



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria Agroalimentària
i de Biosistemes de Barcelona

CONGELACIÓN ASISTIDA POR CAMPOS MAGNÉTICOS EN ALIMENTOS LÍQUIDOS

Trabajo de Fin de Grado
Ingeniería de Sistemas Biológicos

Autor: Víctor Martínez Vázquez

Tutor: Eduard Hernández Yáñez

23 / octubre / 2022

Resumen

La congelación es un proceso clave para la conservación de los alimentos, cada vez más aparecen diferentes estudios con diferentes métodos para la mejorar la técnica de congelación. Al llevar a cabo la congelación clásica nos encontramos con pérdidas en sus propiedades organolépticas como pueden ser la pérdida de sabor, de color o variación en su textura y tamaño entre otras, la principal causa de este deterioro en la calidad del alimento es el tamaño de los cristales de hielo formados durante la congelación. Para reducir el tamaño de los cristales de hielo se han estudiado varios métodos de congelación, en este caso se realizó el estudio con la asistencia de campos magnéticos en la congelación. Para ello se utilizaron dos tipos diferentes de campos magnéticos, uno oscilante provocado por una corriente fluyendo a través de una bobina y otro campo magnético estático producido por dos imanes. También se aplicaron dos diferentes intensidades de campo magnético en este caso 2 mT y 4 mT.

Los parámetros más importantes para la reducción de los cristales de hielo son el tiempo de nucleación y el tiempo de transición de fase. En este estudio se analiza como varia cada uno de ellos en la aplicación de los campos magnéticos en la congelación.

Los resultados obtenidos en el estudio no respaldan la utilización de los campos magnéticos para la congelación, si bien es cierto que se han visto efectos significativos en los campos magnéticos estáticos éste no es suficiente para justificar la inversión requerida por las industrias para la obtención de los instrumentos con esta tecnología.

Finalmente cabe destacar que los resultados obtenidos han tenido una tendencia a disminuir esos parámetros, sin embargo, hay mucha variabilidad entre las muestras sin la cual quizás podría haber tenido un efecto más significativo la utilización del campo magnético.

Resum

La congelació es un procés clau per la conservació d'aliments, cada vegada apareixen més estudis diferents amb diferents mètodes per millorar la tècnica de congelació. Al dur-se al cap la congelació clàssica ens trobem amb pèrdues en les seves propietats organolèptiques com poden ser la pèrdua de sabor, de color o variació en la seva textura i mesura entre altres. La principal causa d'aquest deteriorament en la qualitat de l'aliment és la mesura dels cristalls de gel formats durant la congelació. Per reduir la mesura dels cristalls de gel s'han estudiat diversos mètodes de congelació, en aquest cas es va realitzar l'estudi amb l'assistència de camps magnètics en la congelació. Per això s'han utilitzar dos tipus diferents de camps magnètics, un oscil·lant provocat per una corrent fluïnt a través d'una bobina de coure i un altre camp magnètic estàtic produït per dos imants. També s'han aplicat diferents unitats d'inducció magnètica en aquest cas 2 mT i 4 mT.

Els paràmetres més importants per la reducció dels cristalls de gel són el temps de nucleació, el temps final de congelació i el temps de transició de fase. En aquest estudi s'analitza com varia cadascun d'ells en la aplicació dels camps magnètics en la congelació.

Els resultats obtinguts en l'estudi no recolzen la utilització dels camps magnètics per la congelació, si bé es cert que s'han vist efectes significatius en els camps magnètics estàtics aquests no són suficients per justificar la inversió requerida per les indústries per l'obtenció del instruments amb aquesta tecnologia.

Finalment cau destacar que els resultats obtinguts han tingut una tendència a disminuir aquests paràmetres, tanmateix, hi ha molta variabilitat entre les mostres sense la qual potser podria haver tingut un efecte més significatiu la utilització del camp magnètic.

Abstract

Freezing is a key process for food preservation, more and more different studies appear with different methods to improve the freezing technique. When carrying out the classic freezing, we find losses in its organoleptic properties such as the loss of flavor, color or variation in its texture and size, among others, the main cause of this deterioration in the quality of the food is the size of ice crystals formed during freezing. To reduce the size of ice crystals, several freezing methods have been studied, in this case the study will be carried out with the help of magnetic fields in freezing. To do this, two different types of magnetic fields have been used, an oscillating one caused by a current flowing through a coil and another static magnetic field produced by two magnets. Two different units of magnetic induction have also been applied in this case 2 mT and 4 mT.

The most important parameters for the reduction of ice crystals are the nucleation time, the final freezing time and the phase transition time. This study analyzes how each of them varies in the application of magnetic fields in freezing.

The results obtained in the study do not support the use of magnetic fields for freezing, although it is true that significant effects have been seen in static magnetic fields, this is not enough to justify the investment required by the industries to obtain the instruments with this technology.

Finally, it should be noted that the results obtained have had a tendency to decrease these parameters, however, there is a lot of variability between the samples, maybe without which the use of the magnetic field could have had a more significant effect.

Sumario

ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	9
SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS	11
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. La congelación	12
1.1.1. Proceso de congelación	13
1.1.2. Sistemas de congelación actuales	15
1.1.3. Problemas de la congelación actual	17
1.1.4. Nuevas formas de conservación de alimentos	18
1.2. Campo magnético	20
1.2.1. Tipos de campos magnéticos	21
1.2.2. Estudios previos	24
2. OBJETIVOS	30
2.1. Objetivo general	30
2.2. Objetivos específicos	30
3. MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1. Materiales	31
3.2. Equipo	32
3.3. Metodología	36
3.3.1. Campos magnéticos utilizados	36
3.3.2. Preparación de las muestras	36
3.3.3. Experimento 1: Congelación con campo magnético oscilante	37
3.3.4. Experimento 2: Congelación con campo magnético estático	41
3.3.5. Parámetros de estudio	43
3.3.6. Estadística descriptiva y análisis estadísticos	44
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1. Experimento 1: Campo magnético oscilante	46
4.1.1. Agua destilada	46
4.1.2. Agua Milli-Q	50
4.1.3. Zumo de tomate	55

4.1.4. Suero de tomate.....	59
4.2. Experimento 2: Campo magnético estático	63
4.2.1. Agua Milli-Q.....	63
4.2.2. Zumo de tomate.....	68
4.2.3. Suero de tomate.....	72
4.3. Discusión.....	76
5. CONCLUSIONES	78
BIBLIOGRAFÍA	79
Bibliografía básica	79
Bibliografia complementària	82

Índice de figuras

Figura 1-1 Crecimiento del mercado de alimentos congelados. _____	13
Figura 1-2 Etapas del proceso de congelación. _____	14
Figura 1-3 Imagen microscópica de cristales de hielo formados en una solución de sacarosa. ____	15
Figura 1-4 Congelador mecánico. _____	16
Figura 1-5 Congelador criogénico. _____	16
Figura 1-6 Congelador por chorro de aire. _____	17
Figura 1-7 Campo magnético generado en un imán. _____	20
Figura 1-8 Campo magnético estático. _____	22
Figura 1-9 Campo magnético oscilante. _____	22
Figura 3-1 Baño de agua WNB 14 _____	38
Figura 3-2 Data Logger con sensor de temperatura _____	38
Figura 3-3 Campo magnético oscilante _____	38
Figura 3-4 Tupperware con los tubos de las muestras en el interior de la bobina de campo magnético oscilante _____	38
Figura 3-5 Regulador de voltaje Chuan Hsin SRV-10 0-240V _____	39
Figura 3-6 Muestra de agua destilada _____	40
Figura 3-7 Muestra de agua destilada con tapón de poliestireno _____	40
Figura 3-8 Campo magnético estático 2 mT _____	42
Figura 3-9 Campo magnético estático 4 mT _____	42

Figura 4-1 Test de Tukey para el tiempo de nucleación _____	47
Figura 4-2 Test de Tukey para el tiempo final de congelación _____	48
Figura 4-3 Test de Tukey para el tiempo de transición de fase _____	49
Figura 4-4 Test de Tukey para el tiempo de nucleación _____	51
Figura 4-5 Prueba de igualdad de varianzas _____	52
Figura 4-6 Test de Games-Howell para el tiempo final de congelación _____	53
Figura 4-7 Test de Tukey para el tiempo de transición de fase _____	54
Figura 4-8 Test de Tukey para el tiempo de nucleación _____	56
Figura 4-9 Test de Tukey para el tiempo final de congelación _____	57
Figura 4-10 Test de Tukey para el tiempo de transición de fase _____	58
Figura 4-11 Test de Tukey para el tiempo de nucleación _____	60
Figura 4-12 Test de Tukey para el tiempo final de congelación _____	61
Figura 4-13 Test de Tukey para el tiempo de transición de fase _____	62
Figura 4-14 Prueba de igualdad de varianzas _____	64
Figura 4-15 Test de Games-Howel para el tiempo de nucleación _____	65
Figura 4-16 Test de Tukey para el tiempo final de congelación _____	66
Figura 4-17 Test de Tukey para el tiempo de transición de fase _____	67
Figura 4-18 Test de Tukey para el tiempo de nucleación _____	69
Figura 4-19 Test de Tukey para tiempo final de congelación _____	70
Figura 4-20 Test de Tukey para el tiempo de transición de fase _____	71

Figura 4-21 Test de Tukey para el tiempo de nucleación _____ 73

Figura 4-22 Test de Tukey para el tiempo final de congelación _____ 74

Figura 4-23 Test de Tukey para el tiempo de transición de fase _____ 75

Índice de tablas

Tabla 1 Estudios previos sobre la congelación asistida por campos magnéticos	26
Tabla 2 Equipos utilizados para realizar los experimentos	32
Tabla 3 Estadística descriptiva del agua destilada	46
Tabla 4 ANOVA del tiempo de nucleación	46
Tabla 5 ANOVA para el tiempo final de congelación	48
Tabla 6 ANOVA para el tiempo de transición de fase	49
Tabla 7 Estadística descriptiva del agua Milli-Q	50
Tabla 8 ANOVA para el tiempo de nucleación	50
Tabla 9 Prueba de Welch para el tiempo final de congelación	52
Tabla 10 ANOVA para el tiempo de transición de fase	54
Tabla 11 Estadística descriptiva del zumo de tomate	55
Tabla 12 ANOVA para el tiempo de nucleación	55
Tabla 13 ANOVA para el tiempo final de congelación	56
Tabla 14 ANOVA para el tiempo de transición de fase	57
Tabla 15 Estadística descriptiva del suero de tomate	59
Tabla 16 ANOVA para el tiempo de nucleación	59
Tabla 17 ANOVA para el tiempo final de congelación	61
Tabla 18 ANOVA para el tiempo de transición de fase	62
Tabla 19 Estadística descriptiva del agua Milli-Q	63

Tabla 20 Prueba de Welch para el tiempo de nucleación _____	64
Tabla 21 ANOVA para el tiempo de congelación _____	66
Tabla 22 ANOVA para el tiempo de transición de fase _____	67
Tabla 23 Estadística descriptiva del zumo de tomate _____	68
Tabla 24 ANOVA para el tiempo de nucleación _____	68
Tabla 25 ANOVA para el tiempo final de congelación _____	70
Tabla 26 ANOVA para el tiempo de transición de fase _____	71
Tabla 27 Estadística descriptiva del suero de tomate _____	72
Tabla 28 ANOVA para el tiempo de nucleación _____	72
Tabla 29 ANOVA para el tiempo final de congelación _____	74
Tabla 30 ANOVA para el tiempo de transición de fase _____	75

Símbolos y acrónimos

WHC: Capacidad de retención de agua

OMF: Campos magnéticos oscilantes

PMF: Campo magnético permanente

MFAF: Congelació assistida con campos magnéticos

RPM: Revoluciones por minuto

1. Introducción

Uno de los factores más determinantes en la calidad final de un producto alimentario es su conservación. Es por ello que, con las nuevas tecnologías, que van apareciendo cada vez con más frecuencia, se realizan una gran cantidad de investigaciones relacionadas con la conservación de los alimentos.

Las industrias buscan cada vez más poder mantener las propiedades sensoriales de los productos frescos en los productos conservados, también tienen como objetivo mantener dichas propiedades durante el mayor tiempo posible ya que de esta manera los productos podrían exportarse hacia otros países más lejanos sin perder las cualidades propias de los productos frescos y así, llegar a un mayor número de personas.

El método más común y más utilizado para este proceso de conservación de alimentos es la congelación.

1.1. La congelación

Hay una tendencia muy pronunciada en la industria alimentaria que revela que el crecimiento de la demanda de los alimentos congelados aumentará con el tiempo (Figura 1-1).

La congelación es el método más utilizado para la preservación de los alimentos, es por ello que es un campo de gran interés a nivel mundial. Los estudios relacionados con la congelación de los alimentos buscan poder mejorar el sistema de congelación de forma que sea lo menos perjudicial posible para el producto, es decir, manteniendo las propiedades sensoriales más similares posibles al producto fresco. Para ello es importante conocer cómo se lleva a cabo dicho proceso.

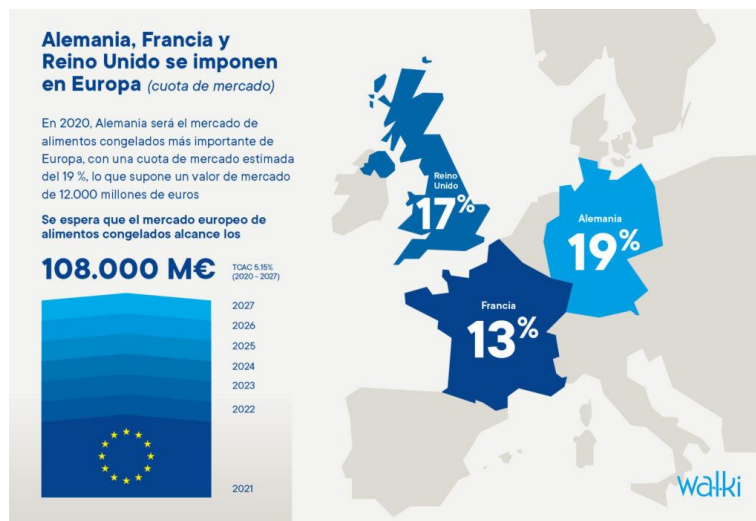


Figura 1-1 Crecimiento del mercado de alimentos congelados. Fuente: <https://plasbel.com/blog/el-furor-por-los-productos-congelados-ha-llegado-para-quequedarse/>

1.1.1. Proceso de congelación

La congelación de los alimentos está formada por cuatro fases (Figura 1-2). Se inicia con una fase de preenfriamiento donde la temperatura se reduce por debajo del punto de congelación (T_f), el cual suele estar alrededor de 0°C , una vez finalizada la fase de preenfriamiento, en el producto subenfriado aparecen de forma espontánea núcleos de hielo que desprenden un calor latente los cuales elevan de nuevo la temperatura hasta el punto de congelación (T_f), éste será el tiempo de nucleación. Esta temperatura se mantiene constante mientras se congela toda el agua produciendo hielo, esta fase se conoce como fase de transición. Finalmente, la temperatura vuelve a descender hasta llegar a la temperatura final de congelación (Otero et al. 2013).

Cuando un producto durante su congelación reduce la temperatura por debajo del punto de congelación decimos que se ha súper congelado o sobreenfriado.

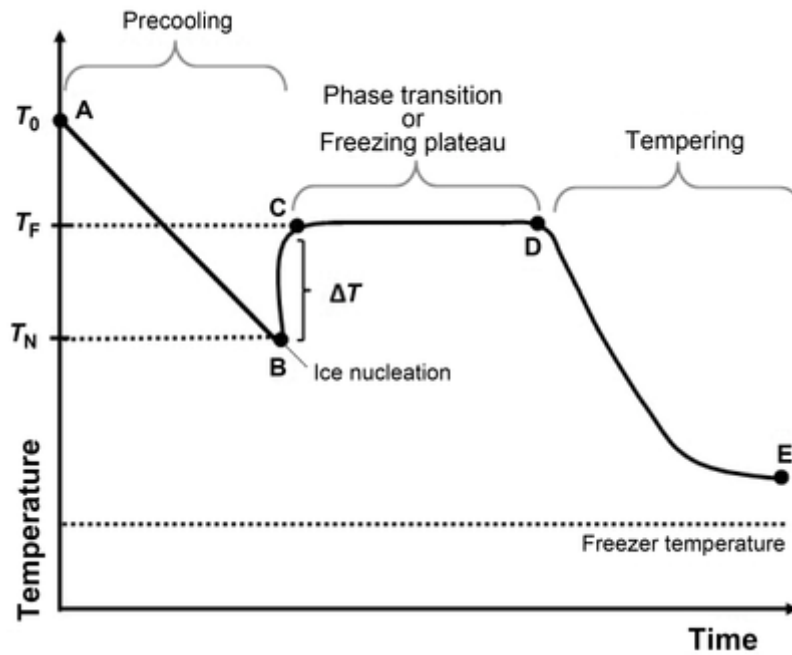


Figura 1-2 Etapas del proceso de congelación. Fuente: Otero et al. (2016)

En este proceso de congelación uno de los factores más determinantes en las propiedades sensoriales del producto es el tamaño de los cristales de hielo que se forman (Figura 1-3). Cuanto más pequeños sean los cristales de hielo que se formen, menos deforman y rompen las paredes de las células y, por tanto, provocan menores daños al producto y mejor calidad organoléptica (Taronja et al. 2015). Para conseguir que estos cristales sean lo más pequeños posibles debemos incrementar la tasa de nucleación (disminuir el tiempo en el que se lleva a cabo la nucleación) y disminuir la velocidad en la que se extrae el calor del sistema (disminuir el tiempo de fase).

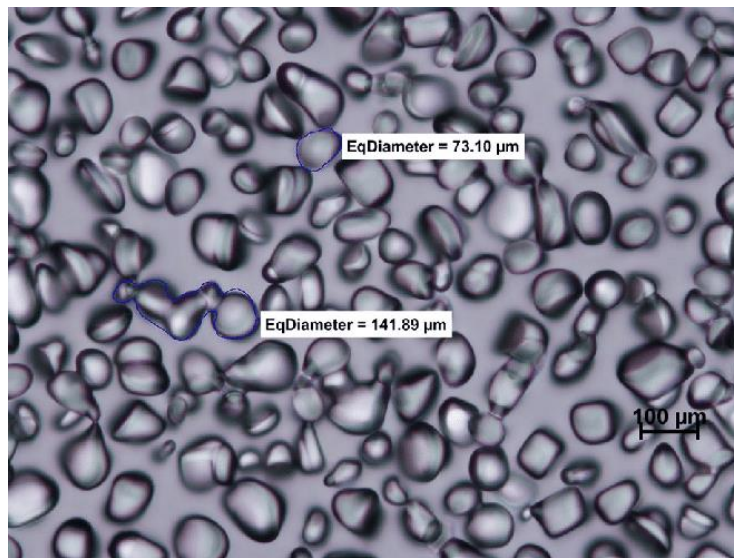


Figura 1-3 Imagen microscópica de cristales de hielo formados en una solución de sacarosa.

Fuente: Kamińska-Dwórznicza et al. (2019).

1.1.2. Sistemas de congelación actuales

Actualmente hay diferentes sistemas de congelación que se están utilizando para la preservación de alimentos, los tres más utilizados son los congeladores mecánicos, los congeladores criogénicos y los congeladores con congelación por chorro de aire (Otero et al. 2013)

- Congeladores mecánicos: Los congeladores mecánicos usan un refrigerante en circulación para conseguir la reducción de la temperatura mediante un intercambio térmico entre el aire y los alimentos (Figura 1-4).

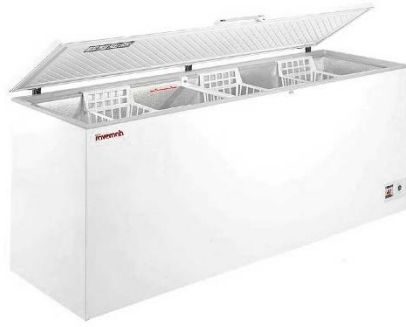


Figura 1-4 Congelador mecánico. Fuente: <https://hosteleria10.com/frio/arcones-congeladores/savemah-arcon-congelador-gran-capacidad-udd-600-bk.html>

- Congeladores criogénicos: Los congeladores criogénicos logran una reducción de la temperatura mediante la aplicación directa de nitrógeno líquido o dióxido de carbono sobre los alimentos (Figura 1-5).



Figura 1-5 Congelador criogénico. Fuente: <https://www.directindustry.es/prod/wuxi-guanya-temperature-refrigeration-technology-co-ltd/product-198970-2005388.html>

- Congeladores por chorro de aire: Los congeladores de chorro de aire dirigen chorros de aire a alta velocidad al producto alimentario, lo que provoca altas presiones (Figura 1-6).



Figura 1-6 Congelador por chorro de aire. Fuente: https://es.made-in-china.com/co_sdecoice/product_Industrial-Air-Blast-Plate-Contact-Freezer-for-Fish-

1.1.3. Problemas de la congelación actual

En los sistemas de congelación que se utilizan actualmente encontramos ciertos inconvenientes que hacen reducir las calidades organolépticas de los alimentos una vez han sido descongelados, la gran mayoría producidos por los cristales de hielo. Los principales son la destrucción celular, la congelación de la capa exterior, la pérdida de humedad y la pérdida de color (Otero et al. 2016).

- Destrucción celular: Los productos a congelar contienen una gran cantidad de agua libre, en el momento de la congelación, ésta se congela produciendo cristales de hielo que crecen aumentando su volumen y destruyendo la estructura de las células contenidas en el producto. Esta destrucción de la estructura celular es lo que provoca las pérdidas por goteo.

- Congelación de la capa exterior: Este problema ocurre sobre todo en métodos criogénicos, los cuales tienden a congelar primero la capa superficial y posteriormente controlar la velocidad de enfriamiento del interior con la transferencia de calor desde la superficie. El principal inconveniente es que debido a los cristales formados en la capa superficial se inhibe esa transferencia de calor, por lo tanto, no permite evitar la expansión del volumen de los cristales de hielo en el interior del producto.

- Pérdida de humedad: En todos los productos a los que se les aplica un método de congelación se observa una pérdida de humedad provocada por la evaporación durante la congelación y por la pérdida por goteo durante la descongelación. La pérdida de humedad reduce el peso del producto por lo que su valor de mercado también se ve reducido, ya que este se vende por peso.

- Pérdida de color: La pérdida de color que encontramos en los productos descongelados viene provocada por dos situaciones, por un lado, por la pérdida por goteo y por otro lado a medida que se van formando los cristales de hielo se produce una concentración de solutos en la fracción sin congelar, esta concentración acelera la oxidación y el oscurecimiento enzimático.

1.1.4. Nuevas formas de conservación de alimentos

Para solucionar los problemas de la congelación y mejorar su calidad organoléptica se proponen diferentes formas de conservación de alimentos, las que tienen más fuerza actualmente son la utilización de ultrasonidos, campos eléctricos y altas presiones (Otero et al. 2013).

La aplicación de ultrasonidos se basa en la idea de acortar el tiempo de congelación reduciendo de esta forma el tamaño de los cristales. Este efecto es debido a la cavitación acústica, que promueve la nucleación del hielo por microburbujas formándose cristales de hielo de un tamaño más pequeño (Zhang et al. 2018).

La aplicación de altas presiones es un sistema de conservación de alimentos en el cual a través de la utilización de grandes presiones hidrostáticas se inhabilitan gran parte de los patógenos de los alimentos (Otero et al. 2013).

El gran inconveniente de los dos métodos anteriores es que son métodos de conservación de alimentos realmente caros.

La aplicación de campos magnéticos tiene por objetivo reducir la temperatura de nucleación y el tiempo de fase aplicando un campo magnético (Otero et al. 2013), ya sea unidireccional, bidireccional o tridimensional. El mecanismo aún no ha sido completamente dilucidado, pero se ha propuesto que el campo magnético genera una reorientación del espín electrónico y del espín nuclear de las moléculas de agua del alimento, de esta forma se producen unos cristales de tamaño más pequeño y más cantidad de ellos, ya que la aplicación del campo magnético induce fuerzas de vibración magnética en las moléculas de agua que evitan la formación temprana de cristales de hielo y su crecimiento, lo cual provoca una reducción de la temperatura de nucleación. De esta misma manera también provoca que la cristalización se realice de forma uniforme en todo el producto (Otero et al. 2013).

Actualmente está surgiendo un nuevo método de congelación llamado congelación isocórica el cual consiste en la modificación que la congelación isobárica tradicional en la que los alimentos se congelan a una presión atmosférica constante. En el caso de la congelación isocórica los alimentos se congelan a un volumen constante, los alimentos se sellan en un recipiente rígido lleno de agua y durante el proceso de congelación el producto en ningún momento se convierte en un bloque de hielo sólido. Los estudios realizados aseguran que se reduce la energía que se utiliza, así como la huella de carbono con este proceso de congelación isocórica, también se indica que se aumenta significativamente la calidad de los alimentos comparado con la congelación tradicional isobárica (Zhao et al. 2021).

1.2. Campo magnético

Un campo magnético es un campo de fuerza creado como consecuencia del movimiento de cargas eléctricas. El campo magnético no se trata de la fuerza en sí sino de un espacio en el que esa fuerza se ejerce como resultado del movimiento de las cargas eléctricas. En él actúan fuerzas sobre partículas cargadas en movimiento, lo que da su carácter vectorial (Figura 1-7) (Quintana et al. 2007).

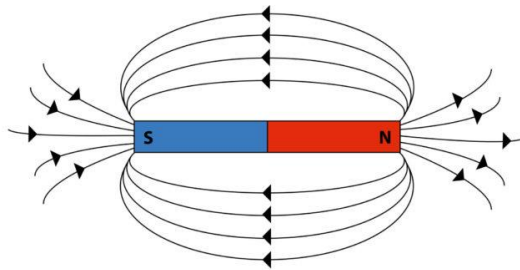


Figura 1-7 Campo magnético generado en un imán. Fuente:

<https://www.caracteristicas.co/campo-magnetico/>

Tal y como podemos observar en la fórmula de Lorentz, ecuación 1-1, una partícula con una carga eléctrica (q) la cual se desplaza a una velocidad (v) en un ángulo (θ) experimenta los efectos de una fuerza que es secante y proporcional tanto a la velocidad (v) como al campo (B) y percibirá una fuerza (F).

$$F = |q|vB \sin \theta \quad (1-1)$$

A través de esta fórmula podemos definir que la magnitud del campo magnético (B) es igual a la fuerza (F) sobre la carga q que se mueve con una velocidad (v) en un ángulo (θ) de la dirección del campo magnético, como se puede observar en la ecuación 1-2.

$$B = \frac{F}{|q|v \sin \theta} \quad (1-2)$$

Los puntos donde se encuentra la mayor densidad de vectores reciben el nombre de polos magnéticos. Los vectores externos del imán siguen la dirección de polo norte a polo sur, por el contrario, los vectores internos lo hacen en la dirección de polo sur a polo norte, éste fenómeno nos da lugar a líneas de campo magnético, las cuales nunca se cruzan entre ellos. La intensidad del campo magnético es proporcional a la densidad de las líneas de campo, a mayor cercanía del polo mayor densidad de líneas, por tanto, en los polos encontraremos la mayor intensidad del campo magnético que se verá reducida a medida que las líneas de campo se alejen.

Los campos magnéticos son el resultado de cargas eléctricas en movimiento. En un magneto permanente estas cargas son los electrones que circulan alrededor del núcleo.

Los electroimanes en cambio son magnetos no permanentes de forma que solo funcionan como tal cuando tienen un flujo de electricidad. Esto es debido a que hay muchas partículas con carga que se desplazan en una corriente.

1.2.1. Tipos de campos magnéticos

Como hemos podido observar en el apartado anterior hay campos magnéticos formados de distintas formas y por lo tanto con diferentes características y comportamientos.

- Según flujo de corriente:
 - Campo magnético estático: Es aquel campo magnético en el cual la magnitud o dirección se mantiene a través del tiempo (Figura 1-8).
 - Campo magnético oscilante: Es aquel campo magnético donde la magnitud o la dirección varían con el tiempo a cierta frecuencia (Figura 1-9).

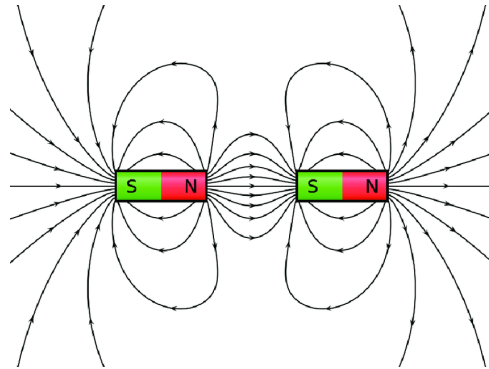


Figura 1-8 Campo magnético estático. Fuente: Romero, D. C. (2012). La física, una odisea en la escalera de Jacob (1st ed.). Universidad Jorge Tadeo Lozano.

<https://doi.org/10.2307/j.ctv23dxc0f>

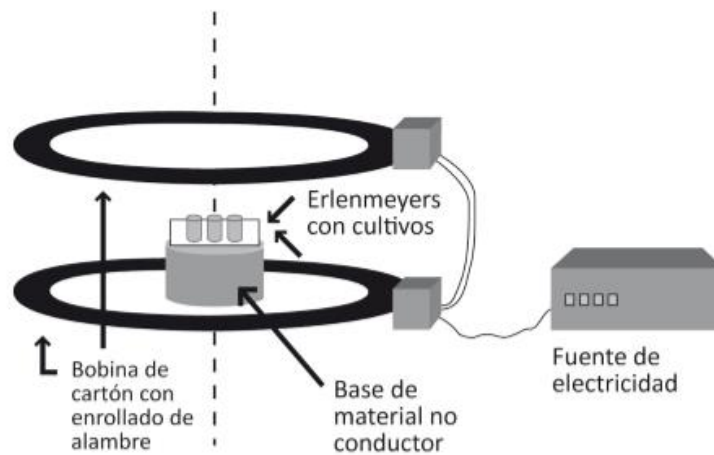


Figura 1-9 Campo magnético oscilante. Fuente:

<http://camposmagneticosyoscilantes.blogspot.com/2016/05/campos-magneticos-campos-oscilantes.html>

- Según fuente de creación:
 - Campos magnéticos provenientes de un imán: Es aquel campo magnético el cual su fuerza viene dada por un imán. Esto es debido a que los imanes tienen la particularidad de poseer un campo magnético permanente creado por el spin de los electrones. También entran dentro de este grupo aquellos cuales la fuerza del campo magnético viene dada por metales magnetizados por medio de un campo magnético externo.

 - Campos magnéticos provenientes de corriente: Es aquel campo magnético el cual su fuerza viene dada por una carga en movimiento. Esto es debido a que una corriente eléctrica es un conjunto de cargas desplazándose por un material conductor, por lo tanto, una corriente creará un campo magnético.

1.2.2. Estudios previos

En años recientes se han realizado diferentes estudios sobre la aplicación de los campos magnéticos en la congelación de alimentos, ya sea de origen vegetal como origen animal. A pesar de todos los estudios realizados por diferentes grupos de investigación hay algunos que indican que claramente hay un efecto significativo sobre la utilización de los campos magnéticos en la congelación (Zhang et al. 2021), pero en cambio hay otros estudios que indican que no han encontrado ningún efecto significativo en la utilización de estos campos magnéticos (Otero et al. 2020). Por lo tanto, hay una gran controversia en si realmente existe dicho efecto significativo que aseguran algunos autores en cualquier campo magnético o tiene que ser en un diseño muy específico. Además de esto algunos autores ponen en duda la reproductibilidad de los experimentos (Otero et al. 2020).

A pesar de todas las controversias comentadas anteriormente existen empresas (Proton Europe SL) que ya comercializan con congeladores que equipan este tipo de tecnología, asegurando a sus compradores que realmente existen dichas mejoras.

Las teorías sobre las que se basan los experimentos realizados son las siguientes:

Durante la congelación del agua, hay un tamaño de cristal crítico después del cual la condición metaestable se rompe y los cristales comienzan a aumentar de tamaño muy rápidamente (Zhang et al. 2021).

En las matrices alimentarias, el agua extracelular se congela primero, provocando una mayor presión osmótica en las paredes celulares, provocando la pérdida de agua y la consiguiente concentración de solutos en el interior de las células. Las concentraciones más altas de soluto provocan una depresión en los puntos de congelación y una congelación desigual en la muestra (Tang et al. 2020).

Reducir la temperatura del agua tanto como sea posible antes de la transición de fase reduce los gradientes de temperatura local que permiten una nucleación rápida y uniforme. Esto se llama sobreenfriamiento, y actualmente se acepta que la tasa de nucleación del hielo es inversamente proporcional a la extensión de sobreenfriamiento (Yun et al. 2021).

Aunque el agua es diamagnética, las moléculas de agua pueden magnetizarse en un campo magnético externo, provocando cambios en su distribución y polarización (Tang et al. 2020). En los

campos magnéticos permanentes (PMF) se aplican las fuerzas de Lorentz sobre cada dipolo, en dirección opuesta, separándolos y debilitando el enlace de hidrógeno. Este debilitamiento de los enlaces de hidrógeno intra-clúster provoca la ruptura de grandes clústeres en otros más pequeños (Tang et al. 2020).

También se propone que los campos magnéticos aplicados al agua congelada producen vibraciones magnéticas en las moléculas de agua que mejora la transferencia de calor y culmina en sobreenfriamiento, lo que significa que la cantidad de agua que se convierte en hielo en la nucleación aumenta simultáneamente, provocando una disminución del tamaño de los cristales de agua y menor tiempo de congelación. De cualquier manera, sobreenfriamiento provoca un menor daño a los tejidos de la muestra de alimentos y mejora las propiedades sensoriales (Otero et al. 2020).

Los campos magnéticos también afectan propiedades como el índice de refracción, la conductividad y la tensión superficial y viscosidad (Zhang et al. 2021)

Los congeladores comerciales con campos magnéticos oscilantes funcionan de 0,1 a 1,5 mT hasta 50 Hz (Otero et al, 2020).

El tiempo de transición de fase se define como el tiempo entre nucleación y punto final de congelación (Otero et al. 2020). El punto final de la congelación es la suma del tiempo de transición de fase y el tiempo de nucleación (Zhang et al. 2021).

Otro parámetro común es la pérdida por goteo, definida como la diferencia de peso entre antes y después de la descongelación en relación con el peso previo a la descongelación (Tang et al. 2020)

En los estudios previos sobre la utilización de esta tecnología los más destacados son los que podemos encontrar en la Tabla 1.

Tabla 1 Estudios previos sobre la congelación asistida por campos magnéticos

Estudio	Metodología	Resultados
Abbie. et al. 2021	Se realiza la congelación con cuatro tratamientos diferentes, uno con un campo magnético, otro con un campo eléctrico, otro con una combinación de ambos y finalmente uno control. Se utilizan tamaños de muestra más grande que en estudios previos.	No se encuentran resultados significativos en la utilización de los campos magnéticos, eléctricos ni en la combinación ambos. No se descarta que se pueda optimizar si se utilizan cajas de campo con congeladores más eficaces.
Hu et al. 2021	Se investigan los efectos sinérgicos del campo electrostático de bajo voltaje combinado con la descongelación de alta humedad en la calidad de los filetes de cerdo.	Los resultados indican que el tratamiento con campo electrostático de bajo voltaje podría acortar el tiempo de descongelación y promover el WHC del músculo, mientras la alta humedad desempeña un papel importante en la estabilidad del color de los músculos descongelados.

Kang et al. 2021	Se realiza la congelación aplicando un campo magnético oscilante (OMF) con una intensidad de 50 mT para la conservación por sobreenfriamiento de rodajas de mango recién cortadas, conservándose a -5 °C durante 7 días.	Los resultados obtenidos dictaminaron que la calidad de las muestras sobreenfriadas estaba más cerca de las muestras frescas en términos de pérdida de peso y textura que utilizando otros métodos convencionales. También se destaca la necesidad de ajustar los OMF a los productos utilizados.
Otero et al. 2020	Se realizan experimentos con agua pura y una solución de NaCl al 0,9%, congelando en un OMF de 0,8 mT y diferentes frecuencias, desde 20 hasta 2000 Hz.	Los resultados revelan que la frecuencia de los OMF débiles no tiene efecto sobre la cinética de sobreenfriamiento o congelación de las muestras. También muestra que la aplicación de un OMF independientemente de su frecuencia no mejora el proceso de congelación convencional.
Otero et al. 2022	Se realizan experimentos con patatas, congelando en un PMF de 40-55 mT, 150-200 mT y una muestra control.	Los resultados obtenidos muestran que no hay ninguna diferencia significativa en el sobreenfriamiento, la cinética de congelación o la calidad de la patata entre las muestras sometidas a PMF y el control.

Puza et al. 2019	Se investiga la congelación mediante OMF en cubos de mango congelados a -30 °C durante 35 min con OMF de 0 %, 30 %, 50 %, 75 % y 100 %, luego se descongelaron a 25 °C durante otros 70 min.	Los resultados obtenidos muestran que en los mangos se encontraron roturas en la pared celular, disminución de la firmeza y pérdida por goteo. Tanto en la muestra control como en las que se aplica OMF, por lo tanto, no existen mejoras en la utilización de OMF.
Tang et al. 2020	Se investiga la congelación asistida con campos magnéticos (MFAF) aplicando un PMF desde 0 a 20 mT y un OMF desde 0 a 2 mT.	Los resultados muestran que la temperatura de congelación aumenta con OMF. El tiempo de transición de fase disminuye con PMF, pero aumenta con OMF, este factor puede estar relacionado con el calor liberado por las bobinas. En ambos campos magnéticos se reduce la pérdida de nutrientes en los alimentos y los cristales de hielo formados son más pequeños y uniformes.
Wang et al. 2021	Se investigan los efectos de los MFAF en el puré de aguacate. Se realizan experimentos congelando muestras de puré de aguacate con un campo magnético de 4 mT a 50 Hz, aplicando éste en diferentes dimensiones.	Los resultados hallados indican una mejora en las cualidades sensoriales y textura en los alimentos en los que se ha aplicado el campo magnético. También se muestra que en cuantas más direcciones es aplicado el campo magnético mayor eficacia tiene.

Wei et al. 2021	Se investigan los efectos de los MFAF en la calidad de la tilapia. Se realizan experimentos congelando muestras de tilapia utilizando PMF con una intensidad de 0 G, 5 G, 10 G, 15 G, 20 G y 30 G.	Los resultados muestran que los MFAF tienen un efecto positivo en la velocidad de congelación, la migración del agua, la microestructura y otros aspectos. La intensidad más significativa es la de 15 G.
Wei et al. 2021	Se investigan los efectos de los MFAF en la refrigeración para mejorar la calidad en la tilapia congelada. Se realizan experimentos con OMF de 10 G, 20 G, 30 G, 40 G y 50 G durante un tratamiento de congelación a baja temperatura.	Los resultados muestran que cuando se aplica un OMF la calidad de la tilapia congelada mejora significativamente y se reduce la separación de agua y el daño residual.
Xanthakis et al. 2014	Se realizan experimentos en un proceso de congelación de alimentos asistido por microondas con diferentes intensidades 0 %, 40 %, 50 % y 60 % en muestras de lomo de cerdo.	Los resultados del experimento muestran que la aplicación de microondas provoca una disminución oscilante de la temperatura y un impacto significativo en el proceso de cristalización, reduciéndose el tamaño de los cristales un 62 % en comparación a las muestras congeladas en un proceso de congelación convencional.
Zhang et al. 2021	Se investiga el efecto de los OMF. Para ello en los experimentos se congelan muestras de 3,5 mL de agua pura y líquido de tejido de pepino en OMF generado por un par de bobinas Helmholtz.	Los resultados muestran que el tratamiento con OMF reduce significativamente la temperatura de congelación, el tiempo de transición de fase y el tiempo de templado.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo de final de grado es determinar si existe un efecto de la aplicación de campos magnéticos en la cinética de congelación de alimentos.

2.2. Objetivos específicos

- Estudiar el efecto de diferentes intensidades de campos magnéticos (2 y 4 mT) sobre el tiempo de nucleación, tiempo de transición de fase y tiempo final de congelación en las muestras con agua, zumo y suero de tomate.
- Estudiar la influencia del tipo de campo magnético (oscilante y estático) sobre las muestras con agua, zumo y suero de tomate.
- Valorar la implementación de maquinaria con esta tecnología en la industria.

3. Materiales y métodos

3.1. Materiales




Para la realización de los experimentos y la preparación de las muestras se utilizaron los siguientes materiales:




- Agua destilada
- Agua Milli-Q
- Tomate en rama
- Poliestireno expandido
- Tupperware con tubos de ensayo sellados con silicona
- Glicol Repsol RP718U92
- Tubos de ensayo
- Aceite de silicona
- Micropipeta
- Vaso de precipitados (100mL)

3.2. Equipo




Para la realización de los experimentos se ha utilizado el equipo indicado en la Tabla 2.

Tabla 2 Equipos utilizados para realizar los experimentos

Especificaciones	Equipo
<p>Sensor de temperatura DATA LOGGER176 T4 (España)</p> <p>Modelo 0572 1764</p> <p>Rango de medición entre -200 °C y + 1000 °C</p> <p>Intervalo de medición desde 1 s hasta 24 h</p> <p>Exactitud ± 0.3 °C</p>	
<p>Sonda termopar tipo K</p> <p>Fibra de vidrio</p> <p>Rango de -50 °C hasta +400 °C</p>	
<p>Baño de agua MEMMERT (Alemania)</p> <p>Modelo WNB 14</p> <p>Rango de temperaturas entre +10 °C y 95 °C</p> <p>Volumen 14 l</p>	

Especificaciones	Equipo
<p>Refrigerador HUBER (Alemania)</p> <p>Modelo Huber CC-405 con controlador CC-1</p> <p>Rango de temperatura entre -40 °C hasta +200 °C</p> <p>Constancia de temperatura ± 0.02 °C</p> <p>Potencia frigorífica a -20 °C es 0.45 kW</p>	
<p>Medidor de radiación PCE (Alemania)</p> <p>Modelo PCE-MFM 3000</p> <p>Rango de medición entre 0 y 300 mT</p> <p>Resolución 0.01 mT</p> <p>Precisión de $\pm 5\%$ + 10 dígitos</p> <p>Cuota de medición 1 s</p>	
<p>Regulador de voltaje NTC tech (EEUU)</p> <p>Modelo Chuan Hsin SRV-10</p> <p>Rango de 0 a 240 V</p>	

Especificaciones	Equipo
<p>Cutter CASTELLVALL (España)</p> <p>Modelo CUT-35</p> <p>Capacidad 35 L</p> <p>Velocidad motor cuchillas 2000 – 4000 r.p.m</p>	 A stainless steel industrial cutter machine with a hopper on top and a collection tray on the side. It has a control panel with several buttons and a power switch.
<p>Tamiz ROBOTCOUPE (Francia)</p> <p>Modelo C80</p> <p>Velocidad de 1500 r.p.m</p> <p>Rendimiento 60 kg/h</p> <p>Perforaciones de 1 mm</p> <p>Potencia 650 W</p>	 A stainless steel industrial sifter machine with a hopper on top and a collection tray on the side. It has a control panel with a green and a red button.
<p>Molino coloidal FRYMAKORUMA (Suiza)</p> <p>Modelo MZ-100</p> <p>Potencia 5.5 kW</p> <p>Diámetro rotor 100 mm</p>	 A stainless steel industrial colloid mill with a hopper on top and a collection tray on the side. It has a control panel with a green and a red button.

Especificaciones	Equipo
<p>Centrífuga EPPENDORF (Alemania)</p> <p>Modelo 5430R</p> <p>Rango de velocidad 100 – 17500 r.p.m</p> <p>Rango volumétrico 300 mL</p>	 A white and grey Eppendorf 5430R centrifuge with a digital display and control buttons on the front panel.
<p>Imanes</p>	 A photograph of the centrifuge rotor assembly with three sample tubes (two red caps, one purple cap) inserted into the rotor. The rotor is mounted on a white base.
<p>Bobina de cobre</p>	 A photograph of a large, cylindrical copper coil mounted on a white table. The coil is connected to electrical equipment, including a power supply and a control unit.

3.3. Metodología

3.3.1. Campos magnéticos utilizados

En el estudio sobre el efecto de los campos magnéticos en la congelación se han realizado los experimentos aplicando dos campos magnéticos diferentes. Primero los experimentos se han realizado sobre un campo magnético proveniente de corriente formando un campo magnético oscilante, el cual consistía en una bobina de cobre a la cual se le suministraba corriente eléctrica a 50Hz aplicando diferentes voltajes con un regulador de voltaje (Chuan Hsin SRV-10 0-240V), de esta forma se podía regular la fuerza del campo magnético, en nuestro caso se realizaron los experimentos en 0, 2 mT y 4 mT. A posterior se han realizado los experimentos sobre un campo magnético proveniente de un imán formando un campo magnético estático, el cual consistía en dos imanes estándar separados a 20 cm y 25 cm para generar una fuerza de 2 mT y 4mT respectivamente, también se realizaron sin ningún tipo de imán para obtener la muestra control.

Las intensidades de campo magnético seleccionadas han sido las de 2 mT y 4 mT debido a que a pesar de que los refrigeradores comerciales utilizan originalmente intensidades menores a 1 mT, tras una revisión bibliográfica, se ha visto que los artículos que utilizan estas intensidades recomiendan probar intensidades mayores (Otero et al. 2020). En la revisión bibliográfica también se ha visto que con equipos similares a los utilizados en el experimento se utilizaban intensidades entre 1 y 10 mT pero tan solo en campos oscilantes (Otero et al. 2020).

3.3.2. Preparación de las muestras

Para la elaboración de la muestra de agua destilada primeramente se vertieron unos 20 mL en un vaso de precipitados de 100 ml. Utilizamos una micropipeta graduada a 2 ml para obtener la muestra de agua destilada y la vertimos en un tubo de ensayo (Figura 3-6).

Para la preparación de la muestra de agua Milli-Q se vertieron unos 20ml en un vaso de precipitados de 100ml. Utilizamos una micropipeta graduada a 2ml para obtener la muestra de agua Milli-Q y la vertimos en un tubo de ensayo.

Para la elaboración de el zumo de tomate o puré de tomate se utilizó tomate en rama y se molió con una cutter (model CUT-35; Castellvall, Spain), luego se pasó por un tamiz (model C80; Robotcoupe, France) y finalmente por un molino coloidal (model MZ-100; FrymaKoruma AG, Rheinfelden, Switzerland).

Para la preparación del suero de tomate se utilizó el zumo de tomate del punto anterior y se centrifuga (model 5430R; Eppendorf, Germany) a 7000 rpm a 4 °C durante 20 min.

3.3.3. Experimento 1: Congelación con campo magnético oscilante

3.3.3.1. Agua destilada

El primer experimento llevado a cabo lo realizamos con agua destilada, aplicando un campo magnético oscilante de 2 y 4 mT.

Una vez preparadas las muestras de agua destilada se dejaron calentando hasta los 25 °C en el baño de agua WNB 14 (Figura 3-1) para que todas las muestras empezasen a la misma temperatura. Mientras las muestras se calentaban hasta los 25 °C se encendió el refrigerador Huber CC-405 y se esperó hasta que la temperatura del refrigerador alcanzó los -20 °C. Paralelamente, se conectó el Data Logger (Figura 3-2) al ordenador para cargar la configuración de lectura deseada, que consistía en realizar la lectura cada segundo y las unidades de salida, en este caso °C. Las unidades de tiempo utilizadas en el experimento son las proporcionadas por el Data Logger. Una vez las muestras alcanzaron los 25 °C se insertaba la sonda de temperatura en la muestra, después de esto se introdujo el tubo de ensayo en otro tubo de ensayo el cual contenía aceite de silicona para de esta manera disminuir el efecto de la vibración del líquido circulando y aislar más la muestra de la temperatura ambiente, además de esto el aceite de silicona disminuye la fuerza boyante y hace que el tubo interior no flote. Este segundo tubo estaba sellado con silicona a un tupper (Figura 3-4) por el cual circulaba Glicol Repsol RP718U92 a -20 °C, enfriado por el congelador. Se fue comprobando en el Data Logger la temperatura de la muestra hasta que, una vez pasada la super congelación, la temperatura aumenta hasta los -5 °C. Una vez se llegó a la temperatura final establecida (-5 °C) se retiró el tubo de ensayo que contiene la muestra y se extrajo la sonda de temperatura.



Figura 3-1 Baño de agua WNB 14



Figura 3-2 Data Logger con sensor de

Una vez realizada la muestra control se realizó una muestra a 2mT. Para crear el campo magnético se utilizó el Regulador de voltaje (Chuan Hsin SRV-10 0-240V) (Figura 3-5), aplicando una corriente sobre la bobina de cobre exterior (Figura 3-3), la cual formaba el campo magnético. Éste se midió con un Gaussímetro PCE-MFM 3000.



Figura 3-3 Campo magnético oscilante

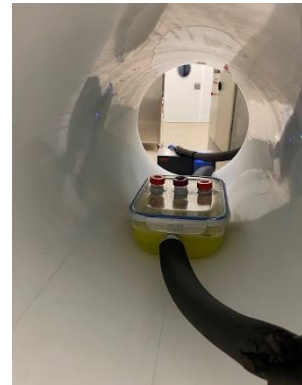


Figura 3-4 Tupperware con los tubos de las muestras en el interior de la bobina de campo magnético oscilante

Posteriormente se realizó una muestra a 4mT. Para crear el campo magnético se utilizó el Regulador de voltaje, aplicando una corriente sobre la bobina de cobre exterior, la cual formaba el campo magnético. Éste se midió con un Gaussímetro PCE-MFM 3000.

Se realizaron 13 repeticiones para cada uno de los campos magnéticos.

Para la realización de las muestras se siguió ese orden ya que el regulador de voltaje se sobrecalentaba y no se podían realizar muchas repeticiones a altos voltajes. Por lo tanto, se realizó una repetición a cada uno de los campos magnéticos y posteriormente se volvió a empezar desde el control.



Figura 3-5 Regulador de voltaje Chuan Hsin SRV-10 0-240V

Una vez terminados los experimentos se conectó el Data Logger al ordenador y se exportaron los datos obtenidos a una tabla de Excel.

Una vez obtenidas todas las muestras necesarias se hizo un análisis de datos.

Para los siguientes experimentos se implementó una pequeña mejora que consistía en la utilización de un tapón de poliestireno expandido (Figura 3-7) que se insertó en el tubo de ensayo en el que estaba la muestra y la sonda de temperatura, el objetivo del cual fue reducir la movilidad durante el experimento de la sonda de temperatura para de esta manera conseguir resultados menos variables y aumentar la reproductibilidad del experimento.

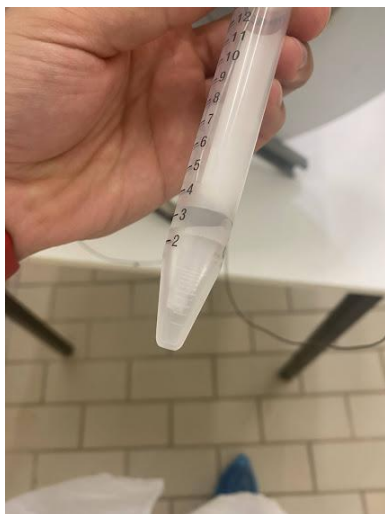


Figura 3-6 Muestra de agua destilada

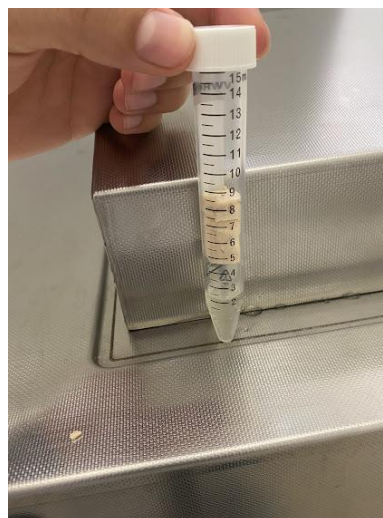


Figura 3-7 Muestra de agua destilada con tapón de poliestireno

3.3.3.2. Agua Milli-Q

El segundo experimento llevado a cabo se realizó con agua Milli-Q, la cual consiste en un agua que ha pasado por un tratamiento de purificación, por lo tanto, hablamos de agua ultrapura. Los procedimientos aplicados para el experimento son los mismos que los realizados para el agua destilada incluyendo la mejora de el tapón de poliestireno expandido. En este caso se realizaron 10 repeticiones para cada uno de los campos magnéticos.

3.3.3.3. Zumo de tomate

El tercer experimento llevado a cabo se realizó con zumo de tomate. Los procedimientos aplicados para el experimento son los mismos que los realizados para el agua destilada incluyendo la mejora de el tapón de poliestireno expandido. En este caso se realizaron 12 repeticiones para la muestra control y 6 repeticiones para cada uno de los campos magnéticos.

3.3.3.4. Suero de tomate

El cuarto experimento llevado a cabo se realizó con suero de tomate. Los procedimientos aplicados para el experimento son los mismos que los realizados para el agua destilada incluyendo la mejora de el tapón de poliestireno expandido. En este caso se realizaron 15 repeticiones para la muestra control y 8 repeticiones para cada uno de los campos magnéticos.

3.3.4. Experimento 2: Congelación con campo magnético estático

3.3.4.1. Agua Milli-Q

En este experimento llevado a cabo lo realizamos con agua Milli-Q, aplicando un campo magnético estático de 2 y 4 mT.

Una vez preparadas las muestras de agua Milli-Q se dejan calentando hasta los 25 °C en el baño de agua WNB 14. Mientras las muestras se calentaban hasta los 25 °C se encendió el refrigerador Huber CC-405 y se esperó hasta que la temperatura del refrigerador alcanzó los -20 °C. Paralelamente, se conectó el Data Logger al ordenador para cargar la configuración de lectura deseada, que consistía en realizar la lectura cada segundo y las unidades de salida, en este caso °C. Las unidades de tiempo utilizadas en el experimento son las proporcionadas por el Data Logger. Una vez las muestras alcanzaron los 25 °C se insertaba la sonda de temperatura en la muestra, utilizando un tapón de poliestireno expandido en el tubo de ensayo para reducir la movilidad de la sonda, después de esto se introdujo el tubo de ensayo en otro tubo de ensayo el cual contenía aceite de silicona para de esta manera disminuir el efecto de la vibración del líquido circulando y aislar más la muestra de la temperatura ambiente, además de esto el aceite de silicona disminuye la fuerza boyante y hace que el tubo interior no flote. Este segundo tubo estaba sellado con silicona a un tupper por el cual circulaba Glicol Repsol RP718U92 a -20 °C. Se fue comprobando en el Data Logger la temperatura de la muestra hasta que, una vez pasada la super congelación, la temperatura aumenta hasta los -5 °C. Una vez se llegó a la temperatura final establecida (-5 °C) se retiró el tubo de ensayo que contiene la muestra y se extrajo la sonda de temperatura.

Una vez realizadas todas las muestras control se realizaron las muestras a 2mT. Para crear el campo magnético se utilizaron dos imanes convencionales a una distancia de 20 cm, los cuales formaban

el campo magnético, en este caso estático (Figura 3-8). Éste se midió con un Gaussímetro PCE-MFM 3000.



Figura 3-8 Campo magnético estático 2 mT

Posteriormente se realizaron las muestras a 4mT. Para crear el campo magnético se utilizaron dos imanes convencionales a una distancia de 25 cm, los cuales formaban el campo magnético, en este caso estático (Figura 3-9). Éste se midió con un Gaussímetro PCE-MFM 3000.



Figura 3-9 Campo magnético estático 4 mT

En las muestras se obtuvieron por orden de campo magnético, primeramente, el control, luego las de 2mT y finalmente las de 4mT, ya que en este caso no había problemas con la sobrecarga del equipo y así no había que estar constantemente moviendo los imanes, lo que podría provocar pequeñas variaciones en el campo magnético. Se realizaron 15 repeticiones para la muestra control y 9 repeticiones para cada uno de los campos magnéticos.

Una vez terminados los experimentos se conectó el Data Logger al ordenador y se exportaron los datos obtenidos a una tabla de Excel.

Una vez obtenidas todas las muestras necesarias se hizo un análisis de datos.

3.3.4.2. Zumo de tomate

El siguiente experimento llevado a cabo se realizó con zumo de tomate. Los procedimientos aplicados para el experimento son los mismos que los realizados para el agua Milli-Q. Se realizaron 12 repeticiones para la muestra control y 9 repeticiones para cada uno de los campos magnéticos.

3.3.4.3. Suero de tomate

El último experimento llevado a cabo se realizó con suero de tomate. Los procedimientos aplicados para el experimento son los mismos que los realizados para el agua Milli-Q. Se realizaron 12 repeticiones para la muestra control y 9 repeticiones para cada uno de los campos magnéticos.

3.3.5. Parámetros de estudio

En los experimentos realizados se analizaron los parámetros más relevantes en la formación de cristales de hielo durante el proceso de congelación.

El primer parámetro analizado fue el tiempo de nucleación. El tiempo de nucleación es el tiempo que tarda la muestra en producir los cristales de hielo, en otras palabras, es cuando se produce el sobreenfriamiento en la muestra y la temperatura asciende repentinamente hasta la temperatura de congelación (T_f). Es importante analizar el tiempo de nucleación ya que cuanto menor es este tiempo de nucleación menor es el tamaño de los cristales de hielo (Yun et al. 2021).

El siguiente parámetro analizado fue el tiempo final de congelación. El tiempo final de congelación es el tiempo total que tarda el producto hasta llegar a la temperatura final de congelación. En este caso consideramos la temperatura final de congelación $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Finalmente, el último parámetro analizado es el tiempo de transición de fase. El tiempo de transición de fase es el tiempo que tarda la muestra, una vez se ha sobreenfriado, a llegar al tiempo final de congelación (Otero et al. 2020). El tiempo de transición de fase es clave en la formación de cristales de hielo, ya que cuanto menor sea el tiempo de transición de fase menos expansión de los cristales de hielo tenemos en nuestra muestra.

3.3.6. Estadística descriptiva y análisis estadísticos

Para el estudio estadístico de los resultados obtenidos de los experimentos se usó el Software Minitab v.19.

Para el análisis estadístico se realizó primeramente una prueba de igualdad de varianzas ($\alpha=0.05$) de los parámetros de cada una de las muestras para comprobar que todas las varianzas no fuesen significativamente diferentes y de esta forma elegir el método estadístico más adecuado para analizar cada una de los parámetros. A continuación, en los parámetros de las muestras que no presentaron diferencias significativas entre sus varianzas, se realizó un ANOVA de un factor ($\alpha=0.05$) y posteriormente un test de Tukey ($\alpha=0.05$) para observar si había diferencias significativas entre las muestras y poderlas clasificar en grupos. Por otro lado, en el caso de los parámetros que se observaron diferencias significativas entre varianzas se realizó una prueba de Welch ($\alpha=0.05$) y posteriormente un test de Games-Howel ($\alpha=0.05$) para observar si había diferencias significativas entre las muestras y poderlas clasificar en grupos.

El método estadístico ANOVA consiste en un análisis de varianza entre las medias de dos o más grupos, la cual compara las medias de las variables respuesta en los diferentes niveles de los factores.

La prueba de Welch es un método estadístico que consiste en la comparación de las medias de dos o más grupos, asumiendo unas varianzas desiguales.

El test de Tukey es un método estadístico que tiene como fin comparar las medias individuales provenientes de un análisis de varianza de varias muestras sometidas a tratamientos distintos, para de esta manera clasificarlas en grupos en función de su igualdad.

El test de Games-Howell es un método estadístico que tiene como fin comparar las medias individuales provenientes de una prueba de Welch, en el test de Games-Howell clasificamos las diferentes medias en diferentes grupos en función de su igualdad.

4. Resultados y Discusión

4.1. Experimento 1: Campo magnético oscilante

4.1.1. Agua destilada

En la Tabla 3 adjunta se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico descriptivo de las muestras de agua destilada.

Tabla 3 Estadística descriptiva del agua destilada

	Campo (mT)	N	Media	Error	Desv.Est.	Varianza	Suma de cuadrados	Mínimo	Mediana	Máximo
Nucleation time (s)	0	13	728,8	77,8	280,7	78779,5	7849714	278	732	1051
	2	13	765,3	84,5	304,6	92760,7	8727175	324	797	1213
	4	13	786,4	75,3	271,4	73645,8	8922959	357	843	1239
Extent of supercooling (°C)	0	13	-10,408	0,606	2,185	4,776	1465,47	-13,2	-10,7	-5,8
	2	13	-10,646	0,621	2,239	5,014	1533,6	-14,3	-11,1	-6,1
	4	13	-10,869	0,508	1,83	3,351	1576,03	-14,5	-11	-7,6
Phase transition time (s)	0	13	698,8	46,6	168,1	28247,6	6687989	483	669	1031
	2	13	666	36,6	132	17431,5	5975406	420	688	929
	4	13	662,7	24	86,6	7499,9	5799093	524	698	797
End point of freezing (s)	0	13	1427,6	69,2	249,6	62304,1	27242763	995	1451	1732
	2	13	1431,3	73	263,3	69331,6	27464321	1049	1435	1884
	4	13	1449,1	77,6	279,6	78189,2	28235982	1034	1451	1975

4.1.1.1. Tiempo de nucleación

Tabla 4 ANOVA del tiempo de nucleación

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	22095	11047	0,14	0,874
Error	36	2942232	81729		
Total	38	2964327			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media	Agrupación
4	13	786,4 A	
2	13	765,3 A	
0	13	728,8 A	

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

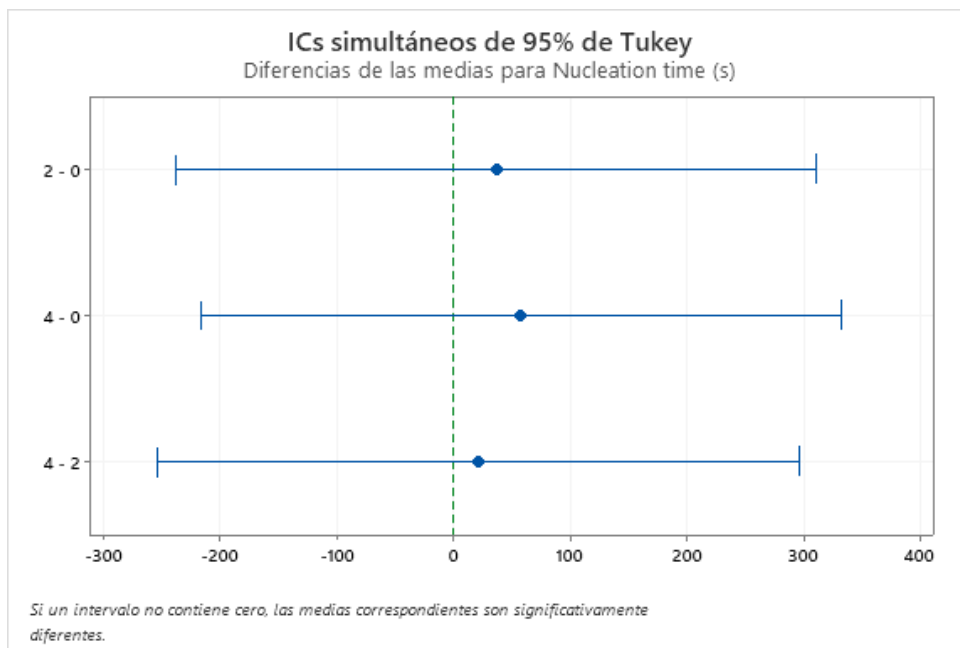


Figura 4-1 Test de Tukey para el tiempo de nucleación

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 4) y posterior comprobación con el test Tukey (Figura 4-1), no existen diferencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo de nucleación en la utilización de los campos magnéticos oscilantes en agua destilada.

4.1.1.2. Tiempo final de congelación

Tabla 5 ANOVA para el tiempo final de congelación

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	3423	1712	0,02	0,976
Error	36	2517899	69942		
Total	38	2521322			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT) N Media Agrupación

4	13	1449,1	A
2	13	1431,3	A
0	13	1427,6	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

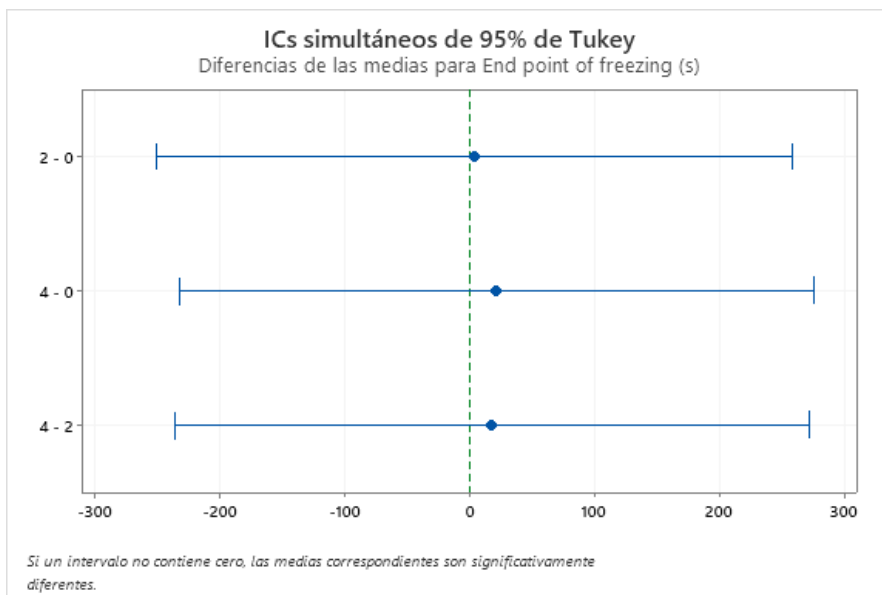


Figura 4-2 Test de Tukey para el tiempo final de congelación

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 5) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-2), no existen diferencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo final de congelación en la utilización de los campos magnéticos oscilantes en agua destilada.

4.1.1.3. Tiempo de transición de fase

Tabla 6 ANOVA para el tiempo de transición de fase

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	10387	5193	0,29	0,748
Error	36	638148	17726		
Total	38	648535			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT) N Media Agrupación

0	13	698,8 A
2	13	666,0 A
4	13	662,7 A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

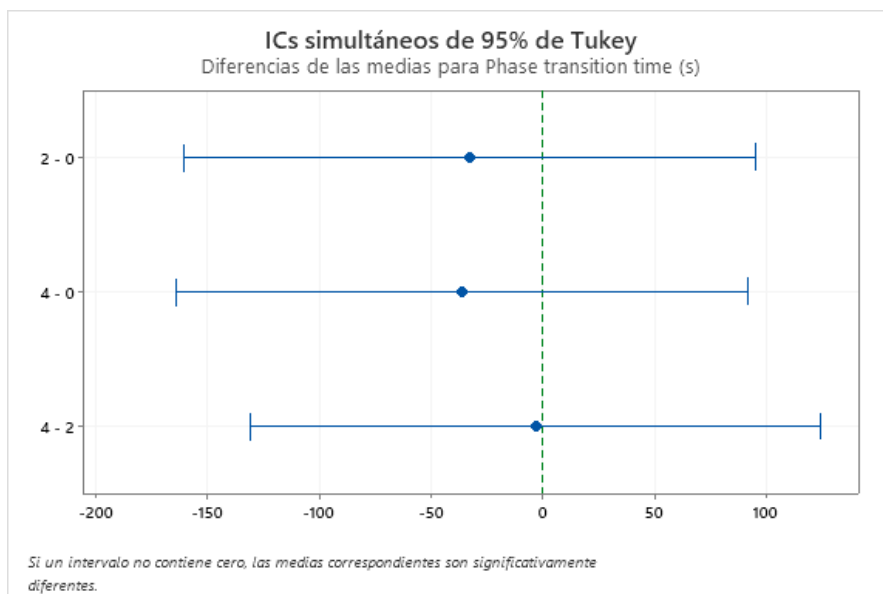


Figura 4-3 Test de Tukey para el tiempo de transición de fase

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 6) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-3), no existen diferencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo de transición de fase en la utilización de los campos magnéticos oscilantes en agua destilada.

4.1.2. Agua Milli-Q

En la Tabla 7 adjunta se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico descriptivo de las muestras de agua Milli-Q.

Tabla 7 Estadística descriptiva del agua Milli-Q

	Campo (mT)	N	Media	Error	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
Nucleation time (s)	0	10	616,2	36,5	115,3	13289,5	365	801
	2	10	730	76,9	243,1	59104	489	1318
	4	10	774,2	64	202,3	40926,4	529	1254
Extent of supercooling (°C)	0	10	-9,79	0,744	2,353	5,537	-11,7	-3,9
	2	10	-10,39	0,58	1,833	3,361	-13,4	-8,3
	4	10	-11,4	0,495	1,564	2,447	-14	-9
End point of freezing (s)	0	10	1509,6	31,4	99,2	9832,3	1362	1625
	2	10	1850	158	501	250860	1340	2708
	4	10	1615,8	68,4	216,2	46726,6	1303	2079
Phase transition time (s)	0	10	893,4	43,1	136,4	18616,7	741	1200
	2	10	1120	126	398	158207	736	2085
	4	10	841,6	29,1	92,1	8476,5	649	990

4.1.2.1. Tiempo de nucleación

Tabla 8 ANOVA para el tiempo de nucleación

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Ajust. MC	Ajust. Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	132894	66447	1,76	0,191
Error	27	1019879	37773		
Total	29	1152773			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media	Agrupación
4	10	774,2 A	
2	10	730,0 A	
0	10	616,2 A	

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

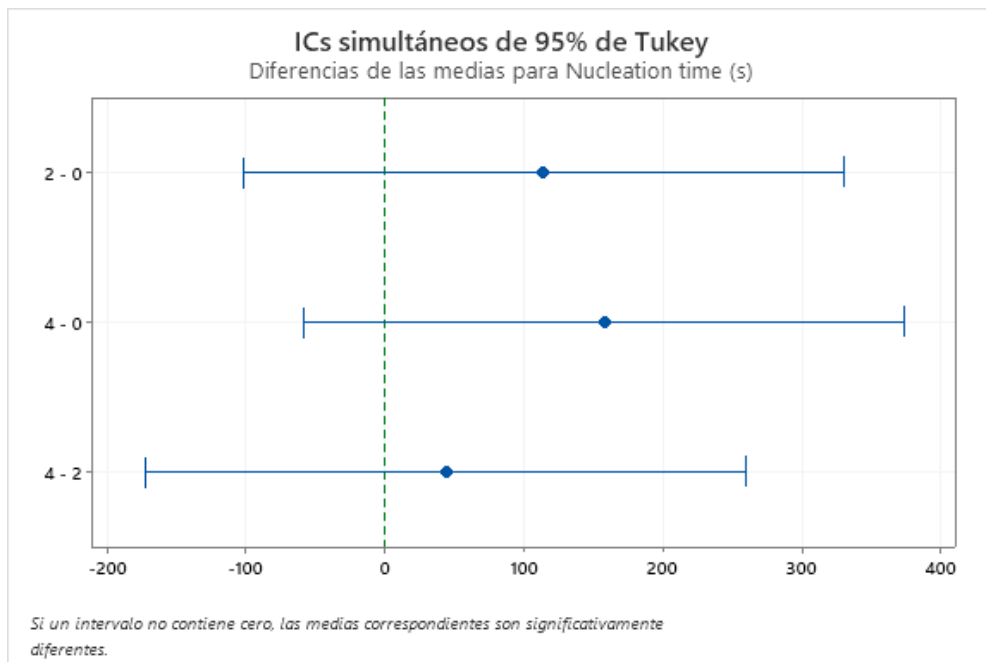


Figura 4-4 Test de Tukey para el tiempo de nucleación

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 8) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-4), no existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo de nucleación en la utilización de los campos magnéticos oscilantes en agua Milli-Q.

4.1.2.2. Tiempo final de congelación

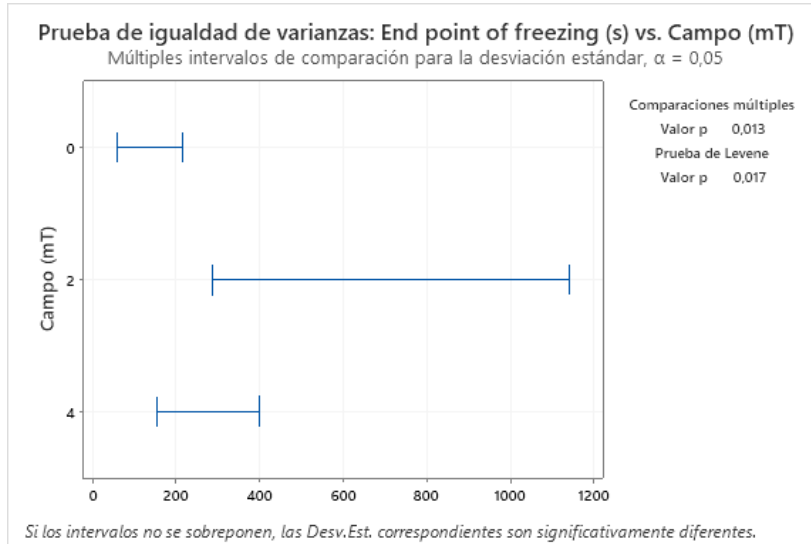


Figura 4-5 Prueba de igualdad de varianzas

Tabla 9 Prueba de Welch para el tiempo final de congelación

Prueba de Welch

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	14,3736	2,86	0,090

Agrupar información utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media	Agrupación
2	10	1850	A
4	10	1615,8	A
0	10	1509,6	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

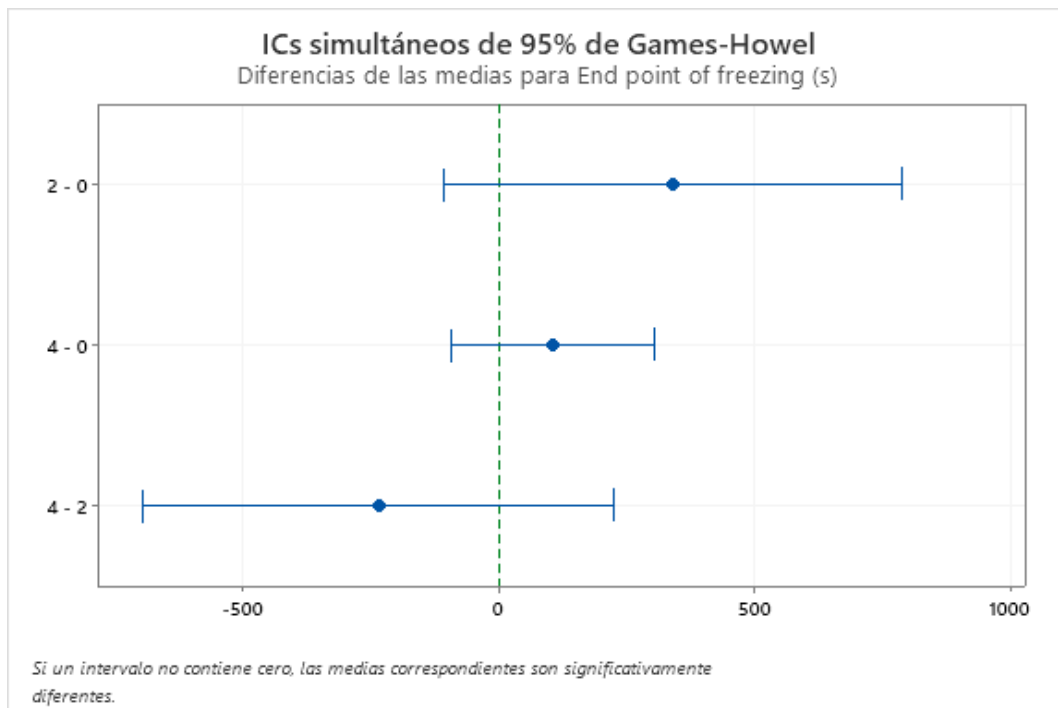


Figura 4-6 Test de Games-Howell para el tiempo final de congelación

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante una prueba de Welch (Tabla 9), en este caso se utiliza una prueba de Welch ya que hay diferencias significativas entre las varianzas (Figura 4-5), y posterior comprobación con test de Games-Howell (Figura 4-6), no existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo final de congelación en la utilización de los campos magnéticos oscilantes en agua Milli-Q.

4.1.2.3. Tiempo de transición de fase

Tabla 10 ANOVA para el tiempo de transición de fase

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	437785	218892	3,54	0,043
Error	27	1667702	61767		
Total	29	2105487			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media	Agrupación
2	10	1120	A
0	10	893,4	B
4	10	841,6	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

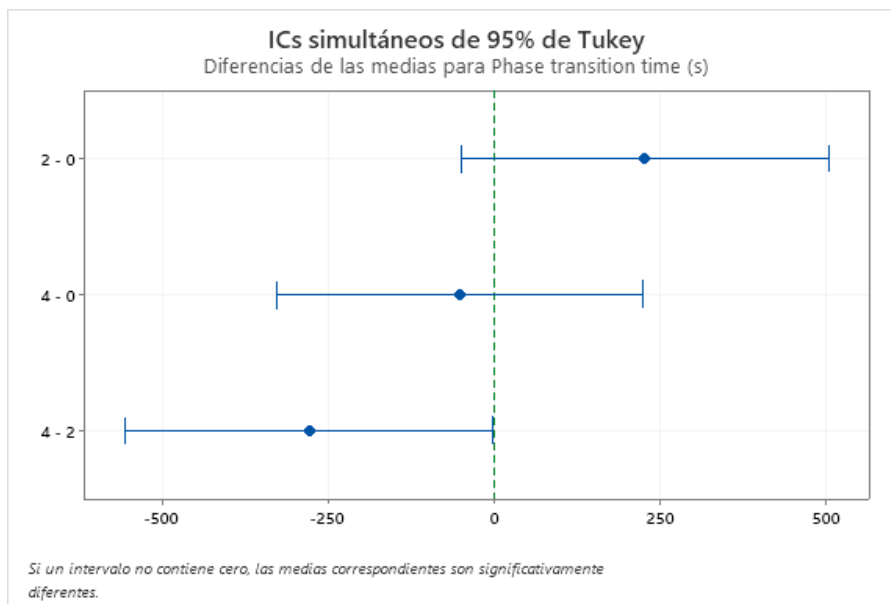


Figura 4-7 Test de Tukey para el tiempo de transición de fase

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 10) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-7), existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo de transición de fase en la utilización de los campos magnéticos oscilantes en agua Milli-Q y aceptar la alternativa, la cual nos dice que existen diferencias significativas para el tiempo de transición de fase.

4.1.3. Zumo de tomate

En la Tabla 11 adjunta se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico descriptivo de las muestras de zumo de tomate.

Tabla 11 Estadística descriptiva del zumo de tomate

	Campo (mT)	N	Media	Error	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
Nucleation time (s)	0	12	399,3	29,9	103,7	10756,9	162	528
	2	6	454	71,4	174,9	30597,6	281	644
	4	6	440,7	73	178,8	31966,7	271	732
Nucleation temperature (°C)	0	12	-8,317	0,89	3,083	9,503	-12,6	-2,8
	2	6	-8	1,52	3,73	13,9	-11,6	-2,6
	4	6	-8,45	1,31	3,2	10,25	-11,8	-4,1
End point of freezing (s)	0	12	1131,5	60,6	209,9	44063,5	848	1591
	2	6	1209	43,6	106,7	11390	1082	1339
	4	6	1143,7	83,4	204,2	41711,5	808	1389
Phase transition time (s)	0	12	732,3	62	214,8	46130,8	378	1214
	2	6	755	72,4	177,4	31485,2	515	1013
	4	6	703	65,1	159,4	25419,6	537	990

4.1.3.1. Tiempo de nucleación

Tabla 12 ANOVA para el tiempo de nucleación

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Ajust. MC	Ajust. Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	14405	7203	0,35	0,708
Error	21	431148	20531		
Total	23	445553			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media	Agrupación
2 mT oscilante	6	454,0 A	
4 mT oscilante	6	440,7 A	
0 mT	12	399,3 A	

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

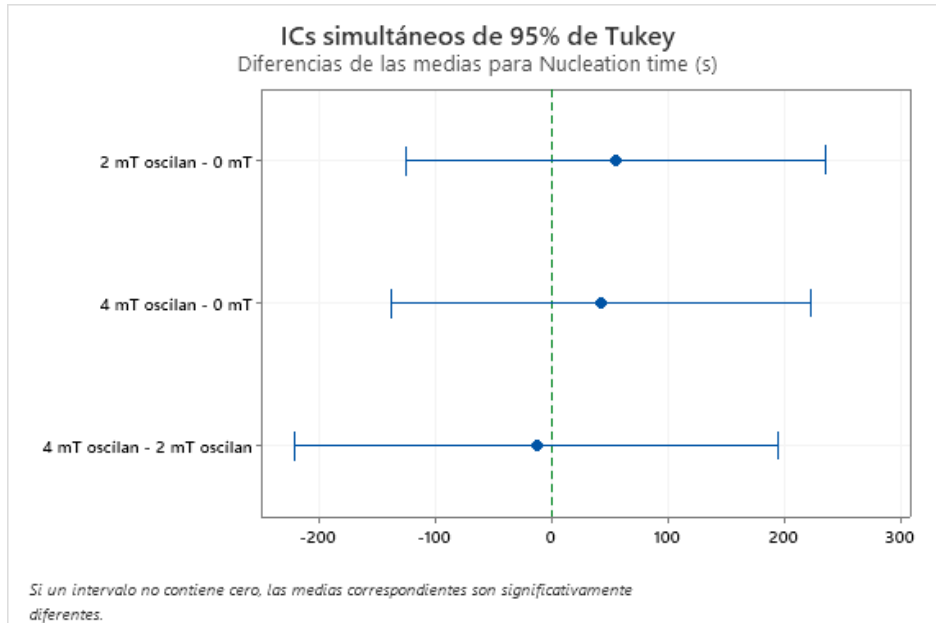


Figura 4-8 Test de Tukey para el tiempo de nucleación

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 12) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-8), no existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo de nucleación en la utilización de los campos magnéticos oscilantes en zumo de tomate.

4.1.3.2. Tiempo final de congelación

Tabla 13 ANOVA para el tiempo final de congelación

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	24866	12433	0,35	0,710
Error	21	750206	35724		
Total	23	775072			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media Agrupación
2 mT oscilante	6	1209,0 A
4 mT oscilante	6	1143,7 A
0 mT	12	1131,5 A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

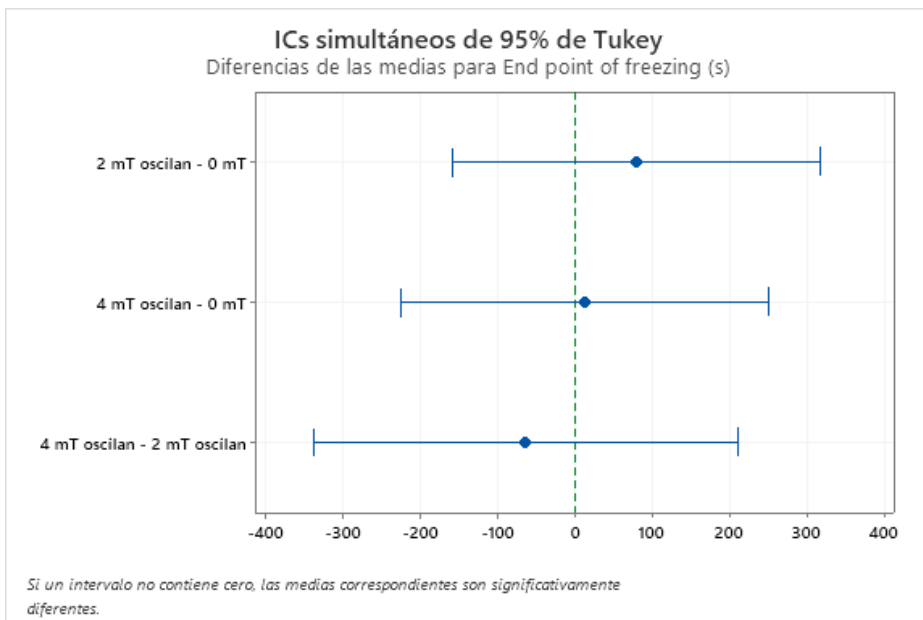


Figura 4-9 Test de Tukey para el tiempo final de congelación

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 13) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-9), no existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo final de congelación en la utilización de los campos magnéticos oscilantes en zumo de tomate.

4.1.3.3. Tiempo de transición de fase

Tabla 14 ANOVA para el tiempo de transición de fase

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	8175	4088	0,11	0,898
Error	21	791962	37712		
Total	23	800138			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media Agrupación
2 mT oscilante	6	755,0 A
0 mT	12	732,3 A
4 mT oscilante	6	703,0 A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

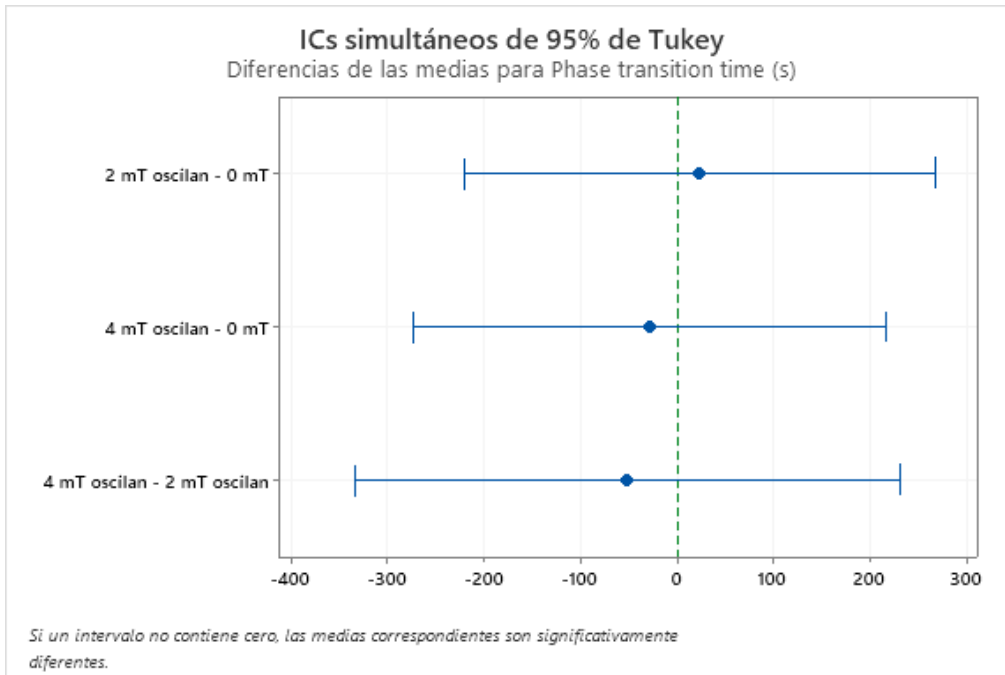


Figura 4-10 Test de Tukey para el tiempo de transición de fase

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 14) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-10), no existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo de transición de fase en la utilización de los campos magnéticos oscilantes en zumo de tomate.

4.1.4. Suero de tomate

En la Tabla 15 adjunta se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico descriptivo de las muestras de suero de tomate.

Tabla 15 Estadística descriptiva del suero de tomate

	Campo (mT)	N	Media	Error	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
Nucleation time (s)	0	15	707,9	62,2	241	58104,8	286	1135
	2	8	764,3	90,3	255,5	65285,1	396	1210
	4	7	835	129	342	116688	480	1466
Nucleation temperature (°C)	0	15	-11,22	0,741	2,87	8,237	-14,9	-5,4
	2	8	-11,063	0,829	2,345	5,5	-14,8	-7,1
	4	7	-11,37	1,12	2,96	8,74	-15,7	-6,4
End point of freezing (s)	0	15	1499,8	79,4	307,6	94633,9	1070	2303
	2	8	1492	104	293	85739	929	1856
	4	7	1594	162	429	183645	1242	2502
Phase transition time (s)	0	15	791,9	59,4	229,9	52869,5	609	1492
	2	8	727,4	44,4	125,6	15784,8	533	869
	4	7	758,9	56,3	149	22199,5	631	1036

4.1.4.1. Tiempo de nucleación

Tabla 16 ANOVA para el tiempo de nucleación

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	78795	39398	0,54	0,589
Error	27	1970592	72985		
Total	29	2049387			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT) N Media Agrupación

4 mT oscilante 7 835 A

2 mT oscilante 8 764,3 A

0 mT 15 707,9 A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

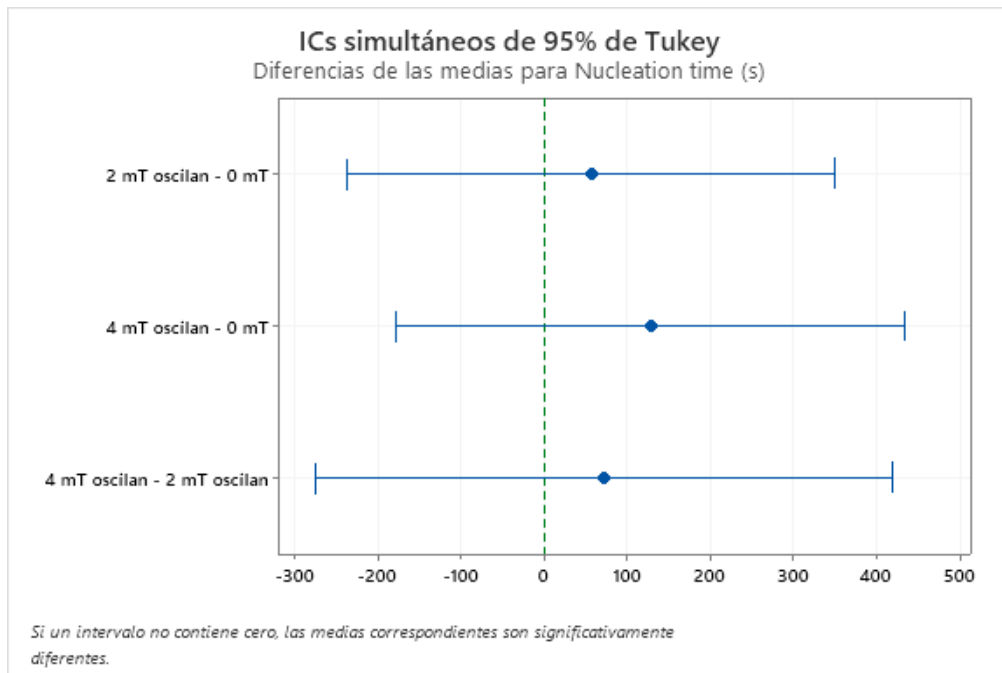


Figura 4-11 Test de Tukey para el tiempo de nucleación

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 16) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-11), no existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo de nucleación en la utilización de los campos magnéticos oscilantes en suero de tomate.

4.1.4.2. Tiempo final de congelación

Tabla 17 ANOVA para el tiempo final de congelación

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	50889	25444	0,23	0,798
Error	27	3026916	112108		
Total	29	3077805			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media	Agrupación
4 mT oscilante	7	1594 A	
0 mT	15	1499,8 A	
2 mT oscilante	8	1492 A	

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

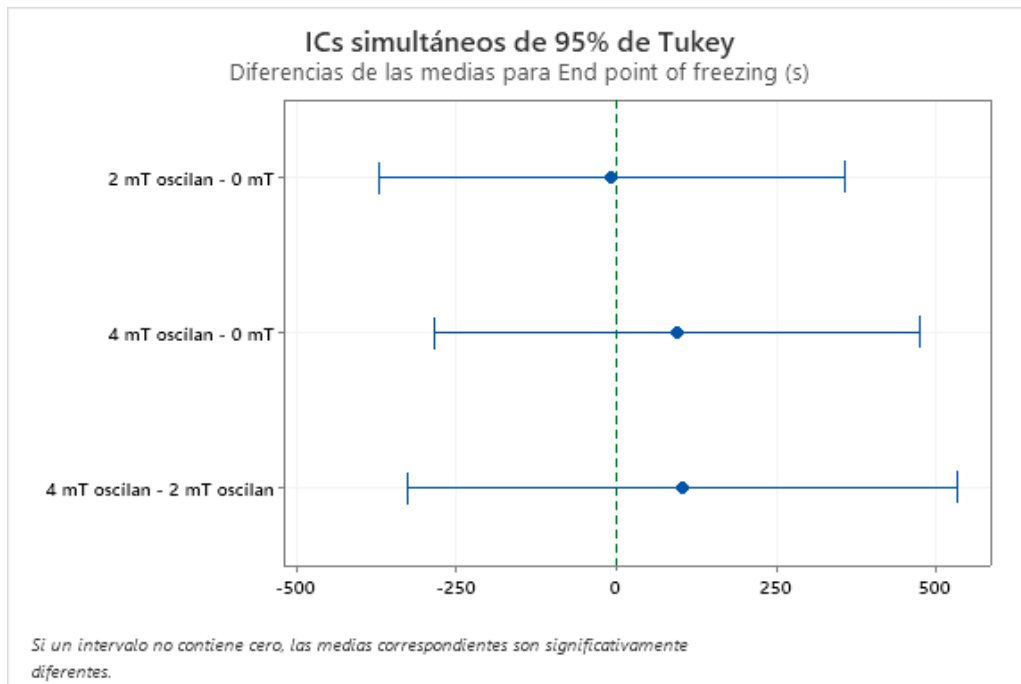


Figura 4-12 Test de Tukey para el tiempo final de congelación

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 17) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-12), no existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo final de congelación en la utilización de los campos magnéticos oscilantes en suero de tomate.

4.1.4.3. Tiempo de transición de fase

Tabla 18 ANOVA para el tiempo de transición de fase

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	22350	11175	0,31	0,738
Error	27	983864	36439		
Total	29	1006214			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media	Agrupación
0 mT	15	791,9 A	
4 mT oscilante	7	758,9 A	
2 mT oscilante	8	727,4 A	

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

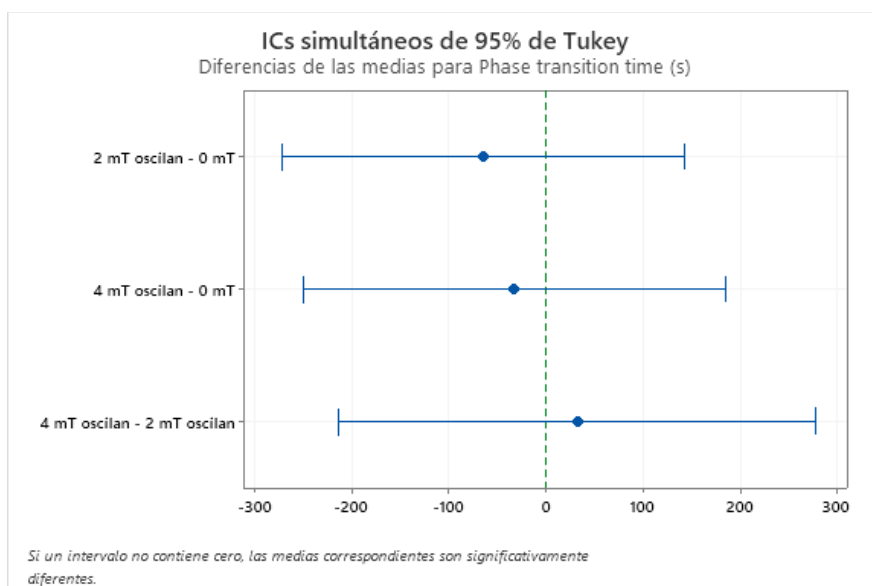


Figura 4-13 Test de Tukey para el tiempo de transición de fase

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 18) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-13), no existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo de transición de fase en la utilización de los campos magnéticos oscilantes en suero de tomate.

4.2. Experimento 2: Campo magnético estático

4.2.1. Agua Milli-Q

En la Tabla 19 adjunta se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico descriptivo de las muestras de agua Milli-Q.

Tabla 19 Estadística descriptiva del agua Milli-Q

	Campo (mT)	N	Media	Error	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
Nucleation time (s)	0	15	578,9	30	116,3	13527,1	384	801
	2	9	712,6	26,5	79,5	6315,8	587	826
	4	9	534,7	14,8	44,4	1969,7	448	599
Nucleation temperature (°C)	0	15	-10,447	0,32	1,238	1,533	-12,3	-8,9
	2	9	-13,456	0,168	0,505	0,255	-14	-12,4
	4	9	-10,1	0,235	0,705	0,497	-11,6	-9,3
End point of freezing (s)	0	15	1383,1	45,2	175,2	30694,1	1121	1625
	2	9	1331,9	43,4	130,3	16988,1	1156	1508
	4	9	1234	35,2	105,7	11177	1024	1390
Phase transition time (s)	0	15	804,1	29	112,4	12632,1	578	984
	2	9	619,3	23,5	70,6	4985,2	509	717
	4	9	699,3	33,6	100,8	10153,5	510	811

4.2.1.1. Tiempo de nucleación

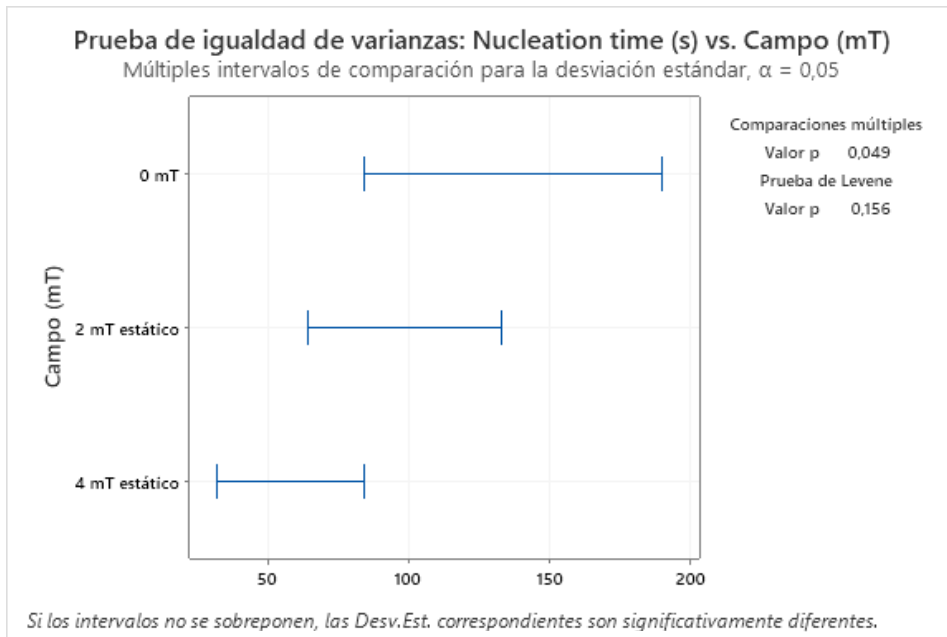


Figura 4-14 Prueba de igualdad de varianzas

Tabla 20 Prueba de Welch para el tiempo de nucleación

Prueba de Welch

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	18,1838	16,58	0,000

Agrupar información utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media	Agrupación
2 mT estático	9	712,6	A
0 mT	15	578,9	B
4 mT estático	9	534,7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

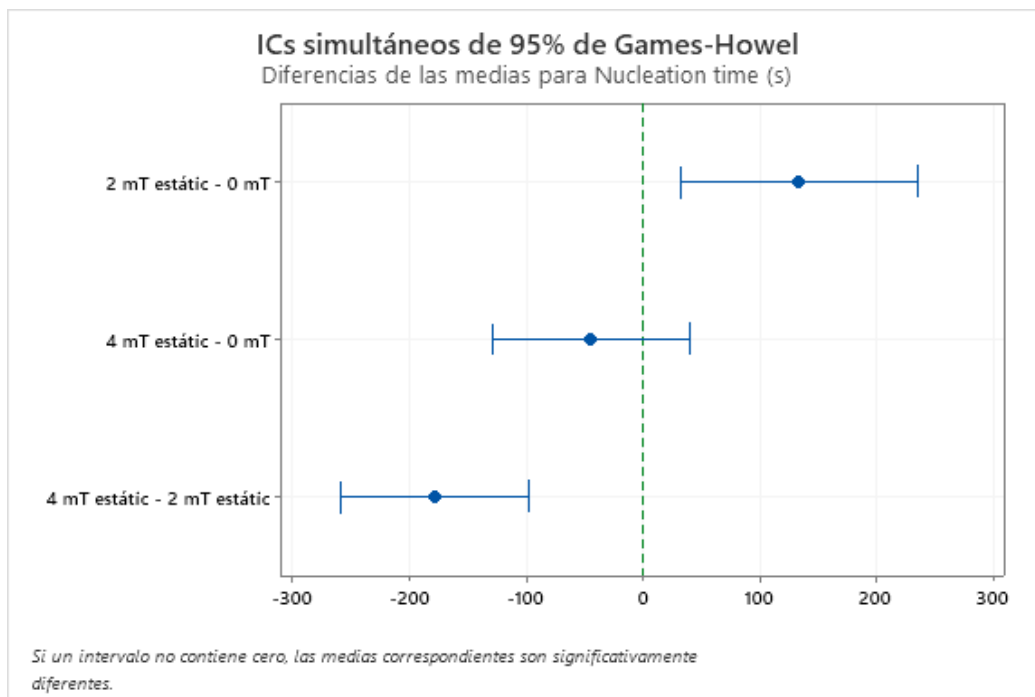


Figura 4-15 Test de Games-Howell para el tiempo de nucleación

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante una prueba de Welch (Tabla 20) y posterior comprobación con test de Games-Howell (Figura 4-15), el cual se utiliza debido a que hay diferencias significativas entre las varianzas (Figura 4-14), existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo de nucleación en la utilización de los campos magnéticos estáticos en agua Milli-Q y aceptar la alternativa que dice que si existen diferencias significativas. Como podemos observar en la Figura 4-13 hay dos grupos con diferencias significativas desde el punto de vista estadístico, uno la muestra control y la de 4 mT y otro grupo para la muestra de 2 mT.

4.2.1.2. Tiempo final de congelación

Tabla 21 ANOVA para el tiempo de

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	125138	62569	2,87	0,073
Error	30	655038	21835		
Total	32	780176			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT) N Media Agrupación

0 mT	15	1383,1 A
2 mT estático	9	1331,9 A
4 mT estático	9	1234,0 A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

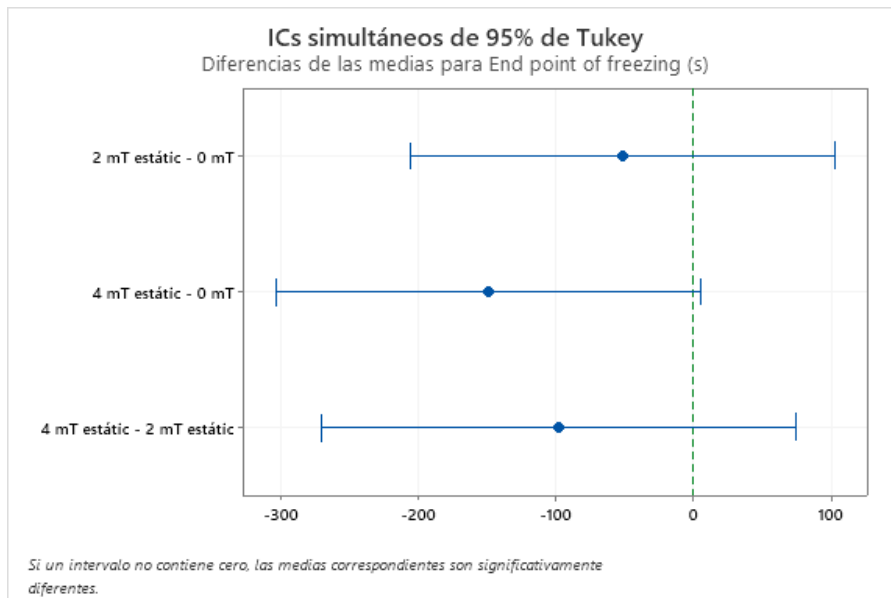


Figura 4-16 Test de Tukey para el tiempo final de congelación

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 21) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-16), no existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo final de congelación en la utilización de los campos magnéticos estáticos en agua Milli-Q.

4.2.1.3. Tiempo de transición de fase

Tabla 22 ANOVA para el tiempo de transición de fase

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	200349	100174	10,09	0,000
Error	30	297960	9932		
Total	32	498308			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media	Agrupación
0 mT	15	804,1 A	
4 mT estático	9	699,3	B
2 mT estático	9	619,3	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

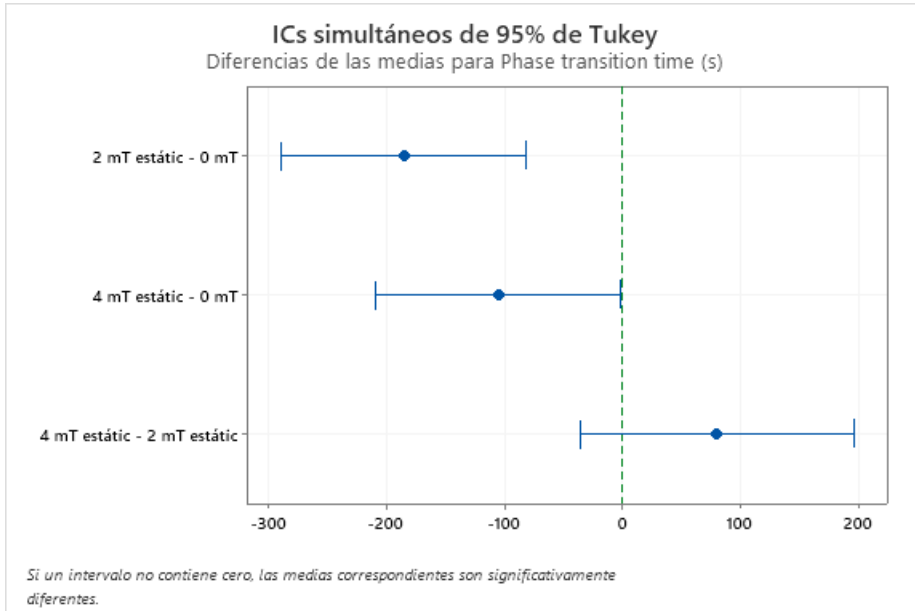


Figura 4-17 Test de Tukey para el tiempo de transición de fase

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 22) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-17), existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo de transición de fase en la utilización de los campos magnéticos estáticos en agua Milli-Q y aceptar la alternativa que dice que si existen diferencias significativas. Como podemos observar en la Figura 4-15 hay dos grupos con diferencias significativas desde el punto de vista estadístico, uno la muestra control y otro grupo para las muestras de 2 mT y 4 mT.

4.2.2. Zumo de tomate

En la Tabla 23 adjunta se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico descriptivo de las muestras de zumo de tomate.

Tabla 23 Estadística descriptiva del zumo de tomate

	Campo (mT)	N	Media	Error	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
Nucleation time (s)	0	12	399,3	29,9	103,7	10756,9	162	528
	2	7	263,1	23,5	62,1	3852,5	170	336
	4	9	340,2	22,7	68,2	4657,4	248	453
Nucleation temperature (°C)	0	12	-8,317	0,89	3,083	9,503	-12,6	-2,8
	2	7	-6,743	0,762	2,016	4,066	-8,4	-3
	4	9	-7,678	0,665	1,994	3,974	-10,4	-4,3
End point of freezing (s)	0	12	1131,5	60,6	209,9	44063,5	848	1591
	2	7	892,7	36,6	96,8	9372,2	745	1025
	4	9	1010,1	38,4	115,2	13269,6	787	1140
Phase transition time (s)	0	12	732,3	62	214,8	46130,8	378	1214
	2	7	629,6	26,1	69,1	4773,6	482	689
	4	9	669,9	42,8	128,4	16495,1	465	816

4.2.2.1. Tiempo de nucleación

Tabla 24 ANOVA para el tiempo de nucleación

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Ajust. MC	Ajust. Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	82383	41191	5,76	0,009
Error	25	178701	7148		
Total	27	261083			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media	Agrupación
0 mT	12	399,3	A
4 mT estático	9	340,2	B
2 mT estático	7	263,1	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

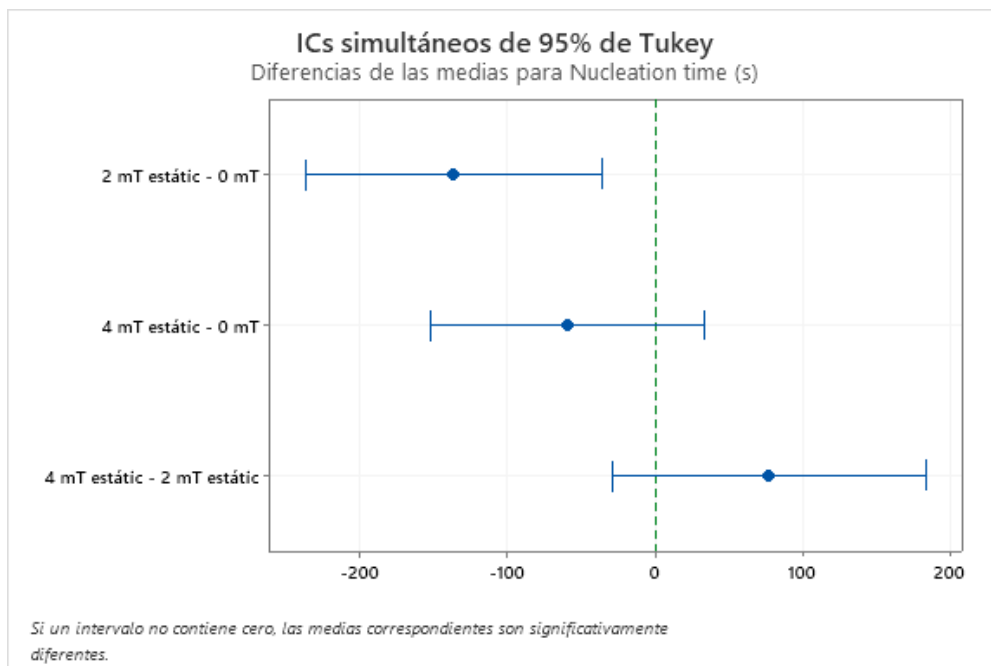


Figura 4-18 Test de Tukey para el tiempo de nucleación

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 24) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-18), existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo de nucleación en la utilización de los campos magnéticos estáticos en zumo de tomate y aceptar la alternativa que dice que si existen diferencias significativas. Como podemos observar en la Figura 4-16 hay dos grupos con diferencias significativas desde el punto de vista estadístico, uno la muestra control y la de 4 mT y otro grupo para las muestras de 2 mT y 4 mT, lo que significa que encontramos diferencia entre la muestra control y la de 2 mT.

4.2.2.2. Tiempo final de congelación

Tabla 25 ANOVA para el tiempo final de congelación

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	258901	129451	5,00	0,015
Error	25	647089	25884		
Total	27	905991			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media	Agrupación
0 mT	12	1131,5	A
4 mT estático	9	1010,1	A B
2 mT estático	7	892,7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

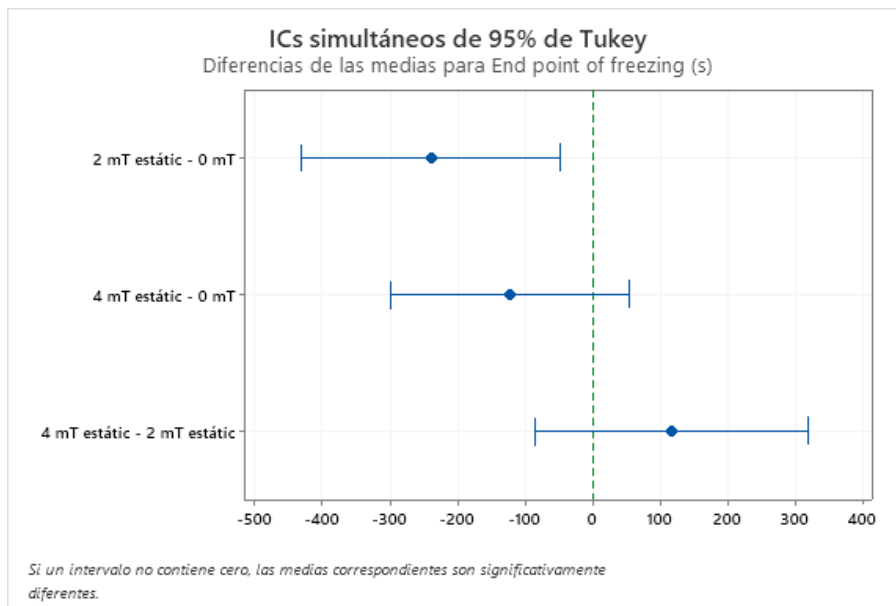


Figura 4-19 Test de Tukey para tiempo final de congelación

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 25) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-19), existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo de congelación en la utilización de los campos magnéticos estáticos en zumo de tomate y aceptar la alternativa que dice que si existen diferencias significativas. Como podemos observar en la Figura 4-16 hay dos grupos

con diferencias significativas desde el punto de vista estadístico, uno la muestra control y la de 4 mT y otro grupo para las muestras de 2 mT y 4 mT, lo que significa que encontramos diferencia entre la muestra control y la de 2 mT.

4.2.2.3. Tiempo de transición de fase

Tabla 26 ANOVA para el tiempo de transición de fase

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	50286	25143	0,94	0,404
Error	25	668041	26722		
Total	27	718327			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media	Agrupación
0 mT	12	732,3 A	
4 mT estático	9	669,9 A	
2 mT estático	7	629,6 A	

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

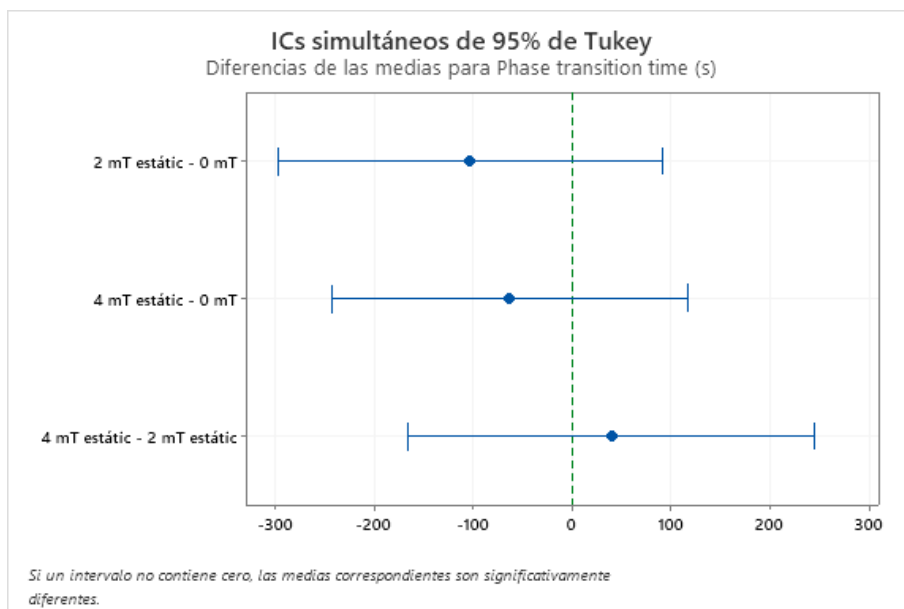


Figura 4-20 Test de Tukey para el tiempo de transición de fase

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 26) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-20), no existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo final de transición de fase en la utilización de los campos magnéticos estáticos en zumo de tomate.

4.2.3. Suero de tomate

En la Tabla 27 adjunta se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico descriptivo de las muestras de suero de tomate.

Tabla 27 Estadística descriptiva del suero de tomate

	Campo (mT)	N	Media	Error	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
Nucleation time (s)	0	15	707,9	62,2	241	58104,8	286	1135
	2	8	640	35	99	9800,3	432	744
	4	9	695,2	40,5	121,4	14731,4	503	887
Nucleation temperature (°C)	0	15	-11,22	0,741	2,87	8,237	-14,9	-5,4
	2	8	-12,863	0,363	1,027	1,054	-13,9	-10,5
	4	9	-12,733	0,377	1,13	1,277	-14,1	-10,7
End point of freezing (s)	0	15	1499,8	79,4	307,6	94633,9	1070	2303
	2	8	1259	43,7	123,7	15291,7	1000	1369
	4	9	1340,1	25,9	77,7	6040,1	1234	1486
Phase transition time (s)	0	15	791,9	59,4	229,9	52869,5	609	1492
	2	8	619	19,5	55	3028,9	524	708
	4	9	644,9	26,3	79	6238,6	505	776

4.2.3.1. Tiempo de nucleación

Tabla 28 ANOVA para el tiempo de nucleación

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	24808	12404	0,36	0,701
Error	29	999921	34480		
Total	31	1024729			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT) N Media Agrupación

0 mT 15 707,9 A

4 mT estático 9 695,2 A

2 mT estático 8 640,0 A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

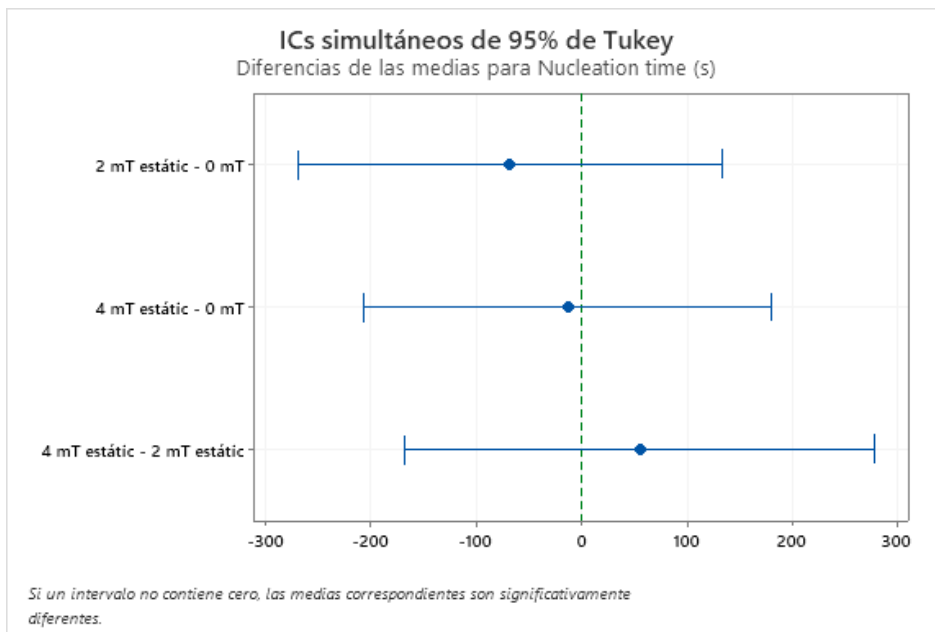


Figura 4-21 Test de Tukey para el tiempo de nucleación

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 28) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-21), no existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo de nucleación en la utilización de los campos magnéticos estáticos en suero de tomate.

4.2.3.2. Tiempo final de congelación

Tabla 29 ANOVA para el tiempo final de congelación

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	339826	169913	3,33	0,050
Error	29	1480237	51043		
Total	31	1820063			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT) N Media Agrupación

0 mT	15	1499,8	A
4 mT estático	9	1340,1	A
2 mT estático	8	1259,0	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

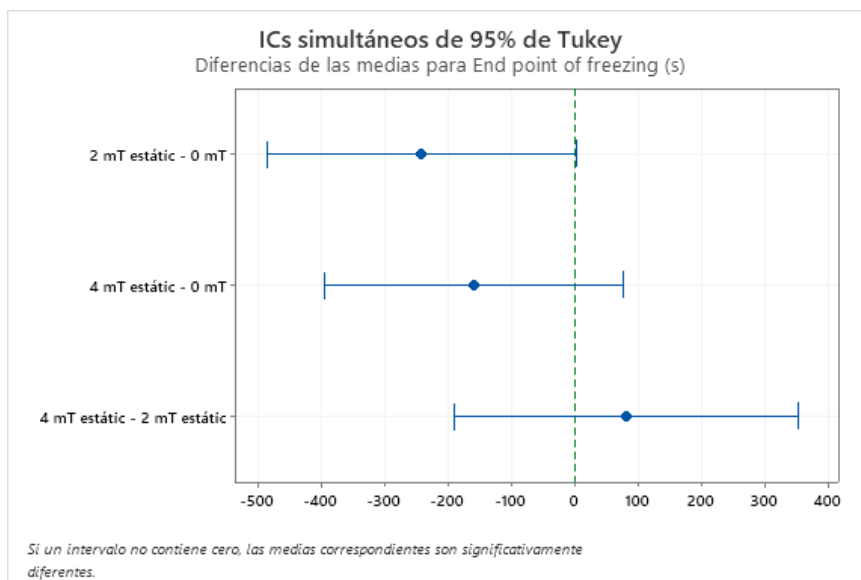


Figura 4-22 Test de Tukey para el tiempo final de congelación

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 29) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-22), no existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo final de congelación en la utilización de los campos magnéticos estáticos en suero de tomate.

4.2.3.3. Tiempo de transición de fase

Tabla 30 ANOVA para el tiempo de transición de fase

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Campo (mT)	2	204873	102437	3,66	0,038
Error	29	811284	27975		
Total	31	1016157			

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Campo (mT)	N	Media	Agrupación
0 mT	15	791,9	A
4 mT estático	9	644,9	A
2 mT estático	8	619,0	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

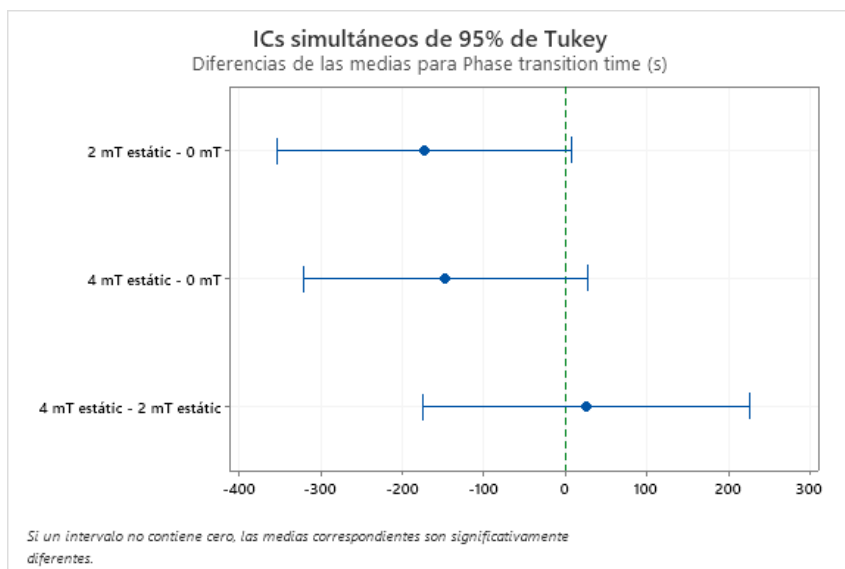


Figura 4-23 Test de Tukey para el tiempo de transición de fase

Como podemos observar en los resultados obtenidos mediante un ANOVA (Tabla 30) y posterior comprobación con test de Tukey (Figura 4-23), no existen evidencias significativas para poder rechazar la hipótesis nula, la cual dice que no hay diferencia significativa para el tiempo de transición de fase en la utilización de los campos magnéticos estáticos en suero de tomate.

4.3. Discusión

Como podemos observar en los resultados obtenidos tanto del experimento 1 con campos magnéticos oscilantes como del experimento 2 con campos magnéticos estáticos hay mucha variabilidad en las muestras, éste es un parámetro importante al valorar los resultados que encontramos en los análisis realizados. Para evitar esta variabilidad tan grande encontrada en los primeros análisis del agua destilada, se incorporó una mejora en el experimento que consistía en utilizar un tapón de poliestireno expandido con el objetivo de inmovilizar la sonda. Para el experimento 1 en el cual se aplicaba un campo magnético oscilante hemos podido observar que tan solo hay diferencias significativas para el parámetro del tiempo de transición de fase en el agua Milli-Q aplicando un campo magnético de 4 mT, siendo un tiempo de transición de fase superior al control, que es lo opuesto a nuestro objetivo. Para el resto de parámetros y de muestras no se expresa ninguna diferencia significativa respecto al control. Estos resultados en los que no se ha observado ninguna diferencia significativa podría venir provocada por un aumento de temperatura de las muestras aplicado por el calor que libera la bobina de cobre (Tang et al. 2020), esto puede explicar por qué aplicando 4 mT el tiempo de transición de fase es superior, también puede explicar porque no se observan diferencias significativas en los demás parámetros para las demás muestras. El aumento de temperatura causado por la bobina viene a contrarrestar los posibles efectos positivos del campo magnético.

Por lo que respecta a los resultados del experimento 2 podemos observar que si existen diferencias significativas para el tiempo de nucleación tanto en agua Milli-Q como en zumo de tomate para la aplicación del campo magnético estático de 2 mT. Para el parámetro de tiempo de final de congelación también existen diferencias significativas cuando se aplica un campo magnético estático de 2 mT pero en este caso tan solo se encuentra en el zumo de tomate. Finalmente, para el tiempo de transición de fase también se encuentra una diferencia significativa en este caso en la aplicación del campo magnético estático tanto de 2 mT como de 4 mT, pero tan solo se observa en la muestra de agua Milli-Q.

Los resultados obtenidos en este estudio son muy similares a los encontrados en otros estudios previos (Abbie et al. 2021), (Otero et al. 2020), (Otero et al. 2022) y (Puza et al. 2019).

Los resultados de los experimentos realizados observamos como en función de la matriz (agua destilada, agua Milli-Q, zumo de tomate y suero de tomate) los resultados son diferentes. Esto podría ser a causa de que los zumos tienen más sólidos, por lo tanto, es de esperar puntos de congelación más bajos que en el agua Milli-Q. En los resultados el sobreenfriamiento en el zumo de tomate es menor que para el resto de matrices (agua y suero de tomate), esto puede tener relación con la presencia de solutos, ya que éstos pueden ayudar a la nucleación, por tanto, reducir el sobreenfriamiento. Por lo que respecta al suero de tomate, el sobreenfriamiento es igual o superior al del agua, ya que después de centrifugar el zumo el residuo sólido que queda es reducido y es más parecido al agua.

Cabe destacar que en los resultados del experimento observamos que el efecto del campo magnético no está proporcionalmente relacionado con la intensidad de éste, ya que los mejores resultados se obtuvieron a 2 mT no a 4 mT.

A pesar de no encontrar diferencias significativas en algunos de los parámetros para la mayoría de las muestras en gran parte de ellas encontramos una tendencia clara a disminuir el tiempo de nucleación, a disminuir el tiempo final de congelación y a disminuir el tiempo de transición de fase.

5. Conclusiones

Como se ha podido observar en los experimentos realizados con diferentes campos magnéticos y diferentes muestras existe un efecto significativo de la utilización de los campos magnéticos en la congelación, sin embargo, éste no se ha dado en todos los campos magnéticos ni en todas las muestras. Encontramos que los campos magnéticos oscilantes no han provocado apenas efectos significativos en ninguna de las muestras, por otro lado, en los campos magnéticos estáticos sí que se han podido apreciar efectos significativos para los parámetros de tiempo de nucleación y tiempo de transición de fase para el agua Milli-Q y en el tiempo de nucleación y tiempo final de congelación para el zumo de tomate, siendo el campo magnético estático de 2 mT el que provoca efectos más significativos. Podemos concluir que los campos magnéticos estáticos producen mayor efecto en la congelación que los campos magnéticos oscilantes, así de esta manera también podemos concluir que los campos magnéticos de 2 mT tienen un mayor efecto sobre el agua Milli-Q y el zumo de tomate que los campos magnéticos de 4 mT.

A pesar de la falta de efecto significativo que se ha hallado en los experimentos, sí que se puede apreciar claramente una tendencia a la disminución del tiempo de nucleación, del tiempo final de congelación y del tiempo de transición de fase, la cual podría convertirse en efecto más significativo si no hubiese tanta variabilidad en los resultados.

En lo que respecta a la implementación de esta tecnología en la industria ya hay algunas empresas japonesas que las comercializan, sin embargo, los efectos que se han encontrado en los experimentos realizados no dan soporte a la utilización de esta tecnología. Tan solo se han encontrado efectos significativos en campos magnéticos estáticos y aun así son insuficientes como para justificar un gasto extra en esta nueva tecnología. Además, a pesar de encontrar efectos significativos en el campo estático, al haber tanta variabilidad en el proceso de congelación su implementación industrial podría no valer la pena, ya que las cinéticas de congelación industrialmente van a depender de muchos factores y ser muy variables.

Bibliografía

Para la bibliografía se ha utilizado el estilo APA (7ª edición, 2020).

Bibliografía básica

- Abie, S. M., Münch, D., Egeland, B., Bjerke, F., Wergeland, I., & Martinsen, Ø. G. (2021). Combined 0.2 T static magnetic field and 20 kHz, 2 V/cm square wave electric field do not affect supercooling and freezing time of saline solution and meat samples. *Journal of Food Engineering*, 311(110710), 110710. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110710>
- Hu, F., Qian, S., Huang, F., Han, D., Li, X., & Zhang, C. (2021). Combined impacts of low voltage electrostatic field and high humidity assisted-thawing on quality of pork steaks. *Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology]*, 150(111987), 111987. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111987>
- Kang, T., You, Y., Hoptowit, R., Wall, M. M., & Jun, S. (2021). Effect of an oscillating magnetic field on the inhibition of ice nucleation and its application for supercooling preservation of fresh-cut mango slices. *Journal of Food Engineering*, 300(110541), 110541. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110541>
- Otero, L., & Pozo, A. (2022). Effects of the application of static magnetic fields during potato freezing. *Journal of Food Engineering*, 316(110838), 110838. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110838>
- Otero, L., Rodríguez, A. C., & Sanz, P. D. (2020). Effect of the frequency of weak oscillating magnetic fields on supercooling and freezing kinetics of pure water and 0.9% NaCl solutions. *Journal of Food Engineering*, 273(109822), 109822. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109822>

- Puza, E. A., Mayo, F. E. C., Polo, J. M. A., De la Matta, A. P., Espinoza, J. S., & Alva, J. C. (2019). Effect of freezing with oscillating magnetic fields on the physical and sensorial characteristics of mango (*Mangifera indica* L. cv. 'Kent'). *Brazilian journal of food technology*, 22. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.16918>
- Tang, J., Zhang, H., Tian, C., & Shao, S. (2020). Effects of different magnetic fields on the freezing parameters of cherry. *Journal of Food Engineering*, 278(109949), 109949. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109949>
- Wang, T., Jin, Y., Yang, N., Xu, D., Yang, Z., Tan, Y., Xu, X., Jin, Z., & Cui, B. (2022). Effect of magnetic field with different dimensions on quality of avocado puree during frozen storage. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(3), 1698-1707. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15538>
- Wei, H., Fu, R., Lin, X., & Feng, A. (2021). Effect of magnetic field-assisted freezing on water migration, fractal dimension, texture, and other quality changes in tilapia. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(11). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15940>
- Wei, H., Luo, K., Fu, R., Lin, X., & Feng, A. (2022). Impact of the magnetic field-assisted freezing on the moisture content, water migration degree, microstructure, fractal dimension, and the quality of the frozen tilapia. *Food Science & Nutrition*, 10(1), 122-132. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2653>
- Xanthakis, E., Le-Bail, A., & Ramaswamy, H. (2014). Development of an innovative microwave assisted food freezing process. *Innovative food science & emerging technologies: IFSET: the official scientific journal of the European Federation of Food Science and Technology*, 26, 176-181. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.04.003>

- Zhang, L., Yang, Z., & Deng, Q. (2021). Effects of pulsed magnetic field on freezing kinetics and physical properties of water and cucumber tissue fluid. *Journal of Food Engineering*, 288(110149), 110149. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110149>
- Zhao, Y., Powell-Palm, M. J., Wang, J., Bilbao-Sainz, C., McHugh, T., & Rubinsky, B. (2021). Analysis of global energy savings in the frozen food industry made possible by transitioning from conventional isobaric freezing to isochoric freezing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151(111621), 111621. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111621>
- Otero, L., & Guignon, B. (2013). Últimos avances en tecnologías de congelación de alimentos. *Alimentaria*, 440, 82-90.
- Otero, L., Rodríguez, A. C., Pérez-Mateos, M., & Sanz, P. D. (2016). Effects of magnetic fields on freezing: Application to biological products: Magnetic freezing of biological products.... *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 646-667. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12202>
- Quintana, J. C., & Aguilar, F. L. (2007). *Interacción Electromagnética. Teoría Clásica*. Reverte.

Bibliografía complementària

- C 80. (s. f.). Robot-coupe.com. Recuperado 14 de septiembre de 2022, de <https://www.robot-coupe.com/es/es/p/coladores-automaticos-c-80/18338>
- Campo magnético. (s. f.). Enciclopedia Humanidades. Recuperado 26 de agosto de 2022, de <https://humanidades.com/campo-magnetico/>
- Campo magnético. (s. f.). Upm.es. Recuperado 26 de agosto de 2022, de <https://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/magnet/campomag2.html>
- Centrifuge 5430/ 5430 R - centrífuga de alta velocidad. (s. f.). Eppendorf.com. Recuperado 14 de septiembre de 2022, de <https://www.eppendorf.com/es-es/Tienda-virtual-y-Productos/Centrifugaci%C3%B3n/Microcentr%C3%ADfugas/Centrifuge-5430-5430R-p-PF-241000>
- Chuan hsin SRV-10 slide voltage regulator 0-240V 1000VA - NTC tech, inc. (s. f.). Ntc-tech.com. Recuperado 14 de septiembre de 2022, de <https://www.ntc-tech.com/product/2427>
- Data logger profesional de temperatura Data Logger176 T4 con pantalla LCD. (s. f.). Testo.com. Recuperado 14 de septiembre de 2022, de https://www.testo.com/es-ES/data-logger-testo-176-t4/p/0572-1764?gclid=Cj0KCQjw1bqZBhDXARIsANTjCPKMWY1n7w0R8kSt7TYGmoJJeWZde7uuYmMZagd8EUmpoBHAb4TivMaAnfFEALw_wcB
- Fryma MZ 100 - Molino coloidal. (s. f.). Foeth.com. Recuperado 14 de septiembre de 2022, de <https://www.foeth.com/es/moledoras/molinos-coloidales/fryma-mz-100-molino-coloidal-057k166>
- Herrera-Enríquez, G., Toulkeridis, T., Castillo-Montesdeoca, E., & Rodríguez-Rodríguez, G. (2021). Critical factors of business adaptability during resilience in Baños de Agua Santa, Ecuador, due to volcanic hazards. En *Artificial Intelligence, Computer and Software Engineering Advances* (pp. 283-297). Springer International Publishing.
- Huber CC-405 Termostato de baño y de circulación de enfriamiento. (s. f.). Huber-online.com. Recuperado 14 de septiembre de 2022, de https://www.huber-online.com/es/product_datasheet.aspx?no=2017.0001.01

- Instrumentación, Recuperado 14 de septiembre de 2022. Medidor de radiación PCE-MFM 3000. Pce-instruments.com. https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-de-radiacion-pce-instruments-medidor-de-radiaci_n-pce-mfm-3000-det_101320.htm
- Kamińska-Dwórznicza, A., Gondek, E., Łaba, S., Jakubczyk, E., & Samborska, K. (2019). Characteristics of instrumental methods to describe and assess the recrystallization process in ice cream systems. *Foods (Basel, Switzerland)*, 8(4), 117. <https://doi.org/10.3390/foods8040117>
- Leskow, E. C. (s. f.). Campo Magnético - Concepto, origen, tipos y características. Concepto. Recuperado 26 de agosto de 2022, de <https://concepto.de/campo-magnetico/>
- López, J. R. (s. f.). Principios físicos de la electricidad. Juntadeandalucia.es. Recuperado 26 de agosto de 2022, de <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/aula/archivos/repositorio/0/39/html/principis.html>
- Marshall. (1997). Electromagnetismo. Prentice Hall & IBD. Recuperado 26 de agosto de 2022.
- Materia, T. (2020, marzo 18). Campo magnético. Toda Materia. <https://www.todamateria.com/campo-magnetico/> Recuperado 26 de agosto de 2022.
- Navarro, R. B. (2018, marzo 20). Tecnologías de conservación de alimentos: Altas Presiones. Blog sobre seguridad alimentaria. <https://www.betelgeux.es/blog/2018/03/20/tecnologias-de-conservacion-de-alimentos-altas-presiones/> Recuperado 24 de agosto de 2022.
- Politècnica, U., València, D. E., Andrés, J., & Carrión, C. (s. f.). Upv.es. Recuperado 24 de agosto de 2022, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/118014/Jim%C3%A9nez%20-%20INFLUENCIA%20DE%20LA%20APLICACI%C3%93N%20DE%20ULTRASONIDO%20DE%20POTENCIA%20EN%20LA%20CIN%C3%89TICA%20DE%20CONGELACI%C3%93N%20Y....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Proyectos : Congelación asistida por ultrasonidos de potencia para prolongar la vida comercial de frutas regionales. (s. f.). Recuperado 24 de agosto de 2022, de

- <http://cicytex.juntaex.es/es/proyectos/639/congelacion-asistida-por-ultrasonidos-de-potencia-para-prolongar-la-vida-comercial-de-frutas-regionales>
- ¿Qué son los campos electromagnéticos y qué tipos existen? (2021, febrero 22). Atl Europa. <https://www.atleuropa.es/que-son-campos-electromagneticos-tipos-existen/> Recuperado 24 de agosto de 2022.
 - Romero, D. C. (2012). La física, una odisea en la escalera de Jacob (1st ed.). Universidad Jorge Tadeo Lozano. <https://doi.org/10.2307/j.ctv23dxc0f> Recuperado 24 de agosto de 2022.
 - Taronja, F. (2015, junio 10). Cambios y alteraciones en los alimentos durante el proceso de congelación (II). restauracioncolectiva.com; Builtvisible. <https://www.restauracioncolectiva.com/n/cambios-y-alteraciones-en-los-alimentos-durante-el-proceso-de-congelacion-ii> Recuperado 24 de agosto de 2022
 - Tecnologías de congelación de frutas y hortalizas. (2018, mayo 23). Revista InfoAgro México. <https://mexico.infoagro.com/tecnologias-de-congelacion-de-frutas-y-hortalizas/>
 - Termopar flexible con sensor de temperatura TP tipo K (fibra de vidrio). (s. f.). Testo.com. Recuperado 14 de septiembre de 2022, de https://www.testo.com/es-ES/sonda-termopar-tipo-k/p/0602-0644?_gl=1*1ljb9gu*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw1bqZBhDXARIsANTjCPKMWY1n7w0R8kSt7TYGmoJJeWZde7uuYmMZagd8EUmpoBHAb4TivMaAnfFEALw_wcB
 - Todo lo que necesitas saber sobre el proceso de congelación de los alimentos. (s. f.). Nutricionista Online, en Ávila o en Trujillo - Naomi Hernández Rodríguez. Recuperado 24 de agosto de 2022, de <https://www.nutricionistanaomihernandez.es/l/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-el-proceso-de-congelacion-de-los-alimentos/>
 - Usuario, S. (s. f.). La congelación de alimentos. Noalcubo.org. Recuperado 24 de agosto de 2022, de <http://noalcubo.org/index.php/aprovecho/la-congelacion-de-alimentos>
 - Villatoro, F. R. (2016, abril 26). La congelación magnética de alimentos. La Ciencia de la Mula Francis. <https://francis.naukas.com/2016/04/26/35881/>

- (S. f.-a). Plasbel.com. Recuperado 14 de septiembre de 2022, de <https://plasbel.com/blog/el-furor-por-los-productos-congelados-ha-llegado-para-que-darse/>
- (S. f.-b). Castellvall.com. Recuperado 14 de septiembre de 2022, de <https://www.castellvall.com/wp-content/uploads/2014/07/cutters-cut-35-50-castellvall1.pdf>