo de obtención de la solución numérica (muy próxima a la matemática) óptima o cuasióptima. El algoritmo puede ser de propósito general (método simplex, Quasi-Newton u otros) o específico. Puede haber diferentes métodos de solución de un problema o diferentes implantaciones de un mismo método. El tiempo de resolución de un problema también puede depender drásticamente de cómo esté formulado.

2.2.17. Aguaymanto

Es una baya jugosa en forma de globo u ovoide (Figura 03) que contiene unas 100 a 300 semillas. Su estructura interna es similar a la de un tomate en miniatura (AMPEX, 2008).

Pertenece a la familia de las *Solanáceas* y al género *Physalis*. Cuenta con más de ochenta variedades que se encuentran en estado silvestre y que se caracterizan porque sus frutos están encerrados dentro de un cáliz o capacho (Velezmoro, 2004).

El fruto mide entre 1,25 y 2,5 cm de diámetro, de forma redonda, que varía del color amarillo a naranja, de sabor agridulce y pequeña con un peso que puede oscilar entre 4 y 10 g, tiene buenos contenidos de vitamina A y C, además de hierro y fósforo (AREX, 2008).



Figura 3. Fruto de aguaymanto (*Physalis peruviana* L) en el cáliz abierto. (AMPEX, 2008).

Clasificación taxonómica

La clasificación botánica del fruto *Physalis peruviana* L. se encuentra bien definida, según el Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, también llamado Museo de Historia Natural de Lima o Museo de Historia Natural citado por Aparcana y Villarreal (2014), menciona que la taxonomía del fruto *Physalis peruviana* L.:

Reino	:Plantae
División	:Magnoliophyta
Clase	:Magnoliopsida
Subclase	:Asteridae
Orden	:Scrophulariales
Familia	:Solanaceae
Género	:Physalis
Especie	:peruviana L.
Nombre común	:Aguaymanto

Composición fisicoquímica

Numerosas investigaciones reportan la caracterización fisicoquímica de (*Physalis Peruviana* L). “Aguaymanto” (Tabla 2), las cuales coinciden en valores aproximados en parámetros como sólidos solubles (°Brix), con contenidos que van entre 12,5 y 14,3; el porcentaje de acidez expresado como % de ácido cítrico oscila entre 2 y 2,4. En los frutos maduros el pH y los °Brix decrecen, lo que lleva a un aumento de la acidez de un 2,0 a 2,1% (Puente *et al.*, 2011).

Tabla 2. Composición química del aguaymanto

Parámetro fisicoquímico	Mendoza <i>et al.</i> , (2012)	Martín <i>et al.</i> , (2010)	Márquez <i>et al.</i> , (2009)	Restrepo <i>et al.</i> , (2009)
Actividad del agua	0,998	0,998	----	----
Acidez (%)	2.0	2.05	2.40	2.10
°Brix	13	14.3	12.5	13.8
Densidad (Kg/m ³)	1.1031	1.0380	---	---
pH	3.72	3.39	3.56	3.39

Fuente: Puente *et al.*, (2011).

Calidad del fruto de aguaymanto

De acuerdo al tamaño de los frutos y grado de madurez, la norma técnica peruana de frutas andinas, aguaymanto fresco (NTP 203.121:2007), establece la siguiente clasificación según se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación según tamaño

Diámetro (mm)	Calibre
> 22,1	A
20,1 – 22,0	B
18,1 – 20,0	C
15,1 – 18,0	D
< 15,0	E

Fuente: NTP (2007)

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

El desarrollo de la parte experimental se llevó a cabo en el laboratorio de Química de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNAJMA, y el análisis de datos y determinación de las variables de salida se realizaron en el Centro de Computo de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNAJMA.

3.2. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño de investigación para el secado y posterior determinación del coeficiente de difusividad de los frutos de aguaymanto, será del tipo DBCA (diseño bloques completamente al azar), debido a que se manipulara dos variables, la matriz de diseño se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Matriz de diseño para el secado de frutos de aguaymanto

Tratamiento	Variable de entrada		Variable de respuesta o salida	
	Temperatura (°C)	Porcentaje de metabisulfito de sodio (%)	Coeficiente de difusividad efectiva	Energía de activación
01	T1 (50)	M1 (3.0)	DEF1	EA1
02	T2 (60)	M1 (3.0)	DEF2	EA2
03	T3 (70)	M1 (3.0)	DEF3	EA3
04	T1 (50)	M2 (4.0)	DEF4	EA4
05	T2 (60)	M2 (4.0)	DEF5	EA5
06	T3 (70)	M2 (4.0)	DEF6	EA6
07	T1 (50)	M3 (5.0)	DEF7	EA7
09	T2 (60)	M3 (5.0)	DEF8	EA8
09	T3 (70)	M3 (5.0)	DEF9	EA9

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1. Población

El universo y/o población se refirió al material genético es decir a los frutos de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) del ecotipo alargado selección Canaán procedentes de la Estación Experimental Agraria INIA ubicado en Chumbibamba, Talavera, Andahuaylas, Apurímac, con coordenadas latitud 66°65'19.23''E, longitud 84°91'097.14''S a 2860 m.s.n.m de altura y temperatura media de 18 a 22 °C. Los frutos de aguaymanto fueron cosechados en el mes de diciembre en su estado de madurez comercial.

3.3.2. Selección de la muestra

Se consideró una muestra a 10 kg de frutos frescos de aguaymanto teniendo en cuenta los aspectos de madurez, tamaño, color, sin magulladuras ni golpes, sin presentación de mohos, esta cantidad se atribuye a que los frutos presentan alta humedad, lo que hace que disminuya su cantidad; por otra parte los frutos provinieron de los terrenos de cultivo de INIA – Andahuaylas

3.3.3. Tamaño de muestra

El tamaño de muestra estuvo referido a 50 g de frutos de aguaymanto, las cuales fueron por conveniencia considerando frutos maduros, sin golpes ni magulladuras. Estas se acondicionaran en bandejas de acero inoxidable.

3.3.4. Unidad de análisis

La unidad de análisis estuvo referida a los datos obtenidos durante el proceso de secado tales como humedad de equilibrio, humedad en base seca a las temperaturas de estudio.

3.4. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Aplicada

Debido a que se evaluará el coeficiente de difusividad efectiva y la energía de activación de los frutos de aguaymanto, cultivados en los terrenos de la INIA – Andahuaylas, para lo cual será necesario la aplicación de conceptos teóricos y científicos pertinentes al tema y a la ingeniería agroindustrial.

Explicativa

Debido a que se explicara los resultados encontrados del coeficiente de difusividad efectiva y la energía de activación de los frutos de aguaymanto, en comparación a los antecedentes y conceptos tecnológicos y científicos.

Experimental

Debido a que se manipularan variables de estudio: Temperatura de secado y porcentaje de aplicación del metabisulfito de sodio, a quienes se les denominará factores o fuentes de variabilidad. Asimismo se considera experimental debido a que se aleatorizo los experimentos o tratamientos a fin de obtener muestras representativas, esto se representará a través de una matriz de diseño experimental.

3.5. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS

3.5.1. Acondicionamiento de las muestras

A los frutos de aguaymanto, se les quitó el cáliz, y enseguida se realizó un lavado con una solución de hipoclorito de sodio de 5 ppm sumergiéndolo de manera que cubra todo el fruto, y luego se enjuagará con abundante agua fresca.

Enseguida se eliminó el agua residual de lavado utilizando paños absorbentes, y se dejó esparcido en una bandeja de acero inoxidable durante 30 minutos a fin de permitir la eliminación total del agua de lavado.

3.5.2. Tratamiento con metabisulfito de sodio

Se prepararon soluciones de metabisulfito de sodio al 3, 4 y 5%. Los frutos acondicionados serán colocados en las soluciones en una relación 2 solución/1 fruto, por un espacio de 30 minutos a la temperatura ambiental.

Luego se colocaron en recipientes de acero inoxidable, las cuales fueron inmediatamente llevadas al secador de bandejas a la temperatura correspondiente.

3.5.3. Determinación de humedad inicial

El contenido de humedad se determinó a través de la pérdida de peso por desecación en estufa, metodología desarrollada por Della (2010). Durante 2 h se las seca a 70 °C y luego a 104 °C por 72 h más. En un principio el secado se realiza a menor temperatura para evitar la pérdida abrupta de agua y la pérdida de material.

3.5.4. Operación de secado

La metodología fue propuesta por Carranza (2011), en la que 50 g de frutos frescos de aguaymanto previamente acondicionadas, fueron colocadas en una bandeja de acero inoxidable, llenando por completo la base del recipiente, de tal manera que sólo quede expuesta a la corriente de aire de secado la superficie superior de la materia prima. La pérdida en peso de humedad durante el secado se determinó retirando y pesando una muestra de la bandeja en una balanza analítica, tal como se muestra en la Figura 4.

El pesado de cada muestra se realizó cada 20 minutos hasta que el peso de las muestras no varié (peso constante). El secado se realizó a las temperaturas de 50, 60 y 70°C, con cinco repeticiones para cada caso.

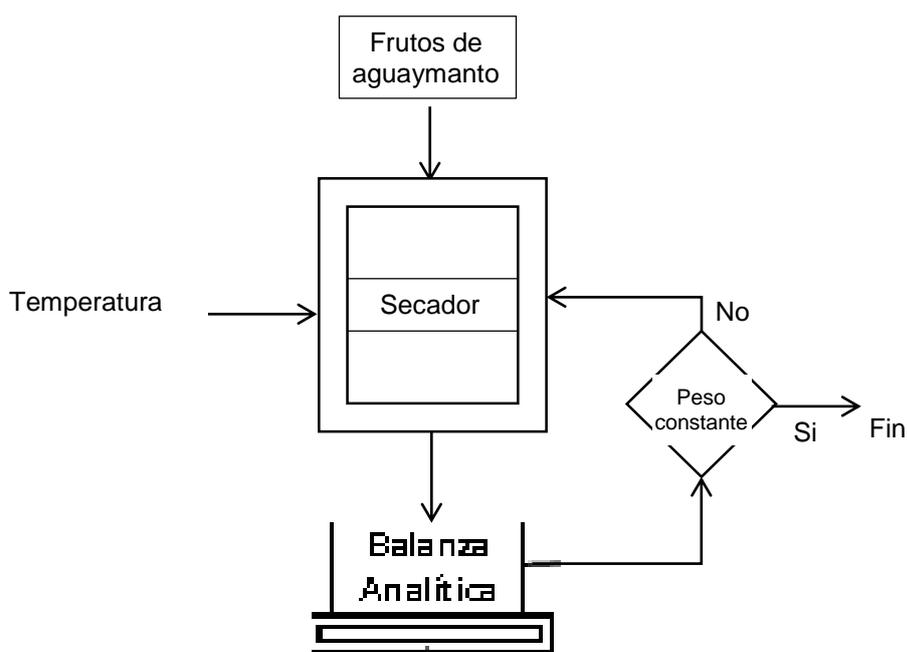


Figura 4 Esquema de la operación de secado (Carranza, 2001)

3.6. MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y ANÁLISIS

3.6.1. Determinación de coeficiente de difusividad efectiva

Se seguirá la metodología propuesta por Arends y Gutiérrez (2008), se construirán curvas de secado graficando la razón de humedad (RX) de los frutos de aguaymanto en función del tiempo (ecuación 12), para cada temperatura de secado.

$$RX_{exp} = \frac{X_t - X_{e,mod}}{X_0 - X_{e,mod}} \quad (\text{Ec. 12})$$

Dónde:

RX_{exp} , razón de humedad experimental, adimensional

X_t , contenido de agua del producto en el tiempo t , en b.s

X_0 , contenido de agua inicial del producto, en b.s

$X_{e,mod}$, contenido de agua en el equilibrio, en b.s.

En contenido de humedad en el tiempo t (X_t), se determinara de acuerdo a la ecuación (13).

$$x_t = \frac{m_t - m_s}{m_s} \quad (\text{Ec. 13})$$

m_t = masa de la muestra en el tiempo t en g , durante el secado, y

m_s = masa de la muestra seca, (g).

Los valores de RX_{exp} , para cada tratamiento de secado serán ajustados a la solución integrada de la segunda ley de Fick a tiempos largos, considerando una esfera (ecuación 14), y asumiendo que:

(1) el contenido de humedad inicial es uniforme en los frutos de aguaymanto.

(2) la geometría de los frutos de aguaymanto permanece constante durante el proceso de secado (Crank, 1975).

$$RX = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[\frac{-D_{ef} n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{r^2} \right] \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde RX la fuerza impulsora reducida se calculara en función del contenido de humedad (b.s.) de la muestra a tiempo t (W_t), a $t = 0$ (W_0) y en el equilibrio

(W_e), D_{ef} es el coeficiente de difusión aparente del agua (m^2/s) y r es el radio del fruto de aguaymanto fresco (m).

Para determinar el coeficiente de difusión aparente del agua se utilizarán cinco términos de la ecuación (14). El valor D_{ef} se obtendrá mediante un ajuste no lineal de los datos experimentales (SOLVER de Excel), minimizando la suma de cuadrados residuales entre el contenido de humedad experimental y predicho.

Al mismo tiempo se determinó el Error Medio Relativo, a través de la (ecuación 15).

$$EMR = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - Y_0|}{Y} \quad (\text{Ec. 15})$$

Dónde:

n , número de observaciones

Y , valor observado experimental

Y_0 , valor estimado por el modelo

3.6.2. Determinación de la energía de activación

Para determinar la energía de activación E_a (kJ/mol), se utilizará la ecuación de Arrhenius (ecuación 16) para conocer la influencia de la temperatura T (K) en la difusividad del agua, siendo D_0 una constante (m^2/s), y R es la constante universal de los gases.

$$D_{ef} = D_0 \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{Ec. 16})$$

3.7. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Para el análisis estadístico de los datos de las respuestas se utilizó un diseño de bloques completamente aleatorizado DBCA, considerando uno de los factores de variabilidad la temperatura de aire de secado y el porcentaje de aplicación de metabisulfito de sodio, teniendo como respuesta el coeficiente de difusividad efectiva y la energía de activación.

Se aplicarán los siguientes análisis estadísticos:

3.7.1. Análisis de varianza

Se aplicó un ANOVA de dos factores: temperatura de secado y porcentaje de aplicación de metabisulfito de sodio.

El planteamiento de hipótesis estadística para el ANOVA fue:

Hipótesis nula –H₀: La media de los valores del coeficiente de difusividad efectiva no muestran diferencia significativa.

$$\bar{x}_i = \bar{x}_j$$

Hipótesis alterna –H_A: La media de los valores del coeficiente de difusividad efectiva muestran diferencia significativa.

$$\bar{x}_i \neq \bar{x}_j, \text{ para algún } i, j.$$

Nivel de significancia (α)

Para el caso de comparaciones de tratamientos habitualmente se emplea $\alpha = 0.05$ (Gutiérrez y de la Vara, 2004).

Criterio para la prueba de hipótesis

Se rechaza H₀ si $\alpha > p\text{-value}$

Para la evaluación tanto del ANOVA y prueba HSD, se utilizó la hoja de cálculo Excel 2010 y Statistica 8.0.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERÍSTICAS DEL FRUTO DE AGUAYMANTO

Las características de importancia para el presente estudio fueron la humedad y el diámetro, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5, de ella se observa que la humedad fue 0.7968 ± 0.0020 en base húmeda, mientras que en base seca esta fue de 3.9216 ± 0.0479 , estos valores son característicos para este fruto (Repo 2018; Floréz et al., 2000), en tanto que el diámetro fue 1.75 ± 0.03 cm siendo característico para este fruto, los cuales oscilan entre 1,25 y 2,5 cm (Tapia y Fries, 2007; Herrera, 2000).

Tabla 5. Características del fruto de aguaymanto

Características	\bar{x}	$\pm s$
Humedad b.h.	0.7968	± 0.0020
Humedad b.s.	3.9216	± 0.0479
Diámetro (cm)	1.75	± 0.03

Donde: \bar{x} , es la media, s es la desviación estándar, los datos se encuentran en el Anexo 5.

4.2. EVALUACIÓN DE LA CURVAS DE SECADO

El aguaymanto sometido a secado reporto diferentes tiempos hasta conseguir la humedad de equilibrio, es así que para la menor temperatura de secado (50°C) se reportó un tiempo de 1320 min para cualquier tratamiento con metabisulfito de sodio, y que esta disminuye a 700 min a 60° , y hasta 600 min a 70°C , tal como se aprecia en la tabla 6, similares tiempos de secado reporto Morante (2017); por otra parte se observa que la humedad de equilibrio disminuye conforme se incrementa la temperatura así como el tiempo de secado, llegando hasta humedades de 0.2594 en b.s.

Tabla 6. Valores finales de secado para los tratamientos

T (°C)	Na ₂ S ₂ O ₅ (%)	t (min)	Humedad de equilibrio (%)
50	3	1320	37.6
60	3	700	48.9
70	3	600	25.9
50	4	1320	37.5
60	4	700	48.7
70	4	600	25.9
50	5	1320	37.2
60	5	700	48.6
70	5	600	26.2

Datos completos en Anexo 1

Por otra parte al realizar el estudio ANOVA bifactorial mostrado en la Tabla 7, se observó que la temperatura de secado tuvo efecto significativo (p-value

= 0.00) en la humedad final del aguaymanto, es así que a medida que se incrementa la temperatura la humedad disminuye considerablemente, aunque existe un ligero incremento la temperatura de 60°C, tal como se aprecia en la Figura 5, por otra parte el porcentaje de metabisulfito de sodio para cada tratamiento no muestra efecto significativo sobre la humedad de secado (p-value > 0.05, Tabla 7), es decir cualquier incremento de metabisulfito reportará similar humedad, este hecho se puede observar en la Figura 5.

Asimismo se observó que la temperatura de secado muestra efecto significativo sobre el tiempo de secado (p-value < 0.05), es decir disminuyendo considerablemente con el incremento de la temperatura tal como se aprecia en la Figura 6, mientras que la adición de metabisulfito de sodio no presentan ningún efecto significativo sobre el tiempo de secado, en la Figura 6 se parecía que esta relación es lineal lo cual es indicativo que no existe cambio alguno.

Tabla 7. ANOVA para humedad final

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Fcal	p-value
T	2	0.077405	0.038703	11897	0.000
%	2	0.000001	0.000001	0.21	0.822
Error	4	0.000013	0.000003		
Total	8	0.077419			

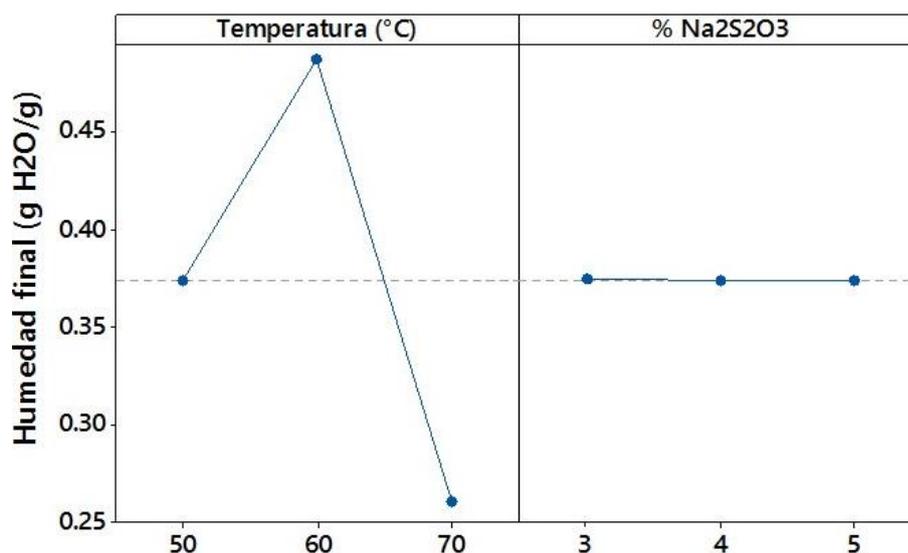


Figura 5. Diagrama de efectos para la humedad

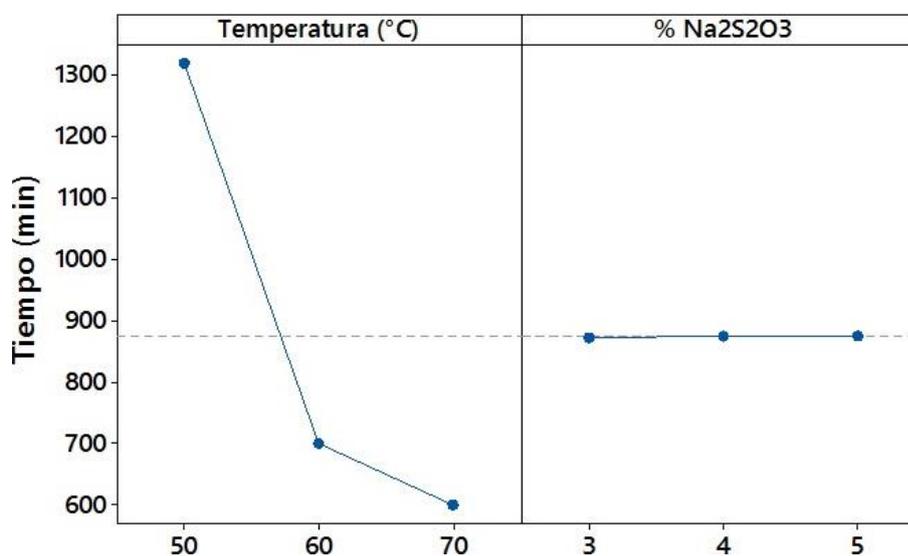


Figura 6. Diagrama de efectos para el tiempo

En la Figura 7, se presentan las curvas de secado a 50°C para el aguaymanto tratado con metabisulfito de sodio al 3%, 4% y 5%, en ella se observa que las curvas coinciden casi por completo a lo largo del tiempo de secado, es así que

la dosis de metabisulfito de sodio no presento efecto significativo ($p\text{-value} < 0.05$) a esta temperatura de secado, no obstante se aprecia que existe perdida de humedad rápida hasta aproximadamente los 400 min, enseguida sucede un disminución lenta hasta 800 min, para luego pasar a una etapa de perdida mínima de agua hasta alcanzar la humedad final o de equilibrio la cual fue 37.6, 37.5 y 37.2 en b.s. al 3%, 4% y 5% de metabisulfito de sodio respectivamente.

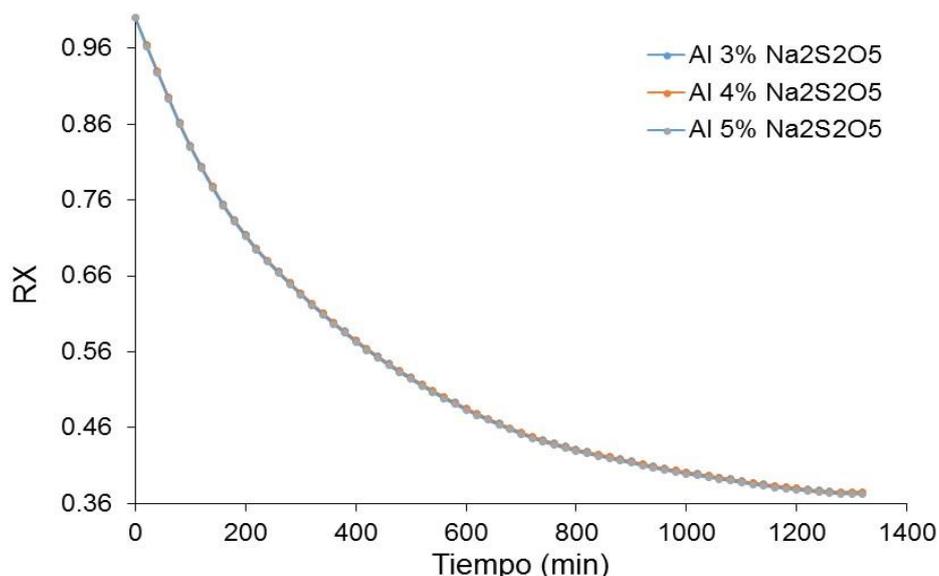


Figura 7. Curva de secado para el aguaymanto a 50°C

Por otra parte en la Figura 8, se aprecia la curva de secado a 60°C, en ella se aprecia una ligera variación de la humedad a los largo del tiempo para el aguaymanto tratado con metabisulfito de sodio al 4%, aunque este no es significativo ($p\text{-value} > 0.05$, Tabla 7), es así que se observa que se presenta perdida rápida de humedad hasta los 200 min, enseguida sucede una disminución más ligera hasta 500 min, y a partir del cual se presenta una zona constante, es decir la humedad de equilibrio a las condiciones de secado, siendo estas 48.9, 48.7 y 48.6 en b.s. al 3%, 4% y 5% de metabisulfito de sodio respectivamente.

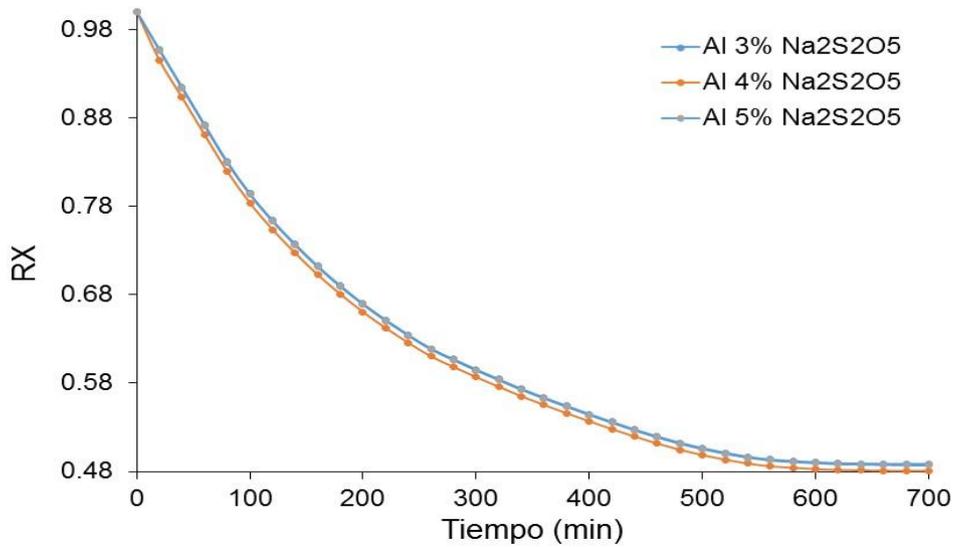


Figura 8. Curva de secado para el aguaymanto a 60°C

Asimismo la curva de secado a 70°C para los frutos de aguaymanto se muestran en la Figura 9, de ella se desprende que las curvas del aguaymanto tratado con diferentes concentraciones de metabisulfito de sodio, presentan el mismo comportamiento, aunque ligeramente el tratado con 4% se diferencia disminuyendo mas humedad en el tiempo, no obstante se observó que la adición de metabisulfito de sodio no muestra efecto significativo sobre la humedad del producto ($p\text{-value} > 0.05$), por otra parte de la Figura 9, se aprecia pérdida considerable y rápida de humedad hasta 300 min, luego hasta 450 min una perdida lenta de humedad, mientras que en adelante la perdida de humedad es mínima llegando a humedades finales de 25.9, 25.9 y 26.2 en b.s. al 3%, 4% y 5% de metabisulfito de sodio respectivamente.

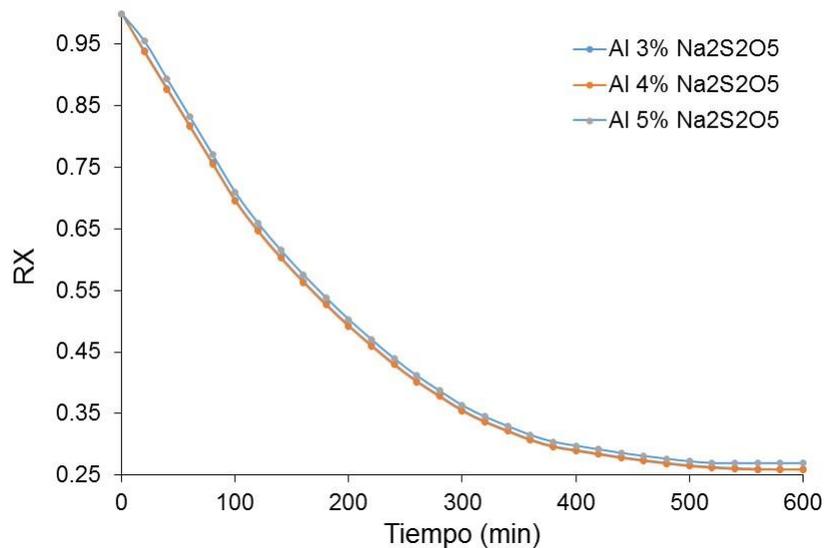


Figura 9. Curva de secado para el aguaymanto a 70°C

4.3. EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIDAD

Los resultados del coeficiente de difusividad efectiva para el agua eliminada a 50°C se muestran en la Tabla 8, de ella se desprende que los valores de la difusividad se incrementa ligeramente con el incremento de la adición de metabisulfito de sodio de 1.804×10^{-10} a 1.842×10^{-10} m²/s entre 3% a 5% respectivamente, no obstante al ajustar la ecuación 13, modelo de difusividad de Crank (1975), se observó que este presenta un coeficiente de ajuste R² de 0.51 para el 3% y 4% de metabisulfito de sodio, mientras que R² = 0.52 para 5%, mientras que el Error Medio Relativo se encuentra alrededor de 10%, cuanto menor son los valores mejor ajuste presentan los modelos.

Por otra parte en la Tabla 9, se presentan el coeficiente de difusividad efectiva para el agua eliminada a 60°C, de ella se desprende que estas se incrementan ligeramente de 1.201×10^{-10} a 1.236×10^{-10} m²/s con el incremento de metabisulfito de sodio de 3% a 5%, asimismo los valores del coeficiente de ajuste R² se encuentran de por debajo de 0.15, y el error medio relativo se encuentra entre 11 a 12%, estos resultados del EMR son mayores que los resultados reportados a 50°C, y el R² menor, lo que incida que presento mejor ajuste a 50°C.

Mientras que la difusividad efectiva para el agua eliminada a 70°C presenta valores en el intervalo de 7.100×10^{-10} a 7.465×10^{-10} m²/s, no presentando una

tendencia los valores con el porcentaje de metabisulfito de sodio, por otra parte los valores de coeficiente de correlación ajustado R^2 se encuentran alrededor de 0.63, con un error medio relativo alrededor de 15%.

Tabla 8. Difusividad efectiva del agua a 50 °C

Metabisulfito de Sodio	D_{ef} (m ² /s)	R^2	EMR (%)
3%	1.804×10^{-10}	0.51	10.12
4%	1.814×10^{-10}	0.51	10.08
5%	1.842×10^{-10}	0.52	10.02

Tabla 9. Difusividad efectiva del agua a 60 °C

Metabisulfito de Sodio	D_{ef} (m ² /s)	R^2	EMR (%)
3%	1.201×10^{-10}	0.14	11.88
4%	1.220×10^{-10}	0.14	12.03
5%	1.236×10^{-10}	0.15	11.81

Tabla 10. Difusividad efectiva del agua a 70 °C

Metabisulfito de Sodio	D_{ef} (m ² /s)	R^2	EMR (%)
3%	7.465×10^{-10}	0.63	14.79
4%	7.496×10^{-10}	0.63	14.84
5%	7.100×10^{-10}	0.62	15.32

Por otra parte se observó que el D_{ef} se incrementa con la temperatura de secado, es así que 50°C y 3% de metabisulfito de sodio presento un valor de 1.804×10^{-10} mientras que a 70°C fue de 7.465×10^{-10} , tal como se aprecia en la Tabla 8 y Tabla 10, este mismo hecho sucede para los demás tratamiento con metabisulfito de sodio, tal como se aprecia en la Figura 10, Geankoplis (1998) saravacos

Las curvas de variación de la D_{ef} en función a la temperatura se presentan en la Figura 10, en ella se observa que la difusividad se disminuye con la inversa de la temperatura absoluto, es decir a mayor temperatura mayor será la difusión de las moléculas de agua hacia el exterior, este comportamiento es característico para alimentos y/o materiales de esta naturaleza (Gaware *et al.*, 2010), es así que la temperatura presenta efecto significativo con la D_{ef} (p -value < 0.05) tal como se muestra en la Tabla 11,

De hecho en la Figura 11 se observa que el incremento de la temperatura incrementa considerablemente D_{ef} , sobre todo a temperaturas entre 60 y 70°C, sin embargo la adición de metabisulfito de sodio no afecta a la D_{ef} (p -value > 0.05; Tabla 11) como se puede apreciar en la Figura 11.

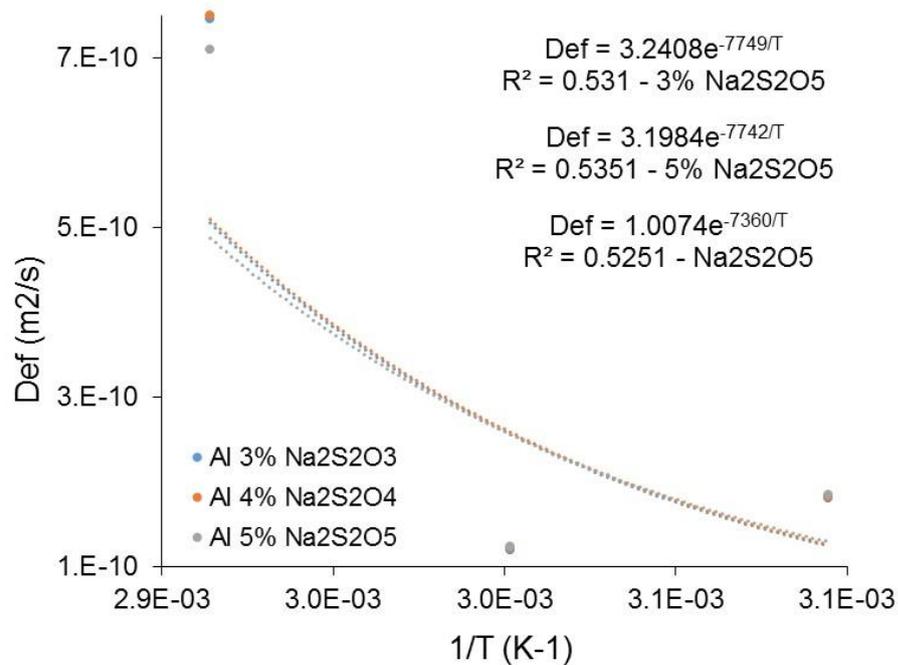


Figura 10. Variación de la D_{ef} con la temperatura

Tabla 11. ANOVA para D_{ef}

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Fcal	p-value
T	2	0.077405	0.038703	11897	0.000
%	2	0.000001	0.000001	0.21	0.822
Error	4	0.000013	0.000003		
Total	8	0.077419			

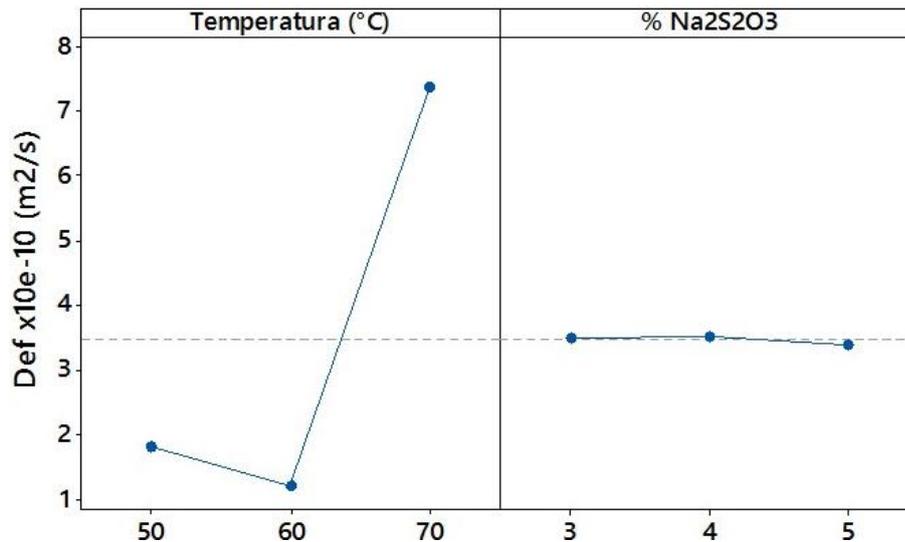


Figura 11. Diagrama de efectos para la D_{ef}

4.4. DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN

La influencia de la temperatura sobre la difusividad, se calculó a través de la energía de activación E_a , que es la mínima energía requerida por la humedad del fruto de aguaymanto para ser eliminada durante el proceso de secado, la cual se determinó a través de la ecuación de Arrhenius, y es propia de cada producto (Mulet *et al.*, 1989), los resultados se muestran en la Tabla 12, observados que esta disminuye con el incremento de la cantidad de metabisulfito de sodio de 64.43 a 61.19 k//mol, Espierriz (2011) indica que cuanto mayor es el tiempo de permanencia para una determinada temperatura, mayor será la transferencia de calor y consecuentemente mayor será la energía de activación necesaria para la difusión del agua, los valores encontrados se encuentran dentro del rango para materiales alimenticios, es así que Simal *et al.* (2000) encontró el valor de la energía de activación de 24.40 kJ mol para pencas de Aloe vera, 82.93 kJ/mol para Menta (*Mentha crispa L.*) (Park *et al.*, 2002) y 31.79 kJ mol para hojas de limón (*Lippia alba*) (Barbosa *et al.*, 2007), 51.26 kJ mol para okra (*Abelmoschus esculentus*) (Doymaz, 2005), 34.35 kJ/mol para espinaca (*Spinacia oleracea*) (Doymaz, 2009).

En general el incremento de la temperatura de secado, provoca un aumento de la velocidad de transferencia de materia o de difusividad del agua, y por ende disminuye la E_a , tal como se muestra en la Tabla 12, así a mayor temperatura mayor transferencia de masa (Lazarides, 1995).

Tabla 12. Valores de la energía de activación

	Al 3% Na ₂ S ₂ O ₅	Al 4% Na ₂ S ₂ O ₅	Al 5% Na ₂ S ₂ O ₅
Do (m ² /s)	3.2408	3.1984	1.007
Ea (kJ/mol)	64.43	64.37	61.19

Por otra parte el factor de Arrhenius D_0 , generalmente se considera más un parámetro estructural que cinético (Martínez *et al.*, 1998), así valores altos de D_0 implican una débil resistencia a la difusión (Turhan y Kaletunç, 1992), en la Tabla 12 se aprecia que D_0 , es mayor cuando se incrementa la cantidad de metabisulfito de sodio, esto indica que a esta velocidad de secado existe menor resistencia a la difusión del aguaymanto se adiciona más sal.

CONCLUSIONES

- Los frutos de aguaymanto presentan una humedad media de 0.797 ± 0.002 b.h., los cuales fueron sometidos a secado reportándose tiempos de secado de 1320, 700 y 600 min a las temperaturas de 50, 60 y 70°C, cuyas curvas de secado se ajustaron a la ecuación de Crank para un diámetro medio del fruto de 1.75 ± 0.03 cm, y a partir de esta se determinó la energía de activación para cada tratamiento en metabisulfito de sodio.
- Se observó que los valores del coeficiente de difusividad efectiva del agua durante el secado, se incrementa significativamente con el aumento de la temperatura ($p\text{-value} < 0.05$), encontrándose en el intervalo de $1.201\text{E-}10$ a $7.496 \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que la adición de metabisulfito de sodio no mostró efecto significativo ($p\text{-value} > 0.05$).
- Se observó que la energía de activación disminuye de 64.43 a 61.19 kJ/mol con el incremento de la concentración de metabisulfito de sodio del 3% a 5%, del mismo modo el factor de Arrhenius D_0 disminuye de 3.241 a $1.007 \text{ m}^2/\text{s}$.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar un estudio de la cinética del color durante el secado del aguaymanto.
- Se sugiere evaluar la actividad del agua de los frutos deshidratados a las temperaturas de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMPEX (2008). Asociación Macroregional de Productores para la Exportación. Aguaymanto, perfil de mercado. http://www.ampex.com.pe/down_file.php?f=perfilaguaymanto.pdf&ruta=perfi.
- Arends, K.M., Gutiérrez, M.V. (2008). Características de secado y modelado matemático para el bagazo de caña de azúcar tratado y no tratado en una planta piloto PDA. Tesis de grado. Facultad de Ing. Química. Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo Edo. Zulia. Venezuela.
- Barbosa, C. (1997). *Manual de Laboratorio de Ingeniería en Alimentos*. Editorial Acriba, S.A. Zaragoza, España. p. 71-88
- Barbosa, F. da F., Barbosa, L.C.A., Melo, E.C., Mendes, B.F., Santos, R.H.S. (2006). Influência da temperatura do ar de secagem sobre o teor e a composição química do óleo essencial de *Lippia alba* (Mill) N. E. Brown. *Química Nova* 29(6):1221 - 1225.
- Blume (1994). *La Armonía de Los Colores*.
- Brennan, J. G. (2008). *Manual del Procesado de los alimentos*. Edit. ACRIBIA. España
- Brennan, J.G.; Cowell, N.D.; Butters, J.R.; Lilly, A.E.V. (1980). *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos*. Ed. Acribia S.A.
- Bruin, S.; Luyben, K.Ch.A. (1980). *Drying of food materials. En: Advances in Drying*, Vol. 1. A.S. Mujumadar (Ed.), Hemisphere Publishing, New York.
- Cáceres, B. N. (2002). *Simulação e Otimização de um Secador Industrial de Túnel para Frutas*. Tesis de doctorado. Faculdade de Engenharia de Alimentos - UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil.
- Carranza J. (2011). *Cinética de secado del plátano (Musa paradisiaca) y de la yuca (Manihot esculenta Crantz)*. Trabajo de Fin de Carrera, Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), Iquitos, Perú.

- Chen, C.S.; Johnson, W.H. (1969). *Kinetics of moisture movement in hygroscopic materials. I. Theoretical consideration of drying phenomena. Trans. ASAE. 12: 109-113.*
- Comaposada, J. (1999). Sorption isotherms and water diffusivity in muscles of pork ham at different NaCl contents. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanya.
- Corrêa, P.C.; Resende, O.; Martinazzo, A.P.; Goneli, A.L.D.; Botelho, F.M. (2007). Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. *Engenharia Agrícola, 27:501-507.*
- Corzo, O., Bracho, N., Rodríguez, J., Pereira, A., Vásquez, A. (2011). Determinación experimental del coeficiente de difusión del agua durante el secado de láminas de coroba. *Rev. Saber, Universidad de Oriente, Venezuela 23(1):36-42.*
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion. 2da ed., Claredon Press: Oxford.*
- da Rocha, R.; Melo, E.; Corbín, J.; Berbert, P.; Donzeles, S.; Tabar, J. (2012). Cinética del secado de tomillo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 16(6).*
- Della, P. (2010). Secado de alimentos por métodos combinados: deshidratación osmótica y secado por microondas aire caliente. Tesis de maestría en Tecnología de alimentos. Univ. Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.
- Doymaz, I. (2005) Drying Characteristics and Kinetics of Okra. *Journal of Food Engineering, 69: 275-279. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.08.019*
- Doymaz, I. (2007). Air-drying characteristics of tomatoes. *J. Food Eng. 78(4):1291-1297. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2005.12.047*
- Doymaz, I. (2009). Thin-layer drying behaviour of mint leave. *Journal of Food Engineering, 74(3):370-375. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2005.03.009*
- Espierriz, J. C. (2012). Obtención de curvas de secado de hierba limón (*Cymbopogon citratus*). Tesis. Universidad Pública de Navarra, España

- Fellows, P. (2000). *Food Processing Technology - Principles and Practice*. 2da edic.
- Ferreira, S., Costa, A. (2009). Parámetros de Transferencia de Materia en el Secado de Frutas. *Información Tecnológica* 20(2):89-104.
- Floréz, R., Fisher, G., Sora, A. (2000). Producción, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana*): 1 ed. Bogotá (Colombia): Universidad Nacional. 165 p.
- Frías, A., Clemente, G., Rosselló, C., Mulet, A. (2003). Kinetics of fluidized bed drying of potato. In: *Proceedings of the Symposium EUDrying 03*, Heraklion, Creta, 224 – 230.
- García, F. (2011). *Cultivo de uso recreativo adaptado a colectivos con discapacidad*. Trabajo final de carrera. Universidad Politécnica de Valencia. España. 640 p.
- García, S.V., Schmalko, M.E., Tanzariello, A. (2007). Isotermas de adsorción y cinética de secado de ciertas hortalizas y aromáticas cultivadas en Misiones – Argentina. *Rev. RIA, INTA, Argentina*.
- Gaware, T.J., N. Sutar y B.N. Thorat. 2010. Drying of tomato using different methods: Comparison of dehydration and rehydration kinetics. *Dry. Technol.* 28(5):651-58. Doi: 10.1080/07373931003788759.
- Geankopolis J. C. (1998). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*, 3ra ed. CECSA.
- Giraldo-Zuniga, A.D., Arévalo-Pinedo, A., Silva. A., Valdes-Serra, J.C., Avlak, M. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Rev. Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, 30(1):179-182.
- Gisbert, M. (2001). Influencia de las variables de proceso en la evolución físicoquímica y bioquímica del lomo embuchado. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Gutiérrez, H.; de la Vara, R. (2010). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Edit. McGrawHill. Mexico.

- Henderson, S. M. (1974). *Progress in developing the thin layer drying equation*. Transactions of ASAE. 17:1167-1172.
- Henderson, S. M.; Pabis, S. (1961). *Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient*. Journal of Agriculture Engineering Research, 6:169-174.
- Hernández-Rodríguez, J., Fernández-Castillo, J. Quinto-Diez, P., Flores-Murrieta, F.E., Acosta-Olea¹ (2011). Estudio de la cinética de secado de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.). Científica, 15(3):125-130
- Herrera A., A. (2000). Manejo poscosecha de la uchuva en producción, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía. Colombia.
- Jayaraman, K.S.; Das Gupta, D.K. (1992). *Dehydration of fruit and vegetables recent developments in principles and techniques*. Drying Technol. 10 (1):1-50
- Jun, S., Irudayaraj, J. (2009). *Food processing operations modeling. Design and analysis*. Edit. CRC Press. Boca Ratón, New York.
- Karim A., Hawlader M. N. A. (2005). *Mathematical Modelling and Experimental Investigation of Tropical Fruits Drying*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 48:4914-4925.
- Keey, R.B. (1972). *Principios y prácticas de secado*. New York: Pregoman Press.
- Krokida, M. K.; Karathanos, V. T.; Maroulis, Z. B.; Marinos-Kouris, D. (2003). *Drying kinetics of some vegetables*. Journal of Food Engineering, 59(4):391-403.
- Lazarides, H.N., Katsanidis, E., Nickolaidis, A. (1995). Mass Transfer Kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. J. Food Eng., 25(2):151-166.
- Lewis, W. K. (1921). *The rate of drying of solids materials*. The Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 13:427-432.
- Lomauro, C.J.; Bakshi, A.S.; Labuza, T.P. (1985). *Moisture transfer properties of dry and semimoist foods*. Journal of Food Science, 50:397-400.

- López B. J.; Rodríguez R. J.; Álvarez C. M.; Jarquin E. L.; Zuñiga G. M. (2003). *Cinética de Secado y Caracterización Físico-Químico de Tomates Deshidratados Tipo Roma en Respuesta a la Temperatura y al Flujo del Aire*. Premio Nacional en Ciencias y Tecnología de Alimentos.
- Madarro, A.; Carbonell, J.V.; Piñaga, F.; Peña, J.L. (1981). *Deshidratación de frutas y hortalizas con aire ambiente. Ensayos exploratorios con zanahorias*. Rev. Agroquim.Tecnol. Alim.. 21(4):525-533.
- Marinos-Kouris, D.; Maroulis, Z. B. (1995). Transport properties in the drying of solids. In: Handbook of Industrial Drying Volume 1, Second Edition, Marcel Dekker Inc., New York, United States of America, 113 – 159.
- Martínez, N., Andrés, A., Chiralt, A., Fito, P. (1998). Termodinámica y Cinética de Sistemas Alimento Entorno. Servicio De Publicaciones, Universidad Politécnica De Valencia. Ref. 98.4034. p.170-198
- Midilli, A., Kucuk, H., Vapar, Z. (2002). *A new model for single-layer drying*. Drying Technology, 20(7):1503-1513.
- Mittal, G. S. (1999). Mass diffusivity of food products. Food Review International, 15(1):19 – 66.
- Moreno, D.C., Díaz-Moreno, C. (2016). Cinética del proceso de secado por aire caliente en tomate chonto (*Lycopersicum esculentum*). Agronomía Colombiana 34(1Supl.):512-515. DOI: 10.15446/agron.colomb.v34n1supl.58304
- Mulet, A.; Berna, A.; Rosselló, C. (1989). Drying of carrots I. Drying models. DryingTechnology, 7(3):537-557.
- Mulet, A., García-Reverter, J., Bon, J., Berna, A. (2000). Effect of shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. Drying Technology, 18(6):1201 – 1219.
- Page, G. E. (1949). *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. Indiana: Universidade de Purdue. Dissertação Mestrado
- Palmia, F., Pecoraro, M., Ferri, S. (1993). Essiccazione di prodotti carnei: calcolo del coeficiente di diffusione effettivo (Da) dell'acqua in fette di lombo suino. Industria Conserve, 68:238 – 242.

- Park, K.J., Vohnikova, Z., Brod, F.P.R. (2002). Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). *Journal of Food Engineering*, 1:193-199.
- Puente, L., Pinto, C., Castro, S. y Cortes, M. (2011). *Physalis peruviana* Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit: A review. *Food Research International* 44:1733–1740.
- Radford, R. D. (1975). Water transport in meat. *Bulletin de l'institut internationale du froid*, 1:315 – 321.
- Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J.A., Barquín, J., Linares, P. (2010). *Modelos matemáticos de optimización*. Univ. Pontificia Comillas Madrid.
- Repo, R., Encina, C.R. Determinación de capacidad antioxidante y compuestos bioactivos de frutas nativas peruanas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 74(2):108-124.
- Rosselló, C.; Cañellas, J.; Simal, S.; Berna, A. (1992). *A simple mathematical model to predict the drying rate of potatoes*. *J. Agric. Food Chem.*
- Ruiz-Cabrera, M. A., Gou, P., Foucat, L., Renou, J. P., Daudin, J. D. (2004). Water transfer analysis in pork meat supported by NMR imaging. *Meat Science*, 67(1):169 – 178.
- Saravacos, G. D., Maroulis, Z. B. (2001). *Transport properties of foods*, Marcel and Dekker Inc., New York, United States of America.
- Saravacos, G., Tsiourvas, D., Tsami. (1986). *Effect of temperature on the water adsorption isotherms of sultana raisins*. *Journal of food science*, 51(2).
- Scenna, G. (1999). *Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos*. Edit. UTN. Argentina.
- Ferreira, S., Costa, A. (2009). Parámetros de Transferencia de Materia en el Secado de Frutas. *Rev. Información Tecnológica*, 20(2):89-104
- Sharaf-Eldeen, Y.I., Hamdy, M.Y., Blaisdell, J.L. (1979). *Falling rate drying of fully exposed biological materials. A review of mathematical models*. *American Soc. of Agric. Eng. Paper No. 79-6522*

- Simal, S., Femenía, A., Llull, P., Rosselló, C. (2000). Dehydration of aloe vera: simulation of drying curves and evaluation of functional properties. *Journal of Food Engineering*, 43:109-114.
- Tapia, M.E., Fries A.M. (2007). Guía de campo de los cultivos andinos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y Asociación Nacional de Productores Ecológicos del Perú (ANPE). Lima.
- Tarifa, E., (2000). *Optimización y Simulación de Procesos - Métodos Numéricos* - Universidad Nacional de Jujuy. Argentina.
- Toledo T. (2007). *Fundamentals of Food Process Engineering*, Tercera Edición, Editorial Springer Science Business Media, LLC.
- Turhan y Kaletunç, (1992). Modeling of salt diffusion in white cheese during long-term brining. *Journal of Food Science* 57(5):1082–1085. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1992.tb11269.x
- Vázquez, G. Chenlo, F. (1997). *Grape drying in a pilot plant with a heat pump. Drying Technology*, 15(3 y 4), pp. 899–920.
- Velezmoro, J. (2004). Perfil de mercado del aguaymanto. Programa desarrollo rural sostenible. Universidad del Pacífico.
- Viollaz, P. E.; Rovedo, C. O. (2002). A drying model for three dimensional shrinking bodies. *Journal of Food Engineering*, 52(2):149 – 153.
- Wang, L.; Sun, D. W. (2002). Modelling three-dimensional transient heat transfer of roasted meat during air blast cooling by the finite element method. *Journal of Food Engineering*, 51(4):319 – 328.
- Welti-Chanes, J., Vélez-Ruiz F., Barbosa-Cánovas G.V. (2003). *Transport phenomena in food processing*, Editorial CRC Press LLC.

ANEXOS

Anexo 1. Datos de secado a 50°C

Tiempo (min)	T3%	T4%	T5%	Tiempo (min)	T3%	T4%	T5%
0	0.7971	0.7971	0.7971	680	0.3666	0.3661	0.3645
20	0.7692	0.7687	0.7671	700	0.3620	0.3614	0.3598
40	0.7414	0.7409	0.7393	720	0.3576	0.3571	0.3555
60	0.7142	0.7137	0.7121	740	0.3539	0.3534	0.3518
80	0.6872	0.6868	0.6851	760	0.3505	0.3499	0.3483
100	0.6629	0.6624	0.6608	780	0.3472	0.3466	0.3450
120	0.6410	0.6405	0.6389	800	0.3440	0.3435	0.3419
140	0.6205	0.6200	0.6184	820	0.3414	0.3408	0.3392
160	0.6011	0.6006	0.5990	840	0.3389	0.3384	0.3367
180	0.5846	0.5841	0.5825	860	0.3366	0.3361	0.3344
200	0.5693	0.5688	0.5672	880	0.3338	0.3333	0.3317
220	0.5551	0.5546	0.5530	900	0.3315	0.3310	0.3294
240	0.5427	0.5422	0.5405	920	0.3289	0.3284	0.3268
260	0.5308	0.5303	0.5287	940	0.3264	0.3259	0.3243
280	0.5194	0.5189	0.5173	960	0.3242	0.3237	0.3220
300	0.5083	0.5078	0.5062	980	0.3222	0.3216	0.3200
320	0.4975	0.4970	0.4954	1000	0.3202	0.3197	0.3180
340	0.4874	0.4869	0.4852	1020	0.3184	0.3178	0.3162
360	0.4774	0.4769	0.4753	1040	0.3167	0.3161	0.3145
380	0.4679	0.4674	0.4658	1060	0.3147	0.3141	0.3125
400	0.4588	0.4583	0.4567	1080	0.3129	0.3123	0.3107
420	0.4502	0.4497	0.4480	1100	0.3109	0.3104	0.3087
440	0.4420	0.4414	0.4398	1120	0.3092	0.3087	0.3070
460	0.4340	0.4335	0.4319	1140	0.3076	0.3071	0.3055
480	0.4268	0.4262	0.4246	1160	0.3061	0.3056	0.3039
500	0.4195	0.4190	0.4174	1180	0.3047	0.3042	0.3026
520	0.4125	0.4120	0.4104	1200	0.3035	0.3030	0.3014
540	0.4057	0.4052	0.4036	1220	0.3021	0.3016	0.3000
560	0.3993	0.3988	0.3971	1240	0.3010	0.3004	0.2988
580	0.3933	0.3928	0.3912	1260	0.3000	0.2994	0.2978
600	0.3874	0.3869	0.3853	1280	0.2995	0.2989	0.2973
620	0.3818	0.3812	0.3796	1300	0.2993	0.2989	0.2971
640	0.3765	0.3760	0.3744	1320	0.2990	0.2989	0.2968
660	0.3715	0.3709	0.3693				

Anexo 2. Datos de secado a 60°C

Tiempo (min)	T3%	T4%	T5%
0	0.7971	0.7971	0.7971
20	0.7630	0.7535	0.7624
40	0.7290	0.7198	0.7284
60	0.6950	0.6862	0.6944
80	0.6617	0.6531	0.6610
100	0.6332	0.6248	0.6324
120	0.6088	0.6007	0.6081
140	0.5876	0.5796	0.5868
160	0.5677	0.5600	0.5670
180	0.5501	0.5425	0.5493
200	0.5339	0.5265	0.5331
220	0.5193	0.5120	0.5185
240	0.5058	0.4987	0.5050
260	0.4935	0.4864	0.4926
280	0.4838	0.4769	0.4830
300	0.4746	0.4677	0.4738
320	0.4659	0.4590	0.4650
340	0.4572	0.4505	0.4563
360	0.4493	0.4426	0.4484
380	0.4418	0.4352	0.4409
400	0.4345	0.4279	0.4336
420	0.4274	0.4209	0.4265
440	0.4206	0.4142	0.4197
460	0.4142	0.4079	0.4133
480	0.4086	0.4023	0.4077
500	0.4037	0.3974	0.4028
520	0.3996	0.3934	0.3987
540	0.3960	0.3899	0.3951
560	0.3935	0.3873	0.3925
580	0.3922	0.3860	0.3913
600	0.3910	0.3849	0.3901
620	0.3901	0.3840	0.3892
640	0.3898	0.3837	0.3889
660	0.3895	0.3834	0.3886
680	0.3895	0.3832	0.3883
700	0.3895	0.3832	0.3880

Anexo 3. Datos de secado a 70°C

Tiempo (min)	T3%	T4%	T5%
0	0.7971	0.7971	0.7971
20	0.7485	0.7471	0.7614
40	0.7003	0.6988	0.7125
60	0.6520	0.6506	0.6635
80	0.6038	0.6024	0.6146
100	0.5556	0.5543	0.5658
120	0.5162	0.5150	0.5259
140	0.4818	0.4805	0.4909
160	0.4502	0.4490	0.4589
180	0.4208	0.4196	0.4291
200	0.3932	0.3920	0.4011
220	0.3676	0.3664	0.3752
240	0.3432	0.3420	0.3504
260	0.3212	0.3201	0.3281
280	0.3020	0.3009	0.3087
300	0.2834	0.2823	0.2898
320	0.2688	0.2677	0.2750
340	0.2569	0.2558	0.2629
360	0.2455	0.2444	0.2514
380	0.2368	0.2358	0.2426
400	0.2318	0.2308	0.2375
420	0.2271	0.2261	0.2327
440	0.2226	0.2215	0.2281
460	0.2187	0.2177	0.2242
480	0.2152	0.2141	0.2206
500	0.2119	0.2109	0.2173
520	0.2098	0.2087	0.2151
540	0.2082	0.2072	0.2148
560	0.2074	0.2064	0.2148
580	0.2067	0.2064	0.2148
600	0.2067	0.2064	0.2148

Anexo 4. Cálculos para determinar D_{ef}

ANÁLISIS A 50°C

Model is: $V2=(6/(Pi^2))*exp(-D_{ef}*(Pi**2)*v1/(0.0174**2))$

Dependent variable: RX3% Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .893602778

Proportion of variance accounted for: .511629739 R =
.715282978

Model is: $V3=(6/(Pi^2))*exp(-D_{ef}*(Pi**2)*v1/(0.0174**2))$

Dependent variable: RX4% Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .889380856

Proportion of variance accounted for: .514097299 R =
.717005787

Model is: $V4=(6/(Pi^2))*exp(-D_{ef}*(Pi**2)*v1/(0.0174**2))$

Dependent variable: RX5% Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .878509433

Proportion of variance accounted for: .520602741 R =
.721528060

ANÁLISIS A 60°C

Model is: $V2=(6/(Pi^2))*exp(-D_{ef}*(Pi**2)*v1/(0.0174**2))$

Dependent variable: RX3% Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .662030855

Proportion of variance accounted for: .135736133 R =
.368423849

Model is: $V3=(6/(Pi^2))*exp(-D_{ef}*(Pi**2)*v1/(0.0174**2))$

Dependent variable: RX4% Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .658728378

Proportion of variance accounted for: .141016173 R =
.375521202

Model is: $V4=(6/(Pi^2))*exp(-D_{ef}*(Pi**2)*v1/(0.0174**2))$

Dependent variable: RX5% Independent variables: 1

Loss function: $(OBS-PRED)**2$

Final value: .655887596

Proportion of variance accounted for: .145545370 R =
.381504089

ANÁLISIS A 70°C

Model is: $V2 = (6/(\pi^2)) * \exp(-D_{ef} * (\pi^2) * v1 / (0.0174^2))$

Dependent variable: RX3% Independent variables: 1

Loss function: $(OBS - PRED)^2$

Final value: .577646066

Proportion of variance accounted for: .626348543 R =
.791421849

Model is: $V3 = (6/(\pi^2)) * \exp(-D_{ef} * (\pi^2) * v1 / (0.0174^2))$

Dependent variable: RX4% Independent variables: 1

Loss function: $(OBS - PRED)^2$

Final value: .575516106

Proportion of variance accounted for: .627797378 R =
.792336657

Model is: $V4 = (6/(\pi^2)) * \exp(-D_{ef} * (\pi^2) * v1 / (0.0174^2))$

Dependent variable: RX5% Independent variables: 1

Loss function: $(OBS - PRED)^2$

Final value: .578555258

Proportion of variance accounted for: .624851522 R =
.790475504

Anexo 5. Datos de la Humedad y diámetro del fruto de aguaymanto

	Humedad b.h. (g H ₂ O/ g muestra)	SS (g)	Humedad b.s. (g H ₂ O/g S.S.)
m1	0.7990	0.2010	3.98
m2	0.7962	0.2038	3.91
m3	0.7952	0.2048	3.88

	cm
D1	1.78
D2	1.73
D3	1.74

PANEL FOTOGRÁFICO



1. Aguaymanto ecotipo alargado selección Canaán en pleno desarrollo vegetativo Estación Experimental Agraria INIA-Cumbiamba-Talavera



2. Frutos maduros a recolectar para los tratamientos. Estación Experimental Agraria INIA-cumbiamba-talavera



3. Acondicionamiento de los frutos, en el laboratorio de Química de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial.



4. Preparación de hipoclorido de sodio con una concentración de 0.75 ml. en un recipiente que contiene 1 litro de agua destilada



5. Secado del fruto luego de retirar de la muestra de hipoclorito de sodio



6. Acondicionamiento y pesado en bandejas de acero inoxidable.



7. Secado de las muestras en la estufa



8. Pesado de las muestras según los tiempos de la investigación

CONSTANCIA

EL QUE SUSCRIBE EL PRESENTE DOCUMENTO, Prof. DIOMEDES CAYO CARDENAS F. hace constar que:

Se ha traducido del idioma español a la lengua quechua el resumen de la tesis titulado: **COEFICIENTE DE DIFUSIVIDAD EFECTIVA Y LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN EN EL SECADO DE AGUAYMANTO (*Physalis Peruviana L*) TRATADO CON METABISULFITO DE SODIO**, para optar el título profesional de Ingeniero Agroindustrial. Dicho trabajo corresponde al Bachiller en Ingeniería Agroindustrial Alexander Alcarraz Huamán, egresado de la Escuela profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad José María Arguedas.

Se emite la presente constancia a petición del interesado.

Andahuaylas, 17 de diciembre de 2019



UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ MARÍA ARGUEDAS
CENTRO DE IDIOMAS

Sodta

Amawta: Diómedes C. Cárdenas Farfán
DOCENTE FACILITADOR DEL IDIOMA QUECHUA

Prof. Diómedes Cayo Cárdenas F.

Traductor