



**INFLUENCIA DE UN PRE-TRATAMIENTO OSMÓTICO SOBRE LA CALIDAD FÍSICA DE MELÓN (*Cucumis melo L.*, variedad cantaloupe) CONGELADO CON IQF**

**LUIS HERNANDO CASTELLANOS BASTIDAS  
KARINA MURILLO VILLADA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS  
SANTIAGO DE CALI – VALLE  
2016**

**INFLUENCIA DE UN PRE-TRATAMIENTO OSMÓTICO SOBRE LA CALIDAD FÍSICA DE MELÓN (*Cucumis melo L.*, variedad cantaloupe) CONGELADO CON IQF**

**LUIS HERNANDO CASTELLANOS BASTIDAS  
KARINA MURILLO VILLADA**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería de Alimentos

**DIRECTOR:**

**ALFREDO AYALA APONTE PhD.**

**CODIRECTOR:**

**CARLOS VELEZ PASOS PhD.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS  
SANTIAGO DE CALI – VALLE  
2016**

## DEDICATORIAS

A Dios primeramente por ser el motor de mi vida y darme la pasión, fuerza, paz y sabiduría para culminar este trabajo de grado.

A mis padres Patricia Villada y Jorge Murillo y a mi hermana Steffanny Álvarez quienes estuvieron constantemente apoyándome y brindándome su amor en los momentos de dificultad.

A mi familia quienes con sus oraciones y palabras de apoyo me impulsaron a seguir mis sueños y cumplir mis metas.

***Karina Murillo Villada***

A Dios quien me ha dado la fortaleza para culminar este trabajo, a mis padres María Dilia Bastidas y Hernando Castellanos por su apoyo y amor incondicional, a mi familia por su compañía, alegría y apoyo durante todo este proceso.

***Luis Castellanos Bastidas***

## **AGREDECIMIENTOS**

Queremos agradecer a Dios, a nuestros padres, familiares y amigos por brindarnos el apoyo incondicional, paciencia y la confianza en el transcurso de nuestra carrera profesional.

A Karen Ortega que con su conocimiento, orientación y apoyo contribuyó a la realización de este trabajo, el cual sin ella no se hubiese podido llevar a cabo en el tiempo estimado.

Al profesor Alfredo Adolfo Ayala Aponte, PhD, por contribuir en nuestro logro de la realización del trabajo de grado, con su orientación y apoyo.

Al profesor Carlos Antonio Vélez Pasos, PhD, por su colaboración y acompañamiento durante este proyecto.

A la Escuela de Ingeniería de Alimentos por las habilidades enseñadas que nos permitirán convertirnos en Ingenieros de Alimentos de la Universidad del Valle.



## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>11</b>
<b>3 JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>12</b>
<b>4 HIPÓTESIS</b> .....	<b>13</b>
<b>5 OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
5.1 Objetivo general.....	13
5.2 Objetivo específicos .....	13
<b>6 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
6.1 Melón ( <i>Cucumis melo L.</i> , variedad Cantaloupe) .....	13
6.2 Deshidratación osmótica (DO) .....	14
6.3 Congelación.....	14
6.3.1 Congelación Rápida Individual (IQF) .....	15
6.3.2 Congelación convencional.....	16
6.4 Osmocongelación (OC).....	16
<b>7 ANTECEDENTES</b> .....	<b>16</b>
<b>8 MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
8.1 Simbología.....	17
8.2 Metodología .....	18
8.3 Diseño experimental .....	20
8.4 Variables de respuesta.....	21
<b>9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>23</b>
9.1 Cambios de humedad y sólidos solubles debido a la deshidratación osmótica .....	23
9.2 Curvas de congelación.....	24
9.3 Pérdida de fase líquida (PFL) .....	25
9.4 Cambios de volumen.....	26
9.5 Propiedades mecánicas.....	27
9.5.1 Esfuerzo de fractura ( $\sigma_F$ ) .....	27
9.5.2 Módulo de Elasticidad (ME).....	28
9.6 Color .....	29
9.6.1 Luminosidad ( $L^*$ ).....	29
9.6.2 Cambio de color ( $\Delta E$ ) .....	30
<b>10 CONCLUSIONES</b> .....	<b>31</b>
<b>11 BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>31</b>
<b>12 ANEXOS</b> .....	<b>38</b>
12.1 Anexo 1. Tablas correspondientes al análisis estadístico de PFL.....	38
12.2 Anexo 2. Tablas correspondientes al análisis estadístico de PFL.....	38

<b>12.3 Anexo 3.</b>	Tablas correspondientes al análisis estadístico de los cambios de volumen.....	<b>39</b>
<b>13.3 Anexo 4.</b>	Se muestran las tablas correspondientes al análisis estadístico de Esfuerzo de deformación .....	<b>40</b>
<b>12.4 Anexo 5.</b>	Se muestran las tablas correspondientes al análisis estadístico de Módulo de elasticidad.....	<b>41</b>
<b>12.5 Anexo 6.</b>	Se muestran las tablas correspondientes al análisis estadístico de $\Delta L$ .....	<b>42</b>
<b>12.6 Anexo 7.</b>	Se muestran las tablas correspondientes al análisis estadístico de $\Delta E$ .....	<b>43</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Evolución de la temperatura del alimento con el tiempo para diferentes velocidades de congelación mostrando la zona crítica.....	15
<b>Figura 2.</b> Sacabocados, cuchillo y cuchillo con doble corte utilizado para el acondicionamiento de las muestras de melón .....	18
<b>Figura 3.</b> Montaje del proceso de la deshidratación osmótica de melón con el agitador mecánico y las canastillas con muestras en su interior .....	19
<b>Figura 4.</b> Muestras de melón en el IQF en bandejas con flujo paralelo .....	20
<b>Figura 5.</b> Muestras en almacenamiento .....	20
<b>Figura 6.</b> Curvas de congelación de las muestras de melón con y sin pretratamiento en congelación por IQF y convencional .....	24
<b>Figura 7.</b> Porcentaje de pérdida de fase líquida (PFL) de melón fresco y con DO en congelación por IQF y convencional .....	25
<b>Figura 8.</b> Porcentaje de cambio de volumen ( $\Delta V$ ) de melón fresco y con DO en congelación por IQF y convencional.....	26
<b>Figura 9.</b> Cambios del esfuerzo de fractura ( $\Delta\sigma_F$ ) de melón fresco y con DO en congelación por IQF y convencional.....	27
<b>Figura 10.</b> Cambios del módulo de elasticidad ( $\Delta ME$ ) de melón fresco y con DO en congelación por IQF y convencional .....	28
<b>Figura 11.</b> Cambios en la luminosidad ( $\Delta L^*$ ) de melón fresco y con DO en congelación por IQF y convencional .....	29
<b>Figura 12.</b> Cambios totales de color ( $\Delta E$ ) de melón fresco y con DO en congelación por IQF y convencional .....	30

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Simbología del proyecto de investigación .....	18
<b>Tabla 2.</b> Parámetros del diseño experimental .....	21
<b>Tabla 3.</b> Propiedades fisicoquímicas de melón con y sin pretratamiento antes de congelar .....	23
<b>Tabla 4.</b> Valores de probabilidad para cada variable de respuesta .....	38
<b>Tabla 5.</b> Anova para la PFL .....	38
<b>Tabla 6.</b> Prueba de Fisher para la PFL .....	39
<b>Tabla 7.</b> Anova para el $\Delta V$ .....	39
<b>Tabla 8.</b> Prueba de Fisher para el $\Delta V$ .....	40
<b>Tabla 9.</b> Anova para el esfuerzo de deformación .....	40
<b>Tabla 10.</b> Prueba de Fisher para el esfuerzo de deformación .....	41
<b>Tabla 11.</b> Anova para el módulo de elasticidad .....	41
<b>Tabla 12.</b> Prueba de Fisher para el módulo de elasticidad .....	42
<b>Tabla 13.</b> Anova para el cambio de luminosidad ( $\Delta L^*$ ) .....	42
<b>Tabla 14.</b> Prueba de Fisher para el cambio de luminosidad ( $\Delta L^*$ ) .....	43
<b>Tabla 15.</b> Anova para el cambio total del color ( $\Delta E$ ) .....	43
<b>Tabla 16.</b> Prueba de Fisher para el cambio total del color ( $\Delta E$ ) .....	44

## RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de un pretratamiento osmótico sobre la calidad física de melón (*Cucumis melo L.*) congelado por IQF en términos de pérdida de fase líquida (PFL), cambio de volumen ( $\Delta V$ ), esfuerzo de fractura ( $\Delta\sigma_F$ ), módulo de elasticidad (ME), cambios de luminosidad ( $\Delta L^*$ ) y cambio total de color ( $\Delta E$ ). Para ello se deshidrataron osmóticamente muestras cilíndricas de melón (variedad Cantaloupe) hasta alcanzar un contenido de humedad de 80% b.h. empleando una solución osmótica de sacarosa con 65°Brix a 30°C. Como muestra control, se empleó fruta fresca (no tratada osmóticamente). Las muestras de melón con y sin DO, se congelaron por IQF a una temperatura de -30°C y una velocidad del aire de 4m/s y por congelación convencional a -18°C y 0,47 m/s. Posteriormente se almacenaron en congelación a -18°C durante 1 y 20 días para evaluar las propiedades físicas de calidad. Los resultados mostraron que las muestras pretratadas osmóticamente y congeladas por IQF presentaron menor PFL (-24,2%) y menor  $\Delta V$  (-36,1%) en comparación con las muestras DO congeladas convencionalmente (-26,29% y -56,23% respectivamente). Las muestras con DO presentaron mayor  $\Delta\sigma_F$  (5,31kPa) en comparación con las muestras control (0,32kPa) debido probablemente a que los solutos de la DO ayudan a formar un tejido más fuerte. En cuanto a  $\Delta L^*$  se observó una pérdida de luminosidad durante el tiempo de almacenamiento, conservándose mejor IQF DO (-16,34%) en comparación a IQF C (-26,77%). Los cambios en el color total  $\Delta E$  fueron menores en IQF-DO (7,47) debido probablemente al efecto protector de la DO que reduce el pardeamiento enzimático. En general, la aplicación de la DO seguida de IQF mostró menores pérdidas de calidad de melón durante el almacenamiento en congelación. Estos resultados indican que el método combinado de DO-IQF es una alternativa de interés para la conservación de frutas durante el almacenamiento en congelación.

**Palabras Clave:** calidad de alimentos, osmocongelación, congelación rápida individual, deshidratación osmótica.

## 1 INTRODUCCIÓN

El melón (*Cucumis melo L.*) es una planta de la familia Cucurbitaceae, originaria del África tropical cuyo fruto es apetecido para consumo, debido a que aporta una gran cantidad apreciable de diversas vitaminas y minerales. Específicamente, 100g de melón proporciona aproximadamente la mitad de la dosis diaria recomendada de vitamina C; también contiene provitamina A (principalmente  $\beta$ -caroteno) que se transforma en vitamina A (Moreiras, Carbajal, Cabrera, & Cuadrado, 2013). La parte comestible de esta fruta, que constituye alrededor del 80%, contiene aproximadamente 90% de agua y 10% de carbohidratos (National Research Council, 2008).

En Colombia, la variedad cantaloupe es la más representativa en términos de producción y comercialización (Nacional e Internacional) (Ayala Aponte & Cadena, 2014). Además es una fruta con alta demanda por los países desarrollados por sus propiedades nutricionales, color y sabor (Maestrelli, Lo Scalzo, Lupi, Bertolo, & Torreggiani, 2001). Sin embargo, es altamente perecedera por su alto contenido de humedad y la sensibilidad al etileno y cambios de temperatura, (National Research Council, 2008; Alaníz Guzmán, García Díaz, Reyes Avalos, & Meza Velázquez, 2013). Por consiguiente, se requiere emplear métodos que conserven significativamente sus características nutricionales, físicas y sensoriales (National Research Council, 2008). Entre estos métodos, está el de emplear bajas temperaturas (refrigeración, congelación y ultra-congelación), fermentación, curado, salado, ahumado, desecación, liofilización, irradiación entre otros (Caballero Torres, 2008).

La congelación es comúnmente usada para preservar alimentos durante largos periodos de tiempo, transformando en hielo la mayoría del agua líquida existente en ellos y retardando los daños biofísicos y químicos, así como el crecimiento de microorganismos (Delgado & Sun, 2001). Además, es uno de los mejores métodos para conservar el sabor, la textura y el valor nutricional del alimento similares al fresco (Wu, Orikasa, Tokuyasu, Shiina, & Tagawa, 2009). Sin embargo, la congelación presenta algunos problemas de calidad principalmente en frutas y vegetales una vez congelada-descongelada, como la destrucción del tejido celular (cambios de volumen y texturales), degradación de colores y pigmentos, pérdida de peso y nutrientes (Zienlinska, Sadowski, & Blaszcak, 2015).

Se ha demostrado que la congelación rápida conserva la calidad inicial de los alimentos, ya que se obtienen microcristales en el tejido celular de los alimentos sensibles, garantizando una descongelación con un cambio mínimo de volumen, reducidas pérdidas de agua y mayor conservación de los nutrientes, vitaminas y minerales después del proceso descongelado (Montes, Castaño & Orrego, 2005). El método de congelación rápida individual “*Individually Quick Freezing*” (IQF), permite obtener mayores velocidades de congelación y una mejor calidad en el producto congelado-descongelado en comparación con la congelación lenta o convencional. Además, garantiza al consumidor alimentos con características muy cercanas a las iniciales obteniéndose un producto de buena calidad para exportar como fruta fresca para el consumo directo (Montes, Castaño & Orrego, 2005).

Por otro lado, el proceso de deshidratación osmótica (DO) consiste en la inmersión de un alimento, ya sea entero o en trozos, en soluciones hipertónicas, promoviendo en simultáneo la pérdida de agua y la penetración de solutos en el alimento con condiciones tiempo-temperatura específicas (Fernández, Gallao, & Rodríguez, 2008; Torreggiani & Bertolo, 2004; Alzate, 2003). Con este método no térmico de deshidratación se obtienen productos de humedad intermedia con muy buena calidad organoléptica (Reppa, Mandala, Kostaropoulos & Saravacos, 2011).

Al proceso de DO previo a la congelación se le llama osmocongelación (OC). Esta es una alternativa para la reducción de pérdida de calidad, al disminuir el agua congelable de la fruta con la subsiguiente impregnación de solutos, creando un efecto crioprotector sobre el tejido vegetal (Xin, Zhang, Xu, Adhikari, & Sun, 2015). Además permite una reducción de los cambios texturales de las frutas y vegetales congelados, disminuyendo el pardeamiento enzimático y el colapso estructural, y reduciendo la PFL durante la descongelación (Xin, Zhang, Xu, Adhikari, & Sun, 2015).

Sin embargo, el producto parcialmente deshidratado no es microbiológicamente estable y además es muy susceptible al deterioro físico, por ello, requiere un procesamiento posterior para prolongar su vida útil (Bianchi, Guarnaschelli, & Milisenda, 2011). Por tanto, se plantea que al combinar la tecnología del IQF con la DO podrían reducirse las pérdidas de calidad, por consiguiente, el propósito de este trabajo fue establecer la influencia del pre-tratamiento osmótico y del tiempo de almacenamiento sobre la pérdida de fase líquida, el color, propiedades mecánicas, y el volumen, de melón congelado por diferentes métodos de congelación.

## **2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las pérdidas de calidad en los alimentos congelados son atribuidas principalmente a la formación de grandes cristales de hielo durante el almacenamiento que ocasionan daños irreversibles a los compartimentos celulares, asociados a la pérdida del estado osmótico y de la semi-permeabilidad (Tregunno & Goff, 1996). Las frutas y verduras al contener grandes cantidades de agua en estado fresco, son susceptibles a la formación de grandes cristales de hielo durante la congelación y el almacenamiento; los cuales después del proceso de congelación-descongelación, presentan pérdidas significativas de calidad acumulativa, gradual, e irreversible, manifestadas en pérdidas de fase líquida (a causa del daño celular) (Marani et al., 2007), alteración de la textura (flacidez y contracción durante la descongelación) (Chassagne-Berces et al., 2009), reducción de volumen (Bellocq et al., 2012) y, en algunos casos, cambios de color (Marani et al., 2007) y de sabor y aroma (Moraga, Martínez & Chiralt, 2006).

Por consiguiente, es importante la búsqueda de alternativas tecnológicas o de proceso para disminuir estas pérdidas de calidad en los alimentos congelados. Lo anterior se puede lograr con una reducción parcial del contenido de humedad de la fruta seguida de una congelación rápida.

De acuerdo a este trabajo, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es la mejor condición de operación en el proceso de congelación-descongelación por IQF con y sin pretratamiento osmótico, con mayor retención en la calidad física del melón en términos de fase líquida, volumen, color y textura (propiedades mecánicas)?

### 3 JUSTIFICACIÓN

Con esta propuesta se pretende ofrecer alternativas tecnológicas para disminuir pérdidas de calidad en el proceso de congelación-descongelación en frutas (melón como fruta de aplicación) mediante:

- 1) La congelación ultrarrápida mediante el uso de un sistema de congelación rápida individual (IQF), se logra promover una nucleación intensiva y por consiguiente formación de pequeños cristales de hielo y de forma redondeada favoreciendo la calidad del producto (Rhim et al., 2011; James, Purnell, & James, 2014; Talens, Martínez-Navarrete, Fito, & Chiralt, 2002). Sin embargo, aunque el aumento de velocidad de congelación puede reducir las posibilidades de la formación de grandes cristales de hielo en la fruta, el daño a los tejidos es todavía inevitable durante el almacenamiento en congelación, debido a la presencia de una significativa cantidad de agua; por consiguiente una alternativa adicional para reducir daños en los tejidos es disminuir parcialmente el contenido de agua congelable de fruta mediante la deshidratación osmótica (DO), que se traduce en una disminución de la cantidad de cristales de hielo formados durante la congelación (Talens et al. 2002).
- 2) La osmocongelación (OC), es la técnica combinada de DO y la congelación, que proporciona un camino prometedor para la conservación de frutas y hortalizas mediante la eliminación de cierta cantidad de agua de los alimentos antes de la congelación (Li & Sun, 2002). Se ha evidenciado en la literatura que la aplicación de la DO como un pre-tratamiento a la congelación, presenta un efecto crioprotector en el alimento, obteniendo un producto final con menores pérdidas de calidad en términos nutricionales y propiedades fisicoquímicas. Así lo confirman varios autores (Bermúdez, Narváez, Cadena, & Ayala, 2013; Talens, Escribhe, Martínez, & Chiralt, 2003; Ayala Aponte & Cadena, 2014) quienes reportaron una reducción en las PFL y de  $\Delta V$  en el congelamiento-descongelamiento de muestras pre-tratadas osmóticamente. Esta reducción en el contenido de agua con la DO podrá mejorar las características estructurales y de calidad, y logra una considerable reducción en la carga de refrigeración y demandas energéticas durante la congelación de la fruta, evidenciándose en un menor tiempo de proceso (Goula & Lazarides, 2012).

De acuerdo a lo anterior, la aplicación de la DO seguido de la congelación por IQF es una alternativa de interés para disminuir significativamente las pérdidas físicas de calidad del melón.



## 4 HIPÓTESIS

Se presentan dos hipótesis:

**Hipótesis Nula (H<sub>0</sub>):** La aplicación de un pre-tratamiento osmótico reduce las pérdidas de calidad física del melón congelado con IQF y congelación convencional (Lenta).

La congelación por IQF con y sin pre-tratamiento osmótico reduce las pérdidas de calidad física del melón respecto a la congelación lenta con y sin pre-tratamiento osmótico.

**Hipótesis Alterna (H<sub>a</sub>):** La aplicación de un pre-tratamiento osmótico no reduce las pérdidas de calidad física del melón congelado con IQF y congelación convencional (Lenta).

La congelación por IQF con y sin pre-tratamiento osmótico no reduce las pérdidas de calidad física del melón respecto a la congelación lenta con y sin pre-tratamiento osmótico.

## 5 OBJETIVOS

### 5.1 Objetivo general

Establecer la influencia de un pre-tratamiento osmótico sobre la calidad física del melón congelado por IQF.

### 5.2 Objetivo específicos

- Determinar el efecto de un pre-tratamiento osmótico sobre la pérdida de fase líquida, el color, la textura y el volumen de melón congelado-descongelado por IQF y congelación convencional, durante el almacenamiento en congelación.
- Establecer la influencia de los métodos de congelación y el tiempo de almacenamiento sobre la pérdida de fase líquida, el color, la textura y el volumen del melón.

## 6 MARCO TEÓRICO

### 6.1 Melón (*Cucumis melo L.*, variedad Cantaloupe)

El melón pertenece al género *Cucumis*, familia de las Cucurbitáceas; es un importante cultivo hortícola en el mundo y se produce principalmente en regiones tropicales y subtropicales. Esta fruta se caracteriza por su alto contenido de agua (92%b.h.), y una baja cantidad de azúcar (6% por cada 100g) inferior a otras frutas; haciendo del melón una de las frutas con menor contenido calórico (Moreiras, Carbajal, Cabrera , & Cuadrado , 2013). Además aporta una gran cantidad de vitamina C y  $\beta$ -carotenos (42mg y 321mgRE por cada 100g respectivamente) (Dole Food Company, The Mayo Clinic, & UCLA Center for Human Nutricion , 2002). También contiene 1g de fibra, 14mg de calcio, 320mg de potasio, 18mg de fósforo, 14mg de sodio, 17mg de

magnesio, entre otros (Valores por cada 100g de melón). (Moreiras, Carbajal, Cabrera , & Cuadrado , 2013)

Por otro lado, este fruto se cosecha por madurez y no por tamaño. Generalmente, la madurez comercial corresponde al estado firme-maduro y la madurez fisiológica se da después de la cosecha, con un contenido de sólidos solubles entre 7°Bx y 12°Bx (Ayala Aponte & Cadena, 2014). Según criterios microbiológicos, la vida del fruto es de 12 a 15 días a temperaturas de almacenamiento entre 2,2°C a 5,0°C (Álvarez, Fermín, García, Peña, & Martínez, 2013).

## **6.2 Deshidratación osmótica (DO)**

Durante este proceso los alimentos son parcialmente deshidratados por inmersión en una solución hipertónica acuosa, reduciendo la actividad de agua del alimento, con lo cual se minimiza el crecimiento de los microorganismos y se extiende la vida útil de los productos alimenticios (Simpson, et al., 2015). Esto sucede a través del contacto directo del tejido de la matriz vegetal con la solución, con ayuda de la membrana semipermeable del alimento y la transferencia de soluto de la solución osmótica al alimento (Ferrari, Arballo, Mascheroni, & Hubinger, 2011), logrando así, la eliminación parcial del agua congelable del producto (Ayala, Serna & Giraldo, 2009).

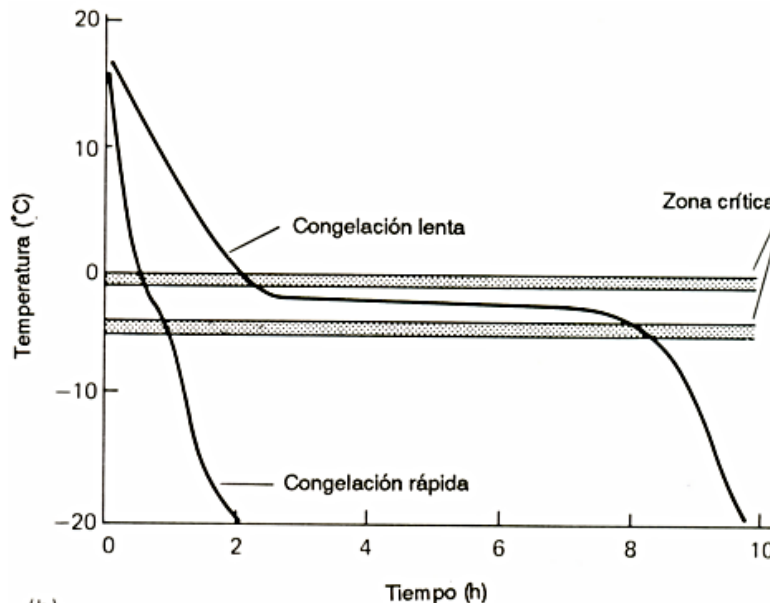
Esta tecnología es promisoriosa en cuanto a la preservación de la calidad de los alimentos en comparación con los tratamientos de congelación y secado convencionales, o como pre tratamiento. Este efecto no sólo se ve reflejado en una mejor apariencia y calidad sensorial general; sino también en la disminución de pérdidas de vitaminas, generando ventajas nutricionales (Simpson, Jiménez, Cerevic, & Grancelli, 2007).

## **6.3 Congelación**

La congelación es un proceso de preservación basado en la reducción de la temperatura por debajo de aquella en la que se comienzan a formar cristales en un material alimenticio, debido a la transformación del agua líquida en hielo, reduciendo así la actividad de agua y biológica. Consecuentemente, se reduce la actividad microbiológica y enzimática, por el descenso de la temperatura que generalmente se lleva hasta un valor entre -10°C y -20°C. Este proceso se utiliza en productos alimenticios tales como frutas, verduras, carnes, productos de panadería y platos preparados (Alzate, 2003).

Cuando la congelación y el almacenamiento se realizan adecuadamente, las características organolépticas del alimento y su valor nutricional se afectan de manera reducida con el paso del tiempo (Alzate, 2003). Es decir, permite prolongar la vida útil de los alimentos, manteniendo significativamente las características de calidad del producto. Sin embargo, la congelación no es adecuada para todos los alimentos. En algunos casos presenta cambios fisicoquímicos indeseables, relacionados con la pérdida de calidad una vez descongelado el producto (James, Purnell, & James, 2014), o también puede provocar pérdidas significativas en la fase líquida y el color de los alimentos (Marani, Angelli, & Mascheroni, 2007).

La congelación consta de tres etapas: (1) enfriamiento del producto hasta su punto de congelación (pre-enfriamiento), (2) eliminación del calor latente de cristalización o zona crítica (etapa de transición de fase) implica la conversión de agua en hielo a través del proceso de cristalización y es el paso clave que determina la eficiencia del proceso y la calidad final del producto congelado, (3) congelación del producto a la temperatura de almacenamiento final (etapa de templado) (Kiani & Sun, 2011). Este proceso también se ve afectado según el tipo de congelación que se emplea, es decir, la velocidad de congelación, afectando así el tiempo del proceso como se puede observar en la Figura 1.



**Figura 1.** Evolución de la temperatura del alimento con el tiempo para diferentes velocidades de congelación mostrando la zona crítica.

Belloq, (2012)

### 6.3.1 Congelación Rápida Individual (IQF)

La congelación rápida individual es el proceso donde el producto se congela individualmente a razón de 0,3 cm/min o más rápido, produciendo la congelación en menos de 90 min, con una temperatura del orden de -30°C (Caballero Torres, 2008). Posteriormente se almacena a -18°C o menos con el fin de mantener su aspecto, valor nutritivo y contenido vitamínico (Wang, et al., 2007). El periodo de congelación por este método es mucho más corto, permitiendo la difusión de solutos y la separación de agua en forma de hielo (Pruthi, 1999). Durante el proceso IQF la formación de cristales de hielo en el alimento son tan pequeños y de forma redondeada (zona crítica), que la frescura, color, sabor y contenido nutricional de los alimentos naturales se pueden preservar al máximo (Wang, et al., 2007). Pero éstos se puede ver afectada por los tratamientos previos a la congelación y los procesos después de la congelación, permitiendo la disminución del tamaño de cristales y una menor pérdida de agua durante el almacenamiento (Xin, Zhang, Xu, Adhikari, & Sun, 2015).

### 6.3.2 Congelación convencional

La congelación convencional o lenta, se efectúa con una tasa de remoción de calor que se refleja en una velocidad de descenso de la temperatura en el producto entre 0,5°C y 15°C por hora, por una tasa de congelación media de avance del frente de hielo menor a 1 cm/h. Por este proceso, se requiere normalmente lapsos de varias horas para reducir la temperatura desde el nivel inicial hasta el punto de congelación (Barreiro & Sandoval, 2006). Este proceso involucra una serie de cambios físicos y químicos que pueden afectar en gran medida la calidad del producto, debido al cambio de estado líquido a sólido, donde la cristalización del agua provoca un aumento de volumen que puede ocasionar fisuras en las membranas celulares e intracelulares del alimento, ocasionando rupturas celulares y, por lo tanto, pérdidas de calidad del alimento (Cadena, 2012; Li & Sun, 2002).

### 6.4 Osmocongelación (OC)

Muchos procesos de congelación innovadores están siendo investigados y desarrollados en la actualidad, entre ellos, la osmocongelación (OC) (Bermúdez, Narváez, Cadena, & Ayala, 2013; James, Purnell, & James, 2014). Ésta consiste en la aplicación de DO por corto tiempo seguido de la congelación en un alimento y tiene como fin mejorar la calidad del producto congelado-descongelado. El producto se deshidrata osmóticamente a un nivel de humedad deseado, para ser congelado posteriormente (Ayala, Sánchez & Rodríguez, 2014). Su fundamento se basa en la reducción del contenido de agua congelable, que significa una disminución de cantidad de cristales de hielo, y los pocos que se forman en la congelación son más pequeños en comparación con la congelación lenta, evitando así la pérdida de la estructura celular en las frutas y parámetros sensoriales (Talens, Escribhe, Martínez, & Chiralt, 2003).

## 7 ANTECEDENTES

Se han reportado diversos estudios sobre los beneficios de la deshidratación osmótica como pretratamiento a la congelación en frutas y vegetales:

- Ramallo & Mascheroni (2010), evaluaron la pérdida por fase líquida, el contenido de ácido ascórbico y el cambio en las propiedades mecánicas de rodajas de piña previamente deshidratadas osmóticamente o secadas con aire y sometidas a congelación a  $-31.5 \pm 2^\circ\text{C}$ . Los resultados mostraron que la deshidratación osmótica y secado al aire caliente contribuyeron a la reducción del tiempo necesario para congelar las muestras de piña. El proceso de congelación-descongelación afectó las propiedades mecánicas en las muestras de piña. El ácido ascórbico disminuyó levemente, aunque durante la deshidratación osmótica se presentó más pérdida que en el secado con aire.
- Acevedo, Tirado, & Guzmán (2014), deshidrataron osmóticamente pulpa de tamarindo (*Tamarindus indica* L.), para evaluar la influencia de la temperatura y la concentración de la solución sobre este proceso. Determinaron experimentalmente la pérdida de agua, pérdida de peso y ganancia de sólidos durante la deshidratación en soluciones hipertónicas de sacarosa con 30°Bx, 40°Bx y 60°Bx a temperaturas de 29°C y 50°C, de lo cual obtuvieron que a mayor

concentración y temperatura de la solución, resultaron mayores pérdidas de agua, pérdidas de peso (53,9%) y ganancia de sólidos (0,008%).

- Ayala Aponte & Cadena, (2014), evaluaron la pérdida de fase líquida (PFL), volumen (V), cambio total de color ( $\Delta E$ ) y firmeza de muestras cilíndricas de melón (variedad Cantaloupe) deshidratados osmóticamente, sometidas a congelación a  $-40^{\circ}\text{C}$  y almacenadas a  $-18^{\circ}\text{C}$  durante 1, 15 y 30 días. Las muestras se deshidrataron hasta dos niveles de humedad (85 y 75%, b.h) empleando una solución osmótica de sacarosa con 55°Brix a  $27\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ . Los resultados mostraron que las muestras tratadas presentaron menores PFL, V y  $\Delta E$  respecto a las muestras no tratadas durante el almacenamiento en congelación. La firmeza fue mayor en las muestras tratadas, lo cual demuestra el efecto crioprotector de la deshidratación osmótica.
- García-Paternina, Alvis-Bermudez, & García-Mogollon (2015), evaluaron el efecto de distintos procesos de secado de Mango (Tommy Atkins) tales como deshidratación osmótica (65°Brix de  $37-40^{\circ}\text{C}$  por 60 min), secado combinado ( $70^{\circ}\text{C}$  en una estufa tipo bandeja y al sol) y el secado en microondas sobre las propiedades físicas en mango con 11-14° Brix y 80% humedad con dimensión 1cm x 1cm x 0,4cm. La pérdida de peso y el tiempo de secado en los mangos pre tratados presentaron diferencias significativas, al igual que los parámetros  $L^*$  (luminosidad) y  $b^*$ . El pre-tratamiento de deshidratación osmótica fue mejor que la deshidratación por microondas, ya que mantuvo mejor las características de apariencia de las hojuelas de mango deshidratadas.
- Ahmed, Qazi, & Jamal (2016), realizaron una revisión bibliográfica acerca del uso de la deshidratación como pretratamiento. En este estudio se analizaron varias técnicas de deshidratación osmótica y su aplicación en la elaboración de alimentos, así como los avances recientes en este proceso. Asimismo, afirman que la deshidratación osmótica junto con la congelación, minimiza los cambios de calidad en términos de color y textura para muestras congeladas. Además, este proceso proporciona beneficios minimizando el daño por temperatura, inhibiendo el pardeamiento enzimático y reduciendo costos y permite obtener productos nutritivos, mínimamente procesados, disponibles durante todo el año con características sensoriales muy semejantes al producto natural.





## 8 MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en los laboratorios de la escuela de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia.

### 8.1 Simbología

En la Tabla 1 se presenta la simbología utilizada en el presente trabajo de investigación, con su respectiva imagen de la combinación de tratamientos obtenida después de congelación.

**Tabla 1.** Simbología del proyecto de investigación

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	ILUSTRACIÓN
LC	<b>Lento Control</b> (muestras de melón sin pre-tratamiento congelado convencionalmente)	
IQF-C	<b>Congelación rápida individual Control</b> (muestras de melón sin pre-tratamiento congeladas por IQF)	
L-DO	<b>Lento con deshidratación osmótica</b> (muestras de melón pre-tratadas osmóticamente con una solución de 65 °Brix y congeladas convencionalmente)	
IQF-DO	<b>Congelación rápida individual con deshidratación osmótica</b> (muestras de melón pre-tratadas osmóticamente con una solución de 65 °Brix y congeladas por IQF)	

## 8.2 Metodología

**Preparación de muestras:** Se emplearon melones (*cucumis melo L*) var. Cantaloup, adquiridos en un mercado local. Se seleccionaron frutos de color 2 (amarillo con visos verdes hacia el centro) según la clasificación de la NTC 5207 (ICONTEC, 2003), con un contenido de humedad de  $92 \pm 2\%$  (b.h) y sólidos solubles  $7 \pm 2$  °Brix. Los melones se lavaron, se retiraron manualmente la cáscara y las semillas, después se cortaron transversalmente en rodajas, posteriormente se obtuvieron cilindros con una altura aproximada de  $1,44 \pm 0,48$  cm y un diámetro aproximado de  $2,09 \pm 0,57$  cm, empleando un sistema de corte doble de cuchillos y un sacabocados de acero inoxidable (Figura 2) (Ayala Aponte & Cadena, 2014).



**Figura 2.** Sacabocados, cuchillo y cuchillo con doble corte utilizado para el acondicionamiento de las muestras de melón

**Preparación de la solución osmótica (SO):** En un contenedor plástico se prepararon 5 litros de SO de 65°Brix con agua destilada y azúcar (sacarosa). La selección de sacarosa como soluto osmótico se debe a su amplio uso en la deshidratación osmótica de frutas que permite una mayor pérdida de agua con mínima ganancia de solutos (Ayala Aponte & Cadena, 2014). Se empleó una relación solución-fruta de 20:1 para evitar cambios en la concentración de la solución durante el proceso.

**Deshidratación Osmótica (DO):** se realizó la DO durante 70 min a presión atmosférica, en una placa de calentamiento para mantener una temperatura constante en la SO de  $30 \pm 1^\circ\text{C}$  mientras se agitaba constantemente a 1000 rpm mediante un agitador mecánico. Esto evita el fenómeno de encostramiento por efecto del azúcar en la superficie de las muestras. Se introdujeron los melones en las canastillas con compartimientos, previniendo el daño de las muestras (Ayala Aponte & Cadena, 2014). El tiempo requerido para alcanzar el nivel de humedad durante la DO se calculó mediante pruebas preliminares (Ortega-Villalba, Vélez-Pasos, & Ayala-Aponte, 2016).

Al sacar las muestras de la SO, se eliminó rápidamente el exceso de solución remanente en su superficie con agua destilada (Ayala Aponte & Cadena, 2014). El montaje del proceso de DO de melón se muestra en la Figura 3. Para determinar el contenido de humedad de las muestras tratadas y no tratadas se utilizó el método AOAC 934.06 y los sólidos solubles se calcularon por medio de un refractómetro digital (Atago 1T, Zeiss, con termostato a  $20^\circ\text{C}$  y precisión  $0,1^\circ\text{Brix}$ ). La DO del melón se realizó hasta alcanzar muestras con un contenido de humedad del  $80 \pm 2\%$  (b.h).



**Figura 3.** Montaje del proceso de la deshidratación osmótica de melón con el agitador mecánico y las canastillas con muestras en su interior

**Congelación y descongelación:** Las muestras con y sin pretratamiento osmótico, se almacenaron en una nevera comercial a  $8 \pm 2^\circ\text{C}$  en bolsas plásticas resellables durante 12 h para promover el equilibrio interno de la concentración (Talens, Martínez-Navarrete, Fito, & Chiralt, 2002). Posteriormente, se congelaron bajo dos métodos: Congelación convencional a  $-18 \pm 2^\circ\text{C}$  y con una velocidad del aire de  $0,47 \text{ m/s}$ , y congelación rápida individual a  $4 \text{ m/s}$  y a  $-30^\circ\text{C}$ , en bandejas perforadas con flujo de aire paralelo (Figura 4).

La fase de equilibrio de las muestras frescas y con DO se llevó a cabo en una nevera vertical mixta (Refrimag, VMS-900) que cuenta con refrigerador y congelador independientes. La congelación IQF se realizó en un túnel de congelación de aire forzado (Dártico, Cali-Colombia). El proceso completó cuando la muestra alcanzó la temperatura del aire en su centro geométrico verificado mediante un termopar.





**Figura 4.** Muestras de melón en el IQF en bandejas con flujo paralelo

**Almacenamiento en congelación:** Las muestras congeladas con y sin pre-tratamiento osmótico se almacenaron a  $-18 \pm 2^{\circ}\text{C}$  en una nevera comercial; los melones se empacaron individualmente en bolsas plásticas resellables identificadas según el tratamiento, el tipo de congelación, tiempo de almacenamiento y las variables respuesta a evaluar. La Figura 5, muestra una imagen del sistema de almacenamiento de las muestras de melón. Una vez terminado el tiempo de almacenamiento en congelación (1 y 20 días), se llevaron las muestras a la nevera vertical a  $8 \pm 2^{\circ}\text{C}$  durante 14h para asegurar una descongelación completa para finalmente, medir las propiedades físicas de calidad (Ayala Aponte & Cadena, 2014).



**Figura 5.** Muestras en almacenamiento

Se establecieron dos tiempos específicos para el almacenamiento en congelación de 1 y 20 días con el fin de determinar el efecto del pretratamiento osmótico y el método de congelación sobre la calidad de melón y si dicho efecto se mantiene durante almacenamiento.

### 8.3 Diseño experimental

La Tabla 2 presenta el diseño experimental de  $2^3$  cuyos factores evaluados fueron la temperatura de congelación, tipo de tratamiento y tiempo de almacenamiento en congelación. Se obtuvieron 8 tratamientos, los experimentos se realizaron por triplicado para un total de 24 pruebas.



**Tabla 2.** Parámetros del diseño experimental

FACTOR	NIVEL	VARIABLE DE RESPUESTA
Temperatura de Congelación (°C)	-30 (IQF)	- Pérdida de fase líquida - Color - Volumen - Propiedades mecánicas - Velocidad de Congelación
	-18 (Lenta)	
Tratamiento	Fresco (Sin DO)	
	Con DO	
Tiempo de almacenamiento en congelación (Días)	1	
	20	

El análisis de resultados se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA univariado para un experimento factorial) y pruebas de diferencias mínimas significativas (LSD) de Fisher, empleando el programa estadístico SAS 9.4, con un nivel de confianza del 95%.

Las especificaciones de los análisis estadísticos para cada variable de respuesta se encuentran en los anexos, en el cual se observan cada una de los ANOVA con su respectiva prueba de Fisher.

#### 8.4 Variables de respuesta

Se dispusieron tres muestras para cada variable de respuesta, midiendo por triplicado para cada una, obteniendo nueve réplicas por cada variable de respuesta con el fin de obtener una mayor confiabilidad en los datos. Todas las variables de calidad expresadas como cambios (deltas), se determinaron entre las muestras deshidratadas y las muestras descongeladas para aquellas que tuvieron tratamiento, y para las muestras control entre las muestras frescas y las descongeladas.

- Velocidad de congelación:** La velocidad de congelación y la curva de congelación se obtuvieron a partir de los perfiles de temperaturas medidos en el centro geométrico de los cilindros durante la congelación por medio de termopares tipo K calibre 36. Las señales de la temperatura se recibieron y almacenaron en un sistema de adquisición de datos a través del tiempo registrado durante el proceso de congelación (FF y tradicional). La velocidad de congelación ( $\theta$ ) se determinó según la Ecuación 1 (Ortega, 2016).

$$\theta = \frac{T_i - T_f}{\Delta t} \quad (1)$$

Dónde:  $T_i$ : Temperatura inicial de la muestra (°C),  $T_f$ : Temperatura final de la muestra (°C),  $\Delta t$ : Tiempo de congelación (min).

- Tiempo de congelación:** Se determinó el tiempo de congelación en cada prueba, cuando las muestras de melón alcanzaron una temperatura final en su centro geométrico de -18°C, partiendo desde 0°C.

- **Pérdida de fase líquida (PFL):** Se determinó mediante la toma de peso de cada muestra antes y después de la congelación. La variación de peso ( $\Delta m$ ) expresada en fracción se calculó con la Ecuación 2 (Ayala Aponte & Cadena, 2014). Este peso se determinó mediante una balanza analítica. Dónde:  $M_i$ : Masa del producto antes de congelación,  $M_f$ : Masa del producto descongelado.

$$\Delta m = \frac{M_f - M_i}{M_i} \quad (2)$$

- **Color:** Se determinó usando un espectrocolorímetro (Hunter Lab – Color flex) para la obtención de las coordenadas de color CIE-  $L^*a^*b^*$ , donde  $L^*$  es luminosidad o claridad,  $a^*$  es coloración entre rojo-verde y  $b^*$  coloración entre amarillo-azul (Ayala, Sánchez, & Rodríguez, 2014). A partir de estas coordenadas se estimó el cambio total o global del color ( $\Delta E$ ), mediante las ecuación 3 (Ochoa-Martínez, Quintero, Ayala, & Ortiz, 2012).

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (3)$$

Posteriormente se calculó el cambio de luminosidad ( $\Delta L^*$ ) de manera similar a la realizada para la PFL (Ecuación 2).

- **Cambio de volumen:** El volumen de cada muestra se determinó midiendo el diámetro y la altura, tomándose tres puntos diferentes para cada medida de un mismo cilindro de melón; por medio de un calibrador Vernier. El cambio de volumen ( $\Delta V$ ) se determinó de manera similar a la Ecuación 2. (Ayala Aponte & Cadena, 2014).
- **Firmeza:** Se llevó a cabo una prueba de compresión uniaxial en la cual las muestras frescas, y congeladas-descongeladas se comprimieron por medio de un texturómetro hasta el 90% de su altura inicial a una velocidad de 50mm/min obteniendo la fuerza (N) y la distancia (mm) de las muestras en función del tiempo. Los valores experimentales de fuerza-distancia se convirtieron en esfuerzo-deformación utilizando las ecuaciones 4 y 5 respectivamente. El esfuerzo se calculó considerando que el volumen de la muestra permanece constante durante el ensayo (Serna, Torres, & Ayala, 2012).

$$\sigma_F = \frac{F(t)}{A(t)} = \frac{F(t)}{\pi r^2 l_0} \times (l_0 - d(t)) \quad (4)$$

$$\varepsilon_H = Ln \left[ \frac{l_0}{(l_0 - dl(t))} \right] \quad (5)$$

Dónde:  $F(t)$ : Fuerza ejercida sobre la muestra,  $l_0$ : Altura inicial de la muestra,  $d(t)$ : Distancia de compresión,  $dl(t)$ : Variación de la altura de la muestra,  $A(t)$ : Área de contacto,  $r$ : Radio de la muestra.

A partir de las gráficas elaboradas con los valores de esfuerzo ( $\sigma_F$ ) y deformación  $\varepsilon_H$  se obtuvieron las curvas de compresión uniaxial donde el punto máximo corresponde



al esfuerzo de fractura ( $\sigma_F$ ) y la deformación de fractura y la pendiente en la zona lineal al inicio de la curva representa el módulo de elasticidad (ME).

## 9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 9.1 Cambios de humedad y sólidos solubles debido a la deshidratación osmótica

En la Tabla 3 se observan algunas de las propiedades de las muestras de melón pre tratadas osmóticamente y frescas.

**Tabla 3.** Propiedades fisicoquímicas de melón con y sin pretratamiento antes de congelar

PROPIEDAD	FRESCO*	DO*
Humedad promedio (%b.h)	91,7± 1,7	82,3 ± 1,52
Sólidos solubles (°Brix)	7,21 ± 0,56	15,81 ± 1,48
Peso (g)	5,65 ± 0,23	4,39 ± 0,23
Volumen (cm <sup>3</sup> )	5,05 ± 0,24	3,34 ± 0,32
$L_o^*$	50,42 ± 1,26	48,18 ± 1,01
$a_o^*$	10,63 ± 0,74	12,22 ± 0,58
$b_o^*$	25,74 ± 0,93	27,15 ± 1,13
Imagen		

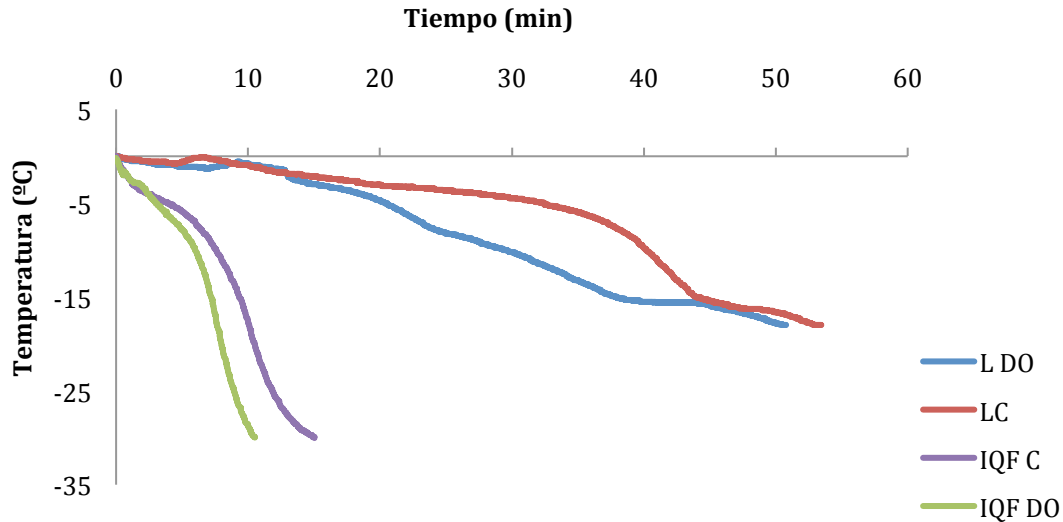
\*FRESCO hace referencia a las muestras de melón sin tratamiento osmótico.

\* DO hace referencia a las muestras de melón tratadas con deshidratación osmótica.

Como se muestra en la Tabla 3, la aplicación de DO ocasionó un descenso del contenido de humedad (CH), del volumen y del peso de las muestras, mientras que los sólidos solubles (°Brix) aumentaron un poco más del doble en la matriz alimentaria. Las coordenadas de color CIEL\*a\*b\* variaron con la DO, la luminosidad disminuyó debido probablemente a que al contener mayor cantidad de solutos, estos impiden la emisión de luz a través del alimento. Los parámetros a\* y b\* aumentaron por lo que las muestras DO tienden a un color más amarillo y más rojo, efecto benéfico para la calidad sensorial de este producto. Ayala-A. & Cadena-G., (2014) reportaron tendencias similares en melón y en otros alimentos deshidratados como las calabazas (Mayor, Moreira, & Sereno, 2011), el albaricoque (Íspir & Toğrul, 2009), las manzanas y los kiwis (Marani, Agnelli, & Mascheroni, 2007).

## 9.2 Curvas de congelación

En la Figura 6 se presentan las curvas de congelación de muestras de melón frescas y pretratadas osmóticamente a distintas condiciones de temperatura y velocidades de aire en los dos métodos utilizados.



**Figura 6.** Curvas de congelación de las muestras de melón con y sin pretratamiento en congelación por IQF y convencional

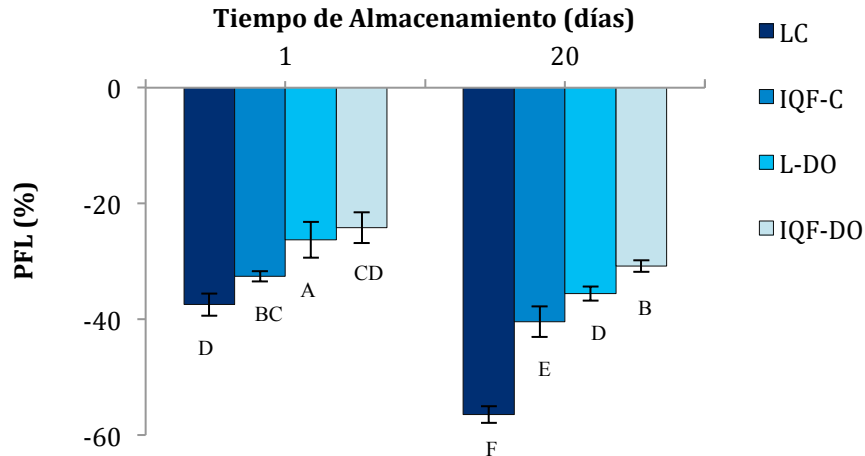
Se observó en la Figura 6, que las muestras congeladas convencionalmente presentaron una menor velocidad de congelación (control: 0,33 °C/min y DO: 0,37°C/min) en comparación con la congelación por IQF (control: 2 °C/min y DO: 2,90 °C/min); esto se traduce en un mayor tiempo en congelación lenta (control: 53 min y DO: 50,78 min) comparado con congelación IQF (control: 15,03 min y DO: 10,55 min). Adicionalmente, las muestras tratadas con DO mostraron menor tiempo de congelación en ambos métodos de congelación debido al menor contenido de agua congelable. Ramallo y Mascheroni, (2010) presentaron comportamiento similar en la reducción de los tiempos de congelación en osmocongelación de piña a 60°Brix.

Puede notarse que en la congelación por IQF el melón no se evidenció el fenómeno de subenfriamiento, debido a su alta velocidad de congelación y la baja temperatura. El método combinado IQF + DO congeló las muestras de melón en menor tiempo que los otros métodos, lo cual podría indicar una reducción de costos energéticos y reducción de pérdidas de calidad (Ramallo & Mascheroni, 2010).

Respecto a la congelación convencional, los tiempos de congelación resultaron hasta 5 veces mayores en IQF. Según Harnkarnsujarit et al., (2016), Alhamdan et al., (2015) y Kiani, Zheng, & Sun, (2014) una baja velocidad de congelación, implica tiempos de congelación mayores, debido a la baja transferencia de calor en dichas condiciones respecto a la congelación rápida. Un resultado similar fue reportado por Osorio et al., (2004), quienes destacan las ventajas de la congelación rápida en papaya, debido al tamaño de los cristales, comparado con la congelación convencional, en la que los cristales son más grandes y causan mayor daño celular. Sin embargo, pocos estudios reportan el efecto de la velocidad de congelación sobre los tiempos de proceso en osmocongelación (James et al., 2014).

### 9.3 Pérdida de fase líquida (PFL)

En la Figura 7 se muestra el cambio de PFL durante el almacenamiento en congelación (a  $-18^{\circ}\text{C}$ ) de melón fresco y tratado osmóticamente, congelado por IQF y congelación convencional.



**Figura 7.** Porcentaje de pérdida de fase líquida (PFL) de melón fresco y con DO en congelación por IQF y convencional

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada condición de congelación, prueba de LSD de Fisher ( $P < 0,05$ ).

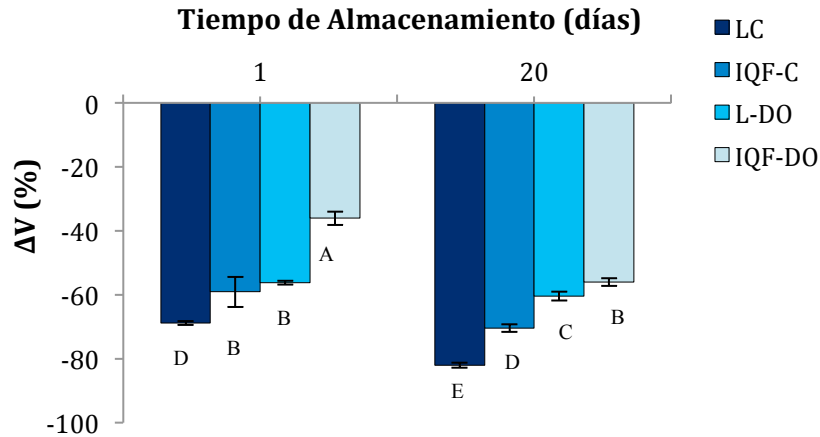
Se encontró un efecto significativo del tiempo de almacenamiento sobre la PFL ( $P < 0,05$ ) (Anexo 1 - Tabla 4). Esto puede deberse a que las PFL se incrementó durante los días de almacenamiento en todos los tratamientos y métodos de congelación (Figura 7), comportamiento atribuible al rompimiento mecánico de las membranas durante el almacenamiento en congelación, debido a la recrystalización del hielo durante este proceso. Esto, disminuye los componentes líquidos celulares y la pérdida de la capacidad de retención del agua de la célula, cambiando así el tamaño, forma y número de cristales de hielo durante el almacenamiento en congelación (Gonçalves, Abreu, Brandão, & Silva, 2011; Simandjuntak, Barrett, & Wrolstad, 1996). Un comportamiento similar se observó en melón (Castellanos-Bastidas, Murillo-Villada, Ortega-Villalba, Vélez-Pasos & Ayala-Aponte, 2016) en manzana, pera y kiwi (Marani, Angelli, & Mascheroni, 2007); en berenjena (Wu, Orikasa, Tokuyasu, Shiina, & Tagawa, 2009) durante el almacenamiento en congelación.

Las muestras pre-tratadas con DO por ambos métodos de congelación, una vez descongeladas, presentaron las menores PFL de manera significativa ( $P < 0,05$ ) (Anexo 1 - Tabla 4). Esto se debe posiblemente a una menor recrystalización del hielo por el bajo contenido de agua congelable y consecuentemente menor daño estructural, evidenciando la crioprotección de este tratamiento. Algunos investigadores reportan un comportamiento similar en diferentes frutas y vegetales (Marani, Angelli, & Mascheroni, 2007) y en melón (Ayala-Aponte & Cadena, 2014; Bermudez, Narvaez, Cadena, & Ayala Aponte, 2013).

Por otra parte, las muestras congeladas-descongeladas por IQF presentaron una menor PFL como se esperaba de manera significativa ( $P < 0,05$ ) respecto a las muestras congeladas convencionalmente. Esto atribuido de igual manera a cristales de menor tamaño.

## 9.4 Cambios de volumen

En la Figura 8, se muestra el cambio de volumen durante el almacenamiento en congelación (a -18°C) de melón fresco y tratado osmóticamente, congelado por IQF y congelación convencional.



**Figura 8.** Porcentaje de cambio de volumen ( $\Delta V$ ) de melón fresco y con DO en congelación por IQF y convencional

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada condición de congelación, prueba de LSD de Fisher ( $P < 0,05$ ).

El cambio de volumen ( $\Delta V$ ) está directamente relacionado con la pérdida de fase líquida (PFL) por lo que también presenta un aumento progresivo con el tiempo de almacenamiento en congelación. Se encontraron diferencias significativas entre los tipos de congelación y entre los tratamientos sobre la pérdida de volumen (Anexo 1 - Tabla 4).

Se observó que las muestras tratadas y congeladas por IQF presentaron menores  $\Delta V$  atribuido a una menor cantidad de agua congelable y la formación de cristales más pequeños que no rompen los tejidos de la matriz alimentaria. Esto debido a que los cristales a altas velocidades de congelación son pequeños, y en su mayoría se forman a nivel intracelular y no extracelular y con forma redondeada, en cambio los cristales formados a bajas velocidades de congelación son grandes y tienden a tener formas hexagonales (puntiagudas) que generan los daños en los tejidos (notorios una vez se descongelan), provocando salida de líquido celular y por ende nutrientes de la fruta (Ortega, 2016; Wu, Ogawa & Tagawa, 2008).

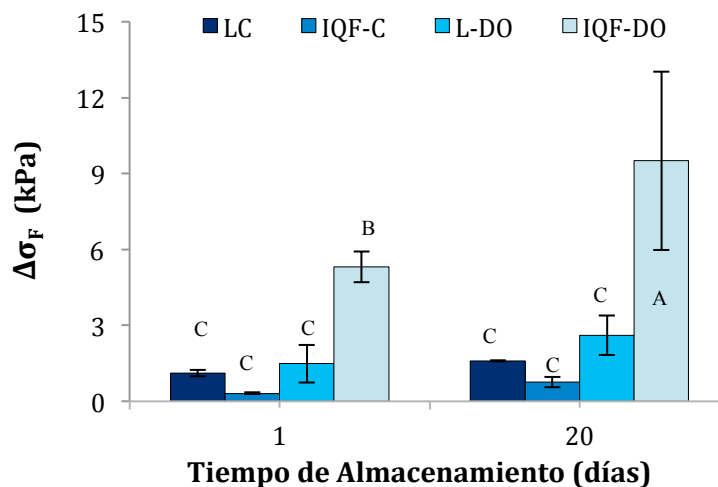
Por otro lado, las muestras pretratadas mostraron un menor  $\Delta V$  que las muestras control durante el almacenamiento. Esto debido a que la muestra tiene una menor cantidad de agua congelable y la sacarosa impregnada durante la DO, tiene un efecto crioprotector. Por tanto, el producto pretratado tiene una estructura más fuerte durante el tiempo de congelación-descongelación (Ayala-Aponte & Cadena (2014). Es decir, el efecto crioprotector se generó cuando la concentración del soluto en la matriz alimentaria, evitó que los cristales de agua dañen la estructura impidiendo cambios significativos en el volumen (Chassagne et al., 2009; Wu, Ogawa & Tagawa, 2008; Marani et al., 2007), como se observa en la Figura 8.

Las muestras no tratadas se asocian con una mayor pérdida por goteo (PFL) en el proceso de congelación-descongelación, debido al mayor contenido de agua congelable. De acuerdo con Koç, Eren, & Kaymak Ertekin, (2008), la pérdida de agua en los alimentos lleva a daños estructurales, lo que provoca encogimiento y cambios en la microestructura del producto.

## 9.5 Propiedades mecánicas

### 9.5.1 Esfuerzo de fractura ( $\sigma_F$ )

En la Figura 9 se presentan los cambios del esfuerzo de fractura ( $\sigma_F$ ) el cual significa la cantidad de fuerza requerida para fracturar la muestra. El delta menor implica un menor  $\sigma_F$  en las muestras descongeladas respecto a las frescas (Ortega, 2016).



**Figura 9.** Cambios del esfuerzo de fractura ( $\Delta\sigma_F$ ) de melón fresco y con DO en congelación por IQF y convencional

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada condición de congelación, prueba de LSD de Fisher ( $P < 0,05$ ).

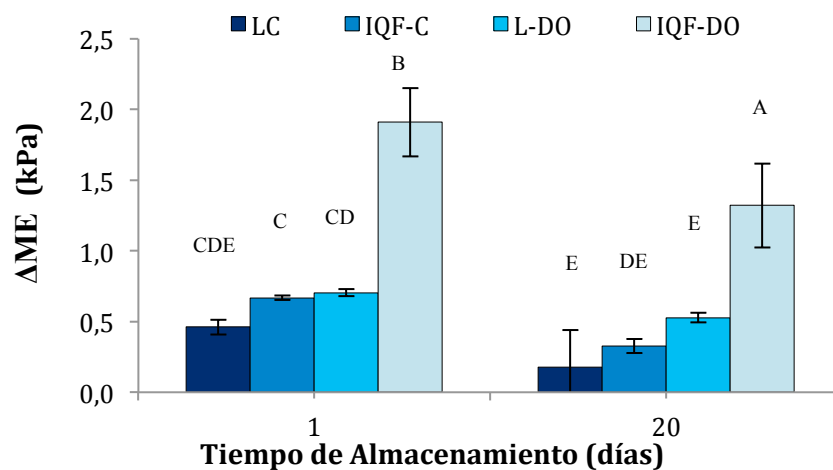
Se obtuvieron diferencias significativas en los tratamientos (Anexo 1 - Tabla 4), lo cual se puede observar en la Figura 9, donde todas las muestras incrementaron su  $\sigma_F$  a través de los días de almacenamiento. Las muestras con DO presentan mayor  $\Delta\sigma_F$  debido posiblemente a que presentaron una compactación de células por la concentración de constituyentes celulares. Esto ocurre durante el pretratamiento osmótico provocando la formación de un tejido más fuerte (Marani, Agnelli, & Mascheroni, 2007). Las muestras control presentaron menores cambios de  $\sigma_F$  indicando posiblemente un reblandecimiento en su textura, lo que puede ser explicado por el rompimiento en las paredes celulares causado por el estrés de la expansión del volumen celular durante la formación de cristales de hielo (Park et al., 2014).

Por otra parte, no se presentaron diferencias significativas en la congelación convencional por ambos tratamientos durante el tiempo de almacenamiento (Figura 9). El tipo de congelación y tratamiento presentó diferencias significativas, donde la combinación IQF + DO obtuvo un

cambio mayor en la resistencia a la fractura para ambos días de almacenamiento. Esto puede deberse a que en el producto deshidratado se reduce la cantidad de agua, disminuyen los cristales de hielo en cantidad y tamaño, evitando así el rompimiento de la estructura celular de la muestra (Talens, Escribhe, Martínez, & Chiralt, 2003). Se ha reportado comportamiento similar para el  $\sigma_F$  en osmocongelación de papaya (Rodríguez & Sánchez, 2010).

### 9.5.2 Módulo de Elasticidad (ME)

La Figura 10 presenta los resultados del módulo de elasticidad (ME) de las muestras con y sin pretratamiento ante diferentes condiciones de congelación; el valor  $\Delta ME$  corresponde a la diferencia entre el módulo de elasticidad de la muestra antes y después de congelar-descongelar.



**Figura 10.** Cambios del módulo de elasticidad ( $\Delta ME$ ) de melón fresco y con DO en congelación por IQF y convencional

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada condición de congelación, prueba de LSD de Fisher ( $P < 0,05$ ).

Los cambios en el ME durante el tiempo de almacenamiento y el tratamiento fueron significativos (Anexo 1 - Tabla 4). Se encontró un mayor cambio de elasticidad en las muestras pretratadas con DO en los dos días de almacenamiento, esto puede deberse a la presencia de mayor cantidad de solutos dentro de la matriz (Ortega, 2016).

Puede notarse que durante el tiempo de almacenamiento las muestras tratadas osmóticamente tienen comportamiento inverso en las propiedades mecánicas, mientras el  $\sigma_F$  se incrementa el ME descende. Esta disminución del ME está asociada a la disminución de la rigidez del material en la superficie de la fruta posiblemente a la salida del agua y a la entrada de soluto afectando la superficie de la fruta. La rigidez del material está asociada al ME. Por el contrario, el  $\sigma_F$  que está relacionado con la resistencia macro de la fruta no fue afectada negativamente por la entrada de soluto y salida de agua, por el contrario fortaleció la estructura por la impregnación de la sacarosa. Ando et al., (2012), reportaron resultados similares en la disminución de ME en zanahoria y otros autores encontraron comportamientos análogos en melón (Ortega, 2016) y pepino (Dermesonlouglou et al., 2008).

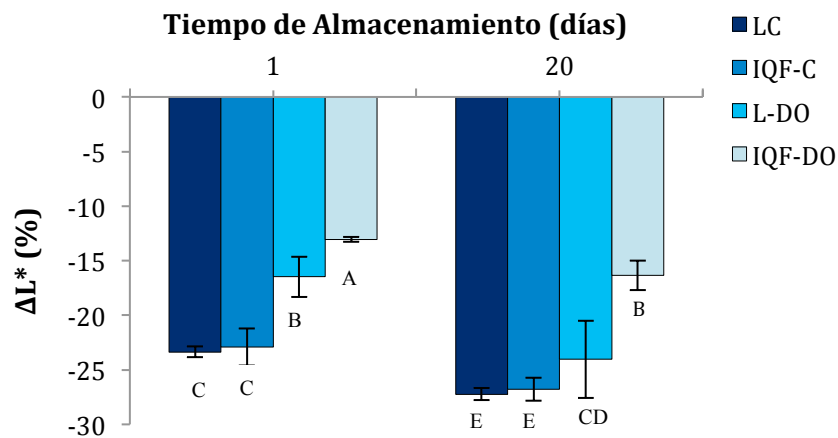


Por otra parte, el  $\sigma_F$  como el ME en IQF + DO presentaron tendencias mayores en comparación con las demás combinaciones de congelación y tratamiento. Esto indica que la estructura es más firme (Marani, Agnelli, & Mascheroni, 2007), y en general IQF + DO generaron un fortalecimiento tanto en la pared celular como en la membrana celular del melón, debido al efecto crioprotector de la osmocongelación.

## 9.6 Color

### 9.6.1 Luminosidad ( $L^*$ )

En la Figura 11 se presentan los cambios de luminosidad ( $\Delta L^*$ ), de las muestras control y pre-tratadas durante el almacenamiento.



**Figura 11.** Cambios en la luminosidad ( $\Delta L^*$ ) de melón fresco y con DO en congelación por IQF y convencional

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada condición de congelación, prueba de LSD de Fisher ( $P < 0,05$ ).

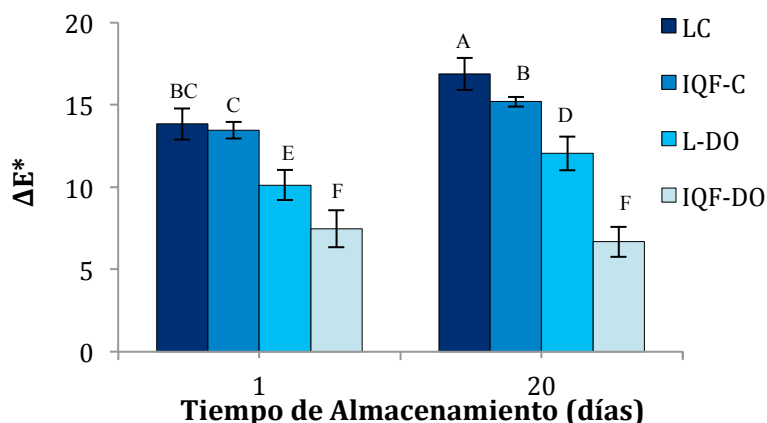
Se observa que en todos los tratamientos aumentó la pérdida de luminosidad durante el tiempo de almacenamiento. También presentó menor pérdida de claridad las muestras tratadas con DO en ambos métodos de congelación. Este efecto puede explicarse por el ingreso de solución osmótica a la superficie de la muestra, desplazando el aire de la superficie de la fruta, indicando un índice refractivo más homogéneo en el tejido y, por consiguiente, mayor absorción de la luz de la superficie de la muestra (Castellanos-Bastidas, Murillo-Villada, Ortega-Villalba, Vélez-Pasos & Ayala-Aponte, 2016). Resultados similares se observan en el melón (Bermudez, Narvaez, Cadena, & Ayala Aponte, 2013) y en mango (Rincón y Kerr, 2010). Sin embargo, no se presentaron pérdidas significativas de  $L^*$  durante el almacenamiento en los tratamientos ( $P > 0,05$ ) en ambos métodos de congelación (Anexo 1 - Tabla 4).

En cuanto a las muestras tratadas con IQF presentaron menor diferencia que las tratadas en congelación lenta (entre 13% y 15% en comparación con 16% a 24%), esto es debido posiblemente a que a mayor velocidad de congelación menor es el tamaño de los cristales de

hielo, logrando pequeños poros que dispersan más la luz que los poros grandes, obteniendo un color más cercano al blanco (Ceballos et al., 2012). Comportamientos similares se observaron por Agnelli y Mascheroni (2002) en fresas.

### 9.6.2 Cambio de color ( $\Delta E$ )

En la Figura 13 se presenta el cambio total de color ( $\Delta E$ ) de las muestras control y las pretratadas osmóticamente en diferentes tiempos de almacenamiento.



**Figura 12.** Cambios totales de color ( $\Delta E$ ) de melón fresco y con DO en congelación por IQF y convencional

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada condición de congelación, prueba de LSD de Fisher ( $P < 0,05$ ).

El ANOVA reportó diferencias significativas en el tipo de congelación, tiempo de almacenamiento y tratamiento en el cambio total del color; es decir, cada factor incide en los cambios de color (Anova 1 – Tabla 4).

El comportamiento ( $\Delta E$ ) fue similar al presentado por ( $\Delta L^*$ ), donde los tratamientos aumentaron con el tiempo y se observó un menor cambio total del color en las muestras con DO. Esto posiblemente por el efecto protector de la impregnación de sacarosa con la aplicación del pretratamiento osmótico, ya que, al formarse una capa superficial delgada de bajo contenido de humedad de las muestras, la protege durante el almacenamiento. Así lo han reportado algunos investigadores en estudios de osmocongelación de kiwi, manzana (Marani, Agnelli, & Mascheroni, 2007) y en berenjena (Wu, Orikasa, Tokuyasu, Shiina, & Tagawa, 2009). Este efecto protector de la DO también puede ser por la inhibición de la transferencia de oxígeno a la fruta por la presencia de azúcares sobre la superficie que reduce el pardeamiento enzimático (Saputra, 2001).

En general se observó, que las muestras con mayores cambios totales de color ( $\Delta E$ ) mostraron mayores PFL, este comportamiento puede estar asociado posiblemente a algunas pérdidas de pigmentos típicos del melón como los carotenoides con la pérdida de fase líquida durante la

congelación-descongelación. Por otro lado, las muestras tratadas con DO presentaron menores  $\Delta E$  lo que indica el efecto protector de la DO asociado a la disminución de pérdida de pigmentos, evitando cambios indeseables del color (Chiralt y Talens 2005). Por otro parte, el principal pigmento del melón son los  $\beta$ -carotenos responsables de su color característico, son termosensibles y se oxidan con facilidad (Ortega, 2016). Fundo et al., (2015) y Talens, Martínez-Navarrete, Fito, & Chiralt, (2002) manifiestan que durante el proceso de congelación-descongelación pueden ocurrir degradación de los carotenoides contenidos en la matriz de la fruta, los cuales se deterioran fácilmente durante estos procesos (Fundo et al., 2015; Talens, Martínez-Navarrete, Fito, & Chiralt, 2002).

## 10 CONCLUSIONES

La congelación rápida individual permitió incrementar la velocidad de congelación de muestras de melón, reduciendo los tiempos de proceso frente a la congelación convencional. Así mismo, se observó que las muestras tratadas con deshidratación osmótica presentaron mayores velocidades de congelación (menores tiempos de proceso) para ambos métodos de congelación; encontrando que la combinación de IQF con DO mostro el menor tiempo de congelación.

Las pérdidas de fase líquida y el cambio de volumen fueron menores en IQF en comparación con la congelación convencional. Los factores individuales no presentaron diferencias significativas entre ellos, pero la combinación del tipo de congelación, pretratamiento y tiempo de almacenamiento mostraron que IQF-DO presentaron las menores pérdidas de fase líquida, lo que indica el efecto crioprotector de la DO.

La aplicación del pretratamiento osmótico previo al proceso de IQF permitió disminuir las pérdidas del color, en términos de la claridad ( $L^*$ ) y el cambio total de color ( $\Delta E$ ) durante el almacenamiento congelado del melón; lo cual indica que la DO protege a la fruta de reacciones de pardeamiento durante el almacenamiento en congelación.

En general, la congelación por IQF presentó menores pérdidas de calidad (PFL,  $\Delta V$ ,  $\sigma_F$ , ME,  $L^*$  y  $\Delta E$ ) en melón en comparación con el método de congelación convencional. Sin embargo, al aplicar el pretratamiento osmótico previo a la congelación IQF (IQF+DO), las pérdidas de calidad fueron menores respecto a la congelación IQF sin DO.

De acuerdo a los resultados de este trabajo, se evidenció que la combinación IQF+DO (Osmocongelación) permite obtener muestras de melón de mejor calidad que las muestras sin pretratamiento osmótico durante el almacenamiento en congelación. Por consiguiente, la técnica de osmocongelación es una alternativa de interés para la conservación de frutas durante el almacenamiento en congelación.

## 11 BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, D., Tirado, D., & Guzmán, L. (2014). Osmotic dehydration tamarind pulp (*Tamarindus indica L.*): Influence of temperature and concentration. *U.D.C.A*, 17(1), 123 -

- Agnelli, M. E., & Mascheroni, R. H. (2002). Quality evaluation of foodstuffs frozen in a cryomechanical freezer. *Journal of Food Engineering*, 52(3), 257–263.
- Ahmed, I., Qazi, I., & Jamal, S. (2016). Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. *Innovative Food & Emerging Technologies*, 34, 29-43.
- Alanís Guzman, M., García Díaz, C., Reyes Avalos, M., & Meza Velázquez, J. (2013). Aplicación de hidrogenofriamiento y una cubierta de HPMC-parafina para aumentar la vida de anaquel de melón Cantaloupe. *Universidad y Ciencia*, 29 (2), 179 - 180.
- Alhamdan, A., Hassan, B., Alkahtani, H., Abdelkarim, D., & Younis, M. (2015). Cryogenic freezing of fresh date fruits for quality preservation during frozen storage. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, In Press.
- Álvarez, C., Fermín, N., García, J., Peña, E., & Martínez, A. (Junio de 2013). Evaluación del efecto de la aplicación de un recubrimiento comestible en melones (cucumis melo l., var. Cantaloupe) cortados y almacenados en refrigeración. *Saber*, 25(2), 218 - 226.
- Alzate, C. (2003). *Procesamiento de Alimentos* (1a ed., Vol. 1). Manizales, Colombia: Ed: Universidad Nacional De Colombia Sede Manizales.
- Ando, H., Kajiwara, K., Oshita, S., & Suzuki, T. (2012). The effect of osmotic dehydrofreezing on the role of the cell membrane in carrot texture softening after freeze-thawing. *Journal of Food Engineering*, 108(3), 473–479.
- Ayala Aponte, A., & Cadena, M. (2014). Influencia de pretratamientos osmóticos sobre la calidad de muestras de melón (*Cucumis melo L.*) durante almacenamiento en congelación. *DYNA*, 81(186), 81 - 86.
- Ayala, A., Sánchez, M., & Rodríguez, H. (Jul-Dic de 2014). Influencia de la osmocongelación sobre algunas propiedades físicas de papaya (*Carica papaya L.*). *U.D.C.A*, 17(2), 487 - 494.
- Ayala, A., Serna, L., & Giraldo, C. (2009). Efecto de la agitación sobre la deshidratación osmótica de pitahaya amarilla (*Selenicereus megalanthus S.*) empleando soluciones de sacarosa. *Interciencia*, 34(7), 494 - 496.
- Barreiro, J., & Sandoval, A. (2006). *Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas* (1a ed.). Caracas, Venezuela: Equinoccio.
- Bchir, B., Besbes, S., Attia, H., & Blecker, C. (2012). Osmotic dehydration of pomegranate seeds (*Punica Granatum L.*): Effect of freezing pre-treatment. *Journal of Food Process Engineering*, 35(3), 335–354.

- Bellocq, E. (2012). *Dehidrocongelación de Zapallo Anco*. Tesis de maestría en Tecnología de Alimentos, Universidad Tecnología Nacional, Ingeniería Química, Buenos Aires.
- Bermúdez, A., Narváez, M., Cadena, I., & Ayala, A. (Agosto de 2013). Reducción de pérdida de calidad de melón (*Cucumis Melo*) durante la congelación mediante aplicación previa de deshidratación osmótica. *Alimentos hoy*, 22(30), 23 -29.
- Bianchi, M., Guarnaschelli, A., & Milisenda, P. (2011). Dehidrocongelación de Frutas: Estudio de los parámetros de Calidad. *Invenio*, 26 (14), 117-132.
- Caballero Torres, Á. E. (2008). *Temas de higiene de los alimentos*. La Habana, Cuba: Ciencias Médicas.
- Cadena, M. (2012). *Aplicación de la Técnica de Osmo-Congelación Para la Conservación de Melón Cantaloupe (Cucumis melo L.)*. Tesis de maestría, Universidad del Valle, Ingeniería de Alimentos, Cali.
- Castellanos-Bastidas, L.H., Murillo-Villada, K., Ortega-Villalba, K.J., Vélez-Pasos, C.A. & Ayala-Aponte, A.A. (2016). Influencia de un pretratamiento osmótico sobre la calidad física del melón congelado por IQF y su evaluación en almacenamiento. *Vitae*, 23(1), 406 – 409.
- Chassagne-Berces, S., Poirier, C., Devaux, M.-F., Fonseca, F., Lahaye, M., Pigorini, G., ... Guillon, F. (2009). Changes in texture, cellular structure and cell wall composition in apple tissue as a result of freezing. *Food Research International*, 42(7), 788–797. <http://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.03.001>
- Ceballos, A. M., Giraldo, G. I., & Orrego, C. E. (2012). Effect of freezing rate on quality parameters of freeze dried soursop fruit pulp. *Journal of Food Engineering*, 111(2), 360–365.
- Chassagne-Berces, S., Poirier, C., Devaux, M. F., Fonseca, F., Lahaye, M., Pigorini, G., ... Guillon, F. (2009). Changes in texture, cellular structure and cell wall composition in apple tissue as a result of freezing. *Food Research International*, 42(7), 788–797.
- Chiralt, A., & Talens, P. (2005). Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues. *Journal of Food Engineering*, 67(1-2), 167–177.
- Delgado, A., & Sun, D. (2001). Heat and mass transfer models for predicting freezing process a review. *Journal of Food Engineering*, 47 (1), 157-174.
- Dermesonlouoglou, E. K., Pourgouri, S., & Taoukis, P. S. (2008). Kinetic study of the effect of the osmotic dehydration pre-treatment to the shelf life of frozen cucumber. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(4), 542–549.

- Dole Food Company, The Mayo Clinic, & UCLA Center for Human Nutrition. (2002). *Encyclopedia of Foods: A Guide to Healthy Nutrition*. (Elsevier, Ed.) Academic Press.
- Fernández, A., Gallao, M., & Rodríguez, S. (2008). Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. *LWT - Food Science and Technology*, 41(4), 604-610.
- Ferrari, C., Arballo, J., Mascheroni, R., & Hubinger, M. (2011). Modelling of mass transfer and texture evaluation during osmotic dehydration of melon under vacuum. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(2), 436 - 443.
- Fundo, J. F., Amaro, A. L., Madureira, A. R., Carvalho, A., Feio, G., Silva, C. L. M., & Quintas, M. A. C. (2015). Fresh-cut melon quality during storage: An NMR study of water transverse relaxation time. *Journal of Food Engineering*, 167, 71–76.
- Gálvez Postigo, A. (2010). Nuevos métodos para la conservación de alimentos. *I Jornadas Del Campus De Excelencia Internacional Agroalimentario*, 11–12.
- García-Paternina, M., Alvis-Bermudez, A., & García-Mogollon, C. (2015). Evaluación de los pretratamientos de deshidratación osmótica y microondas en la obtención de hojuelas de mango (Tommy Atkins). *Información Tecnológica*, 26(5), 63 - 70.
- Gonçalves, E. M., Abreu, M., Brandão, T. R. S., & Silva, C. L. M. (2011). Degradation kinetics of colour, vitamin C and drip loss in frozen broccoli (*Brassica oleracea* L. ssp. *Italica*) during storage at isothermal and non-isothermal conditions. *International Journal of Refrigeration*, 34(8), 2136–2144.
- Goula, A. M., & Lazarides, H. N. (2012). Modeling of mass and heat transfer during combined processes of osmotic dehydration and freezing (Osmo-Dehydro-Freezing). *Chemical Engineering Science*, 82, 52–61.
- Harnkarnsujarit, N., Kawai, K., Watanabe, M., & Suzuki, T. (2016). Effects of freezing on microstructure and rehydration properties of freeze-dried soybean curd. *Journal of Food Engineering*, 184, 10–20.
- ICONTEC. (2003). NTC 5207. Frutas Frescas: Melón Variedad Cantaloupe. Especificaciones. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Bogotá D.C., Colombia.
- İspir, A., & Toğrul, İ. T. (2009). Osmotic dehydration of apricot: Kinetics and the effect of process parameters. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(2), 166–180.
- James, C., Purnell, G., & James, J. (2014). Critical Review of Dehydrofreezing of Fruits and Vegetables. *Food Bioprocess Technology*, 7, 1219 - 1234.
- Kiani, H., & Sun, D. (Agosto de 2011). Water crystallization and its importance to freezing of foods: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 22(8), 407 - 426.

- Kiani, H., Zheng, L., & Sun, D. (2014). Ultrasonic Assistance for Food Freezing. In *Emerging Technologies for Food Processing* (pp. 495–513).
- Koç, B., Eren, İ., & Kaymak Ertekin, F. (2008). Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering*, 85(3), 340–349.
- Li, B., & Sun, D. (Septiembre de 2002). Novel methods for rapid freezing and thawing of foods: a review. *Journal of Food Engineering*, 54(3), 175 - 182.
- Maestrelli, A., Lo Scalzo, R., Lupi, D., Bertolo, G., & Torreggiani, O. (2001). Partial Removal of Water Before Freezing: Cultivar and Pre-Treatments as Quality Factors of Frozen muskmelon (*Cucumis melo*, cv *reticulatus* Naud). *Journal of Food Engineering*, 49 (2), 255-260.
- Marani, C., Angelli, M., & Mascheroni, R. (2007). Osmo-frozen fruits: Mass transfer and quality evaluation. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1122 - 1130.
- Montes, L., Castaño, J. & Orrego, C. (2005). Evaluación del sistema de congelación rápida “IQF”. *Cenicafé*, 56(4): 365 – 380.
- Moraga, G., Martínez Navarrete, N., & Chiralt, A. (2006). Compositional changes of strawberry due to dehydration, cold storage and freezing-thawing processes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 30(4), 458–474.
- Moreiras, O., Carbajal, Á., Cabrera, L., & Cuadrado, C. (2013). *Tablas de composición de alimentos*. España: Pirámide.
- Mayor, L., Moreira, R., & Sereno, A. M. (2011). Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. *Journal of Food Engineering*, 103(1), 29–37.
- National Research Council. (2008). *Lost Crops of Africa: Volume III: Fruits*. EE.UU.: FAO.
- Ochoa-Martínez, C., Quintero, P., Ayala, A., & Ortiz, M. (2012). Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window technique. *Journal of Food Engineering*, 109(1), 69 - 75.
- Ohnishi, S., & Miyawaki, O. (2005). Osmotic Dehydrofreezing for Protection of Rheological Properties of Agricultural Products from Freezing-Injury. *Food Science and Technology Research*, 11(1), 52–58.
- Ortega, K. J. (2016). Influencia de pretratamientos osmóticos con y sin pulsos de vacío en la congelación de melón (*Cucumis melo* L.). Tesis de maestría, Universidad del Valle,

Ingeniería de Alimentos, Cali.

- Ortega-Villalba, K. J., Vélez-Pasos, C. A., & Ayala-aponte, A. (2016). Efecto de las condiciones de operación sobre la calidad de melón ( *cucumis melo* L. ) congelado por iqf. *Vitae*, 23(1), 204–207.
- Osorio, F. A., Moyano, P. C., Vega, R. E., Bungler, A., & Garreto, J. (2004). Effect of Combined Processes of Osmotic Dehydration and Freezing on Papaya Preservation. *Food Science and Technology International*, 10, 163–170.
- Park, S. J., Al Mijan, M., & Bin Song, K. (2014). Quality changes in *Pteridium aquilinum* and the root of *Platycodon grandiflorum* frozen under different conditions. *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, 43, 90–96.
- Phisut, N. (2012). MiniReview Factors affecting mass transfer during osmotic dehydration of fruits. *International Food Research Journal*, 19(1), 7–18.
- Pruthi, J. (1999). *Quick Freezing Preservation of Foods: Foods of plant origin*. Nueva Delhi, India: Allied Publishers.
- Ramallo, L., & Mascheroni, R. (2010). Dehydrofreezing of Pineapple. *Journal of Food Engineering*, 99(3), 269 - 275.
- Reppa, A., Mandala, J., Kostaropoulos, A. & Saravacos, G. (2011). Influence of solute temperature and concentration on the combined osmotic and air drying. *Drying Technology*, 17(7-8): 1449-1458.
- Rincón, A., & Kerr, W. L. (2010). Influence of osmotic dehydration, ripeness and frozen storage on physicochemical properties of mango. *Journal of Food Processing and Preservation*, 34(5), 887–903.
- Rodriguez, H. & Sánchez, M. (2010). Influencia de la osmo-congelación sobre algunas propiedades físicas de la papaya (*Carica papaya* L.). Tesis, Universidad del Valle, Ingeniería de Alimentos, Cali.
- Saputra, D. (2001). Osmotic dehydration of pineapple. *Drying Technology*, 19 (2), 415-425.
- Serna, L., Torres, L., & Ayala, A. (2012). Changes in mechanical properties of minimally-processed yellow Pitahaya treated with 1-MCP. *DYNA*, 79(174), 71 - 78.
- Simandjuntak, V., Barrett, D. M., & Wrolstad, R. E. (1996). Cultivar and Frozen Storage Effects on Muskmelon (*Cucumis melo*) Colour, Texture and Cell Wall Polysaccharide Composition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 71(3), 291–296.
- Simpson, R., Jiménez, M., Cerevic, E., & Grancelli, R. (Junio de 2007). Aceleración de la deshidratación osmótica de frambuesas (*Rubus idaeus*) por medio de calentamiento



- óhmico. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 57(2), 192 - 195.
- Simpson, R., Ramírez, C., Birchmeier, V., Almonacid, A., Moreno, J., Núñez, H., & Jaques, A. (Diciembre de 2015). Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field. *Journal of Food Engineering*, 166, 204 - 211.
- Talens, P., Escríbhe, I., Martínez, N., & Chiralt, A. (2003). Influence of osmotic dehydration and freezing on the volatile profile of kiwi fruit. *Food Research International*, 36(6), 635 - 642.
- Talens, P., Martínez-Navarrete, N., Fito, P., & Chiralt, A. (2002). Changes in optical and mechanical properties during osmodehydrofreezing of kiwi fruit. *Innovative Food Science*, 3(2), 191 - 199.
- Tregunno, N. B., & Goff, H. D. (1996). Osmodehydrofreezing of apples : structural and textural effects. *Food Research International*, 29(5), 471–479.
- Torreggiani, D., & Bertolo, G. (2004). Present and Future in Process Control and Optimization of Osmotic Dehydration. *Advances in Food and Nutrition Research*, 48, 173-238.
- Tortoe, C. (2010). A review of osmodehydration for food industry. *African Journal of Food Science*, 4(6), 303–324.
- Wang, Z., Wu, H., Zhao, G., Liao, X., Chen, F., Wu, F., & Hu, X. (Marzo de 2007). One-dimensional finite-difference modeling on temperature history and freezing time of individual food. *Journal of Food Engineering*, 79(2), 502 - 510.
- Wu, L., Ogawa, Y., & Tagawa, A. (2008). Electrical impedance spectroscopy analysis of eggplant pulp and effects of drying and freezing-thawing treatments on its impedance characteristics. *Journal of Food Engineering*, 87(2), 274–280.
- Wu, L., Orikasa, T., Tokuyasu, K., Shiina, T., & Tagawa, A. (2009). Applicability of the vacuum-dehydrofreezing technique for the long-term preservation of fresh-cut eggplant: Effects of process conditions on the quality attributes of the samples. *Journal of Food Engineering*, 91(4), 560-565.
- Xin, Y., Zhang, M., Xu, B., Adhikari, B., & Sun, J. (Septiembre de 2015). Research trends in selected blanching pretreatments and quick freezing technologies as applied in fruits and vegetables: A review. *International Journal of Refrigeration*, 57, 11 - 25.
- Zienlinska, M., Sadowski, P., & Blaszczyk, W. (2015). Freezing/thawing and microwave-assisted drying of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). *Food Science and Technology*, 62(1), 555-536.

## 12 ANEXOS

### 12.1 Anexo 1. Tablas correspondientes al análisis estadístico de PFL

**Tabla 4.** Valores de probabilidad para cada variable de respuesta

Variable respuesta	Pr > F					
	PFL	$\Delta V$	$\Delta \sigma_F$	ME	$\Delta L$	$\Delta E$
Tipo de congelación	<.0001	<.0001	0.0027	<.0001	0.0002	<.0001
Pretratamiento	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
Tipo de congelación × tratamiento	<.0001	0.6526	0.0003	<.0001	0.0013	<.0001
Tiempo de almacenamiento	<.0001	<.0001	0.0216	0.5041	<.0001	<.0001
Tipo congelación × Tiempo de almacenamiento	<.0001	<.0001	0.2186	0.0344	0.0654	0.0033
Tratamiento × Tiempo de almacenamiento	<.0001	0.3962	0.0851	0.0406	0.1521	0.0065
Tipo de congelación × Tiempo de almacenamiento × pretratamiento	0.8559	<.0001	0.2050	0.0036	0.0674	0.2601

Los valores menores a 0,05 indican una diferencia significativa del factor sobre las variables de respuesta.

### 12.2 Anexo 2. Tablas correspondientes al análisis estadístico de PFL

**Tabla 5.** Anova para la PFL

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	7	1980.18	282.88	76.00	<.0001
Error	26	96.77	3.72		
Total Correcto	33	2076.95			

$R^2$	Coeff Var	Raíz MSE	Media de PFL
0.95	-5.42	1.93	-35.62

**Tabla 6.** Prueba de Fisher para la PFL

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Tipo de congelación	1	146.98	146.98	39.49	<.0001
Tratamiento	1	779.99	779.99	209.56	<.0001
Tipo de congelación * Tratamiento	1	271.13	271.13	72.84	<.0001
Almacenamiento	1	572.28	572.28	153.75	<.0001
Tipo de congelación *Almacenamiento	1	302.98	302.98	81.40	<.0001
Tratamiento * Almacenamiento	1	235.66	235.66	63.31	<.0001
Tipo de congelación * Tratamiento * Almacenamiento	1	0.13	0.13	0.03	0.8559

### 12.3 Anexo 3. Tablas correspondientes al análisis estadístico de los cambios de volumen.

**Tabla 7.** Anova para el  $\Delta V$ 

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	7	5840.01	834.29	246.59	<.0001
Error	24	81.20	3.38		
Total Correcto	31	5921.21			

$R^2$	Coeff Var	Raíz MSE	Media de $\Delta V$
0.99	-3.01	1.84	-61.15

**Tabla 8.** Prueba de Fisher para el  $\Delta V$ 

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
<b>Tipo de congelación</b>	1	1074.28	1074.28	317.52	<.0001
<b>Tratamiento</b>	1	2292.37	2292.37	677.56	<.0001
<b>Tipo de congelación * Tratamiento</b>	1	0.70	0.70	0.21	0.6526
<b>Almacenamiento</b>	1	1214.62	1214.62	359.00	<.0001
<b>Tipo de congelación *Almacenamiento</b>	1	118.39	118.39	34.99	<.0001
<b>Tratamiento * Almacenamiento</b>	1	2.53	2.53	0.75	0.3962
<b>Tipo de congelación * Tratamiento * Almacenamiento</b>	1	118.66	118.66	35.07	<.0001

**13.3 Anexo 4.** Se muestran las tablas correspondientes al análisis estadístico de Esfuerzo de deformación

**Tabla 9.** Anova para el esfuerzo de deformación

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
<b>Modelo</b>	7	144.43	20.63	14.31	0.0002
<b>Error</b>	10	14.42	1.44		
<b>Total Correcto</b>	17	158.85			

$R^2$	Coeff Var	Raíz MSE	Media del esfuerzo de deformación
0.91	41.67	1.20	2.88

**Tabla 10.** Prueba de Fisher para el esfuerzo de deformación

<b>Fuente</b>	<b>DF</b>	<b>Tipo III SS</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>Tipo de congelación</b>	1	22.49	22.49	15.60	0.0027
<b>Tratamiento</b>	1	62.41	62.41	43.28	<.0001
<b>Tipo de congelación * Tratamiento</b>	1	41.71	41.71	28.92	0.0003
<b>Almacenamiento</b>	1	10.66	10.66	7.39	0.0216
<b>Tipo de congelación *Almacenamiento</b>	1	2.49	2.49	1.72	0.2186
<b>Tratamiento * Almacenamiento</b>	1	5.27	5.27	3.65	0.0851
<b>Tipo de congelación * Tratamiento * Almacenamiento</b>	1	2.65	2.65	1.84	0.2050

**12.4 Anexo 5.** Se muestran las tablas correspondientes al análisis estadístico de Módulo de elasticidad

**Tabla 11.** Anova para el módulo de elasticidad

<b>Fuente</b>	<b>DF</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>Modelo</b>	7	4.66	0.67	24.96	<.0001
<b>Error</b>	11	0.29	0.03		
<b>Total Correcto</b>	18	4.96			

<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Coeff Var</b>	<b>Raíz MSE</b>	<b>Media del módulo de elasticidad</b>
0.94	22.26	0.16	0.73

**Tabla 12.** Prueba de Fisher para el módulo de elasticidad

Fuente	DF	Tipo III SS	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
<b>Tipo de congelación</b>	1	1.83	1.83	68.59	<.0001
<b>Tratamiento</b>	1	1.58	1.58	59.31	<.0001
<b>Tipo de congelación * Tratamiento</b>	1	1.08	1.08	40.38	<.0001
<b>Almacenamiento</b>	1	0.01	0.01	0.48	0.5041
<b>Tipo de congelación * Almacenamiento</b>	1	0.16	0.16	5.83	0.0344
<b>Tratamiento * Almacenamiento</b>	1	0.14	0.14	5.38	0.0406
<b>Tipo de congelación * Tratamiento * Almacenamiento</b>	1	0.36	0.36	13.52	0.0036

**12.5 Anexo 6.** Se muestran las tablas correspondientes al análisis estadístico de  $\Delta L$

**Tabla 13.** Anova para el cambio de luminosidad ( $\Delta L^*$ )

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
<b>Modelo</b>	7	718.18	102.60	33.70	<.0001
<b>Error</b>	22	66.98	3.05		
<b>Total Correcto</b>	29	785.16			

$R^2$	Coeff Var	Raíz MSE	Media del $\Delta L$
0.92	-8.21	1.75	-21.25

**Tabla 14.** Prueba de Fisher para el cambio de luminosidad ( $\Delta L^*$ )

<b>Fuente</b>	<b>DF</b>	<b>Tipo III SS</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>Tipo de congelación</b>	1	58.37	58.37	19.17	0.0002
<b>Tratamiento</b>	1	437.90	437.90	143.83	<.0001
<b>Tipo de congelación *</b>					
<b>Tratamiento</b>	1	41.21	41.21	13.54	0.0013
<b>Almacenamiento</b>	1	169.17	169.17	55.57	<.0001
<b>Tipo de congelación *</b>					
<b>*Almacenamiento</b>	1	11.45	11.45	3.76	0.0654
<b>Tratamiento *</b>					
<b>Almacenamiento</b>	1	6.70	6.70	2.20	0.1521
<b>Tipo de congelación *</b>					
<b>Tratamiento *</b>					
<b>Almacenamiento</b>	1	11.27	11.27	3.70	0.0674

**12.6 Anexo 7.** Se muestran las tablas correspondientes al análisis estadístico de  $\Delta E$

**Tabla 15.** Anova para el cambio total del color ( $\Delta E$ )

<b>Fuente</b>	<b>DF</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>Modelo</b>	7	374.82	53.54	69.50	<.0001
<b>Error</b>	26	20.03	0.77		
<b>Total Correcto</b>	33	394.84			

<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Coeff Var</b>	<b>Raíz MSE</b>	<b>Media del <math>\Delta E</math></b>
0.95	7.52	0.88	11.67

**Tabla 16.** Prueba de Fisher para el cambio total del color ( $\Delta E$ )

<b>Fuente</b>	<b>DF</b>	<b>Tipo III SS</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Valor F</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>Tipo de congelación</b>	1	51.56	51.56	66.93	<.0001
<b>Tratamiento</b>	1	269.20	269.20	349.42	<.0001
<b>Tipo de congelación * Tratamiento</b>	1	17.96	17.96	23.32	<.0001
<b>Almacenamiento</b>	1	17.59	17.59	22.83	<.0001
<b>Tipo de congelación *Almacenamiento</b>	1	8.09	8.09	10.49	0.0033
<b>Tratamiento * Almacenamiento</b>	1	6.74	6.74	8.75	0.0065
<b>Tipo de congelación * Tratamiento * Almacenamiento</b>	1	1.02	1.02	1.33	0.2601