

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**ESTUDIO DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA DEL ALMÍBAR EN  
LA PIÑA (*Ananas-Comosus*) PARA SU CONSERVACIÓN**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**FRANCELY CELESTE MULLISACA TORRES**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PUNO – PERÚ**

**2017**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESTUDIO DE LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA DEL ALMÍBAR EN  
LA PIÑA (*Ananas Comosus*) PARA SU CONSERVACIÓN**

**TESIS PRESENTADA POR:**

**FRANCELY CELESTE MULLISACA TORRES**

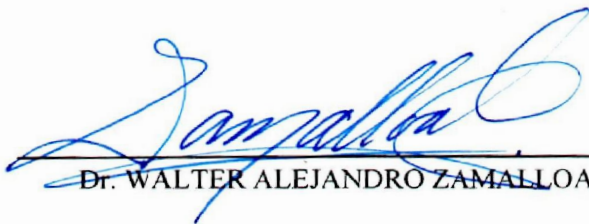
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

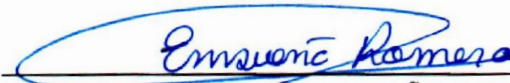


**APROBADA POR:**

**PRESIDENTE**

:   
Dr. WALTER ALEJANDRO ZAMALLOA CUBA

**PRIMER MIEMBRO**

:   
Dra. LIDIA ENSUEÑO ROMERO IRURI

**SEGUNDO MIEMBRO:**

  
Ing. ELVA LÚZ MACEDO ENRÍQUEZ

**DIRECTOR / ASESOR:**

  
Dra. EDITH TELLO PALMA

**ÁREA: Procesos industriales**

**TEMA: Difusividad efectiva del almíbar en la piña**

**LÍNEA: Tecnología de alimentos**

**FECHA DE SUSTENTACIÓN: 28 de diciembre de 2017**

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis principalmente a Dios por ser quién supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no quebrantarme ante situaciones adversas que se presentan.

Para mis padres Neri Torres Sánchez y Marcos Mullisaca Laura, por su comprensión y ayuda en momentos malos y buenos. Me han enseñado a encarar las adversidades sin desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

Para mis hermanos, Heidi, Lizeth, Esleyter y mi sobrino Abad quienes han sido fundamentales en mí camino, por su dedicación y palabras de aliento nunca bajaron los brazos para que yo tampoco lo haga aun cuando todo se complicaba.

Para mi compañero de vida Yoni, por su paciencia su comprensión, por su empeño, por su fuerza, por su amor, para conseguir un equilibrio que me permita dar el máximo de mí.

Para mi querido hijo Edikvander porque su nacimiento ha coincidido con el final de la tesis él es lo mejor que me ha pasado, y ha venido a este mundo para darme el último empujón para terminar el trabajo es sin duda mi referencia para el presente y para el futuro.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios, por haberme dado fuerza y valor para culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres Francisca Neri Torres Sánchez y Marcos Sócrates Mullisaca Laura, por todo lo que me han dado durante toda mi vida, les estaré eternamente agradecido

Al Ing. Edith Tello Palma, director de tesis y señores jurados, por su valiosa guía y asesoramiento a la realización de la misma.

A la Universidad Nacional Del Altiplano y Facultad de Ingeniería Química, docentes que forman parte de ella. Por la formación profesional brindada.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS .....	8
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS .....	9
RESUMEN .....	11
ABSTRACT.....	12
I.- INTRODUCCIÓN .....	13
II.- REVISIÓN DE LITERATURA.....	15
2.1.- Piña (Ananas comosus) .....	15
2.1.1.- Definición .....	15
2.1.2.- Descripción botánica.....	15
2.1.3.- Morfología. ....	15
2.1.4.- Raíces.....	16
2.1.5.- Fruto.....	16
2.1.6.- Hojas .....	16
2.1.7.- Propiedades de la piña .....	16
2.2.- Almíbar de fruta .....	17
2.2.1.- Interacción molecular del almíbar de fruta.....	17
2.2.2.- Ingredientes Básicos .....	18
2.2.3.- Conservación de frutas.....	18
2.2.4.- Conservación por elevadas concentraciones de azúcar: .....	19
2.2.5.- Principios de transferencia de masa.....	19
2.2.6.- Clasificación general de la transferencia de masa .....	20
2.2.7.- Determinación del coeficiente de difusión .....	26
2.3.- Antecedentes.....	30
III.- MATERIALES Y MÉTODOS .....	35
3.1.- Lugar de ejecución .....	35
3.2.- Materiales .....	35
3.2.1.- Materiales equipos y reactivos.....	35
3.2.2.- Materia prima.....	35
3.3.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	36
3.3.1.- Procedimiento para la obtención de almíbar de piña .....	36
3.3.2.- Determinación de las propiedades fisicoquímicas.....	41
3.3.3.- Determinación de la viscosidad y la densidad del almíbar de piña .....	43

3.3.4.-	Balance de materia.....	45
3.3.5.-	Diseño experimental .....	46
3.3.6.-	Factores de estudios .....	47
3.3.7.-	Formulación de la tabla factorial para análisis de datos .....	47
IV.-	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	48
4.1.-	Determinación de la viscosidad y la densidad del almíbar de piña .....	48
4.2.-	Deter. de los parámetros de proceso en la difusión del almíbar en la piña. .	49
4.2.1.-	Resultado de Análisis de contenidos de sólidos solubles (° Brix).....	49
4.3.-	Determinación del coeficiente de difusividad .....	50
4.4.-	Análisis microbiológico.....	55
4.5.-	BALANCE DE MATERIA DEL PROCESO .....	56
4.5.1.-	Balance general.....	57
4.5.2.-	Balance de agua .....	57
4.5.3.-	Balance por componente.....	57
4.6.-	Tratamiento estadístico.....	58
V.-	CONCLUSIONES .....	64
VI.-	RECOMENDACIONES.....	65
VII.-	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
	ANEXOS .....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema De Un Sólido Poroso Típico.....	24
Figura 2: Difusión en estado no estacionario – deducción de la segunda ley de fick ....	25
Figura 3: Transferencia de masa en estado no estacionario.....	26
Figura 4: Diagrama de flujo para la elaboración del almíbar de piña.....	36
Figura 5: Materia prima piña .....	37
Figura 6: Lavado pelado y cortado de la piña.....	38
Figura 7: Troceado y descorazonado de la piña .....	38
Figura 8: Corte cubico de la piña.....	38
Figura 9: Pesado de la piña entera .....	39
Figura 10: Pesado de la piña troceada en cubos .....	39
Figura 11: Pesado de la piña troceada .....	39
Figura 12: Escaldado de la fruta .....	39
Figura 13: Preparación del jarabe .....	40
Figura 14: Jarabes a 14°Brix ,23 Brix ,32 Brix .....	40
Figura 15: Almíbar de piña.....	41
Figura 16: Determinación de los sólidos solubles de la pulpa de la piña .....	41
Figura 17: Determinación del pH en el almíbar de piña.....	43
Figura 18: Curva de difusión del almíbar en la piña ° Brix con respecto al tiempo de inmersión .....	53
Figura 19: Curva de ganancia del °Brix de pulpa de piña con respecto al tiempo de inmersión .....	54
Figura 20: Diagrama de Pareto para la difusividad del almíbar .....	59
Figura 21: Contornos de la superficie de respuesta estimada para la difusividad .....	62
Figura 22: Superficie de respuesta estimada para la difusividad de la piña .....	62

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Análisis químico y estructural de la piña.....	15
Tabla 2: Valores de la difusividad efectiva de la sacarosa. ....	23
Tabla 3: Niveles máximos y mínimos .....	47
Tabla 4: Factorial para el análisis de datos .....	47
Tabla 5: Valores obtenidos de densidad y viscosidad para el almíbar de piña.....	48
Tabla 6: Resultado de análisis de sólidos solubles (°Brix) de 1 a 4 horas.....	49
Tabla 7: Parámetros de proceso .....	49
Tabla 8: Coeficientes de difusividad a determinadas condiciones .....	50
Tabla 9: Comparación del coeficiente de difusividad con diferentes autores .....	52
Tabla 10: Análisis microbiológico del almíbar de piña.....	55
Tabla 11: Resumen del balance de materia del proceso .....	58
Tabla 12: Diseño experimental .....	58
Tabla 13: Análisis de varianza para la difusividad de la piña .....	59
Tabla 14: Coeficiente de regresión para la difusividad de la piña.....	61
Tabla 15: Valores óptimos para la obtención de la difusividad del almíbar.....	61
Tabla 16: Comparación de valores obtenidos de coeficiente de difusión de la piña el valor experimental y el valor obtenido por el diseño experimental.....	63



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

**A:** Azúcar (Kg)

**C<sub>J</sub>:** concentración del Almíbar en (°Brix)

**C<sub>IP</sub>:** concentración inicial de la piña en (°Brix)

**C<sub>t</sub>:** concentración a un determinado tiempo en (°Brix)

**C<sub>e</sub>:** concentración en el equilibrio en (°Brix)

**C<sub>A</sub>:** Es la concentración de la especie A en la mezcla en ese lugar.

**De:** **difusividad** efectiva de la piña (m<sup>2</sup>/seg)

**D<sub>AB</sub>:** Es el cociente de difusión (o difusividad de la masa), en m<sup>2</sup> /s.

**Des:** coeficiente de difusión efectivo de los solutos

**F<sub>1</sub>:** Fruta (Kg)

**F<sub>2</sub>:** Fruta en almíbar (Kg)

**G<sub>1</sub>:** Agua (Kg)

**I** = espacio que ocurre la transferencia de masa los cortes del cubo de grosor

**m<sub>p+d</sub>** : Peso del picnómetro y la disolución

**m<sub>p</sub>** : Peso del Picnómetro

**m<sub>p+w</sub>** : Peso del picnómetro con agua

**N:** Es la razón de difusión de masa de la especie química A, en kmol/s.

**S:** concentración de sólidos en el producto

**St**= concentración a un determinado tiempo

**Se**= concentración en el equilibrio

**S<sub>0</sub>**=concentración al inicio

**S<sub>1</sub>:** Ácido cítrico (Kg) (1% del azúcar)

$t_m$  tiempo en (min)

$t_e$ : tiempo del equilibrio (min)

$W_1$ : Composición del azúcar ( $^{\circ}$ Brix)

$W_2$ : Composición del ácido cítrico ( $^{\circ}$ Brix)

$X_1$ =Concentración

$X_2$ =tiempo

$Y$ = Variable respuesta

$\frac{dCA}{dZ}$  : Gradiente de concentración de A,

$X_1$ : Composición inicial de la piña ( $^{\circ}$ Brix)

$X_2$ : Composición en el equilibrio de la piña ( $^{\circ}$ Brix)

$\rho_d$  : Densidad de la disolución

$\rho_w$  : Densidad del agua

$Z_1$ : Composición en agua de la fruta

$Z_2$ : Composición en agua de la fruta

## RESUMEN

El objetivo de la investigación fue desarrollar el estudio de la difusividad del almíbar en la piña (*Ananas comosus*), para determinar el coeficiente de difusión, y sus parámetros de operación, viscosidad, y densidad para posteriormente validar los resultados obtenidos con los ya establecidos en la teoría, se desarrolló en el Laboratorio de alimentos de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA –Puno, el coeficiente de difusión del almíbar se estimó por el método de separación de variables basados en la segunda ley de difusión de fick, la difusividad se examinó durante tiempos comprendidos de 60-240 minutos hasta llegar al equilibrio en soluciones osmóticas en un rango de concentración de (14-32°Brix) a temperatura ambiente. Los resultados indicaron que se determinaron los coeficientes de difusión efectiva para el almíbar considerando la configuración cubica de la piña, un valor de  $4.56 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{seg}$  a 32 °Brix a temperatura ambiente a 180 minutos siendo este el mayor valor de difusividad obtenida valor el cual es consistente con los valores reportados en la literatura. Se obtuvo una ecuación de regresión ajustada por estadística con un nivel de confianza de 99,76%. Con la cual se obtuvo un valor de  $4.15503 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{seg}$  a 32°Brix y 180 min a temperatura ambiente para este modelo, el cual está muy próximo al valor encontrado experimentalmente. Los factores que contribuyen a la determinación de las difusividades efectivas son el tiempo de sumergimiento, y la concentración de la solución osmótica.

**Palabras Clave:** almíbar, coeficiente de difusión, conservación, piña.

## ABSTRACT

The main objective of this research was develop the study of syrup diffusivity in pineapple (*Ananas comosus*), it is for determine diffusion coefficient and its operating parameters, also to determine viscosity and density for validating the results obtained later with those already established in the theory, it was developed in Food Laboratory in Chemical Engineering Faculty, UNA – Puno. The syrup's Diffusion coefficient was estimated by the separation method of variables, it is based on the Fick's second law of diffusion, this diffusivity was examined during 60-240 minutes until reaching the equilibrium in osmotic solutions in a range concentration (14-32 ° Brix) at room temperature. Results indicated that effective diffusion coefficients for the syrup were determined considering cubic pineapple configuration, a value of  $4.56 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{seg}$  at 32 ° Brix at room temperature at 180 minutes being this the highest diffusivity value obtained, diffusivity value which is consistent with values reported in books. Obtaining a regression equation adjusted by statigraphics with a confidence level 99.76%. With this result was obtained a value  $4.15503 \text{ E-}10 \text{ m}^2/\text{seg}$  at 32°Brix and 180 min at room temperature for this model, which it is very close to value found experimentally. The factors that contribute to determination the effective diffusivities are time submersion, and concentration of osmotic solution.

**Key Words:** Syrup, diffusion coefficient, conservation, pineapple.

## I.- INTRODUCCIÓN

La piña es una fruta popular en las regiones tropicales disponible durante todo el año, tiene una vida útil corta, se trata de productos con una estacionalidad muy marcada y con un alto contenido en agua que los hace muy perecederos lo que aumenta las pérdidas pos cosecha, los tratamientos de alimentos sólidos en disoluciones hipertónicas han sido utilizados como un medio para prolongar la vida útil de las frutas desde hace mucho tiempo, (Lins y Gomes, 2014).

Los consumidores tienen tendencia a consumir productos que sean saludables con características sensoriales con mínima intervención de procesos industriales, que tengan altos valores nutritivos y de agradable sabor entre estos productos destacan las conservas de frutas, los procesos de industrialización de las frutas se encuentran limitado por varios factores el transporte de la materia prima que por falta de carreteras la fruta muchas veces tiende a malograrse, las cuales generaran la necesidad de obtener productos que puedan ser almacenados y poder ser consumida en cualquier época del año (Martínez et.al., 2003)

En respuesta a dicha demanda, surge el interés de investigar esta temática debido a que la investigación creará una mejor conciencia de consumo basada en la adquisición de productos naturales y con alto valor nutricional, como también dar el aporte técnico en su conservación y para ello explicar los fenómenos difusionales que ocurren en estos procesos, el cual representa una alternativa tecnológica para la reducción de las pérdidas pos cosecha para el aprovechamiento de la materia prima en este caso de la piña. En el presente investigación se plantea proponer la tecnología adecuada para el procesamiento de la piña en almíbar, este objetivo se lograra a través del empleo de tratamientos osmóticos el cual consiste en sumergir la fruta en una disolución concentrada de azúcar con esta técnica se producen cambios bioquímicos y fisicoquímicos que aumentan la

estabilidad y vida útil de la fruta para lograr su conservación por más tiempo y así tenerlos durante todo el año (Bezerra, 2015)

El tratamiento osmótico también permite un incremento en el valor nutritivo de las frutas y hortalizas, debido a la impregnación de minerales y vitaminas en su estructura porosa en este tipo de procesos, el cual consiste en aplicar la transferencia de masa del almíbar hacia la piña y el agua de la piña hacia la solución osmótica hasta llegar al equilibrio (Fito et.al., 2001)

Las soluciones hipertónicas proporcionan una alta presión osmótica que promueve la difusión de agua desde el tejido vegetal en la solución y la difusión de solutos osmótica de la solución en el tejido (Rastogi y Raghavarao, 2004).

Una propiedad fundamental del transporte interno, y característica de cada material, es la difusividad, La velocidad de transferencia del almíbar depende del coeficiente de difusión efectivo, para ello es necesario determinar su valor, para un producto que se desee conservar ya que su conocimiento permitirá definir los parámetros de proceso tales como el tiempo difusión, la concentración de la solución osmótica y su caracterización, el valor obtenido del coeficiente de difusión predice con exactitud el proceso, los valores obtenidos servirán a los investigadores para el diseño de equipos a nivel industrial y evitar gastos en energía (Giraldo et. al.,2003).

Se ha planteado como objetivo general: determinar la difusividad del almíbar en la piña (*Ananas comosus*) para su conservación y como objetivos específicos: determinar los parámetros de procesos en la difusión del almíbar en la piña, hallar el coeficiente de difusión del almíbar en la piña en base a la viscosidad y la densidad del almíbar de piña.

## II.- REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1.-Piña (*Ananas comosus*)

#### 2.1.1.- Definición

Es una planta perenne, monocotiledónea herbácea, es la especie más importante de la familia Bromeliácea se le llamo la fruta de los dioses, es una especie terrestre, nativa de Sudamérica posiblemente del Brasil, la piña o ananá con nombre científico de (*Ananas comosus*) nativa de América del sur (Garcidueñas P., 2013).

**Tabla 1: Análisis químico y estructural de la piña**

Componente (%)	Piña
Cenizas	3.7
Lípidos	1.2
Proteínas	4.4
Celulosa	45.1
Hemicelulosa	10.1
Lignina	30.3

Fuente: Barrientos (2011)

#### 2.1.2.- Descripción botánica

La piña como la mayoría de las bromeliáceas son epifitas es una planta vivaz, terrestre aparentemente acule con una roseta basal de hojas rígidas sésiles lanceoladas estrechamente imbricadas con los márgenes dotados de espinas cortas de 30 a 100 cm de largo son ligeramente cóncavas para conducir el agua de lluvia hacia la roseta, el tallo, rojizo se hace visible alrededor de los 2 años, creciendo longitudinalmente hasta alcanzar entre 1 y 1.5 las axilas foliares aparecen pequeños retoños que los cultivadores cortan para la reproducción aunque así se pueden producir más frutos (Arapa, 2011).

#### 2.1.3.- Morfología.

La piña es una herbácea perenne, cuya inflorescencia terminal da origen a una fruta múltiple. Después de la maduración de los primeros frutos, la planta desarrolla nuevos

brotos a partir de yemas axilares, para producir nuevos ejes de crecimiento capaces de producir otro fruto (Bartholomew, 2002).

#### **2.1.4.- Raíces**

El conjunto del sistema radicular de la planta adulta es muy superficial, pero su importancia depende esencialmente de las características físicas del suelo: estructura, aireación, y humedad. Su longitud puede llegar hasta los 2 m, cuando el medio es favorable las raíces crecen dentro del suelo cuando las hojas más viejas mueren y declinan. (Trópico, 2013).

#### **2.1.5.- Fruto**

Las flores dan fruto sin necesidad de fecundación del óvulo y ovario hipógino se desarrollan unos frutos en forma de baya, que conjuntamente con el eje de la inflorescencia y las brácteas, dan lugar a una infrutescencia carnosa (sincarpio) en la superficie de la infrutescencia se ven únicamente las cubiertas cuadradas y aplanadas de los frutos individuales (Garcidueñas, 2013).

#### **2.1.6.- Hojas**

Las hojas sésiles encierran el tallo en dos terceras partes de su circunferencia, el número de hojas es variable, en promedio va de 40 - 80. Las hojas apicales son cortas, erectas, ensiformes y excepto para las más pequeñas apicales, más amplias en su base, que forman una vaina no clorofílica alrededor del tallo. (Hernández, 2003).

#### **2.1.7.- Propiedades de la piña**

Entre las propiedades medicinales del mismo la más notable es la de la enzima proteocilictica llamada bromelina que ayuda a metabolizar los alimentos , es también diurético ligeramente antiséptico desintoxicante antiácido y vermífugo se ha estudiado su uso como auxiliar en el tratamiento de la artritis y reumatoide (Arapa, 2011).



## **2.2.- Almíbar de fruta**

La fruta en almíbar es el producto elaborado a partir de frutas sanas y generalmente en un estado de madurez intermedio entre la madurez de consumo y la fisiológica de tal modo que se encuentren relativamente firmes para soportar el manipuleo durante el procesamiento cortado, pelado, blanqueado, tratamiento térmico.(Guevara y Cancino, 2015).

Los almíbares o jarabes son una solución de azúcar y agua que se preparan con distintas densidades, es decir, cantidad variable de azúcar disuelto en agua, desde el punto de vista tecnológico las frutas envasadas constituyen uno de los productos que se conservan con mayor facilidad. La composición depende naturalmente de la especie y la variedad. Dentro de una misma variedad la composición y textura sus propiedades cambian principalmente por su estado de madurez, de las condiciones agronómicas de cultivo y del manejo pos cosecha (Mera 2015)

### **2.2.1.- Interacción molecular del almíbar de fruta**

Cuando se pone en contacto fruta y jarabe se produce una transferencia de masa, esta transferencia se debe al equilibrio que espontáneamente se busca establecer, entonces si el jarabe posee una mayor concentración de sustancias que la fruta, estas sustancias tienden a salir de la fruta hacia el jarabe, si las paredes celulares lo permiten. La primera que sale y en mayor cantidad es el agua. También otros componentes de la fruta tratan de salir; estos son algunos ácidos, minerales, azúcares, pigmentos y sustancias de sabor. Otra transferencia de masa que se produce es del soluto del jarabe que trata de entrar a la fruta, si las paredes celulares lo permiten esta migración no es muy elevada y se produce generalmente en los primeros momentos de contacto, tratando de permanecer constante a lo largo de su permanencia en almacenamiento. (Desrosier, 2010).

### **2.2.2.- Ingredientes Básicos**

#### **2.2.2.1.- Azúcar**

Se denomina coloquialmente azúcar a la sacarosa, también llamado azúcar común o azúcar de mesa. La sacarosa es un disacárido formado por una molécula de glucosa y una de fructosa es soluble en agua y ligeramente soluble en alcohol y éter, que se obtiene principalmente de la caña de azúcar o de la remolacha azucarera. El azúcar blanco es sometido a un proceso de purificación final mecánico. (Magrama, 2013).

#### **2.2.2.2.- Ácido cítrico**

Se utiliza para regular la acidez, se controla a través del pH adecuado en el jarabe, y para neutralizar el efecto del hidróxido de sodio después del pelado químico de la fruta (Guevara y Cancino, 2015).

### **2.2.3.- Conservación de frutas.**

Las frutas tienen la característica de ser perecederos, por lo tanto necesitan condiciones específicas de tratamiento, conservación y manipulación para así lograr aumentar la vida del alimento. La principal causa de este deterioro es el ataque por diferentes tipos de microorganismos, cambios físico-químicos durante la manipulación, el procesamiento y el almacenamiento de los alimentos y por consiguiente existe una disminución en su calidad, ya que se ve afectado el color, olor y valor nutricional. Los métodos de conservación utilizados se dividen en físicos y químicos. Los métodos físicos incluyen los tratamientos térmicos, la deshidratación y la congelación. Los métodos químicos consisten en el uso de sustancias como el azúcar, sal, vinagre y conservadores. (Montilla, 2015).

La vida útil de un alimento se define como el tiempo finito después de su producción en condiciones controladas de almacenamiento, en las que tendrá una pérdida de sus

propiedades sensoriales y fisicoquímicas, y sufrirá un cambio en su perfil microbiológico (Carrillo y Reyes, 2013)

El tiempo durante el cual las características y desempeño del producto se mantienen como fueron proyectados por el fabricante. El producto es consumible o usable durante este periodo, brindándole al usuario final las características desempeño, seguridad y beneficios sensoriales esperados cuando cualquier atributo se pierde, se termina inevitablemente la vida útil del alimento (Mera 2015).

#### **2.2.4.- Conservación por elevadas concentraciones de azúcar:**

Para la conservación y elaboración de almibares se utiliza una determinada concentración de azúcar y agua que adiciona grandes cantidades de azúcar en el almíbar con el objetivo de endulzar las frutas. esto aumenta la cantidad de solidos solubles totales y medido como grados brix con el mismo propósito de conservar el producto se controla el pH del agua el cual normalmente esta entre 6.7-7.8 con la acción de ácido cítrico el pH baja a 3.5 en promedio eso alarga la vida útil del producto disminuyendo las posibilidades del crecimiento bacteriano en un producto la conservación de alta concentración de azúcar es poco probable la presencia de bacterias sin embargo los hongos y levaduras pueden crecer en estas condiciones por lo que en algunos casos se utiliza benzoato de sodio para prevenirlos (Chacón, 2006).

#### **2.2.5.- Principios de transferencia de masa**

##### **2.2.5.1.- Transferencia de masa**

Debe distinguirse entre la transferencia de masa y el movimiento de masas de fluido (o flujo de fluidos) que se presenta en un nivel macroscópico conforme un fluido se transporta de un lugar a otro. La transferencia de masa requiere la presencia de dos regiones con composiciones químicas diferentes y se refiere al movimiento de especies químicas desde una región de alta concentración hacia una de concentración menor. La

fuerza impulsora primaria para el flujo de fluidos es la diferencia de presión, en tanto que, para la transferencia de masa, es la diferencia de concentración. (Cengel 2007).

Es una operación unitaria que interviene en la destilación, absorción, secado y extracción líquido-líquido. Cuando se está transfiriendo masa de una fase a otra o a través de una sola fase, el mecanismo básico es el mismo ya sea que se trate de gases, líquidos o sólidos. La transferencia de masa es decisiva en muchos resultados de la ciencia y la ingeniería. Se verifica cuando el componente de una mezcla inmigra a una misma fase o de una fase a otra, a causa de la diferencia de concentración entre dos puntos (Geankopolis, 1998).

### **2.2.6.- Clasificación general de la transferencia de masa**

#### **2.2.6.1.- Transferencia de masa molecular**

La masa puede transferirse por medio del movimiento molecular fortuito en los fluidos (movimiento individual de las moléculas), debido a una diferencia de concentraciones. La difusión molecular puede ocurrir en sistemas de fluidos estancados o en fluidos que se están moviendo (Grajales & De, 2008) Las partículas disueltas en un fluido tienen un movimiento que parece aleatorio. Sin embargo, dicho movimiento es consecuencia del segundo principio de la termodinámica (los sistemas tienden a un estado de entropía mayor), y se rige por una pauta de comportamiento: se produce un flujo másico de los puntos de mayor concentración hacia los puntos de menor concentración, es el denominado movimiento Browniano (UPC, 2010).

#### **2.2.6.2.- Transferencia de masa convectiva**

La convección de masa (o transferencia de masa por convección) es el mecanismo de transferencia de masa entre una superficie y un fluido en movimiento en el que intervienen tanto la difusión de masa como el movimiento de la masa de fluido. El movimiento del fluido mejora también en forma considerable la transferencia de masa, al quitar el fluido

con alta concentración cercano a la superficie y reemplazarlo por el de concentración más baja que se encuentra más alejado (Cengel, 2007).

### **2.2.6.3.- Difusión**

La difusión es el movimiento de los átomos en un material los átomos se mueven de una manera predecible tratando de eliminar diferencias de concentración y de producir una composición homogénea y uniforme, la difusión puede ser definida como el mecanismo por el cual la materia es transportada a través de ella misma (Ramiro 2008).

Difusión es el proceso mediante el cual la materia es transportada de una parte de un sistema a otro como resultado de movimientos moleculares al azar es usual ilustrado por el experimento clásico en el que un vaso cilíndrico alto su parte inferior llena de solución de yodo, por ejemplo, y una columna de clara el agua se vierte en la parte superior, cuidadosamente y lentamente, de modo que no haya corrientes de convección se establecen al principio la parte coloreada se separa del claro por un afilado, frontera bien definida posteriormente se observa que la parte superior se colorea, el color cada vez más débil hacia la parte superior, mientras que la parte inferior se convierte en correspondiente. Menos intensamente coloreado después de un tiempo suficiente, la solución completa aparece uniformemente coloreado. Evidentemente, hay una transferencia de yodo moléculas de la parte inferior a la parte superior del recipiente que se ausencia de corrientes de convección se dice que el yodo se ha difundido en el agua (Crank, 1975)

### **2.2.6.4.- Difusión de sólidos**

El transporte de masa en líquidos y sólidos se origina generalmente debido a una combinación de convección (movilización de fluido) y difusión. En los sólidos, estos movimientos atómicos quedan restringidos (no existe convección), debido a los enlaces que mantienen los átomos en las posiciones de equilibrio, por lo cual el único mecanismo

de transporte de masa es la difusión. Sin embargo las vibraciones térmicas que tienen lugar en sólidos permiten que algunos átomos se muevan (Ortiz y Morales 2011).

El transporte en sólidos se puede clasificar en dos tipos de difusión: la difusión que sigue la ley de Fick y que no depende primordialmente de la estructura del sólido; y la difusión en sólidos porosos, en la que la estructura real y los canales vacíos revisten gran importancia (Geankopolis, 1998).

#### **2.2.6.5.- Coeficiente de difusión efectiva**

Es el valor que representa la facilidad con que cada soluto en particular se mueve en un disolvente determinado. Depende básicamente de tres factores: tamaño y forma del soluto, temperatura, viscosidad del disolvente. El aumento del tamaño del soluto o de la viscosidad del disolvente dificulta la difusión mientras que el aumento de la temperatura la acelera. A igual masa molecular, los solutos esféricos difunden con más facilidad en el agua que los solutos alargados principalmente debido a aspectos de superficie de contacto, las unidades del coeficiente de difusión de difusión son  $m^2/s$ . (Esturau, 2011).

La difusión de fluidos en sólidos porosos es bastante importante en procesos alimenticios especialmente en procesos de secado y extracción sólido líquido en este contexto, define la difusividad másica efectiva como una cantidad empírica de una propiedad física precisamente determinada. La difusividad másica efectiva es un modo más conveniente de describir el proceso de difusión en medios sólidos que tienen una intrincada red de poros en sistemas heterogéneos químicos y estructuralmente complejos, donde las especies difusoras recorren un camino tortuoso. En sistemas alimenticios porosos la difusividad efectiva será significativamente menor que la difusividad másica molecular debido a estos efectos de tortuosidad (Varzakas y Arapoglou, 2005).

El coeficiente de difusión estimado será aquel que consiga una mejor correspondencia entre los valores obtenidos experimentalmente y los valores calculados mediante el modelo matemático (García y Gómez, 2012).

**Tabla 2: Valores de la difusividad efectiva de la sacarosa.**

<b>Fruta</b>	<b>Concentración °Brix</b>	<b>T (°C)</b>	<b>D<sub>e</sub> (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Referencia</b>
Manzana	65	20-50	0.172E-09	<i>Salvatori et. al., 1999</i>
Manzana	40-60	20-50	0.108E-09	<i>Kaymak y Sultanoglu, 2003.</i>
Papaya	50-70	30-50	0.933E-09	<i>Rodriguez et al., 2002</i>
Papaya	saturado	25	3.47E-09	<i>Mendoza, 2002.</i>
Piña	50-70	50-70	0.46E-09	<i>Waliszewski et al., 2004.</i>
Piña	40-70	30-50	1.54E-09	<i>Rastogi y Raghavarao, 2002.</i>
Banano	40-70	25-45	0.85E-09	<i>Rastogi y Raghavarao, 1996.</i>
Mango	35-65	30	0.77E-09	<i>Giraldo, 2003</i>

Fuente: Coaquira (2010)

**2.2.6.6.- Leyes de fick**

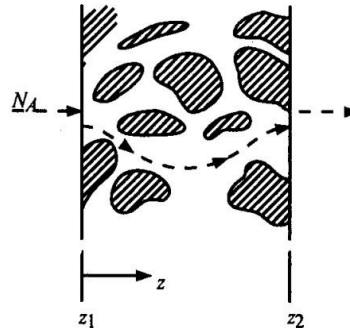
**2.2.6.7.- Difusión en estado estacionario (Primera ley de fick)**

Considerando una mezcla binaria en un medio en reposo de las especies químicas A y B, en donde el número de moléculas de A en un volumen dado en una región, es mayor que en otra región vecina, entonces tendrá lugar la migración de moléculas de A a través de B, es decir desde la zona de mayor concentración hacia la de menor concentración. (Rodríguez, 2017).

**2.2.6.8.- Difusión en sólidos porosos en los que afecta la estructura**

Difusión de líquidos en sólidos porosos. En esta sección interesan los sólidos porosos que tienen canales o espacios vacíos interconectados que afectan a la difusión. En caso de que los espacios vacíos estén totalmente llenos de agua líquida, Al difundirse en el agua por

los conductos vacíos, la solución sigue una trayectoria sinuosa desconocida que es mayor que por un factor  $z$ , llamado sinuosidad. En el sólido inerte no hay difusión. (Geankopolis, 1998).



**Figura 1: Esquema De Un Sólido Poroso Típico**

$$N = -D_{AB} * A * \frac{dC_A}{dz} \dots\dots\dots Ec. (1)$$

$$D_{ABEFF} = \frac{\varepsilon}{\tau} D_{AB} \dots\dots\dots Ec. (2)$$

- $N$ : Es la razón de difusión de masa de la especie química A, en kmol/s.
- $D_{AB}$ : Es el cociente de difusión de A a B (o difusividad de la masa), en  $m^2 / s$ .
- $C_A$ : Es la concentración de la especie A en la mezcla en ese lugar.
- $dC_A / dz$ : Gradiente de concentración de A.
- $\varepsilon$ : fracción de espacios vacíos.
- $\tau$ : es un factor de corrección de la trayectoria más larga.

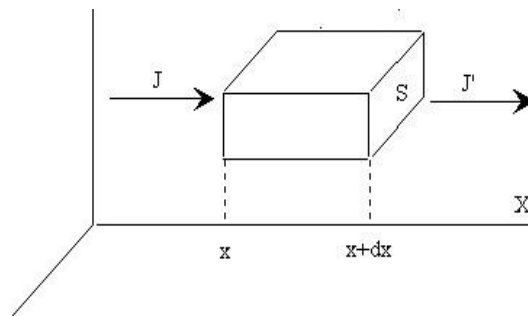
**2.2.6.9.- Difusión en estado no estacionario (segunda ley de fick)**

El estado no estacionario, en el cual las condiciones permanecen invariables con el tiempo, no se encuentra con facilidad entre los problemas de ingeniería. En la mayoría de los casos, se da la difusión en estado no estacionario, en el cual la concentración del soluto en cualquier punto del material cambiará con el tiempo (Rodríguez, 2017).



Este tipo de difusión en sólidos no depende de la estructura real del sólido. La difusión se verifica cuando el fluido o soluto que se difunde, se disuelve en el sólido para formar una solución más o menos homogénea -por ejemplo, en la lixiviación, donde el sólido contiene gran cantidad de agua y el soluto se difunde a través de esta solución-, o en la difusión de zinc a través de cobre, donde se forman soluciones sólidas. La difusión de agua en los alimentos, pues se pueden usar ecuaciones similares. (Geankopolis, 1998).

Difusión en estado no estacionario es hacer que un fluido se extienda en todas las direcciones. La difusión es un proceso físico irreversible, en el que partículas materiales se introducen en un medio que inicialmente estaba ausente, aumentando la entropía del sistema conjunto formado por las partículas difundidas o soluto y el medio donde se difunden o disolvente (Ortiz et. al., 2011).



**Figura 2: Difusión en estado no estacionario – deducción de la segunda ley de fick**

Autor: Rodríguez (2017)

**Balanceando respecto al componente A en términos molares, en ausencia de generación:**

Velocidad de entrada A = Velocidad de salida de A+ Velocidad acumulada de A

$$J_{A,Z} = J_{A,Z+\Delta Z} + \Delta Z * \frac{\partial C_A}{\partial t} \dots\dots\dots(3)$$

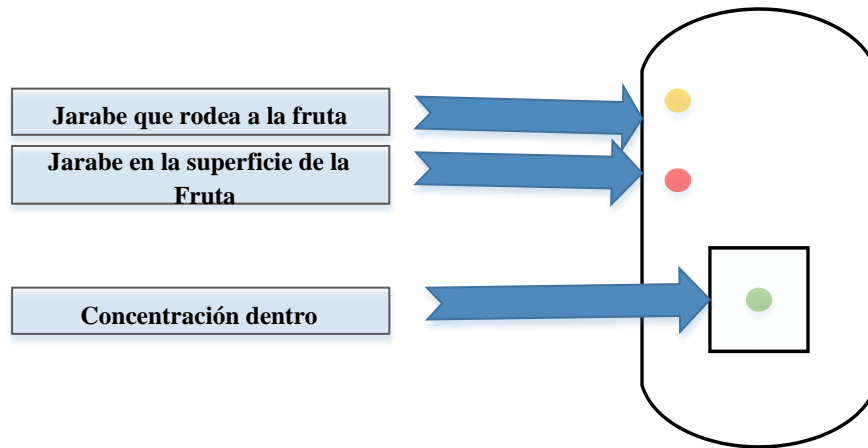
$$-D_{AB} * \frac{dC_A}{dz} = -D_{AB} * \frac{dC_A}{dz} + \Delta Z * D_{AB} * \frac{dC_A}{dz} \dots\dots\dots (4)$$

Ordenando y llevando al límite cuando delta z tiende a cero se obtiene la segunda ley de fick

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{d}{dt} (D_{AB} * \frac{dC_A}{dz}) \dots\dots\dots (5)$$

La ecuación de difusión es de segundo orden respecto del espacio y de primer orden respecto del tiempo. Para su resolución se deben especificar dos condiciones de contorno para la dependencia espacial y una para la dependencia temporal. (Bird, 2011).

Proceso de difusión molecular basada en las diferentes concentraciones que actúan sobre el alimento en estado no estacionario.



**Figura 3: Transferencia de masa en estado no estacionario**

Fuente: Ortiz et. al., (2011)

**2.2.7.- Determinación del coeficiente de difusión**

Existen distintos tipos de experimentos que pueden usarse para la determinación del coeficiente de difusión Si durante el experimento se mide el flujo de humedad a través del sólido, el modelo se basará en la primera ley de Fick. Si, por el contrario, en el experimento se cuantifica la difusión hacia el interior del sólido o desde este hacia el exterior, el modelo se basará en la segunda ley de Fick (Zogzas y Maroulis, 1996).

Las soluciones generales de la ecuación de difusión se pueden obtener para una variedad de condiciones iniciales y límites siempre que el coeficiente de difusión sea constante.

Dicha solución normalmente tiene una de las dos formas estándar o bien está comprendido de una serie de funciones de error o integrales relacionados, en cuyo caso es más adecuado para la evaluación numérica en tiempos pequeños, es decir, en las primeras etapas de difusión, o está en forma de una serie trigonométrica que converge más satisfactoriamente para grandes valores de tiempo cuando la difusión ocurre en un cilindro, la serie trigonométrica es reemplazada por una serie de funciones de Bessel (Crank, 1975).

### 2.2.7.1.- Método de permeabilidad

Consiste en colocar el material en forma de película y permitir a la humedad que difunda a través de él, manteniendo un gradiente de concentración entre sus dos superficies y consiguiendo condiciones de estado estacionario. Para ello, una película de material se coloca entre dos recintos cuya concentración de humedad es conocida. Después de un tiempo, las superficies del material llegan al equilibrio con la concentración de humedad, de manera que se establece un gradiente de concentración constante entre ellas, lo que implica estado estacionario (Boudhiouan y Daudin, 2003).

$$J = D_e * \left( \frac{C_{RA} - C_{RB}}{Y} \right) \dots\dots\dots \text{Ec. (6)}$$

Dónde:

- J: es la densidad de flujo constante de la sustancia que difunde  $\frac{kg}{m^2 s}$
- De: es la difusividad efectiva  $\frac{m}{s^2}$  que en esta ecuación no depende de la concentración,
- $C_{RA}$  y  $C_{RB}$ : son las concentraciones en las superficies A y B ( $kg/m^3$ )
- Y: es el espesor de la película de material (m).

- Está claro que la ecuación de la difusividad puede ser estimada por la medición del flujo de la difusión, conociendo la concentración en la superficie y el espesor de la membrana. El flujo puede ser determinado por la razón de flujo o la difusividad a través de la membrana este puede ser hecho experimentalmente por sucesivos pesados de las celdas en intervalos de tiempo ya predeterminados

### 2.2.7.2.- Método curvas distancias- concentración

Este método consiste en determinar a un tiempo  $t$  el perfil de concentración de una sustancia en el interior de la muestra en estudio, en función de la distancia, durante un proceso difusivo unidimensional que tiene lugar en régimen transitorio. Este método puede ser aplicado tanto a humedad como a solutos. (Boudhioua, y Daudin, 2003)

$$W = \frac{ADC_{RA}}{R} \left( t - \frac{R^2}{6D} \right) \dots\dots\dots Ec. (7)$$

Dónde:

- $W_t$ : Cantidad de difusión (Kg)
- $t$  = tiempo
- $A$  = área
- $C_{RA}$  = concentración
- $D$  = Difusividad

Aunque este método de la impregnación parece ser simple en el uso, hay problemas desde el punto de vista experimental. Uno de ellos es la fabricación de una hoja material fina de espesor constante y de la estructura homogénea. Un segundo, es el lacre de los bordes de la membrana, para asegurar la difusión solamente con el área de la membrana. Un tercero es la medida errónea del caudal del difundido, que resulta de la formación de las capas estancadas. Este problema no se puede solucionar adecuadamente y se hace frente

revolviendo parcialmente. Otros problemas bajo condiciones experimentales, se presenta como la hinchazón del material el mantenimiento de la membrana a las fuentes constantes de la concentración de difusión, así como del uso de los datos de equilibrio necesario para evaluar las concentraciones superficiales de la hoja.

### 2.2.7.3.- Método de separación de variables

Un método estándar para obtener una solución de una ecuación diferencial parcial es suponer que las variables son separadas, Así, se puede encontrar una solución (Crank, 1975).

✓ **Aplicando las siguientes expresiones:**

$$\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e} = \frac{4}{\pi} * \exp\left(\frac{\pi^2}{l^2} * D * t\right)$$

- Linealizando la ecuación:

$$-\left(\frac{\ln\left(\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e}\right)}{\ln\left(\frac{4}{\pi}\right)}\right) * \left(\frac{l^2}{\pi^2}\right) = D_e$$

Dónde:

- S: concentración de sólidos solubles en el producto
- Des: coeficiente de difusión efectivo de los solutos
- St= concentración a un determinado tiempo
- Se= concentración en el equilibrio
- S0=concentración al inicio
- l = espacio que ocurre la transferencia de masa los cortes del cubo de grosor.
- t= tiempo en que alcanza el equilibrio

### 2.3.- Antecedentes

Silva et. al., (2014) los efectos de las concentraciones de sacarosa y lactato de calcio sobre la cinética de deshidratación osmótica de piña, y la difusividad de cada componente. El color, la actividad del agua, la textura y la composición de la fruta también fueron evaluados. La deshidratación osmótica se realizó con 40% y 50% de sacarosa soluciones con lactato de calcio al 0%, 2% o 4% agregado durante 1, 2, 4 y 6 h de tiempo de procesamiento. La adición de calcio a la solución osmótica redujo el contenido de agua del producto y la tasa de incorporación de solutos, inhibiendo la impregnación de sacarosa y aumentar la eficiencia del proceso, en comparación con piña cruda los coeficientes de difusión presentados en este trabajo permitieron la selección de los concentraciones de sacarosa y calcio y el cálculo del tiempo de procesamiento para dar el producto deseado los coeficientes de difusión efectivos de agua, sacarosa y calcio en la piña osmóticamente deshidratada fue  $5.79 \cdot 10^{-10}$  (m<sup>2</sup>/s) para el agua  $4.68 \cdot 10^{-10}$  (m<sup>2</sup>/s) sacarosa  $1.63 \cdot 10^{-10}$  (m<sup>2</sup>/s).

Cordova y Custodio (2015) El presente trabajo de investigación consistió en predecir el comportamiento osmótico de la piña MD2 por un modelo matemático sumergir pequeños trozos de frutas Los factores que se consideraron para determinar la mejor combinación de tratamiento, es aquel que permitió remover la mayor cantidad de agua libre en los trozos de piña y también la que tuvo mayor ganancia de sólidos solubles dando por ganador a la solución osmótica de azúcar al 50% a una temperatura ambiente, también se logró determinar que el modelo matemático de Peleg permite predecir el comportamiento de la deshidratación osmótica de la piña MD2,obteniendose un coeficiente de difusividad de  $4.6 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s a 50-70 °Brix.

Jena y Das (2005) desarrolló un modelo matemático para la predicción del contenido de humedad en manzana y piña durante la osmoconcentración, teniendo como variables principales, la difusividad del azúcar, la ganancia de azúcar, la pérdida de agua y el contenido de humedad estas se predijeron a diferentes temperaturas (30, 40 y 50 C) y concentraciones (50, 60 y 70 °Brix) de solución de sacarosa. Los valores predichos de difusividad del agua variaron entre  $(0.78-3.46)10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s para manzana y  $(1.90-4.35) 10^{-10}$  m<sup>2</sup> /s para piña.

Por otra parte Cornejo, (2018) se evaluó el efecto de diferentes pre tratamientos como deshidratación osmótica uso un antioxidante y escaldado en la piña los resultados mostraron un coeficiente de transferencia de solidos de  $0.0252 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s

Rastogi y Raghavarao (2004) en este trabajo estimo por ley de Fick los coeficientes de difusión de agua y sacarosa durante la deshidratación osmótica de rodajas de piña en solución de sacarosa en diferentes temperaturas Además, analizó el efecto del cambio en el espesor (contracción) durante el proceso y el uso de términos de orden superior en la solución analítica el agua de equilibrio contenido varió entre 34 y 36% para una solución de sacarosa al 60% p / p y fue prácticamente independiente de temperatura. El contenido de azúcar en equilibrio aumentó de 45 a 54% cuando la temperatura aumentó de 30 a 50 ° C. Se encontró coeficiente de difusividad para la sacarosa  $5.75 \times 10^{-11}$  (m<sup>2</sup>/s) y los coeficientes de difusión para el agua  $4.57 \times 10^{-11}$  (m<sup>2</sup>/s).

Castro y Acosta (2015) El objetivo de este trabajo fue determinar la concentración óptima del jarabe y la difusividad másica de sacarosa durante el deshidratado osmótico de piña Hawaiana, utilizando tres tratamientos (concentración de jarabe de sacarosa (40°Brix, 50°Brix y 60°Brix). se modeló con la ecuación difusional de la segunda ley de Fick considerando los trozos de piña como una placa plana. La difusividad másica efectiva de

sacarosa en la piña disminuye a medida que se incrementa la concentración del jarabe siendo los valores obtenidos en promedio los siguientes: a 40°Brix  $5.3998 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ; a 50°Brix  $3.70831 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  y a 60°Brix  $3.2329 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Akharume (2018) los resultados mostraron que el análisis cinético de las manzanas cortadas en cubos demostró que el coeficiente de difusión efectivo para ganancia de sólidos fue el mismo ( $4,40 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ) Independientemente de la adición de humo líquido refinado (RSL); sin embargo, para OD (deshidratación osmótica) puro a base de azúcar y  $4,40 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Schincariol et al.,(2019)La deshidratación osmótica de rodajas de cambuci se estudió utilizando soluciones binarias y ternarias que contienen sorbitol (S) y lactato de calcio (CL) en diferentes concentraciones. Los experimentos se realizaron a 25 ° C. La masa y las propiedades físico-químicas de las rodajas de fruta se midieron a lo largo del proceso. Los resultados mostraron una reducción significativa en la humedad (X), la actividad del agua ( $a_w$ ) y el ácido titulable (TA). Los sólidos solubles (SS) y el aumento de pH fueron También se observa. Los resultados experimentales de la pérdida de agua y la ganancia de sólidos solubles se modelaron utilizando la ecuación de Peleg, y la humedad de equilibrio y el contenido de sólidos solubles. Fueron estimados El coeficiente de difusión efectivo  $1.42 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

Dash (2019) Se realizaron experimentos para investigar la deshidratación osmótica de rebanadas de jengibre suspendidas en tres agentes osmóticos diferentes a 0.1–600 MPa y 40 ° C para diversos tiempos de presión. Los valores efectivos de difusividad de humedad para glucosa, fructosa y sacarosa a 0.1 MPa y 40 ° C fueron  $3.22 \times 10^{-10}$ ,  $3.62 \times 10^{-10}$  y  $3.96 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  respectivamente.



Akharume, Singh, y Sivanandan, (2018) los resultados mostraron que el análisis cinético de las manzanas cortadas en cubos demostró que el coeficiente de difusión efectivo para ganancia de sólidos fue  $(4.40 \times 10^{-10} \text{ m}^2) / \text{s}$ . Independientemente de la adición de humo líquido refinado (RSL); sin embargo, para OD (deshidratación osmótica) puro a base de azúcar y  $4.40 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}$ .

Roche y Mascheroni (2013) en sus resultados ajustó el modelo de Azuara y Crank en función del tiempo de deshidratación osmótica de la zanahoria se grafica el coeficiente de difusividad efectiva del agua para tiempos breves considerando una lámina plana infinita y difusional unidimensional obteniendo un valor de  $1.52 \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$  y.

López (2010) la deshidratación osmótica (OD) de las rodajas de carambola en soluciones de sacarosa, fructosa y glucosa se ha llevado a cabo para evaluar las difusividades de agua y solutos, la difusividad efectiva del agua estaba en el rango de  $(1.00-3.74) \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$ , mientras que los valores de sacarosa, estuvieron entre  $(0.58-1.79) \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$  ( $0.56-1.34) \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$  y  $(0.56-1.88) \times 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$ , respectivamente. Los resultados demostraron que la sacarosa puede considerarse mejor agente osmótica que la fructosa y la glucosa para la DO de la carambola, lo que favorece mayores proporciones de ganancia de agua a soluto a tasas de transferencia de masa comparables.

Quispe (2015) llegó a los siguientes resultados la variación de Sólidos Solubles máxima 14.7759% a una presión de 668.179mbar, concentración 26.591°Brix y temperatura 46.55°C obteniendo mayor valor de difusividad máxima de  $7.0095 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}$ .

Coaquira (2010) los resultados obtenidos muestran que la difusividad efectiva de sacarosa en papaya osmodeshidratada es influenciada por la concentración, temperatura y el índice de madurez. Se logró el mayor valor de difusividad de sacarosa (azúcar)  $4.458 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  cuando la papaya se encuentra en estado verde, a una concentración de

60°Brix y a una temperatura de 45°C, así mismo el tiempo de inmersión en la solución hipertónica tiene relación inversa con la difusividad efectiva de sacarosa en papaya encontrando mayores valores de difusividad en los primeros minutos de tratamiento y la menor difusividad se da en el tratamiento del mismo estado a una concentración de 50°Brix y ambas temperaturas dando un valor de  $2.0264 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  de difusividad efectiva.

License (2014) los resultados evidenciaron una reducción gradual del contenido de humedad y ganancia de sólidos solubles totales en los cilindros de melón, generados por transporte de masa simultáneo de los dos componentes (agua y solutos). Además, que el tratamiento con glucosa presenta un  $De = 8.7 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  mayor que tratamiento con sacarosa  $De = 3.3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ . Por lo anterior se concluye que la deshidratación osmótica de melón se ve potenciada empleando glucosa en la solución hipertónica y que los modelos matemáticos establecidos son adecuados para modelar la deshidratación osmótica en cilindros de melón.

Breu, et al (2008) Con el fin de evaluar las variables no paramétricas como el color, olor y sabor del producto final se utilizó Friedman, prueba estadística que determinó que los tratamientos que mayor aceptación tuvieron son T6 (21°Brix-20% sábila 80% piña), T9 (30°Brix-20% sábila 80% piña) y T8 (30°Brix-50% sábila 50% piña). Posteriormente se realizó pruebas microbiológicas mismas que indican que el producto no tiene carga microbiana alguna, también se realizó análisis de vitamina C, azúcares totales, carbohidratos, proteína, fibra total, entre otros. Finalmente se determinó que la concentración de sólidos solubles y el porcentaje de trozos de sábila y piña adecuados son: 21°Brix-20% sábila 80% piña, 30°Brix 20% sábila 80% piña y 30°Brix-50% sábila 50%, presentes en los tres mejores tratamientos T6, T8 y T9 respectivamente.

### **III.- MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1.- Lugar de ejecución**

El presente trabajo de investigación se realizó en los ambientes de Universidad Nacional del Altiplano UNA- Puno, las pruebas experimentales se desarrollaran en laboratorios de alimentos de la Facultad de Ingeniería Química, bajo condiciones ambientales a una presión atmosférica de 486 mmHg, y a una altitud de 3812 m.s.n.m.

#### **3.2.- Materiales**

##### **3.2.1.- Materiales equipos y reactivos**

##### **3.2.2.- Materia prima**

- ✓ Piña

##### **3.2.2.1.- Materiales de laboratorio**

- ✓ Vasos precipitados de 100, 200,250 ml.
- ✓ Pipetas de 10 ml.
- ✓ Probetas 100 ml.

##### **3.2.2.2.- Reactivos**

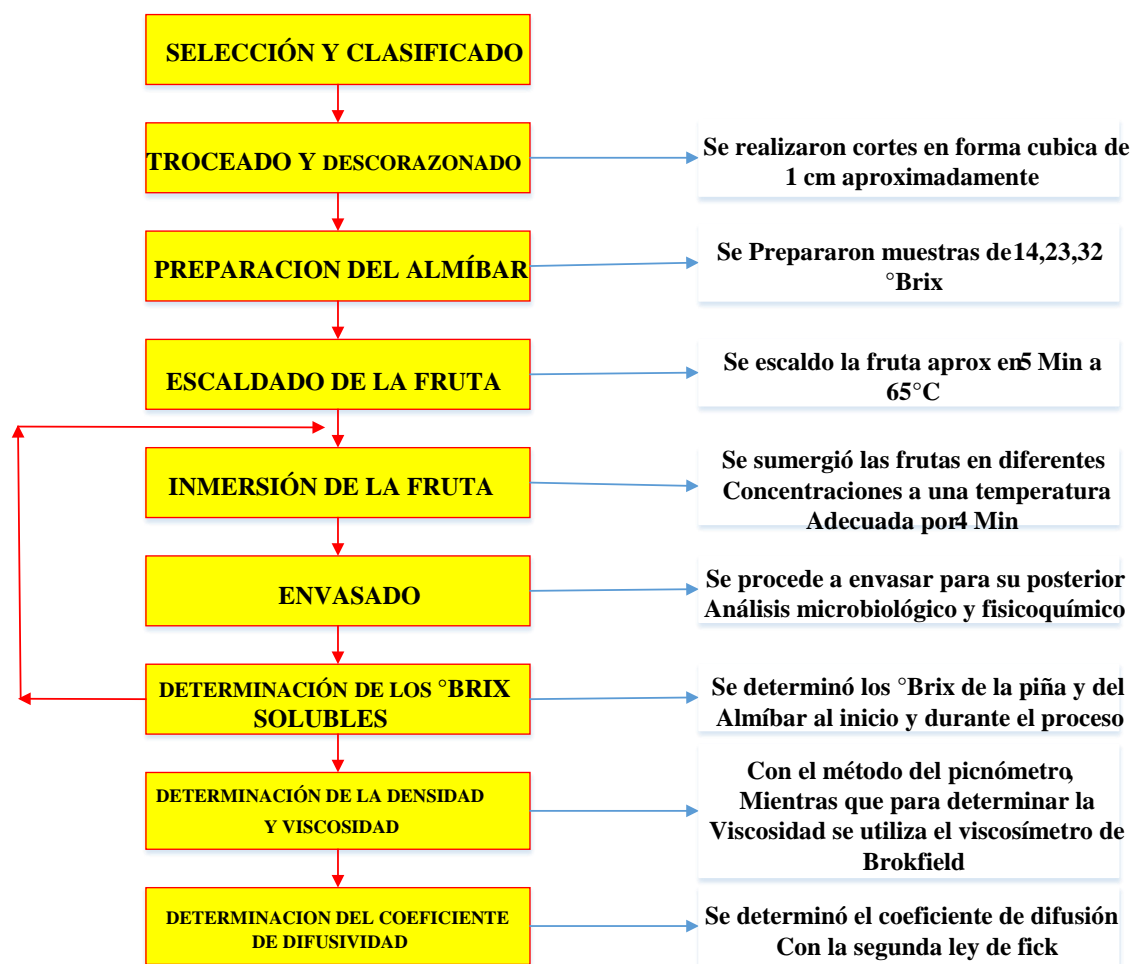
- ✓ Ácido cítrico.
- ✓ Azúcar (sacarosa).
- ✓ Agua destilada.

##### **3.2.2.3.- Equipos**

- ✓ Refractómetro digital HI 96801.
- ✓ Potenciómetro ORION STAR A211.
- ✓ Balanza analítica FERTON PROFESIONAL.
- ✓ Viscosímetro Brookfield.
- ✓ Picnómetro

### 3.3.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Figura 4: Diagrama de flujo para la elaboración del almíbar de piña



#### 3.3.1.- Procedimiento para la obtención de almíbar de piña

##### 3.3.1.1.- Piña

La materia prima con la que se trabaja es la piña (*Ananás comosus*), procedente del departamento de Puno, provincia de Sandía. Que fue adquirido en el mercado de la ciudad de Juliaca.



**Figura 5: Materia prima piña**

### **3.3.1.2.- Selección y clasificado**

Para la elaboración del almíbar de piña se emplean piñas de tamaño y madurez adecuada que estén sanas y que posean características similares.

- Se selecciona según el estado de madurez para asegurar la cantidad de azúcares presentes para ello es necesario trabajar con piña madura.
- Se trabaja con piñas que no presenten signos de deterioro, como las picadas o enmohecidas.

### **3.3.1.3.- Lavado y pelado**

Guevara (2015) Con el lavado se elimina cualquier partícula extraña que pueda estar adherida a la piña.

- El lavado se realiza por inmersión.
- Una vez lavada la fruta se recomienda desinfectarla, para lo cual se sumerge la fruta en una solución desinfectante por un tiempo entre 5 minutos dependiendo del desinfectante a utilizar generalmente se utiliza el hipoclorito de sodio en una concentración de 100 ppm.
- El pelado es manual o mecánico.
- Posteriormente la piña se sumerge en una solución de ácido cítrico o en agua caliente a 65°C para evitar su pardeamiento.



**Figura 6: Lavado pelado y cortado de la piña**

#### **3.3.1.4.- Troceado y descorazonado**

- Se procede a trocear y descorazonar la piña, se elimina el corazón debido a que su composición es heterogénea.
- Se realizaran cortes en forma de cubos de 1x1x1 cm.



**Figura 7: Troceado y descorazonado de la piña**



**Figura 8: Corte cubico de la piña**

#### **3.3.1.5.- Pesado**

Se procede a realizar el pesado de la pulpa, la cascara y otros partes de la fruta que no se consideran para el proceso esto permitirá determinar rendimientos y el balance de materia.



**Figura 9: Pesado de la piña entera**



**Figura 10: Pesado de la piña troceada en cubos**



**Figura 11: Pesado de la piña troceada**

#### **3.3.1.6.- Escaldado de la fruta**

Los trozos de piña se proceden a realizar el escaldado por 2 minutos a 65 °C, con la finalidad de evitar el pardeamiento de la fruta, luego dejar en reposo a temperatura ambiente, antes de la inmersión de la fruta en el almíbar.



**Figura 12: Escaldado de la fruta**



### 3.3.1.7.- Preparación del almíbar

Se prepara el almíbar en base a los grados °Brix deseado, la formulación se realizará según el peso de la fruta y dependiendo del grado de madurez de la fruta en este caso se considera la pulpa de la piña que representa el 65% y el 35% corresponde a la cascara, los penachos y coronas.

El jarabe y la piña, se agrega ácido cítrico (al 1% respecto al peso del azúcar que se utilizó) para inhibir el crecimiento de los microorganismos.

Para la determinación del grado Brix deseado se utiliza la siguiente relación (Tello 2015).

$$\text{Peso de pulpa de piña} = \frac{\text{Kg}_{\text{piñaentera}} * (35\%_{\text{cascarasy penachos}})}{(65\%_{\text{piña}})}$$

$$\text{Peso de pulpa de piña} = \frac{2 * (35\%_{\text{cascarasy penachos}})}{(65\%_{\text{piña}})}$$

$$\text{Peso de pulpa de piña (libre de cáscaras y penachos)} = 1.076\text{Kg}$$

$$\text{Peso de azúcar para un determinado } ^\circ\text{BRIX} = \frac{\text{Kg}_{\text{piñautil}} * (^\circ\text{Brix}_{\text{Deseados en \%}})}{100\%}$$

$$\text{Peso de azúcar para un determinado } ^\circ\text{BRIX} = \frac{1.076\text{Kg} * (32\%)}{100\%}$$

$$\text{Peso de azúcar para un determinado } ^\circ\text{BRIX} = 0.325\text{Kg}$$

$$\text{Peso de agua} = 1.076\text{Kg} - 0.325\text{Kg} = 0.961\text{Kg}$$



**Figura 13: Preparación del jarabe**



**Figura 14: Jarabes a 14°Brix ,23 Brix ,32 Brix**



### 3.3.1.8.- Inmersión en almíbar

Los trozos de fruta se sumergen en los diferentes almibares de 14°Brix, 23°Brix, 32°Brix, y se deja en reposo a temperatura ambiente, por un tiempo de 4 min.



**Figura 15: Almíbar de piña**

### 3.3.1.9.- Envasado

Se envasa el almíbar en un recipiente cerrado para poder realizar los análisis, microbiológicos y fisicoquímicos.

### 3.3.2.- Determinación de las propiedades fisicoquímicas

#### 3.3.2.1.- Determinación de los sólidos solubles de la piña y el almíbar (°Brix)

Se determinaron los sólidos solubles para el cual preferentemente se pesa 10 g de piña triturada. Posteriormente, se coloca unas gotas de la muestra analizar, sobre el prisma del refractómetro para determinar los grados Brix, de cada una de las muestras preparadas de igual forma se procede determinar los °Brix del almíbar.



**Figura 16: Determinación de los sólidos solubles de la pulpa de la piña**

### 3.3.2.2.- Determinación del pH del almíbar de piña por el método AOAC 981.12

#### Método general del Codex

Los reactivos que a continuación se mencionan deben ser grado analítico, cuando se indique agua, se debe entender agua destilada libre de CO<sub>2</sub>.

#### Materiales

- Agitador de vidrio.
- Termómetro.
- Vasos de precipitados.
- Balanza con  $\pm 0.1$  g de sensibilidad.
- Embudo de separación.

#### Aparatos E Instrumentos

- Potenciómetro con su (s) electrodo (s) correspondiente(s).
- Agitador mecánico o electromagnético.
- Licuadora o mortero.

#### Procedimiento

- Calibrar el potenciómetro con las soluciones reguladoras de pH 4, pH 7 y pH 10 según la acidez del producto.
- Mezclar el producto para obtener una pasta uniforme. Adicionar cuando el caso lo requiera entre 10 y 20 ml de agua destilada recientemente hervida por cada 100 g de producto, ajustar la temperatura a  $10^{\circ} \text{C} \pm 0.5^{\circ} \text{C}$  y determinar su pH.

#### Expresión De Resultados

El valor del pH de la muestra se lee directamente en la escala del potenciómetro. Se utiliza el potenciómetro para medir el pH del almíbar de piña, para ello se sumerge el electrodo (analizador de pH) del potenciómetro en el almíbar de piña.



**Figura 17: Determinación del pH en el almíbar de piña**

### 3.3.3.- Determinación de la viscosidad y la densidad del almíbar de piña

Atares (2013) procedimiento experimental que se siguieron para determinar la densidad.

- Pesar el picnómetro vacío y anotar su masa ( $M_p$ )
- Enrasar el picnómetro con almíbar (fluido de referencia) y anotar su masa ( $M_p + w$ )  
(Enrasar el picnómetro significa llenarlo completamente, evitando la formación de burbujas en su interior). Al cerrarlo, el nivel del almíbar subirá por el capilar y ésta rebosará, quedando el capilar también lleno de almíbar. Una vez el almíbar haya rebosado, se seca el picnómetro por fuera antes de pesarlo.
- Se seguirá el mismo procedimiento para las otras muestras y se tendrán las mismas precauciones que al enrasar el picnómetro con agua. Para determinar la densidad se utilizará la siguiente fórmula:

$$\rho_d = \frac{m_{p+d} - m_p}{m_{p+w} - m_p} * \rho_w$$

$\rho_d$  : Densidad de la disolución

$\rho_w$  : Densidad del agua

$m_{p+d}$  : Peso del picnómetro y la disolución

$m_p$  : 25 g

$m_{p+w}$  : Peso del picnómetro con agua

Hervas (2010) procedimiento para la determinación de la viscosidad en un viscosímetro de brokfield:

- Se prepara el viscosímetro con su dispositivo de protección sobre su soporte. Se llena un vaso con el producto a ensayar, teniendo cuidado de no producir burbujas de aire. Introducirlo en el baño de agua a la temperatura del ensayo. Esperar que se equilibren las temperaturas
- Sumergir el vástago en el líquido a medir hasta la marca que figura sobre el eje. Bajar el viscosímetro sobre su soporte y fijar el vástago al eje, comprobar verticalidad y temperatura.
- Poner el motor en marcha. Ajustar a la velocidad deseada. Desbloquear la aguja y dejar que gire hasta que se estabilice sobre el dial. Generalmente tarda entre 5 y 10 segundos. Bloquear la aguja y anotar la lectura. Después, volver a poner en marcha el motor y tomar otra lectura.

### 3.3.3.1.- Determinación del coeficiente de difusión

Para determinar el coeficiente de difusión se resuelve la ecuación de segundo orden ley de Fick por el método de separación de variables a través de ello se obtiene las siguientes expresiones.

De la ecuación (1)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D * \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Dicha ecuación está resuelta en el anexo (L)

Linealizando:

$$\ln\left(\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e}\right) = \ln\left(\frac{4}{\pi}\right) - \left(\frac{\pi^2}{l^2}\right) * D_e$$

$$-\left( \frac{\ln\left(\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e}\right)}{\ln\left(\frac{4}{\pi}\right)} \right) * \left(\frac{l^2}{\pi^2}\right) = D_e$$

Se determinará el coeficiente de difusividad experimental con los siguientes datos:

Para 32 °Brix y 180 minutos

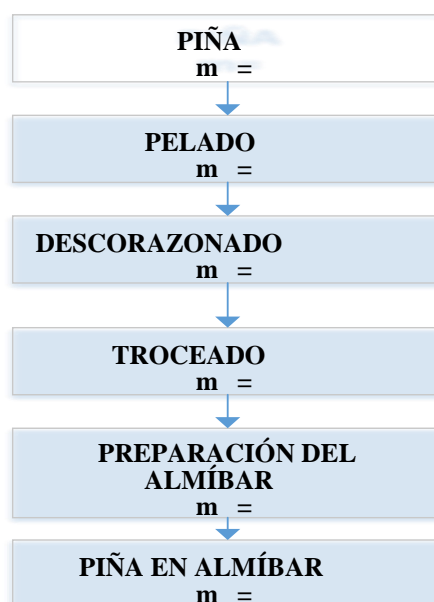
- De: ¿?
- St= 30.8 °Brix a (180 min)
- Se= 30.7 °Brix
- S0= 32°Brix
- l = 0.001m
- t: 240 minutos

$$-\left( \frac{\ln\left(\frac{30.8 - 30.7}{32 - 30.7}\right)}{\ln\left(\frac{4}{\pi}\right)} \right) * \left(\frac{0.001m^2}{\pi^2 * 240 \text{ min}}\right) = D_e$$

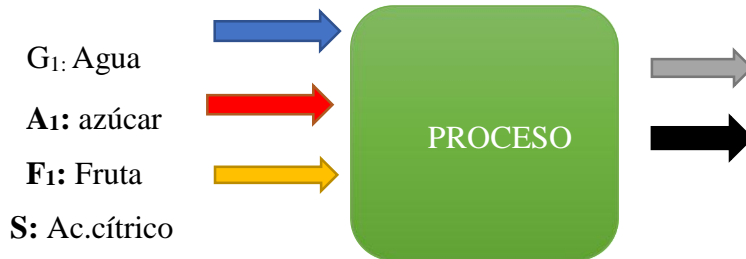
Los resultados del coeficiente a diferentes condiciones se encuentran en la tabla 9 y tabla 7

### 3.3.4.- Balance de materia

#### 3.3.4.1.- Balance de masa



Se describirá y caracterizará los parámetros que definen a los diferentes procesos, a los cuales se aplicara el balance de materia.



✓ **Balance general**

$$A + F_1 + S_1 + G_1 = G_2 + F_2 \dots \dots \dots \text{Ec. (13)}$$

✓ **Balance por componente**

$$A * W_1 + F_1 * X_1 + S * W_2 + G_1 = F_2 * X_2 + G_2 \dots \dots \dots \text{Ec. (14)}$$

✓ **Balance de agua**

$$F_1 * Z_1 + G_1 = F_2 * Z_2 + G_2$$

**3.3.5.- Diseño experimental**

Para esta investigación el diseño de experimentos más adecuado corresponde al diseño factorial de tres niveles y dos factores  $3^k$  que permite evaluar las interacciones que resultan como consecuencia de las combinaciones de los factores.

**$N = 3^K$  Dónde:**

**K** = Número de variables o factores

**N** = Número total de experimentos.

El diseño factorial es de  $3^2=9$  2 factores variables independientes y 3 significa 3 niveles mínimo y máximos 9 experimentos.

**3.3.6.- Factores de estudios****Tabla 3: Niveles máximos y mínimos**

Factores	Bajo	Alto	Unidades	Continuo
Concentración	14	32	°Brix	Sí
tiempo	60	180	min	Sí

Fuente: Niveles máximos y mínimos estimados por programa STATGRAPHICS

**3.3.7.- Formulación de la tabla factorial para análisis de datos****Tabla 4: Factorial para el análisis de datos**

N° Experimentos	X <sub>1</sub> =Concentración	X <sub>2</sub> =tiempo	Variable respuesta
1	14	60	Y <sub>1</sub>
2	23	60	Y <sub>2</sub>
3	32	60	Y <sub>3</sub>
4	14	120	Y <sub>4</sub>
5	23	120	Y <sub>5</sub>
6	32	120	Y <sub>6</sub>
7	14	180	Y <sub>7</sub>
8	23	180	Y <sub>8</sub>
9	32	180	Y <sub>9</sub>

Fuente: programa STATGRAPHICS

## IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1.- Determinación de la viscosidad y la densidad del almíbar de piña

**Tabla 5: Valores obtenidos de densidad y viscosidad para el almíbar de piña**

Tratamientos	Temperatura °C	Sólidos solubles (°Brix)	Densidad g/cm	Viscosidad (cp)
T <sub>1</sub>	12.4	14	1.16	1.70
T <sub>2</sub>	12.6	14	1.10	1.23
T <sub>3</sub>	13	14	1.08	1.46
T <sub>4</sub>	13.4	23	1.19	2.12
T <sub>5</sub>	12.6	23	1.25	2.22
T <sub>6</sub>	12.1	23	1.32	2.51
T <sub>7</sub>	13.7	32	1.38	2.74
T <sub>8</sub>	13.2	32	1.4	2.95
T <sub>9</sub>	12.5	32	1.47	3.15

Fuente: programa STATGRAPHICS

En la tabla 5, muestra los valores obtenidos de viscosidad y de la densidad se puede observar que mientras mayor es la concentración de sacarosa en el almíbar el valor de viscosidad y densidad aumenta. Se utilizó la Ec. (12) para la determinación de la densidad los análisis de realizaron a temperatura ambiente.

El almíbar preparado para la solución de cubierta presenta una consistencia muy viscosa, que se va perdiendo conforme va adquiriendo estabilidad el producto por la transferencia de azúcares y acidez entre el almíbar y la fruta. Cuando el producto ha alcanzado el equilibrio entre la fruta y almíbar y el almíbar tienen un sabor muy agradable por el balance de ácido y el dulzor mezclado con el sabor y aroma de la fruta. Los valores obtenidos en este trabajo de investigación tienen una semejanza con el trabajo de (Quesada, 2007) quien elaboro el almíbar de piña y sábila llegando a los resultados en viscosidad y densidad de (12°Brix 1.05 g/cm<sup>3</sup> 1.20cp y 21°Brix 1.10 g/cm<sup>3</sup> 2.0 cp).



#### 4.2.- Determinación de los parámetros de proceso en la difusión del almíbar en la piña.

Los resultados de difusión del almíbar en la piña se determinaron en base a los análisis realizados en el laboratorio LAVINSERV ver anexo (B, C, D)

##### 4.2.1.- Resultado de Análisis de contenidos de sólidos solubles (° Brix).

**Tabla 6: Resultado de análisis de sólidos solubles (°Brix) de 1 a 4 horas**

Determinación de sólidos solubles	(°Brix) <sub>inicial</sub>	(°Brix) En 1 hora	(°Brix) En 4 hora
Pulpa de piña	10	11.2	12.20
Pulpa de piña	9	18.5	19.5
Pulpa de piña	8.8	20.9	23.10
Almíbar	14	12.70	13
Almíbar	23	22.20	21.9
Almíbar	32	31.50	30.70

Fuente: laboratorio de investigación y servicio LABINVSERV.

En la tabla 6, se muestran los resultados del análisis de sólidos solubles la cual reporta las concentraciones iniciales de la fruta y del almíbar hasta llegar al equilibrio en un tiempo de 1 a 4 horas.

**Tabla 7: Parámetros de proceso**

Factor	Óptimo
Concentración (°Brix)	32 °Brix
Tiempo (min)	180 min
Temperatura	12°C (ambiente)
pH	3.66
Difusividad	$4.56E*10^{-10}$ m <sup>2</sup> /seg

Fuente: Elaboración propia

La tabla 7 muestra los parámetros de proceso, es decir factores con las cuales se han obtenido mejores resultados para la obtención de los coeficientes de difusividad. La magnitud del coeficiente de difusividad depende de las variables que influyan en la fase

de difusión, tales como la temperatura, la presión y la concentración, así como de las propiedades del catalizador (Welty, 2001).

Vega (2007) indica que la concentración de la solución es más influyente que la temperatura de trabajo, ya que al aumentar la concentración de sacarosa mayor es la difusividad de sólidos solubles y por ello una mayor difusividad.

La transferencia de masa depende de algunos factores como la geometría del producto, la temperatura, y la concentración de la solución. Las características del agente osmótico utilizado, como su peso molecular y el comportamiento iónico (Rastogi & Raghavarao, 2004).

El coeficiente de difusividad depende básicamente de tres factores: tamaño y forma del soluto, temperatura, viscosidad del disolvente, el aumento del tamaño del soluto o de la viscosidad (Esturau, 2011).

En base a ese sustento teórico también podemos afirmar que mientras mayor sea la concentración los solutos tendrán mayor facilidad para transportarse en un disolvente determinado.

#### 4.3.- Determinación del coeficiente de difusividad

**Tabla 8: Coeficientes de difusividad a determinadas condiciones**

Concentración	Tiempo	pH	Temperatura	Difusividad efectiva m <sup>2</sup> /seg
14	60	3.09	12.3°C	1.44E-10
23	60	3.75	12.4°C	2.20E-10
32	60	3.45	12.3°C	8.63E-11
14	120	3.09	11.6 °C	1.68E-10
23	120	3.75	11.8 °C	2.43E-10
32	120	3.45	11.2 °C	2.61E-10
14	180	3.09	12.4 °C	1.95E-10
23	180	3.75	12.9 °C	3.54E-10
32	180	3.45	12 °C	4.56E-10

En la tabla 8, se muestran los valores de difusividad efectiva obtenidos para cada una de las concentraciones de almíbar preparadas a 14°Brix, 23 °Brix, 32 °Brix, los resultados reportan una disminución gradual de la concentración del almíbar, se puede notar que los mayores valores obtenidos de coeficiente de difusividad fueron a mayor concentración y tiempo a mayor concentración mayor será el movimiento molecular debido a la gradiente de concentración

El almíbar al difundirse en la piña recorre un área correspondiente un camino tortuoso el cual se debe a la forma y consistencia que presenta la pulpa de piña, la difusividad efectiva se genera por una gradiente de concentración entre la concentración inicial del almíbar y la concentración de la pulpa de piña generando un movimiento molecular, la difusión se dará desde la mayor concentración de azúcar hacia la menor concentración hasta alcanzar el equilibrio en el proceso.

El coeficiente de difusión es el valor que representa la facilidad con que cada soluto en particular se mueve en un disolvente determinado. (Esturau, 2011).

El transporte de materia tiene lugar a causa de un gradiente de concentración, el transporte de cantidad de movimiento tiene lugar a causa de un gradiente de concentración de cantidad de movimiento, y el transporte de energía tiene lugar a causa de un gradiente de concentración de energía (Treybal,1980).

La transferencia de masa se verifica cuando el componente de una mezcla emigra en una misma fase o de una fase a otra, a causa de la diferencia de concentración entre dos puntos (Geankopolis, 1998).

La transferencia de masa molecular que resulta de las diferencias de concentración y a la cual describe la ley de Fick, es el resultado del movimiento molecular fortuito en pequeñas trayectorias medias libres, independientes de las paredes del recipiente.

Para Ortiz et al (2011) el transporte de masa en líquidos y sólidos se origina generalmente debido a una combinación de convección y difusión. En los sólidos, estos movimientos atómicos quedan restringidos debido a los enlaces que mantienen los átomos en las posiciones de equilibrio, por lo cual el único mecanismo de transporte de masa es la difusión.

Los resultados obtenidos en este trabajo se pueden comparar con los trabajos de otros autores como se reporta en la siguiente tabla.

**Tabla 9: Comparación del coeficiente de difusividad con diferentes autores**

<b>Fruta</b>	<b><math>D_e</math> (<math>m^2/s</math>)</b>	<b>Referencia</b>
Piña	$5.79 * 10^{-10}$	Silva et. al., (2014)
Piña	$4.35 \times 10^{-10}$	<i>Jena ( 2004)</i>
Piña	$2.52 \times 10^{-10}$	Cornejo, (2018)
Piña	$3,70831 \times 10^{-10}$	Castro y Acosta (2015)
Piña	$4.6 \times 10^{-10}$	Cardoza y Custodio (2015)
Jengibre	$3.96 \times 10^{-10}$	Dash (2019)
Manzana	$4,40 \times 10^{-10}$	Akharume (2018)
Melón	$3.3 \times 10^{-8}$	<i>Gomez (2014).</i>
Cambuci	$1.42 \times 10^{-9}$	Schincariol et al.,(2019)
Papaya	$4.458 \times 10^{-8}$	<i>Coaquira (2010)</i>
Piña	$4.56 \times 10^{-10}$	<b><i>En este trabajo</i></b>

En la tabla 9 se muestra los valores obtenidos de coeficiente de difusividad de diferentes autores y el valor reportado en este trabajo, en cada caso se trabajaron con piña y otras frutas por lo cual se valida los resultados obtenidos.

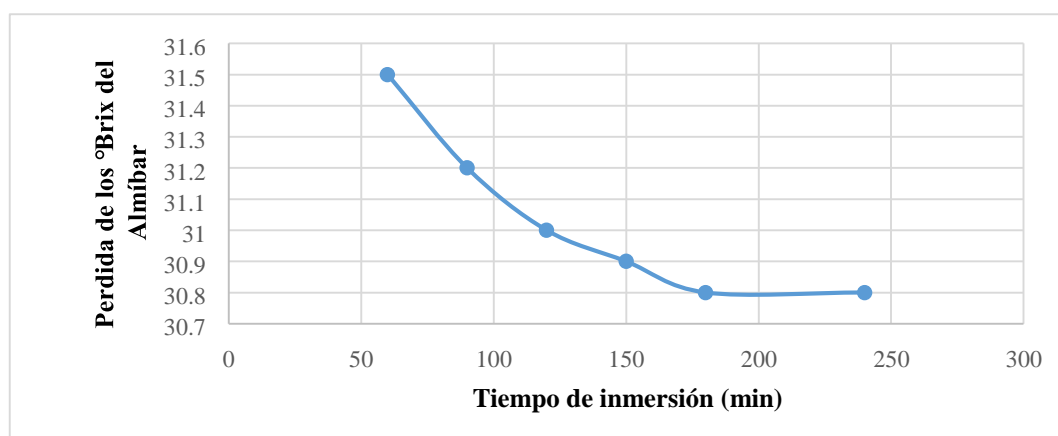
Para la piña se obtuvo un valor de difusividad  $5.79 * 10^{-10} m^2/s$  (Silva et. al., 2014),  $4.35 \times 10^{-10} m^2/s$  (Jena 2004),  $2.52 \times 10^{-10} m^2/s$  (Cornejo, 2018), Castro y Acosta (2015)  $3.2329 \times 10^{-10} m^2 /s$ , Cardoza y Custodio (2015)  $4.6 \times 10^{-10}$  Y el valor obtenido en este

trabajo fue de  $4.56 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$  siendo este un valor consistente con lo establecido en la teoría.

Comparando con el coeficiente de difusividad de otras frutas podemos mencionar Akharume (2018) quien obtuvo el coeficiente de difusividad de las manzanas  $4,40 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$  valor que es muy cercano al de la piña, por otro lado Dash (2019) obtuvo un valor de  $3.96 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$  para el jengibre.

Por su parte Coaquira (2010) obtuvo un valor de coeficiente de difusividad de la papaya  $4.458 \times 10^{-08} \text{m}^2/\text{s}$ . Mientras que License (2014) en los cilindros de melón, obtuvo un valor de  $3.3 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ . Por ultimo Schincariol et al., (2019) en las rodajas de cambuci se obtuvo un valor de coeficiente difusivo de  $1.42 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ .

En comparación al trabajo se puede observar que existe mayor difusividad en el melón cambuci y papaya en comparación a la piña y el jengibre, esto se puede deber al tipo de tejido de cada fruta a la forma geométrica, o a la diferencia entre las temperaturas de trabajo y concentraciones del almíbar.



**Figura 18: Curva de difusión del almíbar en la piña ° Brix con respecto al tiempo de inmersión**

Fuente: elaboración propia

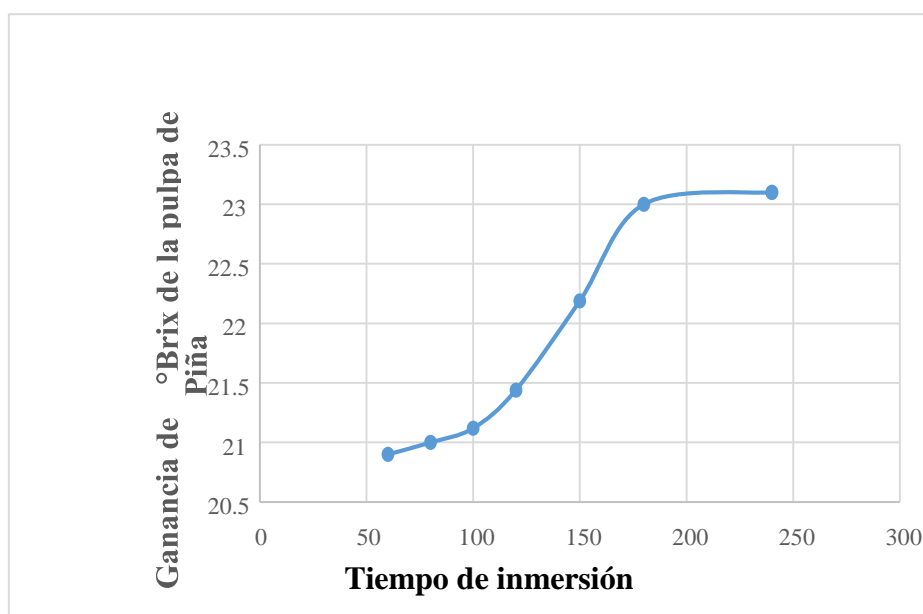
En la figura 18, se puede apreciar conforme va transcurriendo el tiempo durante el proceso de difusión del almíbar en la piña la concentración (°Brix) va disminuyendo hasta llegar

al equilibrio por debajo de los 30°Brix punto en el cual tanto la fruta con el almíbar tienen esa concentración de sacarosa.

Para Treybal (1980), la rapidez con la cual un componente se transfiere de una fase a otra depende de un coeficiente llamado de transferencia de masa, o de rapidez, y del grado de desviación del sistema del equilibrio. La transferencia termina cuando se llega al equilibrio.

A medida que transcurre el tratamiento osmótico y los solutos van penetrando al alimento, la solución va disminuyendo su concentración de solutos, lo cual reduce de modo gradual el gradiente osmótico y, así la velocidad de transferencia de masa (Colina 2010)

Geankoplis (1998), hace referencia que la transferencia de masa se verifica cuando el componente de una mezcla emigra de una misma fase o de una fase a otra, a causa de la diferencia de concentraciones entre dos puntos. Para que se pueda producir un intercambio de moléculas entre el almíbar y los cubos de piña es necesario que exista una fuerza impulsora llamada “gradiente de concentración”.



**Figura 19: Curva de ganancia del °Brix de pulpa de piña con respecto al tiempo de inmersión**

En la fig. 19 Se puede apreciar el fenómeno contrario a la de la tabla 18 aquí se evalúa como la piña va adsorbiendo el azúcar (sacarosa) en su seno en las partes que posee, esto depende del tiempo de inmersión, la ganancia de sólidos es más significativa, con el paso del tiempo esa tasa tiende a permanecer constante, llegando hasta 23.1°Brix de pulpa de piña cuando inicialmente tenía 8°Brix estando sumergida en una solución de 32°Brix, la concentración de la solución osmótica y de la fruta influyen en el transporte de masa, este comportamiento también fue estudiado por (Darche, 2012) en la deshidratación osmótica de las cerezas, quien verifico que la ganancia de sólidos solubles fue mayor a proporciones crecientes de concentración.

Desde el punto de vista de la transferencia de masa, es un proceso complejo de contra-difusión simultáneo de agua y solutos en el cual la velocidad de transferencia de masa disminuye hasta alcanzar el equilibrio en el que la tasa neta de transporte de masa es nula (Sareban y Abbasi Souraki, 2016).

#### 4.4.- Análisis microbiológico.

Para poder corroborar el tiempo de vida útil del producto final se realizó el análisis microbiológico tal y como se presenta en la tabla el resultado del laboratorio ver anexo (A).según la norma técnica.

**Tabla 10: Análisis microbiológico del almíbar de piña**

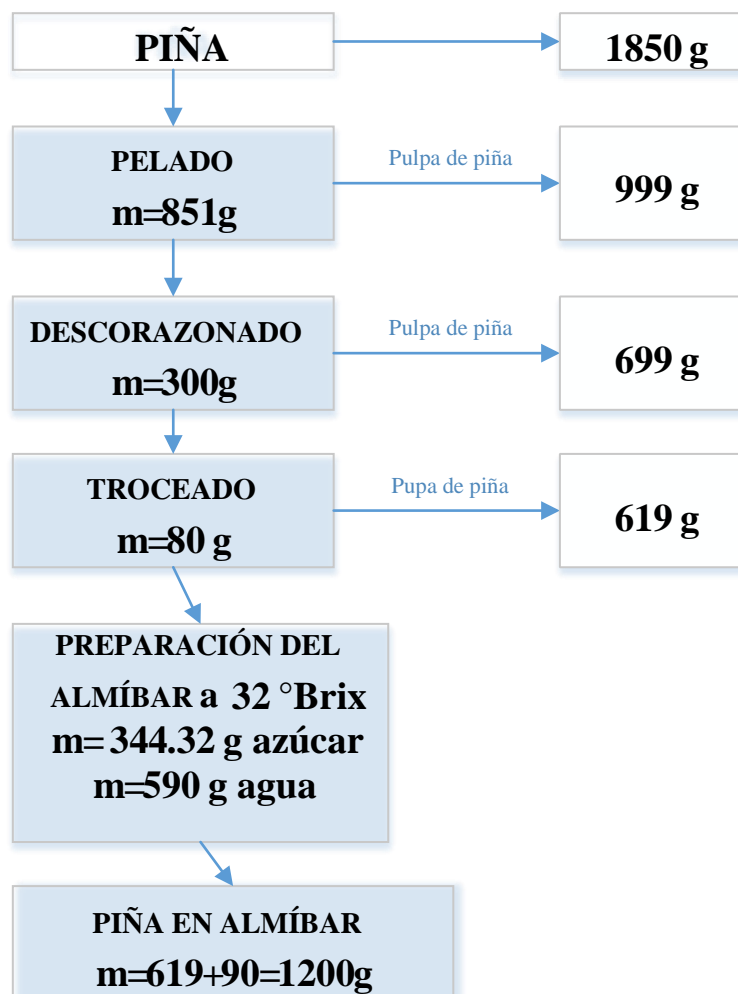
Análisis	Día de la elaboración del almíbar	23 días después de la elaboración del almíbar
Recuento de ..... bacterias aerobia y mesófitas	Negativo	Negativo
Recuento de levaduras	Negativo	Negativo
Recuento de mohos	Negativo	Negativo

Fuente: Laboratorio de microbiológica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia

En la tabla 10, se muestran los resultados de análisis microbiológico realizado en el laboratorio de microbiología de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, el análisis microbiológico indica que la conserva está apto para el consumo humano cumple con las condiciones sanitarias en cuanto a presencia de microorganismos.

La conservación por adición de azúcares, principalmente sacarosa o azúcar invertido, tienen como finalidad disminuir la Actividad del agua y aumentar la presión osmótica, dificultando así la oxidación, “al impedir que entre en contacto con el oxígeno del aire y así evitar la degradación del alimento; por otra parte, cuando la concentración del almíbar es alta, se mantiene la firmeza del producto (Molina y Colina 2008)

**4.5.- BALANCE DE MATERIA DEL PROCESO**







B.C 619 g de piña (útil)

La cantidad de azúcar fue calculada con la Ec. (11) para una concentración 32°Brix.

**4.5.1.-Balance general**

$$A + F_1 + S_1 + G_1 = G_2 + F_2 \dots \dots \dots \text{Ec. (13)}$$

**4.5.2.-Balance de agua**

$$F_1 * Z_1 + G_1 = F_2 * Z_2 + G_2$$

$$619 * 0.9 - F_2 * (0.769) + G_1 = G_2$$

**4.5.3.-Balance por componente**

$$A * W_1 + F_1 * X_1 + S * W_2 + G_1 = F_2 * X_2 + G_2 \dots \dots \dots \text{Ec. (14)}$$

$$344.32 + 619 * 0.10 + 0.001 * 344.32 + G_1 = F_2 * (0.231) + G_2$$

**Reemplazamos la Ec. (13.1) en .Ec (14.1)**

$$344.32 + 619 * 0.10 + 0.001 * 344.32 + G_1 = F_2 * (0.231) + (649 * 0.9 - F_2 * 0.769 + G_1)$$

$$278.76g = F_2 \text{ Cantidad de fruta en almíbar}$$

**Reemplazando la cantidad de agua con la Ec. (13.1)**

$$619 * 0.9 - 342.5 * 0.769 + G_1 = G_2$$

$$883.71g = G_2 = \text{agua}$$

**Piña en almíbar**

$$1162.47g$$

**Tabla 11: Resumen del balance de materia del proceso**

Entradas			Salidas		
Pulpa de piña: 619g					
A	$W_1=0,32$	344,32g	$G_2$		883,71g
$F_1$	$X_1=0,10$	61,9g	$F_2$	$X_1=0,231$	64,39g
	$Z_1=0,90$	557,1g		$Z_2=0,769$	214,36g
$S_1$	$W_2=0.001*(344.32)$	3,44g			
$G_1$		590g			
Total	<b>1556,76g</b>		<b>1162</b>		

La tabla 11, reporta los resultados del balance de materia en el proceso el cual nos muestra las entradas y las salidas, como también la pérdida de masa durante el proceso.

**4.6.- Tratamiento estadístico**

**Tabla 12: Diseño experimental**

Nº ensayos	$X_1$ =Concentración	$X_2$ =Tiempo	Y= Difusividad efectiva $m^2/seg$
1	14	60	1.44E-10
2	23	60	2.20E-10
3	32	60	8.63E-11
4	14	120	1.68E-10
5	23	120	2.43E-10
6	32	120	2.61E-10
7	14	180	1.95E-10
8	23	180	3.54E-10
9	32	180	4.56E-10

Fuente: elaboración propia

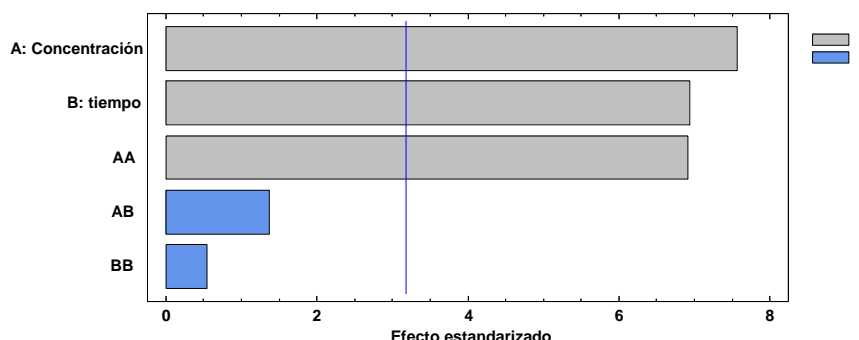
**Atributos de la Superficie de Respuesta**

- Clase de diseño: Superficie de Respuesta
- Nombre del Diseño: Factorial de 3 niveles:  $3^2$

**Diseño Base**

- Número de factores experimentales: 2
- Número de bloques: 1

- Número de respuestas: 1
- Número de corridas: 9
- Grados de libertad para el error: 3
- Aleatorizar: No



**Figura 20: Diagrama de Pareto para la difusividad del almíbar**

Fuente: diagrama de Pareto estimado por programa STATGRAPHICS Centurión XVI

En la figura 20, nos muestra el diagrama de Pareto quien nos evidencia los efectos estimados para la difusividad del almíbar, siendo el más importante la concentración, luego el tiempo, evidenciando como la influencia positiva de la concentración y los tiempos de inmersión en la difusividad.

**Tabla 13: Análisis de varianza para la difusividad de la piña**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Concentracion	5.20802E-14	1	5.20802E-14	343.05	0.0003
B:Tiempo	6.7335E-15	1	6.7335E-15	44.35	0.0069
AA	8.06681E-14	1	8.06681E-14	531.36	0.0002
AB	8.1E-17	1	8.1E-17	0.53	0.5180
BB	1.33389E-16	1	1.33389E-16	0.88	0.4177
Error total	0.0	3	0.0		
Total (corr.)	1.40152E-13	8			

Fuente: ANOVA estimado por programa STATGRAPHICS Centurión XVI

La tabla 13, recoge el análisis de varianza con respecto al rendimiento. Con este análisis se evidencia que la concentración del almíbar tienen un efecto estadísticamente

significativo sobre el rendimiento puesto que el valor-P es menor que 0,05 con un nivel de confianza del 95,0%.

- R-cuadrada = **99.675** por ciento
- R-cuadrada (ajustada por g.l.) = **99.1334** por ciento
- Error estándar del est. = **0.123213**
- Error absoluto medio = **0.0604938**
- Estadístico Durbin-Watson = 3.16162 (P=0.7746) Auto correlación residual de Lag 1 = -0.694018

ANOVA particiona la variabilidad de rendimiento de la determinación del coeficiente de difusión del almíbar en la piña separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, los efectos tienen un valor-P menor que 0,05 indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica **99.675 %** de la variabilidad en determinación del coeficiente de difusión. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es **99.1334 %**.

El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.382428. El error medio absoluto (MAE) de 0.190123 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de auto correlación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

**Tabla 14: Coeficiente de regresión para la difusividad de la piña**

Coeficiente	Estimado
constante	$1.84628 * 10^{-11}$
A:Concentracion	$2.33416 * 10^{-11}$
B:Tiempo	$2.90884 * 10^{-12}$
AA	$-7.7304 * 10^{-13}$
AB	$1.47546 * 10^{-11}$
BB	0.0

Fuente: Coeficientes estimados por programa STATGRAPHICS Centurión XVI

**El StatAdvisor**

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es:

$$Difusividad_{Almibar} = 1.84628 * 10^{-11} + 2.33416 * 10^{-11} * concentracion + 2.90884 * 10^{-12} * tiempo - 7.7304 * 10^{-13} * concentracion^2 + 1.47546 * 10^{-11} * concentracion * tiempo$$

En donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuesta de la lista de Opciones Gráficas.

**Optimizar Respuesta**

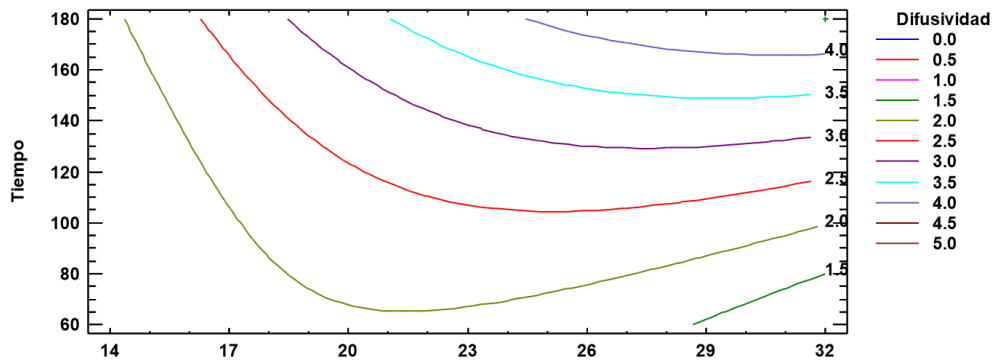
- Meta: maximizar Difusividad
- Valor óptimo =  $4.47419 * 10^{-10}$

**Tabla 15: Valores óptimos para la obtención de la difusividad del almíbar**

Factor	Bajo	Alto	Optimo
Concentración	12	32	32
Tiempo	60	180	180

Fuente: programa STATGRAPHICS Centurión XVI

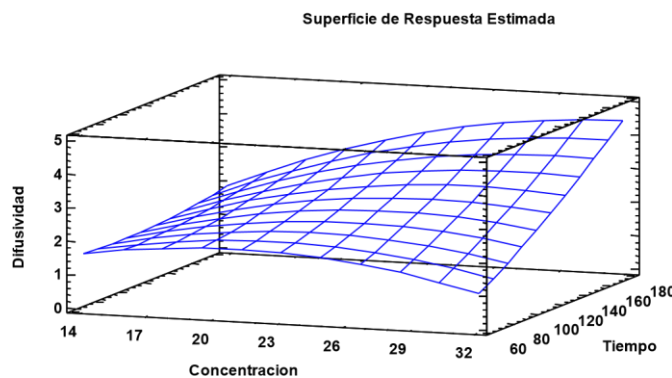
En la tabla 15, se muestran los valores de concentración y tiempo los cuales son los más óptimos para obtener mejores resultados de coeficiente de difusividad del almíbar.



Fuente: contornos de la superficie respuesta STATGRAPHICS Centurión XVI

**Figura 21: Contornos de la superficie de respuesta estimada para la difusividad**

La figura 21, de contorno se utiliza para estudiar los niveles de los factores en los cambios que se da un cambio en la forma o altura de la superficie respuesta. Entonces en la figura, se observa que se logra coeficientes de  $4.5 \cdot 10^{-10} \text{m}^2/\text{seg}$  (región óptima) con concentraciones de 32 °Brix de 180 minutos.



Fuente: superficie de respuesta estimados por programa STATGRAPHICS

**Figura 22: Superficie de respuesta estimada para la difusividad de la piña**

En la Figura 22, se presenta la gráfica de superficie de respuesta estimada en forma tridimensional, la cual indica que se alcanza el máximo coeficiente de difusividad de la piña  $4.5 \cdot 10^{-10} \text{m}^2/\text{seg}$  a 32 Brix cuando aumenta la concentración y el tiempo del almíbar.

**Tabla 16: Comparación de valores obtenidos de coeficiente de difusión de la piña el valor experimental y el valor obtenido por el diseño experimental**

<b>Tiempo</b>	<b>Concentración del almíbar</b>	<b><math>D_e</math> del almíbar obtenida con la ecuación de regresión lineal</b>	<b><math>D_e</math> del almíbar del almíbar obtenidas experimentalmente</b>
60	14	1.43149E-10	1.44E-10
60	23	1.75484E-10	2.20E-10
60	32	8.25858E-11	8.63E-11
120	14	2.58735E-10	1.68E-10
120	23	2.04586E-10	2.43E-10
120	32	1.91371E-10	2.61E-10
180	14	2.08155E-10	1.95E-10
180	23	3.33689E-10	3.54E-10
180	32	4.15503E-10	4.56E-10

En la tabla 16, se muestran los valores de coeficiente de difusividad de la piña obtenidos experimentalmente y obtenidos de la ecuación del diseño experimental, los valores de la ecuación de regresión lineal a  $r=0.97976$  estadísticamente significativa, se asemejan a los valores obtenidos experimentalmente.

## V.- CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado el estudio de la difusividad efectiva del almíbar en la piña para lo cual se preparó la piña con una configuración cúbica, la misma que explica los fenómenos difusionales que ocurren en estos procesos.
- Los parámetros de proceso determinados para el coeficiente de difusividad efectiva del almíbar en la piña son: tiempo de 180 minutos una concentración de 32°Brix a temperatura ambiente, condiciones en el cual se obtiene mejores resultados.
- Se determinó los coeficientes de difusividad efectiva para el almíbar en la piña a 32°Brix a los 180 minutos cuyo valor de difusividad obtenido es  $4.56 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{seg}$ , se determinó un modelo matemático procedente del diseño experimental para el cociente de difusión efectiva del almíbar en la piña obteniéndose un valor de  $4.15503 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{seg}$  a 32°Brix y 180 minutos.
- Se determinó la viscosidad y densidad en el almíbar de piña a 32°Brix ( $1.47 \text{ g/cm}^3$  densidad ,3.15cp viscosidad) estos aumentan mientras la concentración sea mayor y disminuyen conforme aumenta la temperatura.



## VI.- RECOMENDACIONES.

- Se recomienda evaluar la difusividad efectiva de la sacarosa con otros métodos mencionados y realizar pruebas con otros parámetros tales como pulso al vacío, con otras geometrías (esféricas cilíndricas) y diferentes parámetros de operación para obtener el coeficiente de difusividad efectiva.
- Realizar estudios de almacenamiento para calcular el tiempo de vida útil de la piña.
- Realizar estudios de factibilidad económica con la finalidad de evaluar la rentabilidad de tratamientos osmóticos en las zonas de producción de piña.

## VII.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aconcha, G. (2010). El coeficiente de difusión de solventes líquidos y gaseosos en petróleo pesado y betún. Kantzas.

Arapa, F. (2011). "Almíbar de piña con lactosuero". Puno: Una Puno.

Akharume, F., Singh, K., & Sivanandan, L. (2018). Effects of Liquid Smoke Infusion on Osmotic Dehydration Kinetics and Microstructural Characteristics of Apples Cubes. *Journal of Food Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.10.030>

Barrientos, J. (2011). Aplicación y comparación de pre tratamientos totalmente libres de cloro en residuos de piña (*Ananas comosus*) y zapote mamey (*Pouteria sapota*) para la obtención de carboximetilcelulosa. Venezuela.

Atares, L. (2013). Determinación de la densidad de sólidos y líquidos.

Becerra, Meller Da Silva, y Rodríguez, (2015). Un estudio de modelación de difusividades de humedad y coeficientes de transferencia de humedad en el secado de la cáscara de la fruta de la pasión *Revista Internacional de Transferencia de Calor y Masas*, 85, 750–755.

Breu, Guggenbichler, y Wollmann, (2008). Artículo Científico. *Vasa*, 6, 1–6.

Carrillo, Inungaray., y Reyes, A. (2013). Vida útil de los alimentos. *Revista Iberoamericana de Las Ciencias*

Chacón, (2006). Procesamiento de frutas: Procesos húmedos y procesos secos.

- Concentrations, s. (2004). Coeficientes de difusión efectiva del agua en láminas de mamey (mammea americana) deshidratadas osmóticamente a diferentes temperaturas y concentraciones de sacarosa, 16, 118–123.
- Corzo, Brancho, y Rodríguez, (2011). Determinación experimental del coeficiente de difusión del agua durante el secado de láminas de coroba. Saber, Universidad de Oriente, Venezuela., 23, 36–42.
- Colina M., (2010), Deshidratación de Alimentos, Editorial Trillas, Mexico. Pag 183-19
- Central, O., & Tecnicos, P. (n.d.). “ PEDRO RUIZ GALLO .”
- Cornejo, F. (2018). Influencia de pre tratamientos convencionales en el proceso de secado de piña y en las características físicas del producto final, (January 2010).
- Crank, J. (1975). The Mathematics of Diffusion.
- Castro y Acosta (2015). Determinación de la difusividad efectiva de la sacarosa en la deshidratación osmótica de la piña hawaiana (ananas comosus) Instituto de investigación de la facultad de ciencias agrarias universidad nacional del centro del Perú.
- Cordova y Custodio (2015). Modelamiento matemático para predecir el comportamiento de la deshidratación osmótica de la piña md2 (ananas comosus)" facultad de ingeniería química e industrias alimentarias, Lambayeque.
- Da Silva, Lins, y Gomes, J. P. (2014). “Deshidratación osmótica de piezas de piña (Ananas comosus) en forma cúbica descritas por modelos de difusión. LWT - Ciencia y Tecnología de Alimentos”, 55(1), 1–8.

- Dash, K. K., Balasubramaniam, V. M., & Kamat, S. (2019). High pressure assisted osmotic dehydrated ginger slices. *Journal of Food Engineering*, 247(November 2018), 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.11.024>.
- Trópico, (2013). Crecimiento y absorción de nutrientes en piña, 9, 11–18.
- Esturau, N. (2011). Medidas De Coeficiente De Difusión Por RMN: metodología, aspectos experimentales y fundamentos, 189.
- Fito, Chiralt, y Betoret, (2001). Impregnación al vacío y deshidratación osmótica en ingeniería de matrices: aplicación en el desarrollo funcional de alimentos frescos. *Revista de Ingeniería de Alimentos* 49(2–3), 175–183. -X
- García Gómez, D. F. (2012). Determinación De Coeficientes De Difusión De Humedad En Papeles Aislantes De Transformador, 220.
- Garcidueñas (2013). Caracterización morfológica y molecular de piña (*Ananas comosus*) L. Híbrido MD2 y su establecimiento in vitro. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Genakopolis (1998) *Proceso de transporte y operaciones unitarias*, compañía editorial continental, s.a. de C.V. México tercera edición.
- Giraldo, Fito y Chiralt, A. (2003). Influencia de la concentración de la solución de sacarosa en la cinética y el rendimiento durante la deshidratación osmótica del mango. *Revista de Ingeniería de Alimentos*.
- Grajales (2008). Transferencia molecular de calor y masa, 487.

- Guevara, A., Cancino, K. (2015). Elaboración De Fruta En Almíbar. Universidad Nacional Agraria, 1, 13.
- Hernández, E. (2017). Estudio Comparativo de Diseños Experimentales de Superficie. México.
- Hernández, J. M. (2003). El Cultivo de la Piña (Ananas comosus). Iberoamericana, 44-52
- Jena y Das (2005). Modelado de la variación de la humedad durante la osmoconcentración en manzana y piña. Revista de Ingeniería de Alimentos, 66(4), 425–432.
- License (2014). Análisis de la deshidratación osmótica del melón. (Cucumis melo) Preparación de las muestras, 72–78.
- Magrama. (2013). Azúcar, 95–96.
- Martínez, Arpe y Villarino (2003). Nutrición y salud. Nuevos alimentos para nuevas necesidades. Nuevos alimentos para nuevas necesidades.
- Mera (2015) Manejo Pos cosecha De Frutas Y Hortalizas Facultad De Industrias Alimentarias Universidad Nacional de la Amazonia Perú.
- Ortiz, R., Arias, T., & Morales, U. (2011). Universidad nacional del callao, 2011.
- Quispe, J. (2015). "Determinación del coeficiente de difusividad en la carne de alpaca" Universidad nacional del altiplano. Tesis UNA, 1–254.
- Rastogi y Raghavarao (2004). Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de piña: considerando la difusión de Fickian en configuración cúbica. LWT - Ciencia y Tecnología de los Alimentos, 37(1), 43–47.

Ramiro (2008) Transferencia Molecular De Calor, Masa Y/O Cantidad De Movimiento  
Universidad Nacional de Colombia.

Rocca, y Mascheroni, R. H. (2013). Hidratación osmótica de zanahoria, 11(2), 81–92.

Silva, Fernández, & Mauro (2014). Efecto del calcio en la cinética de deshidratación  
osmótica y calidad de la piña. Revista de Ingeniería de Alimentos, 134, 37–44.

Silva, Mariani y Darche (2012). Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica  
de cereza antillana. LWT - Ciencia y Tecnología de los Alimentos, 45(2), 246–252.

Sareban, M. y B. Abbasi Souraki, Anisotropic diffusion during osmotic dehydration of  
celery stalks in salt solution, doi: Sousa, Nassau, y De Sousa Neto (2003) Influencia  
de la concentración y de la proporción fruto: jarabe en la deshidratación osmótica  
de plátanos procesados. Ciencia y Tecnología de Alimentos, 23, 126–130.

Schincariol, M., Pedro, J., Del, F., Alcântara, P. De, Filho, P., & Cecília, C. (2019). Mass  
transfer modeling during osmotic dehydration of cambuci ( *Campomanesia phaea* (   
O . Berg ) Landrum ) slices and quality assessment. *Journal of Molecular Liquids*,  
273, 408–413.

Treybal (1980) Operaciones de transferencia de masa División de Estudios Superiores de  
la Universidad Nacional Autónoma de México.

Varzakas., Israilides, y Arapoglou, D. (2005). Enfoques teóricos y experimentales para la  
determinación de las difusividades efectivas de los solutos en los alimentos.  
Tecnología de enzimas y microbios, 37(1), 29–41.

Vega, Palacios, y Lemus (2007). E Influencia De La Temperatura Y Concentración De La  
Solución Sobre La Cinética De Transferencia De Materia, 27(3), 470– 477.

Waliszewski, y García, (2002). Concentración de equilibrio y difusividad del agua y sacarosa en la deshidratación osmótica de losas de piña. *Tecnología de secado*, 20(2), 527–538.

Welty (2001) *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*, editores Noeriga Limusa Mexico.

Zogzas, y Maroulis, Z. B. (1996) Estimación de la difusividad de la humedad efectiva a partir de los datos de secado. Una comparación entre varios métodos de análisis. *Tecnología de secado*, 14(7–8), 1543–1573.





**Anexo 2: Análisis de azúcares dentro de una hora con una concentración inicial de 10 °Brix de la piña y una concentración de 14° Brix del almíbar**



UNIDAD DE PRODUCCION DE BIENES Y PRESTACION DE SERVICIOS  
LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN Y SERVICIO  
LABINVSERV

### INFORME DE ENSAYO

Nº DE REPORTE: 18571-17

DETERMINACIÓN DE :	INICIO	4 HORAS		
	°Brix	°Brix		
Almibar	12,70	13,00		
Pulpa	11,20	12,20		
OBSERVACIONES:				

**METODO DE ENSAYO**

DETERMINACIÓN	METODO DE ENSAYO APLICADO NORMA /REFERENCIA / NOMBRE
°Brix	Método Refractométrico

PAGINA 2 DE 2

Emiso en Arequipa (Perú), el 19 de Octubre de 2017

**Dr. Juan Reyes Larico**  
Jefe de Laboratorio  
RCQP - 348



**Lic. Fredy Valdivia Peña**  
Químico Responsable  
RCQP - 842

Av: Independencia s/n Ciudad Universitaria Laboratorio 108 -Primer Piso  
Teléfono: 220360 E-mail: fcnf\_labinserv@unsa.edu.pe

**Anexo 3: Análisis de azúcares dentro de una hora con una concentración inicial de 8.5°Brix de la piña y una concentración de 32° Brix del almíbar**



UNIDAD DE PRODUCCION DE BIENES Y PRESTACION DE SERVICIOS  
LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN Y SERVICIOS  
LABINVSERV

**INFORME DE ENSAYO**

N° DE REPORTE: 18573-17

DETERMINACIÓN DE :	INICIO	4 HORAS		
	°Brix	°Brix		
Almíbar	31,50	30,70		
Pulpa	20,90	23,10		
OBSERVACIONES:				

**METODO DE ENSAYO**

DETERMINACIÓN	METODO DE ENSAYO APLICADO
	NORMA /REFERENCIA / NOMBRE
°Brix	Método Refractométrico

Emisido en Arequipa (Perú), el 19 de Octubre de 2017

PAGINA 2 DE 2

**Dr. Jean Reyes Larico**  
Jefe de Laboratorio  
RCQP - 348



**Lic. Fredy Valdivia Peña**  
Químico Responsable  
RCQP - 842

Av. Independencia s/n Ciudad Universitaria Laboratorio 108 -Primer Piso  
Teléfono: 220360 E-mail: fcnf\_labinvserv@unsa.edu.pe

**Anexo 4: Análisis de azúcares dentro de una hora con una concentración inicial de 9°Brix de la piña y una concentración de 23° Brix del almíbar**



UNIDAD DE PRODUCCION DE BIENES Y PRESTACION DE SERVICIOS  
LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN Y SERVICIOS  
LABINVSERV

**INFORME DE ENSAYO**

Nº DE REPORTE: 18572-17

DETERMINACIÓN DE :	INICIO	4 HORAS		
	°Brix	°Brix		
Almibar	22.20	21.90		
Pulpa	18.50	19.50		
OBSERVACIONES:				

**METODO DE ENSAYO**

DETERMINACIÓN	METODO DE ENSAYO APLICADO
	NORMA /REFERENCIA / NOMBRE
°Brix	Método Refractométrico

Emisido en Arequipa (Perú), el 10 de Octubre de 2017

PAGINA 2 DE 2

*Dr. Juan Reyes Larico*  
**Dr. Juan Reyes Larico**  
Jefe de Laboratorio  
RCQP - 348



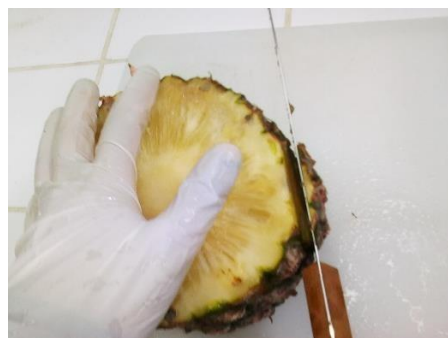
*Lic. Fredy Valdivia Peña*  
**Lic. Fredy Valdivia Peña**  
Químico Responsable  
RCQP - 842

Av. Independencia s/n Ciudad Universitaria Laboratorio 108-Primer Piso  
Teléfono: 220360 E-mail: fenf\_labinvserv@unsa.edu.pe

**Anexo 5: Fotografía de insumos para la elaboración del almíbar**



**Anexo 6. Fotografías de cortado pelado.**



**Anexo 7. Fotografías de descorazonado**



**Anexo 8. Fotografías del cortado en forma cúbica de 1 cm de grosor**





**Anexo 9. Pesado y escaldado de la fruta**



**Anexo 10. Refractómetro digital utilizado.**



**Anexo 11. Toma de muestras y medida de sus grados °Brix de la piña**



**Anexo 12. Conservación de frutas y hortalizas**

FRUTA	JARABE	g/l	°Brix iniciales	°Brix en equilibrio
Albaricoque	Concentrado	230	30	18
Claudia	Concentrado	230	30	18
Durazno Pera	Medio	161	25	14
Manzana	Medio	161	25	14
Piña	Medio	161	25	14
Babaco	Medio	161	25	14
Capulí	Muy Concentrado	297	40	22
Mango	Medio	161	25	14
Guayaba	Medio	161	25	14
Membrillo	Medio	161	25	14
Mora, Frutilla,	Medio	161	25	14
Uvilla	Liviano	111	18	10

Fuente: Larrea (2012)

**Anexo 13. Proporciones de fruta para elaboración de almíbares**

	Coctel de frutas-5	Coctel de frutas
Melocotones	30% a 50%	30% a 50%
Peras	25 % a 45%	25 % a 45%
Piñas	6 % a 16 %	6 % a 25%
Uva	6 % a 20 %	6 % a 20%
Cereza	2 % a 6 %	2% a 15%

Fuente: CODEX STAN 78-1981 norma técnica para el coctel de frutas

**Anexo 14. Aplicación del modelo matemático de fick para la determinación del coeficiente de difusividad**

C <sub>J</sub>	t <sub>m</sub>	C <sub>t</sub>	C <sub>e</sub>	t <sub>e</sub>	$(c_t - c_e)/(c_1 - c_e)$	De (almíbar)
14	60	13	12.2	240	-0.810930216	1.44E-10
23	60	22.22	21.9	240	-1.234744463	2.20E-10
32	60	31.5	30.7	240	-0.485507816	8.63E-11
14	120	12.9	12.2	240	-0.944461609	1.68E-10
23	120	22.18	21.9	240	-1.368275856	2.43E-10
32	120	31	30.7	240	-1.466337069	2.61E-10
14	180	12.8	12.2	240	-1.098612289	1.95E-10
23	180	22.05	21.9	240	-1.992430165	3.54E-10
32	180	30.8	30.7	240	-2.564949357	4.56E-10

Dónde:

- ✓ **C<sub>J</sub>**: concentración del almíbar en °Brix
- ✓ **t<sub>m</sub>** tiempo en min
- ✓ **C<sub>t</sub>**: concentración a un determinado tiempo en °Brix del almíbar
- ✓ **C<sub>e</sub>**: concentración en el equilibrio en °Brix
- ✓ **T<sub>e</sub>**: tiempo del equilibrio min
- ✓ **De** : coeficiente de difusividad efectiva del almíbar m<sup>2</sup>/seg
- ✓ **l**: espesor

**Anexo 15. Resolución a la segunda ley de fick por el método de separación de variables**

Se partió de las ecuaciones de variación para unas coordenadas rectangulares, eliminando las ecuaciones que no corresponden al proceso llegando a la ecuación (Y).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (V_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + V_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + V_z \frac{\partial C_A}{\partial z}) = D_{AB} (\frac{\partial^2 C_A}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial Z^2}) + R_A$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \dots\dots\dots (Y)$$

✓ **Condiciones iniciales**

$$c(x,0) = f(x)$$

$$c(x,t) = G(x)$$

✓ **Condiciones de contorno**

$$c(0,t) = 0$$

$$c(l,t) = 0$$

✓ **Método de separación de variables**

$$c(x, t) = f(x) * G(t)$$

$$C_t = f(x) * G(t)^i$$

$$C_x = f(x)^i * G(t)$$

$$C_{xx} = f(x)'' * G(t)$$

$$\frac{G(t)^i}{G(t)} = D * \frac{f(x)''}{f(x)} = K$$

✓ Aplicando las condiciones de frontera

$$C(0, t) = 0$$

$$0 = f(0) * G(t)$$

$$C(l, t) = 0$$

$$0 = f(l) * G(t)$$

$$f(0) = 0$$

$$f(l) = 0$$

**Primero:**

$$F'' + F * P^2 = 0$$

$$r^2 + P^2 = 0$$

$$r = ip$$

$$c, s(\cos px, \text{sen} px)$$

$$f(x) = A \cos px + B \text{sen} px$$

$$f(0) = A \cos p0 + B \text{sen} p0$$

$$f(0) = A \cos p0 + B \text{sen} p0$$

$$A = 0$$

$$F(l) = A \cos pl + B \text{sen} pl$$

$$0 = B \text{sen} pl$$



$$\text{sen}pl = 0$$

$$\text{sen}pl = n * \pi$$

$$p = \frac{n * \pi}{l}$$

$$f(x) = 0 * \cos px + B * \text{sen}\left(\frac{n * \pi}{l} x\right)$$

$$f(x) = B * \text{sen}\left(\frac{n * \pi}{l} x\right)$$

**Ahora para:**

$$\frac{G(t)}{G(t) * D} = -P^2$$

$$G^i(t) + r^2 G^i(t) * D = 0$$

$$r + p^2 * D = 0$$

$$r = -p^2 * D$$

$$G(t) = \exp^{-p^2 * D * t}$$

En

$$c(x, t) = f(x) * G(t)$$

$$c(x, t) = B_n * \text{sen} \frac{\pi * n * x}{l} * \exp^{p^2 * D * t}$$

✓ **Aplicando la condición inicial**

$$t=0$$

$$C(x, 0) = B_n * \text{sen} \frac{\pi n x}{l} * 1$$

✓ **Siendo una serie de Fourier**

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n * \text{sen} \frac{n \pi x}{l}$$

$$B_n = \frac{2}{l} \int_0^l F(x) \text{sen} \frac{n\pi x}{l}$$

$$l = \pi$$

$$0 < X < \frac{\pi}{2}$$

$$\frac{\pi}{2} < (\pi - X) < \pi$$

$$B_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} x \cdot \text{sen} \frac{n\pi x}{\pi} dx + \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} (\pi - x) \cdot \text{sen} \left( \frac{n\pi x}{l} \right) dx$$



A\*

B\*

$$A^* = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} x \cdot \text{sen} \frac{n\pi x}{\pi} dx = \text{Integral por partes}$$

$$u = x$$

$$du = dx$$

$$dv = \text{sen}(nx)$$

$$v = \frac{-\cos(nx)}{n}$$

$$A^* = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} x \cdot \text{sen} \frac{n\pi x}{\pi} dx = uv - \int v du = \frac{2}{\pi} \left( \frac{x \cdot \cos(nx)}{n} \right)_{\frac{\pi}{2}}^0 - \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left( \frac{-\cos(nx)}{n} \right)$$

$$A^* = 0 + 0 + \frac{2}{\pi} \frac{\text{sen}(nx)}{n^2} \Big|_0^{\frac{\pi}{2}}$$

$$A^* = \frac{2}{\pi} \frac{\text{sen}(n \frac{\pi}{2})}{n^2} \dots \dots \dots (1)$$

$$B^* = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \pi \cdot \text{sen}(nx) dx - \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} x \cdot \text{sen}(nx) dx$$



B\*\*

B\*\*\*

$$B^{**} = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \pi \cdot \text{sen}(nx) dx = \frac{2}{\pi} \left( \frac{\pi(-\cos(nx))}{n} \right)_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} = \frac{-2 \cos(n\pi)}{n} \dots \dots \dots 2$$

De la misma forma la integral por partes

$$B^{***} = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} x \cdot \text{sen}(nx) dx = \frac{2}{\pi} \left( \frac{x \cdot (-\cos(nx))}{n} \right)_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} - \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \frac{-\cos(nx)}{n} dx$$

$$B^{***} = \frac{-2 \cos(n\pi)}{n} - \frac{2}{\pi} \frac{\text{sen}(n \frac{\pi}{2})}{n^2} \dots \dots \dots 3$$

**En la forma total**

$$B_n = A^* + B^{**} + B^{***}$$

$$B_n = \frac{2}{\pi} \frac{\text{sen}(n \frac{\pi}{2})}{n^2} + \frac{-2 \cos(n\pi)}{n} + \frac{-2 \cos(n\pi)}{n} - \frac{2}{\pi} \frac{\text{sen}(n \frac{\pi}{2})}{n^2}$$

$$B_n = \frac{-4 \cos(n\pi)}{n\pi}$$

$$B_n = \frac{4}{n\pi} \quad n = \text{impar}$$

$$c(x, t) = \frac{4}{n\pi} * \text{sen} \frac{\pi * n * x}{l} * \exp^{p^2 * D * t}$$

$$c(x, t) = \frac{4}{(2n+1)\pi} * \sum_{n=0}^{\infty} \text{sen} \frac{\pi * (2n+1) * x}{l} * \exp^{(\frac{(2n+1)^2 * \pi^2}{l^2}) * D * t}$$

Llegando a la siguiente respuesta el cual se ajustara de la siguiente manera:

$$n=0$$

$$c(x,t) = \frac{4}{(2(0)+1)\pi} * \sum_{n=0}^{\infty} \text{sen} \frac{\pi * (2(0)+1) * x}{l} * \exp \left( \frac{(2(0)+1)^2 * \pi^2}{l^2} * D * t \right)$$

$$c(x,t) = \frac{4}{\pi} * \exp \left( \frac{\pi^2}{l^2} * D * t \right)$$

$$\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e} = \frac{4}{\pi} * \exp \left( \frac{\pi^2}{l^2} * D * t \right)$$

$$- \left( \frac{l \ln \left( \frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e} \right)}{\ln \left( \frac{4}{\pi} \right)} \right) * \left( \frac{l^2}{\pi^2} \right) = D_e$$

Dónde:

- S: concentración de sólidos en el producto
- Des: coeficiente de difusión efectivo de los solutos
- St= concentración a un determinado tiempo
- Se= concentración en el equilibrio
- S0=concentración al inicio
- l = espacio que ocurre la transferencia de masa los cortes del cubo de grosor