

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Actualmente, la frutilla se encuentra dentro de las frutas más conocida a nivel mundial, esto se debe a su sabor, aroma y sobre todo a su valor nutricional. La frutilla posee una gran cantidad de vitaminas A, C, E y B1, B2, B3 y B6 y minerales como el hierro, calcio, magnesio, potasio, fósforo, yodo y otros, indispensables para los seres humanos (Mendoza, 2017). El Código Alimentario Argentino (CAA) afirma: “Las variedades comerciales de la Frutilla cultivada corresponden a *Fragaria x ananassa*, que proviene del cruzamiento de dos especies americanas: *Fragaria chiloensis* (sudamericana) y *Fragaria virginiana* (norteamericana)” (CAA, 2012. Pág. 1). Los seis países con mayor producción de frutilla a nivel mundial en el año 2019, se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1

Países con mayor producción de frutilla a nivel mundial

| País | Cantidad (Toneladas) |
|----------------|----------------------|
| China | 3.221.557 |
| Estados Unidos | 1.021.490 |
| México | 861.337 |
| Turquía | 486.705 |
| Egipto | 460.245 |
| España | 351.969 |

Fuente: FAOSTAT, 2020

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE) en Bolivia se cultiva frutilla en cinco departamentos, donde los mayores productores son Santa Cruz y Cochabamba. En la tabla 1.2, se muestra la producción de frutilla en Bolivia del año 2019.

Tabla 1.2

Producción de frutilla en Bolivia

| Departamentos | Cantidad (Toneladas) |
|---------------|----------------------|
| Santa Cruz | 1.697 |
| Cochabamba | 1.607 |
| Tarija | 100 |
| Chuquisaca | 31 |
| La Paz | 22 |
| Total | 3.457 |

Fuente: INE, 2020

En el departamento de Tarija según el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2020) unas 35 hectáreas son dedicadas a la producción de frutilla, con un rendimiento de 2861 kg/hectárea.

En Bolivia se puede encontrar las siguientes frutas liofilizadas: Acaí, camu camu, noni, banana, mango, piña, frutilla, acerola, achachairú y manzana, mismas que se presentan en forma de snack, chips y en polvo; entre las empresas productoras se encuentran: Natur SRL, ubicada en el departamento de Santa Cruz (Natur SRL, 2021), Industria Boliviana de liofilización (IBL) ubicada en la ciudad de Santa Cruz (IBL, 2021), Agroseller SRL, ubicada en el departamento de Santa Cruz (Agroseller, 2021), y la Empresa Boliviana de Alimentos (EBA) que liofiliza en dos de sus plantas ubicadas una en los departamentos de La Paz y Cochabamba (Pagina Siete, 2019).

1.2 Justificación

- La frutilla es una fruta que presenta grandes beneficios para la salud debido a su composición nutricional, ya que contiene vitaminas y minerales, pero debido a su alto contenido de agua esta es una fruta altamente perecedera, por lo que en el presente trabajo se decidió aplicar el método de liofilización que permite alargar el tiempo de vida útil de la fruta y conservar sus propiedades nutricionales y organolépticas.
- La frutilla es una fruta muy perecedera y sensible al manipuleo, esto hace que se vea la importancia de transformarla en un producto deshidratado mediante el proceso de liofilización para que conserve sus propiedades nutritivas y pueda ser incorporada en los supermercados de la ciudad.
- Incentivar de forma indirecta la producción de frutilla en el departamento de Tarija, transformando la materia prima en un subproducto, siendo una alternativa para mejorar la economía de los productores locales y ampliar su mercado.

- Los métodos tradicionales de conservación de alimentos mediante la aplicación de calor, por lo general alteran las propiedades nutritivas y organolépticas de los alimentos, con el presente trabajo se pretende incentivar otro método de deshidratado, como una alternativa a los métodos convencionales de secado, de manera que la frutilla pueda conservar de mejor forma sus propiedades nutritivas y organolépticas.

1.3 Objetivos

Los objetivos planteados para el presente trabajo de investigación, se describen a continuación.

1.3.1 Objetivo General

Aplicar el método de liofilización a nivel experimental, con la finalidad de obtener rodajas deshidratadas de frutilla variedad San Andreas en la provincia Cercado de Tarija.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades físicas, fisicoquímicas y microbiológicas de la frutilla para conocer sus características y composición.
- Realizar evaluación sensorial de las muestras preliminares con el fin de determinar el tipo de corte más aceptado para el proceso de liofilización.
- Aplicar un diseño factorial en el proceso de liofilización con el fin de controlar las variables específicas que puedan afectar en el proceso.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de las rodajas frutilla liofilizada con el fin de conocer su composición nutricional y garantizar su inocuidad.
- Realizar el análisis sensorial de las rodajas de frutilla liofilizada para conocer la aceptabilidad de las características organolépticas del producto.
- Realizar la rehidratación a nivel experimental de las rodajas de frutilla liofilizadas, para conocer su capacidad de rehidratación.

- Realizar el balance de materia y energía en el proceso liofilización de frutilla para conocer las corrientes de entrada y salida del proceso.

1.4 Planteamiento del problema

Al ser la frutilla una fruta muy perecedera, esto hace de que los productores se vean en la necesidad de transformar esta materia prima en un subproducto deshidratado con el fin de poder mejorar su valor agregado, en tal sentido el proceso de liofilización permite eliminar agua y a su vez conservar las propiedades nutricionales alargando el tiempo de vida útil de la fruta. Así mismo, permitirá la incorporación de este producto deshidratado por liofilización en los distintos supermercados de la ciudad de Tarija, ya que este proceso permite obtener un producto de calidad nutricional.

1.5 Objeto de estudio

Aplicación del método de liofilización a nivel experimental, con la finalidad de obtener rodajas deshidratadas de frutilla de variedad San Andreas.

1.6 Campo de acción

El campo de acción propuesto para el presente trabajo de investigación se describe a continuación:

Espacial

El espacio en donde se realizó el presente trabajo de investigación fue en la provincia Cercado de Tarija.

Temporal

El tiempo en el que se realizó en presente trabajo de investigación fue en la gestión 2022.

Institucional

La institución en la que se realizó el presente trabajo de investigación fue en el Laboratorio Académico de la Carrera de Ingeniería de Alimentos – UAJMS.

1.7 Formulación del problema

¿De qué manera se aplicará el método de liofilización a nivel experimental, con la finalidad de obtener rodajas de frutilla deshidratadas en la provincia Cercado de Tarija?

1.8 Hipótesis

La aplicación del método de liofilización a nivel experimental, permitirá obtener rodajas de frutilla deshidratadas en la provincia Cercado de Tarija.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Origen de los productos liofilizados

El proceso de liofilización tiene sus orígenes en el Imperio Inca, allí los pobladores elaboraban un producto denominado Chuño, resultado de la deshidratación de la papa, dejaban las papas cosechadas sobre el suelo, de manera que durante la noche se congelen como consecuencia de las muy bajas temperaturas, y durante el día el sol y el viento seco crean las condiciones necesarias para que se produzca el deshidratado (Parzanese, 2013).

Con el paso de los años este procedimiento se desarrolló industrialmente integrando dos métodos de conservación ampliamente utilizados: la congelación y la deshidratación. El desarrollo comercial del proceso se produjo durante la Segunda Guerra Mundial, ya que se empleó para conservar plasma sanguíneo y en la preparación de los primeros antibióticos de penicilina. Años después, alrededor del año 1960, comenzó a utilizarse en una gran variedad de productos, entre ellos los alimentos (Parzanese, 2013).

Actualmente la liofilización se aplica en industrias farmacéuticas, en la industria química y en la industria de alimentos. En la industria de los alimentos, primero comenzó a utilizarse en la elaboración de productos especiales para montañistas, astronautas, bases militares y otros de usos similares. Sin embargo, desde hace tiempo, se comercializan productos liofilizados tanto como ingredientes industriales como para el consumidor en general, ampliándose así el mercado de estos productos con alto valor agregado (Parzanese, 2013).

2.2 Definición de producto liofilizado

La fruta liofilizada es una fruta estable en almacenamiento que se ha sometido a un proceso para eliminar su humedad, mientras conserva el sabor y los nutrientes. Es muy ligera, con una textura seca y crujiente y un sabor a fruta intenso y concentrado (Jones & Covington, 2021).

Por medio de la liofilización se puede extraer más del 95% del agua contenida en un alimento, a través de lo cual se logra un producto más estable microbiológicamente. Al

finalizar el proceso de liofilización, el alimento se convierte en una estructura rígida que conserva la forma y el volumen, pero con peso reducido, preservando sus características nutritivas y organolépticas. Al rehidratarlo se recuperan la textura, el aroma y el sabor original (Parzanese, 2013).

2.3 Clasificación de los productos liofilizados

La clasificación de los productos liofilizados en el área alimentaria, se presenta en la tabla 2.1

Tabla 2.1

Clasificación de los productos liofilizados

| Alimento | Productos liofilizados |
|------------------|---|
| Cárnicos | Carne bovina. |
| | Carne aviar: pechuga de pollo, pechuga de pavo, muslo de pollo. |
| | Carne porcina: jamón, lomo. |
| Frutas | Frutilla, fresa, banana, ananá, mora, frambuesa |
| Vegetales | Espárrago, choclo, zanahoria, brócoli, coliflor, apio, papa, hongos, aceituna, espinaca, ajés, arroz, arvejas, cebolla. |
| Quesos | Queso Prato, mozzarella, queso provolone, queso blanco. |
| Otros | Café, sopas, zumos de frutas, levaduras, caldos, salsas, especias, champiñones. |

Fuente: Parzanese, 2013.

2.4 Características nutricionales de las frutas liofilizadas

La fruta liofilizada contiene una cantidad pequeña de calorías en comparación con la fruta deshidratada, debido a que no tiene azúcar añadida, sino los endulzantes naturales propios de la fruta, también contiene cerca de 2 g de fibra por cada media taza, lo que fomenta la digestión regular y ayuda a mantener los niveles de colesterol bajos, de manera que reduce el riesgo de contraer enfermedades del corazón. Además, concentra los antioxidantes que contiene, lo que significa que tiene un mayor impacto en la salud, ayudando al cuerpo a luchar contra las enfermedades, incluidas las del corazón y el cáncer, contiene una cantidad similar de nutrientes en comparación con la fruta fresca, algunos se pierden durante el proceso de liofilización, pero aun así se puede aumentar la ingesta de vitaminas A y C, hierro y potasio cuando se la consume. Estas vitaminas

y minerales protegen el sistema inmunológico, contribuyendo a que la sangre permanezca debidamente oxigenada y la presión sanguínea regular. (Duhalde, 2015).

2.5 Composición nutricional de la frutilla liofilizada

Realizando la búsqueda de información en internet, sobre la composición nutricional de la frutilla deshidratada mediante el proceso de liofilización, se encontraron datos de la composición nutricional de un snack de frutilla liofilizada de la marca SNAT de origen argentino, en la tienda en línea Proteger salud farmacias en el año 2022, la información nutricional en 15 gramos de frutilla liofilizada se puede observar en la tabla 2.2

Tabla 2.2

Información nutricional de un snack de frutilla liofilizada

| Componente | Cantidad | Unidad |
|------------------|----------|--------|
| Valor energético | 48,72 | Kcal |
| Carbohidratos | 9,00 | g |
| Proteínas | 1,00 | g |
| Grasa total | 0,00 | g |
| Grasa saturada | 0,00 | g |
| Grasa trans | 0,00 | g |
| Fibra | 3,00 | g |
| Sodio | 2,00 | mg |

Fuente: SNAT, 2020.

2.6 Caracterización botánicas de la frutilla

Las características botánicas de la frutilla, se detallan a continuación:

2.6.1 Descripción botánica de la frutilla

La frutilla es una planta que pertenece a la familia de las Rosáceas, del género *Fragaria* (Caminiti, 2015. Pág. 8). El género *Fragaria* contiene más de 20 especies de plantas cuyo fruto es llamado fresa o frutilla. Gracias al cruce entre las distintas especies se han obtenido variedades comercialmente importantes, de las que *Fragaria x ananassa* o fresa de huerto es la más consumida (BioEnciclopedia, 2016).

Las plantas del género *Fragaria* son perennes de tallos rastreros, largos y nudosos, llamados rizomas, tienen hojas compuestas trifoliadas, es decir, con 3 folíolos. Sus flores poseen 5 pétalos y tienden a ser color blanco con el centro amarillo, pero en algunas variedades cultivadas los pétalos son ligeramente rojos o rosados (BioEnciclopedia, 2016).

La parte comestible de la planta es en realidad un receptáculo, es decir, la parte más gruesa del tallo en donde se desarrollan los órganos, por lo que no se trata de bayas como pudiera pensarse. El fruto, o más bien frutos, son los aquenios que comúnmente se confunden con semillas, pero que sí tienen una en su interior. En síntesis, lo que se llama fruto es la pared del ovario, que a su vez contiene muchos frutos verdaderos en su superficie (BioEnciclopedia, 2016).

2.6.2 Variedades de frutilla

Morales et al., (2017) afirma que las variedades de frutilla (*Fragaria ananassa D.*), se clasifican según su requerimiento de horas de luz en variedades de día corto y variedades de día neutro. En la figura 2.1, se muestran las variedades de frutilla de acuerdo a su clasificación.

| Clasificación | Descripción | Variedades |
|---------------|---|--|
| De día Corto | Requieren menos de catorce horas de luz para desarrollar yemas florales, presenta generalmente dos periodos de cosecha en el año. | Camarosa y Benicia |
| De día neutro | No dependen de la cantidad de horas de luz a lo largo del día, solo necesitan temperaturas del suelo por sobre los 12°C para emitir flores. Su producción es más homogénea a lo largo de la temporada. Son variedades con muy buena aptitud para el mercado fresco, que además representan una excelente alternativa comercial para producción fuera de temporada a través de cultivo forzado | San Andreas, Albión, Monterey y Aromas |

Fuente: Morales et al., 2017

Figura 2.1 Variedades de frutilla de acuerdo a su clasificación

2.6.2.1 Variedad San Andreas

La variedad San Andreas tiene su origen en California, Estados Unidos, su fruto tiene muy buena aptitud para el mercado fresco, ya que es la variedad que presenta el mayor tamaño y homogeneidad de frutos, también para agroindustria; presenta color rojo externo homogéneo y pulpa más clara, fruto muy firme con excelente vida de postcosecha (Morales et al., 2017).

En cuanto a su planta es de tamaño intermedio de rápido crecimiento vegetativo inicial, por lo que debe ser plantada con temperaturas adecuadas (sobre 12 °C en suelo). Plantada con mucho frío presenta exceso de vigor y un período vegetativo más largo (Morales et al., 2017).

2.7 Composición fisicoquímica y nutricional de la frutilla

Históricamente la frutilla ha sido conocida como una fruta sana, es una baya rica en nutrientes y vitaminas, que también contiene cantidades significativas de ácidos benéficos para la salud (antioxidantes), carece de colesterol, e insignificantes niveles de sodio. Es una excelente fuente de Vitamina C, betacarotenos y Vitamina E (Caminiti, 2015).

La fresa contiene 35Kcal/100g. La composición química de la fresa es de 89,6% de agua, 7% de hidratos de carbono, 0,7% de proteínas, 0,5% de lípidos y 2,2% de fibra. El contenido de azúcares en la fresa (de la porción comestible) es de 2,6% de glucosa, 2,3% de fructosa y 1,3% de sacarosa. Respecto al contenido en minerales de la fresa, el potasio es el componente mayoritario, seguido del fósforo, calcio y magnesio. La vitamina mayoritaria es la vitamina C, (Barrufet, 2013).

Según Reyes et al., (2017) la frutilla tiene la composición nutricional que se muestra la tabla 2.3 para una porción comestible de 100 g.

Tabla 2.3

Composición nutricional de la frutilla

| Nutriente | Unidad | Cantidad |
|-----------------------------|---------------|-----------------|
| Energía | Kcal | 34,00 |
| Humedad | g | 89,10 |
| Proteína | g | 0,70 |
| Grasa | g | 0,80 |
| Hidratos de Carbono totales | g | 8,90 |
| Fibra dietaria | g | 2,00 |
| Ceniza | g | 0,50 |
| Calcio | mg | 37,00 |
| Fósforo | mg | 28,00 |
| Zinc | mg | 0,14 |
| Hierro | mg | 1,20 |
| Vitamina A | mcg | 1,00 |
| Tiamina | mg | 0,04 |
| Riboflavina | mg | 0,05 |
| Niacina | mg | 0,26 |
| Vitamina C | mg | 42,00 |

Fuente: Reyes et al., 2017.

2.8 Beneficios de la frutilla para la salud

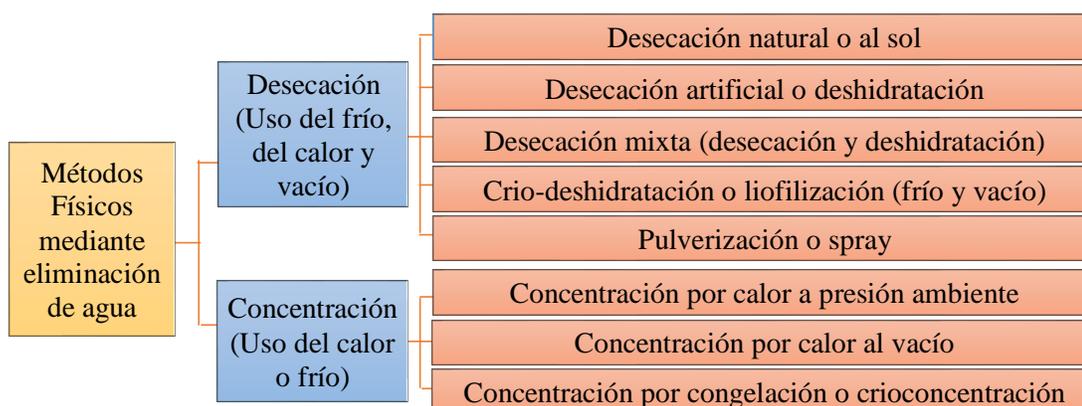
La frutilla tiene varias propiedades medicinales, las cuales se concentran mayoritariamente en su fruta, contiene antioxidantes, grandes cantidades de vitamina C, vitamina E, sales minerales como el potasio, el yodo, el silicio y el fósforo, fibras y beta carotenos, imprescindibles en la lucha contra los radicales libres, los radicales libres son los causantes del envejecimiento y de muchas de las enfermedades que atacan al organismo; debido a sus notables efectos antioxidantes la frutilla ayuda a prevenir el cáncer y ayuda a combatirlo si éste ya afectó a las células, así mismo debido a su contenido en fibra y agua, ayuda a combatir el estreñimiento, por otra parte al poseer vitamina C aumenta la absorción de hierro no hemínico en el intestino, lo que ayuda a combatir la anemia, así mismo la gran cantidad de ácido ascórbico, así como de lecitina y pectina contenida en sus frutos, la hacen ideal para disminuir el nivel de colesterol de la sangre y eliminar las toxinas, tienen virtudes antianémicas y reconstituyentes. Resultan muy adecuados en la época decrecimiento (Macías, 2022).

2.9 Definición de conservación

La conservación es la acción de conservar, mantener, cuidar, proteger, guardar algo, ya sea en la aplicación de la industria alimentaria como en la naturaleza y biología. Las frutas, son alimentos que después de su cosecha siguen respirando, es decir que toman oxígeno y eliminan dióxido de carbono. Esta respiración va acompañada con la eliminación de agua que hay en las células, siendo la causa principal de la maduración y podredumbre frutal. El objetivo de la conservación es evitar que los alimentos sean atacados por microorganismos que causan la putrefacción y puedan ser almacenados y consumidos por más tiempo (Dávila, 2015).

2.9.1 Métodos de conservación de alimentos

Existen diversos métodos de conservación de los alimentos, como ser los métodos físicos, químicos, fisicoquímicos y microbiológicos. Dentro de los métodos físicos, mediante eliminación de agua por desecación con frío y aplicación de vacío se encuentra el método de liofilización. Según Ibañez (2015), los métodos físicos de conservación alimentos mediante eliminación de agua se muestran en la figura 2.2.



Fuente: Ibañez, 2015.

Figura 2.2 Métodos físicos de conservación de alimentos mediante eliminación de agua

2.10 La liofilización

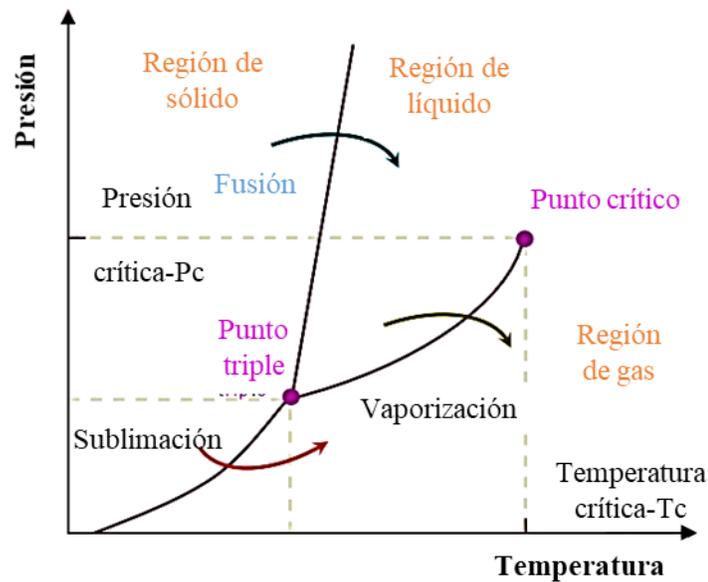
La liofilización se basa en el desecado de determinados materiales por medio de la sublimación del agua. Se realiza congelando el producto y se remueve el hielo

aplicando calor en condiciones de vacío, de esta forma el hielo sublima evitando el paso por la fase líquida (Parzanese, 2013). Además, es un proceso de conservación utilizado con el fin de reducir las pérdidas de los componentes volátiles o termosensibles. Es el más noble proceso de conservación de productos biológico conocido, porque aúna los dos métodos más fiables de conservación, la congelación y la deshidratación (Ramírez, 2006).

Constituye un efectivo sistema de preservación de elementos biológicos como células, enzimas, vacunas, virus, levaduras, sueros, algas, frutas, vegetales y alimentos en general. Todos estos materiales contienen sustancias volátiles o termosensibles que no se ven afectadas por este proceso, ya que se trabaja a temperaturas y presiones reducidas. Lo más importante del método es que no altera la estructura fisicoquímica del producto y admite su conservación sin cadena de frío, ya que su bajo porcentaje de humedad permite obtener un producto con elevada estabilidad microbiológica. Asimismo, el hecho de no requerir refrigeración facilita su distribución y almacenamiento (Parzanese, 2013).

2.10.1 Principios termodinámicos

Una sustancia pura puede existir como sólido, líquido o gas y cambiar de estado por medio de un proceso en el cual libera o absorbe calor a temperatura constante (calor latente), de esto depende hacia donde se direcciona el cambio. El cambio de fase de sólido a gas (denominado sublimación), debe realizarse en condiciones de presión y temperatura menores a las del punto triple (punto en el que conviven los tres estados de la materia), ya que por debajo de éste no existe la fase líquida. En el caso del agua, si la presión se mantiene por debajo de 4,58 Torr. permanece sólida, y al calentarla a una presión menor a la presión de vapor que corresponde a la temperatura de la superficie del hielo, este sublima directamente (Parzanese, 2013). En la figura 2.3, se puede observar el diagrama de cambio de fases del agua



Fuente: Parzanese, 2013

Figura 2.3 Diagrama de cambio de fase del agua

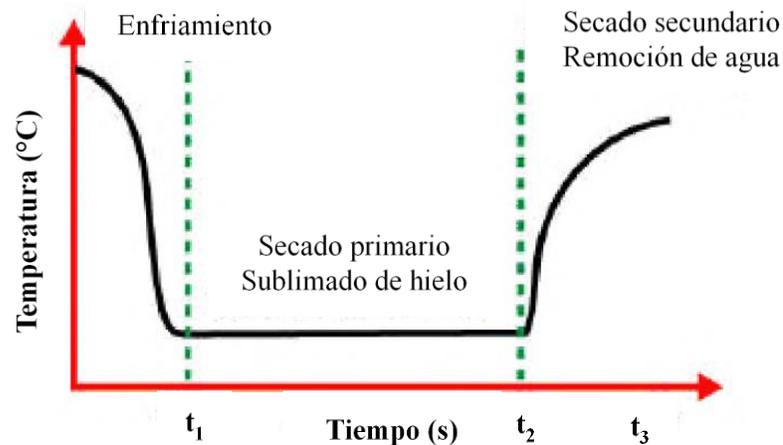
Lo que sucede con los alimentos es que, por contener polímeros naturales como proteínas, lípidos o azúcares, la solución saturada no cristaliza en este punto, sino que su viscosidad va aumentando a medida que disminuye la temperatura y el hielo cristaliza. Cabe aclarar que no toda el agua que compone un alimento está disponible para que los microorganismos puedan llevar a cabo sus actividades metabólicas: solo el agua libre cumple dicho propósito y se le conoce como actividad de agua (A_w). Al deshidratar un producto la disponibilidad de agua libre disminuye drásticamente; así, para eliminar la mayor parte del agua libre contenida en el sólido obtenido, se le debe entregar calor para lograr la sublimación total del hielo. Al final de este cambio de fase se obtiene un producto que conserva el volumen y tamaño original, y presenta la forma de un vidrio altamente poroso (Parzanese, 2013).

La ventaja de esta estructura es que permite una rápida rehidratación. Sin embargo, se trata de un material frágil, por lo que requiere de una protección que prevenga los posibles daños ocasionados por una inadecuada manipulación. Asimismo, debido a su porosidad es necesario realizar el empaque del producto de modo tal que impida la

penetración de oxígeno, para prevenir procesos oxidativos sobre los lípidos en aquellos alimentos que tengan alto contenido graso (Parzanese, 2013).

2.10.2 Etapas del proceso

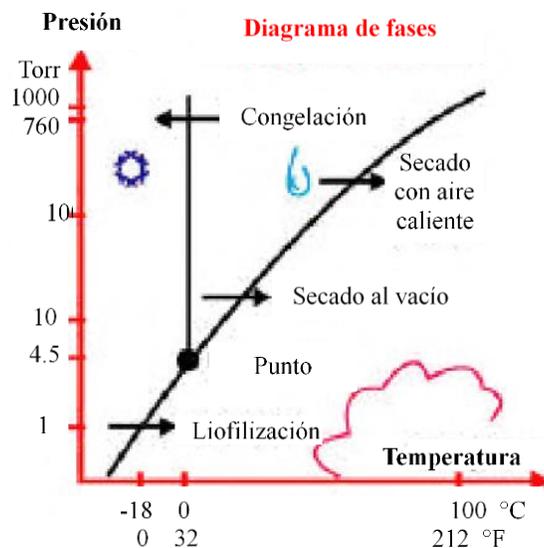
Según Parzanese, (2013) la liofilización involucra cuatro etapas principales que son: preparación, congelación, desecación primaria y desecación secundaria. En la figura 2.4, se muestra los pasos del proceso de liofilización



Fuente: Ramírez, 2006

Figura 2.4 Pasos del proceso de liofilización

En la figura 2.5, se muestra los diagramas de fases del agua y sistemas de secado



Fuente: Ramírez, 2006

Figura 2.5 Diagrama de fases del agua y sistemas de secado

2.10.2.1 Acondicionamiento

Antes de comenzar el proceso, es fundamental el acondicionamiento de la materia prima, ya que una vez completada la transformación, los productos liofilizados no pueden ser manipulados. Lo que se hace con alimentos como guisantes o arándanos es agujerear la piel con el objetivo de aumentar su permeabilidad. Los líquidos, por otro lado, se concentran previamente con el fin de bajar el contenido de agua, lo que acelera el proceso de liofilización (Parzanese, 2013).

2.10.2.2 Congelación

La segunda etapa se lleva a cabo en congeladores independientes (separados del equipo liofilizador) o en el mismo equipo. El objetivo es congelar el agua libre del producto, para lo cual se trabaja a temperaturas entre -20°C y -40°C (Parzanese, 2013).

Según Parzanese, (2013) para la optimización de este proceso es fundamental conocer y controlar:

- La temperatura en la que ocurre la máxima solidificación.
- La velocidad óptima de enfriamiento.
- La temperatura mínima de fusión incipiente.

Con esto se busca que el producto congelado tenga una estructura completamente sólida, sin la presencia de líquido concentrado, de manera que el secado ocurra únicamente por sublimación. De la velocidad de congelación, entre otros factores, dependerán las características de la estructura sólida obtenida al final del proceso (Parzanese, 2013). En la tabla 2.4, se muestran las características en la velocidad de congelación lenta y rápida:

Tabla 2.4*Velocidades de congelación de los alimentos*

| Congelación rápida | Congelación lenta |
|--|--|
| La temperatura de los alimentos desciende aproximadamente unos 20°C en 30 minutos. | La temperatura deseada se alcanza en 3 a 72 horas (aparatos domésticos de congelación). |
| Cristales pequeños. | Cristales grandes. En su formación causan ruptura de la membrana o pared celular y estructuras internas. |
| Al rehidratarse conservan textura y sabor original. | Al hidratarse presentan textura y sabor diferente al original. |
| Apariencia clara del producto seco. | Apariencia oscura del producto seco. |
| Se aplica en alimentos sólidos, ya que evita la ruptura de la membrana o pared celular, y de las estructuras internas. | Se aplica en líquidos, ya que la formación de cristales grandes favorece la presencia de canales para el movimiento del vapor de agua. |

Fuente: Parzanese, 2013

2.10.2.3 Desecación primaria del producto

La tercera etapa del proceso consiste en la desecación primaria del producto, por sublimación del solvente congelado, agua en la mayoría de los casos. La sublimación es la condensación directa de vapor a sólido. Un proceso de sublimación significa un procedimiento mediante el cual una sustancia sufre una transición de estado sólido a estado gaseoso, sin pasar por el estado líquido (Ramírez, 2006).

Para este cambio de fase es necesario reducir la presión en el interior de la cámara, mediante una bomba de vacío, y aplicar calor al producto (calor de sublimación, alrededor de 550 Kcal/Kg en el caso del agua), sin subir la temperatura. Los niveles de vacío y de calentamiento varían según el producto a tratar (Parzanese, 2013).

Al inicio de esta tercera etapa, el hielo sublima desde la superficie del producto y a medida que avanza el proceso, el nivel de sublimación retrocede dentro de él, por lo que para salir del producto el vapor debe pasar por capas ya secas. Este vapor, se recoge en la superficie del condensador, que debe tener suficiente capacidad de enfriamiento para condensarlo todo, a una temperatura inferior a la del producto. Para tener una

liofilización buena y rápida es necesario controlar exactamente esta temperatura y tener la posibilidad de regular la presión total y parcial del sistema (Parzanese, 2013).

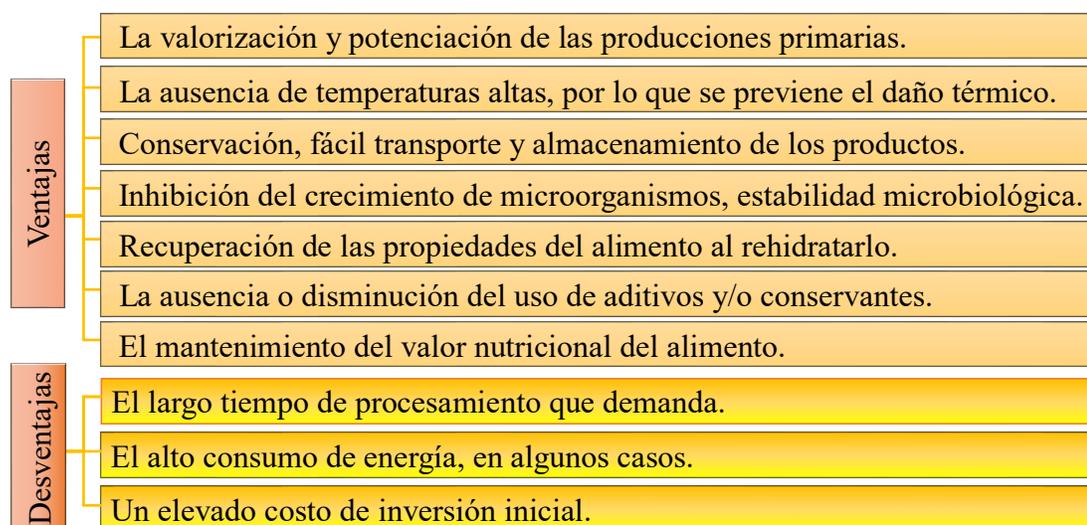
2.10.2.4 Desecación secundaria del producto

Las porciones restantes de agua no congelada, que no subliman en el secado primario, lo hacen por evaporación en la segunda etapa al incrementarse la temperatura de la matriz del alimento. Para el caso de matrices cristalinas, el mecanismo de secado es el de desorción y evaporación del agua desde la superficie cristalina. (Orrego, 2008).

Esta consiste en evaporar el agua no congelable, o agua ligada, que se encuentra en los alimentos, logrando que el porcentaje de humedad final sea menor al 2%. Como en este punto no existe agua libre, la temperatura de las bandejas puede subir sin riesgo de que se produzca fusión. Sin embargo, en esta etapa la presión disminuye al mínimo, por lo que se realiza a la máxima capacidad de vacío que pueda alcanzar el equipo. Es importante, finalmente, controlar el contenido final de humedad del producto, para que se corresponda con el exigido para garantizar su estabilidad (Parzanese, 2013).

2.10.3 Ventajas y desventajas del proceso de liofilización

Las ventajas y desventajas del proceso de liofilización se muestran en la figura 2.6



Fuente: Parzanese, 2013

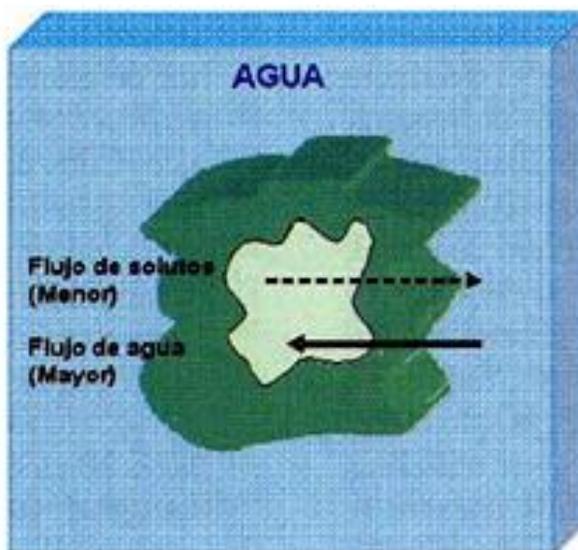
Figura 2.6 Ventajas y desventajas del proceso de liofilización

2.11 Rehidratación de los productos deshidratados

Es importante considerar que la rehidratación no es el proceso inverso a la deshidratación, ya que ambos fenómenos tienen diferentes mecanismos de transferencia de materia y dependen de factores distintos. Varios autores proponen que la rehidratación se puede considerar como una medida del daño en el alimento ocurrido durante la deshidratación, considerándose como un complejo proceso que ayuda a restaurar las propiedades del alimento fresco, anteriormente deshidratado con o sin pretratamientos al secado. En algunos casos la velocidad de rehidratación sirve como medida de la calidad del producto deshidratado, siendo los alimentos deshidratados en condiciones óptimas, los que se deterioran menos y se rehidratan de forma normal (Marín et al., 2006).

Los alimentos deshidratados deben en lo posible rehidratarse lo más rápido posible y mostrar las mismas características estructurales y químicas del alimento fresco, como también sus propiedades nutricionales y sensoriales. Dentro de los medios de rehidratación más utilizados en alimentos se encuentran, la inmersión en agua como la más simple, en soluciones azucaradas (glucosa, sacarosa, trehalosa), leche, yogur, jugos de frutas y verduras, entre otras, donde las etapas de sumergir, deben ser breves, y estos medios de rehidratación ayudan a conseguir un producto de características similares al producto fresco (Marín et al., 2006)

En la figura 2.6, se muestra la transferencia de materia ocurrida durante la rehidratación, se puede mencionar que el agua (o solución hidratante) es absorbida más rápidamente al inicio del proceso y luego disminuyendo gradualmente la absorción hasta que el contenido de humedad alcanza un equilibrio, es decir, que todos los espacios inter o intracelulares queden saturados con agua o con solución hidratante. De esta manera la absorción de agua por parte de los tejidos del alimento deshidratado aumenta sucesivamente el volumen del mismo, junto con una salida de los sólidos desde el interior de estos tejidos (Marín et al., 2006).



Fuente: Marín et al., 2006

Figura 2.7 Transferencia de materia durante la rehidratación de un producto deshidratado

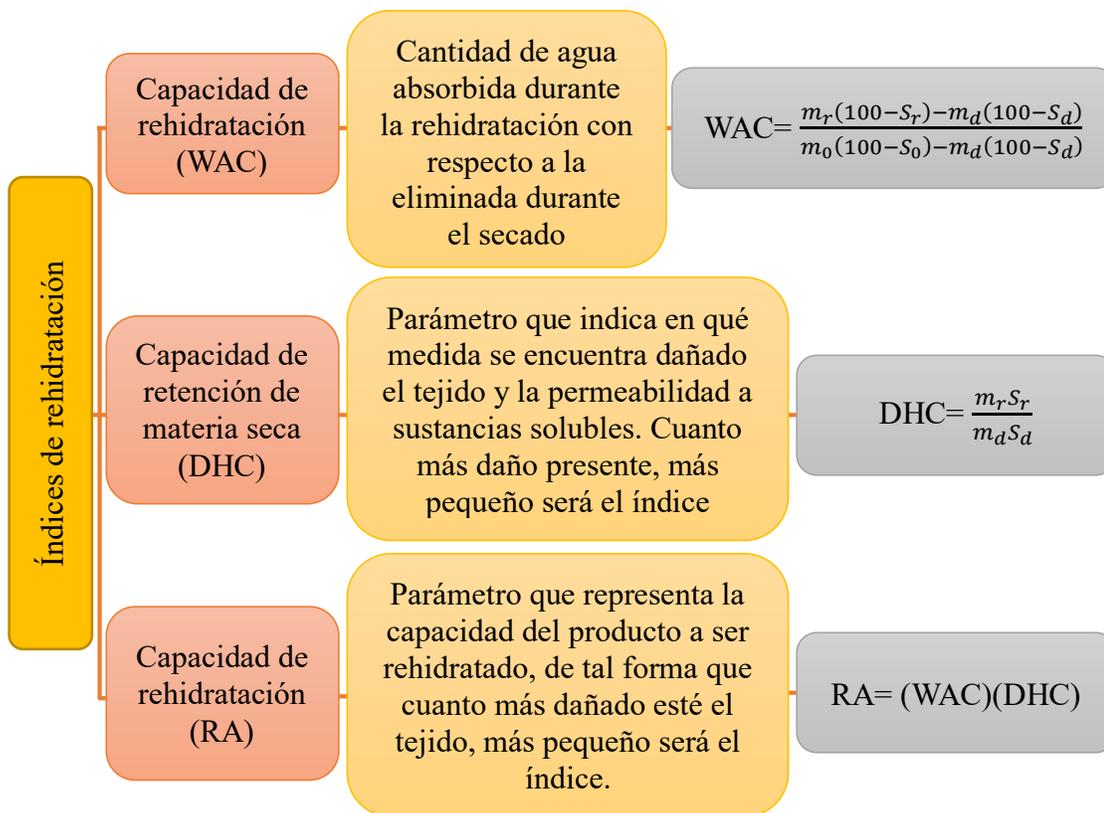
Según Marín et al., (2006), en el fenómeno de la rehidratación existen tres procesos simultáneos:

1. La absorción de agua dentro del material deshidratado
2. La lixiviación de solutos
3. El hinchamiento del material

Donde el cambio de volumen del producto deshidratado es proporcional a la cantidad de agua absorbida o medida, recuperando su tamaño y volumen inicial.

Las variables operacionales del secado (temperatura, velocidad de aire, humedad relativa y tiempo) disminuyen significativamente la calidad final del producto rehidratado, por lo que es común utilizar índices numéricos para observar este efecto, entre estos indicadores destacan la capacidad de rehidratación y la capacidad de retención de agua, que tienen que ver con la estructura, el tejido y la capacidad de mantener el agua absorbida por el alimento. Estos índices pueden disminuir o aumentar, ya sea por una desnaturalización y/o agregación de proteínas bajo el efecto calor, concentración de sales, desorción de agua, destrucción de pectinas y membranas celulares (Marín et al., 2006).

Según Vasquez et al., (2007) los índices de rehidratación de la figura 2.8 son los que representan mejor los flujos de agua y sólidos durante la rehidratación.



Fuente: Vasquez et al., 2007.

Figura 2.8 Índices de rehidratación

Donde:

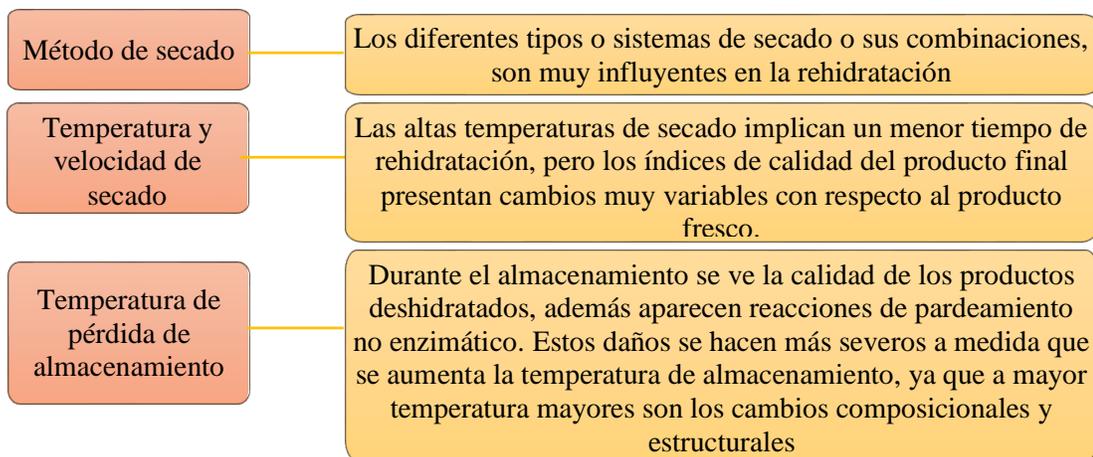
m= masa (g).

S= contenido en materia seca (%)

d, 0 y r = subíndices que se refieren al producto una vez seco, antes del proceso de secado y una vez ya rehidratado, respectivamente.

Según Marín et al., (2006), entre de los factores que influyen en los mecanismos de transferencia de materia ocurridos durante el fenómeno de rehidratación de alimentos, se encuentran los factores extrínsecos e intrínsecos; entre los factores extrínsecos se encuentran: pretratamiento, método de secado, temperatura y velocidad de secado y

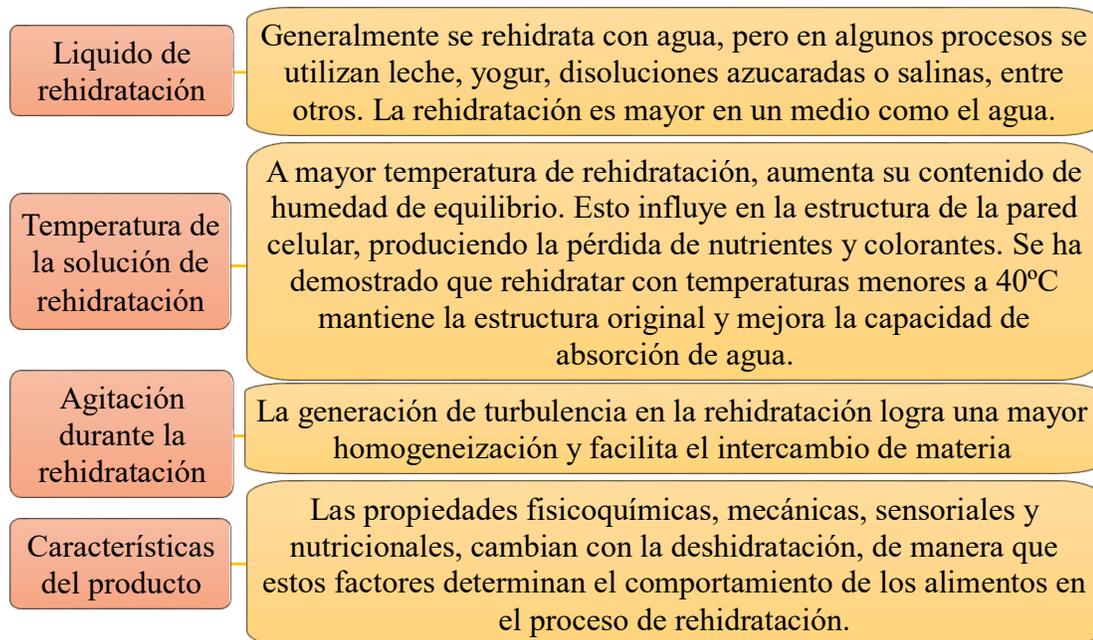
almacenamiento. En la figura 2.9 se muestran los factores extrínsecos que influyen en el proceso de rehidratación



Fuente: Marín et al., 2006

Figura 2.9 Factores extrínsecos en la rehidratación

Según Marín et al., (2006) los factores intrínsecos que influyen en la rehidratación se encuentran descritos en la figura 2.10



Fuente: Marín et al., 2006

Figura 2.10 Factores intrínsecos en la rehidratación

Entre las propiedades de calidad más importantes de un alimento deshidratado que ha sido rehidratado, están las propiedades estructurales (densidad, porosidad, tamaño poro, volumen específico), ópticas (color y apariencia), texturales (fuerza de compresión, relajación, tensión), mecánicas (estado del producto: cristalino, elástico, vítreo), propiedades sensoriales (aroma, sabor, color) y propiedades nutricionales (contenido de vitaminas, proteínas, azúcares, entre otras). La evaluación de todas o algunas de estas propiedades depende de los parámetros a considerar para un mercado específico (Marín et al., 2006).

Una propiedad estructural muy importante en frutas y verduras, frescas y procesadas, es la firmeza, misma que puede ser analizada en productos rehidratados, también el color visual o superficial de los alimentos es un parámetro de calidad muy importante y está dentro de las propiedades ópticas para evaluar en productos rehidratados (Marín et al., 2006).

Los productos liofilizados se rehidratan a mayor velocidad que los sometidos a secado por aire caliente y suelen tener un contenido de humedad muy bajo, cercano al 5%, al rehidratar estos productos se obtienen productos muy parecidos a los originales, con un mayor valor nutritivo y cualidades sensoriales similares a las del alimento fresco (Marín et al., 2006).

CAPÍTULO III
DISEÑO
METODOLÓGICO

3.1 Desarrollo de la parte experimental

El presente trabajo de investigación, se efectuó en el Laboratorio Académico de Carrera de Ingeniería de alimentos perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” (UAJMS).

3.2 Tipo de intervención

El presente trabajo de investigación utilizó la metodología experimental a nivel de laboratorio con el fin de obtener un producto deshidratado por liofilización en base a los siguientes métodos:

- Análisis físico de la frutilla variedad San Andreas.
- Análisis fisicoquímico y microbiológico de la frutilla variedad San Andreas.
- Análisis de minerales de la frutilla variedad San Andreas.
- Análisis fisicoquímico y microbiológico de las rodajas de frutilla liofilizadas.
- Análisis de minerales de las rodajas de frutilla liofilizadas.
- Análisis de rehidratación de las rodajas de frutilla liofilizadas.
- Análisis del diseño experimental en el proceso de liofilización.
- Operacionalización de las variables para el proceso de liofilización de rodajas de frutilla.

3.3 Paradigma investigativo

Bribiesca & Merino, (2008) definen el paradigma como “un modelo o ejemplo de aquellos problemas por resolver en una disciplina científica y el modo cómo se darán las soluciones. De manera que, un paradigma es una forma especial de entender ciertos problemas, explicarlos y manipularlos” (Pag.82). Para Ricoy, (2006) el paradigma positivista es calificado como cuantitativo, empírico-analítico, racionalista, sistemático gerencial y científico tecnológico, por tanto, el paradigma positivista sustenta la investigación que tiene como objetivo comprobar una hipótesis por medios estadísticos o determinar los parámetros de una determinada variable mediante la expresión numérica.

Para el presente trabajo de investigación, se aplicó el paradigma positivista, en el cual se puede identificar las variables dependiente e independiente en la obtención de rodajas de frutilla liofilizadas a nivel experimental, con el fin de formular la hipótesis del tipo empírica.

3.4 Enfoque de investigación

Según Hernández et al., (2014) el enfoque cuantitativo es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente, en este enfoque se establecen hipótesis y determinan variables; se traza un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas utilizando métodos estadísticos, y se extrae una serie de conclusiones respecto de la o las hipótesis.

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se utilizó el enfoque cuantitativo.

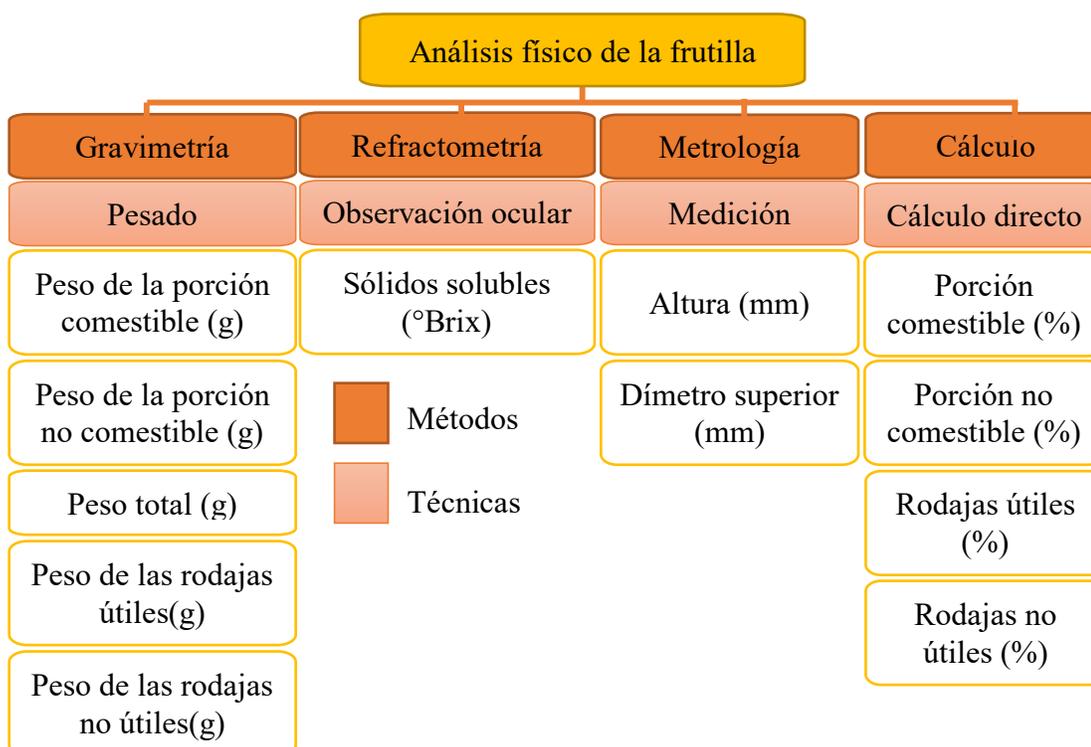
3.5 Métodos, técnicas e instrumentos

Para Martínez, (2013) la palabra método es el orden y los pasos a seguir para lograr un objetivo. Cuando se habla de seguir un camino en la investigación, se está haciendo alusión a los pasos ordenados que permiten el acercamiento a la realidad; son las posibles vías para llegar a un objetivo. Según Ramos, (2018) la técnica es el conjunto de instrumentos y medios a través de los cuales se efectúa el método. La diferencia entre método y técnica es que el método es el conjunto de pasos y etapas que debe cumplir una investigación, mientras que la técnica es el conjunto de instrumentos en el cual se efectúa el método. Según Hernández et al., (2014) el instrumento de medición es el recurso que utiliza el investigador para registrar información o datos sobre las variables que tiene en mente. Para realizar el proceso de medir es necesario y fundamental el instrumento de medición, un instrumento de medición adecuado es aquel que registra datos observables que representan verdaderamente los conceptos o las variables que el investigador tiene en mente.

Los métodos y técnicas utilizados en el presente trabajo de investigación, se detallan a continuación:

3.5.1 Análisis físico de la frutilla variedad San Andreas

Los análisis físicos de la frutilla, se realizaron en el Laboratorio Académico de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (LACIA), dependiente de la Carrera de Ingeniería de Alimentos, perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”. En la figura 3.1, se muestran los métodos y técnicas que se utilizaron para la frutilla variedad San Andreas.

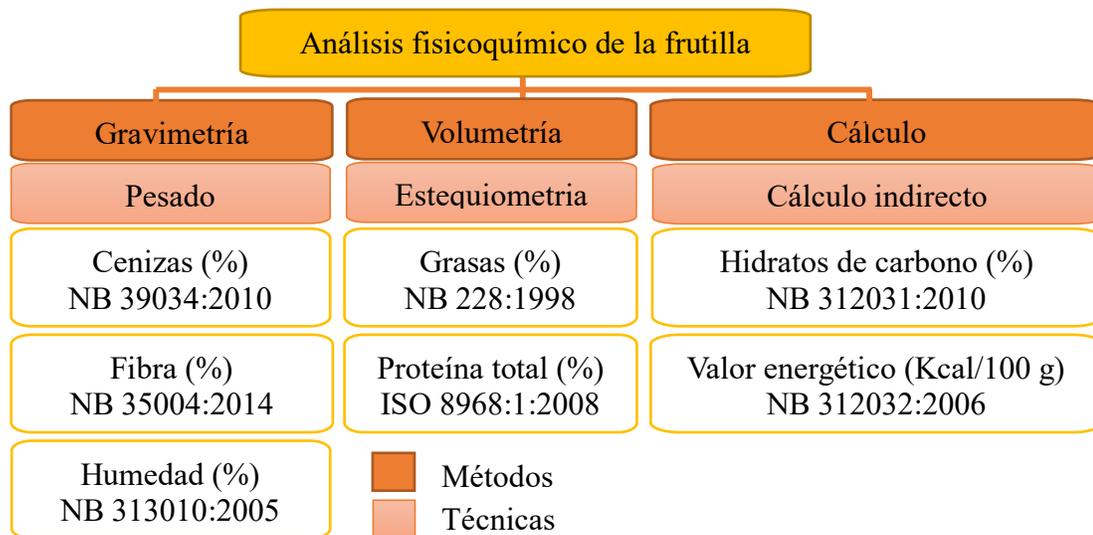


Fuente: Elaboración propia

Figura 3.1 Métodos y técnicas utilizadas en el análisis físico de la frutilla

3.5.2 Análisis fisicoquímico de la frutilla variedad San Andreas

Los análisis fisicoquímicos de la frutilla, se realizaron en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología, dependiente de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”. En la figura 3.2, se muestran los métodos y técnicas que fueron utilizados para la frutilla variedad San Andreas.

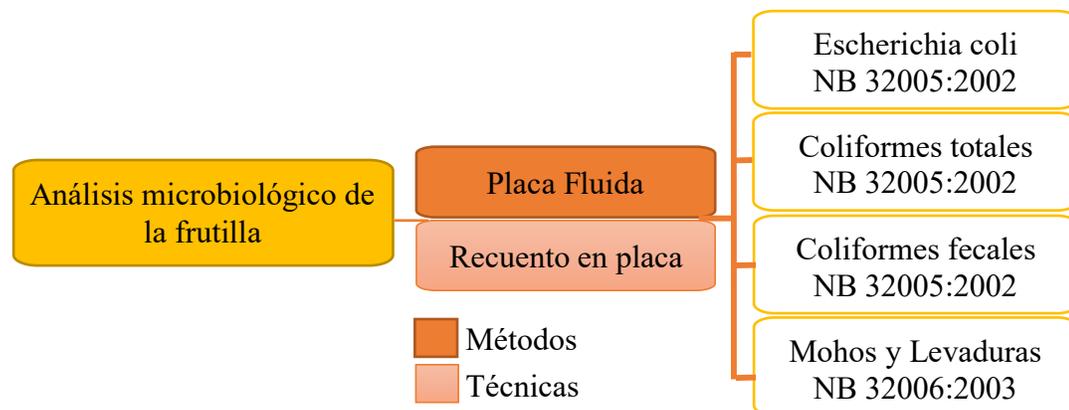


Fuente: CEANID, 2022

Figura 3.2 Métodos y técnicas utilizadas en el análisis fisicoquímico de la frutilla

3.5.3 Análisis microbiológico de la frutilla variedad San Andreas

Los análisis microbiológicos de la frutilla, se realizaron en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología, dependiente de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”. En la figura 3.3, se muestran los métodos y técnicas que fueron utilizados para la frutilla variedad San Andreas.

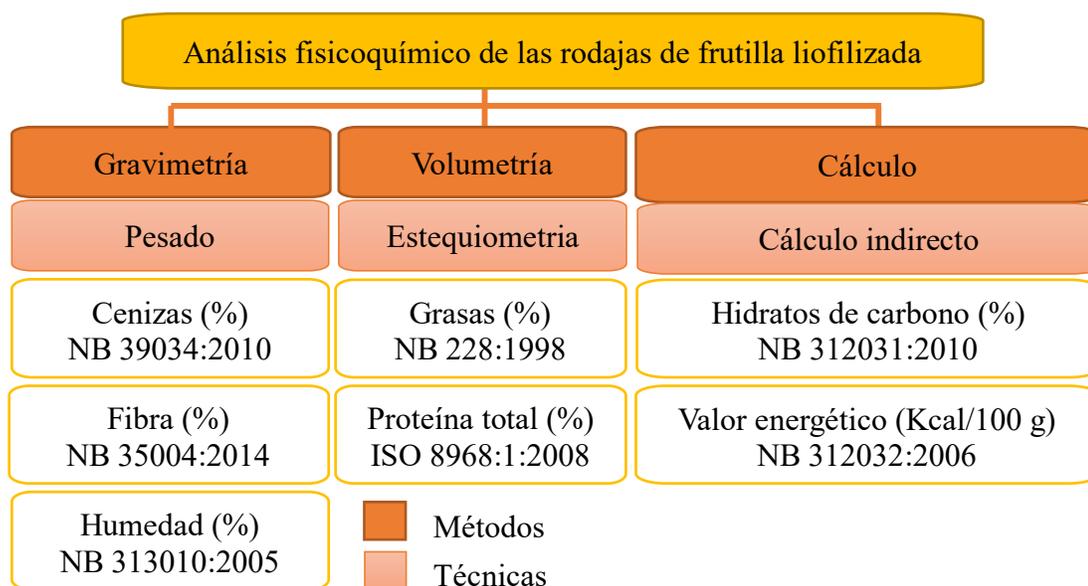


Fuente: CEANID, 2022

Figura 3.3 Métodos y técnicas utilizadas en el análisis microbiológico de la frutilla

3.5.4 Análisis fisicoquímico de las rodajas de frutilla liofilizada variedad San Andreas

Los análisis fisicoquímicos de las rodajas de frutilla liofilizadas, se realizaron en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología, dependiente de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”. En la figura 3.4, se muestran los métodos y técnicas que fueron utilizados para las rodajas de frutilla liofilizadas variedad San Andreas.

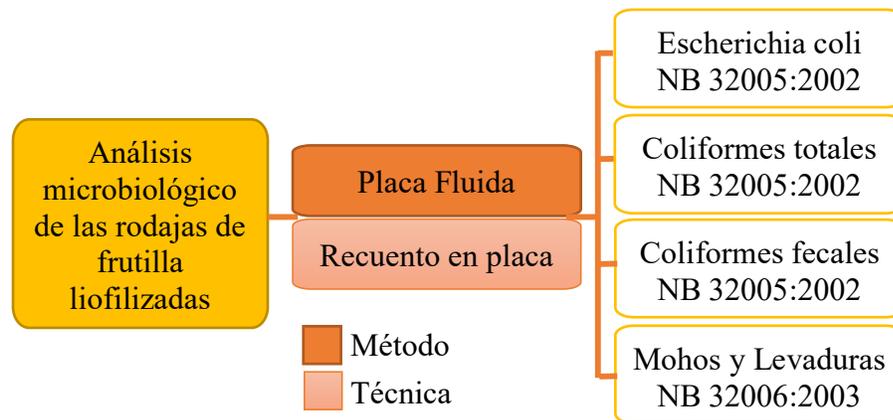


Fuente: CEANID, 2022

Figura 3.4 Métodos y técnicas utilizadas en el análisis fisicoquímico de las rodajas de frutilla liofilizadas

3.5.5 Análisis microbiológico de las rodajas de frutilla liofilizadas variedad San Andreas

Los análisis microbiológicos de las rodajas de frutilla liofilizadas, se realizaron en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología, dependiente de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”. En la figura 3.5, se muestran los métodos y técnicas que fueron utilizados para las rodajas de frutilla liofilizadas variedad San Andreas.

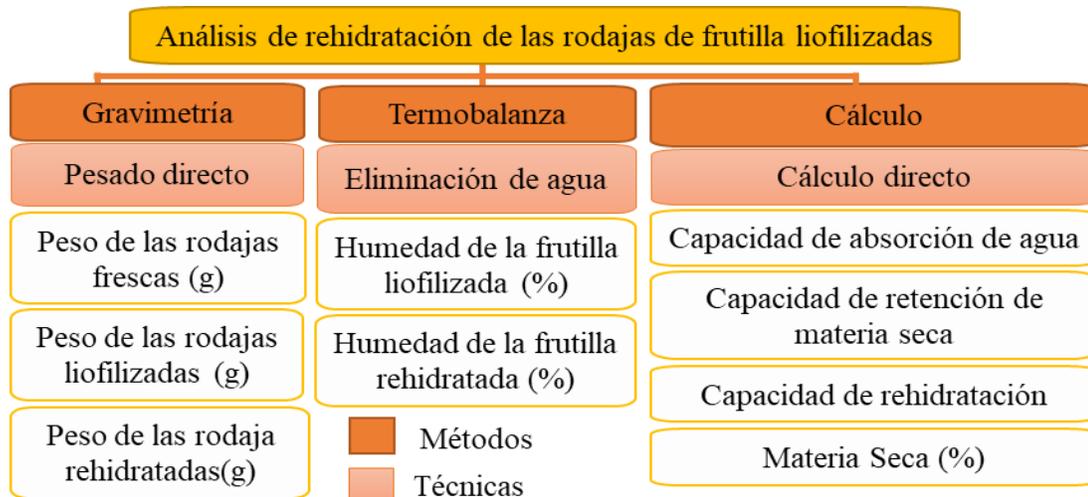


Fuente: CEANID, 2022

Figura 3.5 Métodos y técnicas utilizadas en el análisis microbiológico de las rodajas de frutilla liofilizadas

3.5.6 Análisis de rehidratación de las rodajas de frutilla liofilizadas variedad San Andreas

El análisis de rehidratación de las rodajas de frutilla liofilizadas, se realizó en el Laboratorio Académico de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (LACIA), dependiente de la Carrera de Ingeniería de Alimentos, perteneciente a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”. En la figura 3.6, se muestran los métodos y técnicas que se utilizaron para el análisis de rehidratación de las rodajas de frutilla liofilizadas a diferentes temperaturas.



Fuente: Elaboración propia

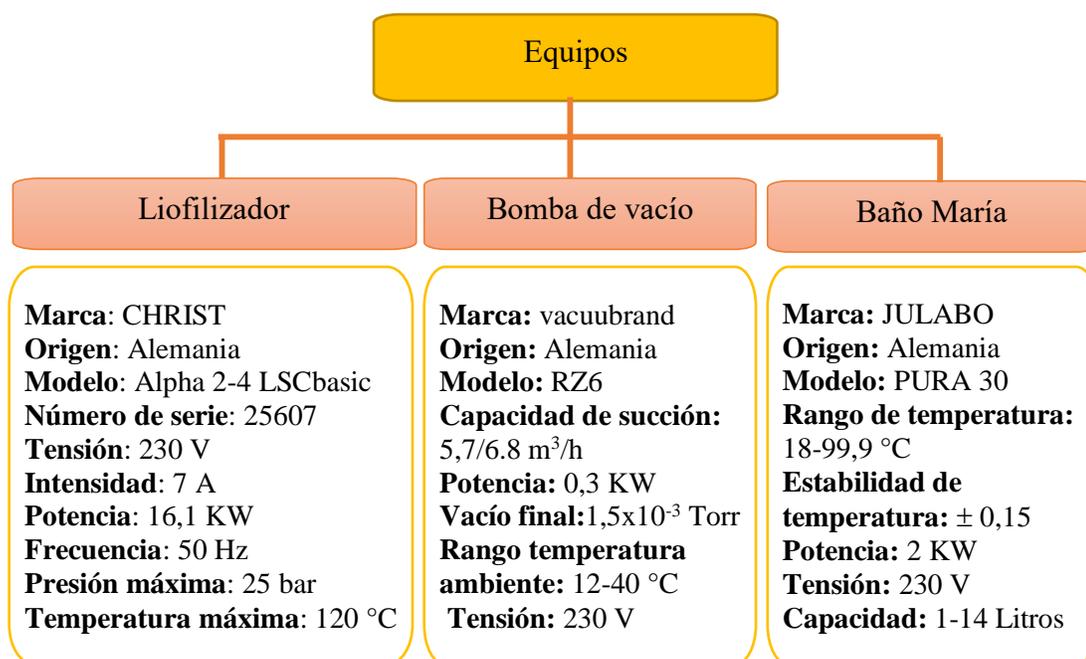
Figura 3.6 Métodos y técnicas utilizados en la rehidratación de las rodajas de frutilla liofilizada

3.6 Equipos, instrumentos de laboratorio y utensilios de cocina

Los equipos, instrumentos de laboratorio y utensilios de cocina que se utilizaron en el presente trabajo de investigación se describen a continuación:

3.6.1 Equipos

En la figura 3.7, se muestra la descripción de los equipos que se utilizaron en el presente trabajo de investigación. Las fotografías de los equipos se muestran en el (Anexo F).

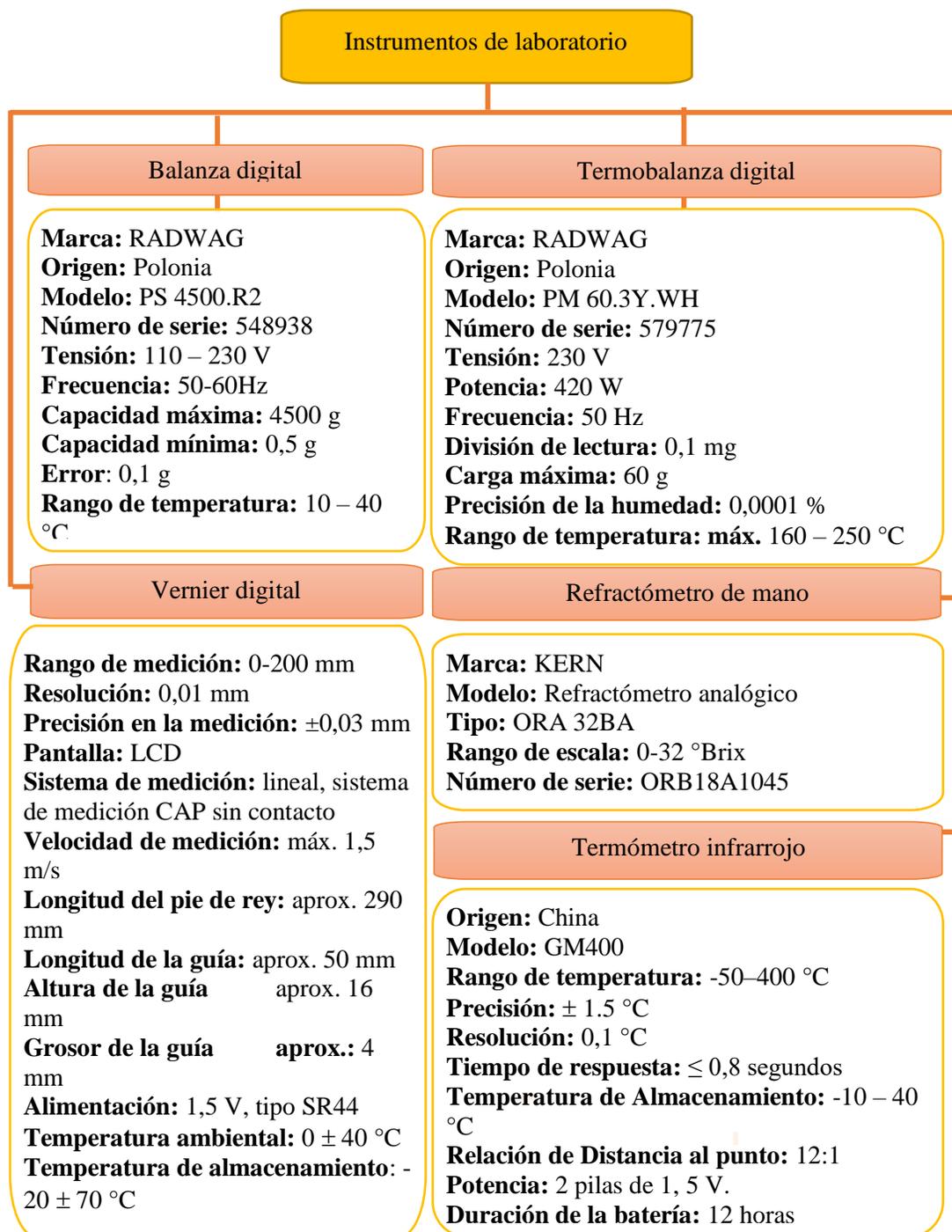


Fuente: LACIA, 2022

Figura 3.7 Descripción de equipos

3.6.2 Instrumentos de laboratorio

Los instrumentos de laboratorio que se utilizaron en el presente trabajo de investigación, se especifican en la figura 3.8 y las fotografías de los instrumentos de laboratorio se muestran en el (Anexo F).

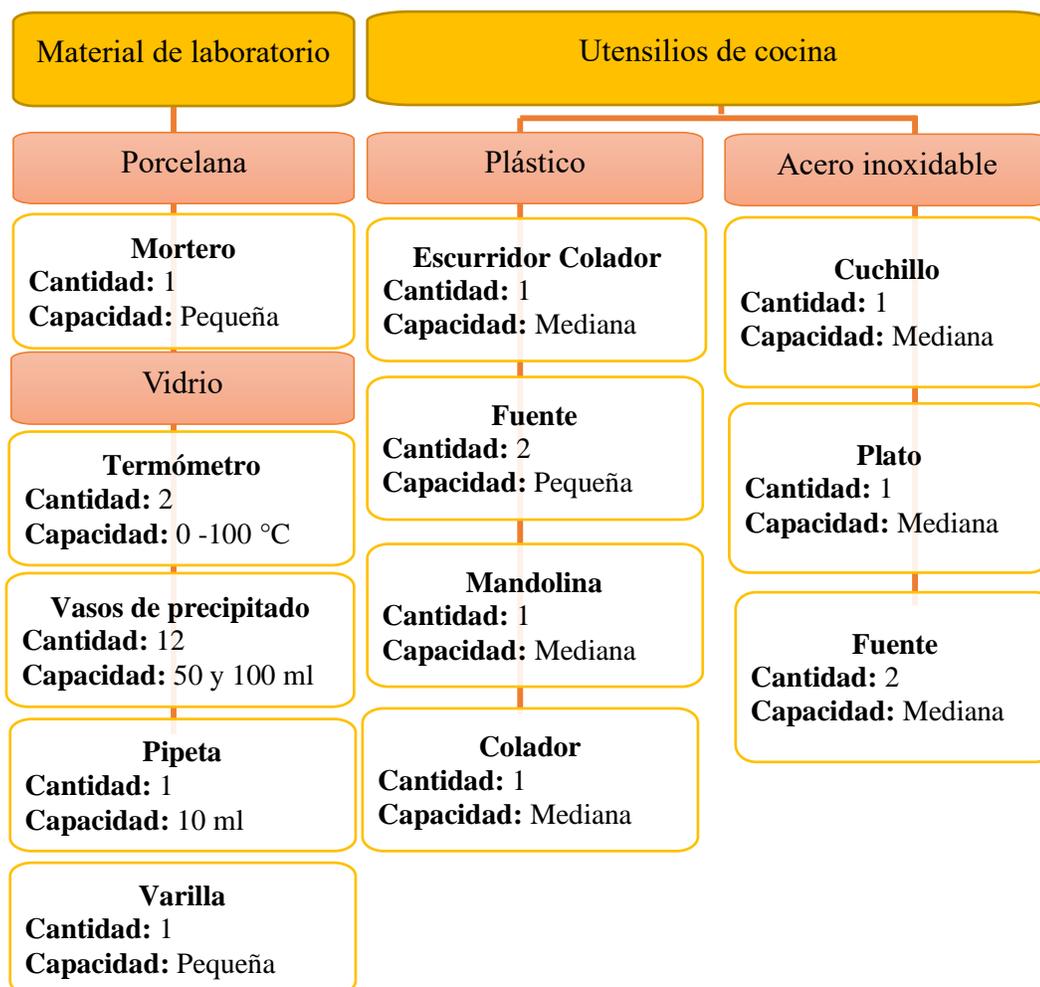


Fuente: LACIA, 2022

Figura 3.8 Descripción de instrumentos

3.6.3 Utensilios de cocina y material de laboratorio

En la figura 3.9, se describen los utensilios de cocina y el material de laboratorio que se utilizaron en el presente trabajo de investigación.

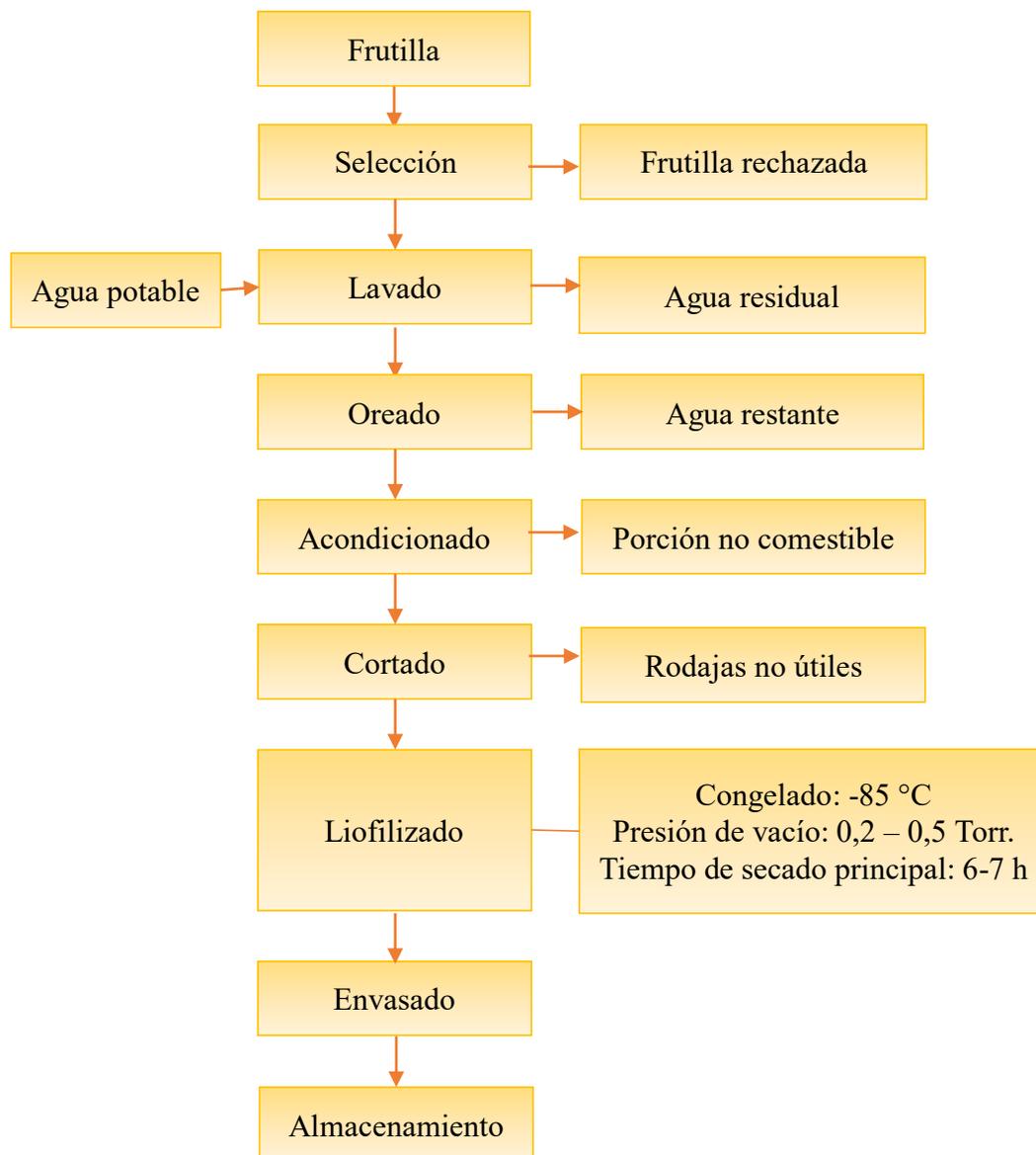


Fuente: Elaboración propia

Figura 3.9 Descripción de los utensilios de cocina y material de laboratorio

3.7 Diagrama de flujo del proceso de liofilización de rodajas de frutilla variedad San Andreas

En la figura 3.10, se muestra el diagrama de flujo del proceso de liofilización de rodajas de frutilla variedad San Andreas a nivel experimental



Fuente: Elaboración propia, 2022

Figura 3.10 Proceso de liofilización de rodajas de frutilla variedad san Andreas a nivel experimental

3.8 Descripción del proceso de liofilización de rodajas de frutilla variedad San Andreas

La descripción del proceso de liofilización de rodajas de frutilla, se describe a continuación:

3.8.1 Frutilla

La frutilla que se utilizó para la elaboración del presente trabajo de investigación fue de la variedad San Andreas y fue adquirida en la provincia Cercado de Tarija, zona El Portillo.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11 Frutilla variedad San Andreas

3.8.2 Selección

La selección de la frutilla, se realizó de manera visual separando para el proceso de liofilización las frutillas maduras, en buen estado y del tamaño que se muestra en la tabla 4.1, rechazando las de tamaño inferior o superior a este, también las frutillas podridas o dañadas y las que aún no se encontraban maduras.

3.8.3 Lavado

El lavado se realizó en una fuente escurridora con agua potable en relación 1:1, entre la cantidad de agua y la cantidad de frutillas (figura 3.12); con la finalidad de eliminar la tierra y otros residuos adheridos a la fruta, y a su vez escurrir toda el agua adherida en el lavado.



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.12 Lavado de la frutilla

3.8.4 Oreado

El oreado se realizó en un escurridor de plástico con papel de cocina absorbente; con el fin de absorber el agua adherida en frutilla durante el lavado (figura 3.13).



Fuente: Elaboración propia
Figura 3.13 Oreado de la frutilla lavada

3.8.5 Acondicionamiento

Con un cuchillo de acero inoxidable, se quitó el cáliz y tallo de la frutilla, separando así la porción comestible de la porción no comestible (figura 3.14).

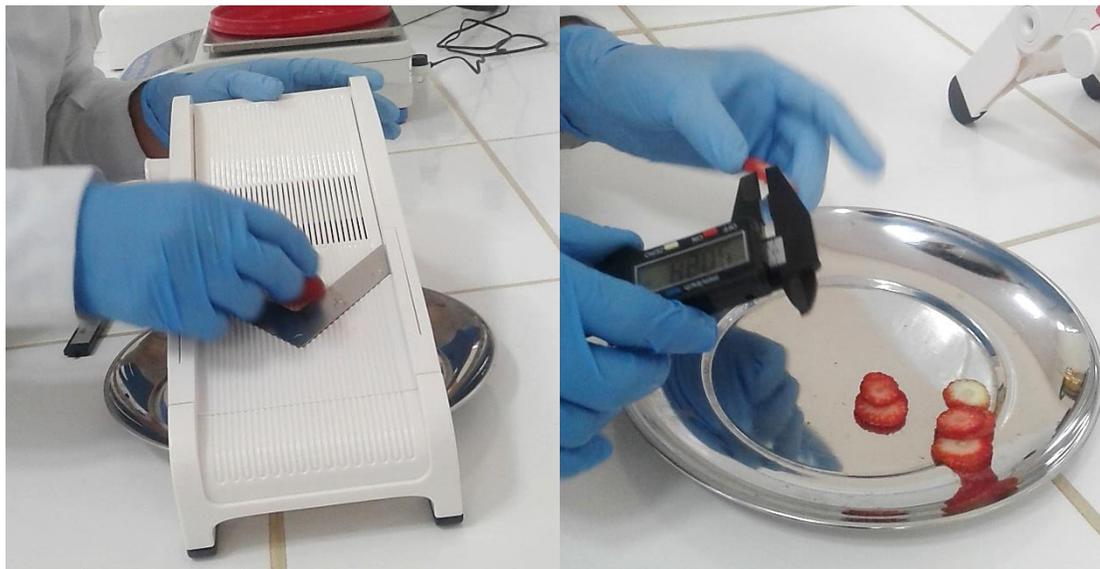


Fuente: Elaboración propia

Figura 3.14 Acondicionado de la frutilla

3.8.6 Cortado

Se realizó el cortado de las frutillas en rodajas de 3 mm de espesor, con una mandolina de cocina regulable, y se corroboró su grosor con la ayuda de un wernier digital de manera que, las rodajas sean uniformes para el proceso de liofilización (figura 3.15).



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.15 Cortado de la frutilla

3.8.7 Liofilizado

Previo al deshidratado de las rodajas de frutilla mediante liofilización, se realizó el pesado de las mismas, utilizándose aproximadamente 60 gramos para cada prueba. Después se realizó el congelado de las rodajas en el liofilizador por un tiempo de 40 minutos, tiempo en el cual las frutillas congelan alcanzando temperaturas entre (-27 y -30) °C. Transcurrido este tiempo se pasó a la etapa de secado para extraer el agua de las rodajas de frutilla mediante sublimación a una presión de 0,2 Torrlicelli y tiempo de 7 horas. Finalizado el tiempo se procedió a retirar las rodajas de frutillas liofilizadas para envasarla (figura 3.16)



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16 Proceso de liofilización de rodajas de frutilla

3.8.8 Envasado

El envasado del producto, se realizó en bolsas herméticas de polipropileno recubiertas de papel craft de tamaño de 20 x 12 cm. Para el control del proceso de liofilización se realizó el pesado de las rodajas de frutilla liofilizadas y se determinó el porcentaje de humedad en la termobalanza (figura 3.17).



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.17 Envasado de las rodajas de frutilla liofilizadas.

3.8.9 Almacenado

El almacenado del producto se efectuó en un lugar seco, con poca luz y a temperatura ambiente de (20 a 30) °C.

3.9 Operalización de variables en la obtención de rodajas de frutilla liofilizadas

En la tabla 3.1, se muestra el cuadro de operacionalización de las variables para el proceso de liofilización del presente trabajo de investigación.

Tabla 3.1

Operalización de variables en la liofilización de rodajas de frutilla variedad San Andreas

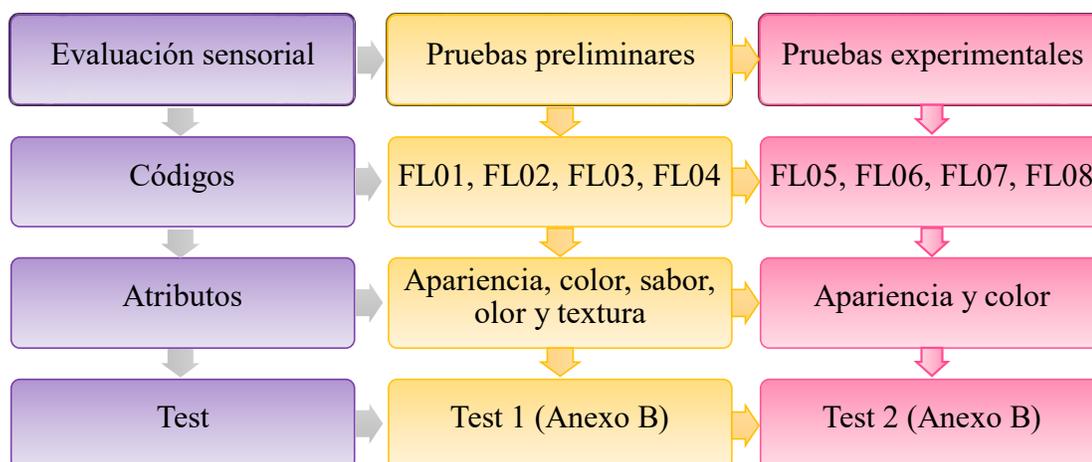
| Hipótesis | Variable | Definición | Parámetros | Indicadores | Escala | |
|---|---------------|--|---|---------------------------|----------------------------|------------|
| La aplicación del método de liofilización a nivel experimental, permitirá obtener rodajas de frutilla deshidratadas en la provincia Cercado de Tarija. | Independiente | Proceso de liofilización | Proceso de conservación mediante sublimación, aúna los dos métodos más fiables de conservación, la congelación y la deshidratación (Ramírez, 2006) | Tipo de Corte | Vernier | mm |
| | | | | Presión de vacío | Indicador de presión | Torricelli |
| | | | | Contenido de humedad | Humedad | % |
| | Dependiente | Rodajas de frutilla deshidratadas variedad San Andreas | Es una fruta estable en almacenamiento que se ha sometido a un proceso para eliminar casi toda su humedad mientras conserva el sabor y los nutrientes. Es muy ligera, con una textura seca y crujiente y un sabor a fruta intenso y concentrado (Jones & Covington, 2021) | Análisis fisicoquímico | Proteína | % |
| | | | | | Carbohidratos | % |
| | | | | | Grasas | % |
| | | | | | Cenizas | % |
| | | | | | Fibra | % |
| | | | | | Humedad | % |
| | | | | | Valor energético | Kcal/g |
| | | | | Análisis de rehidratación | Capacidad de rehidratación | Índice |
| | | | | Análisis microbiológico | Coliformes Totales | UFC/g(ml) |
| | | | | | Coliformes fecales | UFC/g(ml) |
| | | | | | Mohos y levaduras | UFC/g(ml) |
| Escherichia Coli | UFC/g(ml) | | | | | |
| Evaluación sensorial | Apariencia | Escala hedónica de 5 puntos | | | | |
| | Color | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

3.10 Evaluación sensorial

La evaluación sensorial se ha definido como la disciplina científica utilizada para evocar, medir, analizar e interpretar esas respuestas a los productos percibidos a través de los sentidos de la vista, el olfato, el tacto, el gusto y el oído (Severiano, 2019).

Según Baldovino, (2018) el análisis sensorial es el examen de las propiedades organolépticas de un producto realizables con los sentidos humanos. Dicho de otro modo, es la evaluación de la apariencia, olor, aroma, textura y sabor de un alimento o materia prima, además la aplicación de análisis sensoriales, en la industria alimentaria es reconocida como una de las formas más importantes de asegurar la aceptación del producto por parte del consumidor. En la figura 3.18 se detallan las evaluaciones sensoriales realizadas en el presente trabajo de investigación.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.18 Evaluaciones sensoriales realizadas en la obtención de rodajas de frutilla liofilizada

3.11 Diseño experimental

El diseño experimental es una técnica estadística. Esta consiste en manipular intencionalmente la variable independiente de un modelo para observar y medir sus efectos en la variable dependiente, en otras palabras, busca determinar el impacto en una variable como consecuencia de modificar otra variable. Esto, dentro de un proceso o estudio estadístico. Cabe resaltar que este tipo de método se caracteriza por ser

cuantitativo. Es decir, se utilizan las matemáticas para medir los cambios observados en la variable dependiente (Westreicher, 2021).

3.11.1 Diseño factorial 2^k

Son denominados diseño factorial 2^k los diseños en los cuales cada uno de los factores cuenta con dos niveles, es decir cuando se realiza un experimento con un número de factores k en el que cada uno de estos solo puede adoptar dos niveles. Estos niveles podrían ser cuantitativos o cualitativos y una réplica completa de tal diseño requiere que realizar 2^k combinaciones (Fernández, 2020).

Este diseño describe como realizar los experimentos de la forma más adecuada para conocer simultáneamente qué efecto tienen k factores sobre una respuesta y descubrir su interaccionan entre ellos (Fernández, 2020. Pág. 20).

3.11.2 Diseño factorial 2^2 en el proceso de liofilización

Para realizar el diseño experimental en el proceso de liofilización, se utilizó el diseño factorial 2^k , con k variables y dos niveles de variación para cada variable. En el presente trabajo de investigación se tienen 2 variables con 2 niveles cada uno. A continuación, se muestran la ecuación 3.1 y la ecuación 3.2.

$$2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k \quad \text{(Ecuación 3.1)}$$

Donde:

2 = Número de niveles

k = Número de variables

$$2^2 = 2 \times 2 = 4 \text{ pruebas/ réplica} \quad \text{(Ecuación 3.2)}$$

En la tabla 3.2, se muestra los niveles de variación de las variables (nivel inferior y superior), que se aplicaron en el proceso de liofilización, conformado por dos variables: presión de vacío y tiempo del secado principal.

Tabla 3.2*Niveles de variación de las variables en el proceso de liofilización*

| Variables | Unidades | Niveles | |
|-----------------------------|------------|----------|----------|
| | | Superior | Inferior |
| Presión de vacío (A) | Torricelli | 0,5 | 0,2 |
| Tiempo de liofilización (B) | Horas | 7,0 | 6,0 |

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.3 se muestra la matriz del diseño experimental que se aplicó en el proceso de liofilización, conformado por dos variables con dos niveles cada una, considerando la variable más influyente la variable A.

Tabla 3.3*Matriz de variables para el proceso de liofilización*

| Combinación de tratamientos | Variables | | Interacción | Variable respuesta |
|-----------------------------|-----------|---|-------------|--------------------|
| | A | B | AB | Y_i |
| (1) | - | - | + | Y_1 |
| A | + | - | - | Y_2 |
| B | - | + | - | Y_3 |
| ab | + | + | + | Y_4 |

Fuente: Elaboración propia

Donde:

A = Presión de vacío en el secado principal (Torricelli)

B = Tiempo del secado principal (horas)

 Y_i = Contenido de humedad en base húmeda (%)

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y
DISCUSIONES

4.1 Caracterización de las propiedades de la frutilla variedad San Andreas

Para la caracterización de las propiedades de la frutilla variedad San Andreas, se tomaron en cuenta las propiedades físicas, análisis fisicoquímicos y microbiológicos, los cuales se detallan a continuación:

4.1.1 Propiedades físicas de la frutilla variedad San Andreas

En la tabla 4.1, se muestran las propiedades físicas de la frutilla variedad San Andreas y las mismas fueron realizadas en el Laboratorio Académico de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (LACIA).

Tabla 4.1

Propiedades físicas de la frutilla variedad San Andreas

| N° | Peso total (g) | PC (%) | PNC (%) | Sólidos solubles (°Brix) | Diámetro superior mm | Altura Mm | RU (%) | RNU (%) |
|-------|----------------|--------|---------|--------------------------|----------------------|-----------|--------|---------|
| 1 | 12,55 | 90,76 | 9,24 | 8,4 | 25,00 | 34,40 | 70,00 | 30,00 |
| 2 | 12,42 | 90,26 | 9,74 | 10,5 | 26,00 | 35,40 | 72,73 | 27,27 |
| 3 | 14,25 | 90,53 | 9,47 | 7,2 | 30,10 | 35,40 | 72,73 | 27,27 |
| 4 | 13,74 | 91,85 | 8,15 | 9,2 | 29,10 | 33,20 | 66,67 | 33,33 |
| 5 | 14,02 | 89,16 | 10,84 | 8,3 | 26,00 | 33,30 | 66,67 | 33,33 |
| 6 | 13,84 | 95,09 | 4,91 | 8,1 | 26,10 | 35,40 | 81,82 | 18,18 |
| 7 | 14,38 | 95,06 | 4,94 | 7,8 | 28,10 | 37,50 | 75,00 | 25,00 |
| 8 | 14,68 | 89,51 | 10,49 | 10,3 | 24,00 | 36,40 | 66,67 | 33,33 |
| 9 | 14,41 | 93,68 | 6,32 | 9,3 | 27,00 | 35,70 | 75,00 | 25,00 |
| 10 | 16,22 | 94,82 | 5,18 | 7,5 | 29,30 | 39,30 | 76,92 | 23,08 |
| 11 | 14,86 | 92,33 | 7,67 | 7,1 | 30,30 | 32,80 | 77,78 | 22,22 |
| 12 | 17,36 | 89,34 | 10,66 | 7,4 | 29,20 | 33,30 | 80,00 | 20,00 |
| 13 | 14,86 | 94,01 | 5,99 | 7,4 | 28,00 | 37,00 | 75,00 | 25,00 |
| 14 | 12,48 | 93,35 | 6,65 | 7,2 | 26,00 | 33,20 | 70,00 | 30,00 |
| 15 | 14,63 | 95,76 | 4,24 | 7,8 | 28,50 | 35,10 | 81,82 | 18,18 |
| 16 | 11,61 | 94,40 | 5,60 | 8,2 | 26,00 | 34,10 | 63,64 | 36,36 |
| 17 | 11,98 | 94,07 | 5,93 | 8,5 | 25,50 | 31,80 | 66,67 | 33,33 |
| 18 | 10,76 | 94,61 | 5,39 | 8,5 | 22,00 | 31,50 | 77,78 | 22,22 |
| 19 | 14,08 | 93,89 | 6,11 | 8,3 | 26,50 | 34,50 | 72,73 | 27,27 |
| 20 | 12,40 | 94,84 | 5,16 | 9,5 | 26,30 | 33,70 | 80,00 | 20,00 |
| X_i | 13,78±0,01 | 92,87 | 7,13 | 8,33±0,1 | 26,95±0,01 | 34,65±0,1 | 73,48 | 26,52 |

Fuente: Elaboración propia

Donde:

PC: Porción comestible (%)

PNC: Porción no comestible (%)

RU: Rodajas útiles (%)

RNU: Rodajas no útiles (%)

En la tabla 4.1, se puede observar los resultados promedios de las propiedades físicas de la frutilla variedad San Andreas, donde: peso total $13,78 \text{ g} \pm 0,01 \text{ g}$; porción comestible 92,87 %; porción no comestible 7,13 %; sólidos solubles $8,33 \pm 0,1$ °Brix; diámetro superior $26,95 \pm 0,01 \text{ mm}$; altura $34,65 \pm 0,01 \text{ mm}$; rojas útiles 73,48 % y rodajas no útiles 26,52 %.

4.1.2 Análisis fisicoquímico de la frutilla variedad San Andreas

En la tabla 4.2, se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos de la frutilla variedad San Andreas de datos extraídos del (Anexo A).

Tabla 4.2

Análisis fisicoquímico de la frutilla variedad San Andreas

| Componentes | Unidad | Resultados |
|-------------------------|------------|------------|
| Cenizas | % | 0,24 |
| Fibra | % | 1,24 |
| Grasa | % | 0,04 |
| Hidratos de carbono | % | 6,28 |
| Humedad | % | 91,47 |
| Proteína total (Nx6,25) | % | 0,73 |
| Valor energético | Kcal/100 g | 28,40 |

Fuente: CEANID, 2022

En la tabla 4.2, se puede observar que la frutilla variedad San Andreas, contiene: cenizas 0,24%; fibra 1,24 %; grasa 0,04 %; hidratos de carbono 6,28 %; humedad 91,47%; proteína total (Nx6,25) 0,73 % y valor energético 28,40 Kcal/100 g.

4.1.3 Análisis de minerales de la frutilla variedad San Andreas

En la tabla 4.3 se muestran los resultados de los análisis de minerales de la frutilla variedad San Andreas de datos extraídos del (Anexo A).

Tabla 4.3***Análisis de minerales de la frutilla variedad San Andreas***

| Minerales | Unidad | Resultados |
|-----------|----------|------------|
| Calcio | mg/100 g | 16,5 |
| Fósforo | mg/100 g | 8,5 |
| Potasio | mg/100 g | 89,0 |

Fuente: CEANID, 2022

En la tabla 4.3, se puede observar que la frutilla variedad San Andreas, contiene: Calcio 16,5 mg/100 g; fósforo 8,5 mg/100 g y potasio 89 mg/100 g.

4.1.4 Análisis microbiológico de la frutilla variedad San Andreas

En la tabla 4.4, se muestran los resultados del análisis microbiológico de la frutilla variedad San Andreas de datos extraídos del (Anexo A).

Tabla 4.4***Análisis microbiológico de la frutilla variedad San Andreas***

| Microorganismos | Unidad | Resultados |
|--------------------|--------|-------------------------|
| Coliformes fecales | UFC/ g | $< 1,0 \times 10^1$ (*) |
| Coliformes totales | UFC/ g | $< 1,0 \times 10^1$ (*) |
| Escherichia coli | UFC/ g | $< 1,0 \times 10^1$ (*) |
| Mohos y levaduras | UFC/ g | $3,5 \times 10^3$ |

Fuente: CEANID, 2022

En la tabla 4.4, se puede observar que la frutilla variedad San Andreas, contiene: Coliformes fecales $< 1,0 \times 10^1$ UFC/g (*); Coliformes totales $< 1,0 \times 10^1$ UFC/g (*); Escherichia coli $< 1,0 \times 10^1$ UFC/g (*) y mohos y levaduras $3,5 \times 10^3$.

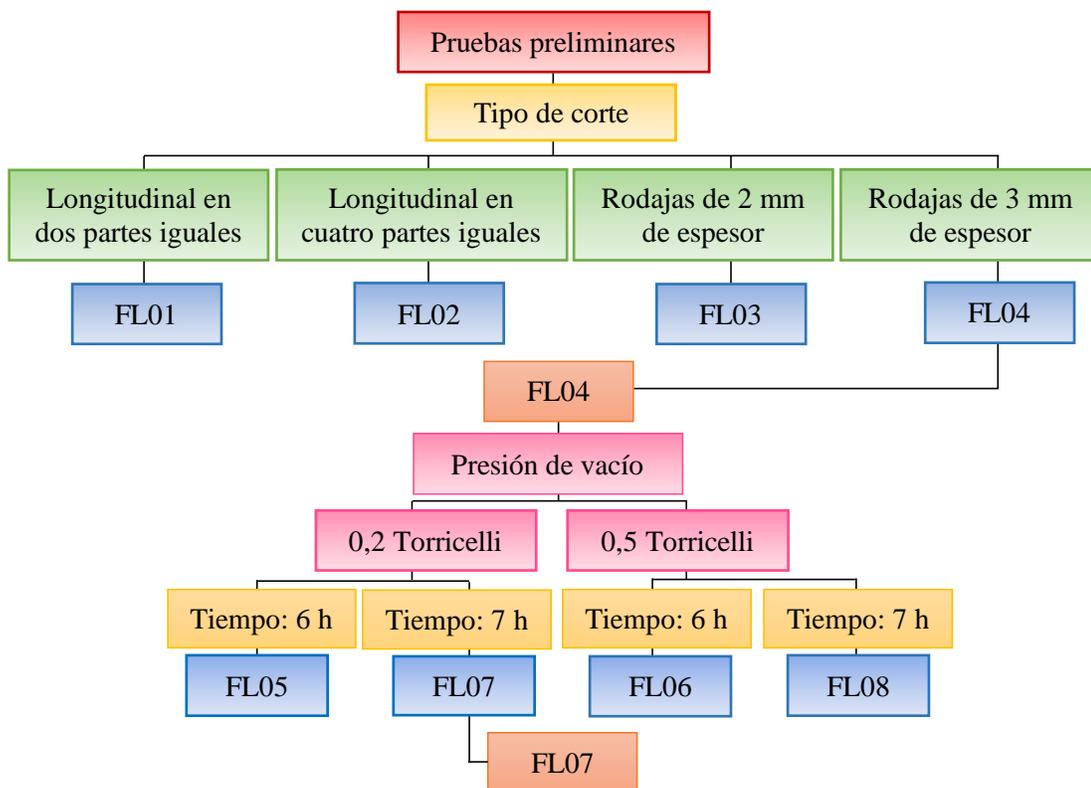
(*) No se observa el desarrollo de colonias.

4.2 Caracterización de las variables del proceso para la obtención de rodajas de frutilla liofilizadas variedad San Andreas

Para la caracterización de las variables del proceso de obtención de rodajas de frutilla liofilizada variedad San Andreas, se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

4.2.1 Clasificación de las pruebas preliminares para determinar tipo de corte de la frutilla variedad San Andreas

Con la finalidad de determinar el tipo de corte más adecuado para el proceso de liofilización de las muestras de frutilla variedad San Andreas, se realizaron los tipos de cortes: longitudinal en dos y cuatros partes y rodajas de 2 y 3 mm de espesor, los cuales se sometieron al proceso de deshidratado mediante liofilización, en donde se aplicaron los mismos parámetros para cada muestra: tiempo de congelación 1 hora, presión de vacío en el secado principal 0,5 Torricelli y tiempo de secado 7 horas y el corte elegido fue rodajas de 3 mm de espesor, al cual aplicó el diseño experimental. En la figura 4.1, se muestran las pruebas realizadas en la obtención de rodajas de frutilla liofilizadas a nivel experimental.



Fuente: Elaboración propia

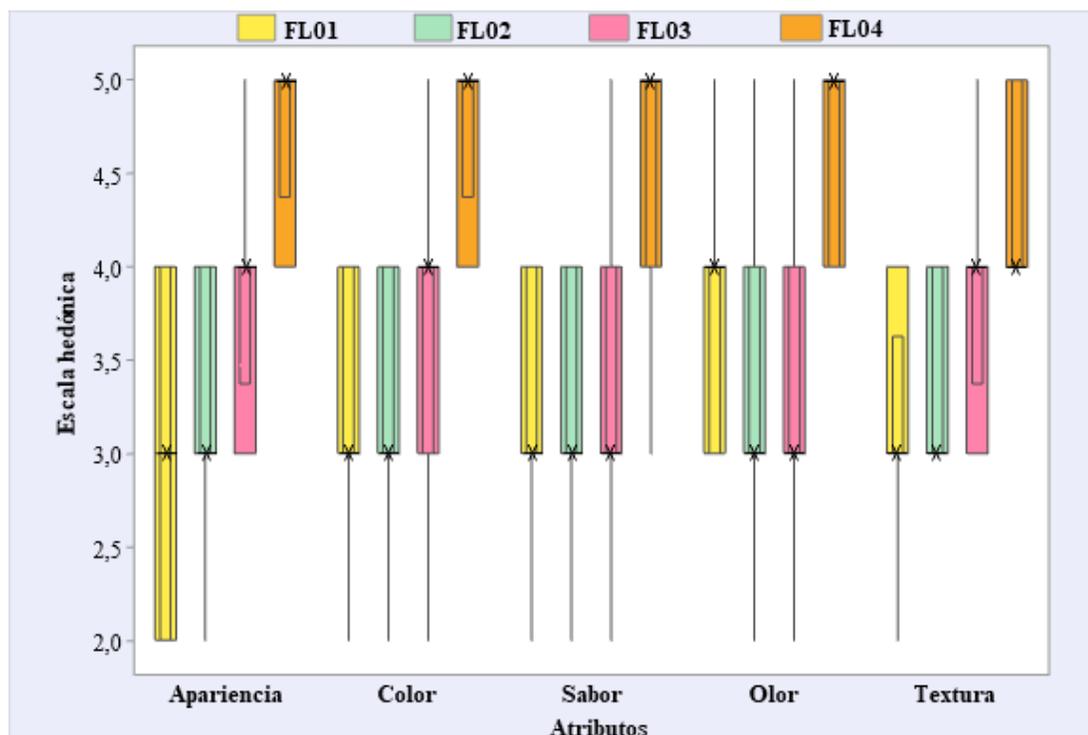
Figura 4.1 Pruebas realizadas en la obtención de rodajas de frutilla liofilizadas a nivel experimental

4.2.2 Evaluación sensorial de las muestras preliminares para elegir el tipo de corte

La evaluación sensorial de las muestras preliminares de frutilla liofilizada, de los cuatro tipos de corte se realizaron con 15 jueces no entrenados en escala hedónica de 5 puntos y en base a los atributos: apariencia, color, sabor, olor y textura.

4.2.2.1 Diagrama de caja y bigote para elegir el tipo de corte de las muestras preliminares de frutilla liofilizada

En la figura 4.2, se muestra el resultado del diagrama de caja y bigote para elegir el tipo de corte de las muestras preliminares de muestras de frutilla liofilizada y el cual se realizó en el programa estadístico Minitab versión 19 para Windows 10.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2 Caja y bigotes para elegir el tipo de corte de las muestras preliminares de muestras de frutilla liofilizada

El valor de las medianas según la figura 4.2 para el atributo apariencia es 5,0 (FL04), color 5,0 (FL04), sabor 5,0 (FL04), olor 5,0 (FL04) y textura 4,0 (FL04). Así mismo, realizado el análisis de varianza (Anexo C); se pudo observar que el valor $p < 0,05$; de

manera que se rechaza la hipótesis planteada, por lo tanto, existe diferencia significativa en los atributos sensoriales evaluados con nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

4.2.2.2 Prueba de Tukey para el atributo apariencia en las pruebas preliminares

En la tabla 4.5, se muestran los resultados de la prueba de Tukey para el atributo apariencia extraído de la tabla C.1.4 del (Anexo C), para un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

Tabla 4.5

Prueba de Tukey para el atributo apariencia

| Muestras | N | Media | Agrupación |
|----------|----|-------|------------|
| FL04 | 15 | 4,733 | A |
| FL03 | 15 | 3,933 | B |
| FL02 | 15 | 3,133 | C |
| FL01 | 15 | 3,133 | C |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.5, se puede observar que existe diferencia significativa entre las muestras FL04 y FL03 con relación a las otras muestras; mientras que entre las muestras FL02 y FL01 no existe diferencia significativa.

4.2.2.3 Prueba de Tukey para el atributo color en las pruebas preliminares

En la tabla 4.6, se muestran los resultados de la prueba de Tukey para el atributo color extraído de la tabla C.2.4 del (Anexo C), para un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Tabla 4.6

Prueba de Tukey para el atributo color

| Muestras | N | Media | Agrupación |
|----------|----|-------|------------|
| FL04 | 15 | 4,733 | A |
| FL03 | 15 | 3,667 | B |
| FL01 | 15 | 3,267 | B |
| FL02 | 15 | 3,200 | B |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.6, se puede observar que existe diferencia significativa entre la muestra FL04 y las demás muestras; mientras que entre las muestras FL03, FL02 y FL01 no existe diferencia significativa.

4.2.2.4 Prueba de Tukey para el atributo sabor en las pruebas preliminares

En la tabla 4.7, se muestran los resultados de la prueba de Tukey para el atributo sabor extraído de la tabla C.3.4 del (Anexo C), para un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Tabla 4.7

Prueba de Tukey para el atributo sabor

| Muestras | N | Media | Agrupación |
|----------|----|-------|------------|
| FL04 | 15 | 4,800 | A |
| FL03 | 15 | 3,467 | B |
| FL02 | 15 | 3,333 | B |
| FL01 | 15 | 3,333 | B |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.7, se puede observar que existe diferencia significativa entre la muestra FL04 y las de demás muestras; mientras que entre las muestras FL03, FL02 y FL01 no existe diferencia significativa.

4.2.2.5 Prueba de Tukey para el atributo olor en las pruebas preliminares

En la tabla 4.8, se muestran los resultados de la prueba de Tukey para el atributo olor extraído de la tabla C.4.4 del (Anexo C), para un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Tabla 4.8

Prueba de Tukey para el atributo olor

| Muestras | N | Media | Agrupación |
|----------|----|-------|------------|
| FL04 | 15 | 4,667 | A |
| FL01 | 15 | 3,733 | B |
| FL02 | 15 | 3,533 | B |
| FL03 | 15 | 3,467 | B |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.8, se puede observar que existe diferencia significativa entre la muestra FL04 y las de demás muestras; mientras que entre las muestras FL03, FL02 y FL01 no existe diferencia significativa.

4.2.2.6 Prueba de Tukey para el atributo textura en las pruebas preliminares

En la tabla 4.9 se muestran los resultados de la prueba de Tukey para el atributo textura extraído de la tabla C.5.4 del (Anexo C), para un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Tabla 4.9

Prueba de Tukey para el atributo textura

| Muestras | N | Media | Agrupación |
|---|----|-------|------------|
| FL04 | 15 | 4,467 | A |
| FL03 | 15 | 3,800 | B |
| FL02 | 15 | 3,467 | B C |
| FL01 | 15 | 3,133 | C |
| <i>Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.</i> | | | |

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.9, se puede observar que existe diferencia significativa entre la muestra FL04 con referencia a las de demás muestras; mientras que entre las muestras FL03 - FL02 y la FL02 - FL01 no hay diferencia significativa, pero si entre las muestras FL03 y FL01.

4.3 Diseño factorial 2² en el proceso de liofilización de frutilla variedad San Andreas

Para la determinación de las variables que influyen en el proceso de liofilización para obtener rodajas de frutilla liofilizada variedad San Andreas, se realizó la parte experimental considerando las variables: Presión de vacío en el secado principal (A) y tiempo del secado principal (B), tomando en cuenta el contenido de humedad en base húmeda (%) de las rodajas de frutilla liofilizada como variable respuesta. Los resultados obtenidos se muestran en el (Anexo D).

4.3.1 Análisis de varianza para la variable respuesta contenido de humedad en base húmeda en el proceso de liofilización

Para el determinar el contenido de humedad en base húmeda de las rodajas de frutilla liofilizadas, se utilizó la termobalanza digital. En la tabla 4.10, se muestran los resultados obtenidos del análisis de varianza del diseño factorial 2^2 , utilizando el programa estadístico STATGRAPHICS Centurión versión XVI para Windows 10, en el proceso de liofilización de rodajas de frutilla. Los datos son extraídos de la tabla D.1.3 del (Anexo D).

Tabla 4.10

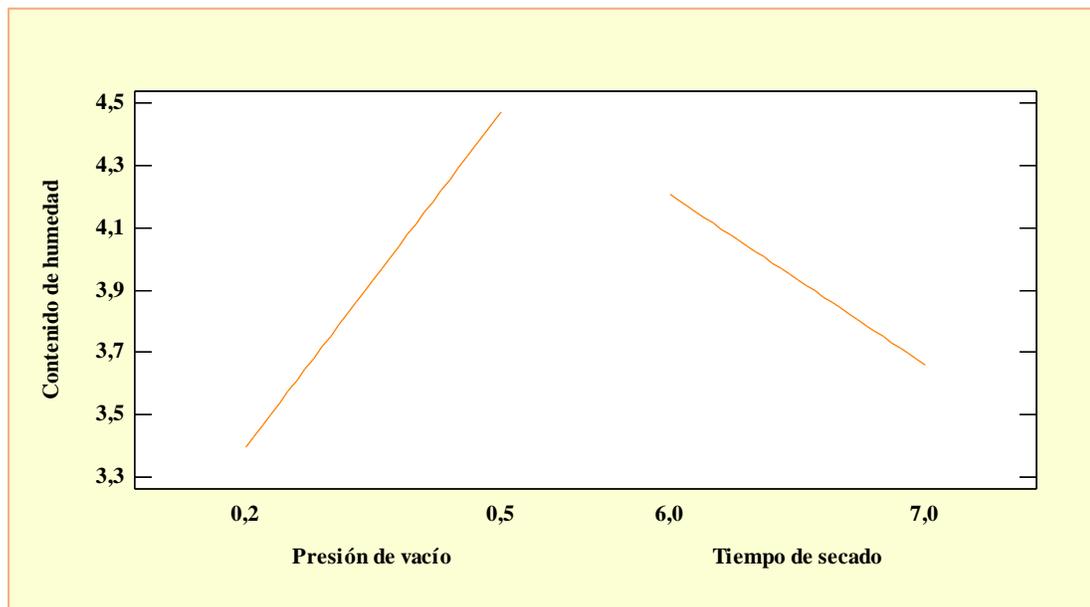
Análisis de varianza para el contenido de humedad

| Fuente | Suma de Cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Razón F | Valor P |
|--------------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| A:Presión de vacío | 2,31125 | 1 | 2,31125 | 195,04 | 0,0002 |
| B:Tiempo de secado | 0,59405 | 1 | 0,59405 | 50,13 | 0,0021 |
| AB | 0,01805 | 1 | 0,01805 | 1,52 | 0,2847 |
| Error total | 0,04740 | 4 | 0,01185 | | |
| Total | 2,97075 | 7 | | | |

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.10, se observa que las variables consideradas para el diseño factorial 2^2 , presión de vacío (A) es altamente significativa y tiempo de secado (B) es significativa en el proceso de liofilización de rodajas de frutilla. Sin embargo, la interacción AB no es estadísticamente significativa para un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

En la figura 4.3, se observa los efectos principales de las variables: Presión de vacío (A) y tiempo de secado (B), con relación al contenido de humedad en base húmeda de las muestras de rodajas de frutilla liofilizada variedad San Andreas, mismas que fue extraída del (Anexo D).

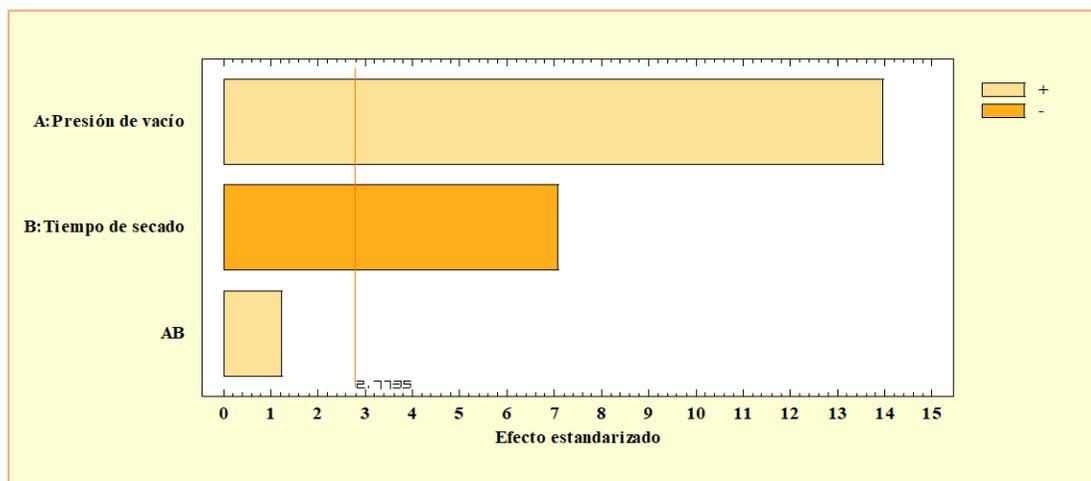


Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3 Efectos principales para el contenido de humedad

En la figura 4.3, se puede observar que la variable (A), presión de vacío (0,2 – 0,5 Torr), en sus niveles alto y bajo es más influyente en el contenido de humedad de las rodajas de frutilla variedad San Andreas liofilizadas, en comparación con la variable (B), tiempo de secado (6 – 7 h), que en sus niveles alto y bajo influye significativamente en el contenido de humedad de las rodajas de frutilla liofilizadas, pero en menor proporción.

En la figura 4.4, se muestra el diagrama de Pareto estandarizado de las variables tomadas en cuenta para el diseño experimental las cuales están ordenadas de mayor a menor grado de incidencia en la variable respuesta. La línea vertical de referencia es la que determina la significancia estadística con un valor de 2,7735. Por lo tanto, los efectos que sobrepasan la línea como las variables A y B, son estadísticamente significativos, además se observa mayor incidencia en la variable A de manera que es más significativa que la variable B, para un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4 Diagrama de Pareto estandarizado en función del contenido de humedad

4.3.2 Evaluación sensorial de las muestras del diseño experimental

Para establecer la aceptación de las muestras de rodajas de frutilla liofilizada, se realizó la evaluación sensorial de las muestras del diseño experimental, con 20 jueces no entrenados en escala hedónica de cinco puntos, tomando en cuenta los atributos apariencia y color. En la tabla 4.11, se detallan las dos muestras del diseño experimental con sus niveles alto y bajo.

Tabla 4.11

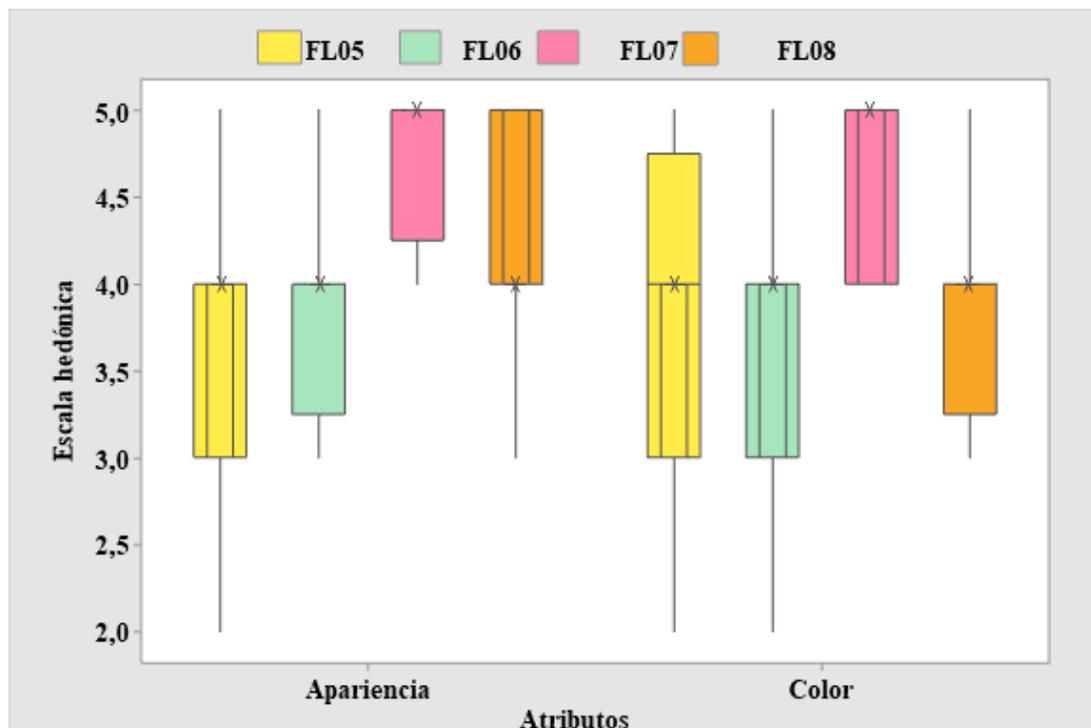
Diseño experimental aplicado a las rodajas de frutilla liofilizadas

| Combinación de tratamientos | Variables | | Codificación |
|-----------------------------|-------------------------------|------------|--------------|
| | Presión de vacío (Torricelli) | Tiempo (h) | |
| (1) | 0,2 | 6 | FL05 |
| a | 0,5 | 6 | FL06 |
| b | 0,2 | 7 | FL07 |
| ab | 0,5 | 7 | FL08 |

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.1 Diagrama de caja y bigote para las dos muestras del diseño experimental en su niveles alto y bajo

En la figura 4.5, se muestra el resultado del diagrama de caja y bigote para elegir la muestra más aceptada en la evaluación sensorial de las rodajas de frutilla liofilizadas del diseño experimental. Se utilizó el programa estadístico Minitab versión 19 para Windows 10.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.5 Caja y bigotes de las muestras de frutilla en rodajas liofilizadas del diseño experimental

El valor de las medianas según la figura 4.5 son: en el atributo apariencia 5,0 (FL07) y en el atributo color 5,0 (FL07). Además, realizando el análisis de varianza (Anexo C) se pudo observar que el valor $p < 0,05$; por lo tanto, se rechaza la hipótesis planteada, de manera que existe diferencia significativa en los atributos sensoriales evaluados con nivel de significancia $\alpha = 0,05$; pero considerando la preferencia de los jueces se procedió a elegir a la muestra FL07 como la muestra final.

4.3.2.2 Prueba de Tukey para el atributo apariencia de las muestras del diseño experimental

En la tabla 4.12, se muestran los datos estadísticos de la prueba de Tukey para el atributo apariencia a un nivel de significancia $\alpha = 0,05$; mismos que fueron extraídos de la tabla C.6.4 del (Anexo C).

Tabla 4.12

Prueba de Tukey para el atributo apariencia

| Muestras | N | Media | Agrupación |
|----------|----|-------|------------|
| FL07 | 20 | 4,75 | A |
| FL08 | 20 | 4,25 | B |
| FL06 | 20 | 3,80 | B C |
| FL05 | 20 | 3,65 | C |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.12, se puede observar que entre las muestras FL08 y FL06 no existe diferencia significativa, de igual forma entre las muestras FL06 y FL05, pero entre la muestra FL07 y la muestra FL05 con respecto a las demás muestras, si existe diferencia significativa.

4.3.2.3 Prueba de Tukey para el atributo color de las muestras del diseño experimental

En la tabla 4.13, se muestran los datos estadísticos de la prueba de Tukey para el atributo color a un nivel de significancia $\alpha = 0,05$; mismos que fueron extraídos de la tabla C.7.4 del (Anexo C).

Tabla 4.13

Prueba de Tukey para el atributo color

| Muestras | N | Media | Agrupación |
|----------|----|-------|------------|
| FL07 | 20 | 4,65 | A |
| FL08 | 20 | 3,95 | B |
| FL05 | 20 | 3,80 | B |
| FL06 | 20 | 3,75 | B |

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.13, se puede observar que entre las muestras FL08, FL05 y FL06 no existe diferencia significativa, pero entre la muestra FL07 con relación a las demás muestras sí existe diferencia significativa.

4.4 Caracterización de las propiedades de las rodajas de frutilla liofilizadas

Para la caracterización de las propiedades de las rodajas de frutilla liofilizadas variedad San Andreas, se tomaron en cuenta los análisis fisicoquímicos y microbiológicos, extraídos del (Anexo A). También los análisis de rehidratación de las rodajas de frutilla liofilizada, realizados en los Laboratorios Académicos de la Carrera de Ingeniería de Alimentos (LACIA).

4.4.1 Análisis fisicoquímico de las rodajas de frutilla liofilizada

En la tabla 4.14, se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos de las rodajas de frutilla liofilizadas de datos extraídos del (Anexo A)

Tabla 4.14

Análisis fisicoquímico de las rodajas de frutilla liofilizadas

| Componentes | Unidad | Resultados |
|-------------------------|------------|------------|
| Cenizas | % | 3,51 |
| Fibra | % | 5,50 |
| Grasa | % | 0,08 |
| Hidratos de carbono | % | 70,77 |
| Humedad | % | 14,05 |
| Proteína total (Nx6,25) | % | 5,37 |
| Valor energético | Kcal/100 g | 311,76 |

Fuente: CEANID, 2022

En la tabla 4.14, se observa que las rodajas de frutilla liofilizadas, contiene: cenizas 3,51 %; fibra 5,50 %; grasa 0,08 %; hidratos de carbono 70,77 %; humedad 14,05 %; proteína total (Nx6,25) 5,37 % y valor energético 311,76 Kcal/100 g.

4.4.2 Análisis de minerales de las rodajas de frutilla liofilizadas

En la tabla 4.15, se muestran los resultados de los análisis de minerales de las rodajas de frutilla liofilizadas de datos extraídos del (Anexo A).

Tabla 4.15***Análisis de minerales de la frutilla variedad San Andreas liofilizada***

| Minerales | Unidad | Resultados |
|-----------|----------|------------|
| Calcio | mg/100 g | 230 |
| Fósforo | mg/100 g | 183 |
| Potasio | mg/100 g | 1.160 |

Fuente: CEANID, 2022

En la tabla 4.15, se puede observar que las rodajas de frutilla liofilizadas contienen: Calcio 230 mg/100 g; fósforo 183 mg/100 g y potasio 1160 mg/100 g.

4.4.3 Análisis microbiológico de las rodajas de frutilla liofilizadas

En la tabla 4.16, se muestran los resultados del análisis microbiológico de las rodajas de frutilla liofilizadas de datos extraídos del (Anexo A).

Tabla 4.16***Análisis microbiológico de la frutilla variedad San Andreas liofilizada***

| Microorganismos | Unidad | Resultados |
|--------------------|--------|-------------------------|
| Coliformes fecales | UFC/ g | $< 1,0 \times 10^1$ (*) |
| Coliformes totales | UFC/ g | $< 1,0 \times 10^1$ (*) |
| Escherichia coli | UFC/ g | $< 1,0 \times 10^1$ (*) |
| Mohos y levaduras | UFC/ g | $6,0 \times 10^2$ |

Fuente: CEANID, 2022

En la tabla 4.16, se puede observar que las rodajas de frutilla liofilizadas contienen: Coliformes fecales $< 1,0 \times 10^1$ UFC/g (*); Coliformes totales $< 1,0 \times 10^1$ UFC/g (*); Escherichia coli $< 1,0 \times 10^1$ UFC/g (*) y mohos y levaduras $6,0 \times 10^2$.

(*) No se observa el desarrollo de colonias.

4.4.4 Análisis de rehidratación de las rodajas de frutilla liofilizadas

El análisis de rehidratación se realizó en cinco muestras de rodajas de frutilla liofilizadas para cada temperatura, mediante inmersión en 5 ml de agua potable, donde el agua utilizada se encontraba a dos temperaturas: la primera a 10 °C y la segunda a temperatura ambiente de 26 °C, además se controló el peso de las rodajas de frutilla rehidratadas cada 30 segundos, por un tiempo total de 330 segundos. En los intervalos de tiempo de cada 30 segundos, las rodajas eran retiradas del agua y colocadas en un

colador con papel absorbente para eliminar el agua excedente, transcurridos los 330 segundos se determinó el contenido de humedad en base húmeda, de las rodajas rehidratadas mediante termobalanza. Los datos de los pesos de las rodajas de frutilla rehidratadas a diferentes tiempos y temperatura se encuentran en la tabla E.1.1 y los promedios de la humedad y peso de las rodajas de frutilla frescas, liofilizadas y rehidratadas en la tabla E.1.2 del (Anexo E). En la tabla 4.17, se muestran los índices de calidad de rehidratación de las rodajas de frutilla liofilizada, que son: Capacidad de absorción de agua (WAC), capacidad de retención de agua (DHC) y capacidad de rehidratación (RA).

Tabla 4.17

Índices de calidad de rehidratación de las rodajas de frutilla liofilizada

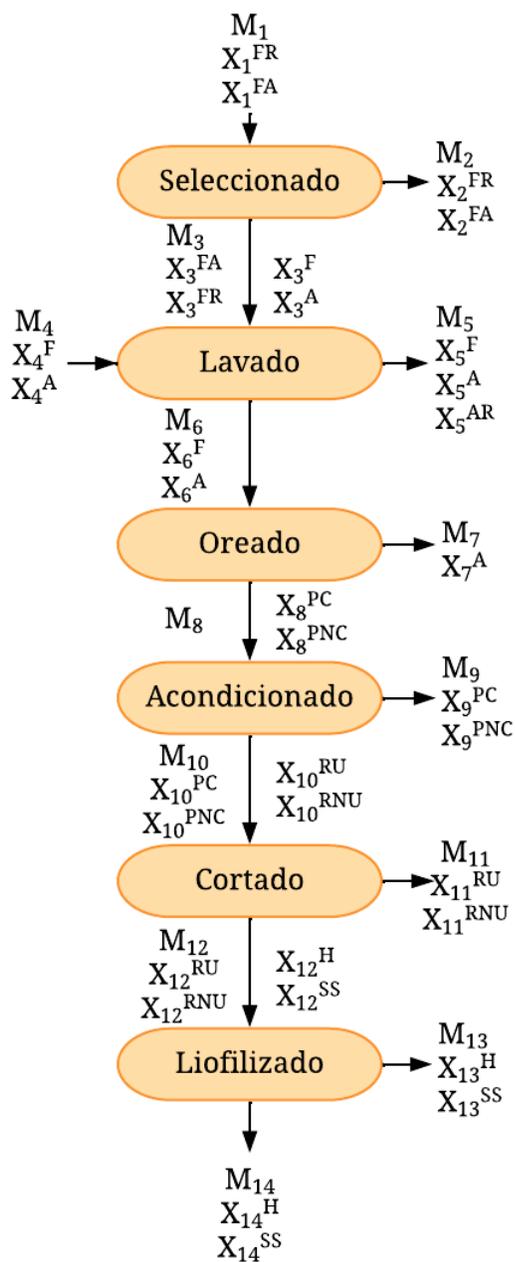
| Etapa | Peso (g) | Humedad (%) | Materia seca (%) | Índices de rehidratación | | |
|---------------------|----------|-------------|------------------|--------------------------|-------|-------|
| | | | | WAC | DHC | RA |
| Fresca | 1,52 | 91,47 | 8,53 | 0,297 | 1,064 | 0,316 |
| Liofilizada | 0,15 | 5,08 | 94,92 | | | |
| Rehidratada a 10 °C | 0,57 | 73,43 | 26,57 | | | |
| Fresca | 1,41 | 91,47 | 8,53 | 0,330 | 0,826 | 0,273 |
| Liofilizada | 0,14 | 5,08 | 94,92 | | | |
| Rehidratada a 26 °C | 0,54 | 79,67 | 20,33 | | | |

Fuente: Elaboración propia

Según lo observado en la tabla 4.17 la capacidad de absorción de agua de las rodajas de frutilla liofilizadas fue mayor a una temperatura de 26 °C ($0,330 > 0,297$), pero a 10 °C fue mayor la capacidad de retención de sólidos ($1,064 > 0,826$) y la capacidad de rehidratación ($0,316 > 0,273$). Por lo tanto, a menor temperatura hay mayor capacidad de rehidratación y retención de sólidos, esto se pudo observar de manera visual en las rodajas de frutilla que se rehidrataron, las rodajas rehidratadas a 10 °C no perdieron su color, a diferencia de las que se rehidrataron a 26 °C, que si se observó una pérdida de color leve tal como se muestra en la figura E.1 y figura E.2 del (Anexo E).

4.5 Balance de materia en el proceso de obtención de rodajas de frutilla liofilizadas

El balance de materia se realizó tomando en cuenta el diagrama de flujo de la figura 4.6 para el proceso de liofilización de frutilla en rodajas variedad San Andreas, se tomó como base para el proceso 500 gramos de frutilla.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.6 Balance de materia en el proceso de liofilización de rodajas de frutilla variedad San Andreas

Donde:

M_1 = Frutilla variedad San Andreas (g)

M_2 = Frutilla rechazada (g)

M_3 = Frutilla aceptada (g)

M_4 = Agua potable (g)

M_5 = Agua residual en el lavado (g)

M_6 = Frutilla lavada (g)

M_7 = Agua residual en el oreado (g)

M_8 = Frutilla oreada (g)

M_9 = Porción no comestible de la frutilla (g)

M_{10} = Porción comestible de la frutilla (g)

M_{11} = Rodajas de frutilla no útiles (g)

M_{12} = Rodajas de frutilla útiles (g)

M_{13} = Agua sublimada (g)

M_{14} = Rodajas de frutilla liofilizada (g)

X^{FR} = Fracción de frutilla rechazada

X^{FA} = Fracción de frutilla aceptada

X^A = Fracción de agua

X^{AR} = Fracción de agua residual

X^F = Fracción de frutilla

X^{PC} = Fracción de la porción comestible de la frutilla

X^{PNC} = Fracción de la porción no comestible de la frutilla

X^{RU} = Fracción de rodajas útiles de la frutilla

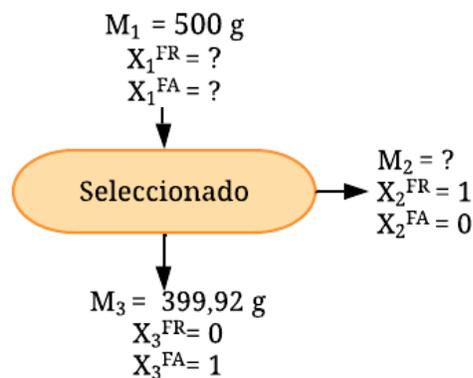
X^{RNU} = Fracción de rodajas no útiles de la frutilla

X^H = Fracción de humedad

X^{SS} = Fracción de sólidos solubles

4.5.1 Balance de materia en la etapa de seleccionado

En la figura 4.7, se muestra el balance de materia en la etapa de seleccionado de la frutilla variedad San Andreas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7 Balance de materia en la etapa de seleccionado

Balance de materia global en la etapa de seleccionado:

$$M_1 = M_2 + M_3 \quad \text{(Ecuación 4.1)}$$

Despejando M_2 de la ecuación 4.1:

$$M_2 = M_1 - M_3$$

$$M_2 = 500 \text{ g} - 399,92 \text{ g}$$

$$M_2 = 100,08 \text{ g frutilla rechazada}$$

Balance de materia parcial para la frutilla rechazada en la etapa de seleccionado

$$M_1 X_1^{FR} = M_2 X_2^{FR} + M_3 X_3^{FR} \quad \text{(Ecuación 4.2)}$$

Donde X_3^{FR} es cero y X_2^{FR} es 1, entonces despejando X_1^{FR} de la ecuación 4.5:

$$X_1^{FR} = \frac{M_2}{M_1}$$

$$X_1^{FR} = \frac{100,08 \text{ g}}{500 \text{ g}}$$

$X_1^{FR} = 0,2002$ fracción de frutilla rechazada en la etapa de seleccionado

Balance de materia parcial para la frutilla aceptada en la etapa de seleccionado

$$M_1 X_1^{FA} = M_2 X_2^{FA} + M_3 X_3^{FA} \quad \text{(Ecuación 4.3)}$$

Donde X_2^{FA} es cero y X_3^{FA} es 1, entonces despejando X_1^{FA} de la ecuación 4.5:

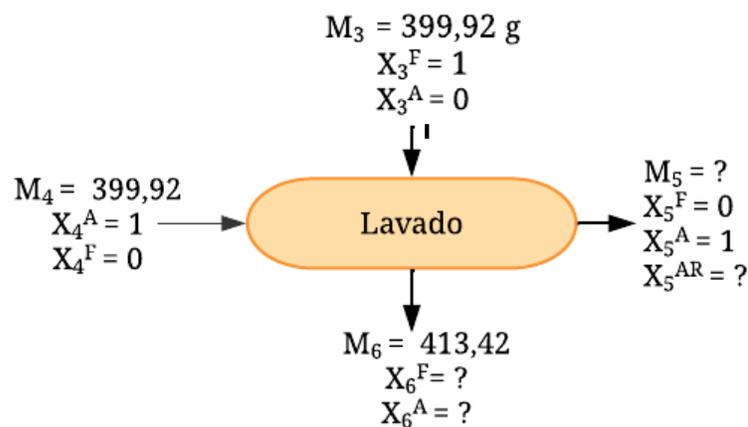
$$X_1^{FA} = \frac{M_3}{M_1}$$

$$X_1^{FA} = \frac{100,08 \text{ g}}{500 \text{ g}}$$

$X_1^{FA} = 0,7998$ fracción de frutilla aceptada en la etapa de seleccionado

4.5.2 Balance de materia en la etapa de lavado

En la figura 4.8, se muestra el balance de materia en la etapa de lavado de la frutilla variedad San Andreas donde la relación de agua frutilla es 1:1



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.8 Balance de materia en la etapa de lavado

Balance de materia global en la etapa de lavado:

$$M_3 + M_4 = M_5 + M_6 \quad \text{(Ecuación 4.4)}$$

Despejando M_5 de la ecuación 4.4:

$$M_5 = M_3 + M_4 - M_6$$

$$M_5 = 399,92 \text{ g} + 399,92 \text{ g} - 413,42 \text{ g}$$

$$M_5 = 386,42 \text{ g de agua residual en el lavado}$$

Balance de materia parcial para la frutilla en la etapa de lavado

$$M_3X_3^F + M_4X_4^F = M_5X_5^F + M_6 X_6^F \quad \text{(Ecuación 4.5)}$$

Donde X_3^F es uno y X_4^F y X_5^F son cero y despejando la ecuación 4.5:

$$X_6^F = \frac{M_3}{M_6}$$

$$X_6^F = \frac{399,92 \text{ g}}{413,42 \text{ g}}$$

$$X_6^F = 0,9673 \text{ fracción de frutilla en la frutilla lavada}$$

Balance de materia parcial para el agua en la etapa de lavado

$$M_3X_3^A + M_4X_4^A = M_5X_5^A + M_6 X_6^A \quad \text{(Ecuación 4.6)}$$

Donde X_3^A es cero y X_4^A y X_5^A son uno y despejando la ecuación 4.6:

$$X_6^A = \frac{M_4 - M_5}{M_6}$$

$$X_6^A = \frac{399,92 \text{ g} - 386,42}{413,42 \text{ g}}$$

$$X_6^A = 0,0327 \text{ fracción de agua adherida a la frutilla lavada}$$

Fracción de agua residual en la etapa de lavado

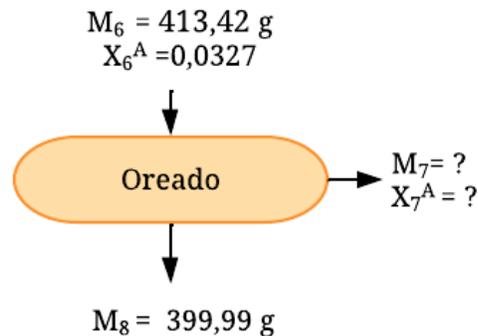
$$X_5^{AR} = \frac{M_5}{M_4}$$

$$X_5^{AR} = \frac{386,42 \text{ g}}{399,92 \text{ g}}$$

$X_5^{AR} = 0,9662$ fracción de agua residual en la etapa de lavado

4.5.3 Balance de materia en la etapa de oreado

En la figura 4.9, se muestra el balance de materia en la etapa de oreado de la frutilla variedad San Andreas para eliminar el agua restante.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.9 Balance de materia en la etapa de oreado

Balance de materia global en la etapa de oreado:

$$M_6 = M_7 + M_8 \quad \text{(Ecuación 4.7)}$$

Despejando M_7 de la ecuación 4.7:

$$M_7 = M_6 - M_8$$

$$M_7 = 413,42 \text{ g} - 399,99 \text{ g}$$

$M_7 = 13,43 \text{ g}$ de agua residual en la etapa de oreado

Fracción de agua perdida en la etapa de oreado

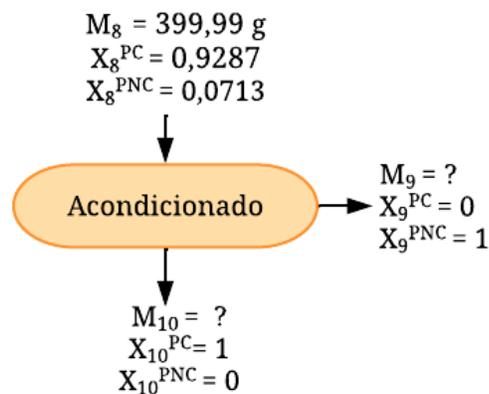
$$X_7^A = \frac{M_7}{M_6 X_6^A}$$

$$X_7^A = \frac{13,43 \text{ g}}{413,42 \text{ g} * 0,0327}$$

$X_7^A = 0,99$ fracción de agua perdida en la etapa de oreado

4.5.4 Balance de materia en la etapa de acondicionamiento

En la figura 4.10, se muestra el balance de materia en la etapa de acondicionamiento de la frutilla variedad San Andreas, para el cálculo se tomaron los datos del porcentaje de la porción comestible y no comestible de la frutilla de la tabla 4.1.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.10 Balance de materia en la etapa de acondicionamiento

Balance de materia global en la etapa de acondicionamiento:

$$M_8 = M_9 + M_{10} \quad \text{(Ecuación 4.8)}$$

Balance de materia parcial para la porción comestible en la etapa de acondicionamiento

$$M_8 X_8^{\text{PC}} = M_9 X_9^{\text{PC}} + M_{10} X_{10}^{\text{PC}} \quad \text{(Ecuación 4.9)}$$

Donde X_9^{PC} es cero y X_{10}^{PC} es uno, entonces despejando M_{10} de la ecuación 4.9:

$$M_{10} = M_8 X_8^{\text{PC}}$$

$$M_{10} = 399,99 \text{ g} * 0,9287$$

$M_{10} = 371,47 \text{ g}$ de porción comestible de frutilla

Balance de materia parcial para la porción no comestible en la etapa de acondicionamiento

$$M_8 X_8^{\text{PNC}} = M_9 X_9^{\text{PNC}} + M_{10} X_{10}^{\text{PNC}} \quad (\text{Ecuación 4.10})$$

Donde X_9^{PNC} es uno y X_{10}^{PNC} es cero, entonces despejando M_9 de la ecuación 4.10:

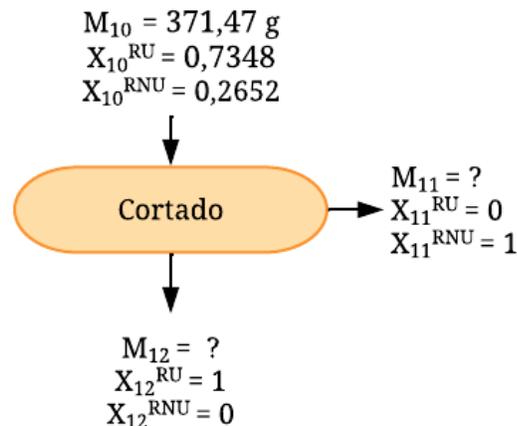
$$M_9 = M_8 X_8^{\text{PNC}}$$

$$M_9 = 399,99 \text{ g} * 0,0713$$

$$M_9 = 28,52 \text{ g de porción no comestible de frutilla}$$

4.5.5 Balance de materia en la etapa de cortado

En la figura 4.11, se muestra el balance de materia en la etapa de cortado de la frutilla variedad San Andreas, para el cálculo se tomaron los datos del porcentaje de las rodajas útiles y no útiles de la frutilla de la tabla 4.1.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.11 Balance de materia en la etapa de cortado

Balance de materia global en la etapa de cortado:

$$M_{10} = M_{11} + M_{12} \quad (\text{Ecuación 4.11})$$

Balance de materia parcial para las rodajas útiles en la etapa de cortado

$$M_{10} X_{10}^{\text{RU}} = M_{11} X_{11}^{\text{RU}} + M_{12} X_{12}^{\text{RU}} \quad (\text{Ecuación 4.12})$$

Donde X_{11}^{RU} es cero y X_{12}^{RU} es uno, entonces despejando M_{12} de la ecuación 4.12:

$$M_{12} = M_{10}X_{10}^{RU}$$

$$M_{12} = 371,47 \text{ g} * 0,7348$$

$$M_{12} = 272,96 \text{ g de rodajas útiles de frutilla}$$

Balance de materia parcial para las rodajas no útiles en la etapa de cortado

$$M_{10}X_{10}^{RNU} = M_{11}X_{11}^{RNU} + M_{12}X_{12}^{RNU} \quad \text{(Ecuación 4.13)}$$

Donde X_{12}^{RNU} es cero y X_{11}^{RNU} es uno, entonces despejando M_{11} de la ecuación 4.13:

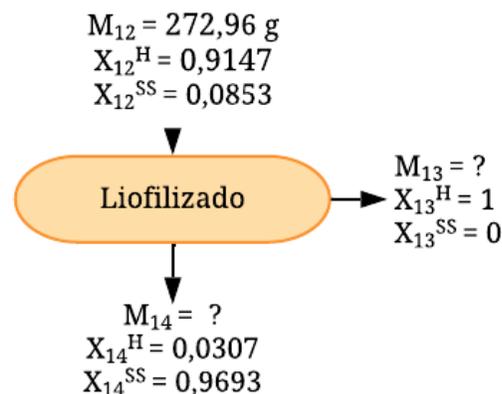
$$M_{11} = M_{10}X_{10}^{RNU}$$

$$M_{11} = 371,47 \text{ g} * 0,2652$$

$$M_{11} = 98,51 \text{ g de rodajas no útiles de frutilla}$$

4.5.6 Balance de materia en la etapa de liofilizado

En la figura 4.12, se muestra el balance de materia en la etapa de liofilizado de la frutilla variedad San Andreas, para lo cual se tomó en cuenta el contenido de humedad de la frutilla fresca (91,47 %) datos extraído del Anexo A y la humedad de las rodajas de frutilla liofilizada determinada mediante termobalanza (3,07 %).



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.12 Balance de materia en la etapa de liofilizado

Balance de materia global en la etapa de liofilizado:

$$M_{12} = M_{13} + M_{14} \quad \text{(Ecuación 4.14)}$$

Balance de materia parcial para sólidos solubles en la etapa de liofilizado:

$$M_{12} X_{12}^{SS} = M_{13} X_{13}^{SS} + M_{14} X_{14}^{SS} \quad \text{(Ecuación 4.15)}$$

Tomando en cuenta que X_{13}^{SS} es cero y despejando M_{14} de la ecuación 4.15:

$$M_{14} = \frac{M_{12} X_{12}^{SS}}{X_{14}^{SS}}$$

$$M_{14} = \frac{272,96 \text{ g} * 0,0853}{0,9693}$$

$$M_{14} = 24,02 \text{ g de frutilla liofilizada}$$

Balance de materia parcial para humedad en la etapa de liofilizado:

$$M_{12} X_{12}^H = M_{13} X_{13}^H + M_{14} X_{14}^H \quad \text{(Ecuación 4.16)}$$

Tomando en cuenta que X_{13}^H es 1 y despejando M_{13} de la ecuación 4.16:

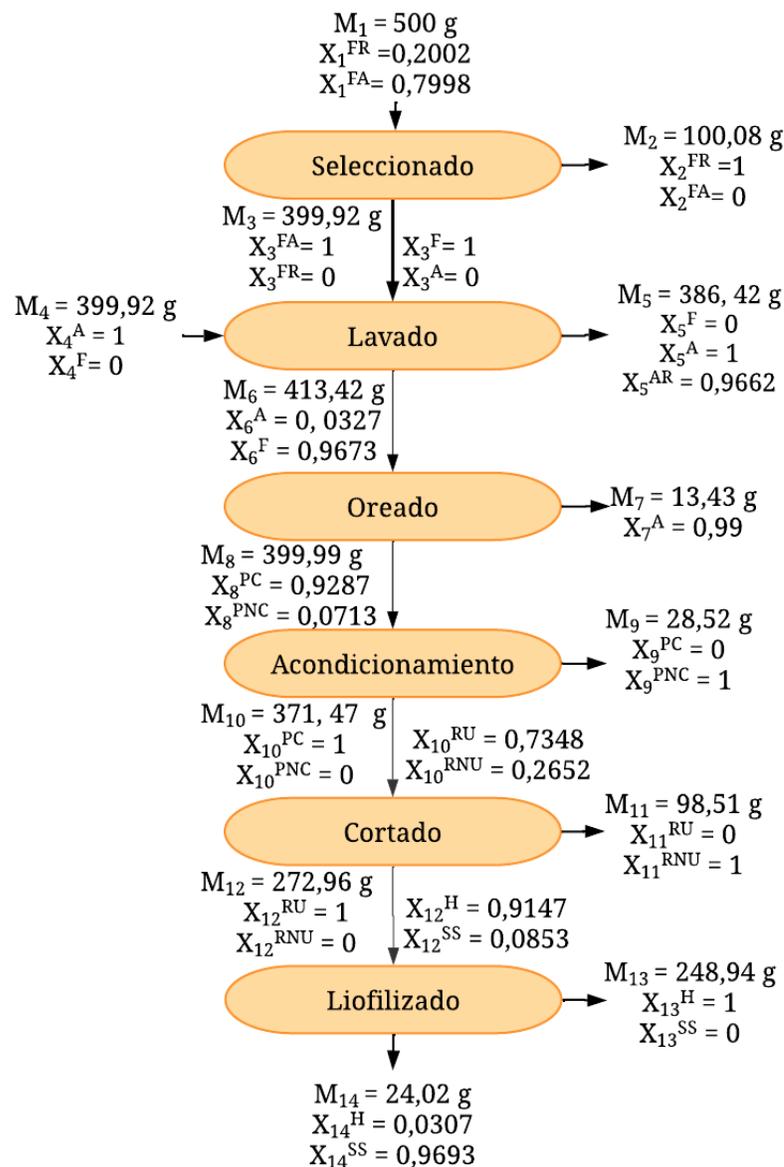
$$M_{13} = M_{12} (X_{12}^H) - M_{14} (X_{14}^H)$$

$$M_{13} = 272,96 \text{ g} (0,9147) - 24,02 \text{ g} (0,0307)$$

$$M_{13} = 248,94 \text{ g de agua sublimada}$$

4.5.6 Resumen general del balance de materia en el proceso liofilización de rodajas de frutilla variedad San Andreas

En la figura 4.13 se muestra el resumen general del balance de materia del proceso de liofilización de rodajas de frutilla variedad San Andreas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.13 Balance general del proceso de liofilización de rodajas de frutilla variedad San Andreas

4.6 Balance de energía en el proceso de liofilización de rodajas de frutilla variedad San Andreas

El balance de energía se realizó en el proceso de liofilizado de las rodajas de frutilla variedad San Andreas.

Según Monsalvo et al., (2014), la energía interna de un sistema, el trabajo y el calor no son más que diferentes manifestaciones de energía, es por eso que la energía no se crea

ni se destruye, sino que, durante un proceso, sólo se transforma en sus diversas manifestaciones.

Según Singh y Heldman (2009), el primer principio de la termodinámica establece que la energía no se crea ni se destruye y puede expresarse ese principio en forma de la ecuación escrita como:

$$\begin{array}{rcc} \text{Energía total que entra} & - & \text{energía total que sale} = \text{cambio energético} \\ \text{en el sistema} & & \text{del sistema} & \text{del sistema} \end{array}$$

Por lo tanto, cuando en un sistema tiene lugar cualquier tipo de proceso, se cumple que la energía que entra al sistema menos la que sale debe ser igual a cualquier cambio de energía del mismo como se expresa en la ecuación 4.17:

$$E_{\text{dentro}} - E_{\text{fuera}} = \Delta E_{\text{sistema}} \quad \text{(Ecuación 4.17)}$$

La transmisión de calor entre un sistema y sus alrededores es probablemente la forma de energía que más habitualmente se observa en muchos sistemas de ingeniería de los alimentos. De acuerdo al primer principio de la termodinámica, el cambio total de energía en un sistema cerrado es igual al calor añadido al sistema menos el trabajo realizado por el sistema (Singh & Heldman, 2009), esto se puede escribir matemáticamente como la ecuación 4.18:

$$\Delta E = Q - W \quad \text{(Ecuación 4.18)}$$

Donde:

ΔE = Cambio total de energía en un sistema cerrado

Q = Calor añadido al sistema

W = Trabajo realizado por el sistema

Según Monsalvo et al., (2014), son distinguibles dos tipos de calor en un sistema. El calor sensible que es la energía absorbida o cedida por un sistema sin que exista cambio de fase, calculándose a presión constante, su expresión es como se muestra en la ecuación 4.19

$$Q = m \times C_p \times \Delta T \quad \text{(Ecuación 4.19)}$$

Donde:

Q = Calor sensible

m = masa

C_p = Calor específico

ΔT = variación de la temperatura

Y el calor latente que es la cantidad de calor absorbido o cedido por la masa de un sistema, durante el cambio de fase a temperatura y presión constantes, siendo su expresión matemática la ecuación 4.20:

$$Q = m \times \lambda \quad \text{(Ecuación 4.20)}$$

Donde:

Q = Calor latente

m = masa

λ = Conductividad térmica

Según Monsalvo et al., (2014), el calor latente está relacionado con los calores generados en los cambios de fase presentes (vaporización, fusión y sublimación).

4.6.1 Balance de energía en el proceso de liofilización

El balance de energía del proceso de liofilización de frutilla variedad San Andreas, se hizo tomando en cuenta 60 g de frutilla en rodajas, mismas que se encontraban a temperatura ambiente de 26 °C, luego son congeladas hasta una temperatura de -27 °C y subenfriadas a una temperatura de -85 °C (dato térmico del liofilizador). Para la temperatura final del subenfriamiento, se considera el punto de congelación de la frutilla -1,1 °C (Tacanga, 2014). En la figura 4.14, se observa las etapas de enfriamiento, congelamiento y subenfriamiento en el proceso de liofilización.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.14 Etapa de enfriamiento, congelación y subenfriamiento en el proceso de liofilización

Mediante balance de calor se tiene la ecuación 4.21:

$$Q_{\text{cedido}} = Q_{\text{absorbido}} \quad \text{(Ecuación 4.21)}$$

Dado que en la liofilización el calor que se cede es el calor de enfriamiento, calor de congelamiento y calor de sub enfriamiento, reemplazando en la ecuación 4.21, se tiene la ecuación 4.22.

$$Q_{\text{absorbido}} = Q_{\text{enfriamiento}} + Q_{\text{congelamiento}} + Q_{\text{subenfriamiento}} \quad \text{(Ecuación 4.22)}$$

Considerando la ecuación 4.19, se tiene que el calor de enfriamiento es:

$$Q_{\text{enfriamiento}} = M_9 \times C_p_{\text{frutilla}} \times (T_1 - T_2) \quad \text{(ecuación 4.23)}$$

Para calcular el calor específico de cualquier alimento, se tiene la ecuación 4.24 citada por (Singh & Heldman, 2009).

$$C_p = X_c \cdot C_{p_c} + X_p \cdot C_{p_p} + X_g \cdot C_{p_g} + X_a \cdot C_{p_a} + X_w \cdot C_{p_w} \quad \text{(Ecuación 4.24)}$$

Donde:

$C_{p_c} = 1,424 \text{ (KJ/Kg °C)}$ = calor específico de los carbohidratos

$C_{p_p} = 1,549 \text{ (KJ/Kg °C)}$ = calor específico de las proteínas

$C_{p_g} = 1,675 \text{ (KJ/Kg °C)}$ = calor específico de las grasas

$C_{p_a} = 0,837 \text{ (KJ/Kg °C)}$ = calor específico de las cenizas

$C_{p_w} = 4,187 \text{ (KJ/Kg °C)}$ = calor específico del agua

X_c = Fracción másica de los carbohidratos

X_p = Fracción másica de las proteínas

X_f = Fracción másica de las grasas

X_a = Fracción másica de las cenizas

X_w = Fracción másica del agua

Reemplazando lo valores en la ecuación 4.24 se obtiene

$$C_p = X_c * 1,424 + X_p * 1,549 + X_g * 1,675 + X_a * 0,837 + X_w * 4,187 \quad (\text{Ecuación 4.25})$$

Para calcular el calor específico de la frutilla se tomó en cuenta los datos de la tabla 4.18 de datos extraídos de la tabla 4.2.

Tabla 4.18

Datos de composición fisicoquímica de la frutilla

| Componentes | Símbolo | Fracción |
|---------------|---------|----------|
| Carbohidratos | X_c | 0,0628 |
| Fibra | X_f | 0,0124 |
| Proteína | X_p | 0,0073 |
| Grasa | X_g | 0,0004 |
| Cenizas | X_a | 0,0024 |
| Humedad | X_w | 0,9147 |

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, reemplazando los datos de la tabla 4.18 en la ecuación 4.25 se obtiene:

$$C_{pM9} = 0,0628 * 1,424 + 0,0073 * 1,549 + 0,0004 * 1,675 + 0,0024 * 0,837 + 0,9147 * 4,187$$

$$C_{pM9} = 3,933 \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}$$

A partir de la ecuación 4.23, reemplazando datos se obtiene el calor de enfriamiento:

$$Q_{\text{enfriamiento}} = M_9 \times C_p \text{ frutilla} \times (T_1 - T_2)$$

$$Q_{\text{enfriamiento}} = 60 \text{ g} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} \times 3,933 \text{ KJ/ Kg } ^\circ\text{C} \times (26 ^\circ\text{C} - (-1.1 ^\circ\text{C}))$$

$$Q_{\text{enfriamiento}} = 6,395 \text{ KJ}$$

Para la etapa de congelamiento, no teniendo el calor latente de congelación de la frutilla, se considera el calor latente de congelación de agua (334 KJ/Kg) y la fracción de agua en la frutilla, dato extraído de la tabla 4.18, de manera que de manera que reemplazando los datos en la ecuación 4.20 se tiene:

$$Q_{\text{congelamiento}} = M_9 \times X_9^H \times \lambda_{\text{Congelación}}$$

$$Q_{\text{congelamiento}} = 60 \text{ g} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} \times 0,9147 \times 334 \text{ KJ/Kg}$$

$$Q_{\text{congelamiento}} = 18,331 \text{ KJ}$$

De acuerdo a la ecuación 4.19 se tiene que el calor de subenfriamiento es:

$$Q_{\text{subenfriamiento}} = M_9 \times C_p_{\text{frutilla}} \times (T_2 - T_3) \quad \text{(Ecuación 4.26)}$$

Para el cálculo del calor específico de la frutilla congelada se considera el modelo matemático de Choi y Okos, citado por (Vidaurre, 2013), donde el calor específico de un alimento se puede predecir a partir de la composición del alimento y del calor específico de cada componente, como se muestra en la ecuación 4.27

$$C_p = \sum (X_{si} C_{p_{si}}) \quad \text{(Ecuación 4.27)}$$

Donde:

C_p = Calor específico

X_{si} = Fracción de masa de cada componente

$C_{p_{si}}$ = Calor específico de cada componente

Reemplazando los componentes en la ecuación 4.27, se tiene la ecuación 4.28

$$C_p = X_c * C_{p_c} + X_p * C_{p_p} + X_g * C_{p_g} + X_a * C_{p_a} + X_w * C_{p_w} + X_f * C_{p_f} \quad \text{(Ecuación 4.28)}$$

Donde:

C_{p_c} = Calor específico de los carbohidratos

C_{p_p} = Calor específico de las proteínas

C_{p_g} = Calor específico de las grasas

C_{p_a} = Calor específico de las cenizas

C_{p_w} = Calor específico del hielo

C_{p_f} = Calor específico de la fibra

X_c = Fracción másica de los carbohidratos

X_p = Fracción másica de las proteínas

X_g = Fracción másica de las grasas

X_a = Fracción másica de las cenizas

X_w = Fracción másica del hielo

X_f = Fracción másica de la fibra

Este modelo matemático está en función de la temperatura (T) con rangos de $-40\text{ }^\circ\text{C}$ a $150\text{ }^\circ\text{C}$, para el cálculo de calor específico de la frutilla congelada se tomó en cuenta la temperatura de $-40\text{ }^\circ\text{C}$, puesto que es la menor temperatura a la cual se puede aplicar el modelo matemático y aunque el condensador trabaja a temperatura de $-85\text{ }^\circ\text{C}$, según Singh y Heldman, (2009) el calor específico de un alimento congelado a temperaturas $20\text{ }^\circ\text{C}$ por debajo del punto de congelación inicial no difiere significativamente. En la tabla 4.19 se muestra las ecuaciones y el cálculo del calor específico de los componentes de la frutilla a temperatura de $-40\text{ }^\circ\text{C}$.

Tabla 4.19

Ecuaciones y cálculo del calor específico de los componentes de la frutilla a $-40\text{ }^\circ\text{C}$.

| Componente | Ecuación | Resultado (J/Kg $^\circ\text{C}$) |
|---------------|--|------------------------------------|
| Carbohidratos | $C_{p_c} = 1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3}T - 5,9399 \times 10^{-6}T^2$ | 1,461 |
| Fibra | $C_{p_c} = 1,8459 + 1,8306 \times 10^{-3}T - 4,6509 \times 10^{-6}T^2$ | 1,765 |
| Proteínas | $C_{p_p} = 2,0082 + 1,2089 \times 10^{-3}T - 1,3129 \times 10^{-6}T^2$ | 1,958 |
| Grasas | $C_{p_f} = 1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3}T - 4,8008 \times 10^{-6}T^2$ | 1,917 |
| Cenizas | $C_{p_a} = 1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3}T - 3,6817 \times 10^{-6}T^2$ | 1,011 |
| Hielo | $C_{p_w} = 2,063 + 6,0769 \times 10^{-3}T$ | 1,820 |

Fuente: Elaboración propia

Considerando que las fracciones de los componentes se mantienen en la etapa de subenfriamiento y toda el agua disponible se congela y reemplazando los datos de las tablas 4.18 y 4.19 en la ecuación 4.28 se obtiene:

$$C_{p_{M9\text{cong.}}} = 0,0628 * 1,461 + 0,0073 * 1,958 + 0,0004 * 1,917 + 0,0024 * 1,011 \\ + 0,9147 * 1,820 + 0,0124 * 1,765$$

$$C_{p_{M9\text{cong.}}} = 1,795 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$C_{p_{M9\text{cong.}}} = 1,795 \times 10^{-3} \text{ KJ/Kg } ^\circ\text{C}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 4.26 se tiene:

$$Q_{\text{subenfriamiento}} = 60 \text{ g} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} \times 1,795 \times 10^{-3} \text{ J/ Kg } ^\circ\text{C} \times ((-1.1 \text{ } ^\circ\text{C}) - (-85 \text{ } ^\circ\text{C}))$$

$$Q_{\text{subenfriamiento}} = 8,8095 \times 10^{-3} \text{ KJ}$$

Reemplazando los valores del calor en la ecuación 4.22 se tiene que el requerimiento total de calor es:

$$Q_{\text{absorbido}} = 6,395 \text{ KJ} + 18,331 \text{ KJ} + 8,8095 \times 10^{-3} \text{ KJ}$$

$$Q_{\text{absorbido}} = 24,735 \text{ KJ}$$

$$Q_{\text{absorbido}} = 5,912 \text{ Kcal}$$

El calor requerido para efectuar el proceso de liofilización de 60 gramos de rodajas de frutilla variedad San Andreas es 5,912 Kcal.

4.7 Cálculo del consumo de energía en la etapa de liofilización de rodajas de frutilla

Según Rodriguez, (2022), la potencia eléctrica es la energía absorbida o emitida (si es un generador) por un aparato eléctrico en un instante o momento determinado, aunque en la definición entra la palabra "tiempo", un receptor tendrá siempre la misma potencia, independientemente del tiempo, lo que cambiará con el tiempo será la energía que consuma. La formula de la energía es muy sencilla: energía es igual a la potencia por el tiempo conectado y esta expresado de la siguiente manera:

$$E = P \times T \quad \text{(Ecuación 4.29)}$$

Donde:

E = Energía consumida (KWh)

P= Potencia del equipo (KW)

T= Tiempo de uso del equipo (h)

Para la etapa de liofilización se utilizó el liofilizador Alpha 2-4 LSCbasic (Anexo F), con una potencia de 16,1 KW, por un tiempo de 8,33 horas y la bomba de vacío con potencia de 0,3 KW y un tiempo de 7,33 horas. En la tabla 4.20 se describe el tiempo utilizado en cada etapa del proceso.

Tabla 4.20

Tiempo de uso de los equipos en la etapa de liofilización

| Etapas | Liofilizador Tiempo (h) | Bomba de vacío Tiempo (h) |
|--|----------------------------|------------------------------|
| Calentado del equipo | 0,33 | 0,00 |
| Congelado de la frutilla | 0,67 | 0,33 |
| Secado principal de la frutilla | 7,00 | 7,00 |
| Descongelado del hielo del condensador | 0,33 | 0,00 |
| Total | 8,33 | 7,33 |

Fuente: Elaboración propia

De manera que la energía eléctrica consumida en la etapa de liofilización es:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{consumida por el liofilizador}} + E_{\text{consumida por la bomba de vacío}} \quad \text{(Ecuación 4.30)}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 4.29 para el liofilizador se tiene:

$$E_{\text{consumida por el liofilizador}} = P_{\text{liofilizador}} \times T$$

$$E_{\text{consumida por el liofilizador}} = 16,1 \text{ KW} \times 8,33 \text{ h}$$

$$E_{\text{consumida por el liofilizador}} = 13,41 \text{ KWh}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 4.29 para la bomba de vacío se tiene:

$$E_{\text{consumida por la bomba de vacío}} = P_{\text{bomba}} \times T$$

$$E_{\text{consumida por la bomba de vacío}} = 0,3 \text{ KW} \times 7,33 \text{ h}$$

$$E_{\text{consumida por la bomba de vacío}} = 2,20 \text{ KWh}$$

Reemplazando los valores de energía consumida en la ecuación 4.30 se tiene:

$$E_{\text{total}} = 13,41 \text{ KW} + 2,20 \text{ KWh}$$

$$E_{\text{total}} = 15,61 \text{ KWh}$$

Entonces la energía eléctrica requerida para liofilizar 60 gramos de frutilla fresca en rodajas de 3 mm de espesor y alcanzar una humedad aproximada de 3,10 % fue de 15,61 KW.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Para el presente trabajo de investigación, según los datos obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones:

- En base al resultado del análisis físico de la frutilla variedad San Andreas, se tuvo que el peso total es $13,78 \text{ g} \pm 0,01 \text{ g}$; la porción comestible 92,87 %; la porción no comestible 7,13 %; sólidos solubles $8,33 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{Brix}$; diámetro superior $26,95 \pm 0,01 \text{ mm}$; altura $34,65 \pm 0,01 \text{ mm}$; rodajas útiles 73,48 % y rodajas no útiles 26,52 %.
- En base a los resultados del análisis fisicoquímico, se observó que la frutilla variedad San Andreas contiene: cenizas 0,24%; fibra 1,24 %; grasa 0,04 %; hidratos de carbono 6,28 %; humedad 91,47%; proteína total (Nx6,25) 0,73 % y valor energético 28,4 Kcal/100 g. En base a los resultados del contenido de minerales contiene: Calcio 16,5 mg/100 g; fósforo 8,5 mg/100 g y potasio 89 mg/100 g.
- En base a los análisis microbiológicos se observó que la frutilla variedad San Andreas, contiene: Coliformes fecales $< 1,0 \times 10^1 \text{ UFC/ g}$ (*); coliformes totales $< 1,0 \times 10^1 \text{ UFC/ g}$ (*); Escherichia coli $< 1,0 \times 10^1 \text{ UFC/ g}$ (*) y mohos y levaduras $3,5 \times 10^3$. (*) No se observa el desarrollo de colonias.
- De acuerdo a los resultados de la evaluación sensorial de las pruebas preliminares de las muestras de frutilla liofilizada, se determinó que la muestra FL04 fue la más aceptada por los jueces y fue la elegida para el diseño experimental, siendo el tipo de corte rodajas de frutilla de 3 mm de espesor.
- Aplicando el diseño factorial 2^2 para las muestras de rodajas de frutilla variedad San Andreas, se pudo comprobar estadísticamente que las variables: Presión de vacío en el secado principal (A) y tiempo del secado principal (B), son significativas, ya que el valor de $p < 0,05$, de manera que influyen

significativamente en el contenido de humedad en base húmeda de las rodajas de frutilla liofilizada.

- En base a los resultados del análisis fisicoquímico, se observó que las rodajas de frutilla liofilizadas variedad San Andreas contiene: cenizas 3,51 %; fibra 5,50 %; grasa 0,08 %; hidratos de carbono 70,77 %; humedad 14,05 %; proteína total (Nx6,25) 5,37 % y valor energético 311,76 Kcal/100 g. En base a los resultados del análisis del contenido de minerales contiene: Calcio 230 mg/100 g; fósforo 183 mg/100 g y potasio 1160 mg/100 g.
- En base a los resultados del análisis microbiológico, se observó que las rodajas de frutilla variedad San Andreas liofilizadas, contiene: Coliformes fecales $< 1,0 \times 10^1$ UFC/ g (*); coliformes totales $< 1,0 \times 10^1$ UFC/ g (*); Escherichia coli $< 1,0 \times 10^1$ UFC/ g (*) y mohos y levaduras $6,0 \times 10^2$. (*) No se observa el desarrollo de colonias.
- De acuerdo al análisis de rehidratación de las rodajas de frutilla liofilizada se observó que, a temperatura del agua de 26 °C, la capacidad de absorción de agua es mayor (0,330) en comparación con el agua a temperatura de 10 °C (0,297), mientras que la capacidad de retención de sólidos es mayor a 10 °C (1,064 > 0,826), al igual que la capacidad de rehidratación (0,316 > 0,273).

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar estudios experimentales sobre la aplicación del método de liofilización en otras frutas que sean termosensibles, debido a que este método conserva mejor la estructura y propiedades fisicoquímicas y sensoriales de los alimentos en comparación con otros métodos convencionales.
- Se recomienda realizar la rehidratación a nivel experimental de las rodajas de frutilla liofilizadas, tomando en cuenta las propiedades estructurales de como la densidad, porosidad, tamaño de poro, volumen específico, las propiedades ópticas como el color y la apariencia, las propiedades texturales como fuerza de compresión y tensión, las propiedades sensoriales y nutricionales.
- Se recomienda obtener rodajas de frutilla deshidratadas mediante otros métodos de secado, para poder comparar con el método de liofilización y observar de qué manera influyen las variables de proceso en las propiedades nutricionales y sensoriales de las rodajas de la frutilla deshidratadas.