



Universidad Nacional  
**SAN LUIS GONZAGA**



## [Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0)

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial, siempre y cuando den crédito y licencia a nuevas creaciones bajo los mismos términos.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>



UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA  
EVALUACION DE ORIGINALIDAD



CONSTANCIA

El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud de la **TESIS** cuyo título es:

**“MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN EN LA PREDICCIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE LA HUMEDAD Y VIDA ÚTIL DURANTE EL ALMACENAMIENTO DEL ARÁNDANO EN FRIO (VACCINIUM CORYMBOSIUM)”**

Presentado por:

**YANCCEHUALLPA DONAYRE ESTEFANIA MINERVA**


**BACHILLER** del nivel **PREGRADO** de la **ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

Que. Se ha recibido del operador del programa informático evaluador de originalidad de la Facultad de Ingeniería Pesquera y de Alimentos de la UNICA, El informe automatizado de originalidad, el mismo que concluye de la siguiente manera:

**El documento de investigación APRUEBA los criterios de originalidad con un porcentaje de similitud de 08%.**

Para dar fe, se adjunta al presente el reporte de similitud de las bases de datos de iThenticate.

Pisco, 16 de diciembre del 2024

  
.....  
DR. JOSE FERNANDO FOC REAÑO  
DIRECTOR DE UNIDAD DE INVESTIGACION  
FACULTAD DE INGENIERIA PESQUERA Y DE  
ALIMENTOS

**UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA”**

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA PESQUERA Y DE ALIMENTOS**



**“Modelamiento matemático y simulación en la predicción de la transferencia de la humedad y vida útil durante el almacenamiento del arándano en frío (*Vaccinium corymbosium*)”**

**Línea De Investigación  
Ciencias Naturales, Ingeniería y Tecnologías Sostenibles**

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE  
INGENIERO DE ALIMENTOS**

**AUTOR:**

**BACH. YANCCEHUALLPA DONAYRE ESTEFANIA MINERVA**

**PISCO - ICA**

**2025**

## **DEDICATORIA**

Dedico este logro a mis padres y familia por su gran esfuerzo en concederme la oportunidad de estudiar y por su constante apoyo a lo largo de mi vida. A mis amigos y compañeros de trabajo, por sus consejos, paciencia y conocimientos que me brindaron para culminar este proyecto.

A Dios, por siempre acompañarme en este largo camino que aún queda por recorrer, con su bendición podre seguir adelante en mi carrera profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica y la Escuela de Ingeniería de Alimentos por haberme concedido el honor de pertenecer a esta gran familia de profesionales, lo cual he podido aprender gracias a sus conocimientos a los diferentes docentes que formaron parte de mi formación profesional.

A mi asesor de Tesis M.Sc. Jean Lopez Del Mar, por su vasto conocimiento y asesoría en este proyecto, gracias a su apoyo y consejos constantes durante la creación de este proyecto.

## INDICE

Dedicatoria .....	ii
Agradecimiento.....	iii
Resumne.....	vii
Abstract... ..	viii
I. INTRODUCCION .....	1
1.1 Planteamiento del problema .....	1
1.2 Antecedentes de la investigación .....	2
1.3 Bases teóricas de la investigación .....	8
1.4 Formulación del problema .....	14
1.5 Justificación e importancia de la investigación .....	14
1.6 Objetivos de la investigacion.....	15
1.7 Hipotesis de la investigacion . .....	15
1.8 Variables de la investigacion .....	16
II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA .....	17
2.1 Diseño de la investigacion .....	17
2.2 Poblacion y muestra de la investigacion.....	17
2.3 Instrumentos de recoleccion de datos .....	17
2.4 Tecnicas de recoleccion de datos .....	18
2.5 Procesamiento y analisis de datos .....	18
2.6 Materiales y metodos .....	18
III. RESULTADOS .....	25
3.1 Resultados del modelamiento matemático y simulación en la predicción de la perdida de humedad y vida útil durante el almacenamiento del arándano en frio y las gráficas de predicción correspondientes.....	25
CAPITULO IV. CONCLUSIONES .....	32
CAPITULO V. RECOMENDACIONES.....	33
CAPITULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	34
CAPITULO VII. ANEXOS.....	36

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Composición química del arándano.....	10
Tabla 2 Propiedades del Aire A 1°C.....	21
Tabla 3 Propiedades Termo Físicas del arándano .....	22
Tabla 4 Tiempo de almacenamiento y pérdida de humedad en el transporte vía marítima .....	25
Tabla 5 se presenta el tiempo de almacenamiento y el porcentaje de pérdida peso en frío, en el transporte aéreo y su correspondiente porcentaje de humedad relativa, estos datos son utilizados para la validación de la simulación.....	25
Tabla 6 tiempo de almacenamiento y pérdida de humedad en el transporte vía aérea.....	26

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 El Arándano ( <i>Vaccinium corymbosum</i> ) .....	8
Figura 2 Evolución de envíos de arándanos.....	10
Figura 3 Lenguaje de programación.....	12
Figura 4 Diagrama esquemático básico de la simulación .....	24
Figura 5 Curvas de la pérdida de peso (acumulado) en relación al tiempo.....	27
Figura 6 Curvas de la pérdida de peso (humedad) en relación al tiempo (días).....	25
Figura 7 Comparación entre valores medidos (vía área) y simulados de la pérdida de peso(%)......	29
Figura 8 Comparación entre valores medidos (vía marítima) y simulados de la pérdida de peso .....	30
Figura 9 Comparación entre las diversas curvas de la pérdida de peso (humedad) y los Simulado.....	31

## RESUMEN

El arándano es un producto que posee niveles altos de antioxidantes y tiene muchos beneficios saludables. El aumento de la pérdida de peso del producto de la fruta, se observa en los diferentes puntos de una cámara frigorífica, lo que conduce al deterioro de la calidad y seguridad de la fruta. El objetivo de este estudio fue una simulación de la pérdida de humedad (transferencia de masa) de los arándanos durante el almacenamiento y transporte en frío ( $1^{\circ}\text{C}$  y HR 75% – 82 %). El modelamiento matemático y simulación han sido codificados utilizando la plataforma de programación MATLAB versión R2017-b. Los resultados mostraron una buena concordancia entre los resultados simulados y medidos, fueron validados los datos de la pérdida de peso (humedad), con datos proporcionados de la industria de procesamiento y almacenamiento en cámaras de refrigeración y transporte tanto en vía aérea y marítima, se verificaron que la pérdida de peso en el tiempo de almacenamiento, en la vía aérea es mayor (3.79 %), con relación a la vía Marítima (1.42%) y el valor de la predicción (simulado) es de (1.92 %), por lo que es bastante aceptable. Por otra parte, también se ha estimado las relaciones de enfriamiento, como el tiempo enfriamiento a la mitad con valor de 4915.218513 seg, y la velocidad de enfriamiento instantáneo (R) de  $0.002538^{\circ}\text{C}$ .

Palabras Clave / transferencia masa humedad /modelado /simulación/

## ABSTRACT

Blueberries are a product that has high levels of antioxidants and have many healthy benefits. The increase in weight loss of the fruit product is observed at different points in a cold room, which leads to the deterioration of the quality and safety of the fruit. The objective of this study was a simulation of the moisture loss (mass transfer) of blueberries during cold storage and transportation (1°C and RH 75% - 82%). The mathematical modeling and simulation have been coded using the MATLAB programming platform version R2017-b. The results showed good agreement between the simulated and measured results, the weight loss (moisture) data were validated, with data provided from the processing and storage industry in refrigeration chambers and transportation both by air and by sea, it was verified that the weight loss during storage time, in the air route, is greater (3.79 %), in relation to the sea route (1.42%) and the prediction value (simulated) is (1.92%), so it is quite acceptable. On the other hand, the cooling ratios have also been estimated, such as the cooling time in half with a value of 4915.218513 sec, and the instantaneous cooling rate (R) of 0.002538 °C.

Keywords / humidity mass transfer /modeling /simulation/

## I. INTRODUCCION

El arándano azul, mora azul (*Vaccinium corymbosum*), esta especie es originaria de Estados Unidos, país que también es un importante productor de arándanos a nivel internacional, este fruto ofrece importantes beneficios para la salud al contar con altos niveles de antioxidantes y de vitamina C y una buena fuente de fibra y una excelente fuente de manganeso. En los últimos años el Perú, se posicionó como el primer exportador mundial de arándanos y su producción el año 2022, fue de 42,040 toneladas (INEI), 25-01-23. A fin de preservar la calidad del fruto post cosecha en buenas condiciones, es necesario el almacenamiento en frío a temperaturas bajas de refrigeración de 0 °C a 5 °C, para maximizar su vida pos cosecha. La pérdida de agua de una fruta o verdura es impulsada por el gradiente de presión incompleta del vapor de agua entre las capas límites sobre la superficie del producto y su entorno, mientras que la capa límite de la superficie del producto, se considera que se encuentra saturado ( $A_w=1$ ), donde la presión superficial en la superficie de evaporación no es equivalente a la presión de vapor en el producto, esta acentuada diferencia de presiones de vapor conduce a una disminución de la vida útil del producto. El método de conservación en frío, de frutas y verduras, cobra gran importancia, cuando se transportan largas distancias y no cuentan con un ambiente óptimo de conservación, su vida útil se acorta y por ende tiende a deteriorarse, por lo que, ocasiona una pérdida económica, el almacenamiento en frío, es uno de los métodos más usados en la industria, por lo que es imprescindible optimizar las condiciones psicométricas donde es almacenado el producto alimenticio y la cadena de frío respectivo.

### 1.1 Planteamiento del problema de Investigación

Las frutas y hortalizas mínimamente procesados en fresco, como es el caso del arándano, constituyen un sector de rápido crecimiento en la industria de alimentos. Actualmente el concepto de “alimentación sana y natural”, está muy arraigado en los países desarrollados con mayores ingresos per cápita. Tecnologías basadas en el

empleo del frío, tales como la refrigeración y congelación se utilizan para mitigar el deterioro post-cosecha de frutas y vegetales frescos y; por tanto, prolongan el tiempo de vida útil.

Por tanto, las exigencias de los países importadores de productos frescos, mínimamente procesados en cuanto a calidad, presentación e inocuidad y vida útil, son factores relevantes en la preservación. Para ello es necesario investigar y estudiar distintos procesos de preservación, considerando y aplicando nuevas tecnologías, para su modelización matemática y su posterior optimización del proceso de preservación y tiempo de duración de vida útil de los productos alimenticios.

### **1.2 Antecedentes de la Investigación**

Los productos alimenticios, como son las frutas, son sistemas dinámicos donde la ganancia o pérdida de humedad, ocurre continuamente hasta alcanzar el equilibrio termodinámico entre los componentes de la composición del alimento y el ambiente gaseoso circundante, como sostiene **Roca et al**, [1], los fenómenos de migración de agua y el cambio resultante en el contenido de humedad en los productos alimenticios afectan su vida útil a través de modificaciones indeseables de sus cualidades físicas, sensoriales y microbianas. Formular y realizar el modelamiento matemático y simulación, del transporte de humedad dentro de estos productos, es de gran importancia para controlar la dinámica de la distribución del agua, durante su preservación, se han adaptado modelos predictivos basados en la segunda Ley de Ficks, para describir los fenómenos de transferencia de humedad en alimentos, **Petru et al**, [2].

En este estudio, **Paniagua et al**, [3], han sostenido, que el ablandamiento de los arándanos está influenciado por las modificaciones de la pared celular que acompañan a la maduración, pero estos cambios parecen haberse completado en gran medida en el momento de la cosecha. En este estudio se controlaron las condiciones de almacenamiento post cosecha de modo que sólo el grado de pérdida de agua varió entre los tratamientos. Se demostró una relación lineal entre la pérdida de peso y la

pérdida de firmeza (evaluado mediante una prueba de compresión no destructiva). Esta relación no se mantuvo con una pérdida de peso muy baja, sino que se encontró que los arándanos se reafirmaban durante el almacenamiento. Las imágenes por resonancia magnética de las bayas confirmaron una contracción y pérdida de agua significativas en las bayas que tuvieron una gran pérdida de peso.

También afirmaron la probabilidad, que los tratamientos que restringen la pérdida de agua de los arándanos a menos del 8% sean beneficiosos para conservar una firmeza aceptable de las bayas durante un almacenamiento de hasta tres semanas.

En este estudio **Guillard *et al***, [4], desarrollaron un modelo, para predecir la transferencia de humedad en un alimento compuesto, y propusieron un modelo matemático y donde experimentaron en un sistema de dos componentes constituido por un bizcocho en contacto con un relleno fresco y húmedo. Utilizaron una prueba experimental para determinar la cinética de sorción independiente y donde encontraron que, la ley de potencia describe el efecto del contenido de humedad en la difusividad efectiva del agua del bizcocho. Además, ajustaron los parámetros de la ley de potencia, utilizando el procedimiento de optimización del modelo en mediciones de perfiles de humedad de bizcocho en contacto con un agar con actividad de agua de 0,99 en gel a 20°C. El modelo se validó con geles de agar con actividad de agua de 0,95 y 0,90 y se utilizó con precisión, para predecir Transferencia de humedad en un alimento real.

También verificaron que, en la presencia de un fino espacio de aire entre los componentes aumentó la capacidad de un producto alimenticio multidominio para resistir las fluctuaciones de temperatura.

**Gómez, *et al*** [5], En este trabajo, se empaquetaron y almacenaron rodajas de piña de 1 cm de espesor a diferentes temperaturas y usaron paquetes de atmósfera modificada en equilibrio (EMAP) para determinar los cambios de color y firmeza a lo largo del tiempo para representa vida útil físico química. A partir de los datos experimentales, se realizó un análisis de varianza para determinar el efecto de

temperatura y nivel de O<sub>2</sub> sobre la evolución del color (coordenadas CIELAB) y la firmeza. Se observaron, que la evolución en las coordenadas L\*, a\* y b\* es independiente de la concentración de O<sub>2</sub> en el sistema EMAP. Después de eso, modelos adecuados se ajustaron para representar el cambio de las propiedades de calidad en función de la temperatura mediante el uso de modelos de primer orden para representar el color y un modelo para predecir la firmeza. Asimismo, se ajustó una función de distribución normal modificada para representar el coeficiente de pérdida de firmeza en función del nivel de O<sub>2</sub>, además del efecto de la temperatura. El modelo de firmeza se utilizó para obtener una ecuación adecuada para predecir la vida útil de las rodajas de piña para diferentes sistemas EMAP. Finalmente, por medio de un experimento de validación se realizó a 8 °C obteniendo una alta capacidad de predicción ( $R_{2adj} > 0,90$ ) en comparación con los datos experimentales. El modelo ajustado se puede utilizar para configurar un sistema EMAP satisfactorio para la mejor preservación de la piña mínimamente procesada a partir de la evolución prevista del color, la firmeza y la vida útil en función de la temperatura y concentración de O<sub>2</sub>.

**Yashmita y Predeep, [6]**, sostuvieron y explicaron que, las frutas y verduras son ricas en nutrientes esenciales como minerales, vitaminas, y antioxidantes; sin embargo, tienen una vida útil corta. La conservación de alimentos por congelación es superior y es un método de conservación comparado, con otras técnicas con respecto a los nutrientes, retención y mantenimiento de atributos sensoriales. Sin embargo, existen varios problemas físicos y los cambios en la calidad de la textura asociados con la congelación y descongelación plantean un grave problema para la calidad de los productos congelados. Además, manifiestan algunas desventajas asociadas con los métodos empleados actualmente para congelar frutas y verduras incluyen bajas tasas de intercambio de calor en congeladores rápidos, indican también que presentan algunas limitaciones en los congeladores de placas y acarrear un alto costo de operación en la congelación criogénica y dilución de la solución en

congelación por inmersión. Por otro lado, señalan, que se han desarrollado nuevas tecnologías de congelación para lograr una nucleación y cristalización controlada del hielo, una congelación de una velocidad controlada y un tiempo de transición de fase reducido y estabilidad de temperatura mantenida. En este trabajo analizan y revisan, algunos de los enfoques más recientes empleados en la congelación y señalan su adopción para mantener la calidad de frutas y verduras con almacenamiento de tiempo más extendido.

**Dempsey y Pradeed, [7]**, presentan y describen en forma detallada el método de congelación por aire comprimido, que es una técnica de congelación común que se utiliza en todo el mundo para congelar diversos productos alimenticios, desde cadáveres hasta productos envasados. Señalan también que la industria de almacenamiento en frío de Nueva Zelanda identificó la congelación rápida como la operación que consume más energía en la industria del almacenamiento de alimentos congelados, consumiendo 8,1 GWh de electricidad en Nueva Zelanda en 2005. Este documento presenta una descripción general de los distintos tipos de congeladores rápidos, sus defectos de diseño comunes, medidas comunes de ahorro de energía y una guía de mejores prácticas. También han presentado un modelo de simulación para predecir el rendimiento y diseñar un sistema óptimo en una variedad de condiciones operativas.

**Hyun y Seung, [8]**, en este estudio, mencionan que el arroz cocido congelado, es un producto común comercialmente disponible, que se ha convertido en el alimento de conveniencia en diferentes partes del mundo. Afirman también que los alimentos congelados que se elaboran bien en las fábricas a menudo experimentan un deterioro de la calidad debido a las fluctuaciones de temperatura durante la distribución. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto de la congelación y descongelación repetida, que puede ocurrir durante la distribución, en la calidad física del arroz cocido congelado. Además, analizaron el efecto de los niveles de aislamiento térmico del embalaje sobre el cambio de calidad del arroz cocido congelado como resultado

de repetidos ciclos de congelación y descongelación. El tratamiento repetido de congelación y descongelación del arroz cocido congelado resultó en la pérdida de humedad, destrucción de la microestructura, aumento de la dureza, aumento de la adhesividad. En particular, señalan que, afectan la calidad del arroz cocido congelado, donde se deterioran rápidamente, para evitar este deterioro proponen que podría suprimirse mediante el uso de envases con aislamiento térmico.

**Godoy, [9]**, En este estudio se evaluaron dos variedades de cultivos de arándanos, bajo condiciones de almacenamiento de refrigeración convencional, frutos completamente maduros y de color azul, donde se seleccionaron y envasaron en “clamshells” y se sometieron a almacenamiento refrigerado a 0°C y 85 – 90% de HR, durante 10, 17 24 y 31 días, donde para cada periodo de almacenamiento, se realizaron muestras a la salida del frío y después de dos días a temperatura ambiente. Se evaluaron la homogeneidad en el empaque, pérdida de peso, firmeza, contenido de sólidos solubles: acidez titulable, pH, relación sólidos solubles, el peso promedio de las frutas fue de 1.9 gramos correspondiendo al grado “extralarge”.

La fruta se mantuvo en buenas condiciones durante 11 días de almacenamiento refrigerado, después perdió calidad como consecuencia de la pérdida de peso. Como resultado de este trabajo se encontró que la variedad Bluejay supero a Brigitte en cuanto a firmeza, el contenido de sólidos solubles, aumento proporcionalmente a la duración del periodo de almacenamiento. En ambas variedades se observó un aumento significativo del pH al mes de almacenamiento.

**Roca et al, [10]** En este estudio se determinaron las isoterms de sorción de agua y las difusividades de humedad efectivas a 20 8 C para bizcochos con alta actividad de agua en función de su porosidad inicial, en el rango de 86 y 52% (0 g/g de contenido de grasa en base seca), y de su contenido de grasa, que oscila entre 0 y 0,30 g/g de base seca (67%porosidad inicial). Encontraron que los valores de humedad de equilibrio no se vieron afectados por la estructura de los alimentos y disminuyeron con el aumento del contenido de grasa. La difusividad efectiva de la

humedad disminuyó de 7,5 a 0,3/10K10 m<sup>2</sup>/s con un contenido de humedad creciente de 0,30 a 2,20 g/g en base seca. La porosidad inicial disminuyó en un rango de 86 al 52%, la difusividad efectiva de la humedad disminuyó en más de cuatro órdenes de magnitud. Este comportamiento estuvo relacionado con diferencias de los mecanismos de transferencia de agua, con el aporte de la difusión del agua líquida en la matriz sólida y de la difusión del agua vapor en los poros. El aumento del contenido de grasa de 0,30 g/g de base seca en el bizcocho, independientemente de la porosidad, disminuyó la difusividad efectiva de la humedad en más de cinco órdenes de magnitud. Para demostrar y validar se, utilizó un modelo matemático predictivo para simular la ingesta de humedad en dos sistemas alimentarios compuestos: bizcochos con variando las porosidades iniciales y el contenido de grasa y un gel de agar como modelo de una fuente de agua sin limitación de velocidad. Observaron que al aumentar la densidad de la estructura y la adición de grasa en la fase basada en cereales podría aumentar la vida útil de los alimentos compuestos.

**Sousa, *et al* [11]**, En este artículo describen que los alimentos son perecederos y existen muchos factores que pueden deteriorar la calidad y seguridad de los productos alimenticios durante el almacenamiento y distribución. Estos se pueden clasificar en factores químicos y físicos. Para minimizar la degradación de los alimentos durante el procesamiento o almacenamiento, también proponen usar y deben determinar modelos cinéticos que describan las tasas de degradación y la dependencia de factores intrínsecos (es decir, factores críticos) de factores extrínsecos como la temperatura y el contenido de humedad. Además, señalan que el propósito esencial de los modelos cinéticos es, primero, describir suficientemente un conjunto de datos experimentales obtenidos, y segundo, utilizar los modelos para la predicción, control de procesos, optimización y simulación de operaciones de procesamiento, envasado y almacenamiento de alimentos.

### 1.3 Bases Teóricas

#### 1.3.1 Características del arándano

El arándano azul (blue berry en inglés) es uno de los frutos del bosque más renombrados por su concentración de nutrientes. Es un arbusto que crece silvestre en el Norte de Europa, América y Asia. Sin embargo, la gran demanda de estos pequeños frutos ha empujado al sector agrario crear cultivos de arándanos y seleccionar variedades que se adaptan a diferentes condiciones climáticas, los frutos del arándano son de piel tersa y su pulpa es jugosa y aromática de sabor agridulce, es un fruto esférico, y dependiendo de la variedad puede variar su tamaño entre 0.7 a 1.6 cm de diámetro su color puede variar entre azul claro y azul oscuro, El periodo de desarrollo de fruto, entre floración y la maduración de la fruta, es de 90 a 120 días aproximadamente. El arándano es uno de los alimentos con mayor contenido de antioxidantes, además aporta vitamina C, potasio y fibra, asimismo, el consumo de este fruto fortalece el sistema inmunitario.



Fig. 1. El arándano (*Vaccinium corymbosum*)

### **1.3.2 Clasificación taxonómica**

Reino	: Plantae
División	: Magnoliophyta
Clase	: Magnoliopsida
Orden	: Ericales
Familia	: Ericaceae
Subfamilia	: Vaccinioideae
Tribu	: Vaccinieae
Género	: Vaccinium
Especie	: <i>V. corymbosum</i>
Nombre científico	: <i>Vaccinium corymbosum</i>
Nombre común	: Mora azul, caramina, uva de monte, mendero, murtilo, mirtilo etc.

### **1.3.3 Descripción botánica**

Pequeño arbusto caducifolio de hasta 1 metro de altura. Ramas verdes angulosas y enderezadas. Las hojas son ovales, alternas, coriáceas, de color verde claro o algo amarillentas, con las márgenes dentadas, caducas y con peciolo corto. Las flores son insignificantes, de color verde rosado con cinco pétalos y sépalos, se producen aisladas o de dos en dos auxiliares en racimos colgantes. El fruto es una baya de color negro azulado de sabor agradable y agridulce. [18]

### **1.3.4 Usos y consumo**

Esta fruta puede consumirse sin procesar y fresco, también se incorpora para hacer zumos, mermeladas y salsas, son la base de numerosas recetas de repostería y licores. Según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), los arándanos son algunos de los alimentos con mayor actividad de antioxidantes por porción. [18].

### **1.3.5 Composición química del arándano**

En la tabla 1 se presenta la composición química del arándano.

TABLA I  
COMPOSICION QUIMICA DEL ARANDANO

Componentes	Valor Nutricional por 100g de Arándanos
Valor energético	33 kcal
Grasa	0.6 g.
Proteína	0.625 g.
Agua	87.8 g.
Carbohidratos	6.05 g.
Fibra dietética total	4.9 g.

### 1.3.6 Producción del Arándano en el Perú

#### Regiones productoras

La principal región productora de arándanos en el Perú es La Libertad, que tiene el 46% de la superficie plantada con este producto agrícola, seguido de Lambayeque (29%), Ica (6.8%), Lima (6.7%), Áncash (6.4%), Piura (5.3%) y Moquegua (0.4%). Asimismo, el 85% del volumen exportado del Perú se realiza de agosto a diciembre, refieren las estadísticas de Pro Arándanos.

### EVOLUCIÓN DE LOS ENVÍOS DE ARÁNDANOS

(En US\$ millones FOB)

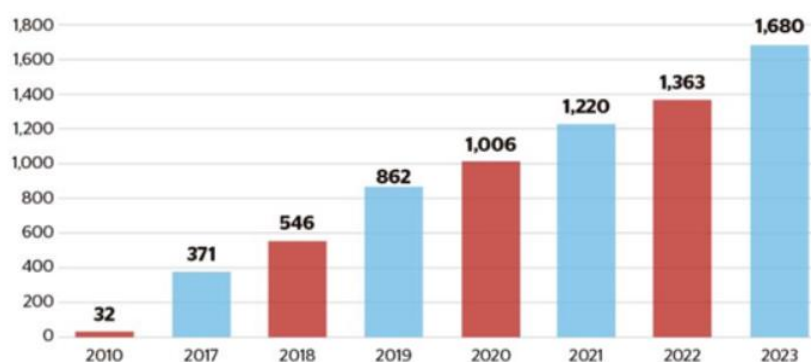


Fig. 2. evolución de envíos de arándanos

### **1.3.7 Modelamiento matemático y simulación en la predicción de la vida útil de las frutas**

El almacenamiento en este caso del arándano fresco, debe gestionarse mediante la predicción de la pérdida de humedad, en cualquier condición de almacenamiento, para preservar la frescura, ya que el contenido de humedad es un parámetro de calidad importante, **Eboibi, et al [19]**. El modelado matemático proporciona una solución de ingeniería sólida y practica para predecir las respuestas físicas y fisiológicas en los productos. Un modelo simultaneo de transferencia de calor y masa, es un método atractivo porque se considera que el comportamiento de pérdida de humedad, incluida la transpiración, es impulsado por un proceso interactivo de movimiento de calor y masa, **Castro et al [20]**, Se han propuesto varios modelos para estimar la pérdida de humedad y transpiración en varios productos hortícolas y frutas, sin embargo, la mayoría se realizó sin el modelado de la resistencia de la piel. Para estimar los coeficientes de transferencia de masa (humedad), y de calor, se utilizan algunos parámetros adimensionales como son, los numero de Schmidt, el número de Lewis y el número de Sherwood como también, el número de Nusselt.

La simulación, es una herramienta de análisis, que intenta modelizar sistemas reales o hipotéticos por ordenador, de forma que su funcionamiento puede ser estudiado y puede predecirse su comportamiento, en la siguiente tabla 2.3 se muestran, 17 lenguajes de programación más utilizados actualmente, Según el indicador de calidad TIOBE.


















Posición	Cambio	Lenguaje de Programación	Calificación	Cambio (%)
1		 Python	15.39%	+2.93%
2	↑	 C++	10.03%	-1.33%
3	↓	 C	9.23%	-3.14%
4		 Java	8.40%	-2.88%
5		 C#	6.65%	-0.06%
6	↑	 JavaScript	3.32%	+0.51%
7	↑↑	 Go	1.93%	+0.93%
8	↑	 SQL	1.75%	+0.28%
9	↓	 Visual Basic	1.66%	-1.67%
10	↑↑	 Fortran	1.53%	+0.53%
11		 Delphi/Object Pascal	1.52%	+0.27%
12	↑↑	 Swift	1.27%	+0.33%
13	↓	 Assembly language	1.26%	-0.03%
14	↓	 MATLAB	1.26%	+0.14%
15	↓↓	 PHP	1.22%	-0.52%
16	↓	 Scratch	1.17%	+0.15%
17	↑	 Rust	1.17%	+0.26%

Fig. 3. Lenguajes de programación

### 1.3.8 Marco conceptual

#### 1.3.8.1 Difusividad y Difusividad Efectiva

La difusión molecular o transporte molecular es la transferencia de masa o movimiento individual de las moléculas a través de un fluido por medio de movimientos individuales y aleatorios de las mismas **Gómez et.al [5]**. La difusividad es la constante de proporción que aparece en la ley de Fick de la Difusión, relacionando la densidad de flujo molar  $j_A$  con el gradiente de concentración  $\nabla C_A$ .

El mecanismo de transferencia de masa, depende de la dinámica del sistema en que se lleva a cabo. Hay dos modos de transferencia de masa: Convectiva, en el cual la masa

puede transferirse debido al movimiento global del fluido, el cual puede ser en régimen laminar o turbulento por medio de una fuerza aplicada y de manera Molecular o Difusión ordinaria, en la cual la difusión (o transporte molecular), puede definirse como el desplazamiento de las moléculas individuales a través de un fluido por medio de los desplazamientos individuales y desordenados de las moléculas, debido a una diferencia de concentraciones.

El coeficiente de difusividad es función de la temperatura y presión tal como lo es la viscosidad y la conductividad térmica que son propiedades usadas en cantidad de movimiento y transferencia de calor **Gómez *et.al* [5]**

#### **1.3.8.2 Temperatura de bulbo seco del aire ambiental**

Temperatura de bulbo seco o temperatura seca es la medida con un termómetro convencional de mercurio o similar, cuyo bulbo se encuentra seco.

#### **1.3.8.3 Humedad relativa del aire ambiental**

La humedad relativa es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitara contener para saturarse a idéntica temperatura,

#### **1.3.8.4 Temperatura de Refrigeración**

El frio es una de las técnicas más ampliamente utilizada en el mundo para minimizar el deterioro pos cosecha de frutas y hortalizas frescas, reduciendo además su deshidratación y desarrollo de enfermedades. Cuando el destino de la fruta es para consumo en fresco, es necesario reducir rápidamente la temperatura de los frutos mediante el pre enfriado, hasta alcanzar valores próximos al aconsejado para la conservación con el fin de evitar pérdidas de calidad.

#### **1.3.8.5 Contenido de humedad en equilibrio**

Si se pone en contacto un alimento con aire de una humedad relativa y una temperatura dada acaba por alcanzar un equilibrio entre la presión de vapor de agua en el alimento y la presión parcial del vapor de agua en el aire. En estas condiciones el alimento adquiere una determinada cantidad de agua que se define como el contenido de humedad d equilibrio (Lomas Esteban, M. 2008).

#### **1.4. Formulación del problema**

¿Cómo y de qué modo será la predicción de la transferencia de la humedad bajo condiciones de almacenamiento en frío del arándano y la etapa de prolongar su vida útil, mediante el modelamiento matemático, de la solución de las ecuaciones de transferencia de calor y humedad, usando métodos numéricos y su respectiva codificación en un lenguaje de programación computacional?

¿la aplicación y la transferencia de masa (humedad) por el modelo de la difusión en la predicción de los parámetros de la predicción de la vida útil, como la pérdida de peso, firmeza y contenido de sólidos solubles, que ajuste de confiabilidad numérica logran en este proceso de simulación matemática?

#### **1.5 Justificación e importancia de la Investigación**

En los países en vías de desarrollo se estima que cerca de un 30 – 40 % de las frutas, vegetales y tubérculos cultivados se llegan a perder debido a la falta de un adecuado manejo de transporte y preservación, **Petru *et al*, [12]**.

En ese sentido, el agua que contienen y que representa más del 80 % de su peso, es un factor determinante en la pronta descomposición de los mismos.

La necesidad de disminuir las pérdidas de pos- cosecha, además del valor agregado que puede adquirir un producto, son parámetros importantes a tomar en consideración en los países en vías de desarrollo, especialmente ahora, cuando las necesidades de mayor producción de alimentos se han incrementado y los ingresos de clases sociales dedicados al cultivo de productos agrícolas son bajos.

Para el caso de frutas y hortalizas, requieren un almacenamiento a bajas temperaturas y así prolongar su vida útil, actualmente existen una gran variedad de métodos o procesos, en donde los parámetros de eficiencia energética, tiempo de almacenamiento y calidad del producto final se utilizan para seleccionar la mejor opción, dependiendo de los requerimientos del mercado, en este ámbito el estudio de la transferencia de masa ( humedad) y calor, se inician desde un punto de vista de los fenómenos de transporte, seguido de los procesos de separación macroscópica, para poder desarrollar

esta área, se requieren un conocimiento en el análisis matemático y en herramientas computacionales para el diseño y optimización de los procesos y es donde la aplicación de las técnicas numéricas, cobra una mayor importancia y a su vez, es una herramienta para predecir las condiciones óptimas de almacenamiento, es un aspecto clave durante la vida útil de un producto y ello conlleva las fases de modelamiento y simulación de los diversos procesos unitarios en la Ingeniería de alimentos.

## **1.6 Objetivos**

### **1.6.1 Objetivo general**

El objetivo principal de este proyecto de tesis, es determinar y validar un modelo para predecir la transferencia de calor y humedad en el arándano, durante su almacenamiento en frío y su fase posterior de vida útil a temperatura ambiente.

### **1.6.2 Objetivos específicos**

Determinar, la pérdida de humedad en el almacenamiento y transporte en frío del arándano.

## **1.7 Hipótesis y variables de la investigación**

### **1.7.1 Hipótesis general**

**HI:** La simulación con el empleo de un lenguaje de programación dinámica en la transferencia de la humedad proporcionan una predicción óptima

**Ho:** La simulación con el empleo de un lenguaje de programación dinámica en la transferencia de la humedad no proporcionan una predicción óptima

### **1.7.2 Hipótesis específico**

Los gradientes de los perfiles de humedad y temperatura del producto durante el almacenamiento influyen en la vida útil del producto.

La simulación con el empleo de un lenguaje de programación dinámica, permite optimizar los parámetros en el tiempo de duración de vida útil del producto.

## **1.8 Variables**

### **1.8.1 Variable Independiente (X)**

El modelamiento matemático de la simulación de la transferencia masa (humedad)

### **1.8.2 Variable dependiente (Y)**

Predicción del perfil de humedad y velocidad de difusión de humedad efectiva en el almacenamiento y su vida útil del producto

### **1.8.3 Variable Interviniente (Z)**

Las propiedades físicas y térmicas del material alimenticio y su tipo de geometría van incidir en su comportamiento frente a los campos y gradientes de temperatura y humedad.

## **II. ESTRATEGIA METODOLOGICA**

### **2.1. Diseño de la Investigación.**

Para el diseño de la investigación emplearemos el método experimental, el cual se identifica por la introducción y manipulación del elemento causal, que es la variable independiente, para de esa manera establecer después el elemento efecto, el cual es la variable dependiente.

Por lo tanto, este método experimental nos ayudará a establecer la formulación correcta de arandano que tenga aceptación de los consumidores.

### **2.2. Población y Muestra**

#### **2.2.1. Población**

Son los arándanos frescos cosechados en el año agrícola del 2023 de la variedad Emerald, almacenados y transportados en condiciones de frío controlado (0 -5 grados centígrados y HR: 90 %) durante el periodo de tiempo de 20 días aéreo y marítimo de 45 días.

#### **2.2.2. Muestra**

Para esta investigación del modelamiento y simulación en la producción de humedad y vida útil durante al almacenamiento en frío, se toman la muestra de ½ Kg. y se seleccionan 125 gramos. los arándanos procedentes de la empresa agroexportadora Athos, año de cosecha 2023, variedad EMERALD.

Ubicación geográfica: esta empresa Athos se encuentra ubicado en el distrito, provincia de Ica, departamento Ica.

### **2.3. instrumentos de Recolección de Datos**

Para llevar a cabo la recolección de datos necesario para esta investigación, se llevaron los siguientes instrumentos.

- Lista de verificación estructurada: este instrumento se utilizo durante la observación en las distintas partes del proceso, como el almacenamiento en las cámaras de frío, área de despacho. Tomando el tiempo empleado en las etapas de la cadena de frío tanto como transporte y almacenamiento.
- Análisis de documentos, se utilizan formatos de tipo estandarizados, para revisar y analizar los documentos relacionados con el despacho y

transporte. Esto permitió la sistematización de la información correspondiente, y los equipos que se utilizaron fueron:

- Balanza analítica.
- Durómetro: medir firmeza del arándano.

#### **2.4. Técnicas de Recolección de Dato**

Estas técnicas de recolección de datos utilizados en esta investigación. Se enfocaron en dos fases:

- La observación directa. Esta técnica consistió en la observación directa de actividades en los tunales y cámaras de almacenamiento área de preparación y despacho. Durante las horas de operación.
- Revisión documental. Es una técnica de gran ayuda por que permite completamente la observación directa.

#### **2.5. Procesamiento y Análisis de Datos.**

El procesamiento de datos y análisis, en este trabajo corresponde al tipo predictivo, donde se evalúan, los datos de almacenamiento y transporte y la vida útil del arándano, para comparar y validar de este proceso de simulación.

#### **2.6. Materiales y Métodos**

##### **2.6.1. Materiales**

Materia prima: arándano utilizado, corresponde a la variedad EMERALD, Empresa Athos, cosechado en el año agrícola 2023.

Equipos y materiales: Balanza analítica, Bolsa atmosfera modificada (Polietileno)

##### **2.6.2. Métodos**

###### **2.6.2.1 Modelo de la transferencia de masa (Pérdida de peso, humedad)**

El procedimiento empleado aquí, es la utilización de un modelo matemático simple de la transferencia de la humedad en el almacenamiento del arándano, propuesto por, **Keshed, et al [13]**, es un modelo donde, la perdida de agua de los alimentos está impulsado por el gradiente de densidad del vapor de agua entre la piel del arándano y el aire circundante, fenómeno que requiere ser formulado bajo las siguientes suposiciones:

- a) Los componentes del alimento son homogéneos e isotrópicos
- b) La humedad y temperatura dependen de las propiedades de transporte
- c) La contracción o el encogimiento del volumen del arándano se consideran constante.

El modelamiento matemático, es de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\frac{dm}{dt} = K_{ta} A_s (\rho_w - \rho_{w,\infty}) \quad (3.1)$$

Donde:

M: pérdida de peso (Kg agua)

$\rho_w$ : densidad del vapor de la superficie del arándano (Kg agua/m<sup>3</sup>)

$\rho_{w,\infty}$ : densidad del vapor del aire circundante (Kg agua/m<sup>3</sup>)

$K_{ta}$ : coeficiente de transferencia de humedad de la piel del arándano (m/seg)

$t$ : tiempo en(s)

Para resolver la ecuación diferencial (3.1) de la transferencia de humedad, se ha utilizado el programa computacional **ODE 45** del entorno **MATLAB**

El Coeficiente de transferencia de masa  $K_{ta}$ , es entonces calculado de  $hc$  fue obtenido de **Gwanpua, et al [12]** y es la siguiente ecuación.

$$K_{ta} = \frac{hc}{\rho_R C_{pa} (Le)^{2/3}} \quad (3.2)$$

Donde el número de Lewis  $Le$  es calculado de la ecuación (3)

$$Le = \frac{Ka}{\rho_R C_{pa} D_{air}} \quad (3.3)$$

Donde:

$hc$ : coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m<sup>2</sup> K)

$\rho_R$ : densidad del aire interior de la sala fría (Kg/m<sup>3</sup>)

$C_p$ : calor específico del aire de enfriamiento (J/Kg °C)

$K_a$ : conductividad térmica del aire (W/m °K)

$D_{air}$ : difusividad del agua en el aire (m<sup>2</sup>/s)

$\rho_w$ : es relacionado a la presión de vapor saturado  $P_{sat}$ . (Pa) a la temperatura de superficie del arándano  $T_s$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) como las ecuaciones (3.4) y (3.5).

$$\rho_w = \frac{M_{H_2O} P_{sat,superf}(T_s) a_w}{R T_s} \quad (3.4)$$

$$P_{sat,superf} = 0.61078 \exp \left[ \frac{17.269388 T_s}{T_s + 237.3} \right] \quad (3.5)$$

Donde:

$P_{sat,superf}$ : presión de vapor saturado a la temperatura de superficie del arándano (Pa)

$M_{H_2O}$ : masa molar del agua (kg/mol=0,018)

$R$ : constante universal de los gases (8.314 J/mol  $^{\circ}\text{K}$ )

$A_w$ : Actividad del agua del arándano

$T_s$ : temperatura de superficie del arándano ( $^{\circ}\text{C}$ )

La expresión de  $\rho_{w,\infty}$  es la misma como para  $\rho_w$  por reemplazo de la actividad de agua por la humedad relativa (HR) y la presión de vapor saturado  $P_{sat}$ . (Pa) a la temperatura del aire de refrigeración  $T_a$  ( $^{\circ}\text{K}$ ), como las ecuaciones (3.6), (3.7) y (3.8)

$$\rho_{w,\infty} = \frac{M_{H_2O} P_{w,air}}{R T_a} \quad (3.6)$$

$$\rho_{w,air} = P_{sat,air}(T_a) \frac{RH}{100} \quad (3.7)$$

$$P_{sat,air} = 0.61078 \exp \left[ \frac{17.269388 T_s}{T_s + 237.3} \right] \quad (3.8)$$

Donde:

$P_{sat,superf}$ : presión de vapor saturado en la temperatura de superficie del arándano (Pa)

$P_{sat,air}$ : presión de vapor saturado en la temperatura del aire de enfriamiento (Pa)

RH: humedad relativa (%).

Las propiedades termo físicas del aire son listados en la siguiente tabla.

TABLA II  
PROPIEDADES DEL AIRE A 1 °C.

Propiedad termo física	valor	Unidad
Densidad ( $\rho$ )	1.29	Kg/m <sup>3</sup>
Conductividad térmica ( $K_a$ )	0.025	W/m °C
Calor específico del aire frío ( $C_p$ )	1004	J/Kg °C
Difusividad del agua en el aire	$2.1 * 10^{-5}$	m <sup>2</sup> /s

### 2.6.3. Coeficiente de transferencia de calor por convección

El coeficiente de transferencia de calor por convección  $h_c$ , puede ser estimado, usando la correlación Nusselt-Reynolds-Prandtl. **Incropera and DeWitt, [15]**.

El Numero de Nusselt es definido en la ecuación (3.9):

$$Nu = \frac{h_c d}{K_a} \quad (3.9)$$

Porque el proceso de transferencia de masa es gobernado por un similar mecanismo, la correlación Nusselt-Reynolds-Prandtl, puede ser calculado por las siguientes ecuaciones, (3.10), (3.11), (3.12), 3.13) y (3.14).

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (3.10)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.11)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_R} \quad (3.12)$$

$$\alpha = \frac{K_p}{\rho_p c_p} \quad (3.13)$$

$$Re = \frac{u_{\infty} d}{\nu} \quad (3.14)$$

Para el rango de temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  para  $120^{\circ}\text{C}$ , la viscosidad del aire húmedo varia poco del aire seco, por tanto, la viscosidad dinámica del aire húmedo es aproximadamente por el del aire seco a la misma temperatura, usando la siguiente relación, el cual fue obtenido con datos del aire seco por ajuste de mínimos cuadrados reportado por **ASHRAE [16]**

$$\mu = 17.19 + 0.0429 T_s \quad (3.15)$$

Donde:

Nu: número de Nusselt

Re: número de Reynolds

Pr: número de Prantdl

hc: Coeficiente de transferencia de calor por convección ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

d: diámetro del arándano (m)

$U_{\infty}$ : velocidad del aire (m/s)

$\nu$ : viscosidad cinemática del aire ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\mu$ : viscosidad dinámica del aire ( $10^{-6} \text{Ns}/\text{m}^2$ )

$K_a$ : conductividad térmica del aire ( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$ )

$K_p$ : conductividad térmica del arándano ( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$ )

$C_p$ : calor específico del arándano ( $\text{J}/\text{Kg}^{\circ}\text{C}$ )

$\alpha$ : difusividad térmica del arándano ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\rho_R$ : densidad del aire al interior de la cámara ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

Las propiedades termo físicas del arándano (variedad genérica negra), son presentadas en la tabla

TABLA III  
PROPIEDADES TERMO FÍSICAS DEL ARÁNDANO

Propiedades termo físicas	Valor	Unidades
Conductividad térmica del arándano	0.546	$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$ ( $K_p$ )
Calor específico del arándano	3830	$\text{J}/\text{Kg}^{\circ}\text{C}$ ( $C_p$ )
Densidad del arándano	950	$\text{Kg}/\text{m}^3$ ( $\rho_a$ )

#### 2.6.4 Tiempo de enfriamiento y velocidad de enfriamiento

La relación de enfriamiento (relación de temperatura, Y), es el cambio de temperatura no realizado, como porcentaje del enfriamiento total posible en el sistema. Esta relación es calculada por la ecuación (3.16).

$$Y = \frac{T - T_i}{T_i - T_{air}} \quad (3.16)$$

Donde:

T: temperatura de la pulpa ( $^{\circ}\text{C}$ ) en el momento (h)

T<sub>air</sub>: temperatura del fluido refrigerante ( $^{\circ}\text{C}$ )

T<sub>i</sub>: temperatura inicial de la pulpa ( $^{\circ}\text{C}$ )

El tiempo de enfriamiento puede ser simulado usando el coeficiente de enfriamiento, este coeficiente indica el cambio en la diferencia fraccionaria de temperatura no lograda o alcanzada entre el producto y el clima circundante por unidad de cambio en el tiempo de enfriamiento **ASHRAE [16]**. Bajo condiciones de transferencia de calor no Newtonianas, que suelen ocurrir en situaciones de post cosecha, C es calculado usando la ecuación (3.17), donde el subíndice para Y<sub>1,2</sub>, t indican tiempos de muestreo.

$$C = \frac{\ln y_1 - \ln y_2}{t_1 - t_2} \quad (3.17)$$

La mitad del tiempo de enfriamiento ( $t_{1/2}$ ) es el tiempo necesario para eliminar la mitad y reducir la diferencia de temperatura entre el producto y el aire de refrigeración a la mitad y se calcula a partir de la, ecuación (3.18) del coeficiente de enfriamiento.

$$T_{1/2} = \frac{\ln\left(\frac{1}{2}\right)}{C} \quad (3.18)$$

La velocidad de enfriamiento instantáneo R, expresada en ( $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ), es calculado con la ecuación (3.19).

$$R = C (T - T_0) \quad (3.19)$$

**La Estrategia de solución en este trabajo, es la simulación en la predicción de la pérdida de peso (transferencia de masa, humedad en el almacenamiento) y su**

**vida útil del arándano, mediante la aplicación de un programa computacional cuyos resultados serán validados y comparados con datos obtenidos de una planta de almacenamiento en frío del producto.**

En la figura se muestra un diagrama esquemático del enfoque de simulación básica e ilustración del modelo de transferencia de masa.

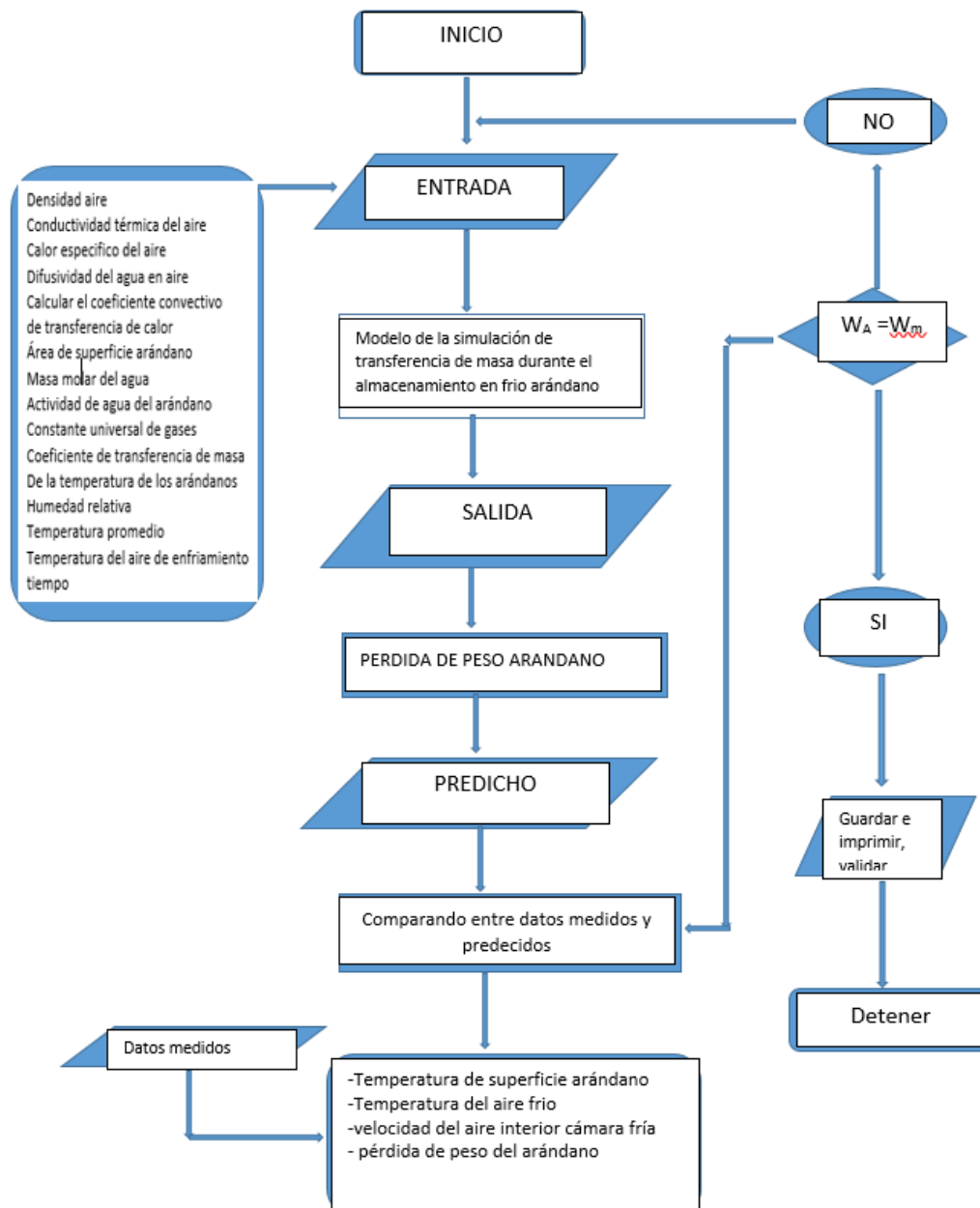


Fig. 4. Diagrama esquemático básico de la simulación utilizando la plataforma programación MATLAB.

### III. RESULTADOS

**3.1** Resultados del modelamiento matemático y simulación en la predicción de la pérdida de humedad y vida útil durante el almacenamiento del arándano en frío y las gráficas de predicción correspondientes.

#### 3.1.1 Datos de la pérdida de humedad

En la Tabla IV se presenta el tiempo de almacenamiento y el porcentaje de pérdida peso en frío, tanto en el transporte marítimo y su correspondiente porcentaje de humedad relativa, estos datos son utilizados para la validación de la simulación.

**TABLA IV**

**TIEMPO DE ALMACENAMIENTO Y PERDIDA DE HUMEDAD EN EL TRANSPORTE  
VÍA MARÍTIMA**

Arándano de exportación, Bolsa AM, MARITIMO	
Presentación:	125 gr
Humedad relativa	% pérdida de peso x día
70% - 75%	0.08 – 0.1
76% - 80%	0.06 – 0.08
81% - 85%	0.04 – 0.06

**TABLA V**

SE PRESENTA EL TIEMPO DE ALMACENAMIENTO Y EL PORCENTAJE DE PERDIDA PESO EN FRIO, EN EL TRANSPORTE MARITIMO Y SU CORRESPONDIENTE PORCENTAJE DE HUMEDAD RELATIVA, ESTOS DATOS SON UTILIZADOS PARA LA VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN.

ATHOS (125 gr) – BOLSA AM - MARITIMO					
Días de Almacenamiento	0	15	25	35	45
Peso Neto	1547	1535	1528	1527	1525
% de pérdida de peso	0	0.78	1.23	1.29	1.42

TABLA VI  
TIEMPO DE ALMACENAMIENTO Y PERDIDA DE HUMEDAD EN EL TRANSPORTE  
VÍA AÉREA

Arándano de exportación, BOLSA, AEREO					
		Presentación:		125 gr	
		Humedad relativa	% pérdida de peso x día		
		70% - 75%	0.4 – 0.6		
		76% - 80%	0.3 – 0.4		
		81% - 85%	0.1 – 0.2		

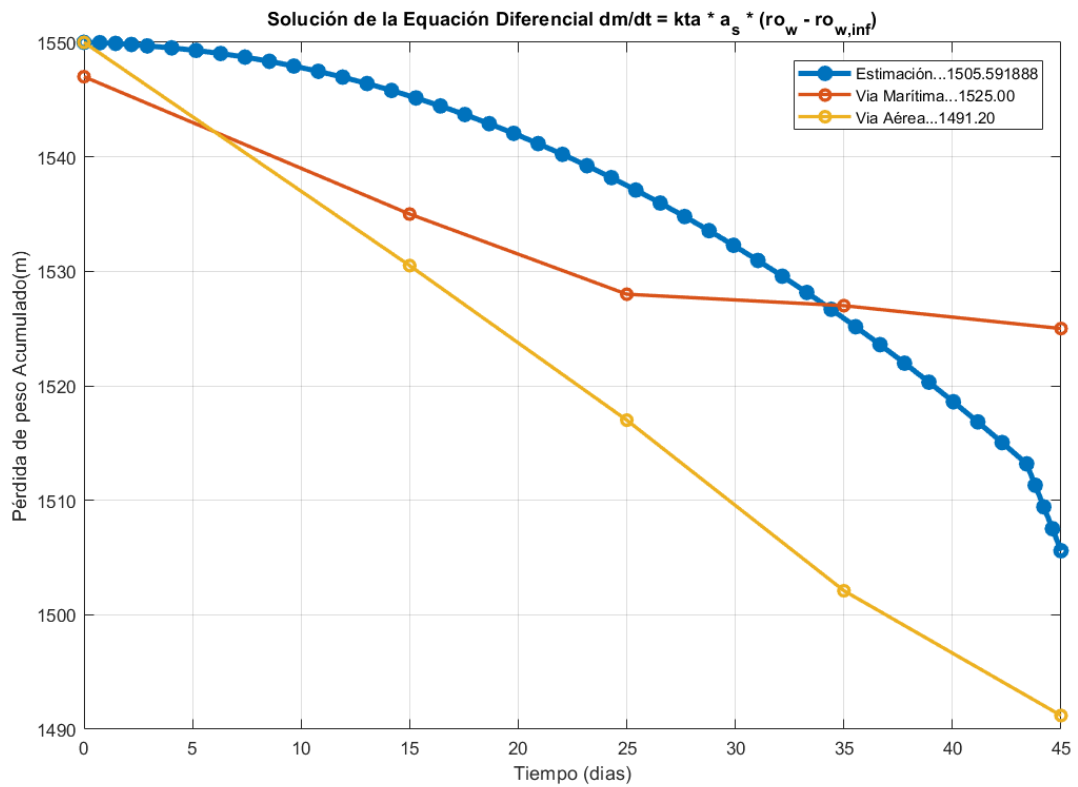
  

ATHOS (125 gr) – AEREO					
Días de Almacenamiento	0	5	10	15	20
Peso Neto	1550	1530.5	1517	1502.1	1491.2
% de pérdida de peso	0	1.25	2.13	3.09	3.79

### 3.1.2 Gráficos de la pérdida de humedad tanto medidos y predecidos

En la figura 5, muestra la relación del tiempo con la pérdida de peso (acumulado), y sus respectivas curvas del proceso de almacenamiento y transporte en frío, en el primer caso el **estimado**, se verifica que la pérdida de peso (humedad) disminuye rápidamente a un mismo tiempo de almacenamiento, en cambio la pérdida de peso (humedad), en **vía marítima**, disminuye lentamente a un mismo tiempo de almacenamiento, por otro lado la pérdida de peso (humedad) en **vía aérea** disminuye más rápidamente a un mismo tiempo de almacenamiento. La influencia y variación de la humedad relativa, junto con la tasa de respiración del arándano, favorece notablemente la disminución de la vida útil del producto lo que confirma que la velocidad de la pérdida de humedad, depende principalmente de la transferencia de calor y la difusión de vapor

(transferencia de masa) en la interface solido-liquido, los valores de la pérdida de peso en la vía aérea son 1491.2 gr. y en la vía marítima 1525 gr, por otro la predicción de la pérdida de peso proporciona un valor de 1505 gr, que es aceptable.



**Fig. 5.** Curvas de la pérdida de peso (acumulado) en relación al tiempo

**En la figura 6:** Presenta la relación del tiempo con la pérdida de peso (humedad), donde se observa que la pérdida de peso (humedad) en la vía aérea es mayor que la vía marítima y los valores de la predicción son casi coincidentes con la vía marítima de (1.42 % frente a 1.92 % simulado), como se observa en la gráfica (6), correspondientes.

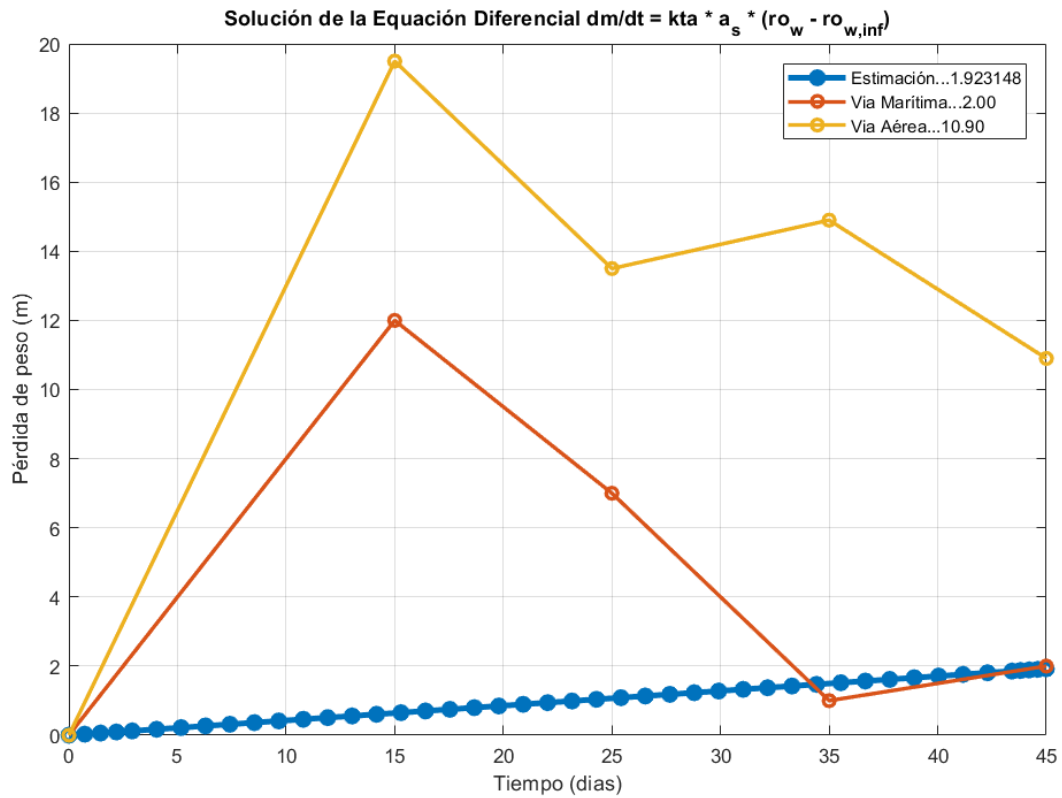


Fig. 6. Curvas de la pérdida de peso (humedad) en relación al tiempo (días)

En la Figura 7. Presenta un coeficiente de correlación de 0.98 entre valores medidos (vía aérea) y simulados de la pérdida peso (%), durante el periodo de simulación, este valor bajo es debido a una alta tasa de respiración del arándano, y una humedad relativa baja, que produce calor y por lo tanto tiende a perder agua y peso rápidamente (en el programa de simulación se ha considerado un valor 85 % de humedad relativa).

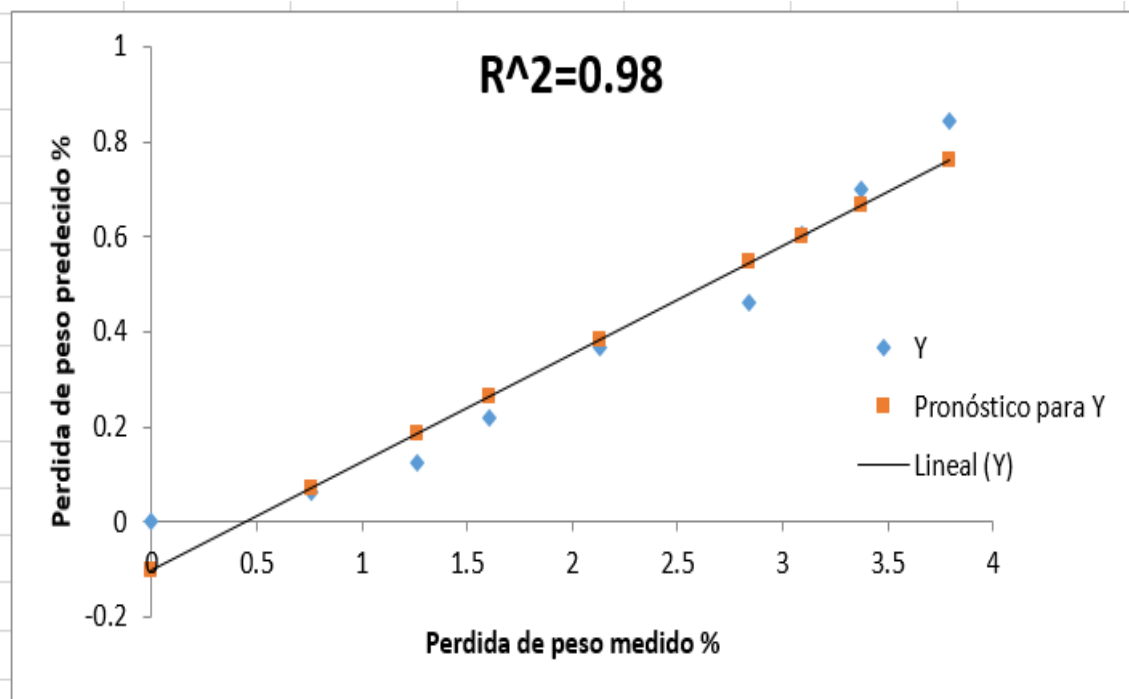


Fig. 7. Comparación entre valores medidos (vía aérea) y simulados de la pérdida peso (%)

En la figura 8 Presenta un coeficiente de correlación de 0.94 entre valores medidos (vía marítima) y simulados de la pérdida peso (%), se observa que es casi coincidente con los valores de pérdida de peso, lo que confirma que los valores de la predicción son aceptables.

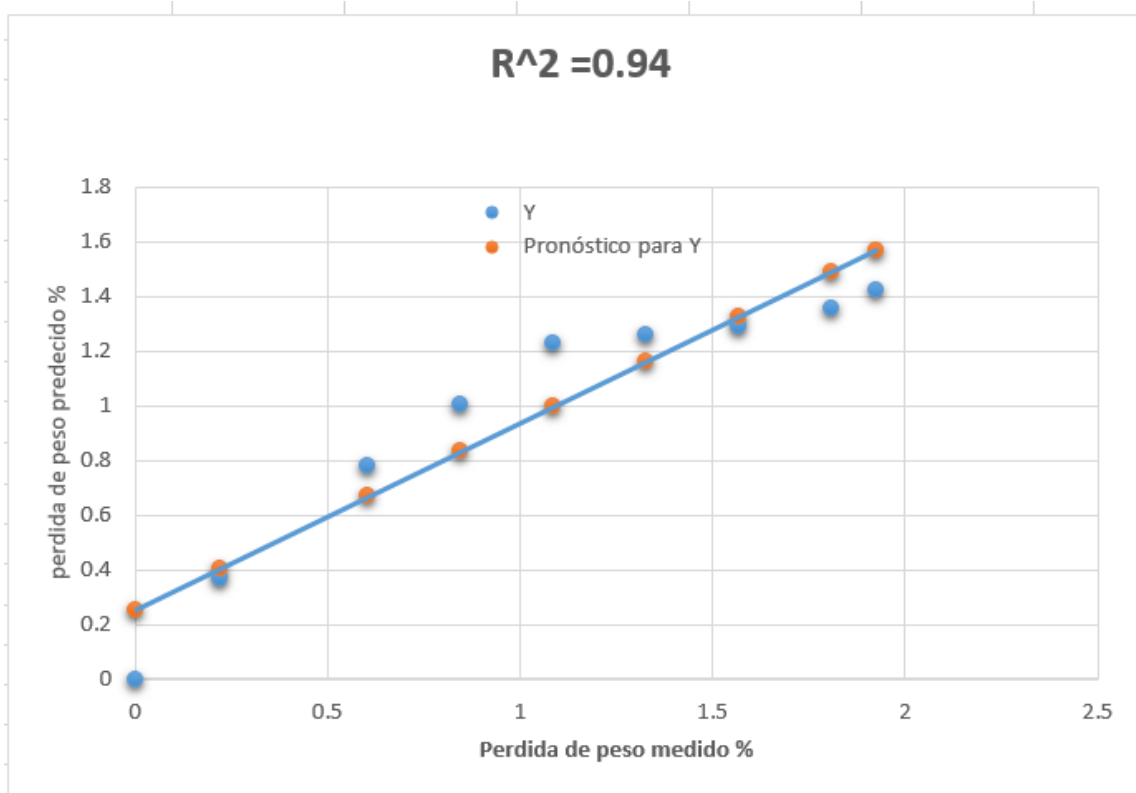


Fig. 8. Comparación entre valores medidos (vía marítima) y simulados de la pérdida de peso

En la figura 9: Es una representación gráfica de comparación entre las diversas curvas de la pérdida de peso y de simulación, donde se observan las tendencias y la interacción entre el tiempo y la pérdida de peso del arándano, donde la pérdida de peso en la vía aérea es más rápida en un menor tiempo de almacenamiento y transporte.

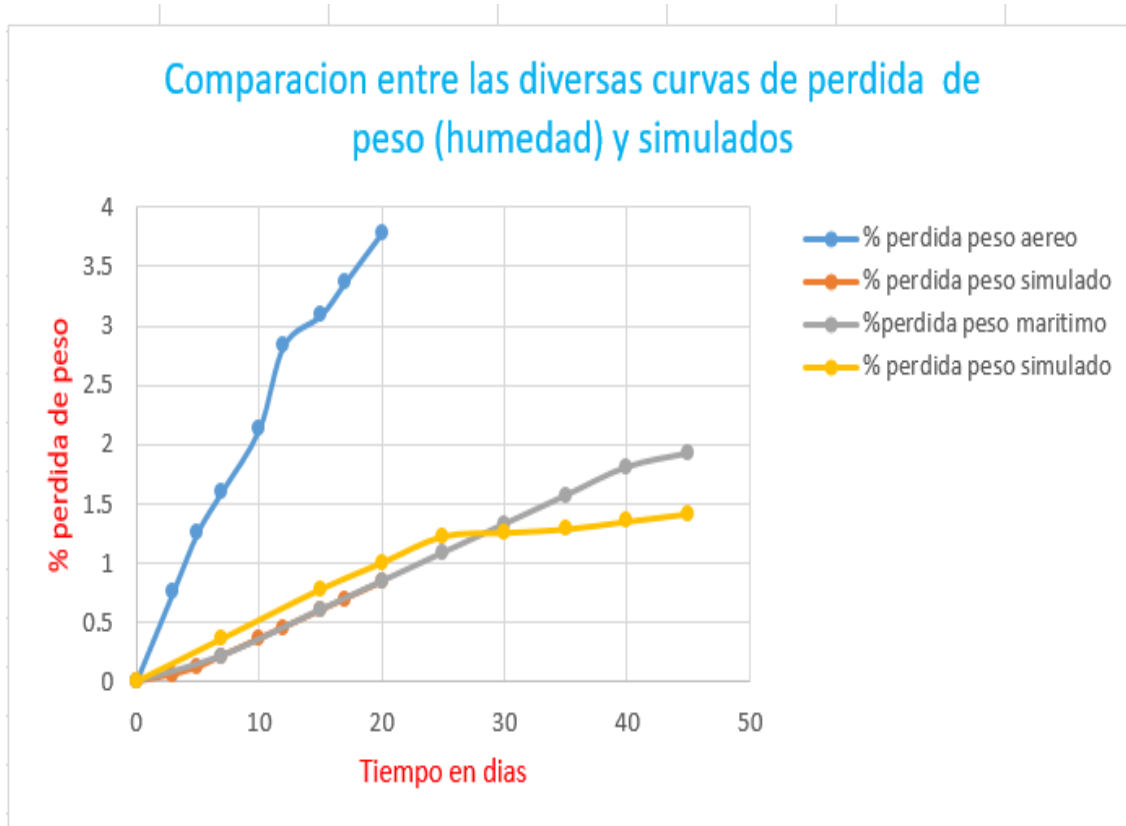


Fig. 9. Comparacion entre las diversas curvas de la perdida de peso (humedad) y los Simulados

Como resultado del programa de la simulacion, obtenemos valores del tiempo de enfriamiento, que es estimado usando un coeficiente de enfriamiento designado como (C), este coeficiente indica el cambio en la diferencia fraccionaria de tiempo no logrado o alcanzado entre el producto y el medio circundante por unidad de cambio en el tiempo de enfriamiento.

Relacion de enfriamiento (Y1)=0.571429

Relacion de enfriamiento (Y2)=0.428571

Coeficiente de enfriamiento (C) =0.000141

Tiempo de enfriamiento a la mitad (T 1/2) = 4915.218513 seg.

Velocidad de enfriamiento instantaneo (R) = 0.002538 °C

#### IV. CONCLUSIONES

Del trabajo de simulación realizado se deducen las siguientes conclusiones

Del proceso de modelamiento matemático y su proceso de simulación de la pérdida de peso transferencia de masa, (humedad), durante el almacenamiento y transporte del arándano, se verifica que la humedad disminuye rápidamente a un menor tiempo de almacenamiento en frío con relación al transporte aéreo ( 3.79 %), y los valores de predicción indican un ajuste del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) del 98 %, el cual es bastante aceptable.

-Mientras que la pérdida de peso, en el almacenamiento y transporte marítimo en frío, comparativamente con el proceso de simulación los resultados muestran valores de predicción (1.42 % y 1.92 %), son confiables y coincidentes en la pérdida de humedad, además los resultados del análisis de varianza, indican un ajuste del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) del 94 %, el cual es aceptable.

-El modelo matemático propuesto y utilizado en este trabajo es un modelo simple donde, la pérdida de agua de los alimentos está impulsado por el gradiente de densidad del vapor de agua entre la piel del arándano y el aire circundante y sus resultados confirman un buen desempeño en el proceso de la simulación, así mismo se obtienen valores del tiempo de enfriamiento a la mitad ( $T_{1/2}$ ) de 4915,21 seg, y la velocidad de enfriamiento instantáneo ( $R$ ) de  $0.002538 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

## V. RECOMENDACIONES

Como resultado de este trabajo son hechas las siguientes recomendaciones:

\_ La simulacion de un proceso u operación unitaria en la Industria alimentaria, utilizando un lenguaje de programacion de alto nivel, deben considerarse como una alternativa en la solucion de aquellos problemas en los cuales no se han obtenido buenos resultados, usando metodos tradicionales.

-En el modelamiento matematico de la transferencia de masa (humedad) debe enlazarse o tomarse en consideracion la tasa de respiracion y transpiracion, a medida que el fruto respira genera calor y esto contribuye a la transpiracion que es la perdida de agua a traves de la piel del fruto, con la finalidad de que la simulacion sea mas precisa y eficiente.

- Se debe considerar en el proceso de simulacion los cambios de valores de la humedad relativa en la camara de almacenamiento y transporte, porque influye directamente en la perdida de agua y consecuentemente en la vida util del producto.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Roca Elisabeth, Bertrand Broyard, Valerie Guillard, Sthepane Guilbert, Nathalie Gontard, “Prediction moisture transfer and shelf-life of multidomain in food products”, *Journal Food Engineering.*, vol.86, pp.74-83, 2008.
- [2] Petru- Marian Carlescu, Vlad Arsenoia, Radu. Rosca, Ioan Tenu, “CFD simulation of heat and mass transfer during appricots Drying”, *LWT- Food Science and Technology*, 2017.
- [3] Paniagua, A.C., A.R. East, J.P. Hindmarsh, J.A. Heyes, “Moisture loss is the major cause of firmness change during postharvest o blueberry”, *Postharvest Biology and Tehcnology.*, vol.79, pp.13-19, 2013.
- [4] Guillard, V., Broyart, B., Bonazzi, C., Guilbert, S., & Gontard, “Evolution of moisture distribution during storage in a composite food. Modeling and simulation”., *Journal of Food Science*, vol. 68, pp.958–966, 2003 a.
- [5] Jose M. Gomez, Sandra M. Mendoza, Anibal O. Herrera, Diego A. castellanos, “Evaluation and modeling of change in color, firmness and physicochemical shelf life of cut pineapple (*Ananas comosus*) slices in equilibrium modified atmosphere packing”, *Journal Food Science*, vol.0, 2020.
- [6] Yashmita Grover, Pradeep Singh Negi, “Recent development in freezing of fruits and vegetable: striving for controlled ice nucleation and crystallization with enhanced freezing rates”., *Journal Food Science*, pp.1-28, 2023.
- [7] Patrick Dempsey, Pradeep Bensal, “The art of air blast freezing: Design and Efficiency considerations”., *Applied Thermal Engineering*, vol.41, pp.71-83, 2012.
- [8] Hyun-Gyu Lee, Seung ran Yoo, “Changes in the Physical properties of frozen cooked rice depending on termal insulation levels of packing during freeze- thaw”., *Journal of Food Science*, vol.85, 2020.
- [9] Carlos Godoy, “Conservación de dos variedades de arándano alto en condiciones de frio convencional”., *Rev. Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, Tomo xxxvi No.1, pp.53-61. 2004.
- [10] Roca Elisabeth, Valerie Guillard, Sthepane Guilbert, Nathalie Gontard, “Moisture migration a cereal composite food at high wáter activity: Effects of initial porosity and fat content”, *Journal of Cereal Science*, vol.43, pp.144-151, 2006.
- [11] Sousa-Gallagher, M.J., Mahajan, P. V., Yan, Z., *Modelling chemical and physical deterioration of foods and beverages*, in: Kilcast & Subramaniam (Ed.), *Food and Beverage Stability and Shelf Life*. Woodhead Publishing Ltd, pp. 459–481, 2011  
<https://doi.org/10.1533/9780857092540.2.459>

- [12] Gwanpua, S.G. Verdlinden, B.E. Hertog, M.L.A.T.M., Bulens, I., Van der Poel., Van Impe, J., Nicolai, B.M. and Geeraerd. "Kinetics modeling of firmness breakdown in Braeburn apples stored under different controlled atmosphere conditions", *Postharvest Biology Technology*, vol.67, pp. 68-74, 2012.
- [13] Keshed, M.H., Omar, M.N and Elsis, S.F." Simulation of mass transfer from peaches during cool store and its effect on some quality properties, ", *Misr. Journal Ag. Eng.*, vol.36 (1), pp. 259-282, 2019.
- [14] Veraberbeke, E.A., Verboken, P., Van Oostveldt, P. and Nicola, B.M. "Prediction of moisture loss across the cuticle of Apple, during storage Part. I. Model development and determination of diffusion coefficients ", *Postharvest Biology and Technology*, vol 30, pp.75-88, 2003.
- [15] Incropera, F.P., and De Witt, D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Eds. New York: John Wiley and Sons, 1990.
- [16] Methods of precooling fruits and vegetables. Chap. 22, In **ASHRAE**, handbook, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Handbook, 2006.
- [17] Alvis, A., Caicedo, I., y Peña, P. (2012). "Determinación de Propiedades Termofísicas de alimentos en función de la concentración y la temperatura empleando un programa computacional", *Información Tecnológica*, Vol. 23(1), pp.111-116, 2012.
- [18] Gleason, H. A. & A.J. Cronquist. *Man. Vasc. Pl. N.E. U.S.* (ed. 2) i-910. New York Botanical Garden, Bronx.1991 [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Vaccinium\\_corymbosum](https://es.wikipedia.org/wiki/Vaccinium_corymbosum). [Accedido:18-Julio-2024]
- [19] Agencia agraria de noticias, 2024 [En línea]. Disponible en: <https://agraria.pe/noticias/la-ruta-de-crecimiento-del-arandano-en-el-peru-35625>. [Accedido: 24-julio-2024]
- [20] Disponible en <https://blog.nubecolectiva.com/los-20-lenguajes-de-programacion-mas-populares-junio-2020>. [Accedido 30- julio-2024]

## VII. ANEXOS

Programa principal escrito, codificado en la plataforma de programación MATLAB, versión R2017-b, en la simulación y la predicción de la pérdida de humedad del arándano en almacenamiento en frío (transferencia de masa). frente al tiempo.

```
C main8.m X
D: > programa_perdida_peso > C main8.m
1
2
3 % Properties of Air at 1°C
4 ro_r = 1.29; % Density of air inside the cooling chamber (kg/m³)
5 ka = 0.025 * 1; % Thermal conductivity of air (W/m·K)
6 cpa = 1004; % Specific heat capacity of refrigeration air (J/kg·K)
7 dair = 2.1e-5; % Water diffusivity in air (m²/s)
8 ta = 1 + 273.15; % Air temperature (°C)
9
10 % Thermo-Physical Properties of Blueberry
11 ro_p = 950; % Density of blueberry (kg/m³)
12 kp = 0.546 * 1; % Thermal conductivity of blueberry (W/m·K)
13 cp = 3830 * 1; % Specific heat capacity of blueberry (J/kg·K)
14
15 % Constants
16 m_agua = 0.018; % Molar mass of water (kg/mol)
17 r = 8.314 ; % Universal gas constant (J/mol·K)
18
19 % Blueberry properties
20 as = 0.0019635; %7.96e-6; % Surface area of blueberry (m²) 0.0019635 r=0.0125m;
21 hr = 85; % Relative humidity (%)
22 aw = 0.85; % Water activity in the fruit
23
24 u_inf = 1.5; % Wind speed (m/s)
25 d = 0.025; % Diameter of blueberry (m)
26
27 % Initial and surface temperatures
28 ts = 5 + 273.15; % Surface temperature of blueberry (°C)
29 ti = 23 + 0; % Initial pulp temperature (°C)
30
31 % Calculate coefficients
32 % Calculate the Lewis number
33 le = ka / (ro_r * cpa * dair);
34 % Calculate the convective heat transfer coefficient
35 alpha = kp / (ro_p * cp); % Thermal diffusivity of blueberry
36 u = 17.19 + 0.0429 * ta; % Dynamic viscosity of air
```

```

37 v = u / ro_r; % Kinematic viscosity of air
38 pr = v / alpha; % Prandtl number
39 re = (u_inf * d) / v; % Reynolds number
40 nu = 2 + 0.6 * re^0.5 * pr^0.33; % Nusselt number
41 hc = (nu * ka) / d; % Heat transfer coefficient (W/m^2K)
42 % Calculate the moisture transfer coefficient
43 kta = hc / (ro_r * cpa * le^(2/3));
44 % Calculate the vapor density at the surface of the blueberry
45 p_sat_surf = 0.61078 * exp((17.269388 * ts) ./ (ts + 237.3)); % Saturation vapor pressure
46
47 % Calculate vapor densities
48 ro_w = (m_agua * p_sat_surf * aw) ./ (r * (ts + 0)); % Convert C to K
49 % Calculate the vapor density in the air
50 p_sat_air = 0.61078 * exp((17.269388 * ta) / (ta + 237.3)); % Saturation vapor pressure
51 ro_w_air = p_sat_air * hr / 100;
52 ro_w_inf = (m_agua * ro_w_air) / (r * (ta + 0)); % Convert C to K
53
54
55
56 % Time settings for simulation
57 tspan = [0 60*24*45]; % Simulate for 1 hour (3600 seconds)
58 m0 = 0; % Initial weight loss
59
60 % Solve the differential equation using ode45
61 dmdt = @(t, m) kta * as * (ro_w - ro_w_inf);
62 [t, m] = ode45(dmdt, tspan, m0);
63 mar_sub = [0, 12, 7, 1, 2];
64 aereo_sub = [0; 19.5; 13.5; 14.9; 10.9];
65 figure;
66 t1 = [0; 15; 25; 35; 45];
67 plot(t/(60*24), m * 620, '-o', 'Linewidth', 3);
68 hold on;
69 plot(t1, mar_sub, '-o', 'Linewidth', 2);
70 hold on;

```

```

108 hold on;
109 legend1 = sprintf('Estimaci3n...%.6f', m_acc(end));
110 legend2 = sprintf('Via Mar3tima...%.2f', mar(end));
111 legend3 = sprintf('Via A3rea...%.2f', aereo(end));
112 legend(legend1, legend2, legend3);
113 xlabel('Tiempo (días)');
114 ylabel('P3rdida de peso Acumulado(m)');
115 title('Soluci3n de la Equaci3n Diferencial dm/dt = kta * a_s * (ro_w - ro_w_{,inf})');
116 grid on;
117
118
119
120
121 % Calculate the cooling relationship
122 ta = 1;
123 t = 23;
124 ti = 15;
125 y1 = (t - ti) / (ti - ta);
126 t = 21;
127 ti = 15;
128 y2 = (t - ti) / (ti - ta);
129 tiempo1 = 1*24*5;
130 tiempo2 = 2*24*45;
131 % Calculate the cooling coefficient
132 c = (log(y1) - log(y2)) / (tiempo1 - tiempo2);
133
134 % Calculate the half-cooling time
135 mitad_t = log(0.5) / c;
136
137 % Calculate the cooling rate
138 ve = transpose(c) * (5 - 23);
139
140 fprintf('Relaci3n de enfriamiento (Y1): %.6f \n', y1)
141 fprintf('Relaci3n de enfriamiento (Y2): %.6f \n', y2)
106 hold on:
142 fprintf('Coeficiente de enfriamiento (C): %.6f \n', c)
143 fprintf('Tiempo de enfriamiento a la mitad (t1/2): %.6f s \n', mitad_t)
144 fprintf('Velocidad de enfriamiento instant3neo (R): %.6f 3C/h', ve)
145

```

Relaci3n de enfriamiento (Y1): 0.571429

Relaci3n de enfriamiento (Y2): 0.428571

Coeficiente de enfriamiento (C): -0.000141

Tiempo de enfriamiento a la mitad (t<sup>1/2</sup>): 4915.218513 s

Velocidad de enfriamiento instant3neo (R): 0.002538 3C