

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



TESIS

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA  
EN LÁMINAS DE MASHUA (*Tropaeolum tuberosum*), MEDIANTE LA METODOLOGÍA  
DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

Presentado por:

Marko Antonio Pérez Ayma

Para optar el título profesional de Ingeniero Agroindustrial

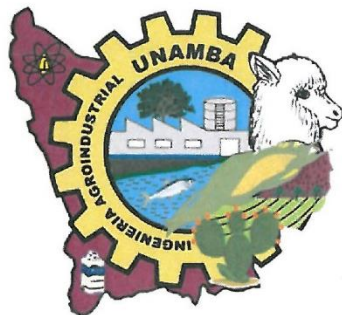
Abancay, Perú

2021



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC  
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



TESIS

“DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA  
EN LÁMINAS DE MASHUA (*Tropaeolum tuberosum*), MEDIANTE LA METODOLOGIA  
DE SUPERFICIE DE RESPUESTA”

Presentado por el Bach. **Marko Antonio Perez Ayma**, para optar el título de: Ingeniero  
Agroindustrial

Sustentado y aprobado el 31 de marzo del 2021 ante el siguiente jurado evaluador:

**Presidente:**

  
Ing. Luis Ricardo Paredes Quiroz

**Primer Miembro:**

  
Ing. Jorge Beltrán Mendoza Cáceres

**Segundo Miembro:**

  
Ing. Alex Ernesto Muñoz Cáceres

**Asesor (es):**

  
Dra. Guadalupe Chaquilla Quilca

  
M.Sc. Alfredo Fernández Ayma



### **Agradecimiento**

*A Dios quien me seduce al amor, fortaleza, humildad, servicio, por brindarme una energía fuera de lo lógico.*

*A mis asesores Dra. Guadalupe Chaquilla Quilca y M.Sc. Alfredo Fernández Ayma, quienes, me motivaron y contribuyeron con una suma de conocimientos en todas las etapas de esta investigación.*

*A familiares y compañeros quienes me alentaron y apoyaron en la ejecución de la tesis.*



### *Dedicatoria*

*A mis padres Eugenia y Miguel que me dieron la oportunidad de vivir, y su amor incondicional, a ellos quienes me forjaron un hombre consciente.*

*A mis hermanos por acompañarme en esta hermosa travesía de la vida.*

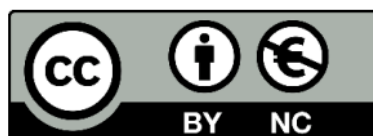
*Y amigos que contribuyeron indistintamente en este trabajo.*



Determinación de los parámetros en la deshidratación osmótica en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*), mediante la metodología de superficie de respuesta

Línea de investigación: Caracterización, desarrollo de procesos e innovación en la industria.

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>RESUMEN</b> .....	2
<b>ABSTRACT</b> .....	3
<b>CAPÍTULO I</b> .....	4
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	4
1.1 Descripción del problema.....	4
1.2 Enunciado del problema.....	5
1.2.1 Problema general.....	5
1.2.2 Problemas específicos .....	5
1.3 Justificación.....	5
<b>CAPÍTULO II</b> .....	7
<b>OBJETIVOS E HIPÓTESIS</b> .....	7
2.1 Objetivo de la investigación .....	7
2.1.1 Objetivo general .....	7
2.1.2 Objetivos específicos.....	7
2.2 Hipótesis de la investigación.....	7
2.2.1 Hipótesis general .....	7
2.2.2 Hipótesis específico.....	7
2.3 Definición de Variables.....	8
2.4 Operacionalización de variables (variable, dimensión, indicador, índice/escala).....	8
<b>CAPÍTULO III</b> .....	9
<b>MARCO TEÓRICO REFERENCIAL</b> .....	9
3.1 Antecedentes .....	9
3.2 Marco teórico .....	11
3.2.1 Generalidades de mashua .....	11
3.2.1.1 Clasificación Taxonómica de la mashua .....	11
3.2.1.2 Descripción Botánica .....	11
3.2.1.3 Morfología de la mashua.....	12
3.2.1.3.1 Acesión: Mashua amarilla .....	13
3.2.1.3.2 Información morfológica.....	14
3.2.1.4 Composición química.....	14
3.2.1.5 Usos de la mashua .....	16
3.2.1.6 Producción nacional de mashua .....	16
3.2.2 Deshidratación de alimentos .....	17
3.2.3 Deshidratación osmótica .....	18
3.2.3.1 Ventajas y desventajas de la deshidratación osmótica .....	19



3.2.3.2	Factores que afectan la deshidratación osmótica.....	20
A.	Variables internas.....	20
A.1.	Estructura y composición del fruto, y tamaño de las piezas.....	20
B.	Variables externas.....	21
B.1.	Tipo de agente osmótico.....	21
B.1.1.	La sacarosa:.....	22
B.1.2.	Efecto de la concentración de sacarosa.....	23
B.2.	Temperatura.....	24
B.3.	Tiempo de proceso.....	24
B.4.	Relación alimento / solución.....	25
B.5.	Agitación.....	25
B.6.	Presión del sistema.....	25
B.7.	Pre tratamiento del producto.....	25
3.2.3.3	Mecanismo de la osmodeshidratación.....	26
3.2.3.4	Cinética de la deshidratación osmótica.....	28
3.2.3.5	Difusión.....	28
3.2.3.5.1	Valores de Difusividad de agua y sólidos para algunos alimentos.....	29
3.2.3.5.2	Modelo utilizado para Difusividad efectiva de agua y sólidos.....	30
3.2.3.5.3	Modelo de Crank.....	31
3.2.3.6	Post tratamiento a la osmosis:.....	34
3.2.4	La metodología de superficie de respuesta.....	36
3.2.4.1	Curvas de nivel.....	36
3.2.4.2	Modelos para ajustar superficie de respuesta.....	37
3.2.4.3	Diseño de composición central rotacional.....	38
3.3	Marco conceptual.....	40
<b>CAPÍTULO IV</b>	.....	<b>41</b>
<b>METODOLOGÍA</b>	.....	<b>41</b>
4.1	Tipo y nivel de investigación.....	41
4.2	Diseño de investigación.....	41
4.3	Población y muestra.....	45
4.3.1	Población.....	45
4.3.2	Muestra.....	45
4.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	45
4.4.1	ETAPA I: Caracterización fisicoquímicas de la mashua.....	45
4.4.2	ETAPA II. Deshidratación osmótica.....	45
4.4.3	ETAPA III. Determinaciones analíticas.....	49
4.5	Material de investigación.....	51
4.6	Análisis estadístico.....	52
<b>CAPÍTULO V</b>	.....	<b>53</b>

<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....	53
5.1 Descripción de resultados.....	53
5.1.1 Características fisicoquímicas de mashua fresca.....	53
5.1.2 Resultados experimentales .....	53
5.1.3 Análisis estadístico.....	54
5.1.3.1 Análisis estadístico de pérdida de peso (%PP).....	55
5.1.3.2 Análisis estadístico de pérdida de agua (%PA).....	56
5.1.3.3 Análisis estadístico de ganancia de sólidos.....	58
5.1.4 Modelo matemático ajustado.....	59
5.1.5 Superficie de respuesta.....	61
5.1.5.1 Superficie de respuesta estimada para pérdida de peso.....	61
5.1.5.2 Superficie re respuesta estimada para pérdida de agua: .....	62
5.1.5.3 Superficie de respuesta estimada para ganancia de solidos: .....	63
5.1.6 Optimización simultanea de respuestas.....	63
5.1.7 Determinación de difusividad efectiva de agua.....	65
5.1.8 Determinación de difusividad efectiva de sólidos.....	66
5.2 Contrastación de hipótesis.....	69
5.3 Discusión de resultados.....	70
5.3.1 Análisis de las características fisicoquímicas de mashua.....	70
5.3.2 Análisis de pérdida de peso (%PP).....	70
5.3.3 Análisis de pérdida de agua (%PA).....	71
5.3.4 Análisis de ganancia de sólidos (%GS).....	72
5.3.5 Análisis de optimización de las láminas de mashua.....	73
5.3.6 Análisis de difusividad efectiva de agua ( $D_{ef,w}$ ) .....	74
5.3.7 Análisis de difusividad efectiva de solidos ( $D_{ef,ss}$ ). .....	74
<b>CAPÍTULO VI</b> .....	76
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	76
6.1 Conclusiones .....	76
6.2 Recomendaciones.....	77
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	78
<b>ANEXO</b> .....	83

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1</b> Operacionalización de variables.....	8
<b>Tabla 2.</b> Composición proximal de la mashua en 100 gramos de porción comestible.....	15
<b>Tabla 3.</b> Rangos de variabilidad en la caracterización química de mashua Banco de Germoplasma del INIAP* .....	15
<b>Tabla 4.</b> Producción nacional de mashua de 2000-2016 .....	17
<b>Tabla 5.</b> Ventajas de agente osmótico .....	22
<b>Tabla 6.</b> Valores de Difusividad efectiva para agua y sólidos en diferentes alimentos.....	29
<b>Tabla 7.</b> Descripción de diseño experimental.....	42
<b>Tabla 8.</b> Coordenadas del Diseño de Composición Central Rotacional (DCCR) para tres factores .....	42
<b>Tabla 9.</b> Detalle de los tratamientos con los valores codificada y natural.....	43
<b>Tabla 10.</b> Esquema experimental para optimizar la deshidratación osmótica en láminas de mashua (Tropaeolum tuberosum) mediante la metodología de superficie respuesta .....	44
<b>Tabla 11.</b> Composición fisicoquímica de mashua variedad amarillo .....	53
<b>Tabla 12.</b> Efecto de las variables de concentración de sacarosa, temperatura y tiempo en la deshidratación osmótica. Evaluados en pérdida de peso, pérdida de agua y ganancia de sólidos. ....	54
<b>Tabla 13.</b> ANOVA para la variable de respuesta pérdida de peso (% PP).....	55
<b>Tabla 14.</b> ANOVA para la variable de respuesta pérdida de agua (% PA).....	57
<b>Tabla 15.</b> ANOVA para la variable de respuesta porcentaje de ganancia de sólidos (% GS).....	58
<b>Tabla 16.</b> Modelo matemático ajustado para las variables de respuestas.....	59
<b>Tabla 17.</b> Parámetros óptimos, respuestas estimadas y deseabilidad optimizada .....	65
<b>Tabla 18.</b> Resultado de la difusividad efectiva de agua a parámetros óptimos .....	66
<b>Tabla 19.</b> Resultado de la difusividad efectiva de sólidos a parámetros óptimos .....	68



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Algunas variedades de colores de mashua en Perú.....	12
<b>Figura 2.</b> Accesoión: Mashua Amarilla.....	13
<b>Figura 3.</b> Contenido de agua y azúcar durante la deshidratación osmótica. ....	19
<b>Figura 4.</b> Geometría de reducción de tamaño en alimento para deshidratación osmótica .....	21
<b>Figura 5.</b> Estructura química de la sacarosa.....	23
<b>Figura 6.</b> Mecanismos de transferencia de masa dentro de los tejidos celulares .....	26
<b>Figura 7.</b> Esquematzación del mecanismo de transporte en la deshidratación osmótica en tejido vegetal .....	27
<b>Figura 8.</b> Diagrama de flujo general de un proceso de deshidratación osmótica de alimentos.....	35
<b>Figura 9.</b> Gráfico de método de superficie respuesta .....	37
<b>Figura 10.</b> Representación y construcción de los DCC para k=3 y k=2 factores.....	38
<b>Figura 11.</b> Visualización gráfica del experimento. ....	49
<b>Figura 12.</b> Diagrama de Pareto para porcentaje de pérdida de peso (%PP).....	56
<b>Figura 13.</b> Diagrama de Pareto para porcentaje de pérdida de agua (%PA).....	57
<b>Figura 14.</b> Diagrama de Pareto para porcentaje de ganancia de solidos (%GS).....	59
<b>Figura 15.</b> Superficie de respuesta estimada de la variable pérdida de peso (%PP) .....	62
<b>Figura 16.</b> Superficie de respuesta estimada de la variable perdida de agua (%PA) .....	62
<b>Figura 17.</b> Superficie de respuesta estimada de la variable ganancia de solidos (%GS) .....	63
<b>Figura 18.</b> Gráfico de simultáneas respuestas para el proceso de deshidratación osmótico .....	64
<b>Figura 19.</b> Gráfico de contornos superpuestos en el proceso de deshidratación osmótica.....	64
<b>Figura 20.</b> Variación de $\ln((H_t - H_e)/(H_o - H_e))$ en función al tiempo a temperatura 23.2°C y concentración 66.8 °Brix en la determinación de difusividad efectiva de agua. Repetición 1. ....	66
<b>Figura 21.</b> Variación de $\ln((H_t - H_e)/(H_o - H_e))$ en función al tiempo a temperatura 23.2°C y concentración 66.8 °Brix en la determinación de difusividad efectiva de agua. Repetición 2. ....	66
<b>Figura 22.</b> Variación de $\ln((S_t - S_e)/(S_o - S_e))$ en función al tiempo (h) a temperatura 23.2°C y concentración 66.8 °Brix en la determinación de difusividad efectiva de sólidos. Repetición 1.....	67
<b>Figura 23.</b> Variación de $\ln((S_t - S_e)/(S_o - S_e))$ en función al tiempo a temperatura 23.2°C y concentración 66.8 °Brix en la determinación de difusividad efectiva de sólidos. Repetición 2.....	67

## INTRODUCCIÓN

La mashua es un tubérculo cultivado en las zonas alto andinas de nuestro país, contiene un alto valor nutricional, por sus cualidades curativas es que interviene como diurético y previene problemas hepáticos y renales. Recientemente la deshidratación osmótica está tomando importancia dentro de los alimentos como pre tratamiento dentro de la conservación. Y se define como técnica de remoción parcial de agua y consiste en introducir trozos de alimentos o enteras en contacto con solución osmodeshidratante, constituyéndose una doble transferencia de materia; desde el producto se desplaza agua hacia la solución osmodeshidratante con algunos componentes (azúcares, vitaminas, pigmentos), así mismo, en sentido contrario hay desplazamiento de sólidos solubles, desde la solución osmodeshidratante hacia el producto. En respuesta a este proceso el producto pierde agua, gana sólidos solubles y pierde peso.

El presente estudio tiene como objetivo principal, determinar los parámetros óptimos en la deshidratación osmótica en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*), mediante la metodología de superficie de respuesta. Los objetivos específicos son lo siguiente: Evaluar los efectos de la concentración de sacarosa, temperatura y tiempo de proceso en la deshidratación osmótica en términos de porcentaje de pérdida de peso (%PP), pérdida agua (%PA) y ganancia de sólidos (%GS) en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*), utilizando la metodología de superficie de respuesta. Determinar la difusividad efectiva de agua y sólidos en los parámetros óptimas de deshidratación osmótica en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*).

Desarrollar los parámetros de deshidratación osmótica y difusividad de agua y sólidos, permite formular modelos matemáticos en la deshidratación, pero también es útil para otros trabajos de investigación, como un producto de tratamiento intermedio para estudios posteriores como la congelación, freído, secado, liofilizado.



## RESUMEN

La mashua (*Tropaeolum tuberosum*), es un tubérculo cultivado en las zonas andinas, de una vida corta después de la cosecha, de escaso consumo y corre peligro en desaparecer debido a la limitada difusión. El presente trabajo tiene la finalidad de determinar los parámetros óptimos en la deshidratación osmótica en términos de pérdida de peso (%PP), pérdida de agua (%PA) y ganancia de sólidos solubles (%GS) en láminas de mashua mediante la Metodología de Superficie Respuesta (MRS). Adicionalmente a los parámetros óptimos se determinó la difusividad efectiva de agua y de sólidos por el modelo Crank. La mashua es lavado, desinfectado y cortado en láminas de 3 mm de espesor y 23 mm de diámetro, la relación producto/jarabe se consideró 1:4, se ha desarrollado la deshidratación osmótica en baño maría con agitación orbital a 100 rpm. Las variables independientes fueron solución de sacarosa [40 a 60° Brix], temperatura [30 a 50°C] y tiempo de inmersión [60 a 180 min]. Los experimentos se realizaron de acuerdo al Diseño Central Compuesto Rotacional (DCCR), estas fueron sometidas a un análisis de Metodología de superficie de respuesta, consecuentemente se obtuvieron modelos matemáticos las cuales fueron validadas por análisis ANOVA con un nivel de significancia al ( $P < 0.05$ ). Las variables de respuesta fueron optimizadas mediante la función de deseabilidad global a las siguientes condiciones: máximo la pérdida de peso, máximo pérdida de agua y mínima ganancia de sólidos. Los parámetros óptimos en la deshidratación osmóticas en láminas de mashua fueron: 66.8 °Brix de concentración de sacarosa, 23.2°C de temperatura y 48.6 minutos de tiempo de inmersión, facilitando una máxima pérdida de peso de 50.14%, máxima pérdida de agua 52.34% y mínima ganancia de sólidos de 2.20 %. Finalmente a parámetros óptimos, los valores de difusividad efectiva de agua ( $D_{ef, w}$ ) es de  $3.87216 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s. y difusividad efectiva de sólidos ( $D_{ef, ss}$ ) de  $5.29403 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s.

**Palabras Claves:** Mashua, deshidratación osmótica, difusividad efectiva, Metodología de Superficie de Respuesta (MRS), optimización.



## ABSTRACT

The mashua (*Tropaeolum tuberosum*), is a tuber cultivated in the Andean zones, of a short life after the harvest, of little consumption and is in danger of disappearing due to the limited diffusion. The present work aims to determine the optimal parameters in osmotic dehydration in terms of weight loss (% PP), water loss (% PA) and gain of soluble solids (% GS) in sheets of mashua using the Surface Response Methodology (MRS). In addition to the optimal parameters, the effective diffusivity of water and solids was determined by the Crank model. The mashua is washed, disinfected and cut into sheets of 3 mm thick and 23 mm in diameter, the product / syrup ratio was considered 1: 4, osmotic dehydration has been developed in a water bath with orbital shaking at 100 rpm. The independent variables were sucrose solution [40 to 60 ° Brix], temperature [30 to 50 ° C] and immersion time [60 to 180 min]. The experiments were carried out according to the Central Compound Rotational Design (DCCR), these were subjected to a response surface Methodology analysis, consequently mathematical models were obtained which were validated by ANOVA analysis with a level of significance at ( $P < 0.05$ ). The response variables were optimized by means of the global desirability function to the following conditions: maximum weight loss, maximum water loss and minimum solid gain. The optimal parameters in the osmotic dehydration in mashua sheets were: 66.8 ° Brix of sucrose concentration, 23.2 ° C of temperature and 48.6 minutes of immersion time, facilitating a maximum weight loss of 50.14%, maximum water loss 52.34% and minimum solid gain of 2.20%. Finally at optimal parameters, the effective diffusivity values of water ( $D_{ef, w}$ ) is  $3.87216 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s. and effective diffusivity of solids ( $D_{ef, ss}$ ) de  $5.29403 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s. It can be confirmed that it is possible to effectively develop dehydration in mashua sheets as a pre-preservation treatment for subsequent processes.

**Key Words:** Mashua, osmotic dehydration, effective diffusivity, Surface Response Methodology (MRS), optimization.



## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1 Descripción del problema

La mashua (*Tropaeolum tuberosum*) es un tubérculo andino, geográficamente se desarrolla desde Colombia hasta Bolivia entre los 1500-4200 msnm, es un cultivo anual que resiste bien el frío (Aruquipa *et al.*, 2016; Suca, 2008). Estos cultivos fueron domesticados por los pueblos autóctonos, con el paso del tiempo ha adquirido un alcance global.

La producción de mashua en la región de Apurímac y en el resto de Perú es estacionaria, es escasa de adquirir después de la cosecha, así también la obtención y consumo de mashua está reduciéndose notablemente, debido a la influencia de nuevos hábitos alimenticios, falta de conocimiento y aprovechamiento de bondades de este cultivo. Por otro lado (Grau *et al.*, 2003) menciona que la machua corre peligro de desaparecer por la escasa difusión que tiene a escala nacional con la adopción de otras prácticas y tecnologías alimenticias. Así también (Benavides, 2017), indica que la vida útil de mashua luego de la cosecha es corta, por la actividad de agua y tiende a deteriorarse fácilmente, provocando la pérdida de propiedades nutricionales, textura y color.

La mashua tiene un alto contenido de proteínas (mayores que la oca, papa y olluco), ácido ascórbico (vitamina C), carbohidratos, fibra y calorías (Manrique *et al.*, 2013). Sin embargo, la limitada transferencia de una tecnología agroindustrial para aprovechamiento de este tubérculo y la escasa adaptación de tecnología, insta a la necesidad de aprovechar en diferentes transformaciones de este tubérculo. La eliminación agua es una operación unitaria en los procesos de alimentos para estabilizarlos al disminuir la actividad de agua, sin embargo, en los casos de frutas y vegetales cuando se somete sin un pre-tratamiento de osmosis disminuye la calidad de producto, en efecto, produce textura dura, rehidratación lenta o incompleta, pérdida de jugosidad, color desfavorable y pérdida de sabor. Por lo tanto, el uso de la deshidratación osmótica es una técnica que permite eliminar parcialmente el agua de los tejidos de los alimentos por sumergir en una solución osmodeshidratante, sin afectar su calidad, para tratamientos posteriores.

En la actualidad no existe parámetros óptimos en el proceso de deshidratación osmótica en la mashua, considerando las variables internas del alimento (tamaño y forma de alimento), y la variable externa del proceso (temperatura del medio osmótico, tiempo de proceso, tipo de agente osmótico, relación jarabe: producto, agitación), que afecten en la cinética de deshidratación osmótica en términos de pérdida de peso, pérdida de agua, ganancia de sólidos y la difusión efectiva



de agua y sólidos en el producto. Por ello para identificar los parámetros en la deshidratación osmótica en láminas de mashua, esta investigación pretende determinar el punto óptimo pérdida de peso, pérdida de agua y la ganancia de sólidos solubles en láminas de mashua *Tropaeolum tuberosum*, mediante la metodología de superficie respuesta. Y finalmente a condiciones óptimas del proceso se evalúa la difusividad efectiva de agua y solutos descrita por la Segunda Ley de Fick, modelo modificado por Crank para laminas, para una mejor comprensión del movimiento de los solutos y agua en la estructura interna en láminas de mashua.

## 1.2 Enunciado del problema

### 1.2.1 Problema general

¿Cuáles son los parámetros óptimos en la deshidratación osmótica en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*), mediante la metodología de superficie de respuesta?

### 1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo influye la concentración de sacarosa, temperatura y tiempo de proceso en la deshidratación osmótica en términos de porcentaje de pérdida de peso (%PP), pérdida agua (%PA) y ganancia de sólidos (%GS) en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*), utilizando la metodología de superficie de respuesta?
- ¿Cuál es la difusividad efectiva agua y sólidos en los parámetros óptimas de deshidratación osmótica en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*)?

## 1.3 Justificación

La mashua es un tubérculo que se caracterizan por poseer un mayor contenido de proteínas (mayores a la oca, papa y el olluco), carbohidratos, vitamina C, ácido ascórbico, fibra y calorías. Además, posee propiedades que se utiliza como insecticidas, nematicidas, antibióticas, diuréticas, anticancerígenas, lo que contribuye a sustentar el uso tradicional de la mashua en la medicina andina.

La deshidratación en la mashua ha sido y sigue siendo materia de investigación, hasta el momento se ha desarrolla métodos de deshidratación convencional como exposición solar por un periodo de tiempo largo; para conseguir un sabor dulce y ser consumido de distintas formas. En la actualidad la deshidratación osmótica ha sido sujeta a muchas investigaciones, aplicándose en vegetales y frutas como tratamiento previo a procesos convencionales (congelado, freído, secados, liofilizado, etc), los resultados de esta investigación muestran un efecto positivo en la conservación de las propiedades nutricionales, sensoriales y de estabilidad del producto final.



Esta propuesta de investigación pretende dar un valor agregado a la mashua fresca, introduciendo a un proceso de deshidratación osmótica como pre-tratamiento para los demás procesos posteriores (freído, secado, congelado, liofilizado, etc.). Se utilizó la sacarosa como agente osmótico; por su facilidad de adquirirlo, bajo costo, bajo peso molecular y contribuirá en la remoción de agua de la mashua aportando sólidos solubles para su conservación, prolongando el tiempo de comercialización. Además, es de interés tanto de los investigadores y empresarios conocer los parámetros en el proceso de deshidratación osmótica en láminas de mashua, estos parámetros permitirán cuantificar, diseñar y controlar procesos de materia en este tubérculo en los procesos agroalimentarios.

El uso de la Metodología de superficie de respuestas “permite la reducción de números de experimentos necesarios para obtener resultados estadísticamente válidos, además es una herramienta muy efectiva para la optimización y entregan información que las evaluaciones clásicas en las que se estudia una variable a la vez” (Ozdemir *et al.*, 2008).

Por lo expuesto será de gran importancia el estudio de la determinación de los parámetros óptimos en la deshidratación osmótica en láminas de mashua, mediante la metodología de superficie de respuesta.



## CAPÍTULO II

### OBJETIVOS E HIPÓTESIS

#### 2.1 Objetivo de la investigación

##### 2.1.1 Objetivo general

Determinar los parámetros óptimos en la deshidratación osmótica de láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*), mediante la metodología de superficie de respuesta.

##### 2.1.2 Objetivos específicos

- Evaluar los efectos de la concentración de sacarosa, temperatura y tiempo de proceso en la deshidratación osmótica en términos de porcentaje de pérdida de peso (%PP), pérdida de agua (%PA) y ganancia de sólidos (%GS) en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*), utilizando la metodología de superficie de respuesta.
- Determinar la difusividad efectiva de agua y sólidos en los parámetros óptimos de deshidratación osmótica en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*).

#### 2.2 Hipótesis de la investigación

##### 2.2.1 Hipótesis general

La concentración de sacarosa, temperatura del medio osmótico y el tiempo de inmersión permite la deshidratación osmótica en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*).

##### 2.2.2 Hipótesis específico

- La concentración de sacarosa, temperatura del medio osmótico y tiempo de inmersión tiene un efecto en la pérdida de peso (%PP), pérdida de agua (%PA) y ganancia de sólidos (%GS) durante la deshidratación osmótica en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*).
- Los parámetros óptimos de deshidratación osmótica en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*) permiten determinar la difusividad efectiva de agua y sólidos.



### 2.3 Definición de Variables

Variable independiente:

- Concentración de la solución de sacarosa
- Temperatura del proceso
- Tiempo de proceso

Variable dependiente:

- Pérdida de peso (%PP)
- Perdida de agua (%PA)
- Ganancia de solidos solubles (%GS)
- Difusividad efectiva de agua (m<sup>2</sup>/s)
- Difusividad efectiva de solidos (m<sup>2</sup>/s)

### 2.4 Operacionalización de variables (variable, dimensión, indicador, índice/escala)

**Tabla 1**

*Operacionalizacion de variables*

VARIABLES CONCEPTO	DIMENSION	INDICADORES	INDICES	
<b>VARIABLES INDEPENDIENTES</b>				
Factores que influyen en la deshidratación osmótica en láminas de mashua.	Relación de la cantidad de solvente (agua) y la cantidad de soluto(sacarosa)	Concentración de la solución de sacarosa	40 °Brix 60 °Brix	
	Magnitud referida a la noción de calor medible	Temperatura	30 °C 50 °C	
			Magnitud física con que se mide la duración del proceso	Tiempo
	<b>VARIABLES DEPENDIENTES</b>			
	Efectos que se generan durante la deshidratación osmótica, mediante la Metodología de Superficie Respuesta	Cinética de la deshidratación osmótica	Pérdida de peso	%
Perdida de agua			%	
Ganancia de solidos solubles			%	
Propiedad del material en el secado. Un valor que representa la facilidad con que cada soluto y agua se mueve en láminas de mashua.	Transferencia de masa a parámetros óptimos del proceso.	Difusividad efectiva agua	m <sup>2</sup> /s	
		Difusividad efectiva solidos	m <sup>2</sup> /s	

## CAPÍTULO III

### MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

#### 3.1 Antecedentes

- a) Según (Yadav *et al.*, 2012), en su investigación “Optimización de las condiciones de deshidratación osmótica de rodajas de melocotón en solución de sacarosa utilizando la metodología de superficie de respuesta”, evaluó la concentración de sacarosa (50 °Brix a 70 °Brix), el tiempo de inmersión (2 h a 4 h) y la temperatura del proceso (35 °C a 55 °C) para máxima pérdida de agua (WL), mínima ganancia de soluto (SG) y máxima relación de rehidratación (RR) como variables de respuesta. La deshidratación osmótica en las rodajas a condiciones óptimas fue 69.9 ° Brix de concentración de sacarosa, 3.97 h de duración del proceso y 37.63 ° C de temperatura del proceso reduciría el contenido de agua original de las rodajas de durazno en aproximadamente un 28.42% con una relación de rehidratación de 3.38.
- b) Según (Bambicha *et al.*, 2012), en su investigación “Optimización del proceso de deshidratación osmótica de calabacita (*Cucurbita Moschata*) en soluciones ternarias”. Mediante el uso de la metodología de superficie de respuesta (MSR), con el objetivo de lograr una máxima pérdida de agua, máxima pérdida de peso y una mínima ganancia de sólidos. Las variables independientes fueron solución hipertónica de sacarosa (40, 50 y 60 °Brix), NaCl (3, 6 y 9 g/100g) y tiempo de inmersión (1, 2 y 3 h). Concluyendo que las condiciones óptimas en la deshidratación osmótica fueron: 60° Brix concentraciones de sacarosa y 6.39% de cloruro de sodio y un tiempo inmersión de 2 h y 24 min.
- c) Según (Sandoval, 2016), utilizó la MRS para hallar las condiciones óptimas de procesamiento en la deshidratación osmóticas en manzana. Los factores de estudio fueron temperaturas de (30 a 40°C), concentraciones de glucosa (40 a 60% w/w) y tiempo de procesamiento (60 a 180 min). Obteniendo como una máxima pérdida de agua (27.3%) y ganancia de sólidos mínima (1.75%) se logró con 37.1 °C de temperatura 59% en peso de solución acuosa de glucosa y 217.3 minutos de tiempo de inmersión. Concluyó que la temperatura, concentración de glucosa y el tiempo de inmersión fueron factores importantes que tuvieron un efecto en la deshidratación osmótica de manzanas.
- d) Según (Martinez, 2012), estudió los efectos de la concentración y la temperatura en la deshidratación osmótica del tomate de árbol. Utilizó concentraciones de (50°, 55° y 60 ° Brix)



y temperaturas de (25°, 35°, 45° y 55 °C). El mejor tratamiento fue el tratamiento (60°Brix 55°C). Pérdida de peso 52.09 g/100 g.fi; Pérdida de agua 53.70 g. agua/100 g.fi; para Ganancia de Sólidos nos indica que los mejores tratamientos son (60 °Brix 45°C) y (55 °Brix 55 °C), con valores promedios de 17,67 (g. sólidos/100 g. fi) y 19,50 (g. sólidos/100 g. fi). En tanto los valores establecidos en los diferentes tratamientos y condiciones para la difusividad efectiva de agua se encuentra en el orden de  $10^{-10}$  (m<sup>2</sup>/s).

- e) Según (Silva *et al.*, 2014), con el propósito de analizar la cinética de deshidratación osmótica de papa (*Solanum Tuberosum L.*). Comparó modelo cinético fenomenológico y con el modelo de Azuara. Los factores de estudio fueron temperatura (30 °C, 40 °C y 50 °C) en cubos de 1 cm de arista de papa, en solución de sacarosa (40 %) y cloruro de sodio (5 %), relación masa/solución de 1:4, agitación de 120 ±5 rpm y los intervalos de tiempo fueron 0, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 420 y 480 min. Concluyendo que en 2-3 h se logra la mayor velocidad de pérdida de agua y ganancia de sólidos en la deshidratación osmótica de papa, la velocidad disminuye cuando tiende al equilibrio. Encontró la difusividad efectiva de agua en orden  $10^{-10}$  (m<sup>2</sup>/s) y la difusividad efectiva de sólidos  $10^{-10}$  (m<sup>2</sup>/s), en todos los tratamientos.
- f) Según (Naranjo, 2015), determinó las parámetros óptimas en la deshidratación osmótica y la obtención de snacks a partir de zanahoria *Daucus Carota*, mediante la metodología de superficie de respuesta. Para la deshidratación osmótica consideró factores de estudio de tiempo (60 a 180 min) y concentración de sacarosa (40 a 60 °Brix). Concluyendo que las condiciones óptimas son: 64°Brix y 35 minutos, respectivamente. A estos parámetros se encontraron el 29.34% de pérdida de peso, 12.45% de ganancia de sólidos y el 40.70% de pérdida de humedad. Y las condiciones óptimas en el freído fueron temperatura y tiempo de fritura 164°C y 4.6 minutos respectivamente.
- g) En su estudio (Allcca, 2017), desarrolló la influencia de la concentración de sacarosa y la temperatura en la deshidratación osmótica de la oca. Introdujo trozos de oca en solución hipertónica de sacarosa de 40 y 50 °Brix y temperaturas de 15 °C y 30 °C. Concluyendo que tratamiento es 30 °C y 50 °Brix, presento la máxima perdida de agua (%PA) de 27.9913%, la máxima pérdida de peso (%PP) de 13% y a 15°C y 50 °Brix presento la máxima ganancia de sólidos (%GS) de 20.271%. Determinó el coeficiente de difusividad en rango de  $3.75 \times 10^{-11}$  (40 °Brix y 15°C) a  $1.13 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s (50 °Brix y 30°C).



## 3.2 Marco teórico

### 3.2.1 Generalidades de mashua

La mashua (*Tropaeolum tuberosum*) es un tubérculo andino que ocupa el cuarto lugar en interés de consumo en la región de los Andes después de la papa, la oca y el ulluco, su producción es en valles húmedos de la zona andina de Perú, Colombia, Argentina, Ecuador y Bolivia (National Research Council, 1989). Así también (Manrique, *et al.*, 2013), mencionan que la mashua, también es conocida como “añu”, “isaño” o “cubio”, es una planta herbácea perenne originaria de la región andina, donde fue domesticada. Según (Manrique, *et al.*, 2013) y (Grau, *et al.*, 2003) menciona que la mashua se cultiva a 2400 a 4300 m.s.n.m., con más frecuencia entre los 3000 y 3700 m.s.n.m., donde las temperaturas promedio anuales entre 8 a 11 °C. En referencia al ciclo vegetativo, (Gomez y Cevallos, 2015) indica que la mashua varía entre 220 y 245 días. A diferencia de la oca y ulluco, produce gran cantidad de semillas viables. También, (Fries y Tapia, 2007) menciona; que a primera vista los tubérculos pueden ser equivocados con la oca, pero se diferencian por su forma cónica, jaspes oscuros y mayor concentración de yemas en la parte distal y un sabor agrio.

#### 3.2.1.1 Clasificación Taxonómica de la mashua

Según (Arenas y Samantha, 2015) cita a (Cronquist, A. 1981) donde clasifica la taxonomía de la mashua en la siguiente secuencia:

Reino: *Vegetal*.

Clase: *Angiopermas*.

Sub clase: *Dicotiledoneas*.

Orden: *Geraniales*.

Familia: *Tropaeolaceae*.

Género: *tropaeolum*.

Especie: *tuberosum R. et P.*

Nombre Científico: *Tropaeolum tuberosum R.et P.*

Nombres comunes: *mashua, añu, cubios, navios, isaño.*

#### 3.2.1.2 Descripción Botánica

La mashua es una planta herbácea, semierecta de 20 a 80 cm, no obstante, en la etapa de madurez es semiprostrada de modo que la hoja es ovalada; el perfil superior es verde mate y perfil inferior de un verde claro, puede ser de tres, cuatro o cinco lóbulos. Las flores solitarias nacen en las axilas de las hojas de mashua tienen yemas profundas y alargadas, son de forma elipsoidal o cónica, (Fries y Tapia, 2007).



Este tubérculo se encuentra de diferentes colores muy llamativos y hermosos. Los isaños violáceos oscuros se encuentran sur de Perú y Bolivia. Y su cultivo es muy rústico porque se cultiva en suelos pobres, sin uso de pesticidas y fertilizantes; a estas condiciones, su rendimiento puede exceder a la papa (Tapia, 1990).

### 3.2.1.3 Morfología de la mashua

La parte comestible de mashua inicia en los estolones axilares se ensanchan para crear tubérculos, la hortaliza generalmente mide 5 a 15 cm de largo, son de forma cónica alargada, de variados colores y de yemas profundas (Travis, 1999). Al respecto de la diversidad de color en la Figura 1. Muestra las multitudes de colores de este tubérculo en todos los lugares, esta diferencia es por el color de piel como el color de la pulpa. El color de piel de este tubérculo puede poseer desde crema hasta morado oscuro, atravesando desde color amarillo, naranja hasta purpura morado en las tonalidades, por ello, presenta colores como purpuras en forma de jaspes que se encuentra en el ápice y debajo de las yemas (Grau *et al.*, 2003; National Research Council, 1989).



**Figura 1.** Algunas variedades de colores de mashua en Perú  
Fuente : (Ramón, 2017).

### 3.2.1.3.1 Accesoión: Mashua amarilla

En las comunidades campesinas de Perú, Bolivia y Argentina se pueden encontrar 113 accesiones y estas se encuentran clasificadas en Centro Internacional de la Papa (CIP). De la determinación morfológica de 107 accesiones de mashua, se distingue 91 agrupamientos de morfotipos. Y los 67 de los 91 morfotipos están caracterizado por una sola accesión, mientras que los 14 morfotipos restantes están conjugados por dos o tres accesiones (Manrique, *et al.*, 2013).



**Figura 2.** Accesoión: Mashua Amarilla  
Fuente : (Manrique, *et al.*, 2013)

### 3.2.1.3.2 Información morfológica

Según (Manrique, *et al.*, 2013) describe en el catálogo de Centro Internacional de la Papa (CIP), la siguiente información sobre la mashua de accesión mashua amarilla

**Color de follaje:** Verde purpureo (137CD) - (187AB)

**Color del envés:** Verde (139D, 138C)

**Color de los tallos o ramas:** Verde amarillento con rojo grisáceo (182B) o con púrpura rojizo (59A) o con púrpura grisáceo (187AB), irregularmente distribuido

**Predominancia de lóbulos por lámina:** Predominantemente tripeltadas

**Color predominante de la superficie de los tubérculos:** Amarillo naranja (14C, 16B, 20AB), (22B, 23B), (24B).

**Color secundario de la superficie de los tubérculos:** Ausente

**Distribución del color secundario de la superficie de los tubérculos:** Ausente

**Color predominante de la pulpa de los tubérculos:** Naranja amarillento (15D), (22ABC)

**Color secundario de la pulpa de los tubérculos:** Ausente

**Distribución del color secundario de la pulpa de los tubérculos:** Ausente

**Forma de los tubérculos:** Cónico fusiforme

**Profundidad de ojos de los tubérculos:** Profundo

### 3.2.1.4 Composición química

La mashua tiene un elevado contenido de proteínas, ácido ascórbico (vitamina C), fibra, carbohidratos y calorías. Asimismo, contienen concentraciones de glucosinolatos aromáticos cuando son hidrolizados se convierten en isotiocianatos. Este componente actúa como diuréticas, antibióticas, insecticidas, anticancerígenas y nematocidas, lo que forma parte en la medicina tradicional andina (Manrique, *et al.*, 2013).

**Tabla 2.**  
Composición proximal de la mashua en 100 gramos de porción comestible

Componentes	Contenido (g/ 100 g de muestra húmeda) <sup>1</sup>	Contenido (g/ 100 g de muestra seca) <sup>2</sup>
Proteína (g)	0.70	9.17
Grasa total (g)	0.10	-
Agua (g)	88.0	-
Carbohidratos totales (g)	9.80	75.4
Extracto etéreo (g)	-	4.61
Fibra cruda (g)	0.90	5.86
Ceniza (g)	0.50	4.81
Hierro (mg)	0.37	4.2
Calcio (mg)	-	6.0
Zinc (mg)	0.28	
Fosforo (mg)	29.0	320
Vitamina C (mg)	42.06	-
Niacina (mg)	0.82	-
Riboflavina (mg)	0.03	-
Carotenos (ER)	-	73.56*
Ácido ascórbico (mg)	-	77.37*
Tiamina (mg)	0.02	-
Vitamina A (mg)	12	-
Retinol (µm)	12.0	-

Fuente: Basado en 1: (Reyes *et al.*, 2017) y 2: (Espin *et al.*, 2001).

\* Datos expresados en Base Seca, muestra entera

Adicionalmente, (Espin, *et al.*, 2001) reporta la composición química de mashua del Banco de Germoplasma del INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Ecuador).

**Tabla 3.**  
Rangos de variabilidad en la caracterización química de mashua Banco de Germoplasma del INIAP\*

Parámetro	Materia seca %	Energía Kcal/g	Proteína %	Almidon <sup>1</sup> %	Azúcares totales <sup>2</sup>	Azúcares reductores <sup>2</sup> %
Rango	7.20 - 19.70	4.19– 4.64	7.22 – 13.99	20.01 – 79.46	6.77 - 55.23	6.41 - 45.29
X	12.51	4.41	9.74	48.31	28.42	23.65
S	2.63	0.09	1.54	10.47	10.65	9.85
CV (%)	21.04	2.20	15.78	21.67	37.47	41.63

Fuente : (Espin, *et al.*, 2001)

\* Datos expresados en materia seca

1 muestra libre de azúcares y pigmentos

2 valores obtenidos de azúcares como % Glucosa



Así también (Travis, 1999) menciona que el tubérculo posee una textura arenosa con un elevado porcentaje de carbohidratos y agua. La mashua fresca contiene de 79 a 94 % de agua, indicado lo perecible que es. Según (Travis, 1999), afirma que la mashua seca puede tener desde 14% a 16% de proteína, en su mayoría 80 % de carbohidratos, alrededor de 9 µg/100g β-caroteno, y casi 480 mg de vitamina C/100g. Asimismo posee aminoácidos esenciales y altos niveles de ácido ascórbico.

### 3.2.1.5 Usos de la mashua

Desde tiempos muy antiguos este tubérculo forma parte de la medicina folclórica de los Andes. Según (Fries y Tapia, 2007), señala que para curar los síntomas urinarios y de próstata se consume en infusiones, en caso de reumatismo se desarrollan parches con mashua molida. También (Vásquez et al., 2012) indica que este tubérculo se consume para aliviar dolencias de riñón e hígado. Por otro lado (Manrique, *et al.*, 2013), resalta las propiedades terapéuticas de la mashua y empleo como medicina andina, es la presencia de isotiocianatos, conocida por sus propiedades antibióticas, insecticidas, nematocidas, diuréticas y anticancerígenas. Según (Nakamura y Miyoshi, 2006) menciona que los isotiocianatos incitan a la apoptosis o muerte celular en varias líneas de células cancerígenas. Por otro lado (Zhang y Talalay, 1998) indica que los isocianatos inhiben la proliferación de células cancerígenas, es decir, obstruyen la carcinogénesis química, por la inhibición de enzimas que participan en la activación de carcinógenos y activando a las enzimas que incrementan la inactivación de los carcinógenos.

### 3.2.1.6 Producción nacional de mashua

Los tubérculos de mashua, olluco y la oca son considerados como los cultivos andinos menores por la producción en cantidades pequeñas en comparación con la cosecha de papa, además el comercio suele ser de pequeña escala, y repercute solo a nivel local (Trivelli y Smith, 1997). La evolución de la producción a nivel nacional se muestra en la Tabla 4. Donde se observa que en los últimos años está disminuyendo la producción nacional, la superficie cosechada y aunque el rendimiento ha mejorado por los sistemas de cultivo, no es ajeno a la exclusión de consumo y siembra a nivel nacional.



**Tabla 4.**  
*Producción nacional de mashua de 2000-2016*

<b>Año</b>	<b>Producción Nacional (t)</b>	<b>Superficie cosechada (ha)</b>	<b>Rendimiento (kg/ha)</b>
2000 <sup>1</sup>	35459	6700	5293
2001 <sup>1</sup>	36089	6806	5302
2002 <sup>1</sup>	36394	6425	5664
2003 <sup>1</sup>	37088	6658	5571
2004 <sup>1</sup>	35484	6653	5334
2005 <sup>1</sup>	33585	6313	5320
2006 <sup>1</sup>	32151	5600	5741
2007 <sup>1</sup>	30444	5307	5737
2008 <sup>1</sup>	29003	5262	5511
2009 <sup>1</sup>	32913	5552	5929
2010 <sup>1</sup>	29196	5107	5717
2011 <sup>1</sup>	29103	5030	5786
2012 <sup>1</sup>	31413	5050	6221
2013 <sup>1</sup>	31113	4971	6259
2014 <sup>2</sup>	29287	4631	6324
2015 <sup>3</sup>	30252	4546	6655
2016 <sup>3</sup>	33098	4841	6837

Fuente: Basado en 1: (MINAG, 2012) 2: (INEI, 2015) , 3: (Sifuentes *et al.*, 2017)

### 3.2.2 Deshidratación de alimentos

Se precisa que la deshidratación es la acción de despojar a un cuerpo del agua que posee. En los alimentos, la deshidratación se conoce como la remoción de la humedad desde un producto alimenticio, (Alvarado, 2013). Según (Singh y Heldman, 1993) el método más antiguo para la conservación de alimentos, es la disminución de la humedad en alimentos. Cuando se reducen el contenido de agua hasta a niveles muy bajos existe la posibilidad de eliminar el deterioro biológico, y otro mecanismo de daño al producto.

La deshidratación es un fenómeno complejo en el que actúan varios mecanismos de transferencia de calor y materia de forma simultánea. En el desarrollo del proceso de secado en alimento, existe una fuente de calor o una transferencia de calor externa desde el ambiente a la superficie del alimento, la que ocurre por convección, conducción y/o radiación; después el calor se transfiere desde la superficie a la zona de evaporación, por conducción y/o radiación. En respuesta a esto, existe una transferencia de masa interna desde la zona de evaporación hasta la superficie del alimento por diferentes mecanismos, como difusión de vapor, difusión de líquido y capilaridad. Para culminar existe una transferencia de masa externa desde la superficie al ambiente, o un disipador de humedad, lo que ocurre generalmente por convección másica y por difusión, (Alvarado, 2013).



### 3.2.3 Deshidratación osmótica

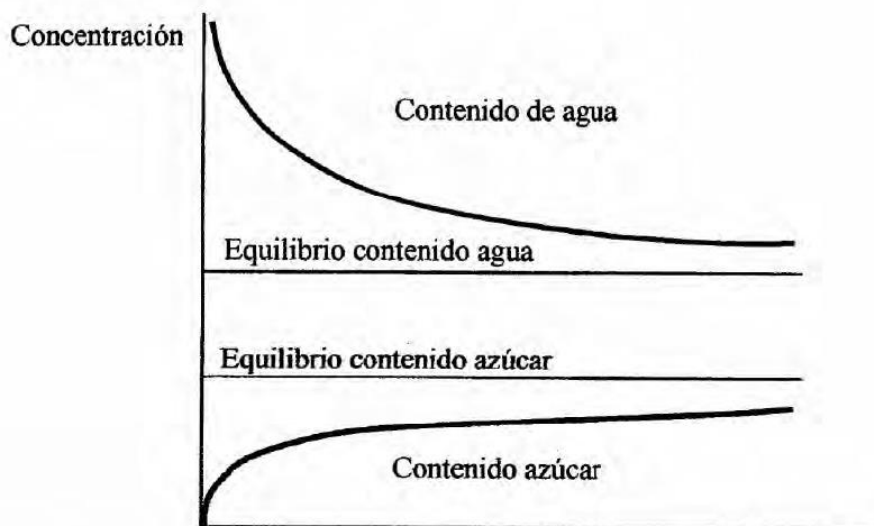
La deshidratación osmótica, según (Tepper, 1996) Menciona que es; “Una técnica que se fundamenta en introducir frutas o verduras, enteras o en trozos en soluciones osmóticas de azúcares o sales como NaCl y otros solutos que puedan de originar una presión osmótica alta”. Con respecto al método (Spiazzi y Mascheroni, 2001) menciona que es una operación de deshidratado osmótico donde incrementa el contenido de sólidos solubles y disminuye el contenido de humedad hasta un 50-60 % en base húmeda. En línea a esta afirmación (Torreggiani, 1993) menciona que en esta técnica existe principalmente dos flujos en contra corriente: la primera es que fluye agua del alimento a la solución y simultáneamente la transferencia de sólidos desde la solución hipertónica al alimento, esto se debe al gradiente de potencial químico del agua, del soluto y la membrana de la célula que permite el tejido parenquimático del alimento. Además (Lenart y Flink, 1984; Molano *et al.*, 1996), menciona que el mecanismo de deshidratación osmótica en las membranas de células vegetales, son semipermeables que permiten el movimiento del agua y del soluto, como resultado se genera la pérdida de agua por parte del producto. Al respecto (Barbosa y Vega, 1996), mencionado por (Sandoval, 2016) en la deshidratación osmótica sucede fuerza impulsora para la transferencia de materia puesto que existe una diferencia de potencial químico a través de la membrana semipermeable entre el producto y la solución osmótica, el potencial químico  $\mu_i$  está vinculado con la actividad de agua, este suceso se representa en la ecuación (1).

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_w \quad (1)$$

T; es la temperatura absoluta, R; la constante de los gases,  $\mu_i^0$ ; es el potencial químico de referencia

El mecanismo más frecuente en la transferencia de materia es la difusión se debe al gradiente de concentración que hay entre el alimento y la solución osmótica. La transferencia de materia se efectúa hasta que las actividades de agua de la solución hipotónica y alimento se equilibren (Barbosa y Vega, 1996) mencionado por (Sandoval, 2016).

En la Figura 3. Se observa la fluctuación en la deshidratación osmótica en frutas y/o vegetales donde se percibe una disminución de contenido de agua y un aumento del contenido de azúcares con el tiempo, en los dos casos tienden a un equilibrio en un determinado tiempo. Y se asume en el alimento, el contenido de agua y solutos está en función al tiempo.



**Figura 3.** Contenido de agua y azúcar durante la deshidratación osmótica.

Fuente: (Barbosa y Vega, 1996) mencionado por (Sandoval, 2016).

### 3.2.3.1 Ventajas y desventajas de la deshidratación osmótica

**Ventajas:** Según (Levi *et al.*, 1983) mencionada por (Leyva y Ruiz, 2014) considera las siguientes ventajas.

- El deterioro provocado en el color y sabor es reducido. Puesto que no sometido a elevadas temperaturas en lapsos de tiempos largos.
- La estructura de los alimentos se conserva mejor.
- El producto deshidratado es más dulce y blando, que obtenidos por otros métodos de secado. Esto se sustenta que al producirse la remoción de agua sale del alimento ácido junto con el agua.
- Comparando con secado por aire caliente o liofilización, la deshidratación osmótica es un proceso más rápido, esto se sustenta a que la exclusión del agua ocurre sin cambio de fase.
- Se evita la inclusión de aditivos químicos como sulfitos. La solución hipertónica de sacarosa alcanzada en la parte externa de la pieza y evita el oscurecimiento en muchos productos.
- La aplicación de un proceso de deshidratación por osmosis como un pre tratamiento a operaciones de desecado, genera la posibilidad de reducción del tiempo, por tanto, se reducen los costos de producción.

Además, (Raoult y Anne, 1994) la inclusión de solutos tiene un efecto protector sobre la estructura celular, dando la opción de que el alimento sea más resistente a tratamientos posteriores. Además, considera que la textura final aumenta considerable ya que las células no colapsan al perder agua.

**Desventajas :** Según (Sierra, 2010) considera las siguientes :

- En aquellos alimentos de estructura sólida, No se puede aplicar.
- Al culminar el proceso de ósmosis, el producto puede presentar pequeños residuos de la misma solución; esto se reduce con escurrido.
- Se obtendrá una ósmosis parcial, en algunos casos los alimentos son menos densos y que ocasionan flotación, al realizar una inmersión del alimento en el jarabe esta solución no circulará completamente sobre los trozos. Para este problema se coloca un contrapeso de forma que el alimento este siempre sumergido en la solución.
- Después del proceso la humedad final es bajo y es necesario agregar otras técnicas como congelamiento o secado.

### 3.2.3.2 Factores que afectan la deshidratación osmótica

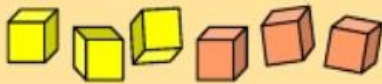
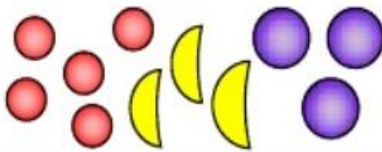






Existen factores internas y externas que fueron estudiadas en la deshidratación osmótica, en general todos estos factores influyen en la velocidad de la transferencia de masa.

#### A. Variables internas

##### A.1. Estructura y composición del fruto, y tamaño de las piezas

En el desarrollo de deshidratación osmótica en la transferencia de agua/soluto(s), existen factores muy importantes como la geometría del tejido y/o estructura, el estado de madurez, la variedad y la especie a deshidratar (Islam y Flink, 1982) mencionada por (Torres, 2007). También (Sharma *et al.*, 2003) menciona que afectan el desarrollo de deshidratación osmótica como; forma y tamaño de los alimentos, la relación entre protopectina y pectina soluble, la estructura de la membrana del alimento, compacidad del tejido, espacio intermolecular, etc. Por otra parte (Suca, 2008), menciona que si se pretende deshidratar alimentos enteros, no se lograría con el objetivo ni características deseadas, por eso es necesario reducirlos de tamaño. A mayor área superficial con respecto al volumen de la solución, mayor será el área de contacto con la solución; por consiguiente, mayor será la velocidad. Es importante que los alimentos a deshidratar sean de misma geometría y del mismo tamaño. Para geometrías en forma de láminas, Jara (2011) mencionado por (Bautista, 2018); afirma que la geometrías que brindan mayor área de contacto favorecen a la transferencia de masa. Igualmente, cuando el grosor de las rodajas pasa de 10 a 5 mm, se tiene pérdidas de masa 1, 3 veces mayores. Cuando se reduce el tamaño, es conveniente tomar otros factores como las características físicas del producto final, costo y operación.



Alimento	Geometría	Ejemplificación
Piña, melón, papaya	Cubos	
Bayas, frambuesas, fresas, moras, grosellas, ciruelas, duraznos, aguaymanto.	Enteras o mitades.	
Pera, manzana, kiwi, pomelo, mango, piña, papaya, plátano, carambola	Rodajas, cubos.	
Manzana, piña	Cubos, tiras.	
Cebollas, pimientos	Cubitos	
Patatas, camote	Rodajas, tiras, cubos	
Carnes rojas	Paquetes musculares, filetes	
Carnes de pescado	Tiras, filete	

**Figura 4.** Geometría de reducción de tamaño en alimento para deshidratación osmótica

Fuente: (Suca, 2008).

## B. Variables externas

### B.1. Tipo de agente osmótico

Según Marcotte (1988) mencionado por (Barbosa y Vega, 2000) que para elegir solutos para la solución osmótica, se fundamenta en los siguientes principios muy importantes; la masa molecular del mismo, costo del producto y las características sensoriales del producto que se desea conseguir. Según (Barbosa y Vega, 2000) menciona que los solutos más utilizados en la deshidratación osmóticos es la sacarosa, cloruro de sodio, glicerol, jarabe de maíz con alto contenido en fructosa y lactosa. En esta línea (Colina, 2010) sugiere que existe la posibilidad de combinar a

la solución osmótica otro soluto o compuesto con fines muy específicos, como los ácidos orgánicos, antioxidantes, agentes antimicrobianos, colorantes, etc. Con el objetivo incorporar estos compuestos necesarios para su formulación.

A si mimos (Biswal y Bozorgmehr, 1992) indica que la dimensión de la molécula de soluto va a implicar una mayor o menor facilidad para difundir en la estructura compleja del alimento. La sacarosa es el agente osmótico más utilizado en frutas o vegetales.

En la Tabla 5. Describe el tipo de agentes osmóticos y su empleo en alimentos, además algunas ventajas que estos agentes brindan en el producto.

**Tabla 5.**  
*Ventajas de agente osmótico*

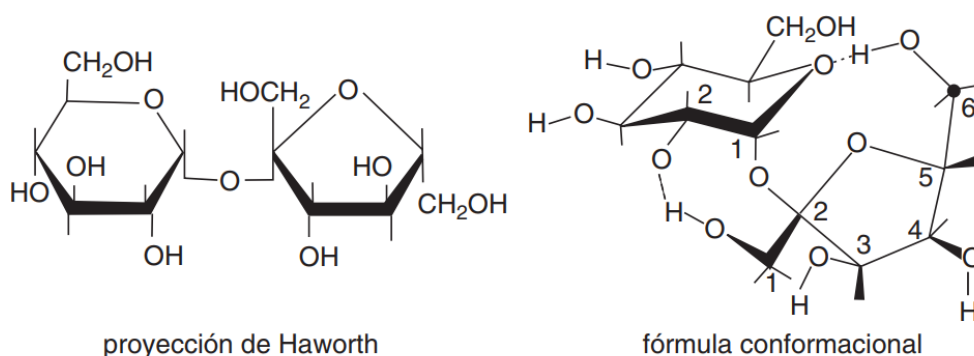
Nombre	Usos	Ventajas
<b>Cloruro de Sodio</b>	Vegetales y carnes	Mayor capacidad de depresión de la actividad de agua (aw)
<b>Sacarosa</b>	Frutas/vegetales	Disminuye el pardeamiento, aumenta la retención de sustancias volátiles.
<b>Lactosa</b>	Frutas	Sustitución parcial de sacarosa
<b>Glicerol</b>	Frutas/vegetales	Mejora la textura
<b>Combinación</b>	Frutas/vegetales y carnes	Características sensoriales ajustadas, combina la alta capacidad de disminución de la actividad de agua

Fuente: (Barbosa y Vega, 2000)

### **B.1.1. La sacarosa:**

Según (Wais, 2011). Define la sacarosa es un edulcorante natural que sustituye el 60-80% de los azúcares. Es utilizada en la industria por poseer la baja hidrofobicidad, estabilidad en el proceso, genera la caramelización, como preservador contra mohos por la presión osmótica que genera a altas concentraciones. Presenta un peso molecular de 342 g/mol. Así también (Badui, 2006) indica que la sacarosa está formada por una glucosa cuyo carbono aldehídico se une al cetónico de la fructosa, estableciendo un enlace glucosídico b(1,2) que impide que este disacárido sea reductor por carecer de grupos aldehído o cetona libres; además, no exhibe mutarrotación.





**Figura 5.** Estructura química de la sacarosa  
Fuente: (Badui, 2006).

Según (Keqing, 2004) mencionado por (Mestas y Quispe, 2016) indica que los solutos de bajo peso molecular, facilitan su penetración favoreciendo la ganancia de sólidos. En tanto la sacarosa presenta un peso molecular de 342.30 g/mol y la fórmula molecular es  $C_{12}H_{22}O_{11}$ .

### B.1.2. Efecto de la concentración de sacarosa

La sacarosa es un disacárido de fructosa y glucosa. Por su fácil accesibilidad, aceptable de sabor y aroma, reducción de pardeamiento enzimático y por aumentar la retención de volátiles, se usa principalmente como agente osmótico en las frutas y hortalizas, (Keqing, 2004). La sacarosa es uno de los agentes osmóticos más preferibles y es que evita la pérdida de sabores volátiles, un inhibidor eficaz de la polifenoloxidasas y la mayoría de las membranas celulares son impermeables a ella; su difusividad es mucho más bajo que la del agua, lo que resulta en una baja adquisición de sólidos en el tejido según (Sharma *et al*, 2003). Las concentraciones de sacarosa provocan mayor ganancia de sólidos y pérdida de agua que los jarabes de maíz, debido a la diferencia de pesos moleculares y la viscosidad de la solución osmótica, (Colina, 2010). Numerosos investigadores en este campo recomiendan que las concentraciones de la solución de sacarosa deban estar entre los 50-70 °Brix, (Ponting, 1966). Además, un incremento en la diferencia inicial de concentración entre el producto y la solución tiene un efecto importante en la pérdida de agua y más débil o casi nulo en la ganancia de solutos, de ahí una reducción de peso creciente con la concentración del soluto, (Islam y Flink, 1982). Afecta en gran medida a la velocidad del proceso, ya que define la fuerza impulsora para la transferencia de materia. Así mismo, la distinta viscosidad de la disolución y de la fase líquida del alimento que va aumentando con el tiempo del proceso, tiene un efecto importante en la velocidad de transporte, (Martínez, 1998).

## **B.2. Temperatura**

Según (Barbosa y Vega, 2000). Sostiene que un aumento de temperatura fomenta la penetración de sustancias osmóticas y expulsión de agua del tejido. Y se considera uno de los factores que influye en la deshidratación osmótica. La influencia de temperatura en la cinética osmótica depende del tipo de agente osmótico. Así también (Suca, 2008), indica que cuando se incrementa la temperatura, desciende la viscosidad de la solución osmótica originado que flujo con menos dificultad hacia interior de la tejido alimentario. Por consiguiente, la temperatura influye en la ganancia de sólidos en el alimento. Por otra parte según (Lerici *et al.*, 1977) menciona que las temperaturas de 20 y 40 °C son adecuadas y que brindan resultados óptimos, la razón es que preservan la calidad nutricional del alimento, no afectan la integridad de los tejidos y es de mayor rentabilidad económica. Aunque el efecto de temperatura no es uniforme en cualquier intervalo. Según (Suca, 2008). Menciona que la introducción de temperaturas mayores de 60 ° C provocar cambios que perjudican la integridad del tejido, pérdida de compuestos termolábiles y causar pardeamiento interno. Y temperaturas próximas a 60 ° C induce a una ligera degradación en el alimento, favoreciendo la incorporación de solutos en el tejido alimentario. Según (Biswal y Bozorgmehr, 1992) afirman que el empleo de elevadas concentraciones osmóticas y bajas temperaturas ayuda en la retención de nutriente y ácidos orgánicos. A esta última afirmación (Lazarides *et al.*, 1995). Menciona en la mayoría de los casos hay mínima ganancia de sólidos, por las razones de formación de capa externa de célula colapsada, que interviene como obstáculo impidiendo el flujo de componentes.

## **B.3. Tiempo de proceso**

Según (Colina, 2010), menciona que el proceso de difusión en la deshidratación osmótica se realiza en estado no estacionario, quiere decir que la concentración del soluto en cualquier punto del material cambia con respecto al tiempo hasta llegar al equilibrio. Por tanto, el tiempo es una variable importante que ayuda obtener la cantidad de agua removida y/o cantidad de sólidos ganados. Por otra parte (Cornejo, 2010) menciona que la opción del tiempo en el proceso se someterá de acuerdo a necesidades del producto final. Las elevadas concentraciones de agentes osmóticos y temperaturas disminuyen el tiempo de permanencia del producto en la solución. Sin embargo, los menores tiempos de deshidratación no son los más apropiados. Con respecto al tiempo de inmersión (Colina, 2010) indica que en las primeras horas de inmersión es notable la pérdida de agua, es preferible evaluar cada media hora.



El tiempo de inmersión en el proceso depende del peso constante del alimento algunos pueden durar de 3 a 7 horas. También (Suca, 2008) cita que los primeros minutos del proceso es mayor la pérdida de agua y ganancia de sólidos. A los 40 – 60 min la tasa de pérdida de agua es alta. Luego continúa una disminución progresiva, debido a la reducción progresiva de presión osmótica

#### **B.4. Relación alimento / solución**

Según (Jara, 2011), indica que la utilización relación fruta/solución ayuda a la perdida de agua y ganancia de sólidos en fruta-hortícola. Esta relación fruta/ solución generalmente se emplean de 1:3 a 1:5. Así también (Colina, 2010). Menciona que, si se usan grandes volúmenes de solución en razón con la masa de productos, sucede que el gradiente de concentración no baja, y la velocidad de transferencia de solutos no se ve perjudicado, esto podría afectar en el incremento de costos de producción

#### **B.5. Agitación**

Según (Suca, 2008), señala que en la deshidratación osmótica la escala de agitación de 80 a 120 rpm. Teniendo los cuidados necesarios como la velocidad de agitación o configuración de rodete no debe dañar la integridad del alimento.

#### **B.6. Presión del sistema**

Según (Colina, 2010), indica que en la mayoría de los casos en la deshidratación osmótica se desarrolla a presión atmosférica. En otros casos en la etapa inicial del proceso se emplean sistemas de alta presión (100-700 MPa) o vacío (50-180mbar) por un tiempo de 5-15 min y posteriormente restablecen la presión atmosférica, este procedimiento se realiza con el fin de aumentar la velocidad de acelerar el proceso y transferencia de masa.

#### **B.7. Pre tratamiento del producto**

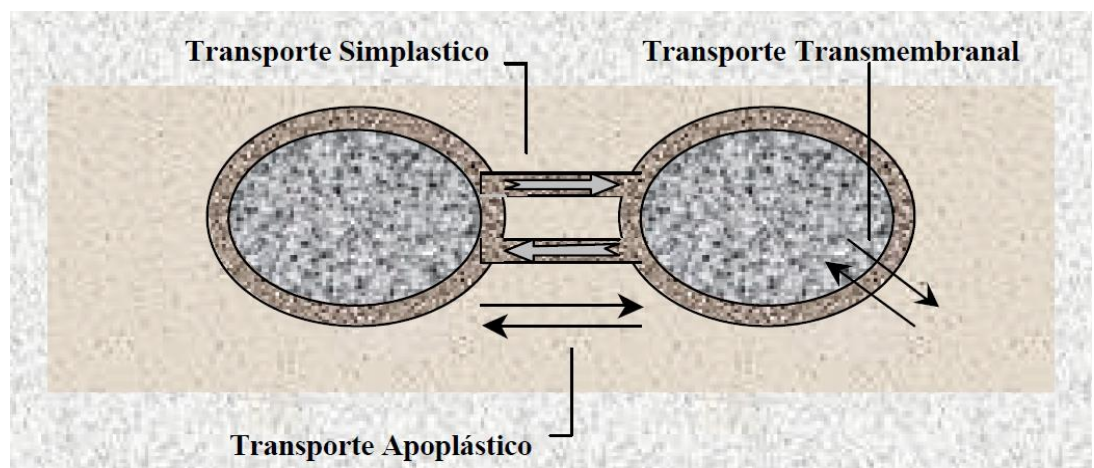
Como pre tratamiento antes de realizar proceso de deshidratación osmótica, (Lazarides *et al.*, 1999) indica que existe pre tratamientos como el escaldado, sulfatación, acidificación, la congelación que ayudan en la inserción de sólidos al interior de fruto. Estas disposiciones ayudan a acrecentar la difusividad del agua y del soluto al interior del producto. El pre tratamiento del alimento a deshidratar y las diferentes condiciones influyen la integridad del tejido natural y un efecto severo en la transferencia de masa.



### 3.2.3.3 Mecanismo de la osmodeshidratación

Existen tres tipos de mecanismos de transferencia de masa en el tejido vegetal cuando se procede a un tratamiento osmótico, (Maguer, 1987) mencionada por (Oquendo, 2007) describe estos mecanismos.

- El transporte transmembrana (TM), hay reciprocidad entre el protoplasma y el espacio libre que incluye el espacio intercelular y la pared celular.
- El transporte simplástico (SP), se desarrolla en el interior de la plasmalema por medio de delgados conductos (Plasmodesmos), se conoce por el movimiento de moléculas de una célula a otra.
- El transporte apoplástico (AP), se desarrolla en el exterior de la membrana celular y puede observar como una difusión de moléculas en la pared celular y los espacios intercelulares.



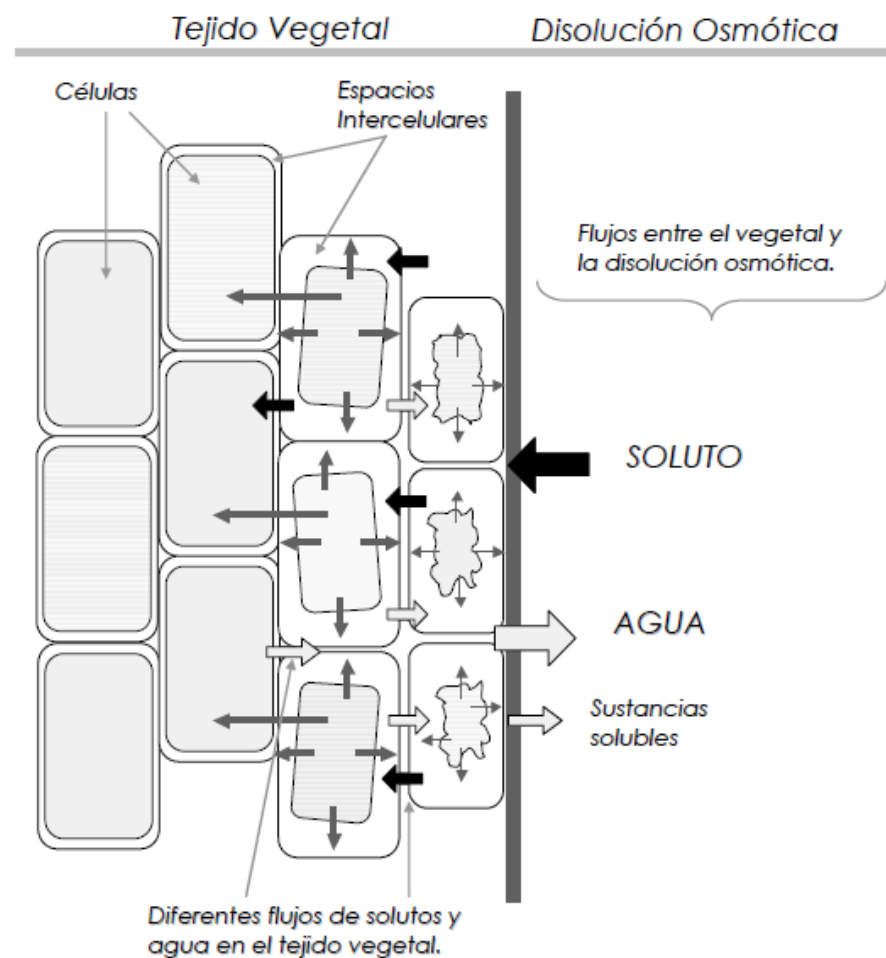
**Figura 6.** Mecanismos de transferencia de masa dentro de los tejidos celulares  
Fuente: (Maguer, Yao, 1995).

En el desarrollo de deshidratación osmótica, el soluto ingresa dentro del volumen extracelular. Por diferentes particularidades del soluto, este puede o no pasar a través de la membrana celular y acceder al volumen intracelular. El soluto genera una disparidad de potencial químico a través de la membrana celular, permitiendo salir agua del volumen intracelular al volumen extracelular. Seguidamente, el agua fluye del volumen intracelular a la solución osmótica por medio del espacio extracelular. Se resume que los solutos de la solución se trasladan hacia el interior del tejido y el agua del tejido brota hacia la solución, (Maguer M. y Yao M., 1995) mencionada por (Oquendo, 2007).

Según (Alzamora *et al.*, 1997) describe algunas alteraciones que se producen en la estructura celular cuando se realiza DO.

- El encogimiento del tejido.
- La incapacidad del protoplasma para recobrar su volumen original.
- La alteración de la pared celular.
- La pérdida de la funcionalidad de la membrana plasmática.
- El colapsamiento de la matriz porosa, etc.

Según (Fito, *et al.*, 1994, Chiralt y Fito, 2003) mencionada por (Oquendo, 2007), clasifica dos grupos de mecanismos que actúan en la DO. La primera esta asociada a los gradientes de concentración (pseudodifusionales) y que comprenden el transporte transmembrana y el difusional en los espacios no compartimentados, y el segundo mecanismo asociado a la presión, denominados mecanismos hidrodinámicos.



**Figura 7.** Esquemización del mecanismo de transporte en la deshidratación osmótica en tejido vegetal

Fuente:(Suca, 2008).

### 3.2.3.4 Cinética de la deshidratación osmótica

La cinética de deshidratación osmótica y los principales fenómenos macroscópicamente se describe generalmente por los siguientes términos: ganancia de sólidos, pérdida de peso y pérdida de agua, (Suca, 2008). Define (Giangiacomo *et al.*, 1987), a la pérdida de agua en la deshidratación osmótica como “la cantidad de agua que se difunde de la fruta hacia la solución osmótica” y la ganancia de sólidos se define como “la cantidad de soluto que se desplaza de la solución osmótica hacia la fruta menos la cantidad de sólidos de fruta que penetra a la solución, siendo estos sólidos despreciables”.

En el desarrollo de deshidratación osmótica la transferencia de masa es monitoreada por la variación en el tiempo de pérdida de agua, ganancia de sólidos y pérdida de peso (Della y Mascheroni, 2011; Wais, 2011), las ecuaciones se detallan a continuación:

#### a) Pérdida de peso (PP)

$$PP(\%) = \left( \frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

#### b) Pérdida de agua (PA):

$$PA(\%) = \left[ \left( 1 - \frac{ST_0}{100} \right) - \left( 1 - \frac{ST}{100} \right) \left( 1 - \frac{PP}{100} \right) \right] \times 100 \quad (3)$$

#### c) Ganancia de sólidos (GS):

$$GS(\%) = \left[ \left( 1 - \frac{PP}{100} \right) \times \frac{ST}{100} - \frac{ST_0}{100} \right] \times 100 \quad (4)$$

#### Donde:

*PP* (%): Porcentaje de pérdida de peso

*PA* (%): Porcentaje de pérdida de agua

*GS* (%): Porcentaje de ganancia de sólidos

*m<sub>i</sub>*: Masa inicial de la muestra fresca en (g)

*m<sub>f</sub>*: Masa final de la muestra deshidratada osmóticamente a tiempo *t* en (g)

*ST<sub>0</sub>*: Contenido de sólidos totales iniciales (°Brix)

*ST*: Contenido de sólidos totales (°Brix) para determinado tiempo, *t*

### 3.2.3.5 Difusión

El transporte molecular o difusión se define como el movimiento de moléculas individuales que se mueven de una manera predecible, tratando de eliminar diferencia de concentraciones y de producir una composición homogénea y



uniforme, (Geankoplis, 1998). Así mismo (Djelveh *et al.*, 1989) cita que los vegetales poseen estructuras heterogéneas, por esta razón tener un idea exacta del mecanismo de difusión es compleja. Al respecto (Loncin, 1980) mencionado por (Arenas y Samantha, 2015) afirma que los alimentos tienen un sistema celular de múltiples capas, por esta causa se admite que la difusión sea unidireccional, el cálculo se puede desarrollar experimentalmente la difusividad aparente o efectiva.

Es muy necesario determinar la difusividad de agua en los alimentos, el agua en estado de líquido o vapor está implicado en muchos procesos alimentarios, un claro ejemplo es el envasado y almacenado puede sufrir reacciones adversas. Hallar los parámetros de difusividad efectiva de sólidos es fundamental porque ayuda a cuantificar, controlar y analizar el desarrollo de transferencia de materia en el sector alimentario, un claro ejemplo es la absorción, secado, separación con membranas, extracción, etc. (Saravacos y Maroulis, 2001) mencionada por (Clemente, 2003).

### 3.2.3.5.1 Valores de Difusividad de agua y sólidos para algunos alimentos

Son escasos las estimaciones de difusividades efectivas en alimentos, generalmente son difíciles de compararlos con otros alimentos, debido a diferentes factores, (Saravacos y Maroulis, 2001), mencionada por (Clemente, 2003):

- Diferencia en la estructura de los alimentos.
- Diferencia entre los métodos de análisis de los resultados experimentales.
- Diferencia entre métodos de determinación empleados.
- Variación en la composición de los distintos alimentos.

**Tabla 6.**

*Valores de Difusividad efectiva para agua y sólidos en diferentes alimentos.*

Alimento	De,w (m <sup>2</sup> /s)	De,ss (m <sup>2</sup> /s)	T (°C)	Concentración	Referencia
Manzana	15 x10 <sup>-9</sup> a 60 x10 <sup>-9</sup>		30-50	50-70 ° Brix	Conway <i>et al.</i> ,1993 citado por Spiazzi y Mascheroni, 1997
Manzana	0.157 x10 <sup>-9</sup> a 1.046 x10 <sup>-9</sup>	0.172 x10 <sup>-9</sup> a 1.048 x10 <sup>-9</sup>	20-50	65 ° Brix	Salvatori <i>et al.</i> , 1999
Manzana	0.0332 x10 <sup>-9</sup> a 0.213 x10 <sup>-9</sup>	0.0385 x10 <sup>-9</sup> a 0.108 x10 <sup>-9</sup>	20-50	40-60 ° Brix	Kaymak <i>et al.</i> , 2000
Papaya	0.314 x10 <sup>-9</sup> a 0.655 x10 <sup>-9</sup>	0.107 x10 <sup>-9</sup> 0.933 x10 <sup>-9</sup>	30-50	50-70 ° Brix	Rodríguez <i>et al.</i> , 2003
Papaya	1.3 x10 <sup>-9</sup>	3.47 x10 <sup>-9</sup>	25	Saturado	Mendoza <i>et al.</i> , 2002

Pera	$0.347 \times 10^{-9}$ a $1.92 \times 10^{-9}$	$0.199 \times 10^{-9}$ $3.6 \times 10^{-9}$	40-60	40-70 ° Brix	Park <i>et al.</i> , 2002
Piña	$1.72 \times 10^{-9}$	$0.2 \times 10^{-9}$ a $0.46 \times 10^{-9}$	50-70	50-70 ° Brix	Waliszewski <i>et al.</i> , 2002
Piña	$1.48 \times 10^{-9}$ a $3.24 \times 10^{-9}$	$0.53 \times 10^{-9}$ a $1.54 \times 10^{-9}$	30-50	40-70 ° Brix	Rastogi <i>et al.</i> , 2004
Piña	$0.6 \times 10^{-9}$ a $2.5 \times 10^{-9}$		30-50	50-70 ° Brix	Beristain <i>et al.</i> , 1990 citado por Spiazzi y Mascheroni, 1997
Banano	$0.85 \times 10^{-9}$ a $2.43 \times 10^{-9}$		25-42	40-70 ° Brix	Rastogi <i>et al.</i> 1997 a
Mango	$0.018 \times 10^{-9}$ a $0.077 \times 10^{-9}$		30	35-65 ° Brix	Giraldo <i>et al.</i> , 2003
Pepinillo	$5.00 \times 10^{-10}$ a $11.00 \times 10^{-10}$		35	NaCl 25 %	Parkjoko <i>et al.</i> , 2000
Zanahoria	$3.00 \times 10^{-09}$		40	NaCl 20%	Schwartz <i>et al.</i> , 1993- 1999
Espárrago* verde	$2.64 \times 10^{-10}$ a $7.74136 \times 10^{-11}$	$1.23 \times 10^{-10}$ a $4.06252 \times 10^{-11}$	38	NaCl 30%	Torres, David, <i>et al.</i> , 2013
Oca*	$3.75 \times 10^{-11}$ a $1.13 \times 10^{-10}$		15 y 30	40 y 50 °Brix	Alleca, 2017
Aguaymanto*	$3.54 \times 10^{-9}$		60	70° Brix (fructuosa)	Bazalar, 2007
Pepino dulce*		$0.94 \times 10^{-6}$ a $2.52 \times 10^{-6}$	30, 40 y 50	40°, 50° y 60°Brix (sacarosa)	Leyva y Ruiz, 2014
Cocona*	$6.0195 \times 10^{-9}$		Temperatura ambiente.	60.°Brix	Vazquez, 2007

Fuente: (Torres *et al.*, 2013), \* Datos **incluidos**

### 3.2.3.5.2 Modelo utilizado para Difusividad efectiva de agua y sólidos

En la deshidratación osmótica, el modelado resulta complicado debido a la existencia de dos flujos simultáneos y contracorrientes de soluto y solvente en parámetros distantes al equilibrio, a su vez producto deshidratado se deforma y encoje en el proceso (Gamboa y Silva, 2018).

El porcentaje de pérdida de agua, pérdida de peso y ganancia de sólidos con otras variables, son los modelos más usados para describir un proceso en la deshidratación osmótica. No obstante, estos modelos no se pueden extrapolar por el mismo hecho de distintos parámetros experimentales que conlleva. Existe el modelo fenomenológico que se fundamenta en la



segunda ley de Fick que si permite calcular la difusividad efectiva en un proceso, en estado no estacionario.(Gamboa y Silva, 2018). Asimismo (Parjoko *et al.*, 1996), mencionado por, (Della y Mascheroni, 2011) cita que el modelo segunda Ley de Fick se usa para diferentes geometrías conocidas, condiciones iniciales, condiciones de limite descritas por Crank. Se calcula la difusividad efectiva del agua y del soluto, desarrollando las ecuaciones numéricas o analíticas.

### 3.2.3.5.3 Modelo de Crank

En la deshidratación osmótica a presión atmosférica se emplea el modelo Crank, que describe el mecanismo difusional, este modelo es la solución de la segunda ley de Fick. A este proceso se le conoce como modelo fenomenológico (Della y Mascheroni, 2011).

La segunda ley de Fick para la difusión unidireccional en estado no estacionario, para placas planas o rebanadas longitud infinita está dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5)$$

Donde:

$C$ : Concentración

$t$ : tiempo

$D_{ef}$ : Difusividad efectivo

$x$ : distancia desde el centro de la placa (dimensión en la que se produce la difusión)

Para las siguientes suposiciones y condiciones límites:

$$C = C_0 \text{ a } t = 0 \quad -L < x < +L$$

Donde  $L$  es el semi-espesor de la placa y  $C_0$  es la concentración inicial

$$C = C_1 \text{ a } t > 0 \text{ x } = \pm L$$

Donde  $C_1$ : la concentración en el seno del fluido.

La resolución de la ecuación (5) para la difusión del agua y solutos se puntualizan a continuación según (Crank, 1964) mencionada por, (Della y Mascheroni, 2011).

**Difusión del agua**

$$\frac{H_t - H_e}{H_0 - H_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n + 1)^2} \exp \left\{ -D_{e,w} (2n + 1)^2 \frac{\pi^2}{4L^2} t \right\} \quad (6)$$

**Difusión de sólidos o solutos**

$$\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n + 1)^2} \exp \left\{ -D_{e,ss} (2n + 1)^2 \frac{\pi^2}{4L^2} t \right\} \quad (7)$$

Donde:

*H*: humedad del producto

*S*: concentración de sólidos solubles en el producto

*D<sub>e,w</sub>*: Difusividad efectiva de agua

*D<sub>e,ss</sub>*: Difusividad efectiva de solidos

*n* : es el número de término de la serie.

Los subíndices *0*, *t* y *e* describen las condiciones iniciales, a cualquier tiempo *t* y al equilibrio, respectivamente.

Considerando que el espesor es pequeño comparado con la longitud de la rebanada y que el tiempo de secado es largo, se puede aproximar mediante el primer término de la serie y aplicando propiedades de logaritmo se obtiene la siguiente ecuación, que ayudará a determinar la difusividad efectiva de agua y sólidos, (Clemente, 2003; Martinez, 2012; Vega *et al.*, 2007). Presentan las siguientes fórmulas e incluyen en sus trabajos de investigación:

- Difusividad efectiva de agua (*D<sub>e,w</sub>*)

$$\frac{H_t - H_e}{H_0 - H_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left( -\frac{D_{e,w} \pi^2}{4L^2} t \right) \quad (8)$$

Aplicando propiedades de logaritmos a la ecuación (8), se obtiene la ecuación (9) donde al graficar  $\ln \left( \frac{H_t - H_e}{H_0 - H_e} \right)$  en función del tiempo se tiene un comportamiento lineal de forma:

$$\ln \left( \frac{H_t - H_e}{H_0 - H_e} \right) = \underbrace{\ln \frac{8}{\pi^2}}_A - \underbrace{\frac{D_{e,w} \pi^2}{4L^2}}_B * t \quad (9)$$



$$B = \text{Pendiente} = \frac{D_{e,w}\pi^2}{4\left(\frac{L}{2}\right)^2}$$

$$A = \text{Coeficiente lineal} = \frac{8}{\pi}$$

- Difusividad efectiva de solidos ( $D_{e,ss}$ )

$$\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{D_{e,ss}\pi^2}{4L^2} t\right) \quad (10)$$

Aplicando propiedades de logaritmos a la ecuación (10), se obtiene la ecuación (11) donde al graficar  $\ln\left(\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e}\right)$  en función del tiempo se tiene un comportamiento lineal de forma:

$$\ln\left(\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e}\right) = \underbrace{\ln\frac{8}{\pi}}_A - \underbrace{\frac{D_{e,ss}\pi^2}{4L^2}}_B * t \quad (11)$$

$$B = \text{Pendiente} = \frac{D_{e,ss}\pi^2}{4\left(\frac{L}{2}\right)^2}$$

$$A = \text{Coeficiente lineal} = \frac{8}{\pi}$$

Donde:

$H_t$  = Contenido de humedad (kg de agua/kg de solido seco, base seca).

$H_e$  = Contenido de humedad de equilibrio (kg de agua/kg de solido seco, base seca).

$H_0$  = Contenido de humedad inicial (kg de agua/ kg de solido seco, base seca).

$S_t$  = Concentración de sólidos solubles (°Brix) del alimento a un tiempo.

$S_e$  = Concentración de sólidos solubles en el jarabe (°Brix).

$S_0$  = Concentración de sólidos solubles iniciales en el alimento en el jarabe (°Brix) a un  $t = 0$

$D_{e,w}$  = Difusividad efectiva de agua, ( $m^2/s$ ).

$D_{e,ss}$  = Difusividad efectiva de soluto que ingresa al sólido, ( $m^2/s$ ).

$t$  = tiempo (s)

$L$  = la mitad del espesor del producto a deshidratar (m).

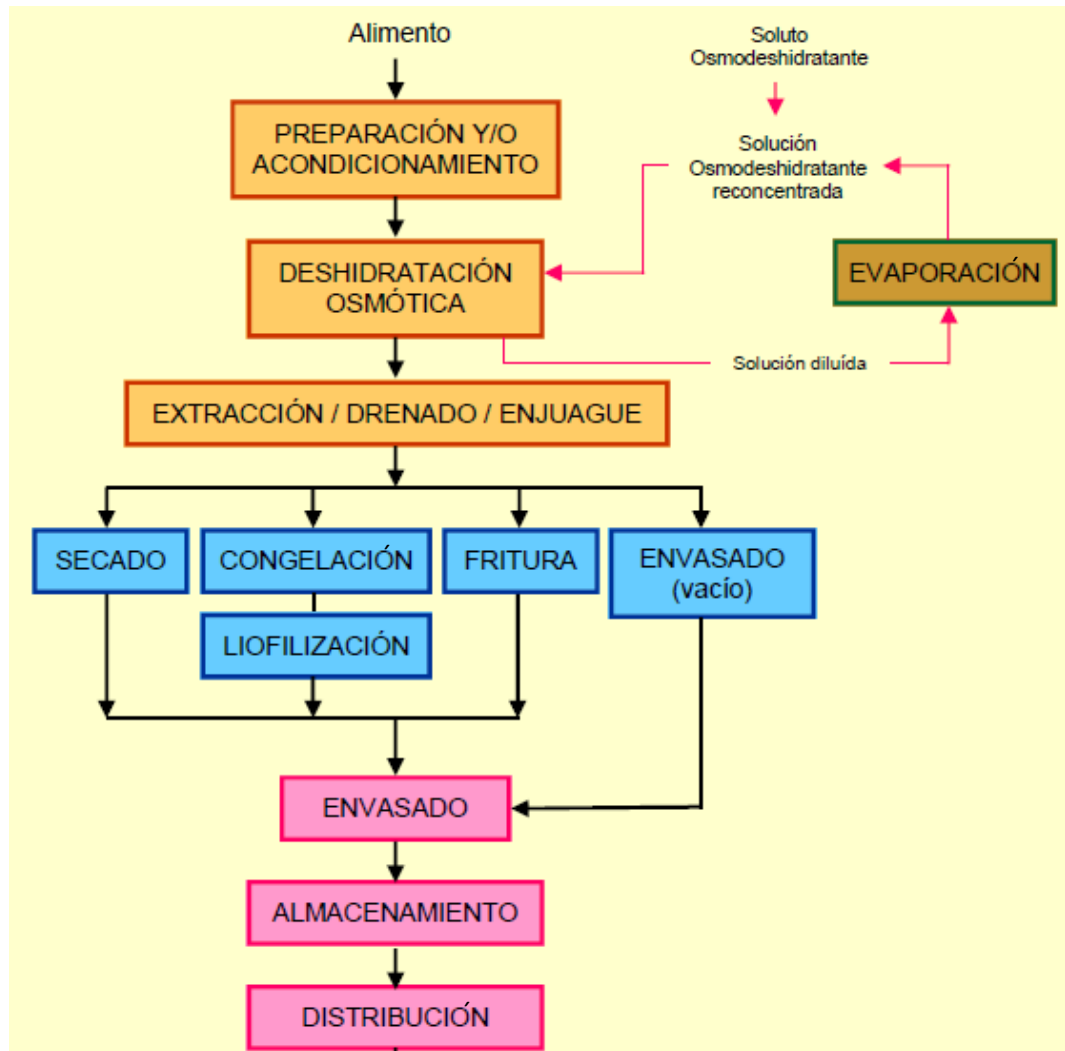
Este modelo de difusión de Fick, implica grandes limitaciones para propósitos prácticos, (Parjoko *et al.*, 1996).

- Se asume el mecanismo de difusión para la extracción de agua.
- Se asume un cuerpo semi-infinito por lo tanto la transferencia de masa es unidireccional.
- Se desestima el encogimiento debido a la transferencia de masa.
- Se asume que el agente osmótico es un medio semi-infinito, por lo tanto, se requiere una relación disolución/alimento muy grande.
- Se determina experimentalmente el punto de equilibrio
- Se desestima la resistencia externa a la transferencia de masa, pero esto no se puede lograr a baja temperatura ni a alta concentración de soluto.
- Aunque tiene en cuenta la forma y las dimensiones, sólo hay soluciones analíticas para láminas planas, cilindros, cubos y esferas, entonces se requieren técnicas numéricas para materiales irregulares y,
- No hay efecto de los sólidos ganados ni de los solutos perdidos sobre la pérdida de agua.

### 3.2.3.6 Post tratamiento a la osmosis

La deshidratación osmótica por sí solo no otorga estabilidad al producto deshidratado. En consecuencia, el alimento es susceptible al ataque de microorganismos y reacciones enzimáticas; pese a haberse disminuido su actividad de agua. Los principales procesos pos tratamientos que acompañan a la deshidratación osmótica son el secado, congelación, liofilización, fritura y envasado al vacío en la figura 8. Describe el flujograma general del proceso osmótico (Suca, 2008).





**Figura 8.** Diagrama de flujo general de un proceso de deshidratación osmótica de alimentos.

Fuente: (Suca, 2008).

El alimento puede ser envasado después de terminar el proceso de deshidratación osmótica, sin requerir ningún proceso previo de deshidratación. Esto quiere decir que puede ser envasado al vacío, en atmósferas modificadas o controladas, o usando algunos gases o mezclas de estos. En este caso, los productos obtenidos se denominarían como alimentos de humedad intermedia. Se denomina de esta forma a aquellos alimentos que tienen una humedad en un rango de 10-50% y una actividad de agua en 0.6-0.9. este rango de actividad de agua les permite a los productos deshidratados por deshidratación osmótica ser lo suficientemente estables en almacenamiento (Suca, 2008).

### 3.2.4 La metodología de superficie de respuesta

Cuando se pretende optimizar la respuesta y las variables de respuestas reciben influencias de diversas variables, se aplica la metodología de superficie respuesta, que consiste en una serie de métodos estadísticas y matemáticas eficaces en el modelo (Montgomery, 2002). Cuando se propone alcanzar una región óptima de la superficie investigada, tiene dos fases, el modelamiento y desplazamiento. El modelado, se realiza adaptando a modelos lineales, cuadráticos o cúbicos. El desplazamiento se realiza generalmente a lo largo del camino de máxima inclinación de un determinado modelo que es una trayectoria en la cual la respuesta varía de forma más pronunciada, (Lopez, 2015).

Suponiendo el valor esperado,  $\eta$ , de la variable respuesta está en función de las  $k$  variables  $x_1, x_2, \dots, \dots, x_k$ , esto es existe alguna función de  $x_1, x_2, \dots, \dots, x_k$ , que proporciona el correspondiente valor de para alguna combinación dada de niveles de la variables explicativas, (Lopez, 2015).

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, \dots, x_k) \quad (12)$$

De tal forma que a variable respuesta puede expresarse como:

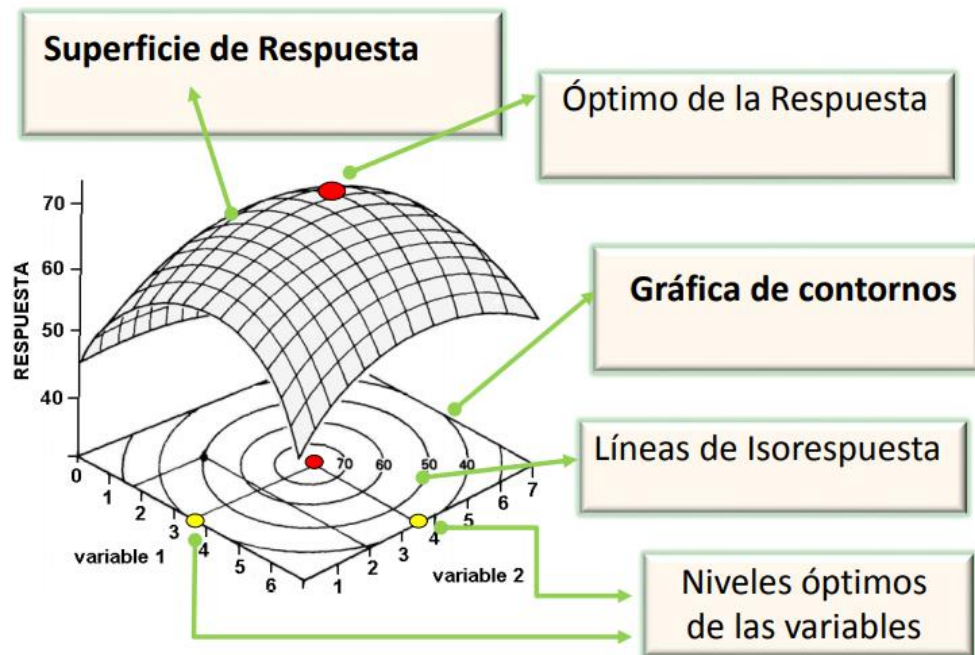
$$Y = \eta + \varepsilon = f(x_1, x_2, \dots, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (13)$$

Donde  $\varepsilon$  es el error observado de la respuesta

La relación  $f(x_1, x_2, \dots, \dots, x_k)$  entre y los niveles de las  $k$  variables puede representarse a través de una hipersuperficie a la que llamaremos superficie de respuesta, (Lopez, 2015).

#### 3.2.4.1 Curvas de nivel

Es un método que se emplea como apoyo para visualizar la gráfica de superficie de respuesta tridimensional y consta en representar la gráfica de curvas de nivel de la superficie, donde se trazan las líneas de contorno, estas son curvas que pertenecen a valores constantes de la respuesta sobre el plano bidimensional en  $(x_1; x_2)$ . Estas graficas de contornos son muy útiles para estudiar los niveles de los factores en los que se da un cambio en la forma, (Lopez, 2015).



**Figura 9.** Gráfico de método de superficie respuesta  
Fuente: (De Zan *et al.*, 2016).

### 3.2.4.2 Modelos para ajustar superficie de respuesta

Las superficies de respuestas se singularizan acomodando un modelo a los datos experimentales. Estos modelos son básicamente polinomios los que se usan en la MRS. Así, si se tienen  $k$  factores el modelo de primer orden está dado por:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (14)$$

En el modelo de primer orden no existe curvatura, cuando hay presencia de curvatura en la superficie es necesario utilizar un modelo que ajuste mejor. Se generaliza a un modelo de segundo orden con  $k$  factores,  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , y el modelo de segundo orden es:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1; i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (15)$$

El modelo ajustado es de segundo orden es:

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1; i < j}^k \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \quad (16)$$

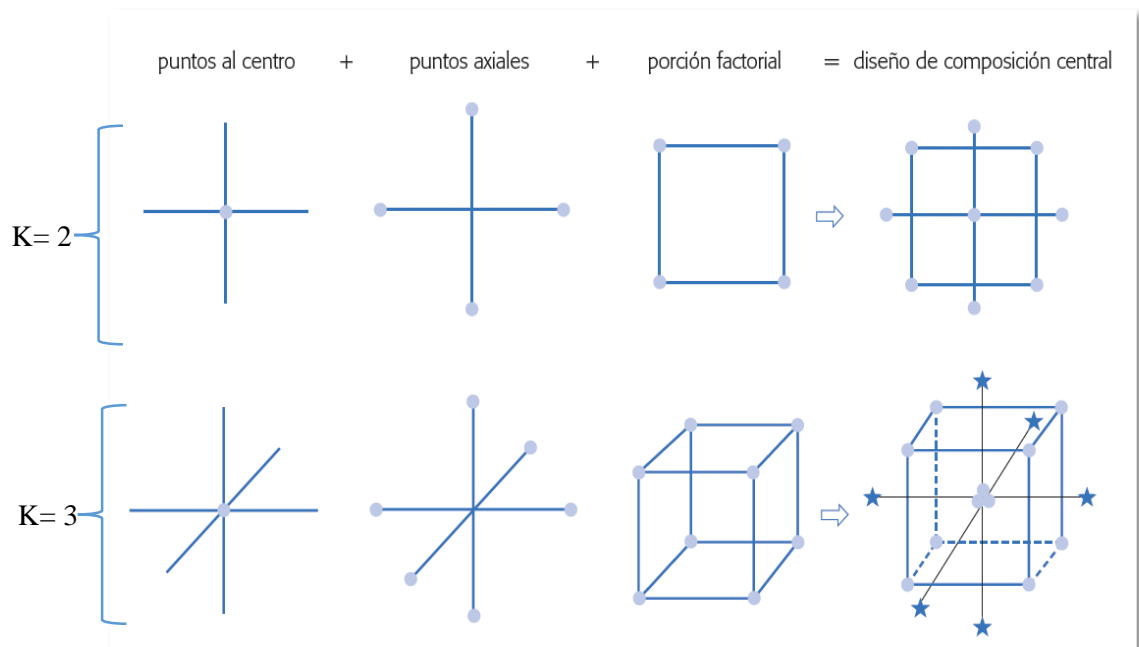
Donde  $\beta_0$  es el corte de la superficie con el eje  $Y$  en el origen;  $\beta_i$  representa el efecto principal  $i$  individual del factor  $x_i$ ;  $\beta_{ij}$  mide el efecto de interacción  $x_i x_j$  y  $\varepsilon$  representa el error experimental (aleatorio). Los parámetros  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  se estiman a partir de los datos. Por ejemplo, en el caso de un diseño factorial  $2^k$  los parámetros (con

excepción de  $\beta_{ii}$ ) se estiman a partir de los efectos, solo dividiéndolos entre 2 para expresarlos en una escala unitaria; el estimador de  $\beta_0$  es la medida global de los datos. En general se puede aplicar, el modelo de mínimos cuadrados para estimar los parámetros del modelo para cualquier diseño, (Gutierrez y De la Vara, 2012).

### 3.2.4.3 Diseño de composición central rotacional

En la optimización de procesos, uno de los diseños experimentales más utilizados, es el diseño factorial  $2^k$  con elementos adicionales lo que hace más eficiente, (Montgomery, 2002). Este hecho también (Gutierrez y De la Vara, 2012) justifica que el diseño de composición central (DCC) es más empleado en la etapa de búsqueda de segundo orden adecuado a su gran flexibilidad: se puede construir a partir de un diseño factorial completo  $2^k$  agregando puntos al centro y sobre los ejes. Este diseño tiene una composición de tres tipos de puntos:

1. Una réplica de un diseño factorial en dos niveles, completo o fraccionado. A esta parte del DCC se le llama porción factorial.
2.  $n_0$  puntos o repeticiones al centro del diseño, con  $n_0 \geq 1$ .
3. Dos puntos sobre cada eje a una distancia  $\alpha$  del origen. Estos puntos se llaman porción axial. La manera en que se ensamblan y el DCC resultante se muestra en figura 10, para los casos de dos y tres factores.



**Figura 10.** Representación y construcción de los DCC para  $k=3$  y  $k=2$  factores

Fuente: (Gutierrez y De la Vara, 2012)

Con  $K$  factores las unidades experimentales experimentales  $N= 2^k + 2k + n_0$ . El número de corridas al centro y la distancia de los puntos axiales ( $\alpha$ ) deben adecuarse

de manera idóneo, dependerá de las propiedades que se quieran en el DCC. Cuando se desea que el diseño sea rotatable se obtiene  $\alpha$  igual a:

$$\alpha = (F)^{1/4} \quad (17)$$

El propósito de la MSR es la optimización, y la localización del óptimo se ignora antes del experimento, por lo tanto la aplicación de la rotabilidad es que proporciona una precisión de estimación igual en todas las direcciones, (Montgomery, 2002).

Según (Ozdemir *et al.*, 2008), el mejor proceso debe ajustar el flujo de tareas, entradas y salidas de manera que entregue la mejor calidad al menor costo y en el menor tiempo. La optimización es el procedimiento de elegir, a partir de un conjunto de alternativas posibles, aquella que mejor satisfaga a las metas propuestas.



### 3.3 Marco conceptual

**°Brix:** Forma de representar la densidad y concentración de solución de sacarosa. El grado brix representa el porcentaje en peso de azúcar en una disolución de agua y azúcar (jarabe), a 20 °C. Cada grado brix corresponde a 1 g de sacarosa de 100 g de jarabe. En el caso de productos que contienen sólidos solubles como mermeladas, néctares, concentrados de tomates de tomate, etc. El ° brix representan el porcentaje de sólidos totales. El °brix se miden mediante el refractómetro o mediante el pesajarabe o aerómetro en grados brix.

**Deshidratación:** Es un procedimiento mediante el cual se elimina agua, de este modo disminuye la actividad de agua a niveles que no promueva el crecimiento microbiano o reacciones degradativas.

**Deshidratación Osmótica:** Es un método isotérmico de remoción parcial de agua por inmersión del alimento en soluciones o jarabes concentrados de sólidos solubles, sin cambio de fase ni consumo intensivo de energía.

**Difusividad efectiva:** Es el valor que representa la facilidad con que cada soluto en particular en un disolvente determinado, es una propiedad de transferencia de masa expresada en (m<sup>2</sup>/s). La difusión es un proceso físico irreversible, en el que las partículas materiales se sumergen en un medio que inicialmente estaba ausente, incrementando la entropía del sistema conjunto formado por las partículas difundidas o solutos y el medio donde se difunden o disolvente.

**Metodología de la superficie de respuesta:** es una estrategia de análisis y modelación, sirven para una selección de factores que afectan en la variable de respuesta y continuando con la optimización del proceso.

**Sacarosa:** Son cristales de sabor dulce de fórmula C<sub>12</sub> H<sub>22</sub> O<sub>11</sub>, peso molecular 342, 30 g/mol estos sólidos se funden a 185°C, la solubilidad en alcohol es pequeña. En 100 g de agua a temperatura ambiente, se disuelve 204 g de sacarosa. La solución saturada de sacarosa a temperatura ambiente contiene 67,1 g de sacarosa por 100 g de solución. La sacarosa es un disacárido no reductor formado por la (levulosa), se le conoce comúnmente como azúcar y es usado como edulcorante natural; se obtiene de la caña de azúcar o de la remolacha.

**Soluto:** Normalmente es el componente de una solución que se encuentra en menor cantidad. Es la sustancia disuelta en un disolvente para formar una solución

**Solvente:** Es una sustancia en la que se diluye un soluto, como consecuencia forma una disolución, frecuentemente el solvente es la que se encuentra en mayor cantidad en la disolución.

**Ósmosis:** Movimiento neto de disolvente por medio de una membrana semipermeable, sin gasto de energía.



## CAPÍTULO IV METODOLOGÍA

### 4.1 Tipo y nivel de investigación

El presente trabajo se enfocó en un tipo de investigaciones experimental, puesto que se manipuló las variables independientes (concentración de sacarosa, temperatura y tiempo de inmersión), y como respuesta se obtuvo las variables dependientes (pérdida de peso, pérdida de agua y ganancia de sólidos), en el proceso de deshidratación osmótica en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*). El presente estudio por su naturaleza del problema pertenece a un nivel de investigación explicativo por lo que su interés se centra en explicar un fenómeno y en qué condiciones se da este fenómeno.

### 4.2 Diseño de investigación

Para la siguiente investigación se consideró el Diseño de Composición Central Rotacional (DCCR), este fue construido a partir de un diseño factorial  $2^k$ , para 3 factores de estudio ( $k = 3$ ), más 6 puntos axiales (estrella) en los ejes coordenadas (a una distancia de  $\alpha$ ) y 4 repeticiones en el punto central, resultando 18 tratamientos experimentales.

Para conseguir el entorno experimental más acotado se delinearón los puntos axiales  $+\alpha$  y  $-\alpha$ , este valor depende del número factorial ( $F=2^k$ ), donde  $K$  es el número de variables independientes ( $K=3$ ), los valores  $+\alpha$  y  $-\alpha$  son definidos en la Ecuación 18, que garantiza un diseño central compuesto rotatable (Montgomery, 2002) y (Gutierrez y De la Vara, 2012).

$$\pm \alpha = (f)^{1/4} = (2^k)^{1/4} = (2^3)^{1/4} = 1.682 \quad (18)$$

El número de tratamientos fue calculado usando la ecuación 19, para un DCCR, determinando el número de unidades experimentales con base en el número de repeticiones y combinaciones a evaluar. En la Tabla 7, se resume la descripción de diseño experimental y el total de tratamientos realizar en el presente proyecto de investigación.

$$N = 2^K + 2K + m \quad (19)$$

Donde:

$K = (3 \text{ variables})$

$2 = \text{nivel de estudio (superior e inferior)}$

$2^k = \text{Número de puntos factoriales}$



$2^k$  = Número de puntos axiales

$m$  = Número de réplicas del punto central.

**Tabla 7.**  
*Descripción de diseño experimental*

Expresión		Cantidad de puntos
$2^k = 2^3$	8	Factoriales
$2k = 2 \cdot 3$	6	Puntos axiales
M	4	Puntos centrales
	18	Unidad experimental

Los niveles de las variables independientes en términos codificadas y naturales se detallada como la composición de todos los niveles; factoriales, axiales ( $\alpha = 1.682$ ) y puntos centrales (Tabla 8). La inclusión de los niveles altos y bajos de las variables independientes se estableció de acuerdo en investigaciones realizadas por los autores (Allcca, 2017; Naranjo, 2015; Sandoval, 2016; Silva, *et al.*, 2014) estableciendo lo siguiente:  $X_1$  = Concentración de sacarosa (40-60),  $X_2$  = Temperatura (30-50) y  $X_3$  = Tiempo (60-180).

**Tabla 8.**  
*Coordenadas del Diseño de Composición Central Rotacional (DCCR) para tres factores*

Variable	Unidad	Símbolo		Niveles				
				$-\alpha$	Bajo	Medio	Alto	$+\alpha$
		Codificada	Natural	-1.68	-1	0	+1	+1.68
Concentración de sacarosa	°Brix	$x_1$	$X_1$	33.2	40	50	60	66.8
Temperatura	°C	$x_2$	$X_2$	23.2	30	40	50	56.8
Tiempo	Min	$x_3$	$X_3$	19.1	60	120	180	220.9

Los niveles axiales de las variables independientes se determinan de acuerdo a la ecuación 20.

$$X_i = \frac{J - a}{b} \quad (20)$$

Donde:

$X_i$  = ( $i=1, 2, \dots, k$  factores) toma valores adimensionales de -1, +1

J = Es el valor de la variable natural o factor en estudio

a = Es el valor natural del punto medio entre el valor bajo (-1) y el valor alto (+1)

b = Es el valor de la diferencia entre el valor alto (+1) o el valor bajo (-1) y el valor medio

Utilizando el software STATGRAPHICS Centurión XVI.II, se creó un diseño de experimentos en diseño de superficie de respuesta, para 3 factores experimentales y 3 variables de respuesta, diseño

de base: Composición Central 2<sup>3</sup> más 6 puntos estrella, características de diseño: rotable, puntos centrales: 4, sin aleatorias, haciendo un total de 18 tratamientos, los detalles en la Tabla 9.

**Tabla 9.**  
*Detalle de los tratamientos con los valores codificada y natural.*

Tratamiento	Variables Codificadas			Variables naturales (independiente)			Variable de respuesta		
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub> %PP	Y <sub>2</sub> %PA	Y <sub>3</sub> %GS
T1	-1	-1	-1	40	30	60			
T2	1	-1	-1	60	30	60			
T3	-1	1	-1	40	50	60			
T4	1	1	-1	60	50	60			
T5	-1	-1	1	40	30	180			
T6	1	-1	1	60	30	180			
T7	-1	1	1	40	50	180			
T8	1	1	1	60	50	180			
T9	-1.681	0	0	33.2	40	120			
T10	1.681	0	0	66.8	40	120			
T11	0	-1.681	0	50	23.2	120			
T12	0	1.681	0	50	56.8	120			
T13	0	0	-1.681	50	40	19.1			
T14	0	0	1.681	50	40	220.9			
T15	0	0	0	50	40	120			
T16	0	0	0	50	40	120			
T17	0	0	0	50	40	120			
T18	0	0	0	50	40	120			

**Leyenda:**

- T: Tratamientos o puntos de estudio
- x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub>: variables codificadas
- X<sub>1</sub>: Concentración de sacarosa (°Brix)
- X<sub>2</sub>: Temperatura (°C)
- X<sub>3</sub>: Tiempo (min)
- Y<sub>1</sub>: Porcentaje de pérdida de peso
- Y<sub>2</sub>: Porcentaje de pérdida de agua
- Y<sub>3</sub>: Porcentaje de Ganancia de solidos

**Tabla 10.**

Esquema experimental para optimizar la deshidratación osmótica en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*) mediante la metodología de superficie respuesta

OPERACIONES	ACONDICIONAMIENTO PARA LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA	DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA	PARÁMETROS ÓPTIMOS
<p><b>DISEÑO DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA.</b></p>	<p>Láminas de mashua (<i>Tropaeolum tuberosum</i>),</p> <p><u>Dimensión</u> Diámetro :23 mm Espesor :3 mm</p> <p><u>Variables fijas</u> Relación mashua: Solución sacarosa (1:4) Agitación :100 rpm Presión: Atmosférica</p>	<p>CONCENTRACIÓN DE SACAROSA (°BRIX)      TEMPERATURA (°C)      TIEMPO (min)</p>	
<p><b>CONTROLES</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Humedad (%)</li> <li>-Carbohidratos (%)</li> <li>-Sólidos solubles (°Brix)</li> <li>-Proteína (%)</li> <li>-Grasa (%)</li> <li>-Fibra (%)</li> <li>-Ceniza (%)</li> <li>-pH</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Perdida de peso (%PP)</li> <li>-Perdida de agua (% PA)</li> <li>-Ganancia Sólidos (%GS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Difusividad efectiva de agua ( m<sup>2</sup>/s)</li> <li>-Difusividad efectiva de sólidos ( m<sup>2</sup>/s)</li> </ul>

Fuente: Adaptado a la metodología de (Box y Wilson, 1951), recopilado por (Montgomery, 2002). Diseño de Composición Central Rotacional (DCCR)



### 4.3 Población y muestra

#### 4.3.1 Población

Para realizar los ensayos de investigación se trabajó con mashua (*Tropaeolum tuberosum*) accesión: mashua amarilla como materia prima, provenientes del departamento de Apurímac, provincia de Abancay, distrito de Lambrama, de la cosecha de julio - setiembre del 2019. Y la sacarosa comercial marca: Casa grande, fue adquirida en el departamento de Apurímac, provincia de Abancay, distrito de Abancay, mercado central de Abancay.

#### 4.3.2 Muestra

La obtención de la muestra para la investigación se utilizó el muestreo no probabilístico, es decir al azar, debido a la producción de mashua (*Tropaeolum tuberosum*) se encuentra en lugares distintos de la provincia. El tamaño de muestra para el estudio fue aproximadamente 20 kg de mashua y 9 kg de sacarosa por los 18 tratamientos y determinación de difusividad de agua y sólidos.

Se utilizó 100 g de muestra de mashua en forma placas cilíndricas de 3 mm de altura y 23 mm de diámetro para cada corrida experimental.

### 4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la obtención de datos experimentales se realizó cada uno de las siguientes etapas, procediendo la secuencia de la investigación.

#### 4.4.1 ETAPA I: Caracterización fisicoquímicas de la mashua

Para realizar el análisis fisicoquímico de la mashua (*Tropaeolum tuberosum*), se determinó por los siguientes métodos: humedad; NTP 209.264, proteína; NTP 209.262, grasa NTP 209.263, ceniza; NTP 209.265, fibra; FAO 14/7, carbohidrato; por diferencia, pH; A.O.A.C.2005, Acidez; A.O.A.C. 964.07, Determinación de sólidos solubles; A.O.A.C.1995.

#### 4.4.2 ETAPA II. Deshidratación osmótica

Se realizó según la metodología descrita por (Bambicha, *et al.*, 2012; Naranjo, 2015; Suca, 2008).

##### a. Acondicionamiento del tubérculo

**Recepción de la materia prima:** La adquisición de mashua, se realizó del mercado central del distrito de Lambrama de la cosecha julio - setiembre de 2019, se tomó los frutos que presenten la misma variedad, frutos que se encontraban en buen estado sin daño alguno, se



colocó en un recipiente (recipiente de plástico) de 18 L. Aproximadamente, para evitar daños en el transporte.

**Selección y clasificación:** A través de una inspección visual y táctil, se seleccionó la mashua con apariencia uniforme en los colores y tamaños, eliminando los que presentan daños o imperfecciones fisiológicos.

**Lavado:** Se usó una escobilla con cerdas que no maltraten la superficie de la mashua. Se realizó enjuague con abundante agua potable a fin de eliminar la suciedad y otras sustancias extrañas, se realizó de forma tradicional en tinas.

**Sanitización:** Se sumergió en una solución clorada (50 ppm) al 5%, por 15 minutos se agitó suavemente, se realizó la operación de enjuague nuevamente con agua para eliminar el residuo de cloro.

**Trozado:** Los tubérculos fueron cortados en láminas, para ello se usó un microprocesador de alimentos eléctrico marca Oster, en rebanadas de 3 mm de grosor y para uniformizar las láminas con un sacabocado se extrajo 23 mm de diámetro formando placas cilíndricas.

**Escaldado:** La rodajas de mashua se sometió a un pretratamiento de escaldado, para ello se usó agua a 70°C por 1 minuto, para ablandar y facilitar el ingreso de sólidos (Allcca, 2017).

**Drenado 1.-** Se drenaron las láminas de mashua mediante un colador de plástico.

**Pesado:** Se pasaron las láminas de mashua en una balanza analítica. La cantidad de muestra por tratamiento fue de 100 g.

#### **b. Acondicionamiento de la solución osmótica**

**Limpieza pre-operatoria:** Consistió en la limpieza de los equipos y utensilios que fueron utilizados, este procedimiento se realizó de acuerdo al: Manual general de limpieza y sanitización de la planta (Caballero, 2009).

**Pesado de soluto y agua:** Se pesó la sacarosa considerando que 1 grado Brix (°Bx) = 1 g de sacarosa / en 100 g de solución, hasta alcanzar la concentración necesaria de acuerdo al diseño experimental. Se utilizó agua hervida hasta alcanzar la concentración necesaria.

**Mezclado:** En un vaso precipitado se mezcló el soluto y el solvente hasta conseguir una mezcla homogénea.

**Calentar solución de sacarosa:** Se procedió a calentar a 50 °C esto para evitar la formación de cristales y disolver homogéneamente la disolución, al culminar este procedimiento se cubrió con papel aluminio y guardar a temperatura ambiente.

**Medir concentración:** Utilizando un refractómetro se procedió a medir la concentración y regular hasta llegar a los datos de la metodología propuesta.

**Colocar en recipientes:** Los jarabes ya preparados se colocaron en recipientes de plásticos y se cubrieron.

**Almacenamiento:** Estos recipientes con disolución se guardaron a temperatura ambiente.

**c. Inmersión en la solución sacarosa**

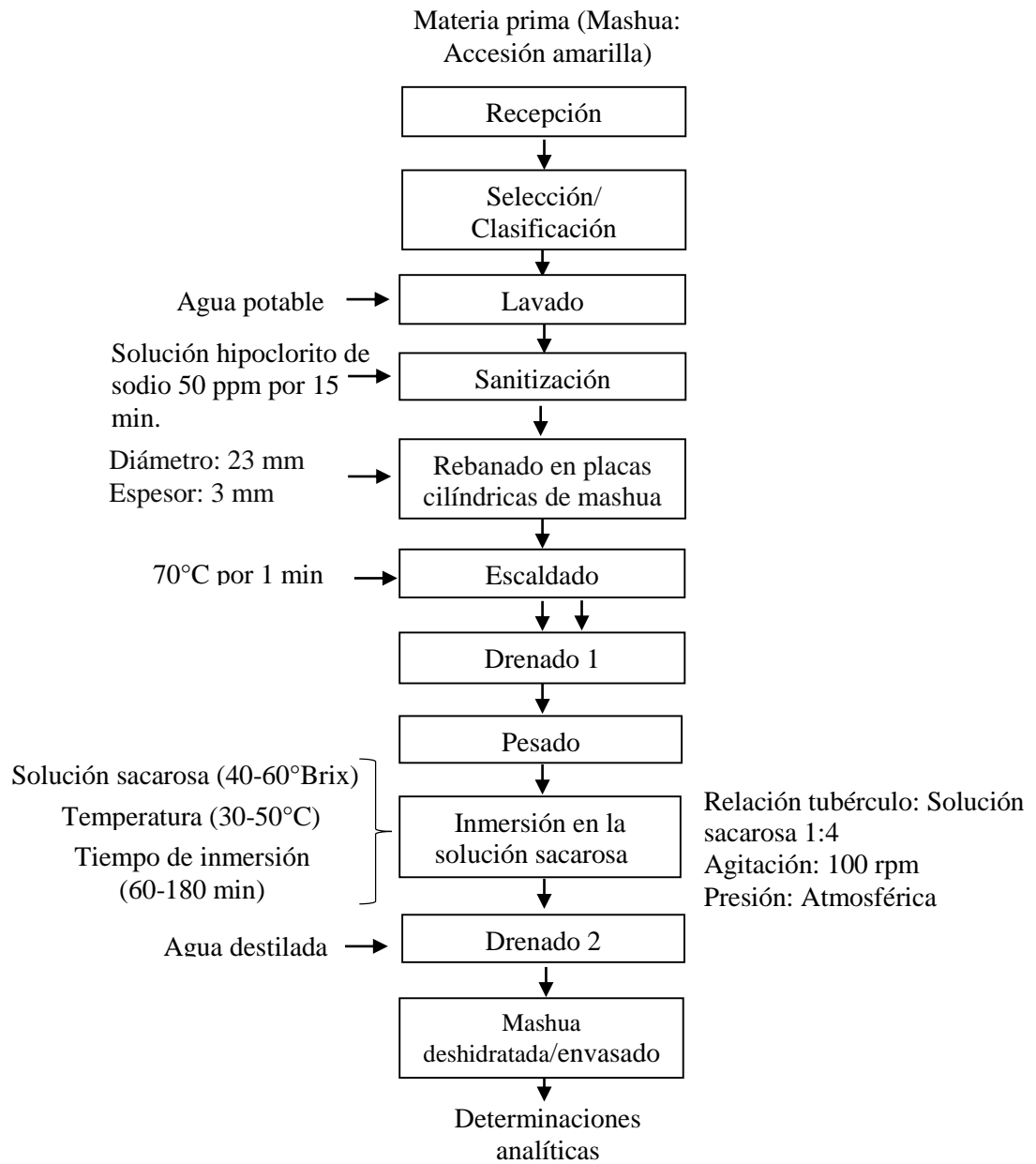
Se utilizó baño maría con agitación orbital para el control de temperatura y agitación de 100 rpm, se colocó la mashua cortada en vasos precipitado de 600 ml con contenido de solución de sacarosa. Las muestras de 100 g aproximadamente de láminas de mashua, se colocaron en mallas plásticas bien sujetados la parte superior y se introdujo a la solución hipertónica. La relación peso muestra de alimento/solución osmótica es de 1:4. En la figura 11, se ilustra el procedimiento.

**Drenado 2:** La muestra deshidratada fue escurrida con agua destilada en flujo corriente, se retiró el excedente del azúcar de la superficie de las láminas de mashua con papel adsorbente tissue.

**Análisis de estudio:** Se recogió la información de acuerdo a la metodología descrita.

**Almacenado:** El producto final se embolsó en fundas de polietileno y almacenó a una temperatura menor a los 8°C.

## DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE DESHIDRATACION OSMOTICA DE LA MASHUA



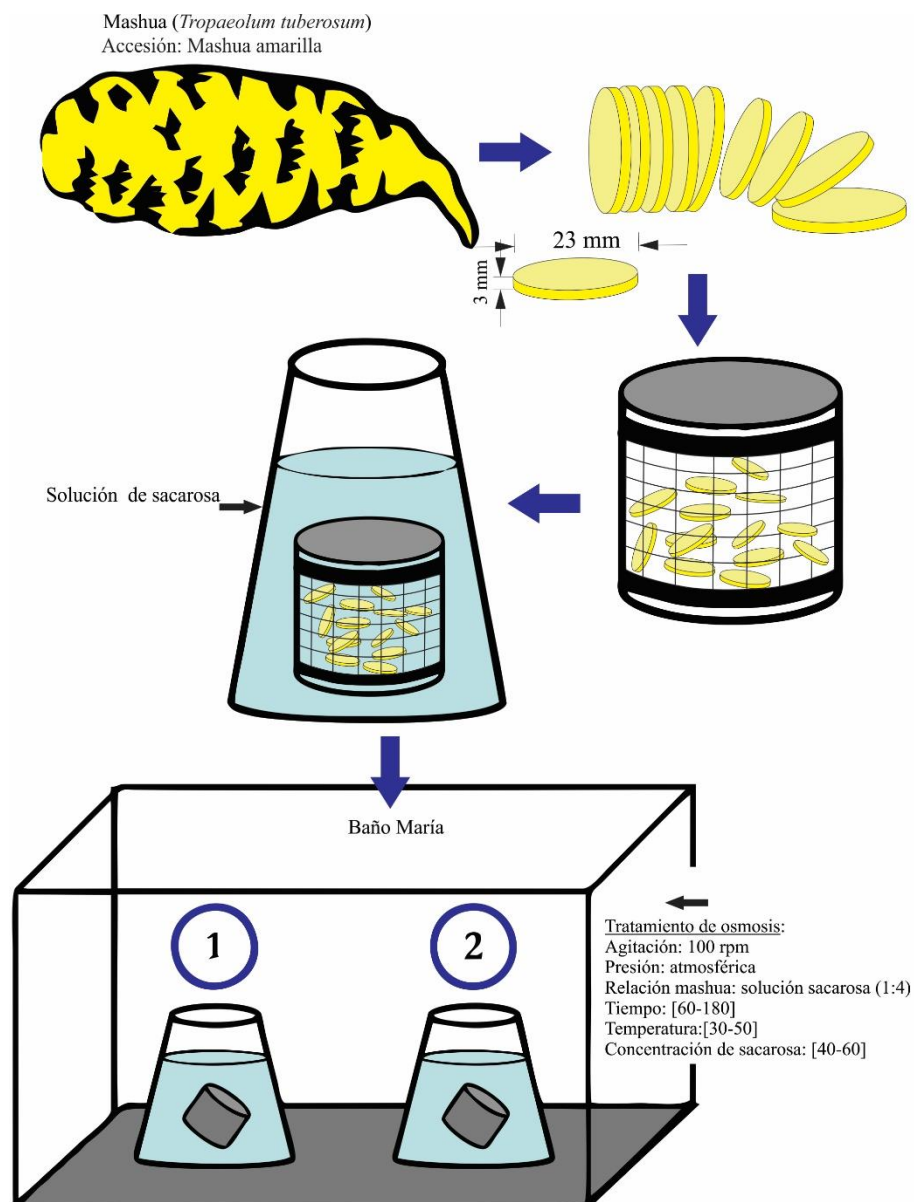


Figura 11. Visualización gráfica del experimento.

#### 4.4.3 ETAPA III. Determinaciones analíticas

Culminado el desarrollo del tratamiento, se procedió a las determinaciones analíticas requeridas para el presente estudio.

##### a. Tratamiento de cinética de deshidratación osmótica

Para determinar pérdida de peso (%PP), pérdida de agua (%PA) y ganancia de sólidos solubles (%GS), se realizó de acuerdo a las ecuaciones mencionadas por, (Della y Mascheroni, 2011; Wais, 2011).

- **Pérdida de peso (%PP):** Es la diferencia de peso inicial (antes de ser sumergido en el jarabe) y el peso final (tomado inmediatamente después de retirar la muestra de inmersión) en cada tratamiento. Se utiliza la siguiente ecuación:

$$PP(\%) = \left( \frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad (21)$$

- **Determinación de Pérdida de agua (PA):** Para determinar el porcentual de pérdida de agua en el alimento, se toma el peso inicial del alimento y de luego se sumergir en el jarabe anotar el peso del alimento en cada tratamiento, además, anotar el contenido de solidos iniciales del fruto (antes de sumergir al jarabe) y el contenido de solidos solubles finales (después de retirar del jarabe), para calcular se utiliza la Ecuación 22.

$$PA(\%) = \left[ \left( 1 - \frac{ST_0}{100} \right) - \left( 1 - \frac{ST}{100} \right) \left( 1 - \frac{PP}{100} \right) \right] \times 100 \quad (22)$$

- **Ganancia de solidos solubles:** Se determinó los sólidos iniciales de mashua (antes de sumergir al jarabe), luego del proceso se determinó los sólidos finales (después de retirar del medio osmótico) en cada tratamiento. También se utilizó los cálculos de pérdida de peso, Para calcular se utilizó la ecuación 23.

$$GS(\%) = \left[ \left( 1 - \frac{PP}{100} \right) \times \frac{ST}{100} - \frac{ST_0}{100} \right] \times 100 \quad (23)$$

**Donde:**

*PP (%)*: Porcentaje de pérdida de peso

*PA (%)*: Porcentaje de pérdida de agua

*GS (%)*: Porcentaje de ganancia de solidos

*m<sub>i</sub>*: Masa inicial de la muestra fresca de mashua en (g)

*m<sub>f</sub>*: Masa final de la muestra de mashua deshidratada osmóticamente a tiempo t en (g)

*ST<sub>0</sub>*: Contenido de solidos totales iniciales de mashua (°Brix)

*ST*: Contenido de solidos totales (°Brix) de mashua para determinado tiempo, t

**b. Determinación de difusividad efectiva de agua y sólidos**

Después de obtener los parametros óptimos del proceso, se procedió a determinar la difusividad de agua y sólidos, para ello, se consideró la temperatura óptima, la concentración óptima y el tiempo (0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330, 360) minutos. Se realizó por la segunda ley de Fick, desarrollado por Crack para geometrías planas, en estado no estacionario. Se utilizó la ecuación (9) para difusividad efectiva de agua ecuaciones y para difusividad efectiva de solidos ecuación (11) descritas en el marco teórico.



## 4.5 Material de investigación

### Materiales, reactivos e insumos:

#### Materiales

- Envases de plástico 500 ml, 1000 ml
- Cuchillos de acero inoxidable
- Envases de plástico 18 l
- Vaso precipitado 600 ml
- Vasos precipitados de 50 ml y 100 ml
- Tina de plástico
- Escobilla de cerdas
- Colador
- Cuchillos de acero inoxidable
- Espátula y pinzas
- Campana de vidrio (desecador)
- Papel aluminio
- Ligas estándar N° 18
- Sacabodados de diámetro 23 mm
- Piseta
- Equipo de titulación.
- Papel adsorbente tissue
- Papel toalla
- Vernier
- Bisturi
- Pinzas para crisol
- Crisol
- Pipetas de 5 ml
- Envases de plástico 2 l
- Mallas plásticas de diámetro 8 cm y altura 7 cm
- Prensador de limas

#### Reactivos e insumos

- Hipoclorito de sodio al 0.1 %
- Sacarosa (azúcar rubia) marca: casa grande
- Mashua (*Tropaeolum tuberosum*)
- Agua destilada

#### Equipos

- Balanza analítica de SARTORIUS ENTRIS224-1S 0.1mg-220g
- Balanza Portátil Clásica TRAVELER OHAUS - SE402F 0.01g-400g
- Microprocesador de alimentos eléctrico marca: Oster BLSTFP-W00
- Baño María con agitación marca: GFL 1092
- Refractómetro de ABBE NAR -2T
- Termómetro con vástago FORME T 91000-054/S rango: - 50 a + 150 °C
- Estufa MEMMERT UN 30 230V
- Cocinilla CAT ROBAX M6 230VAC con agitador magnético SPINBAR
- Cronometro digital
- pH – METRO SI ANALYTICS Lab 850



#### 4.6 Análisis estadístico

Los resultados de los tratamientos fueron sometidos al software STATGRAPHICS Centurión XVI.II. El mismo proporcionó el análisis de varianza (ANOVA) con prueba de significancia a  $\alpha=0.05$ . Para evaluar el orden de prioridades del efecto de la variable independiente en la respuesta, se utilizó el diagrama de Pareto. Asimismo, determinado el modelo matemático y el coeficiente del modelo para cada respuesta con el objetivo de obtener gráficos de superficie de respuesta. Para la optimización se utilizó la función de deseabilidad global a las siguientes condiciones; maximizar pérdida de agua, maximizar pérdida de peso y minimizar ganancia de sólidos.



## CAPÍTULO V

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 5.1 Descripción de resultados

##### 5.1.1 Características fisicoquímicas de mashua fresca

La caracterización fisicoquímica de la mashua fresca se muestra en el Tabla 11, estos resultados fueron analizados por dos repeticiones en el laboratorio de la UNSAAC (2019) Anexo 1; Resultados del análisis fisicoquímico de la Mashua, los componentes de sólidos solubles y acidez se determinó en los laboratorios de la UNAMBA.

**Tabla 11.**

*Composición fisicoquímica de mashua variedad amarillo*

<i>Componentes</i>	<i>Método</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
Humedad	NTP 209.264	86.5 ± 1.82
Proteína	NTP 209.262	1.23 ± 0.01
Grasa	NTP 209.263	0.79 ± 0.04
Ceniza	NTP 209.265	1.16 ± 0.06
Fibra	FAO 14/7	1.45 ± 0.01
Carbohidratos	Diferencia	10.31 ± 1.85
Sólidos solubles	A.O.A.C. 1995	8.00 ± 0.00
Acidez	A.O.A.C. 964.07	1.42 ± 0.09 g ácido ascórbico /100 g muestra
Ph	A.O.A.C. 2005	6.14 ± 0.17

##### 5.1.2 Resultados experimentales

En la Tabla 12, se muestra los valores de las variables independientes y dependientes del presente estudio, cada tratamiento se realizó por dos repeticiones. Las variables de respuestas ( $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$ ) es el promedio de los experimentos. Los resultados del experimento se muestran en Anexo 2 y Anexo 3.



**Tabla 12.**

Efecto de las variables de concentración de sacarosa, temperatura y tiempo en la deshidratación osmótica. Evaluados en pérdida de peso, pérdida de agua y ganancia de sólidos.

Tratamiento	Variables Codificadas			Variables naturales (Independiente)			Variable de Respuesta		
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub> %PP	Y <sub>2</sub> %PA	Y <sub>3</sub> %GS
T1	-1	-1	-1	40	30	60	24.07	30.72	6.65
T2	1	-1	-1	60	30	60	47.65	50.38	2.73
T3	-1	1	-1	40	50	60	26.91	34.24	7.33
T4	1	1	-1	60	50	60	35.80	43.63	7.82
T5	-1	-1	1	40	30	180	28.72	37.33	8.61
T6	1	-1	1	60	30	180	41.57	49.84	8.27
T7	-1	1	1	40	50	180	24.11	35.35	11.24
T8	1	1	1	60	50	180	36.78	47.68	10.90
T9	-1.681	0	0	33.2	40	120	21.90	29.64	7.74
T10	1.681	0	0	66.8	40	120	46.43	57.58	11.15
T11	0	-1.681	0	50	23,2	120	40.08	46.79	6.71
T12	0	1.681	0	50	56,8	120	34.38	44.65	10.27
T13	0	0	-1.681	50	40	19.1	27.73	29.93	2.20
T14	0	0	1.681	50	40	220.9	37.00	47.46	10.46
T15	0	0	0	50	40	120	37.10	44.79	7.69
T16	0	0	0	50	40	120	38.90	46.81	7.90
T17	0	0	0	50	40	120	38.92	46.89	7.97
T18	0	0	0	50	40	120	37.58	45.83	8.25

**Legenda:**

T: Tratamientos o puntos de estudio

x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub>: variables codificadas

X<sub>1</sub>: Concentración de sacarosa (°Brix)

X<sub>2</sub>: Temperatura (°C)

X<sub>3</sub>: Tiempo (min)

Y<sub>1</sub>: Porcentaje de pérdida de peso

Y<sub>2</sub>: Porcentaje de perdida de agua

Y<sub>3</sub>: Porcentaje de Ganancia de solidos

**5.1.3 Análisis estadístico**

Con los resultados obtenidos de la Tabla 12 (Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, Y<sub>3</sub>), se determinó el análisis estadístico utilizando software STATGRAPHICS Centurión XVI. II.



### 5.1.3.1 Análisis estadístico de pérdida de peso (%PP)

En la Tabla 13, se muestra el análisis de varianza (ANOVA) de la pérdida de peso (%PP), donde evalúa la importancia de cada uno de los factores de concentración de sacarosa, temperatura y tiempo de inmersión con sus respectivos términos lineales, interacciones y cuadráticos, comparando el cuadrado medio contra un estimado del error experimental de la variable de pérdida de peso (%PP). En este análisis se observa que las variables de concentración de sacarosa ( $X_1$ ), la temperatura ( $X_3$ ) en términos lineales, y en términos cuadráticos el tiempo de inmersión ( $X_3 X_3$ ) tienen un valor-P menor que 0.05, las que justifican que son significativas con un nivel de confianza del 95.0%. Los factores de tiempo ( $X_2$ ) en término lineal, la interacción ( $X_1 X_2$ ;  $X_1 X_3$ ;  $X_2 X_3$ ) y los términos cuadráticos de ( $X_1 X_1$ ,  $X_2 X_2$ ), no resultaron significativo en la pérdida de peso.

Además, se observa que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es 93.069%, es decir, la calidad de ajuste del modelo estimado es satisfactorio, según (Gutierrez y De la Vera, 2012) indica si el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es superior al 70%, es un modelo que tiene un ajuste satisfactorio. Así también el estadístico R-cuadrada ajustada es de 85.2717%, esto significa que los factores en estudios explican colectivamente un 85.27% de la variabilidad observada en la pérdida de peso (%PP). El error estándar del estimado es de 2.90761, estima la desviación estándar del error e indica la magnitud del error de estimación en el modelo.

**Tabla 13.**  
ANOVA para la variable de respuesta pérdida de peso (% PP)

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
$X_1$ :CONCENTRACIÓN	721.209	1	721.209	85.31	0.0000
$X_2$ :TEMPERATURA	57.3916	1	57.3916	6.79	0.0313
$X_3$ :TIEMPO	11.1507	1	11.1507	1.32	0.2840
$X_1 X_1$	34.5865	1	34.5865	4.09	0.0777
$X_1 X_2$	27.6396	1	27.6396	3.27	0.1082
$X_1 X_3$	6.03781	1	6.03781	0.71	0.4226
$X_2 X_2$	4.10868	1	4.10868	0.49	0.5055
$X_2 X_3$	0.0190125	1	0.0190125	0.00	0.9633
$X_3 X_3$	66.3311	1	66.3311	7.85	0.0232
Error total	67.6337	8	8.45421		
Total (corr.)	975.82	17			

R-cuadrada = 93.069 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 85.2717 por ciento

Error estándar del est. = 2.90761

En la figura 12, se observa el diagrama de Pareto para la variable pérdida de peso (%PP), este diagrama permite asignar un orden de prioridades de efectos de las variables independientes con sus respectivas formas lineales, interacciones y



cuadráticas en la pérdida de peso. Se percibe que los factores estudiados como la concentración de sacarosa ( $X_1$ ) en términos lineales tiene un efecto positivo (+), esto indica que las elevadas concentraciones de sacarosa garantizan mayor pérdida de peso en láminas de mashua en la deshidratación osmótica. La variable de tiempo de inmersión en su forma cuadrática ( $X_3X_3$ ), muestra un efecto negativo (-), indica que al incrementar el tiempo de inmersión conlleva una disminuye en la pérdida de peso en láminas de mashua en la deshidratación osmótica. Así también la variable de temperatura ( $X_2$ ) en términos lineales afecta positivamente (+), nos señala que temperaturas altas garantiza mayores pérdidas de peso. Finalmente se observa que los otros términos no sobrepasan línea vertical que muestra la variabilidad estadística de ( $p < 0,05$ ), en consecuencia, no es significativo para la pérdida de peso en la deshidratación osmótica en láminas mashua.

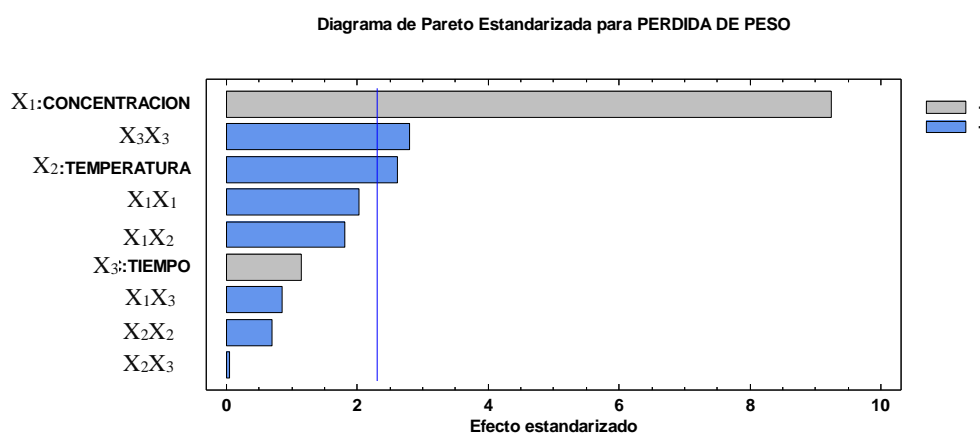


Figura 12. Diagrama de Pareto para porcentaje de pérdida de peso (%PP)

### 5.1.3.2 Análisis estadístico de pérdida de agua (%PA)

En la Tabla 14, se muestra el análisis de varianza (ANOVA) de la pérdida de agua (%PA), donde evalúa la importancia de los factores de concentración de sacarosa, temperatura y tiempo de inmersión con sus respectivos términos lineales, interacciones y cuadráticos, comparando el cuadrado medio contra un estimado del error experimental de la variable de pérdida de agua (%PA). se observa que la concentración de sacarosa ( $X_1$ ), tiempo de inmersión ( $X_3$ ) en términos lineales y el tiempo ( $X_3X_3$ ) en su forma cuadrática tienen un valor-P menor que 0.05 las que justifican que son significativos con un nivel de confianza del 95.0%. Los factores temperatura ( $X_2$ ) en términos lineales, las interacciones ( $X_1 X_2$ ;  $X_1 X_3$ ;  $X_2 X_3$ ) y los términos cuadráticos ( $X_1 X_1$ ;  $X_2 X_2$ ) no tienen efecto significativo en pérdida de agua. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es 92.8071%, indica la calidad de ajuste del modelo estimado, en el presente estudio es satisfactorio. Así mismo el estadístico R-cuadrada ajustada es 84.715%, indica que los factores en estudios explican colectivamente un 84.7% de la variabilidad observada en la pérdida de agua (%PA).

El error estándar del estimado es 3.11671, esto estima la desviación estándar del error e indica la magnitud del error de estimación en el modelo.

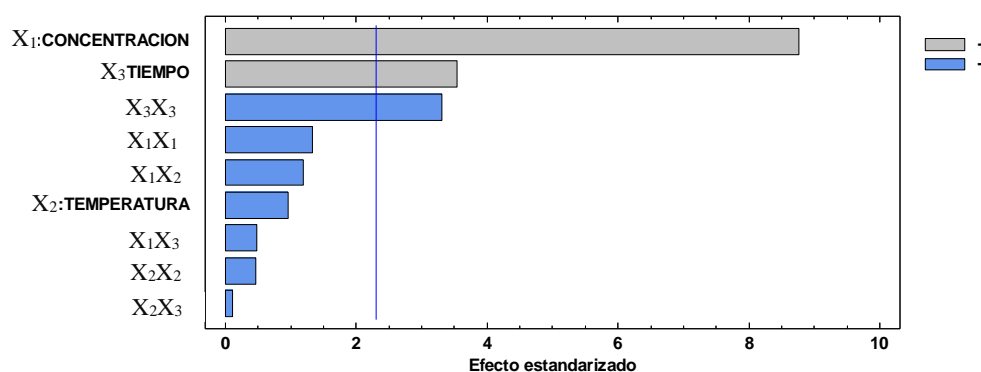
**Tabla 14.**  
ANOVA para la variable de respuesta pérdida de agua (% PA)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
X <sub>1</sub> :CONCENTRACIÓN	745.166	1	745.166	76.71	0.0000
X <sub>2</sub> :TEMPERATURA	8.81021	1	8.81021	0.91	0.3688
X <sub>3</sub> :TIEMPO	121.365	1	121.365	12.49	0.0077
X <sub>1</sub> X <sub>1</sub>	17.0078	1	17.0078	1.75	0.2223
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	13.6503	1	13.6503	1.41	0.2699
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	2.21551	1	2.21551	0.23	0.6457
X <sub>2</sub> X <sub>2</sub>	2.16344	1	2.16344	0.22	0.6496
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	0.103513	1	0.103513	0.01	0.9203
X <sub>3</sub> X <sub>3</sub>	106.179	1	106.179	10.93	0.0108
Error total	77.7113	8	9.71391		
Total (corr.)	1080.38	17			

R-cuadrada = 92.8071 %; R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 84.715 %; Error estándar del est. = 3.11671

En la figura 13, se observa el diagrama de Pareto para la variable pérdida de agua (%PA), este diagrama permite asignar un orden de prioridades de efectos de las variables independientes con sus respectivas formas lineales, interacciones y cuadráticas en la pérdida de agua. Se percibe que la concentración de sacarosa (X<sub>1</sub>) en términos lineales tiene un efecto positivo (+), el tiempo de inmersión (X<sub>3</sub>) en su forma lineal tiene un efecto positivo (+), sin embargo el tiempo de inmersión en su forma cuadrática (X<sub>3</sub>X<sub>3</sub>) muestra un efecto negativo (-), estos términos indican que las elevadas concentraciones de sacarosas garantizan mayores pérdidas de agua, mientras un incremento de tiempo de inmersión no siempre va a garantizar mayores pérdidas de agua, ya que puede ocurrir lo contrario en el proceso de deshidratación. Finalmente, otros términos que no sobrepasan línea vertical que muestra la variabilidad estadística de (p<0,05), en consecuencia, no es significativo para la pérdida de agua en la deshidratación osmótica en láminas mashua.

Diagrama de Pareto Estandarizada para PERDIDA DE AGUA



**Figura 13.** Diagrama de Pareto para porcentaje de pérdida de agua (%PA)

### 5.1.3.3 Análisis estadístico de ganancia de sólidos

En la Tabla 15, se muestra el análisis de varianza (ANOVA) de la ganancia de sólidos (%GS), donde evalúa la importancia de cada uno de los factores de concentración de sacarosa, temperatura y tiempo de inmersión con sus respectivos términos lineales, interacciones y cuadráticos, comparando el cuadrado medio contra un estimado del error experimental de la variable de ganancia de sólidos (%GS). En este análisis se observa que las variables de tiempo de inmersión ( $X_3$ ), la temperatura ( $X_2$ ) en términos lineales, tienen un valor-P menor que 0.05 las que justifican que son significativos con un nivel de confianza del 95.0%. Los factores ( $X_1$ ) en término lineal, la interacción ( $X_1 X_2$ ;  $X_1 X_3$ ;  $X_2 X_3$ ) y los términos cuadráticos de ( $X_1 X_1$ ,  $X_2 X_2$  y  $X_3 X_3$ ), no fueron significativos en la ganancia de sólidos.

Se observa que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es 88.5816%, es decir, la calidad de ajuste del modelo estimado es satisfactorio, según (Gutierrez y De la Vera, 2012) indica si el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es superior al 70%, es un modelo que tiene un ajuste satisfactorio. Así también el estadístico R-cuadrada ajustada es de 75.7358%, esto significa que los factores en estudios explican colectivamente un 75.7358%, de la variabilidad observada en la ganancia de sólidos (%GS). El error estándar del estimado es de 1.23058, estima la desviación estándar del error e indica la magnitud del error de estimación en el modelo.

**Tabla 15.**  
ANOVA para la variable de respuesta porcentaje de ganancia de sólidos (%GS)

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
$X_1$ :CONCENTRACIÓN	0.193333	1	0.193333	0.13	0.7301
$X_2$ :TEMPERATURA	21.2043	1	21.2043	14.00	0.0057
$X_3$ :TIEMPO	58.9826	1	58.9826	38.95	0.0002
$X_1X_1$	3.09422	1	3.09422	2.04	0.1907
$X_1X_2$	2.43101	1	2.43101	1.61	0.2408
$X_1X_3$	0.945313	1	0.945313	0.62	0.4523
$X_2X_2$	0.311572	1	0.311572	0.21	0.6622
$X_2X_3$	0.03251	1	0.0325125	0.02	0.8871
$X_3X_3$	4.65644	1	4.65644	3.07	0.1176
Error total	12.1146	8	1.51432		
Total (corr.)	106.097	17			

R-cuadrada = 88.5816 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 75.7358 porciento

Error estándar del est. = 1.23058

En la figura 14, se observa el diagrama de Pareto para la variable ganancia de sólidos (%GS), en el que permite asignar un orden de prioridades de efectos de las variables independientes con sus respectivos términos lineales, interacciones y cuadráticas en la ganancia de sólidos (%GS). Los factores que sobrepasan la línea vertical de la

variabilidad estadística de ( $p < 0,05$ ) son; el tiempo ( $X_3$ ) y temperatura ( $X_2$ ) en términos de lineales que poseen un efecto positivo (+) en la ganancia de sólidos (%GS), en general nos indica que los tiempos y temperaturas altas siempre garantizaran mayores ganancias de sólidos en la deshidratación en láminas de mashua.

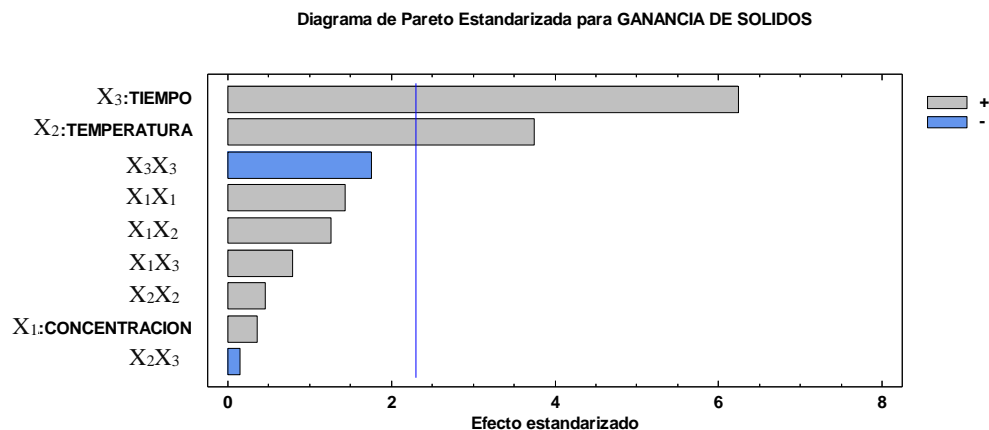


Figura 14. Diagrama de Pareto para porcentaje de ganancia de sólidos (%GS)

### 5.1.4 Modelo matemático ajustado

En la tabla 16, despliega los modelos matemáticos ajustado para las variables de respuestas. La ecuación (24) describe el trayecto de estudio para pérdida de peso (%PP), la ecuación (25) para pérdida de agua y la ecuación (26) para ganancia de sólidos (%GS), se observa modelos polinomiales de segundo grado reducidos para las tres variables de respuestas.

Tabla 16. Modelo matemático ajustado para las variables de respuestas

Variable dependiente	Ecuación
<b>PÉRDIDA DE PESO (%PP)</b>	$Y_1 = -97.6312 + 3.29753*CONCENTRACION + 1.19007*TEMPERATURA + 0.243369*TIEMPO - 0.0165357*CONCENTRACION^2 - 0.0185875*CONCENTRACION*TEMPERATURA - 0.00144792*CONCENTRACION*TIEMPO - 0.0056993*TEMPERATURA^2 - 0.00008125*TEMPERATURA*TIEMPO - 0.000636097*TIEMPO^2$ <span style="float: right;">(24)</span>
<b>PÉRDIDA DE AGUA (%PA)</b>	$Y_2 = -73.0317 + 2.52599*CONCENTRACION + 0.926407*TEMPERATURA + 0.294272*TIEMPO - 0.0115956*CONCENTRACION^2 - 0.0130625*CONCENTRACION*TEMPERATURA - 0.000877083*CONCENTRACION*TIEMPO - 0.00413564*TEMPERATURA^2 - 0.000189583*TEMPERATURA*TIEMPO - 0.000804794*TIEMPO^2$ <span style="float: right;">(25)</span>

---

<b>GANANCIA DE SÓLIDOS (%GS)</b>	$  \begin{aligned}  Y_3 = & 24.6259 - 0.771942*CONCENTRACION - \\  & 0.263826*TEMPERATURA + 0.0506893*TIEMPO \\  & + 0.0049459*CONCENTRACION^2 + \\  & 0.0055125*CONCENTRACION*TEMPERATURA \\  & + 0.000572917*CONCENTRACION*TIEMPO + \\  & 0.00156946*TEMPERATURA^2 - \\  & 0.00010625*TEMPERATURA*TIEMPO - \\  & 0.000168536*TIEMPO^2  \end{aligned}  $	(26)
--------------------------------------	---	------

---

La Ecuación 24. Representa el modelo matemático que describe pérdida peso (%PP). En esta ecuación se observa el coeficiente del modelo ( $\beta_1$ ; 3.29753) de la concentración de sacarosa en término lineal, esto indica que cuando se incrementa la concentración de sacarosa, el porcentaje de pérdida de peso aumenta en 3.3 %, manteniendo constante las variables de temperatura y tiempo de inmersión. Para el termino lineal temperatura ( $\beta_2$ ; 1.19007), indica que la pérdida de peso aumenta en 1.19 % por cada unidad de cambio en la variable de temperatura, independientemente de las demás variables de estudio. Para el termino lineal tiempo de inmersión ( $\beta_3$ ; 0.243369), indica que la pérdida de peso se verá incrementada en 0.243 % por cada unidad de cambio en la variable de tiempo de inmersión, cuando el resto de variables independientes se mantienen constantes. Este criterio se toma para los demás términos de la ecuación. Por último, el porcentaje de pérdida de peso prevista en ausencia de temperatura, concentración de sacarosa y tiempo de inmersión es de - 97.6317, dicho de otro modo, es la coordenada en el origen.

La Ecuación 25. Representa el modelo matemático ajustado que describe la perdida de agua (%PA) en la deshidratación osmótica en láminas de mashua. Se observa la regresión de concentración de sacarosa ( $\beta_1$ ; 2.52599) en termino lineal, donde indica que la perdida de agua se verá incrementada en 2.53 % por cada unidad de cambio en la variable de concentración de sacarosa, cuando el resto de variables independientes se mantienen constantes. Para el termino lineal temperatura ( $\beta_2$ ; 0.926407), indica que la pérdida de agua es afectada en 0.93 % por cada unidad de cambio en la variable de temperatura, independientemente de las demás variables de estudio. Para el termino lineal tiempo de inmersión ( $\beta_3$ ; 0.294272), indica que la pérdida de agua se verá incrementada en 0.29 % por cada unidad de cambio en la variable de tiempo de inmersión, cuando el resto de variables independientes se mantienen constantes. Este criterio se toma para los demás términos de la ecuación. Por último, el porcentaje de pérdida de agua prevista en ausencia de temperatura, concentración de sacarosa y tiempo de inmersión es de -73.0317, dicho de otro modo, es la coordenada en el origen.

La ecuación 26. Representa el modelo matemático ajustado que describe la ganancia de sólidos (%GS) en la deshidratación osmótica en láminas de mashua, los valores de coeficiente lineal de concentración de sacarosa ( $\beta_1$ ; -0.771942), temperatura ( $\beta_2$ ; -0.263826)



y tiempo de inmersión ( $\beta_3$ ; 0.0506893), indican una disminución de ganancia de sólidos con el aumento de concentración de sacarosa y temperatura, por otra parte, un aumento de tiempo de inmersión se incrementará en la ganancia de sólidos, este criterio de análisis se considera para los demás términos. Así también ausencia de temperatura, concentración de sacarosa y tiempo de inmersión es de 24.6259, dicho de otro modo, es la coordenada en el origen.

### 5.1.5 Superficie de respuesta

Luego de haber determinado las ecuaciones correspondientes para cada variable de respuesta, se desarrolló la superficie de respuestas y las curvas de contorno para cada modelo.

La interpretación de las superficies de respuestas en esta investigación está en función a los colores de contorno, basados en valores bajos (fríos) a valores altos o calientes de la siguiente forma; el color rojo representa valores muy altos, color anaranjado representa valor alto, color amarillo oscuro o claro presenta valores regulares a más, el color verde oscuro y claro representa valores regulares a menos, el color celeste representa valores bajos y el color azul oscuro representa valores muy bajos.

#### 5.1.5.1 Superficie de respuesta estimada para pérdida de peso

En la Figura 15, se muestra la superficie de respuesta en forma de paraboloides debido a que el modelo contiene términos cuadráticos, donde este gráfico representa la evolución temporal de pérdida de peso. Para visualizar mejor la gráfica de superficie de respuesta se ha fijado como constante la variable de tiempo de inmersión (120 minutos). En la superficie proyectada se puede apreciar el efecto de concentración y temperatura sobre la pérdida de peso en el proceso osmosis de láminas de mashua. Cuando se aumenta la concentración de sacarosa y la misma vez la temperatura, esto genera un incremento relativo en la pérdida de peso, sin embargo, a temperaturas altas y concentraciones altas la pérdida de peso disminuye. Por último, la tendencia a color rojo en la superficie indica que existe una mayor pérdida de peso y en extremo el color azul indica una menor pérdida de peso en la deshidratación.

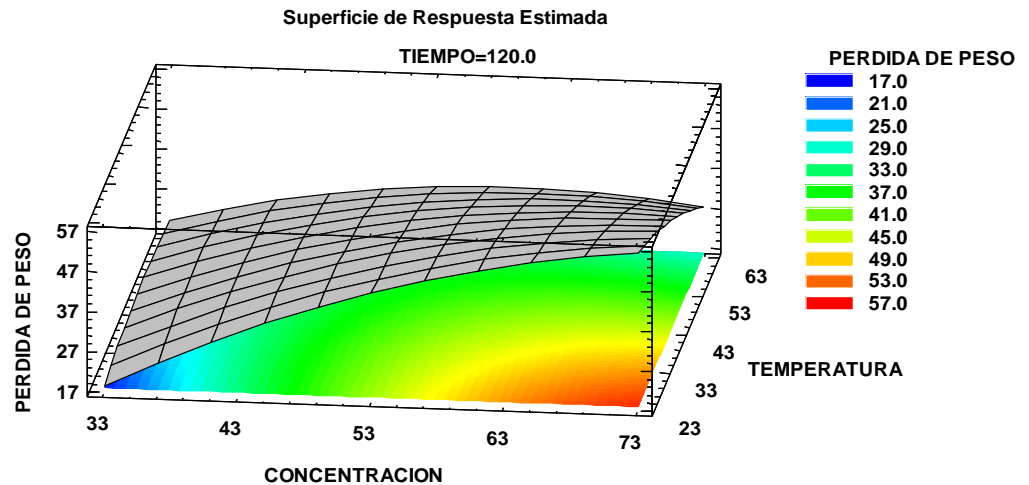


Figura 15. Superficie de respuesta estimada de la variable pérdida de peso (%PP)

### 5.1.5.2 Superficie re respuesta estimada para pérdida de agua

En la figura 16, se muestra la superficie de respuesta que describe el modelo matemático de la ecuación 25, para pérdida de agua (%PA). Se aprecia una figura paraboloides debido a que el modelo contiene términos cuadráticos, para visualizar la superficie se ha fijado la variable de tiempo de inmersión (120 minutos). En el grafico se observa que a medida incrementa la concentración de sacarosa y a bajas temperaturas la pérdida de agua (%PA) incrementa. Sin embargo, cuando la concentración es alta y la temperatura es alta hay disminución en la deshidratación osmótica de láminas de mashua. La tendencia a color amarillo naranja, indica que existe una mayor pérdida de peso y en extremo la tendencia al color azul indica una menor pérdida de peso en la deshidratación.

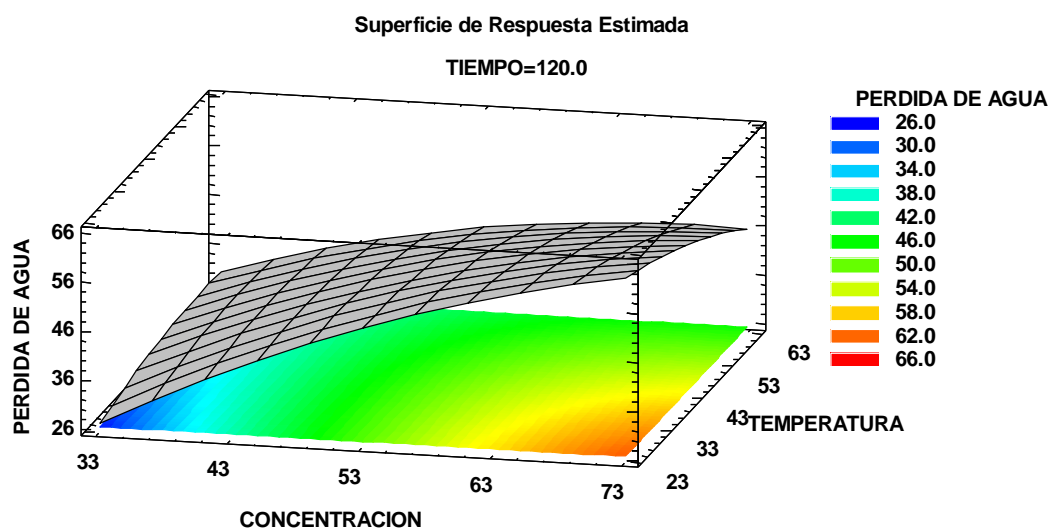


Figura 16. Superficie de respuesta estimada de la variable pérdida de agua (%PA)

### 5.1.5.3 Superficie de respuesta estimada para ganancia de solidos

En la Figura 17, muestra la superficie de respuesta del modelo matemático Ecuación (26) para la ganancia de solidos (%GS). La superficie tiene una curvatura debido a que el modelo contiene términos cuadráticos, esta gráfica explica la evolución temporal de ganancia de sólidos (%GS) cuando el tiempo de inmersión es 120 minutos. En el gráfico se observa que a medida que se incrementa la temperatura y la concentración de sacarosa existe un incremento en la ganancia de sólidos (%GS), mientras que a concentraciones altas y temperaturas bajas, muestra una disminución en la ganancia de sólidos. Sin embargo, cuando la concentración es baja y la temperatura es baja, existe un incremento lento de la ganancia de sólidos en la deshidratación osmótica de láminas de mashua. La tendencia a color amarillo rojo indica que existe una mayor pérdida de peso y en extremo la tendencia al color azul indica una menor pérdida de peso en la deshidratación.

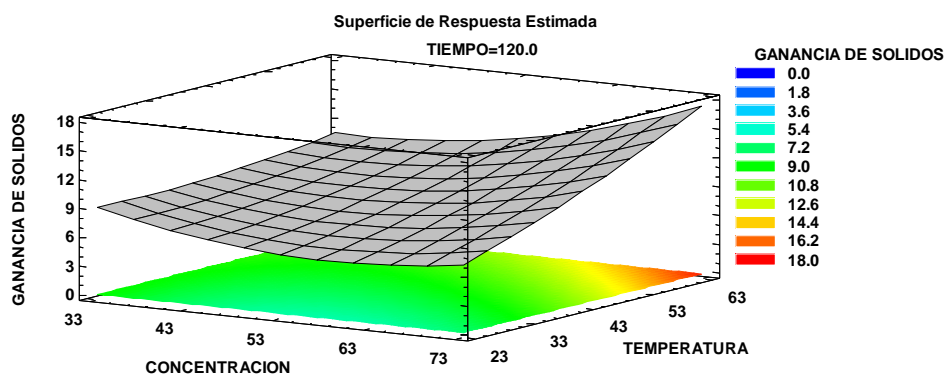


Figura 17. Superficie de respuesta estimada de la variable ganancia de solidos (%GS)

### 5.1.6 Optimización simultanea de respuestas

La optimización simultánea se desarrolló empleando la función de deseabilidad global de las múltiples respuestas en el software STATGRAPHICS Centurión XVI.II, con el objetivo de encontrar los parámetros óptimos del proceso. Se condicionaron las variables de respuesta; maximizar la pérdida de peso, es decir, mayor disminución de peso en la matriz del alimento, maximizar pérdida de agua dicho de otro modo mayor cantidad de agua que deja el alimento por causa de la presión osmótica que ejerce la solución de sacarosa y minimizar la ganancia de sólidos es decir menor cantidad de azúcar que penetra en la matriz de láminas de mashua.

Para observar gráficamente la región óptima, se utilizó la superficie compuesta con su respectivo graficas de contorno. En la Figura 18, se muestra la superficie compuesta de las variables de estudio, para visualizar las gráficas se fijó la variable tiempo ( $t=120$ ).

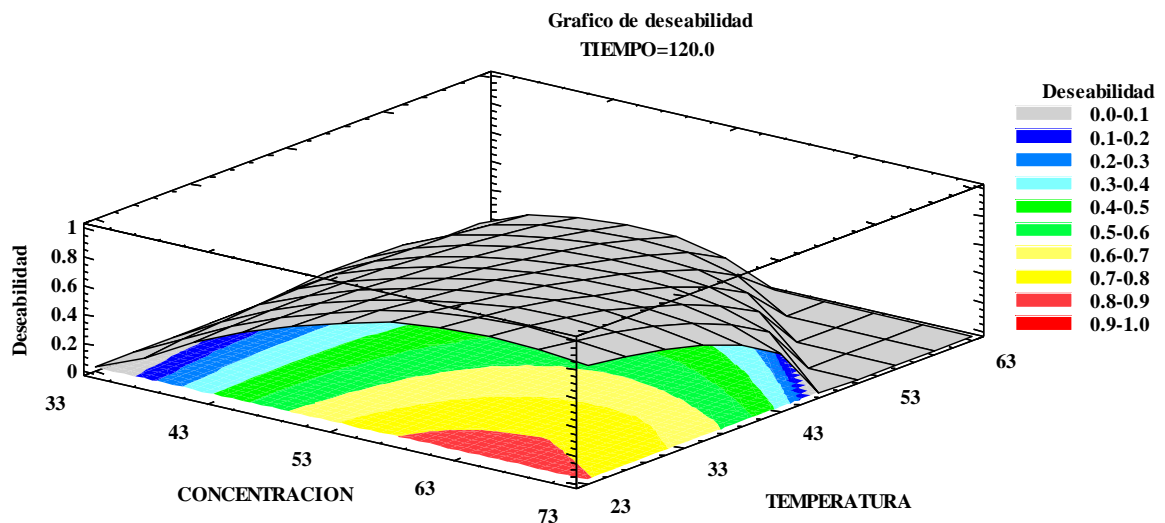


Figura 18. Gráfico de simultáneas respuestas para el proceso de deshidratación osmótico

En la Figura 19, muestra el grafico sobrepuesto con su respectivo punto de localización óptima en función a los factores de estudio, para visualizar los gráficos se fijó variable tiempo. En esta grafica se observa la aglomeración de gráficos de contorno de las variables de respuestas, las líneas celestes representan el grafico de contornos para pérdida de peso, la línea roja representa el grafico de contornos para perdida de agua, la línea verde representa el grafico de contornos para ganancia de sólidos y la línea rosada proyecta las coordenadas del punto óptimo de estudio. Asimismo, se aprecia un punto (azul) donde indica el tratamiento que se ajustó a las exigencias mencionadas de optimización, esta coordenada de la región óptima muestra la temperatura de 23.2°C y concentración de sacarosa 66.8 °C, considerando tiempo constante para evaluar el grafico, los resultados se detallan en la tabla 17.

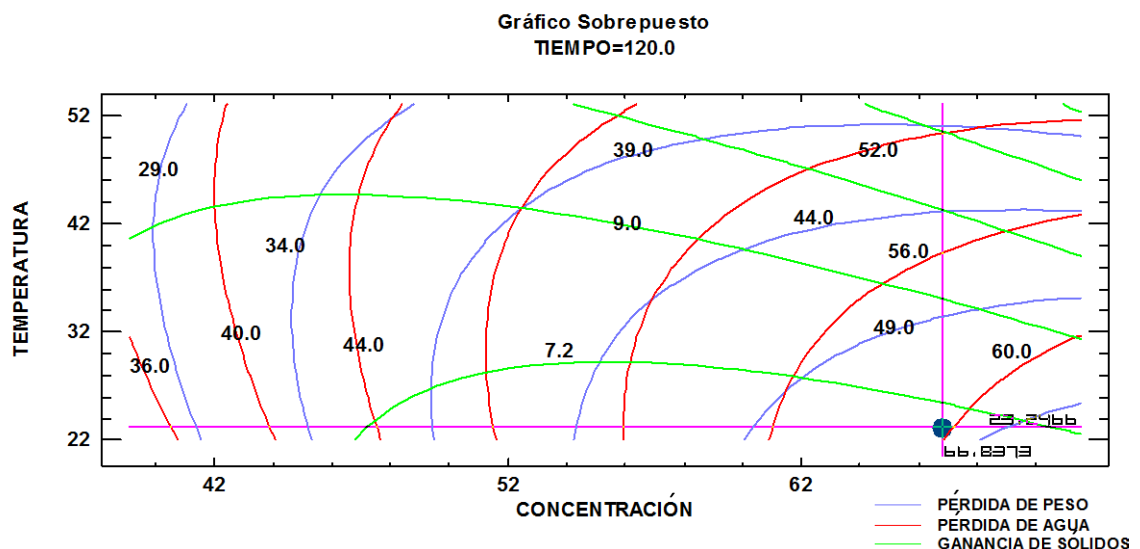


Figura 19. Gráfico de contornos superpuestos en el proceso de deshidratación osmótica

En la Tabla 17, muestra los resultados de los parámetros óptimos, se encontraron los siguientes parámetros óptimos concentración de sacarosa de 66.8 Brix, temperatura 23.2 °C y tiempo de inmersión 48.6 min, de las cuales, resultaron las siguientes respuestas óptimas del proceso de osmosis; pérdida de peso 50.14%, pérdida de agua 52.34 % y ganancia de solidos 2.20%. Las variables respuesta generan un índice de deseabilidad de 93.31%, según (Montgomery, 2002), si la respuesta esperada  $Y_n$  está en su meta u objetivo, entonces la deseabilidad es próximo a 1, y si la respuesta es fuera de la región entonces la deseabilidad global es igual a cero.

**Tabla 17.**  
*Parámetros óptimos, respuestas estimadas y deseabilidad optimizada*

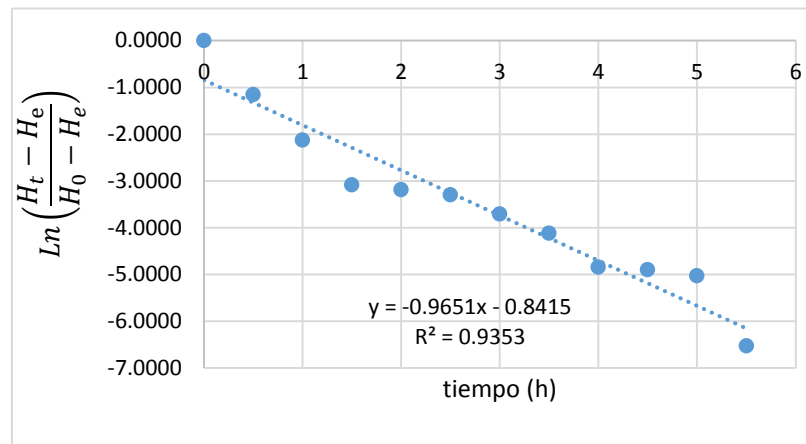
Nº	$X_1$ Concentración (°Brix)	$X_2$ Temperatura (°C)	$X_3$ Tiempo (min)	Pérdida de peso (%PP)	Pérdida de agua (%PA)	Ganancia de sólidos (%GS)	Deseabilidad global optimizada
1	66.8	23.2	48.6	50.14	52.34	2.20	0.933076

### 5.1.7 Determinación de difusividad efectiva de agua

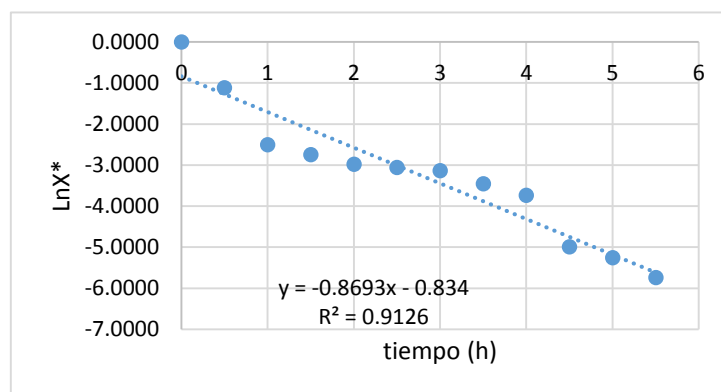
Para estimar la difusividad efectiva de agua ( $D_{e,w}$ ) en la deshidratación osmótica en láminas de mashua, se utilizó los parámetros óptimos citados en la Tabla 17 (Concentración de sacarosa 66.8 °Brix, temperatura 23.2 °C y tiempo cada 30 minutos hasta 360 minutos). Se utilizó la segunda ley de Fick modificado por Crank, para placas planas infinitas de lado L. Se determinó a partir de los datos obtenidos de humedad, longitud y espesor de la muestra de láminas de mashua Anexo 4 y Anexo 5. Además, se utilizó la Ecuación 9 presentada en el inciso 3.2.3.5.3 del marco teórico despejando esta ecuación tendremos la ecuación 24, la que nos permite determinar la difusividad en agua.

$$D_{e,w} = \frac{Pendiente \cdot 4 \left(\frac{L}{2}\right)^2}{\pi^2 \cdot t} \quad (24)$$

Para ello se graficó  $\ln\left(\frac{H_t - H_e}{H_0 - H_e}\right)$  respecto con el tiempo los que se muestran la figura 20; repetición 1 y figura 21; repetición 2, y de cuya línea de tendencia se obtuvo la pendiente que permitió determinar la difusividad efectiva de agua. Se realizaron por dos repeticiones, los datos experimentales se muestran en el Anexo 4 y Anexo 5.



**Figura 20.** Variación de  $\ln((H_t - H_e)/(H_0 - H_e))$  en función al tiempo a temperatura 23.2°C y concentración 66.8 °Brix en la determinación de difusividad efectiva de agua. Repetición 1.



**Figura 21.** Variación de  $\ln((H_t - H_e)/(H_0 - H_e))$  en función al tiempo a temperatura 23.2°C y concentración 66.8 °Brix en la determinación de difusividad efectiva de agua. Repetición 2.

Reemplazando los datos en la ecuación (24), se calculó la difusividad efectiva de agua. En la Tabla 18, se muestra el resultado de las repeticiones 1 y 2 del experimento a parámetros óptimos, teniendo la difusividad de agua promedio de  $3.87216 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ .

**Tabla 18.**

*Resultado de la difusividad efectiva de agua a parámetros óptimos*

Repeticiones	Concentración (°Brix)	Temperatura (°C)	Pendiente	Difusividad efectiva de agua ( $D_{ef,w} = \frac{m^2}{s}$ )
1	66.8	23.2	0.9651	$4.07438 \times 10^{-11}$
2	66.8	23.2	0.8693	$3.66994 \times 10^{-11}$
<b>Promedio</b>				$3.87216 \times 10^{-11}$

### 5.1.8 Determinación de difusividad efectiva de sólidos

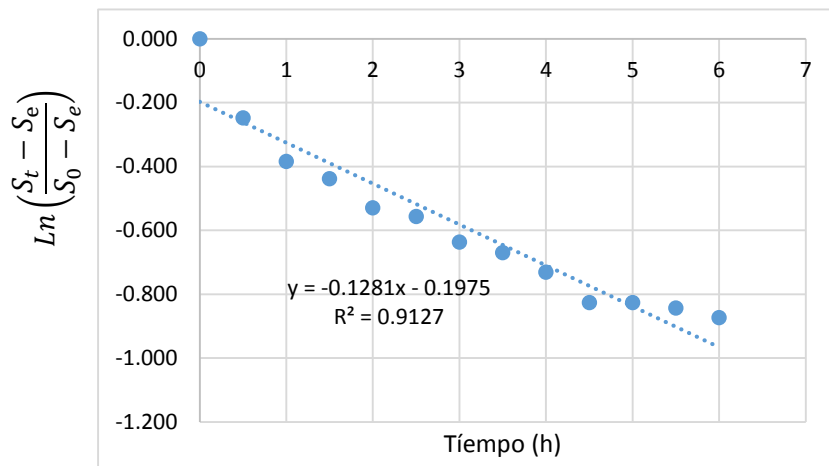
Para estimar la difusividad efectiva de sólidos ( $D_{e,ss}$ ) en la deshidratación osmótica en láminas de mashua, se utilizó los parámetros óptimos detalladas en la Tabla 17;



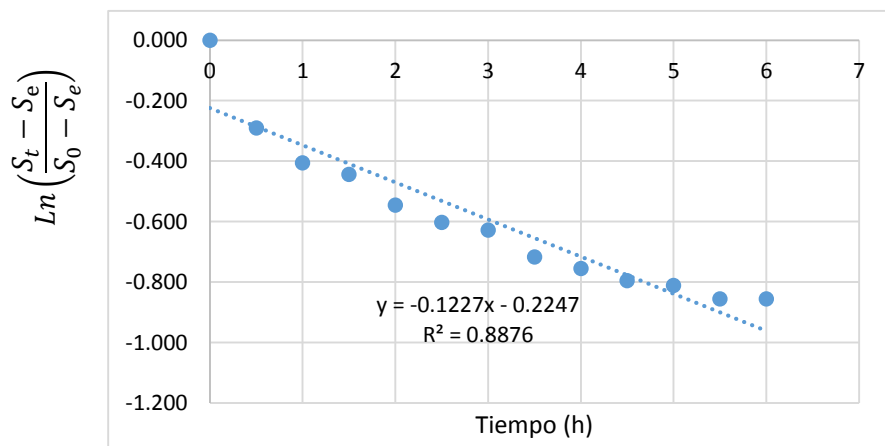
(Concentración de sacarosa 66.8 °Brix, temperatura 23.2 °C y tiempo cada 30 minutos hasta 360 minutos). Se aplicó la segunda ley de Fick modificada por Crank para placas planas infinitas de lado L. Se determinó a partir de los datos de concentración de sólidos iniciales de mashua antes de sumergir, concentración de sólidos solubles en el jarabe a diferentes tiempos y concentración de sólidos solubles de la mashua a diferentes tiempos en la deshidratación, longitud y espesor de la muestra de láminas de mashua, estos datos de muestran en el Anexo 6 y Anexo 7. Además, se utilizó la Ecuación 11 presentada en el inciso 3.2.3.5.3 del marco teórico despejando esta ecuación, tendremos la ecuación 25, la que nos permite determinar la difusividad en sólidos.

$$D_{e,ss} = \frac{\text{Pendiente} \cdot 4 \left(\frac{L}{2}\right)^2}{\pi^2 \cdot t} \quad (25)$$

Para ello se graficó  $\ln\left(\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e}\right)$  respecto al con el tiempo los que se muestran la figura 22 y figura 23, y de cuya línea de tendencia se obtuvo la pendiente que permitió determinar la difusividad efectiva de agua. Los datos experimentales se muestran en el Anexo 6 y Anexo 7.



**Figura 22.** Variación de  $\ln\left(\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e}\right)$  en función al tiempo (h) a temperatura 23.2°C y concentración 66.8 °Brix en la determinación de difusividad efectiva de sólidos. Repetición 1.



**Figura 23.** Variación de  $\ln\left(\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e}\right)$  en función al tiempo a temperatura 23.2°C y concentración 66.8 °Brix en la determinación de difusividad efectiva de sólidos. Repetición 2

Reemplazando los datos en la ecuación (25), se calculó la difusividad efectiva de sólidos. En la Tabla 19, Se presenta el resultado de las repeticiones 1 y 2 del experimento, obteniendo el promedio de difusividad efectiva de sólidos de  $5.29403 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

**Tabla 19.**

*Resultado de la difusividad efectiva de sólidos a parámetros óptimos*

<b>Repeticiones</b>	<b>Concentración (°Brix)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Pendiente</b>	<b>Difusividad efectiva de agua (<math>D_{ef,ss} = \frac{m^2}{s}</math>)</b>
<b>1</b>	<b>66.8</b>	<b>23.2</b>	0.1281	$5.40802 \times 10^{-12}$
<b>2</b>	<b>66.8</b>	<b>23.2</b>	0.1227	$5.18005 \times 10^{-12}$
			<b>Promedio</b>	$5.29403 \times 10^{-12}$

## 5.2 Contrastación de hipótesis

### 5.2.1 Hipótesis estadística

#### Hipótesis general

**H<sub>0</sub>** = La inmersión de láminas de mashua en solución osmótica de sacarosa a (concentraciones 40 – 60° Brix) a temperaturas en el proceso (30-50°C) y tiempos de inmersión (60-180) permitirá la deshidratación.

**H<sub>1</sub>**= La inmersión de láminas de mashua en solución osmótica de sacarosa a (concentraciones 40 – 60° Brix) a temperaturas en el proceso (30-50°C) y tiempos de inmersión (60-180) no permitirá la deshidratación de estas.

- Los resultados indican que a una concentración de sacarosa 66.8 ° Brix, temperatura 23.2°C y tiempo de 48.6 minutos, facilitan una máxima pérdida de peso de 50.14%, máxima pérdida de agua 52.34% y mínima ganancia de sólidos de 2.20 %, estos resultados se muestran en la Tabla 17. Por lo tanto se acepta la hipótesis nula (H<sub>0</sub>).

#### Hipótesis específico 1

**H<sub>0</sub>** = La concentración de sacarosa, temperatura del medio osmótico y tiempo de inmersión tendrá un efecto en la pérdida de peso (%PP), pérdida de agua (%PA) y ganancia de sólidos (%GS) durante la deshidratación osmótica en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*).

**H<sub>1</sub>** = La concentración de sacarosa, temperatura del medio osmótico y tiempo de inmersión tendrá no efecto en la pérdida de peso (%PP), pérdida de agua (%PA) y ganancia de sólidos (%GS) durante la deshidratación osmótica en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*).

De las Tablas 13; ANOVA para la variable de pérdida de peso, la concentración de sacarosa, temperaturas en términos lineales son significativas y tiempo cuadrático es significativa valor-P menor que 0.05. De la Tabla 14, ANOVA para la variable de respuesta pérdida de agua, la concentración de sacarosa, tiempo en términos lineales y tiempo en términos cuadráticos son significativos valor-P menor que 0.05. Tabla 15, ANOVA para la variable de respuesta ganancia de sólidos, la concentración y temperatura en términos líneas son en donde valor-P menor que 0.05. Estas explicaciones demuestran que existe un efecto en las variables de respuestas, por lo tanto, se acepta la hipótesis H<sub>0</sub>.

### 5.3 Discusión de resultados

#### 5.3.1 Análisis de las características fisicoquímicas de mashua

Los datos adquiridos para la composición fisicoquímica de mashua se muestra en la Tabla 11, estos datos presentan un similitud con los autores (Collazos *et al.*, 2009; Reyes, *et al.*, 2017) donde determinaron la humedad 88%, proteína 1.5%, grasa 0.7%, carbohidratos totales 9.8 %, ceniza de 0.6 % fibra 0.9 %. Respecto a sólidos solubles según (Espin, *et al.*, 2001) obtuvo 8.5 ° Brix para mashua amarillo, en el presente estudio se halló de 8.0 ° Brix. Por otro el pH se encuentra dentro del rango al respecto (Paucar, 2014) encontró Ph 6.67 y 6.13 para las variedades Amarilla y Amarilla Zapallo de mashua respectivamente. De la misma manera (Cuya, 2009), también determinó en su estudio la accesión amarilla encontró un valor de pH igual a 6.22. Finalmente con respecto a la acidez titulable (Consuelo, 2017) determinó 1.15 g de ácido ascórbico/ 100 g. lo que coincide con los datos determinados en este trabajo.

#### 5.3.2 Análisis de pérdida de peso (%PP)

La pérdida de peso es una dimensión indirecta de la perdida de agua en el alimento deshidratado por osmosis, y que se refleja la reducción del volumen del alimento con lo que facilita el almacenamiento y traslado del alimento. Los análisis estadísticos se muestran en la tabla 13, análisis de varianza ANOVA para la pérdida de peso (%PP), donde se observa el efecto significativamente ( $p < 0.05$ ) por los términos lineales de concentración de sacarosa y temperatura, y en términos cuadráticos del tiempo, lo que significa una repercusión positiva en la pérdida de peso, así a mayor concentración de sacarosa, temperatura y tiempos relativamente bajos se obtendrá mayor pérdida de peso. Este mismo comportamiento encontró (Bautista, 2018) en la deshidratación osmótica en ají dulce (*Capsicum chinense Jacp.*), utilizó la sacarosa como agente osmótico, llegando a concluir que la pérdida de peso es mayor cuando se aplica altas concentraciones de sacarosa (50 ° Brix) y la temperatura experimental más baja (35°C), se observar este mismo efecto en el presente estudio. Según (Bambicha, *et al.*, 2012), estudió los efectos de sacarosa, tiempo y cloruro de sodio en placas planas de calabacita (*Cucúrbita Moschata*) mediante la metodología de superficie de respuesta. Los estudios se realizaron a temperatura bajas de 30 °C, además se fijó la agitación de 100 rpm. Encontrando que los términos lineales de concentración, tiempo y cloruro de sodio y en términos cuadráticos la concentración de sacarosa y cloruro de sodio tienen un efecto significativo en la variable de respuesta pérdida de peso. por otra parte (Allcca, 2017), estudió el efecto de temperatura y concentración en la deshidratación osmótica en oca (*Oxalis tuberosa*) en forma de cubos 1x1x1 cm de arista, dicho autor llegó a concluir que la concentración de 50 °Brix y temperatura de 30 °C estimó mayor pérdida de peso, además afirma que una mayor concentración y temperatura conduciría a la obtención de un producto más deshidratado, reflejada en pérdida de peso. Del mismo modo (Alvarado, 2013), investigó láminas de tomate de Árbol



(*Cyphomandra betacea*) sometiendo a un proceso de osmosis. Concluyendo que la temperatura y concentración tiene un efecto significativo en la pérdida de peso. Además, evidenció que las primeras 3 horas presento mayor pérdida en pérdida de peso, y posteriores a 3 horas va disminuyendo el peso del alimento, enfatiza lo ocurrido al sistema que empieza a equilibrarse por tanto la presión osmótica se reduce hasta tender a equilibrio entre la solución osmótica y el alimento. Este mismo efecto se puede observar en el presente estudio, que el tiempo de inmersión es uno de los factores que influyen en la deshidratación osmótica en láminas de mashua. Al respecto (Naranjo, 2015), estudió la deshidratación osmóticas en láminas de zanahorias mediante la metodología de superficie de respuesta, concluyendo que los términos lineales de concentración de sacarosa y el tiempo de inmersión influye significativamente en la pérdida de peso. Por lo que podemos deducir que la pérdida de peso en la deshidratación osmótica de mashua, está directamente relacionada con el aumento de concentración de sacarosa, temperatura y el tiempo de inmersión.

### 5.3.3 Análisis de pérdida de agua (%PA)

La salida de agua del alimento en la deshidratación osmótica es un parámetro muy necesario. En la Tabla 14 (análisis de varianza ANOVA), se observa que la pérdida de agua %PA se afecta significativamente ( $p < 0.05$ ) por los términos lineales de concentración de sacarosa y tiempo de inmersión y en términos cuadráticos el tiempo de inmersión. Resultados similares se observaron en los estudios de (Naranjo, 2015) donde evaluó los efectos de la concentración de sacarosa y tiempo de inmersión en láminas de zanahorias en la deshidratación osmótica mediante la metodología de superficie de respuesta. Encontrando un efecto significativo de ( $p < 0,05$ ) en la concentración de solución sacarosa y tiempo en términos lineales, además la concentración en su forma cuadrática en la pérdida de agua en láminas de zanahorias. Este hecho podemos encontrar en el presente estudio, sin embargo, la concentración en términos cuadráticos no fue significativa. Por otro lado (Sandoval, 2016), estudió la deshidratación osmótica en trozos de manzana, encontrando las variables de concentración de glucosa, la temperatura y el tiempo de procesamiento, en términos lineales, interacciones y cuadráticas estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95% para la pérdida de agua. A estos estudios se suman otros investigadores entendiendo los términos del suceso, (Perez M. y Pimentel J., 2013) menciona que las elevadas concentraciones de soluciones hipertónicas provoca un incremento de pérdida de agua en el producto deshidratado. Esto se debe a que las altas concentraciones realizan grandes fuerzas impulsoras, gracias a esto el tiempo de desarrollo en la deshidratación es corta y las células superficiales del producto quedan muy deshidratadas. Otro de los efectos que genera la pérdida de agua es la permeabilidad y características estructurales de las paredes o membranas celulares. Al respecto (Yanqui y Maquera, 2010) menciona en la papaya las paredes celulares mayormente son de celulosa, fibras solubles y hemicelulosa lo que admite una considerable pérdida de agua. En el caso de



la estructura interna de la mashua, según (Espin, *et al.*, 2001), indica que está compuesto de hidratos de carbono en su mayoría como consecuencia de ello, predominan los polisacáridos sobre los azúcares mono y disacáridos, la textura firme debido a los principalmente a la rigidez estructural que les confieren las paredes celulares (celulosa e hemicelulosa), la presencia de esta estructura permitiría una mayor pérdida de agua. El tiempo también es uno de los factores que influyen en la pérdida de agua al respecto (Suca, 2008) la tasa de pérdida de agua en general veces es alta los primeros 40-60 minutos, luego mengua drásticamente en respuesta a esto, existe una progresiva disminución de la presión osmótica.

#### 5.3.4 Análisis de ganancia de sólidos (%GS)

En la Tabla 15, análisis de varianza ANOVA para ganancia de sólidos se observa que los términos lineales de temperatura y tiempo de inmersión afectan significativamente ( $p < 0.05$ ) sobre la ganancia de sólidos. Estos resultados están de acuerdo con (Yadav, 2012) que estudió en la deshidratación osmótica en láminas de duraznos utilizando la metodología de superficie de respuestas, encontrando que los términos lineales del tiempo y la temperatura fueron significativos al ( $p < 0.05$ ), mientras que la concentración de sacarosa significativo. Sin embargo, el efecto de términos interactivo sobre la ganancia de soluto no fue significativo, la evaluación de términos cuadráticos mostró un efecto significativo a un nivel de significación del 1%. Así mismo (Naranjo, 2015), en su investigación de deshidratación osmótica en láminas zanahoria, con el objetivo de encontrar los parámetros óptimos utilizó la metodología de superficie de respuestas, evidenciando tanto el tiempo de inmersión y concentración de la solución de sacarosa en términos lineales, además el tiempo de inmersión en términos cuadráticos tuvieron un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) en la ganancia de sólidos. Asimismo (Sandoval, 2016), estudió la deshidratación osmótica en trozos de manzana, llegó a evidenciar que los tratamientos de altas temperaturas y concentraciones de glucosa tienen mayor ganancia de sólidos, en cambio a altas concentraciones, tiempo de inmersión cortas y temperaturas relativamente intermedias se consigue menor cantidad la ganancia de sólidos. Por otra parte, sobre la influencia de temperatura en el proceso de deshidratación osmótica (Suca, 2008), explica que, al incrementar la temperatura, disminuye la viscosidad de la solución osmótica facilitando el ingreso al interior del tejido alimentario. Este mismo fenómeno justifica (Amiel, 2007), que la temperatura influye en la ganancia de sólidos porque las elevadas temperaturas afectan a la permeabilidad de la membrana celular, en consecuencia, a esto existe mayor ingreso de solutos en el producto. Además (Leyva y Ruiz, 2014) menciona a (Farkas y Lazar, 1969), que la velocidad de transferencia de masa se intensifica con la temperatura y sobre 45 °C comienza el deterioro de aromas y pardeamiento enzimático. Sobre los 60 °C cambian las características de los tejidos beneficiando a la ganancia de sólidos. Por otra parte, en referencia al tiempo de inmersión (Torres *et al.*, 2013), menciona que el tiempo favorece en la ganancia



de sólidos, sin embargo, los tiempos muy prolongados causan impregnación de sólidos en el producto.

### 5.3.5 Análisis de optimización de las láminas de mashua

Con la finalidad de encontrar los parámetros óptimos en la deshidratación osmótica en láminas de mashua, se utilizó la función de deseabilidad global de las múltiples respuestas en el software STATGRAPHICS Centurión XVI.II, se considerando las siguientes condiciones; lograr una máxima ganancia de pérdida de peso, máxima pérdida de agua y una mínima ganancia de sólidos. En la tabla 17, muestra la deseabilidad global para la deshidratación osmótica en láminas de mashua, se aprecia los siguientes resultados; concentración de sacarosa de 66.8 °Brix, temperatura 23.2 °C y tiempo de inmersión 48.6 minutos, del cual resultaron las siguientes respuestas óptimas de pérdida de peso de 50.14 %, pérdida de agua de 52.34 %, ganancia de sólidos de 2.20%. Estos resultados guardan relación con los autores mencionados en los siguientes párrafos. según (Naranjo, 2015), estudió las condiciones de deshidratación osmótica en láminas de zanahoria mediante la MRS. Concluyendo que las condiciones óptimas son de 64°Brix de solución de sacarosa y 35 minutos de inmersión, respectivamente. Estos parámetros posibilitaron alcanzar el 29,34% de pérdida de peso, el 12,45% de ganancia de sólidos y el 40,70% de pérdida de humedad. Por otra parte (Sandoval, 2016), determinó las condiciones óptimas en la deshidratación osmótica de manzana en forma cilíndricas mediante la metodología de superficie de respuesta, encontrando los siguientes parámetros. Temperatura 37.1°C, solución de glucosa 59% y tiempo 217.3 min, a estas condiciones logró la máxima pérdida de agua 27,3% y una mínima ganancia de sólidos de 1,75%. De la misma manera (Yadav, *et al.*, 2012) utilizó la metodología de superficie de respuesta en la deshidratación osmótica en rodajas de melocotón (*Prunus perica*), obteniendo las condiciones óptimas de 69.9 °Brix de concentración de sacarosa, 3.97 horas de duración del proceso y 37.63 °C de temperatura del proceso de deshidratación osmótica a estos punto obtuvo la máxima pérdida de agua 28.42% y mínima ganancia de sólidos 8.39%. Así también (Bambicha, *et al.*, 2012) utilizando la metodología de superficie de respuesta determinó que a 60° Brix y 6.39% de concentraciones de sacarosa y sal respectivamente, y un tiempo de proceso de 2 h y 24 minutos de las cuales se obtuvieron la máxima pérdida de pérdida de agua de 54.48%, máxima pérdida de peso 48,59% y mínima ganancia de 9.05%. Se ha evidenciado que las investigaciones comparadas con los resultados del presente estudio, son distinto, debido a la diferencia en el proceso de osmosis, por consiguiente, la optimización no es comparables, por lo tanto, en este estudio se menciona un nuevo aporte al proceso de deshidratación osmótica en la mashua.



### 5.3.6 Análisis de difusividad efectiva de agua ( $D_{ef,w}$ )

Uno de los métodos que permite determinar la difusividad efectiva de agua es el modelo fenomenológico basado en la segunda ley de Fick, modificada por (Crank, 1975). Nos permite obtener un valor que representa la facilidad de movimiento de agua desde la matriz del alimento hacia la solución de sacarosa. En la Tabla 18, se muestra el promedio de difusividad efectiva del agua ( $D_{ef,w}$ ) de  $3.87216 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s. a los parámetros óptimos (concentración 66.8°Brix, temperatura 23.3°C y tiempo constante cada 30 minutos hasta 360 minutos) en deshidratación osmótica en láminas de mashua. Resultados similares encontró (Silva, *et al.*, 2014) en su estudio de cinética de deshidratación osmótica en cubos de 1 cm de arista de papa (*Solanum tuberosum L.*) a la vez determinó la difusividad de agua y la cinética de deshidratación osmótica. Para ello utilizó factores de temperatura (30 °C, 40 °C y 50 °C), mezcla de sacarosa (40 %) y NaCl<sub>2</sub> de 5 % en la solución hipertónica. Además, empleó agitación de 120 ±5 rpm y proporción masa/solución de 1:4. Aplicó el modelo empírico de Azuara para difusividad de agua. Concluyendo que la difusividad efectiva de agua promedio es de 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s. Así también (Martinez, 2012) estudió el efecto de la concentración y la temperatura en la deshidratación osmótica del tomate de árbol. Utilizó concentraciones de (50°, 55° y 60° Brix) y temperaturas de (25°, 35°, 45° y 55 °C). En tanto los valores establecidos en los diferentes tratamientos y condiciones para la difusividad efectiva de agua se encuentra en el orden de 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s. Por otro lado (Allcca, 2017), ha estudiado trozos de oca en soluciones hipertónicas de sacarosa y temperaturas, determinó el coeficiente de difusividad para agua en rango de  $3.75 \times 10^{-11}$  (40 °Brix, 15°C) y  $1.13 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s (50 °Brix, 30°C) respectivamente, coincidiendo con los resultados de esta investigación. Además (Marinos, 2006), mencionado por (Cardoza y Custodio, 2015) indica que la difusividad de agua de los alimentos normalmente se ubica en un rango de 10<sup>-13</sup> a 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, se aprecia en el presente estudio la ubicación dentro de este rango, aunque los valores son idénticos con otros autores. Al respecto hace hincapié (Saravacos y Maroulis, 2001) mencionado por (Polo, 2008), que la estimación de difusividad de agua en alimento, generalmente son escasos, además no son concordantes, esto se debe a muchos factores como la variedad de métodos empleados en determinar la difusividad, variedades de estructuras en alimentos. Además (Djeveh *et al.* 1989) mencionada por (Leyva y Ruiz, 2014), asegura que es difícil tener una idea precisa de mecanismo de difusión en alimentos por que presentan una estructura heterogénea.

### 5.3.7 Análisis de difusividad efectiva de sólidos ( $D_{ef,ss}$ )

La difusividad efectiva de sólidos es una de las propiedades de transporte en la matriz del alimento cuando se somete a un proceso de osmosis, mide la facilidad con el que se mueven las moléculas de la solución sacarosa hacia la matriz de láminas de mashua. Para calcular la difusividad de sólidos, se ha desarrollado mediante el modelo fenomenológico basado en la



segunda ley de fick, modificada por (Crank, 1975). En la Tabla 19, se muestra el promedio difusividad efectiva de solidos ( $D_{ef,ss}$ ) de  $5.29403 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  a parámetros óptimos (concentración 66.8°Brix, temperatura 23.3°C y tiempo constante cada 30 minutos hasta 360 minutos). Resultados similares encontró (Silva, *et al.*, 2014), quien estudió la cinética de deshidratación osmótica en cubos de 1 cm de arista de papa (*Solanum tuberosum L.*). A diferentes temperaturas (30 °C, 40 °C y 50 °C), concentración de 40 °Brix, 5% de cloruro de calcio y una relación producto-jarabe de solución de 1:4. Llegó a concluir que la difusividad efectiva de solidos promedios es de  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  utilizando el modelo Azuara. Así mismo (Vega, *et al.*, 2007) estudió la difusividad de sólidos en papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*), aplicando las ecuaciones difusionales integradas de la segunda ley de Fick, asumiendo cubitos de papaya en láminas infinitas, llegando a concluir los valores difusividad efectiva de solidos de  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . y añade que la difusividad efectiva de solidos aumenta a medida la concentración aumenta, sin embargo la influencia de la temperatura no es del todo claro. Otro estudio realizado por (Gamboa y Silva, 2018) en arándano de variedad Biloxi (*Vaccinium corymbosum L.*), con el objetivo de determinar la temperatura y concentración óptimas del proceso de deshidratación, adicionalmente estudio la difusividad de agua y sólidos, utilizando el modelo fenomenológico basado en la segunda ley de Fick para la difusión en estado no estacionario. Llegando a concluir que la difusividad efectiva de solidos de  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . Acotando a estos resultados (Lazarides, *et al.*, 1995) menciona a temperaturas bajas, generalmente es escasa la ganancia de sólidos, debido a la formación de una capa externa de células colapsada, que actúa como barrera impidiendo el flujo de componentes. Por otro lado la concentración es de igual importancia en la difusión de sólidos, al respecto, (Leyva y Ruiz, 2014) menciona a (Lereci *et al* 1985), asegura que la impregnación del soluto en el producto depende de la concentración del agente osmótico, tiempo de proceso, dimensión del alimento, superficie de contacto de alimento, agitación y presión del sistema entre otros. Esto indica que la difusividad de solidos a través de láminas mashua es inferior con las investigaciones comparadas por lo se asume principalmente a la temperatura de 23.3 °C es menor que todos los datos comparados.



## CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

La metodología de superficie de respuesta permitió encontrar los parámetros óptimos en la deshidratación osmótica en láminas de mashua, los cuales fueron; concentración de sacarosa 66.8 °Brix, temperatura 23.2 °C y tiempo de inmersión 48.6 minutos, a estos parámetros óptimos, se encontraron las siguientes respuestas óptimas del proceso; máxima pérdida de peso 50.14 % lo que ilustra la mayor disminución de peso de la matriz de láminas de mashua por presión osmótica que ejerce la solución de sacarosa, máxima pérdida de agua de 52.34 %, es decir, mayor cantidad de agua que pierde la mashua por causa de la presión osmótica que ejerce la solución de sacarosa, y una mínima ganancia de sólidos 2.20% es decir menor cantidad de azúcar que penetra en la matriz de láminas de mashua.

La concentración de sacarosa, temperatura del medio osmótico y tiempo de inmersión fueron factores que, si influyeron en la deshidratación osmótica por lo que permitió la deshidratación de estas, se ha observado que existe un efecto significativo (valor-P menor que 0.05) de las variables independientes en la pérdida de peso (%PP), pérdida de agua (%PA) y ganancia de sólidos (%GS) durante la deshidratación osmótica en láminas de mashua (*Tropaeolum tuberosum*).

Los valores de difusividades fueron determinadas mediante el modelo matemático de Crank para láminas, estas se calcularon a los parámetros óptimos (concentración sacarosa 66.8 °Brix, temperatura 23.2 °C y tiempo de inmersión cada 30 minutos hasta 360 minutos), resultando los siguientes promedios; difusividad de agua de  $3.87216 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  y difusividad de sólidos de  $5.29403 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .



## 6.2 Recomendaciones

Realizar estudios aplicando otros agentes osmodeshidratantes como la miel, glucosa, combinación sacarosa - cloruro de sodio y otros en la deshidratación osmótica de mashua. Además, incorporar otros factores como la presión, tamaño y forma, relación producto solución osmótica.

Evaluar análisis del tiempo de vida útil, análisis microbiológico y fisicoquímicas después de someter a un proceso de deshidratación osmótica las láminas de mashua.

Realizar estudios en la deshidratación osmótica en la mashua aplicando métodos empíricos como Peleg, Magee y Azuara y comparar la eficiencia de estos métodos la cinética de deshidratación osmótica de mashua.

Reutilizar los residuos generados como los remanentes de la selección, pelado en la mashua y el sobrante de solución osmótica usar en la elaboración de bioetanol.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARADO, J. *Principios de ingeniería aplicados a alimentos*. Edtion ed. Ecuador. Ambato, 2013. ISBN 978-9942-11-507-2.
- ALZAMORA, S. M., GERSCHENSON L. N., VIDALES S. L.y NIETO A. Structural changes in the minimal processing of fruits: some effects of blanching and sugar impregnation. *Food engineering* 2000, 1997, 117-139.
- ALLCCA, M. Influencia de la concentración de sacarosa y temperatura en la deshidratación osmótica de la oca (*Oxalis Tuberosa*). Tesis - Pregrado Universidad Nacional Jose Maria Arguedas, 2017.
- ARENAS, P.y SAMAMTHA E. Caracterización morfológica y molecular de mashua (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz y Pavón) de los departamentos de Cusco y Cajamarca. Post- grado Universidad Nacional Agraria la Molina 2015.
- ARQUIPA, R., TRIGO R., BOSQUE H., MERCADO G., et al. El Isaño (*Tropaeolum tuberosum*) un cultivo de consumo y medicina tradicional en Huatacana para el beneficio de la poblacion boliviana. *Revista de Investigacion e Innovacion Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 2016, 3(2), 146-151.
- BADUI, S. *Química de los alimentos*. Edtion ed.: Pearson educación, 2006. ISBN 9702606705.
- BAMBICHA, R., AGNELLI M.y MASCHERONI R. Optimización del proceso de deshidratación osmotica de calabacita en soluciones ternarias. *Avances en Ciencias e Ingenieria*, 2012, 3(2).
- BARBOSA, G.y VEGA H. *Deshidratación de alimentos*. Edtion ed., 2000. ISBN 8420009180.
- BAUTISTA, F. Evaluacion del proceso de deshidratacion osmotica del fruto del aji amazonico (*Capsicum chinense Jacq*), por la metodologia de superficie de respuesta. UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE DIOS, 2018.
- BENAVIDES, J. Efectos de la deshidratación osmótica y secado sobre las características físico químicas y sensoriales de snack de mashua *tropaeolum tuberosum* Universidad Tecnica del Norte, 2017.
- BISWAL, R.y BOZORGMEHR K. Mass transfer in mixed solute osmotic dehydration of apple rings. *Transactions of the ASAE*, 1992, 35(1), 257-262.
- BOX, J.y WILSON W. On the Experimental Attainment of Optimun Conditions. . *journal of the Royal Statistical society. Series B (methodological)*, 1951, 13(1), 1-45.
- CARDOZA, J.y CUSTODIO N. Modelamiento matemático para predecir el comportamiento de la deshidratación osmótica de la piña MD2 (*Ananas comosus* variedad Comosus). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2015.
- CLEMENTE, G. Efecto de la contracción en la cinética de secado de músculos de jamón. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2003.
- COLINA, M. *Deshidratación de alimentos*. edited by TRILLAS. Edtion ed. México DF., 2010. ISBN 6071704014.
- COLLAZOS, C., ALVISUR E., VASQUEZ J., HERRERA N., et al. *Tablas peruanas de composición de alimentos; Centro Nacional de Alimentación y Nutrición - Instituto Nacional de Salud*. Edtion ed. Lima, Peru, 2009.



CONSUELO, F. Efecto del estrés abiótico post-cosecha en las características físico-químicas y de algunos metabolitos primarios de mashua morada (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pavón). Universidad Nacional Agraria la Molina, 2017.

CORNEJO, M. Deshidratación de rebanadas de aguacate variedad Hass por el método OSMO-VAC (osmótico-vacio) y evaluación de calidad. Maestría Politécnico Nacional Mexico, 2010.

CUYA, R. Efecto de secado en bandeja y atomización sobre la actividad antioxidante de la mashua (*Tropaeolum tuberosum* R & P) 2009.

DE ZAN, M., VERA L.y GOICOECHEA H. Diseño experimental y optimización de sistemas con múltiples respuestas In *Metodología de Superficie de Respuestas*. Argentina, 2016, vol. 2019, p. [https://www.fcb.unl.edu.ar/laboratorios/ladaq/wp-content/uploads/2016/06/3-RSM\\_Mezclas\\_2016.pdf](https://www.fcb.unl.edu.ar/laboratorios/ladaq/wp-content/uploads/2016/06/3-RSM_Mezclas_2016.pdf).

DELLA, P.y MASCHERONI R. Deshidratación de papas por métodos combinados de secado: deshidratación osmótica, secado por microondas y convección con aire caliente. *Proyecciones*.(Argentina), 2011, 9(2), 11-26.

DJELVEH, G., GROS J.y BORIES B. An improvement of the cell diffusion method for the rapid determination of diffusion constants in gels or foods. *Journal of Food science*, 1989, 54(1), 166-169.

ESPIN, S., BRITO B., VILLACRES E., RUBIO A., et al. Composición química, valor nutricional y usos potenciales de siete especies de raíces y tubérculos andinos. *Acta científica Ecuatoriana*, 2001, 7(1), 49-63.

FRIES, A.y TAPIA M. *Guía de campo de los cultivos andinos*. Edtion ed.: FAO, ANPE-PERÚ, 2007. ISBN 9253056827.

GAMBOA, W.y SILVA J. Determinación de la temperatura y concentración de la solución osmótica en la deshidratación del arandano (*Vaccinium corymbosum* l.). Pre-Grado. Universidad Nacional del Santa., 2018.

GEANKOPLIS, C. J. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Edtion ed.: Compañía Editorial Continental, 1998. ISBN 9682613167.

GIANGIACOMO, R., TORREGGIANI D.y ABBO E. Osmotic dehydration of fruit: PART 1. Sugars exchange between fruit and extracting syrups 1. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1987, 11(3), 183-195.

GOMEZ, L.y CEVALLOS G. Efecto de la micorrización y la abonadura orgánica en el cultivo de Mashua (*tropaeolum tuberosum*) en la variedad amarilla tardía en la zona de Caranqui, provincia de Imbabura. Pre- grado. Universidad Tecnica de Babahoyo., 2015.

GRAU, A., ORTEGA D., NIETO C.y HERMANN M. Mashua (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pav.). Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 25. International Potato Center, Lima, Peru/International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy. 2003.

GUTIERREZ, H.y DE LA VARA R. *Analisis y diseño de experimentos*. Edtion ed. Guanajuato, Mexico: McGraw-Hill, 2012. ISBN 6071507251.

INEI. compendio Estadístico Peru 2015. *Agrario* [Type of Work]. 2015. Available from Internet:<[https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1253/cap12/ind12.htm](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1253/cap12/ind12.htm)>.

ISLAM, M.y FLINK J. Dehydration of potato: II. Osmotic concentration and its effect on air drying behaviour. *International Journal of Food Science & Technology*, 1982, 17(3), 387-403.



- LAZARIDES, H., FITO P., CHIRALT A., GEKAS V., et al. Advances in osmotic dehydration. In *Minimal Processing of Food and Process Optimization*. CRC Press, Boca-Ratón, 1999, p. 175-200.
- LAZARIDES, H. N., KATSANIDIS E.y NICKOLAIDIS A. Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. *Journal of food Engineering*, 1995, 25(2), 151-166.
- LENART, A.y FLINK J. Osmotic concentration of potato. I. Criteria for the end-point of the osmosis process. . *International Journal of Food Science & Technology*, 1984, 19(1), 45-63.
- LERICI, C., PEPE M.y PINNAVAIA G. The osmotic dehydration of fruits,[1]. Results obtained in laboratory experiments. *Industria Conserve*, 1977.
- LEVI, A., GAGEL S.y JUVEN B. Intermediate moisture tropical fruit products for developing countries. Technological data on papaya. *International Journal of Food Science & Technology*, 1983, 18(6), 667-685.
- LEYVA, J.y RUIZ M. Determinación de los coeficientes de difusividad másica en la deshidratación osmótica del pepino dulce (*solanummuricatum aiton*). Pre- grado. Universidad Nacional del Centro del Peru., 2014.
- LONCIN, M. Diffusion phenomena in solids. *Food process engineering*, 1980, 1, 354-363.
- LOPEZ, A. Optimización estadística del tiempo de vida de anaquel de Litchi y el nopal. Tesis Maestría Universidad Autónoma Metropolitana, Mexico, 2015.
- MANRIQUE, I., ARBIZU C., VIVANCI F., GONZALES R., et al. *Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pav. Colección de germoplasma de mashua conservada en el Centro Internacional de la Papa (CIP), 2013.
- MARTINEZ, C. Efecto de la Concentración y la Temperatura en la Deshidratación Osmótica de Tomate de árbol (*Cyphomandra betacea*). Universidad Técnica de Ambato, 2012.
- MARTÍNEZ, M. Cambios físico-químicos en manzana Granny Smith asociados a la impregnación a vacío. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 1998.
- MESTAS, M.y QUISPE A. Optimización de los parámetros de la deshidratación osmótica y rehidratación de la cocona (*solanum sessiliflorum dunal*) y de tomate de árbol (*solanum betaceum*). Pregrado Universidad Nacional del Altiplano, 2016.
- MOLANO, C., SERNA C.y CASTAÑO J. Deshidratación de piña variedad Cayena Lisa por métodos combinados. Caldas, Colombia: 1996.
- MONTGOMERY, D. *Diseño y análisis de experimentos*. Edtion ed. Balderas, Mexico: LIMUSA WILEY, 2002.
- NAKAMURA, Y.y MIYOSHI N. Cell death induction by isothiocyanates and their underlying molecular mechanisms. *Biofactors*, 2006, 26(2), 123-134.
- NARANJO, C. Optimización de un proceso de fritura de zanahoria. Universidad Central de Ecuador, 2015.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL *Lost crops of the Incas: little-known plants of the Andes with promise for worldwide cultivation*. Edtion ed.: National Academies Press, 1989. ISBN 030904264X.
- OQUENDO, J. D. Optimización de las condiciones de operación de tratamientos osmóticos destinados al procesado mínimo de mango (*Mangifera indica* L.). Doctorado. Universitat Politècnica de València, 2007.



OZDEMIR, M., OZEN B. F., DOCK L. L.y FLOROS J. D. Optimization of osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(10), 2044-2050.

PARJOKO, A., RAHMAN M., BUCKLE K., PERERA C., et al. Osmotic dehydration kinetics of pineapple wedges using palm sugar. *LWT-Food Science and Technology*, 1996, 29(5-6), 452-459.

PEREZ M.y PIMENTEL J. *Transferencia de Masa I*. edited by E.O.S. ROMÁN. Edtion ed. Puno, Peru, 2013.

POLO, C. Efecto de la contracción en la cinética de secado de músculos de jamón (Doctoral dissertation). Tesis, Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2008.

PONTING, J. Osmotic dehydration of fruits. *Food Technol.*, 1966, 20, 125-128.

RAMÓN, F. Efecto del estrés abiótico post-cosecha en las características físico-químicas y de algunos metabolitos primarios de mashua morada (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pavón). Pre-grado. Universidad Nacional Agraria la Molina., 2017.

RAOULT, W.y ANNE L. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 1994, 5(8), 255-260.

REYES, M., GOMEZ I.y ESPINOZA C. *Tablas peruanas de composición de alimentos*. Edtion ed. Lima, Peru: Centro Nacional de Alimentacion y Nutrición- Instituto Nacional de Salud, 2017. ISBN 612310117X.

SANDOVAL, G. Optimizacion de la deshidratacion osmotica de cilindros de manzana (*Malus domestica* B.) por la metodologia de superficie de respuesta. Tesis Pregrado Universidad Nacional de Callao, 2016.

SHARMA, S., MULVANEY S.y RIZVI S. *Ingeniería de alimentos: Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*. edited by IERA. Edtion ed. Balderas, Mexico, 2003. ISBN 9681862031.

SIERRA, G. Estudio de la deshidratación osmótica de la arveja china (*pisum sativum l.*) mediante dos metodologías, directa e indirecta, como alternativa tecnologica al sector hortofrutícola del país. Tesis licenciatura. Facultad de Ingeniería Universidad de San Carlos, Guatemala, 2010.

SIFUENTES, E., ALBUJAR E., CONTRERAS S., LEÓN C., et al. *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola y Ganadera 2016*. Edtion ed. Lima, Peru, 2017.

SILVA, R., DELLA P., TISOCCO O.y MASCHERONI R. Efecto de la temperatura sobre la transferencia de agua durante la deshidratación osmótica de papa (*Solanum tuberosum L.*). Publicación de investigación y posgrado de la Facultad Regional Buenos Aires, 2014, 12(2), 37-44.

SINGH, P.y HELDMAN D. *Introducción a la ingeniería de los alimentos*. Edtion ed. Zaragoza, España: Editorial Acirbia, 1993. ISBN 84-200-0841-9.

SPIAZZI, E.y MASCHERONI R. Modelo de deshidratación osmótica de alimentos vegetales. *Mat-Serie A*, 2001, 4, 23-32.

SUCA, C. Manual de osmodeshidratacion de alimentos. In *Serie tecnologias emergentes en ciencias de alimentos*. Junin, Peru, 2008, vol. 1, p. 1-76.

TAPIA, M. Los Tuberculos Andinos (Una revisición de la investigación actualizada) en *Avances en las Investigaciones sobre Tuberculos Alimenticios de los Andes*. Editor: Mario Tapia. Proyecto INIAA CIID ACIDI. Bolivia, 1990, 45-61.



TEPPER, P. Transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de palta cv fuerte. Universidad de Chile. Facultad deficiencias Agracrias y Forestales. Santiago–Chile, 1996.

TORREGGIANI, D. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. Food Research International, 1993, 26(1), 59-68.

TORRES, D., SALVADOR D., BALTAZAR R.y SICHE R. Optimización de las condiciones de deshidratación osmotica de esparrago (*Asparagus officinalis*) utilizando la metodología de superficie de respuesta. Agroindustrial Science, 2013, 3(1), 7-18.

TORRES, J. Optimización de las condiciones de operación de tratamientos osmóticos destinados al procesado mínimo de mango (*Mangifera indica* L.). Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2007.

TRAVIS, A. Mashua. Ethnobotanical Leaflets, 1999, 1999(2), 3.

TRIVELLI, C.y SMITH S. Cultivos andinos y el mercado. In *El caso del ulluco en la sierra sur del Perú*. . Lima, Peru: Centro Internacional de la Papa (CIP). 1997.

VÁSQUEZ, J., GONZÁLES J.y PINO J. Decrease in spermatic parameters of mice treated with hydroalcoholic. Revista Peruana de Biología, 2012, 19(1), 089-093.

VEGA, A., PALACIOS M., BOGLIO F., PÁSSARO C., et al. Deshidratación osmótica de la papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*) e influencia de la temperatura y concentración de la solución sobre la cinética de transferencia de materia. Food Science and Technology, 2007, 27(3), 470-477.

WAIS, N. Secado combinado de frutas: Deshidratación osmótica y microondas. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de la Plata, 2011.

YADAV, B. S., YADAV R. B.y JATAIN M. Optimization of osmotic dehydration conditions of peach slices in sucrose solution using response surface methodology. Journal of food science and technology, 2012, 49(5), 547-555.

YANQUI , P.y MAQUERA V. Efecto del estado de madurez, concentración y temperatura en la difusión efectiva de sacarosa en papaya (*Carica papaya* L.) en el módulo de osmodeshidratacion. Pregrado Universidad Nacional del Altiplano, 2010.

ZHANG, Y.y TALALAY P. Mechanism of differential potencies of isothiocyanates as inducers of anticarcinogenic Phase 2 enzymes. Cancer research, 1998, 58(20), 4632-4639.



## ANEXOS



Anexo 1. Resultados del análisis fisicoquímico de la Mashua.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO  
FACULTAD DE CIENCIAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO  
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

INFORME DE ANÁLISIS

Nº0534-19-LAQ

SOLICITANTE: MARKO ANTONIO PEREZ AYMA  
MUESTRA : MASHUA  
CODIGO : A Y B  
COMUNIDAD : CAYPE  
DISTRITO : LAMBRAMA  
PROVINCIA : ABANCAY  
REGION : APURIMAC  
FECHA : C/16/09/2019

RESULTADO ANALISIS FISICOQUIMICO:

	A	B
Humedad %	85.23	87.80
Proteína %	1.22	1.23
Grasa %	0.82	0.77
Ceniza %	1.12	1.20
Fibra %	1.46	1.44
Carbohidratos %	11.61	9.00

Humedad, NTP 209.264  
Proteína, NTP 209.262  
Grasa, NTP 209.263  
Ceniza, NTP209.265  
Fibra, FAO 14/7  
Carbohidratos, Por diferencia.

Cusco, 25 de Setiembre, 2019

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco  
Unidad de Prestación de Servicios Académicos  
  
Melquíades Herrera Ariollca  
RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO



**Anexo 2.** Datos experimentales para determinar PP, PA Y GS, Repetición 1

<b>T</b>	(mi) Masa inicial (g)	(mf) Masa final (g)	(STo) Sólidos iniciales de mashua (°Brix)	(ST) Sólidos totales para determinado tiempo (°Brix)	PP (%) Pérdida de peso	GS (%) Ganancia de sólidos	PA (%) Pérdida de Agua
<b>1</b>	100.35	75.79		20.10	24.47	7.18	31.65
<b>2</b>	100.48	53.18		20.30	47.07	2.74	49.82
<b>3</b>	100.85	70.43		21.50	30.16	7.01	37.18
<b>4</b>	100.24	65.07		24.50	35.09	7.90	42.99
<b>5</b>	100.3	71.79		23.20	28.42	8.61	37.03
<b>6</b>	100.29	58.17		28.50	42.00	8.53	50.53
<b>7</b>	100.08	76.38		26.00	23.68	11.84	35.52
<b>8</b>	100.02	63.57		29.80	36.44	10.94	47.38
<b>9</b>	100.48	78.11	8.0	20.30	22.26	7.78	30.04
<b>10</b>	100.62	54.47		35.00	45.87	10.95	56.81
<b>11</b>	100.64	59.82		24.50	40.56	6.56	47.12
<b>12</b>	100.1	66.17		27.10	33.90	9.91	43.81
<b>13</b>	100.48	72.54		14.33	27.81	2.35	30.15
<b>14</b>	100.05	63.2		30.20	36.83	11.08	47.91
<b>15</b>	100.31	62.81		25.50	37.38	7.97	45.35
<b>16</b>	100.84	60.36		27.10	40.14	8.22	48.36
<b>17</b>	100.06	60.97		26.30	39.07	8.03	47.09
<b>18</b>	100.08	61.26		26.80	38.79	8.40	47.19

**Anexo 3.** Datos experimentales para determinar PP, PA Y GS, Repetición 2

<b>T</b>	(mi) Masa inicial (g)	(mf) Masa final (g)	(STo) Sólidos iniciales de mashua (°Brix)	(ST) Sólidos totales para determinado tiempo (°Brix)	PP (%) Pérdida de peso	GS (%) Ganancia de sólidos	PA (%) Pérdida de Agua
<b>1</b>	100.75	76.9		18.50	23.67	6.12	29.79
<b>2</b>	100.79	52.18		20.70	48.23	2.72	50.95
<b>3</b>	100.88	77.01		20.50	23.66	7.65	31.31
<b>4</b>	100.58	63.85		24.80	36.52	7.74	44.26
<b>5</b>	100.17	71.1		23.40	29.02	8.61	37.63
<b>6</b>	100.72	59.29		27.20	41.13	8.01	49.15
<b>7</b>	100.58	75.89		24.70	24.55	10.64	35.18
<b>8</b>	100.43	63.16		30.00	37.11	10.87	47.98
<b>9</b>	100.96	79.21	8.00	20.00	21.54	7.69	29.23
<b>10</b>	100.87	53.46		36.50	47.00	11.34	58.35
<b>11</b>	100.4	60.65		24.60	39.59	6.86	46.45
<b>12</b>	100.37	65.37		28.60	34.87	10.63	45.50
<b>13</b>	100.11	72.42		13.90	27.66	2.06	29.71
<b>14</b>	100.27	63		28.40	37.17	9.84	47.01
<b>15</b>	100.52	63.52		24.40	36.81	7.42	44.23
<b>16</b>	100.78	62.82		25.00	37.67	7.58	45.25
<b>17</b>	100.16	61.33		26.00	38.77	7.92	46.69
<b>18</b>	100.25	63.78		25.30	36.38	8.10	44.48



**Anexo 4.** Datos experimentales para calcular la difusividad efectiva de agua; contenido de agua, materia seca, humedad de en base seca y razón de humedad, Repetición 1

Tiempo (h)	Tiempo (min)	P1	P2	P3	Humedad de mashua (%)	Humedad fracción	Peso de mashua (g)	Peso (kg)	Contenido agua(kg)	Contenido materia seca (kg)	Humedad base seca (kg/kg seco)	Razón de humedad $\frac{H_t - H_e}{H_0 - H_e}$	$Ln \left( \frac{H_t - H_e}{H_0 - H_e} \right)$
0	0	37.0454	5.0254	37.7311	86.3553	0.8636	150.0200	0.150	0.130	0.020	$H_0 = 6.329$	1.0000	0.0000
0.5	30	31.2318	3.0254	31.9514	76.2147	0.7621	97.5000	0.098	0.074	0.023	3.204	0.3162	-1.1514
1	60	32.3878	3.0487	33.3104	69.7379	0.6974	89.2000	0.089	0.062	0.027	2.304	0.1193	-2.1263
1.5	90	32.0632	3.0395	33.087	66.3168	0.6632	82.3500	0.082	0.055	0.028	1.969	0.0458	-3.0827
2	120	36.6789	3.0162	37.702	66.0798	0.6608	76.5620	0.077	0.051	0.026	1.948	0.0413	-3.1870
2.5	150	42.6805	3.042	43.719	65.8613	0.6586	70.5890	0.071	0.046	0.024	1.929	0.0372	-3.2924
3	180	45.6247	3.0828	46.6981	65.1810	0.6518	66.3200	0.066	0.043	0.023	$H_t = 1.872$	0.0246	-3.7034
3.5	210	51.1991	3.043	52.2729	64.7125	0.6471	62.5000	0.063	0.040	0.022	1.834	0.0163	-4.1170
4	240	37.0478	3.0357	38.1337	64.2290	0.6423	58.89000	0.059	0.038	0.021	1.796	0.0079	-4.8394
4.5	270	31.8312	3.0609	32.9269	64.2033	0.6420	54.0260	0.054	0.035	0.019	1.794	0.0075	-4.8964
5	300	28.5439	3.1112	29.6593	64.1489	0.6415	50.8900	0.051	0.033	0.018	1.789	0.0065	-5.0291
5.5	330	32.3497	3.0989	33.47	63.8485	0.6385	47.8500	0.048	0.031	0.017	1.766	0.0015	-6.5212
6	360	33.379	3.0795	34.495	63.7604	0.6376	44.8000	0.045	0.029	0.016	$H_e = 1.759$		

DATOS	
PI	3.142
L (cm)	0.3
L (m)	0.003
A	0.84
b	0.9651
Tiempo (seg)	21600
$D_{ef,w}$ (m <sup>2</sup> /s)	4.07438E-11

**TERMINOS:**

**P1 = Peso de la placa vacía**

**P2 = Peso de la muestra**

**P3 = Peso de placa más la muestra**

**Fracción humedad = Humedad de Mashua (%) / 100**

**Contenido de agua (Kg) = Fracción de humedad x Peso (Kg)**

**Contenido de materia seca (Kg) = Peso (kg) - Contenido de agua (Kg)**

**Humedad base seca (kg/kg seco) = Contenido de agua (Kg)/Contenido de materia sea (Kg)**



**Anexo 5.** Datos experimentales para calcular la difusividad efectiva de agua; contenido de agua, materia seca, humedad de en base seca y razón de humedad, Repetición 2

Tiempo (h)	Tiempo (min)	P1	P2	P3	Humedad de mashua (%)	Humedad fracción	Peso de mashua (g)	Peso (kg)	Contenido agua(kg)	Contenido materia seca (kg)	Humedad base seca (kg/kg seco)	Razón de humedad $\frac{H_t - H_e}{H_0 - H_e}$	$Ln \left( \frac{H_t - H_e}{H_0 - H_e} \right)$
0	0	42.6311	5.0532	43.2929	86.9033	0.869	150.20	0.150	0.131	$H_0 =$ 0.020	6.636	1.0000	0.0000
0.5	30	28.0452	3.03492	28.7462	76.9022	0.769	96.80	0.097	0.074	0.022	3.329	0.3289	-1.1119
1	60	31.8319	3.0938	32.8264	67.8551	0.679	89.12	0.089	0.060	0.029	2.111	0.0816	-2.5058
1.5	90	30.8931	3.0592	31.9039	66.9587	0.670	82.01	0.082	0.055	0.027	2.027	0.0645	-2.7414
2	120	37.4247	3.034	38.4498	66.2129	0.662	76.20	0.076	0.050	0.026	1.960	0.0509	-2.9774
2.5	150	36.8755	3.058	37.9152	66.0007	0.660	69.65	0.070	0.046	0.024	1.941	0.0472	-3.0540
3	180	35.5247	3.032	36.5616	65.8015	0.658	66.29	0.066	0.044	$H_t =$ 0.023	1.924	0.0437	-3.1305
3.5	210	36.6785	3.0409	37.7398	65.0991	0.651	61.89	0.062	0.040	0.022	1.865	0.0318	-3.4498
4	240	37.4245	3.0129	38.4905	64.6188	0.646	58.61	0.059	0.038	0.021	1.826	0.0239	-3.7357
4.5	270	30.8929	3.1912	32.0566	63.5341	0.635	53.56	0.054	0.034	0.020	1.742	0.0068	-4.9922
5	300	28.0439	3.0255	29.1503	63.4308	0.634	50.40	0.050	0.032	0.018	1.735	0.0052	-5.2554
5.5	330	32.0689	3.0132	33.1748	63.2982	0.633	47.80	0.048	0.030	0.018	1.725	0.0032	-5.7406
6	360	31.7314	3.0217	32.8469	63.0837	0.631	44.95	0.045	0.028	$H_e =$ 0.017	1.709	0.0000	

DATOS	
PI	3.141592654
L (cm)	0.3
L (m)	0.003
a	0.834
b	0.8693
Tiempo (seg)	21600
$D_{ef,w}$ (m <sup>2</sup> /s)	3.66994E-11



**Anexo 6.** Datos experimentales para determinar la difusividad efectiva de sólidos, Repetición 1

<b>Tiempo (hora)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>S<sub>0</sub></b> Concentración de sólidos solubles iniciales de mashua en el jarabe (°Brix) a un t = 0	<b>S<sub>e</sub></b> Concentración de sólidos solubles en el jarabe (°Brix) a diferentes tiempo	<b>S<sub>t</sub></b> Concentración de sólidos solubles (°Brix) de la mashua a un tiempo.	$\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e}$	$Ln\left(\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e}\right)$
<b>0</b>	0		66.8	8	1	0.000
<b>0.5</b>	30		58.0	19.0	0.780	-0.248
<b>1</b>	60		55.0	23.0	0.681	-0.384
<b>1.5</b>	90		54.5	24.5	0.645	-0.438
<b>2</b>	120		53.0	26.5	0.589	-0.530
<b>2.5</b>	150		52.5	27.0	0.573	-0.557
<b>3</b>	180	8.0	51.5	28.5	0.529	-0.637
<b>3.5</b>	210		50.0	28.5	0.512	-0.670
<b>4</b>	240		48.5	29	0.481	-0.731
<b>4.5</b>	270		48	30.5	0.438	-0.827
<b>5</b>	300		48	30.5	0.438	-0.827
<b>5.5</b>	330		47.5	30.5	0.430	-0.843
<b>6</b>	360		47.5	31	0.418	-0.873

<b>R1</b>	<b>DATOS</b>
<b>PI</b>	<b>3.1416</b>
<b>L (cm)</b>	<b>0.3</b>
<b>L (m)</b>	<b>0.003</b>
<b>a</b>	<b>0.1975</b>
<b>b</b>	<b>0.1281</b>
<b>Tiempo (seg)</b>	<b>21600</b>
<b>D<sub>e,ss</sub> (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>5.40802E-12</b>



**Anexo 7.** Datos experimentales para determinar la difusividad efectiva de sólidos, Repetición 2

<b>Tiempo (hora)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>S<sub>0</sub></b> Concentración de sólidos solubles iniciales de mashua en el jarabe (°Brix) a un t = 0	<b>S<sub>e</sub></b> Concentración de sólidos solubles en el jarabe (°Brix) a diferentes tiempo	<b>S<sub>t</sub></b> Concentración de sólidos solubles (°Brix) de la mashua a un tiempo.	$\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e}$	$Ln\left(\frac{S_t - S_e}{S_0 - S_e}\right)$
<b>0</b>	0		66.8	8.00	1	0.000
<b>0.5</b>	30		57.5	20.5	0.747	-0.291
<b>1</b>	60		56.0	24.0	0.667	-0.405
<b>1.5</b>	90		54.0	24.5	0.641	-0.444
<b>2</b>	120		53.2	27.0	0.580	-0.545
<b>2.5</b>	150		52.2	28.0	0.548	-0.602
<b>3</b>	180	8.0	53.0	29.0	0.533	-0.629
<b>3.5</b>	210		50.0	29.5	0.488	-0.717
<b>4</b>	240		49.5	30	0.470	-0.755
<b>4.5</b>	270		49	30.5	0.451	-0.796
<b>5</b>	300		48.5	30.5	0.444	-0.811
<b>5.5</b>	330		48	31	0.425	-0.856
<b>6</b>	360		48	31	0.425	-0.856

<b>R2</b>	<b>DATOS</b>
<b>PI</b>	<b>3.141592654</b>
<b>L (cm)</b>	<b>0.3</b>
<b>L (m)</b>	<b>0.003</b>
<b>a</b>	<b>0.2247</b>
<b>b</b>	<b>0.1227</b>
<b>Tiempo (seg)</b>	<b>21600</b>
<b>D<sub>e,ss</sub> (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>5.18005E-12</b>



**Anexo 8.** Ilustraciones fotográficas de los procedimientos en las preparaciones de las soluciones de sacarosa



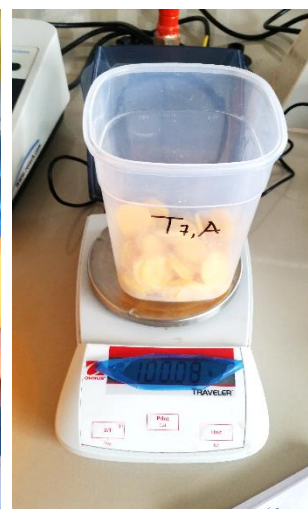
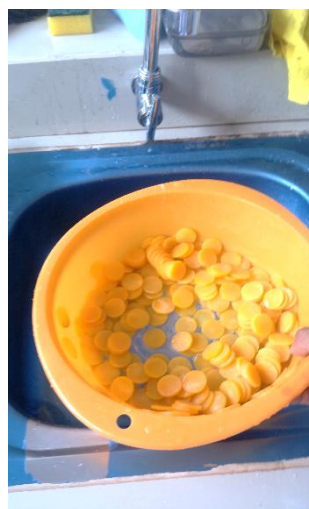
Anexo 9. Fotografías de Acondicionamiento del tubérculo mashua.



Recepción, selección, clasificación, lavado y sanitización de mashua



Trozado de mashua en 23 mm de diámetro y espesor 3mm.

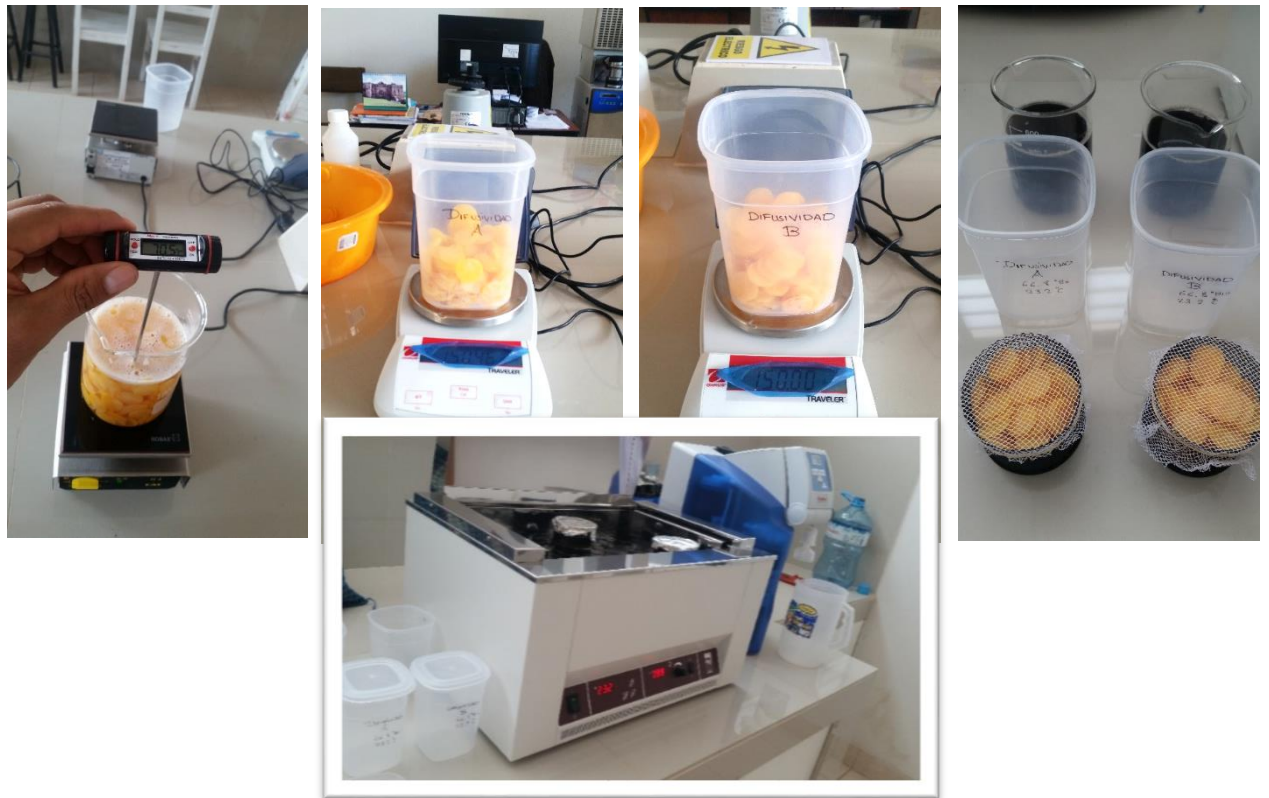


Escaldado, drenado y pesado de láminas de mashua

**Anexo 10.** Fotografías de Inmersión de láminas mashua en la solución sacarosa, deshidratación osmótica en baño maría con agitación orbital, y drenado para realizar los análisis grados °Brix y peso.



**Anexo 11.** Fotografías en la determinación de difusividad efectiva de agua y sólidos en láminas de mashua a parámetros óptimos



- Ilustración de determinación de humedad en cada tiempo.

