



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

“ANÁLISIS DEL PROCESO DE SECADO DE UVILLA *Physalis peruviana* L. MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA EN LA EMPRESA TERRAFERTIL S.A.”

Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Agroindustrial

Autora:

Abalco Pillajo Jesenia Paola

DIRECTOR: Ing. Juan Carlos De La Vega, MSc.

Ibarra-Ecuador

2022

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN
CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN AGROINDUSTRIAS

“ANÁLISIS DEL PROCESO DE SECADO DE UVILLA *Physalis* *peruviana* L. MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA EN LA EMPRESA TERRAFERTIL S.A.”

Trabajo de grado revisado por el Comité Asesor, por lo cual se autoriza su presentación
como requisito para obtener el Título de:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

APROBADO:

Ing. Juan Carlos de la Vega MSc.
DIRECTOR


FIRMA

Ing. Marco Lara MSc.
MIEMBRO TRIBUNAL



FIRMA

FIRMA

Dr. José Pais
MIEMBRO TRIBUNAL



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1723599450
APELLIDOS Y NOMBRES:	ABALCO PILLAJO JESENIA PAOLA
DIRECCIÓN:	TABACUNDO PANAMERICA NORTE KM 46
EMAIL:	pjabalco@utn.edu.ec
TELÉFONO FIJO:	—
TELÉFONO MÓVIL:	0988088562

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"ANÁLISIS DEL PROCESO DE SECADO DE UVILLA <i>Physalis peruviana</i> L. MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA EN LA EMPRESA TERRAFERTIL S.A."
AUTOR (ES):	ABALCO PILLAJO JESENIA PAOLA
FECHA: DD/MM/AAAA	03 de octubre del 2022
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera Agroindustrial
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Juan Carlos de la Vega MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los tres días del mes de octubre del 2022

EL AUTOR:

Jesenia Paola Abalco Pillajo

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Jesenia Paola Abalco Pillajo**, bajo mi supervisión.

Ibarra, 03 de octubre del 2022

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Juan Carlos de la Vega', is written over a horizontal dashed line.

Ing. Juan Carlos de la Vega MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE TESIS

Contenido

Contenido	v
Índice de figuras	vii
Índice De Tablas	vii
Índice De Anexos	vii
Resumen	viii
Summary	ix
DEDICATORIA	x
AGRADECIMIENTO	xi
Capítulo I.....	1
Introducción	1
1.1 Problema.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.2 Objetivos	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
Capítulo II	4
Marco teórico	4
2.1. Validación de un método.....	4
2.1.1. Generalidades	4
2.1.2. Definición De Términos.....	5
2.1.3. Identificación de las fuentes de incertidumbre.....	6
2.2. Proceso de deshidratación	7

2.2.1.	Secador de bandejas	8
2.2.2.	Periodo de secado.....	9
2.2.3.	Factores que afectan el proceso de deshidratación.	11
2.2.4.	Balance De Energía.....	11
2.3.	Análisis matemático	11
2.3.1.	Coefficiente de relación.....	13
2.3.2.	Regresiones lineales simples.....	14
2.3.3.	Regresiones lineales múltiples	15
CAPÍTULO III.....		18
MARCO METODOLÓGICO		18
3.1.	Caracterización del Área de Estudio	18
3.2.	Materiales y Equipos	18
3.3.1	Diseño de un esquema metodológico para el análisis del contenido de humedad en uvilla orgánica deshidratada en Terrafertil S.A.....	19
3.3.2	Determinación experimental de los parámetros necesarios para la simulación matemática del proceso de deshidratación de la uvilla <i>Physalis peruviana</i> L.....	23
3.3.3	Evaluación del efecto del proceso de deshidratación mediante modelación matemática en la uvilla deshidratada.	27
CAPITULO IV.....		29
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		29
CAPÍTULO V		35
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		35
5.1	Conclusiones	35
5.2	Recomendaciones	35
Bibliografía		45

Índice de figuras

Figura 1 Deshidratador de alimentos	8
Figura 2 Dispersión en regresión simple.....	15
Figura 3 Bandeja para deshidratación	24
Figura 4 Ingreso de uvilla al horno de procesamiento	25
Figura 5: Balance de energía.....	26

Índice De Tablas

Tabla 1 Datos ambientales Tabacundo	18
Tabla 2 Instrumentos, equipos y reactivos a utilizar.....	19
Tabla 3 Objetivos para realizar el esquema de la validación en un método gravimétrico	20
Tabla 6. Objetivos de la validación en el método gravimétrico.....	29
Tabla 7 Declaración de la validación	30
Tabla 5. Parámetros obtenidos de carta psicrométrica.....	31

Índice De Anexos

Anexo 1. Base de datos obtenidos en la experimentación	37
Anexo 2. Tabla de error.	42
Anexo 3. Validación del modelo matemático	44

Resumen

La uvilla (*Physalis peruviana* L) es un fruto andino, exótico por naturaleza, con muy alto contenido nutricional, su atractivo sabor inconfundible es muy atractivo para sus consumidores. El objetivo de esta investigación fue determinar experimentalmente los parámetros necesarios para la simulación matemática en el proceso de deshidratación de uvilla (*Physalis peruviana* L).

El secado de uvilla (*Physalis peruviana* L) fue realizado en un horno de bandejas separadas con una medida de 30 x 30 cm considerando la fruta con las siguientes características: tamaño de la fruta oscilaba de 1.7 a 2.6 centímetros de diámetro, peso de 3 a 9.8 gramos, un promedio de humedad inicial y final 81 % y 16% respectivamente además con una temperatura y tiempo constante de una media de 90 °C y 7 horas, con los resultados obtenidos se ejecutó una simulación matemática del proceso de deshidratación utilizando el modelo matemático lineal considerando al tiempo y temperatura constantes y como variables dependientes se definió al diámetro, peso, humedad inicial y variable independiente la humedad final.

Con la ayuda de un software los resultados analizados arrojó un coeficiente de determinación $R^2 = 0,95$ que de acuerdo con la bibliografía genera confiabilidad además se consideró la validación con un resultado de porcentaje de error: 0.68 lo que permite afirmar que el modelado matemático y las variables desarrolladas fueron las correctas. La fruta analizada utilizada para la experimentación cumplió con altos estándares de calidad la misma que fue previamente clasificada de acuerdo con las variables de estudio para lograr obtener una muestra homogénea en un estado de madurez nivel 4 con una coloración naranja claro sin presencia de rayaduras o golpes que puedan afectar el proceso de secado.

Summary

The goldenberrys (*Physalis peruviana* L) is an Andean fruit, exotic by nature, with very high nutritional content, its attractive and unmistakable flavor is very attractive to its consumers. The objective of this research was to experimentally determine the necessary parameters for the mathematical simulation of the dehydration process of uvilla (*Physalis peruviana* L).

The drying of uvilla (*Physalis peruviana* L) was carried out in a separate tray oven with a measure of 30 x 30 cm. considering the fruit with the following characteristics: fruit size ranged from 1.7 to 2.6 centimeters in diameter, weight from 3 to 9. With the results obtained, a mathematical simulation of the dehydration process was carried out using the linear mathematical model considering constant time and temperature, and as dependent variables were defined the diameter, weight, initial humidity, and final humidity as independent variables.

With the help of software, the results analyzed yielded a coefficient of determination $R^2=0.95$ which, according to the bibliography, generates reliability. In addition, validation was considered with an error percentage result of 0.68, which allows us to affirm that the mathematical modeling and the variables developed were correct. The analyzed fruit used for the experimentation complied with high quality standards, which were previously classified according to the study variables in order to obtain a homogeneous sample in a state of maturity level 4 with a light orange coloration without the presence of scratches or blows that could affect the drying process.

DEDICATORIA

A ustedes Santi, Pancho y Vale para que recuerden que con esfuerzo y perseverancia se puede cumplir cada uno de sus sueños.

Paola Abalco

AGRADECIMIENTO

Agradecida con Dios y el Universo por permitirme desarrollar mi trabajo de titulación con excelentes docentes de calidad humana: Ing. Juan Carlos de la Vega, Ing. Marco Lara y Dr. José País que sin su experiencia y conocimiento no hubiese sido posible la culminación de mi objetivo.

Además, aquellas personas que me enseñaron que la mejor libertad del ser humano está en la superación personal e intelectual mis padres: Juan, Pilar, al Lic. Alan por el apoyo incondicional durante la travesía de mi carrera que sin importar cada una de las caídas nunca faltó una voz de aliento que me permita seguir con el objetivo planteado y a ti mi Tosh quien ha sido mi fiel confidente y compañero de aventuras y arrebatos siempre estaremos juntos en este largo caminar llamada vida.

A la empresa TERRAFERTIL S.A. por permitirme desarrollar profesionalmente en especial a la MSc. Dayana Sandoval por ser aquel humano lleno de luz que apareció en el camino y a mi equipo de calidad por creer en mi aprendizaje y capacidades.

A ustedes mi querida familia Abalco♥ que siempre estuvieron apoyándome, guiándome incondicionalmente, Mami loli, mi ángel del cielo, Carmelina, Polo, Elsa, empujándome a las experiencias que la vida me estaba presentando finalmente y no menos importantes ustedes que tienen un pedacito de mi corazón Jommy, Wen, Guzmi, Mish, Jime, Li, Migue, Dennis por cada palabra de aliento, gracias, por tanto.

Este objetivo cumplido es de ustedes y mío, no existe palabras para expresar tanto agradecimiento por ser la energía que necesitaba para poder avanzar.

Paola Abalco

Capítulo I

Introducción

1.1 Problema

Terrafertil S.A., es una empresa ecuatoriana procesadora y exportadora que ofrece al mercado nacional e internacional una alta gama de productos naturales que satisfacen la necesidad de sus consumidores como son tes, condimentos y deshidratados, según Maldonado (2016) “entre los deshidratados, el producto estrella es la uvilla, pero también destacan la piña, el mango y el banano” debido a la fuerte venta y poca competencia en el mercado, respaldado adicionalmente por el soporte que la empresa da a la cadena de valor con intensos controles y cuidados desde antes de la siembra trabajando con más de 1500 agricultores de la zona sierra norte del Ecuador.

Según (Skocdopolov, 2017) “La optimización del proceso de producción es una tarea importante que debe resolverse en la planificación estratégica y/u operativa de cada empresa industria”. A pesar de la importancia de estos procesos también manifiesta (Saraguro, 2018) “En la gran parte de las fábricas se trabaja más por rutina, que manejando el sentido común. Eso lleva a que no se lleguen a inspeccionar los costes de producción y que el proceso sea muy ineficiente”.

Durante el proceso de deshidratación el contenido de humedad final se ve afectado por algunos factores como son el diámetro del fruto, la zona de cultivo, el tiempo de procesamiento, la temperatura entre otros, por lo que se hace necesario tomar en cuenta todas estas variables para evitar lo que actualmente ocurre en la empresa que es realizar un segundo secado del producto y así generar pérdidas económicas.

La importancia de la exactitud de los resultados impacta directamente al rendimiento general del proceso, pues se trabaja con rangos de humedad como determinante de la calidad del producto, y desencadena a la estabilidad del producto en el mercado.

1.2 Justificación

En la industria alimentaria es necesario que el laboratorio arroje datos confiables mediante metodologías validadas; el porcentaje de humedad que presentan las frutas deshidratadas analizado mediante el método gravimétrico, ofrece información importante para cálculos de rendimientos, estabilidad en percha y futuras innovaciones de procesos.

El deber de control de calidad de Terrafertil es proporcionar resultados confiables de los análisis que realizan a cada lote de proceso, considerando las fuertes exigencias de los clientes internacionales que manejan, es necesario aplicar un método de análisis validado para el control de la humedad de la uvilla orgánica deshidratada.

De esta manera al validar el método de análisis gravimétrico para el control de la humedad de la uvilla deshidratada en Terrafertil, ayudara en 3 puntos clave, primero dar la certeza al cliente de que los resultados de los análisis para el control de humedad son certeros y validados; tener datos correctos y validados para estandarizar procesos productivos cumpliendo el enfoque de la empresa a la mejora continua, y reducción de costos de análisis en laboratorios externos certificados y validados solicitados por clientes para garantía de resultados.

La validación del método gravimétrico da un valor extra al control de calidad de Terrafertil S.A., pues da la garantía de una metodología apropiada en base a cumplimientos de la Norma ISO 17025, avalando la calidad de los resultados emitidos en los Certificados de análisis por cada lote de proceso.

Muchos fenómenos físicos pueden ser descritos como modelos matemáticos los cuales se pueden basar en teorías o leyes científicas establecidas para confirmar lo práctico con la teoría, en el deshidratado de uvilla se asume los factores, pero con un modelo matemático se confirma si afectan a dicho proceso (Rolleri, 2019).

1.2 Objetivos

Objetivo general

Analizar el proceso de secado de uvilla *Physalis peruviana* L en la empresa de Terrafertil S.A.

Objetivos específicos

- Diseñar el esquema metodológico para el análisis del contenido de humedad en uvilla orgánica deshidratada en la empresa de Terrafertil S.A.
- Determinar experimentalmente los parámetros necesarios para la simulación matemática del proceso de deshidratación de la uvilla *Physalis peruviana* L.
- Evaluar el efecto del proceso de deshidratación mediante modelación matemática en la uvilla deshidratada.

Capítulo II

Marco teórico

2.1. Validación de un método

2.1.1. Generalidades

Según (Hernández, 2019) manifiesta que la validación de un método es aquel proceso por el cual se establece mediante estudios de laboratorio que su capacidad compensa los requisitos para las aplicaciones deseadas; esta capacidad se expresa en términos de parámetros de análisis, donde se tiene en cuenta la linealidad, precisión (repetibilidad y reproducibilidad), exactitud, especificidad, sensibilidad, entre otros, en dependencia del objetivo que se apremie. En la actualidad dicho acontecimiento genera una gran importancia la validación de métodos, procesos, etc., que permitan mayor seguridad en los resultados, fundamentalmente cuando se trabaja con productos naturales, donde es necesario obtener datos y resultados experimentales que demuestren la aptitud para el uso que se destina.

Según (Hernández, 2019) para poder realizar la validación de un método debe pasar por varios procesos dentro del laboratorio con el fin de obtener los requisitos necesarios y llegar al objetivo planteado, este estudio ayuda a en la actualidad a brindar seguridad para el uso de productos en sus diferentes procesos de producción final.

La confiabilidad de un resultado se mide por la precisión y la exactitud, parámetros que se ven afectados por todas las variables que actúan en el proceso de medición, tales como técnicas de muestreo, condiciones ambientales, personal que realiza el análisis, equipos utilizados, calidad de los reactivos y procedimiento utilizado para su cálculo. El protocolo de todos los pasos y condiciones que se deben seguir para llegar al resultado constituye el método de análisis, y este debe ser validado (Giraldo Gomez G. I., 2017)

Según (Giraldo Gomez G. I., 2017) la confiabilidad de un resultado puede ser alterado ya que en el proceso de ser medido la precisión y la exactitud son afectados, dentro de esta medición existen variantes que los motivan a entrar en varios

cambios, por lo cual el proceso a ser utilizado para su medición debe ser aprobado con el fin de que no entre a alteraciones que puedan ocasionar un cambio involuntario.

De acuerdo a la (Oficina de acreditación de Guatemala, C.A., 2017) Los parámetros de ocupación que se recomienda incluir en la validación y verificación de diferentes métodos de ensayo pueden ser, según el caso: exactitud, exactitud relativa, desviación, desviación positiva, desviación negativa, efecto matricial, repetibilidad, precisión intermedia, reproducibilidad, especificidad, límite de detección, límite de cuantificación, linealidad, rango, sensibilidad, robustez y fortaleza, entre otras.

De acuerdo con la (Entidad mexicana de acreditación, 2018) Para métodos o procedimientos normalizados el laboratorio debe realizar y presentar evidencia objetiva de la verificación del método para demostrar que cumple las especificaciones de este y cuenta con la competencia técnica para realizarlo adecuadamente tomando en consideración sus propias instalaciones, equipo, personal. La verificación del método debe realizarse de acuerdo con lo siguiente:

Para los ensayos que involucren mediciones analíticas:

- Límite de detección
- Límite de cuantificación
- Intervalo lineal y de trabajo
- Reproducibilidad
- Repetibilidad
- Incertidumbre

2.1.2. Definición De Términos

- **Veracidad:** Grado de acuerdo entre el valor promedio obtenido en una larga serie de resultados de ensayos y una referencia aceptada o valor verdadero.

- **Límite de detección:** El menor contenido mensurable del que se puede deducir la presencia del analito con un grado razonable de certeza estadística
- **Límite de cuantificación:** El menor contenido mensurable que permite cuantificar el analito con un grado aceptable de exactitud y precisión.
- **Repetibilidad:** Grado de acuerdo entre los resultados de mediciones sucesivas de un mismo analito realizadas en condiciones repetibles, por ejemplo, con el mismo método, el mismo material, el mismo operador, en el mismo laboratorio y en un período de tiempo breve.
- **Reproducibilidad:** Grado de acuerdo entre los resultados de mediciones sucesivas de un mismo analito en materiales idénticos realizadas utilizando el mismo método en condiciones diferentes, por ejemplo, con diferentes operadores, en diferentes laboratorios, y a lo largo de un período de tiempo prolongado.
- **Exactitud:** Capacidad de obtener un resultado verdadero. En los ensayos cuantitativos, la exactitud expresa el grado de acuerdo entre el valor verdadero y el valor obtenido después de repetir el ensayo cierto número de veces.
- **Incertidumbre:** Medida asociado con el resultado de un cálculo que caracteriza la dispersión de los valores que puede atribuirse razonablemente al analito.

2.1.3. Identificación de las fuentes de incertidumbre

Según (Morán Humani, 2017) Una vez explícito el mensurando, el principio, el método y el procedimiento de medición, se asemejan las posibles fuentes de incertidumbre. Éstas provienen de los diversos factores involucrados en el cálculo.

- Los resultados de la calibración del instrumento.
- La incertidumbre del patrón o del material de referencia.

- La repetibilidad de las lecturas.
- La reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos.
- Características del propio instrumento, como resolución, histéresis, deriva, etc.
- Variaciones de las condiciones ambientales.
- La definición del propio mensurando.
- El modelo particular de la medición.
- Variaciones en las magnitudes de influencia.

2.2. Proceso de deshidratación

El secado puede ser expresado o descrito de diferentes maneras, entre ellas el contenido de humedad que se expresa como la cantidad de humedad por unidad de peso de solido seco o húmedo. La humedad en base húmeda expresa la humedad del sólido como porcentaje del peso de solido húmedo y si la humedad es en base seca, se expresa como un porcentaje del peso del solido seco. El secado ocurre por medio de la transferencia de calor del aire caliente, por medio de la convección, al agua que se encuentra en la fruta, haciendo que esta se evapore. El secado por convección suele ser un proceso continuo y se usa más a menudo para productos que tienen un valor relativamente bajo.

El secado al aire es por lo general se logra pasando aire a temperatura y humedad reguladas sobre o a través de la comida en una secadora. Los factores que afectan las tasas de secado son la temperatura, la humedad, velocidad del aire y patrón de distribución, intercambio de aire, geometría, características del producto y espesor. La muestra generalmente se coloca en bandejas de malla en una capa para una mejor circulación del aire, este puede ser horizontal o vertical a la capa o lecho. En general, cuanto más caliente es la temperatura del aire, más rápido es el velocidad de secado y de manera similar, cuanto mayor sea la velocidad, mayor será la tasa de secado. La humedad relativa cae cuando se eleva la temperatura del aire. El secador debe expulsar el aire para eliminar la humedad, permitiendo que entre aire

nuevo y de menor humedad al sistema en muchos casos se utilizan secadores de dos etapas o de varias etapas, con diferentes condiciones de secado inicial a 90 °C y luego la segunda o última etapa a 60 °C. La recirculación del aire de escape en las secadoras es popular debido a la conservación de energía y su efecto sobre la calidad del alimento.

El proceso de secado es uno de los procesos de mayor consumo energético en la industria alimentaria. Aparte de el aumento del coste de la energía, la legislación sobre la contaminación, sostenibilidad y el medio ambiente las tecnologías amigables han creado una mayor demanda de procesos de secado energéticamente eficientes en la industria alimentaria.

2.2.1. Secador de bandejas

El alimento en este tipo de secadores reposa sobre recipientes perforadas para dejar fluir el aire, estas son situadas en armarios, así sobre las bandejas hay un flujo de aire caliente a humedad y temperatura controladas, en este tipo de secadores debe gestionar que el aire transite lo mas idénticamente posible existe una variación de este modelo en donde las bandejas son encajadas en un túnel a las mismas condiciones de secado pero en un sistema semicontinuo mucho mas extenso, lo cual aumenta la capacidad de este tipo de secadores en donde el secado es lento y a temperaturas bajas.

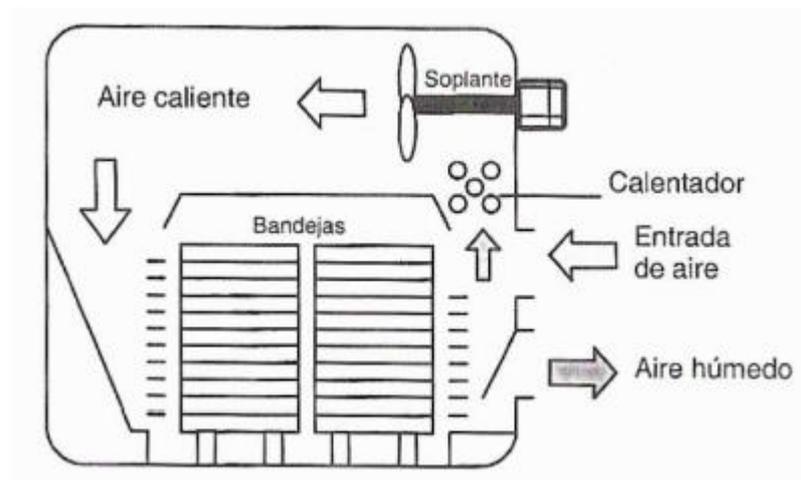


Figura 1 Deshidratador de alimentos

Fuente: Repositorio EPN Diseño y construcción de una secadora

2.2.2. Periodo de secado

De acuerdo con el autor (Santana Lozano & Cubillos Ortiz, 2016) El secado de las frutas es una operación que implica procesos de transferencia de calor y de masa de forma simultánea. La velocidad de secado es de trascendente importancia debido a que ayuda a fijar situaciones de operación óptimas para los sólidos a secar tales como la temperatura y tiempo necesario para llegar hasta la humedad deseada, además para establecer un tamaño adecuado del dispositivo. En el momento de determinar los periodos de secado se debe conocer que el proceso se divide en tres partes, una fase inicial de precalentamiento, una fase de velocidad de secado constante y por ultimo una fase de velocidad de secado decreciente.

Para (Santana Lozano & Cubillos Ortiz, 2016) en el proceso de secado frutal la transferencia de calor y la velocidad presentan papeles importantes para conseguir el producto final, muestra a demás da a conocer tres fases en el proceso para poder llegar a obtener la humedad deseada.

La etapa de precalentamiento transcurre mientras el agua en la fruta se calienta hasta lograr la temperatura de bulbo húmedo, temperatura a la cual un termómetro cuyo bulbo está rodeado de un medio poroso, en este caso la fruta se mantiene totalmente húmeda al ponerse en contacto con el aire; en esta fase la transferencia de masa es muy lenta, por lo que la fruta se encuentra a una temperatura menor a la que se evapora el agua y como resultado su presión de vapor es baja, el gradiente de temperatura entre el aire y la fruta es grande generando una transferencia de calor alta; la etapa de precalentamiento finaliza cuando la temperatura de la fruta iguale la temperatura del aire. La etapa de velocidad constante es en donde hay una significativa reducción del contenido del agua de la fruta, la cual es anulada a un flujo másico constante en la superficie de la fruta a una temperatura constante. En esta etapa el flujo de calor intercambiado entre el aire y la fruta es utilizado solo para la evaporación del agua y continuará mientras que el área de la fruta este alimentada por agua líquida proveniente del interior de la fruta por el fenómeno de capilaridad; la etapa de velocidad constante finaliza cuando el contenido de humedad de la fruta alcance el valor de la humedad critica, siendo está no una

propiedad de la fruta sino el punto en donde el flujo másico de secado deja de ser constante y depende de las condiciones del aire. La etapa de velocidad decreciente es aquella en donde la velocidad de secado reduce debido a que la superficie externa de evaporación se reduce bruscamente, este fenómeno es provocado porque el volumen de agua en el interior de la fruta es bajo. La brusca reducción de la superficie externa de evaporación es la principal causa de la disminución de la velocidad de secado, la migración del agua es cada vez más difícil y como consecuencia la transferencia de masa se convierte en el factor limitante del proceso; esta fase terminará cuando la fruta alcance su humedad de equilibrio (contenido de humedad de una sustancia que está en el equilibrio con una presión parcial dada del aire) y depende de las condiciones de deshidratación. (Geankoplis, 2017)

Según (Geankoplis, 2017) explica de tres fases por las cuales pasa el producto para su deshidratación, la primera de precalentamiento donde se encuentra a una temperatura menor a la que se evapora el aire, la fase de velocidad constante la misma que empieza a eliminar el agua de la fruta y termina esta fase cuando llega al punto crítico de humedad en una fruta y la última fase es la considerada de velocidad decreciente la cual muestra como baja el nivel de secado.

La transferencia de calor y masa en alimentos depende de Factores externos: Temperatura, presión, humedad y velocidad del medio de secado. Estos son bien conocidos y existen ecuaciones de relativo fácil uso para su manejo.

De acuerdo con la fuente (De Michelis & Ohaco, 2018) Elementos internos: estos son poco conocidos aún, debido a la complejidad generada en la posibilidad de transportar agua hacia la superficie del producto.

Su método matemático riguroso es muy complicado ya que se ponen en juego muchos mecanismos de transporte. Durante la ocurrencia de los fenómenos de transferencia de calor y masa, también se manifiestan fenómenos de degradación. Estos últimos ocurren a muy alta velocidad ya que se trabaja a temperaturas relativamente altas. Por ello debe tenderse a secar lo más rápido posible.

En (De Michelis & Ohaco, 2018) se puede ver los factores a los cuales depende la transferencia de calor, los externos con ecuaciones de fácil manejo y los internos a pesar de no ser muy conocidos afectan en el proceso de pasar agua hacia la parte superior del fruto, como son manejadas a muy altas velocidades tienden a secar muy rápido.

2.2.3. Factores que afectan el proceso de deshidratación.

Los principales elementos que pueden afectar el proceso de deshidratación son la temperatura y la velocidad de aire, las condiciones del aire de entrada, el estado de maduración, corte y espesor de la fruta.

Si la temperatura y la velocidad de aire son muy bajas, el tiempo de proceso se ve afectado, pudiéndose desarrollar al no haber las mejores condiciones para la transferencia de calor. En cuanto al fase de la fruta, su estado de maduración es una variable de proceso, porque según este pueden trastornar propiedades de la fruta. El corte y grosor de la fruta se ven reflejados en la homogeneidad del producto y la estética del mismo. (Santana Lozano & Cubillos Ortiz, 2016)

En (Santana Lozano & Cubillos Ortiz, 2016) plantean que los factores para el proceso de deshidratación pueden ser afectados, por la temperatura, la velocidad, el corte de la fruta, entre otras cosas ya nombradas en su cita, lo cual muestra que durante el proceso de deshidratación se debe corregir toda variable que pueda alterar al producto final.

2.2.4. Balance De Energía

Se especula que el balance de energía se fundamenta en la ley de la conservación de la energía y para ejecutar el balance se deben considerar hipótesis como:

- Gran parte de la energía es usada para evaporar el agua del sólido, por ende, la velocidad de deshidratación se considera constante.
- Se considera el proceso de deshidratación como ideal.

2.3. Análisis matemático

Un modelo matemático es una representación matemática de la realidad que puede utilizarse para tomar mejores decisiones o para comprender una situación compleja.

El modelo matemático de programación lineal permite encontrar la mejor forma de asignar recursos, generalmente, escasos a diversas actividades que compiten por ellos. (Portilla W., 2018)

Existen sinnúmero clases de modelos, entre ellos están los modeladores asentados en la física. El punto de partida para estos modelos son las leyes físicas universales que deben describir los fenómenos físicos que se presume. Se aprueban con datos experimentales, pero éstos no necesariamente tienen que existir antes de la modelación. (Ortiz Jerez, 2014)

Según (Ortiz Jerez, 2014) el modelo matemático es un sistema con la capacidad de describir las características de un proceso basándose en leyes de matemáticas y física mundiales. Para ser aprobados dichos modeladores deben pasar por varios ensayos.

En general, los modelos matemáticos son muy ventajosos en el diseño y análisis de procesos de deshidratación de alimentos con transferencia simultánea de humedad y calor. Estos pueden dividirse en tres grandiosos conjuntos: (i) aquellos que involucran ecuaciones empíricas admitidas para procesos específicos; (ii) aquellos basados en modelos básicos de difusión de masa y calor, y (iii) un grupo de modelos más exhaustivos que relaciona ecuaciones de transporte de energía, masa y momento con todos los flujos interactuando termodinámicamente. Una experiencia común es el modelado del material porque es posible anunciar la repartición de temperatura y humedad instantánea dentro del mismo. Muchos modelos de transferencia simultánea de masa y calor en procesos de secado de frutas y vegetales se han obtenido. (Ortiz Jerez, 2014)

Para (Ortiz Jerez, 2014) los modelos matemáticos realizan una gran función en los procesos de secado de frutas y verduras, muestra a demás tres tipos mencionados en la cita, los cuales se especifican según el objetivo, el más común es aquel que se predice la distribución de temperatura y humedad dentro del producto.

El modelo de regresión lineal múltiple (ecuación 3) es semejante al modelo de regresión lineal simple (ecuación 2), con la única diferencia de que surgen más variables explicativas como se exponen en las ecuaciones 2 y 3.

Según (Rojo Abuín, 2017) en la regresión lineal múltiple se utilizar más de una variable explicativa; esto nos va a ofrecer la ventaja de utilizar más información en la construcción del modelo y, consecuentemente, realizar estimaciones más precisas.

2.3.1. Coeficiente de relación

De acuerdo con (JMP, 2022) El coeficiente de correlación es la medida específica que cuantifica la intensidad de la relación lineal entre dos variables en un análisis de correlación. En los informes de correlación, este coeficiente se simboliza con la r .

El coeficiente de correlación r es un valor sin unidades entre -1 y 1. La significancia estadística se indica con un valor p . Por lo tanto, usualmente las correlaciones se escriben con dos números clave: $r =$ y $p =$.

- Cuanto más se aproxima r a cero, más débil es la relación lineal.
- Los valores de r positivos indican una correlación positiva, en la que los valores de ambas variables tienden a incrementarse juntos.
- Los valores de r negativos indican una correlación negativa, en la que los valores de una variable tienden a incrementarse mientras que los valores de la otra variable descienden.
- Los valores 1 y -1 representan una correlación "perfecta" positiva y negativa, respectivamente. Dos variables perfectamente correlacionadas cambian conjuntamente a una tasa fija. Decimos que tienen una relación lineal; cuando representados en un gráfico de dispersión, todos los puntos correspondientes a los datos pueden conectarse con una misma línea recta.
- El valor p nos ayuda a determinar si podemos o no concluir de manera significativa que el coeficiente de correlación de la población es diferente a cero, basándonos en lo que observamos en la muestra.

2.3.2. Regresiones lineales simples

De acuerdo con (Gonzalez, 2018) La Regresión Lineal es una técnica paramétrica utilizada para predecir variables continuas dependientes, dado un conjunto de variables independientes. Es de naturaleza paramétrica porque hace ciertas suposiciones basadas en el conjunto de datos. Si el conjunto de datos sigue esas suposiciones, la regresión arroja resultados confiables, de lo contrario, tiene dificultades para proporcionar una precisión convincente.

Matemáticamente, la regresión usa una función lineal para aproximar o predecir la variable dependiente dada como se describe en la ec. 1.

$$y = a + bx \tag{1}$$

Donde:

y: variable dependiente o la variable a predecir

x: variable independiente o la variable que usamos para hacer una predicción

a: valor que debe ser determinado, se le conoce como coeficiente y es una especie de magnitud de cambio que pasa por y cuando x cambia.

b: constante que debe ser determinada, se le conoce como intercepto porque cuando x es igual a 0, entonces $y = b$.

Se llama simple porque solo hay una variable independiente involucrada, que vendría siendo “x”. El objetivo de la regresión lineal simple es localizar la mejor recta de ajuste de entre todas las posibles dentro de la nube de puntos como se expone en la figura 2. Dispersión en regresión simple:

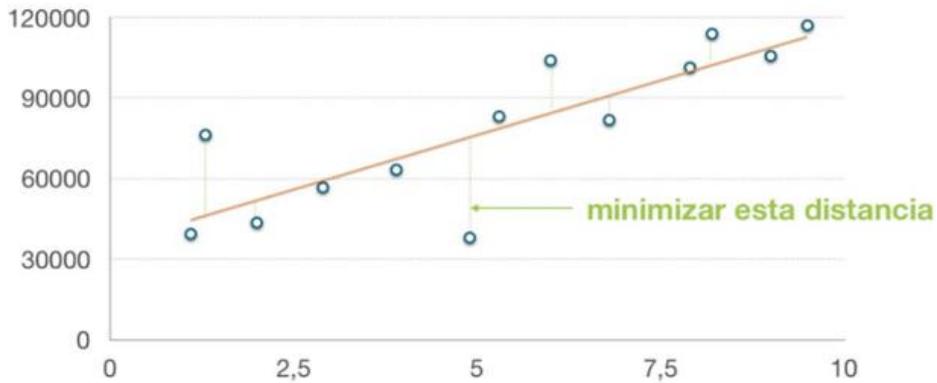


Figura 2 Dispersión en regresión simple
Fuente: (Gonzalez, 2018)

2.3.3. Regresiones lineales múltiples

De acuerdo con (Novales, 2010) En la ingeniería constantemente se requiere la realización de regresiones lineales, pero en ciertas ocasiones es más relevante e importante desarrollar regresiones lineales múltiples, ya que en muchas ocasiones una variable depende de más de un parámetro. Matemáticamente, este problema puede representarse bajo la ecuación. 2.

$$y(x_1, x_2) = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 \quad (2)$$

En la cual:

y: Variable de salida o variable dependiente

x_1 : Variable de ingreso, variable controlada o independiente

x_2 : Segunda variable de entrada, variable controlada o variable independiente

Para hallar los valores de las constantes α_0 , α_1 y α_2 , se debe resolver el sistema de ecuaciones de la ec. 3.

$$C * a = b \quad (3)$$

En la cual:

C: matriz de los coeficientes

a: Vector correspondiente a las constantes del ajuste (vector que contiene $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$)

b: Vector de los términos independientes del sistema

Para determinar las matrices C y b, se debe construir la matriz R, la cual viene dada por la ec. 4.

$$R = \begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,n} \end{matrix} \quad (4)$$

Donde:

n: Número total de datos

Y posteriormente se obtienen C y b, con las ec. 5 y 6.

$$C = R * R^T \quad (5)$$

$$b = R \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

Por ende, la solución vendría siendo la ec. 7.

$$a = C^{-1} * b \quad (7)$$

Inmediatamente de conseguir los coeficientes de regresión lineal, se debe establecer el coeficiente de determinación (R^2) para conocer cuan bien concuerda la ecuación a los datos experimentales. Para ello debe utilizarse la ec. 8.

$$R^2 = 1 - VNE/VT \quad (8)$$

En la cual:

VNE: Varianza no explicada

VT: Varianza total

Por último, para calcular VNE y VT, se deben utilizar las ec. 9 y 10.

$$VNE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (9)$$

$$VT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (10)$$

En la cual:

y_i : Dato i-ésimo de la variable dependiente

\hat{y}_i : Dato i-ésimo estimado por la ecuación de ajuste

\bar{y} : Promedio de los datos de la variable dependiente

Si R^2 es próximo a 1, entonces la ecuación representa perfectamente a los datos experimentales además estos se puedan predecir a partir de la misma son confiables, este coeficiente es muy significativo pues establece qué porcentaje de la varianza de la variable dependiente es expuesto por el modelo de regresión además es un coeficiente adimensional; el cual no se ve afectado por transformaciones lineales de las variables; por ello, si cambiamos las unidades de medida, el coeficiente de determinación permanecerá invariante.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Caracterización del Área de Estudio

El desarrollo de la investigación acerca de la optimización del proceso de secado en uvilla *Physalis peruviana* L. en la empresa de Terrafertil S.A se ejecutó en el laboratorio de análisis de la planta de Terrafertil. Las características ambientales donde se ejecutó el experimento se detallan en la tabla 1.

Tabla 1 Datos ambientales Tabacundo

Localización	Descripción
Provincia	Pichincha
Cantón:	Pedro Moncayo
Altitud:	2800 m.s.n.m
Humedad relativa promedio:	60%
Precipitación:	916.6 mm/año
Temperatura media:	13.5 °C

Fuente: (INAMHI, 2021)

3.2. Materiales y Equipos

Para el desarrollo de la presente investigación los instrumentos y dispositivos que se utilizaron en la experimentación se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2 Instrumentos y equipos a utilizar

Instrumentos	Equipos
Archivos y documentos de la normativa ISO 17025	Estufa
Capsulas de porcelana	Computadora
Tijera	Cámara
Pinza para capsulas de porcelana	Desecador
	Balanza electrónica
	Calibrador
	Horno Blassy

Fuente: Elaboración propia

3.3.1 Diseño de un esquema metodológico para el análisis del contenido de humedad en uvilla orgánica deshidratada en Terrafertil S.A.

Para el desarrollo del método gravimétrico en fruta deshidratada se ocupó el método definido por la AOAC (1999), para determinar el porcentaje de humedad en fruta deshidratada cuyos pasos se describen a continuación:

- a) Secar el recipiente vacío en el horno a 105 °C durante 3 h, transcurrido el tiempo pasar el plato al desecador hasta que se enfríe.
- b) Pesar el recipiente y anotar su peso.
- c) Pesar aproximadamente 3 g de la muestra al plato. Extender la muestra a la uniformidad y registrar el valor del pesaje.
- d) Colocar el recipiente con la muestra en el horno durante 3 horas a 105 ° C.
- e) Después del secado colocar la muestra en el desecador hasta que se enfríe la muestra en el transcurso de 15 minutos finalmente sacar y volver a pesar el plato y su muestra seca, registrar el valor del pesaje.
- f) Finalmente, los datos obtenidos son registrados en la siguiente ecuación:

$$\text{Cálculo Humedad (\%)} = \frac{w1 - w2}{w1} * 100 \quad (11)$$

Dónde:

W1 = peso (g) de la muestra antes de secar

W2 = peso (g) de la muestra después del secado

El método gravimétrico se emplea en muestras de uvillas deshidratadas con su muestra patrón o blanco la cual es llamada así por que desconoce su valor de humedad por parte del analista del laboratorio interno. La misma que sirvió para tener una estimación más real descartando los errores que pueden aparecer en un análisis de muestras de rutina. A continuación, se describe con más detalle los objetivos mencionados en la tabla 3. El esquema metodológico fue desarrollado bajo las condiciones de (Eurolab España. P.P. Morillas y colaboradores., 2016).

Tabla 3 Objetivos para realizar el esquema de la validación en un método gravimétrico

Parámetro	Objetivo Establecido
Veracidad (recuperación)**	(100 ± 10) %
Precisión (repetibilidad) %CV	<10%
Precisión (reproducibilidad) %CV	<10%
Exactitud	Z score ± 2
Incertidumbre	< 30%

Fuente: (Eurolab España. P.P. Morillas y colaboradores., 2016)

Veracidad

Se procedió a comparar el valor medio de la humedad obtenidos por los analistas de la empresa de estudio, con el valor de referencia presentado por el laboratorio externo considerado para el proceso de validación. La diferencia en valor absoluto

de los valores mencionados anteriormente es lo que se define como sesgo. Este último valor refleja la veracidad del proceso desarrollado, el mismo que según (Eurolab España. P.P. Morillas y colaboradores., 2016), no debe exceder en un <10%, ya que valores superiores a este implican que existió errores involucrados a los procesos que se encuentran asociados al método. Una de las evaluaciones para analizar la veracidad en un método es mediante la obtención de los valores esperados de los materiales de referencia ensayados. Para ello se puede utilizar material de referencia certificado, un material de referencia (MR) o un calibrador de valor conocido. El material es sometido a análisis de repetición del método donde se estima la concentración media del analito y con el valor obtenido se puede determinar el porcentaje de recuperación.

Adicionalmente, la veracidad puede verse afectada por la precisión del método y la incertidumbre de los valores de referencia, por lo que desarrollar un procedimiento estandarizado y meticuloso, permitirá alcanzar el rango de veracidad deseado. De acuerdo (Eurolab España. P.P. Morillas y colaboradores., 2016) Como punto neutro se analizó una muestra referencial conocida y con ayuda de los intervalos de aceptación se determinó que el porcentaje de recuperación trabajo definiendo el rango para veracidad valores de (90 - 110) %.

Repetibilidad

Consistió en analizar 5 muestras de uvilla de 3 g cada una, en la misma balanza analítica, por el mismo analista, en el mismo laboratorio, en un período corto de tiempo. Una vez que se realizó la parte experimental, se procedió a determinar el coeficiente de variación (CV) de acuerdo con la ecuación 12 que se describe a continuación, para el desarrollo de la formula fue necesario el cálculo de la media que se expresa con la ecuación 13.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (12)$$

Donde:

$x = Variable$

$x_i =$ Observacion numero i de la variable x

$N =$ numero de observaciones

$\bar{x} =$ Media de la variable x

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{N} \quad (13)$$

Donde:

$x =$ Variable

$N =$ numero de observaciones

Los datos experimentales fueron procesados mediante un software digital, aplicando las ecuaciones 12 y 13, que según (Hernández Cruz, 2020) ayuda para la toma de decisiones acerca de sucesos que se quieren comparar y tiene la ventaja de que se puede representar en porcentaje y sin unidades en un espacio controlado, con variables definidas y condiciones estables, el CV no debe exceder del 10%, ya que según (Loaiza, 2013) A mayor valor del coeficiente de variación mayor heterogeneidad de los valores de la variable; y a menor C.V., mayor homogeneidad en los valores de la variable.

Reproducibilidad

El desarrollo de este proceso es similar al de repetibilidad con ciertas diferencias, en la repetibilidad el proceso de cuantificación de la humedad lo desarrolla un mismo analista. Para la precisión la cuantificación debe desarrollarse por diferentes analistas, además de cambiar el equipo con el que se trabaja y se debe realizar en diferentes días de análisis. De esta manera, se realizó un cronograma para definir el día en que cada analista cuantificaría la humedad, evitando que existan largos períodos de tiempo entre cada cuantificación.

Una vez desarrollada la fase experimental, se calculó el CV con las mismas ecuaciones explicadas en el literal anterior. Según el coeficiente de variación

permite comparar precisiones entre varios métodos, no obstante, depende del valor numérico del promedio al cual se refiere. Algunos autores plantean que hoy en día se requiere de un laboratorio en el cual la reproducibilidad este por debajo del 5 % para determinaciones puramente químicas oscilan en el rango 3-4 % y por debajo de estas y para las pruebas enzimáticos alrededor del 10%

Exactitud

Para el desarrollo de este parámetro se procedió a tomar una muestra de 1 kilogramo donde se dividió en dos partes iguales, una de ella fue enviada al laboratorio externo para ser examinada, la otra parte se procedió a analizar en el laboratorio interno de Terrafertil con los datos obtenidos en ambos laboratorios se procede a comparar los resultados, donde de acuerdo a (Guía de validación de métodos analíticos, 2013) se definió un límite de ± 2 o 98% - 102% de recuperación

Incertidumbre

Para calcular la incertidumbre de las mediciones que se asociaron a todas las fuentes descritas en el diagrama de causa y efecto donde se calculó el cuadrado de la incertidumbre obtenida, después se determinó la incertidumbre total combinada, una vez que se obtuvo la incertidumbre final expandida, con un nivel de confianza aproximadamente del 95%, con un factor de cobertura $k=2$.

3.3.2 Determinación experimental de los parámetros necesarios para la simulación matemática del proceso de deshidratación de la uvilla *Physalis peruviana* L.

El proceso fue llevado a cabo utilizando uvilla (*Physalis peruviana* L) en estado de madurez 4 clasificada según la escala de colores de la (Norma Técnica Colombiana NTC 4 580, 1999). Durante 7 semanas se recibió la materia prima de diferentes proveedores (uno por semana), provenientes de la provincia de Imbabura. Cada semana se tomó una muestra de 500 g, asegurando que no presentaran golpes ni raspaduras, una vez seleccionadas, se procedió a lavarlas con agua potable. A cada uvilla se le midió el diámetro y su peso, para asegurar que exista uniformidad entre

ellas, posteriormente fueron colocadas en una bandeja de acero inoxidable de 30x30 cm como se describe en la figura 12.



Figura 3 Bandeja para deshidratación
Fuente: Autor

Para evitar que las mismas se mezclaran durante el secado, se utilizó una barrera física que asegurara la trazabilidad de las muestras como se observa en la figura anterior. De cada clasificación siguiendo (INEN 2 485, 2009), que se detalla en la tabla 4 donde se tomaron 4 uvillas, para cuantificar la humedad inicial por duplicado, y el resto del lote se ingresó al horno como se muestra en la figura 4.



Figura 4 Ingreso de uvilla al horno de procesamiento

Fuente: Autor

Tabla 4 Clasificación de la uvilla en la bandeja de procesamiento

CALIBRE	Diámetro ecuatorial	Masa promedio sin
	mm	capuchón (g)
Grande	>22	>2.8
Mediana	18-22	2.8
Pequeña	>18	<1.8

Fuente: (INEN 2 485, 2009)

Luego se configuró en el equipo un tiempo de procesamiento de 7 horas a una temperatura promedio de 90 °C. Al finalizar el secado, se tomó una muestra homogénea de 8 uvillas por clasificación, a las cuales se les midió la humedad final. Se consideró también clasificar las uvillas en función al proveedor de estas, y se generó un set de datos, que fueron utilizados posteriormente para el modelado matemático. A partir de los datos y de la fase experimental, se determinó cuales variables debían efectivamente considerarse para el modelado.

Además, como parte de este objetivo se realizó un balance de energía para determinar el calor perdido durante el proceso de secado de la uvilla, con el

principio de energía o también llamado primer principio de Termodinámica. El sistema de estudio se puede analizar tomando en consideración el esquema de la figura 5.

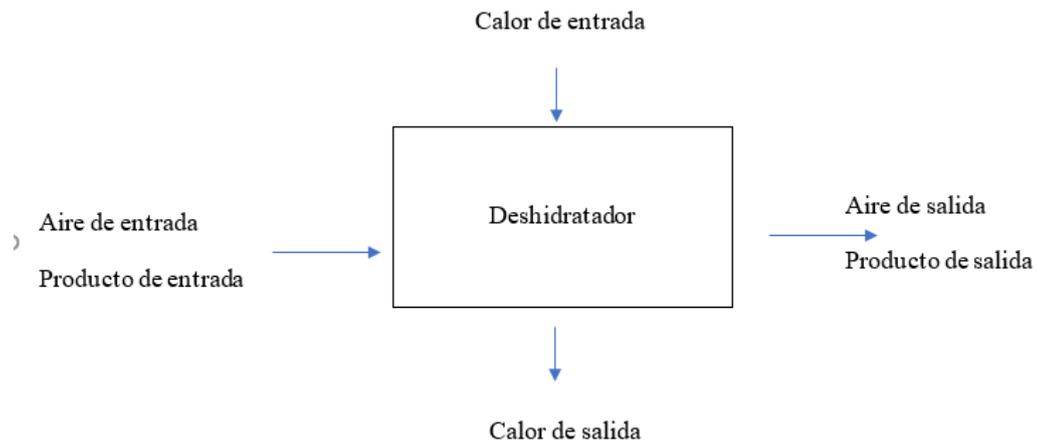


Figura 5: Balance de energía

Desarrollando el balance de energía del sistema, se alcanza la ecuación 14.

$$Q_{ent} + L_1 h_1 + G_1 h_{s1} = L_3 h_3 + G_3 h_{s3} + Q_{perd} \quad (14)$$

Donde:

Q_{ent} : Calor cedido al sistema $\frac{kcal}{h}$

L_1 : cantidad de aire seco a la entrada $\frac{kg \text{ aire seco}}{h}$

L_3 : cantidad de aire seco a la salida $\frac{kg \text{ aire seco}}{h}$

G_1 : Masa de solido seco por hora a la entrada $\frac{kg}{h}$

G_3 : Masa de solido seco por hora a la salida $\frac{kg}{h}$

h_{s1} : Entalpia del solido a la entrada $\frac{kcal}{kg}$

h_{s3} : Entalpia del solido a la salida $\frac{kcal}{kg}$

Q_{perd} : Perdida de calor por las paredes $\frac{kcal}{h}$

Considerando que no existe acumulación de aire en el equipo ($L_1 = L_3 = L$) y tomando en cuenta que la masa de sólido las uvillas no varía por el proceso de secado ($G_1 = G_3 = G$), la ecuación 14 se puede simplificar a la ecuación 15.

$$Q_{ent} = L * (h_3 - h_1) + G * (hs_3 - hs_1) + Q_{perd} \quad (15)$$

Tomando en cuenta datos experimentales de la literatura, el calor perdido por las paredes se puede considerar igual al 10% del calor entregado, mientras que para el cálculo de las entalpías se ocuparon las ecuaciones 16 a 19.

$$h_1 = Cp_{aire} * T_{bs1} + \lambda_0 + Cp_{vapor} * T_{bs1} * Y_1 \quad (16)$$

$$h_3 = Cp_{aire} * T_{bs3} + \lambda_0 + Cp_{vapor} * T_{bs3} * Y_3 \quad (17)$$

$$h_{s1} = Cp_{solido} * T_{bs1} + X_f + Cp_{agua} * T_{bs1} \quad (18)$$

$$h_{s3} = Cp_{solido} * T_{bs3} + X_f + Cp_{agua} * T_{bs3} \quad (19)$$

3.3.3 Evaluación del efecto del proceso de deshidratación mediante modelación matemática en la uvilla deshidratada.

Para el desarrollo del modelado matemático se manejaron los datos obtenidos en la experimentación, los cuales fueron alineados a un modelo de regresión lineal múltiple de acuerdo con sus características, para ello se utilizó la metodología descrita en el marco teórico con la ayuda del software digital. Dado que es necesario cuantificar la confiabilidad del modelo desarrollado, del total de datos experimentales, se utilizó el 88% en el desarrollo del modelo, mientras que el restante fue utilizado para validarlo.

Luego de generado el modelo, se determinó el coeficiente de regresión, que según la literatura debe ser cercano a 1 o 100%, lo que indica que el modelo representa el 100% de los datos experimentales. Posteriormente, el modelo fue aplicado en los

datos que se separaron para la validación. Y se comparó el resultado obtenido por la ecuación con los presentados a nivel de planta. En ambos procedimientos se determinó el coeficiente de regresión lo que proporciona la confiabilidad del modelo desarrollado.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la información se basó en el estudio, experimentación y tabulación de datos los mismos que fueron sustentados con revisión bibliográfica y serán descritos a continuación.

4.1 Diseñar el esquema metodológico para el análisis del contenido de humedad en uvilla orgánica deshidratada en la empresa de Terrafertil S.A.

El trabajo experimental para desarrollar el esquema metodológico fue realizado por 5 técnicos, debido a los parámetros de validación como reproducibilidad y repetibilidad que se maneja en el método gravimétrico además de presentar confiabilidad en los datos finales. A continuación, se observa en la tabla 5 los parámetros necesarios para el método gravimétrico de humedad en uvilla deshidratada.

Tabla 5. Objetivos de la validación en el método gravimétrico.

Parámetro	Objetivo Establecido
Veracidad (recuperación)**	(90 - 110) %
Precisión (repetibilidad) %CVr	<10%
Precisión (reproducibilidad) %CVR	<10%
Exactitud	Z score +- 2
Incertidumbre	< 30%

Una vez determinados los parámetros a ser cuantificados, se ejecuta el análisis de la validación del método gravimétrico; los resultados del ensayo muestran que los niveles de repetibilidad son válidos, debido a que el coeficiente de variación (CVr) es menor del 10%, lo que muestra una alta homogeneidad en los datos recolectados como se observa a continuación en la tabla 6.

Tabla 6 Declaración de la validación

Repetibilidad	Reproducibilidad	Veracidad	U (%)
%CVr	%CVR	Recuperación (90-110%)	$k \leq 2$
3.88	5.05	100	1.85

De acuerdo (Universidad Tecnológica de Pereira, 2007), si el coeficiente de variación de la reproducibilidad es mayor al de la repetibilidad, las causas pueden ser: El operador necesita mejor entrenamiento en cómo utilizar y como leer el instrumento, la indicación del instrumento no es clara, no se han mantenido condiciones de reproducibilidad (ambientales, montaje, ruidos, etc.) y/o el instrumento de medición presenta deriva. Sin embargo, los valores de coeficiente de variación se encuentran por debajo del 10%, que por literatura indica un correcto manejo experimental. Por lo anteriormente expuesto el esquema metodológico planteado en la investigación cumple con la regulación y requisitos expuestos en la Guía de Laboratorio para Validación de Métodos y Temas Relacionados. (Eurolab España. P.P. Morillas y colaboradores., 2016).

Por otro lado, Según (CENAM, 2008) el porcentaje de recuperación tiene que ser igual o lo más cercano a 100. Como se observa en la tabla 6, para esta investigación, la recuperación fue del 100%, lo que implica que el método planteado permitió reproducir la medición de la humedad exactamente igual al del laboratorio de referencia certificado con el que se comparó. Este resultado también nace de los bajos valores de CV alcanzados (en referencia a 10%).

De acuerdo con (Laboratorios, 2012) el factor de cobertura (k) debe ser igual o menor a 2 %, lo que también se pudo alcanzar en esta investigación, esto implica que el método propuesto presenta la confiabilidad necesaria para poder ser validado.

4.2 Determinar experimentalmente los parámetros necesarios para la simulación matemática del proceso de deshidratación de la uvilla *Physalis peruviana* L.

Para la determinación de los parámetros para la simulación matemática, se partió de un análisis de las variables que rigen el proceso de deshidratación, para lo cual se evaluó la recepción de la materia prima hasta que la misma esta lista para ser empacada. Se evaluaron siete proveedores, los cuales abastecen de uvilla fresca para la producción de la empresa de estudio, quienes deben asegurar la rotación oportuna de la materia prima. Adicionalmente, de acuerdo con la bibliografía (INEN 2 485, 2009), se consideraron variables como el diámetro, peso de la uvilla y humedad en la fruta fresca (humedad inicial). De esta manera, se obtuvieron 169 datos (ver anexo 1), los cuales fueron registrados en una tabla digital para luego ser examinados y poder considerar la predicción de la humedad final a partir de estas variables.

Sin embargo, el comportamiento diario de la empresa obliga a que los proveedores no sean constantes entre un lote de producción y otro, debido a numerosas causas. Es por ello por lo que se retiró este parámetro como variables a considerar en el modelo matemático del estudio. Aunque igualmente se tomaron los datos del proveedor, posteriormente se evidenció al momento de desarrollar el modelo matemático que no existía influencia. Así, se tomaron en cuenta el diámetro, peso y humedad de la uvilla fresca. Adicionalmente, para el desarrollo de este objetivo se realizó un balance de energía, focalizando las variables del proceso de secado más importantes como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros obtenidos de carta psicrométrica

Parámetros	Símbolo	Cantidad	Unidades
-------------------	----------------	-----------------	-----------------

Temperatura de secado	Ts	90	°C
Humedad del producto antes del secado	W1	81.5	%
Humedad del producto después del secado	W3	15	%
Temperatura de entrada del material	Tmat	25	°C
Temperatura de bulbo seco	Tbs1	20	%
Temperatura de bulbo húmedo	Tbh1	15	°C
Densidad de ocupación del producto		0.065	g/ cm ²

Para el balance de energía del horno, se toma en cuenta las ecuaciones que rigen el proceso, iniciando por el cálculo de las entalpías (Tabla 8), como refieren las ecuaciones descritas en la metodología (16 a 19).

Tabla 8. Entalpias de entrada y salida de aire y uvilla durante el secado.

Entalpia	Resultados
Aire en el ingreso del secador	12.80 kcal/kg
Aire a la salida del secador	25.70 kcal/kg
Sólido a la entrada	98.56 kcal/kg
Sólido a la salida	44.74 kcal/kg

Al calcular mediante la ecuación se puede obtener que la energía suministrada al sistema es de 1911 kcal/h.

4.3 Evaluación del efecto del proceso de deshidratación mediante modelación matemática en la uvilla deshidratada.

Para cumplir con este objetivo, se trabajó con los datos recopilados en la sección anterior (169 datos). Estos datos fueron separados aleatoriamente para utilizar el 12% para la validación del modelo y el restante 88% para la construcción según manifiesta (MathWorks, 2022). De esta manera, utilizando software especializado se aplicaron las nociones matemáticas de la regresión lineal múltiple y se determinó la ecuación 20.

$$H_f = 0.1727P + 4.6659D + 1.0828H_0 - 85.0468 \quad (20)$$

Donde

H_f : humedad final (%)

P: peso (g)

D: diámetro (cm)

H_0 : humedad inicial (%)

Se encontró un coeficiente de regresión del 0.95, lo que indica que la confiabilidad de la ecuación encontrada es del 95% únicamente para los datos considerados durante la fase experimental. De acuerdo con la literatura, valores de coeficientes

de regresión superiores al 70% se consideran como buenas representaciones matemáticas (Luis Martínez, Jesús Linares, Rafael Martínez, Haydee Oliva, 2015). Por lo que se puede inferir que las variables tomadas en cuenta en el objetivo anterior efectivamente son representativas en el proceso de estudio, además se evidencia que no es necesario contemplar el proveedor para el modelo matemático.

Por otro lado, a pesar de obtener resultados favorables, es necesario validar el modelo con datos no considerados durante la construcción de este. Es por ello por lo que con el 12% de los datos experimentales restantes se determinó el promedio de los errores que se genera entre los valores predichos y los valores reales. Es así como se alcanzó un valor de 0.66% (ver anexo 2) además se trabajó la definición del coeficiente de regresión para la validación y se alcanzó un 97% de confiabilidad (ver anexo 3). En definitiva, se puede concluir que el modelo desarrollado para el trabajo representa confiablemente la deshidratación de la uvilla llevada a cabo en la empresa Terrafertil.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Al término de la revisión documental efectuada se obtienen como conclusiones las siguientes:

- El diseño del esquema metodológico permitió validar el proceso de medición de humedad de uvilla de la empresa Terrafertil S.A., asegurando la calidad del producto final.
- De los parámetros propuestos en la investigación, se identificaron el peso, diámetro y humedad inicial como los más relevantes para poder desarrollar el modelado matemático de la deshidratación de la uvilla, debido a que estos participan directamente en el proceso de secado para la elaboración del producto final.
- El modelado matemático encontrado con un coeficiente de regresión del 95%, permitió verificar que las variables consideradas representan el sistema. Así el proceso de deshidratación se ve afectado por el peso, diámetro y humedad inicial de la uvilla.

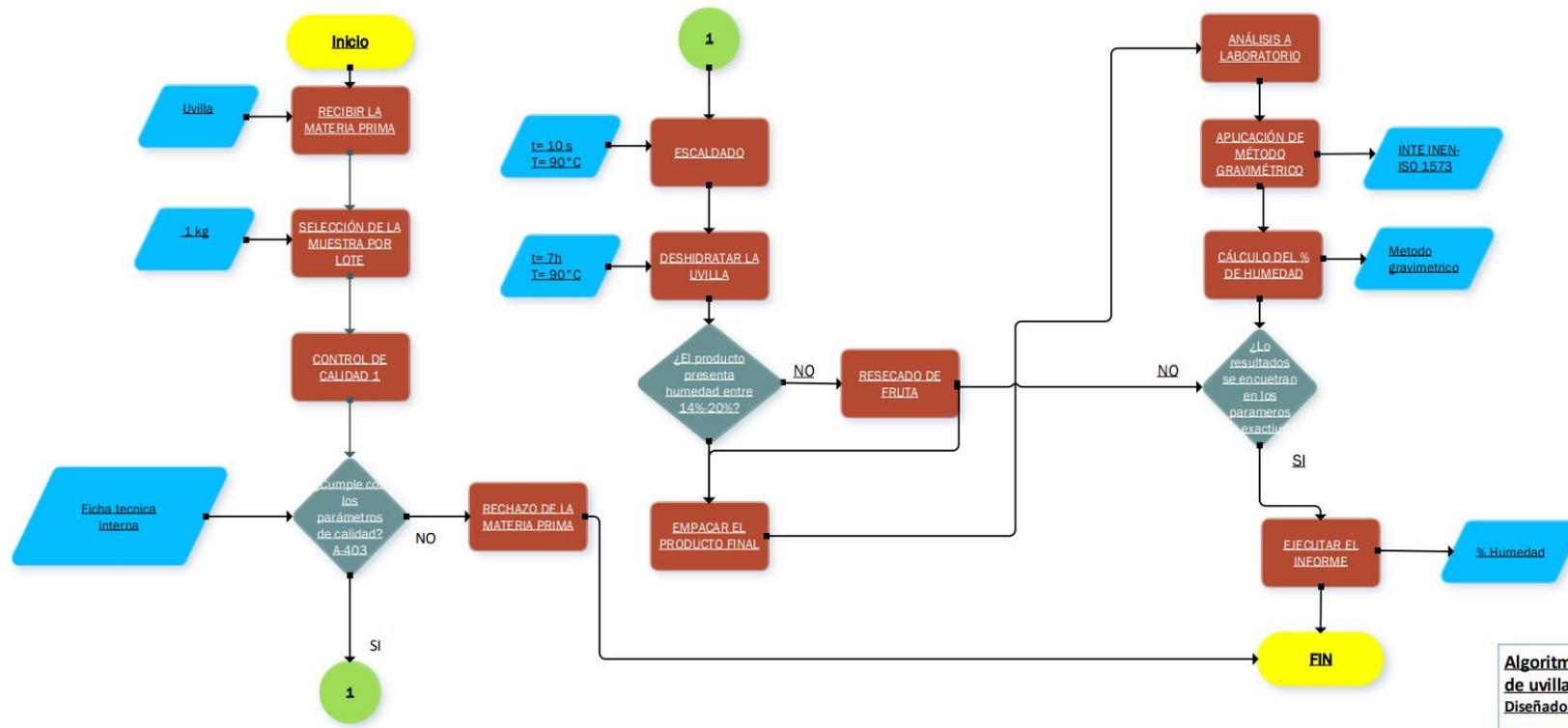
5.2 Recomendaciones

Recomendaciones para futuros estudios:

- Realizar un modelado matemático con un índice de madurez diferente.

ANEXOS

Anexo 1. Esquema metodológico de deshidratación



Algoritmo de Deshidratación de uvilla
Diseñado por: Paola Abalco

Anexo 2. Base de datos obtenidos en la experimentación

PROVEEDOR	PESO	DIAMETRO	HUMEDAD INICIAL	HUMEDAD FINAL
1	8,80	2,5	82,48	20,05
1	8,80	2,5	83,00	20,05
1	8,50	2,5	82,00	20,05
1	8,00	2,4	83,66	18,92
1	8,00	2,4	83,06	18,80
1	7,10	2,2	82,00	17,38
1	7,10	2,2	82,00	17,32
1	7,00	2,2	81,75	16,85
1	7,00	2,2	81,74	16,33
1	7,00	2,2	81,73	16,33
1	6,29	2,1	81,66	15,14
1	6,20	2,1	81,66	15,38
1	6,20	2,1	81,56	15,18
2	8,50	2,5	83,15	20,05
2	8,30	2,4	82,77	20,05
2	8,10	2,4	83,66	20,05
2	7,10	2,2	81,45	17,33
2	7,00	2,2	81,17	16,85
2	6,64	2,1	81,49	15,66
2	6,34	2,1	81,21	15,13
2	6,28	2,1	81,21	15,08
2	4,20	2,0	80,05	14,11
2	3,90	1,8	80,05	12,98
2	3,80	1,8	80,05	12,98
2	3,70	1,8	80,05	12,98
2	3,70	1,8	80,05	12,98
2	3,50	1,7	80,05	12,95
2	3,40	1,8	80,07	12,93
3	9,78	2,5	82,72	20,05
3	9,49	2,4	82,32	19,73
3	8,40	2,4	82,77	20,27
3	8,16	2,4	82,97	19,72
3	8,15	2,4	82,97	19,72
3	8,08	2,4	82,96	19,12
3	8,08	2,4	82,96	18,99
3	6,64	2,1	81,49	15,66
3	6,53	2,1	81,49	15,66
3	6,49	2,1	81,49	15,66
3	6,38	2,1	81,21	15,66

3	6,34	2,1	81,21	15,13
3	6,28	2,1	81,21	15,08
3	6,25	2,1	81,21	15,08
3	6,18	2,1	80,98	15,08
3	6,00	2,1	80,93	15,14
3	6,00	2,1	80,93	15,14
3	6,00	2,1	80,93	15,14
3	6,00	2,1	80,93	15,14
3	6,00	2,1	80,93	15,14
3	6,00	2,1	80,93	15,14
3	4,87	2,0	80,48	14,52
3	4,74	2,0	81,00	14,52
3	4,74	2,0	80,48	14,52
3	4,65	2,0	80,48	14,52
3	4,51	2,0	80,07	14,33
3	4,48	2,0	80,07	14,33
3	4,45	2,0	80,07	14,33
3	4,38	2,0	80,07	14,33
3	4,28	2,0	80,05	14,11
3	4,26	2,0	80,05	14,11
3	4,22	2,0	80,05	14,11
3	4,08	2,0	80,05	13,98
3	4,07	2,0	80,03	13,98
3	4,00	2,0	80,03	13,08
3	4,00	2,0	80,03	13,08
4	9,80	2,5	82,81	20,50
4	9,12	2,5	82,57	19,56
4	9,07	2,5	82,50	19,45
4	7,42	2,3	82,72	18,93
4	7,31	2,3	82,72	18,93
4	7,31	2,3	82,72	18,93
4	7,28	2,3	82,72	18,93
4	7,19	2,3	82,50	18,67
4	7,17	2,3	82,50	18,67
4	7,17	2,3	82,50	18,67
4	7,13	2,3	82,50	18,67
4	7,01	2,3	82,14	17,58
4	7,00	2,3	82,14	17,58
4	7,00	2,3	82,14	17,58
4	7,00	2,3	82,14	17,58
4	7,00	2,3	82,14	17,58
4	7,00	2,3	82,14	17,58
4	6,24	2,2	81,85	15,96

4	6,22	2,2	81,85	15,94
4	6,22	2,2	81,85	15,94
4	6,14	2,2	81,85	15,94
4	6,05	2,2	81,35	15,69
4	6,04	2,2	81,35	15,94
4	6,04	2,2	81,35	15,69
4	6,00	2,2	81,35	15,69
4	6,00	2,2	81,35	15,69
4	6,00	2,2	81,35	15,69
4	6,00	2,2	81,35	15,69
4	5,15	2	80,81	14,38
4	5,11	2	80,81	14,38
4	5,07	2	80,81	13,83
5	9,24	2,5	82,61	19,85
5	8,41	2,4	82,10	20,05
5	8,30	2,4	82,77	20,05
5	8,29	2,4	81,77	20,00
5	8,27	2,4	81,77	20,00
5	8,25	2,4	82,97	20,19
5	8,20	2,4	82,97	20,05
5	8,11	2,4	82,97	19,65
5	8,01	2,4	83,03	18,65
5	7,46	2,2	81,98	18,23
5	7,03	2,2	81,17	16,47
5	7,01	2,3	82,17	16,47
5	7,00	2,2	81,17	16,47
5	7,00	2,2	81,17	16,47
5	7,00	2,2	81,17	16,47
5	7,00	2,2	81,17	16,47
5	7,00	2,2	81,17	16,47
6	9,24	2,5	82,61	19,85
6	9,12	2,5	82,57	19,56
6	9,07	2,5	82,50	19,45
6	8,41	2,4	82,15	20,28
6	8,33	2,4	82,77	20,03
6	8,30	2,4	82,10	20,03
6	8,25	2,4	82,97	20,19
6	8,20	2,4	82,97	20,15
6	8,16	2,4	82,99	19,72
6	8,08	2,4	82,96	18,99
6	8,05	2,4	82,95	18,65
6	7,31	2,3	82,72	18,93
6	7,00	2,3	82,14	17,58
6	6,24	2,2	81,85	15,96
6	6,14	2,2	81,85	15,94

6	5,15	2	80,81	14,38
6	5,11	2	80,81	14,38
6	5,07	2	80,81	13,83
7	9,80	2,6	82,50	19,96
7	9,78	2,5	82,72	20,20
7	9,49	2,4	82,32	19,73
7	8,16	2,4	82,97	19,72
7	8,08	2,4	82,96	18,99
7	7,42	2,3	82,72	18,93
7	7,19	2,3	82,50	18,67
7	7,17	2,3	82,50	18,67
7	7,00	2,3	82,14	17,58
7	7,00	2,3	82,14	17,58
7	6,49	2,1	81,49	15,66
7	6,17	2,2	81,85	15,94
7	6,07	2,2	80,98	15,14
7	6,05	2,2	81,35	15,69
7	6,04	2,2	81,35	15,94
7	6,04	2,2	81,35	15,69
7	6,00	2,2	81,35	15,69
7	6,00	2,2	81,35	15,69
7	6,00	2,1	80,93	15,14
7	6,00	2,1	80,93	15,14
7	6,00	2,1	80,93	15,14

Anexo 3. Tabla de error.

N°	PESO	VALOR	DIAMETRO	VALOR	H. INICIAL	VALOR	INTERCEPTO	H. FINAL(C)	H. FINAL(F)	% ERROR
1	0,49813	3,8	5,0572	1,8	0,5987	80,05	-46,5495	12,37	12,98	4,68
2	0,49813	9,49	5,0572	2,4	0,5987	82,32	-46,5495	19,6	19,73	0,66
3	0,49813	6,64	5,0572	2,1	0,5987	81,49	-46,5495	16,17	15,66	3,23
4	0,49813	6,25	5,0572	2,1	0,5987	81,21	-46,5495	15,8	15,08	4,80
5	0,49813	6,18	5,0572	2,1	0,5987	80,98	-46,5495	15,63	15,08	3,66
6	0,49813	6,0	5,0572	2,1	0,5987	80,93	-46,5495	15,51	15,14	2,46
7	0,49813	6,0	5,0572	2,1	0,5987	80,93	-46,5495	15,51	15,14	2,46
8	0,49813	4,87	5,0572	2,0	0,5987	80,48	-46,5495	14,17	14,52	2,38
9	0,49813	7,13	5,0572	2,3	0,5987	82,5	-46,5495	18,03	18,67	3,45
10	0,49813	7,01	5,0572	2,3	0,5987	82,14	-46,5495	17,75	17,58	0,97
11	0,49813	7	5,0572	2,3	0,5987	82,14	-46,5495	17,75	17,58	0,94
12	0,49813	6,17	5,0572	2,2	0,5987	81,85	-46,5495	16,65	15,94	4,47
13	0,49813	6	5,0572	2,2	0,5987	81,35	-46,5495	16,27	15,69	3,69
14	0,49813	5,15	5,0572	2	0,5987	80,81	-46,5495	14,51	14,38	0,91
15	0,49813	7,0	5,0572	2,2	0,5987	81,17	-46,5495	16,66	16,47	1,15
16	0,49813	8,2	5,0572	2,4	0,5987	82,97	-46,5495	19,35	20,15	3,99

17	0,49813	7	5,0572	2,3	0,5987	82,14	-46,5495	17,75	17,58	0,94
18	0,49813	6,0	5,0572	2,1	0,5987	80,93	-46,5495	15,51	15,14	2,46
19	0,49813	3,8	5,0572	1,8	0,5987	80,05	-46,5495	12,37	12,98	4,68
20	0,49813	7	5,0572	2,3	0,5987	82,14	-46,5495	17,75	17,58	0,94

Anexo 4. Validación del modelo matemático

Humedad calculada (HC)	Humedad experimental (HE)	$(HC - PROM)^2$	$(HE - PROM)^2$
12,3721859	12,98	14,298336	10,0711023
19,5999044	19,73	11,8777033	12,7913523
16,1661579	15,66	0,00016022	0,24354225
15,8042502	15,08	0,12197545	1,15240225
15,6316799	15,08	0,2722962	1,15240225
15,512081	15,14	0,41141834	1,02718225
15,512081	15,14	0,41141834	1,02718225
14,1740603	14,52	3,91818157	2,66832225
18,026361	18,67	3,50760849	6,33277225
17,7510532	17,58	2,55217616	2,03490225
17,7460718	17,58	2,53628509	2,03490225
16,653283	15,94	0,24978303	0,04558225
16,2692505	15,69	0,01339818	0,21483225
14,5111084	14,38	2,69745007	3,14530225
16,6596175	16,47	0,2561549	0,10017225
19,3464678	20,15	10,1950432	15,9720123
17,7460718	17,58	2,53628509	2,03490225
15,512081	15,14	0,41141834	1,02718225
12,3721859	12,98	14,298336	10,0711023
17,7460718	17,58	2,53628509	2,03490225
Promedio	16,1535	73,101713	75,182055
	R^2	97,2329275	

Bibliografía

- Bellón, J. M. (2018). *Correlación y regresión lineal*. Obtenido de <https://epidemiologiamolecular.com/correlacion-regresion-lineal/>
- CENAM. (2008). Obtenido de <http://qualitat.cc/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/CENAM.EMA.Validacion-verificacion.pdf>
- De Michelis, A., & Ohaco, E. (2018). *Deshidratación y secado de frutas*. Obtenido de <https://n9.cl/p2h47>
- Entidad mexicana de acreditación, a. c. (2018). *MANUAL DE PROCEDIMIENTOS CRITERIOS DE APLICACIÓN DE LA NORMA ISO/IEC 17025*. Obtenido de <https://n9.cl/g366w>
- Eurolab España. P.P. Morillas y colaboradores. (2016). *Una Guía de laboratorio para la validación de métodos y temas relacionados*. Obtenido de www.eurachem.org
- Geankoplis, C. J. (2017). *Fenomeno de transporte y operaciones unitarias*. Obtenido de <https://n9.cl/ybact>
- Giraldo Gomez, G. I. (2017). *Validación de metodos analiticos de laboratorio*. Obtenido de <https://n9.cl/tlwvh>
- Giraldo Gomez, G. I. (2017). *Validación de métodos analíticos de laboratorio*. Obtenido de <https://n9.cl/tlwvh>
- Giraldo Zuniga, A., & Aroldo, A. (Marzo de 2010). *Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (Theobroma grandiflorum) en rodajas*. Obtenido de <https://www.scielo.br/j/cta/a/HT4CM6wN7jD9Wnh7kSSHyhF/?format=pdf>
- Gonzalez, L. (30 de Noviembre de 2018). *Regresión Lineal Simple – Teoría*. Obtenido de <https://n9.cl/0xi5t>

- Guía de validación de métodos analíticos* . (2013). Obtenido de <https://acortar.link/6LASwY>
- Hernández Cruz, S. (2020). *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*. Obtenido de <https://n9.cl/f777>
- Hernández, D. (2019). *Validación de un método analítico de determinación de dopamina por cromatografía líquida de alta resoluc.* Obtenido de <https://n9.cl/akpuj>
- INAMHI. (2021). *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología*. Obtenido de <https://n9.cl/z4wsp>
- INEN 2 485. (2009). Obtenido de <https://n9.cl/v962y>
- JMP. (2022). *Portal de formación estadística*. Obtenido de <https://shortest.link/3f5E>
- Juarez, C. (2020). *The food tech*. Obtenido de <https://n9.cl/f2rcv>
- Laboratorios, I. (Enero de 2012). *Revista bionalisis*. Obtenido de <http://www.revistabioanalis.com/images/flippingbook/Rev43%20n/nota1.pdf>
- Loaiza, R. (Octubre de 2013). *COEFICIENTE DE VARIACION*. Obtenido de <https://n9.cl/vfqo36>
- Luis Martínez, Jesús Linares, Rafael Martínez, Haydee Oliva. (Diciembre de 2015). *Modelos de regresión para la predicción de propiedades de compuestos de PVC considerando los efectos de los aditivos Dosis*. Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702015000300010
- MathWorks*. (2022). Obtenido de <https://la.mathworks.com/help/deeplearning/ug/train-network-on-data-set-of-numeric-features.html>
- Morán Humani, V. (2017). *Universidad nacional agraria la Molina*. Obtenido de <https://n9.cl/vjkuc>

Norma Técnica Colombiana NTC 4 580. (1999).

Novales, A. (2010). *Análisis de regresión.* Obtenido de <https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-13-Analisis%20de%20Regresion.pdf>

Oficina de acreditación de Guatemala, C.A. (2017). Obtenido de <https://n9.cl/ijdm5>

Ortiz Jerez, M. J. (2014). *Universidad del Valle* . Obtenido de <https://acortar.link/7J0A87>

Portilla W., G. E. (2018). *Revista logos, ciencia y tecnología.* Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5177/517754458009/517754458009.pdf>

Rojo Abuín, J. M. (2017). *Regresión lineal múltiple.* Obtenido de <https://acortar.link/7R0Xvy>

Rolleri, J. L. (2019). *¿Qué son los modelos físicos?* Obtenido de <https://n9.cl/1u4rc>

Santana Lozano, D. R., & Cubillos Ortiz, D. R. (2016). *Fundación universidad de america* . Obtenido de <https://n9.cl/pc9t2>

Saraguro, R. (2018). *Aplicación de herramientas de la metodología lean manufacturing en la mejora del proceso de producción de puertas enrollables.* Obtenido de <https://n9.cl/xf027>

Skocdoplov, V. (2017). *Información tecnológica.* Obtenido de <https://n9.cl/tb6j1>

Universidad Tecnológica de Pereira. (2007). *Estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método de promedios y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la norma técnica NTC/IEC 17025.*