



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
y del Medio Natural

SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE CONGELACIÓN DE
AGUAYMANTO MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA
DE RADIOFRECUENCIA Y TERMOGRAFÍA
INFRARROJA

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Agronómica

AUTOR/A: Novella Torres, Nuria

Tutor/a: Fito Suñer, Pedro José

Cotutor/a: Castro Giráldez, Marta

Director/a Experimental: CHUQUIZUTA TRIGOSO, TONY STEVEN

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



Curso Académico: 2022/2023

Septiembre 2023

Alumna: Nuria Novella Torres

Titulació: Master en Ingeniería Agronómica

Título del TFM: SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE CONGELACIÓN DE AGUAYMANTO MEDIANTE ESPECTROFOTOMETRÍA DE RADIOFRECUENCIA Y TERMOGRAFÍA INFRARROJA.

Lugar de realización: Instituto Universitario de Ingeniería de los Alimentos FoodUPV.

Localidad: Valencia, septiembre 2023

Tutor/a: Dra. Marta Castro Giráldez y Dr. Pedro José Fito Suñer

Director experimental: Tony Steven Chuquizuta Trigoso



Resumen

El aguaymanto es una fruta exótica de origen sud-americano con gran interés nutricional por su cantidad en fibra y su importante aporte vitamínico. Debido a su alta perecibilidad es necesario realizar operaciones de conservación con el fin de alargar su vida útil preservando sus características nutricionales. El proceso de congelación permite mantener gran parte de las propiedades nutricionales para ser consumido posteriormente a su descongelación o como operación intermedia en liofilización. En este trabajo se pretende desarrollar un sistema de monitorización del proceso de congelación de aguaymanto mediante espectrofotometría de radiofrecuencia y termografía infrarroja. La Espectrofotometría de radiofrecuencia es una técnica que permite analizar ciertas especies químicas importantes en frutas como son los electrolitos o el agua, además, a frecuencias de Maxwell-Wagner es posible determinar la formación de cristales de hielo, pudiéndose determinar los puntos críticos en el proceso de congelación. La termografía infrarroja es una técnica que permite medir ciertas propiedades superficiales del fruto durante su proceso de congelación (emisividad), muy relacionadas con los procesos de evaporación superficial o formación de cristales superficiales, y al mismo tiempo que registra la variación de temperatura en superficie.

Palabras clave: radiofrecuencia, infrarrojos, aguaymanto, congelación



Abstract

The golden gooseberry is an exotic fruit of South American origin with great nutritional interest due to its amount of fiber and its important vitamin content. Due to its high perishability, it is necessary to carry out conservation operations in order to extend its useful life while preserving its nutritional characteristics. The freezing process allows maintaining a large part of the nutritional properties to be consumed after thawing or as an intermediate operation in freeze-drying. The aim of this work is to develop a monitor system for the freezing process of golden gooseberry by means of radiofrequency spectrophotometry and infrared thermography. Radiofrequency Spectrophotometry is a technique that allows the analysis of certain important chemical species in fruits such as electrolytes or water, in addition, at Maxwell-Wagner frequencies it is possible to determine the formation of ice crystals, being able to determine the critical points in the process. of freezing. Infrared thermography is a technique that allows the measurement of certain surface properties of the fruit during its freezing process (emissivity), closely related to the processes of surface evaporation or formation of surface crystals, and at the same time that it records the temperature variation on the surface.

Keywords: radiofrequency, infrared, goldenberry, freezing



Resum

El aguaymanto és una fruita exòtica d'origen sud-americà amb gran interès nutricional per la seua quantitat en fibra i la seua important aportació vitamínica. A causa de la seua alta perecibilitat és necessari realitzar operacions de conservació amb la finalitat d'allargar la seua vida útil preservant les seues característiques nutricionals. El procés de congelació permet mantindre gran part de les propietats nutricionals per a ser consumit posteriorment a la seua descongelació o com a operació intermèdia en liofilització. En aquest treball es pretén desenvolupar un sistema de monitoratge del procés de congelació de aguaymanto mitjançant espectrofotometria de radiofreqüència i termografia infraroja. L'Espectrofotometria de radiofreqüència és una tècnica que permet analitzar unes certes espècies químiques importants en fruites com són els electròlits o l'aigua, a més, a freqüències de Maxwell-Wagner és possible determinar la formació de cristalls de gel, podent-se determinar els punts crítics en el procés de congelació. La termografia infraroja és una tècnica que permet mesurar unes certes propietats superficials del fruit durant el seu procés de congelació (emissivitat), molt relacionades amb els processos d'evaporació superficial o formació de cristalls superficials, i al mateix temps que registra la variació de temperatura en superfície.

Paraules clau: radiofreqüència, infrarojos, aguaymanto, congelació



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN DEL DESARROLLO DE SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN EN PROCESOS DE CONGELACIÓN.....	1
1.2. AGUAYMANTO.....	1
1.3. SISTEMAS ACTUALES DE MONITORIZACIÓN DEL PROCESOS DE CONGELACIÓN	4
1.4. SISTEMAS DE ANALISIS POR IMPEDANCIAS Y PROPIEDADES DIELECTRICAS.....	5
1.4.1. Plano teórico de la espectrofotometría de baja frecuencia.....	5
1.4.2. Plano teórico de la termografía de infrarrojos.....	8
1.5. CONGELACIÓN.....	9
1.5.1. Teoría de Congelación, curva de congelación de alimentos.....	9
1.5.2. Principales modelos de congelación.....	10
1.5.2.1. Robinson & Stokes.....	10
1.5.2.2. Fontan & Chirife.....	11
1.5.3. Teoría de la vitrificación, concepto de agua no congelable (Gordon y Taylor).....	11
2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO	12
2.1. OBJETIVOS.....	12
2.2. PLAN DE TRABAJO.....	12
3. MATERIALES Y MÉTODOS	12
3.1. MATERIAS PRIMAS	12
3.2. MATERIALES Y EQUIPOS	12
3.2.1. Metodología experimental	12
3.2.2. Equipos.....	15
3.2.2.1. Congelador de flujo	15
3.2.2.2. Datalogger para la medida de temperatura	16
3.2.2.3. Analizador de Impedancias.....	16
3.2.2.4. Cámara infrarroja	17
3.2.2.5. Soporte impreso en 3D.....	18
3.2.2.6. Calorimetría diferencia de barrido.	19
4. RESULTADOS	19
4.1. CURVA DE CONGELACIÓN	19
4.2. CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA.....	20



4.3. CÁLCULO DE LA EMISIVIDAD EN EL ESPECTRO DE INFRARROJO LEJANO (7-13 μm)	21
4.3. PROPIEDADES DIELECTRICAS.....	22
5. CONCLUSIONES	24
6. BIBLIOGRAFIA	25
ANEXO I. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030	28



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Fruto de aguaymanto en su estadio de madurez comercial.	2
Figura 2. Evolución de las exportaciones de Perú de aguaymanto durante el 2012-2016. Adaptado de (Puente et al., 2011).	4
Figura 3. Evolución de las exportaciones de Perú de aguaymanto. (Adaptado de Puente et al., 2011).	4
Figura 4. Representación de la constante dieléctrica y el factor de pérdidas en sistemas biológicos en función de la frecuencia (Adaptado de Traffano-Schiffo 2017b).	6
Figura 5. Representación del campo electromagnético, formado por el campo eléctrico (rojo) y el campo magnético (azul) (Adaptado de Tomas, 2022).	7
Figura 6. Esquema de los fenómenos que tienen lugar en un tejido biológico bajo un campo eléctrico (Adaptado de Castro-Giraldez et al., 2010)	8
Figura 7. Curva teórica de congelación de alimentos (Adaptado de Talens, 2016).....	10
Figura 8. Posicionamiento de los aguaymantos. (1) Medición de temperatura superficial y del centro de la muestra. (2) Medida de la temperatura superficial mediante cámara infrarroja. (3) Medidas dieléctricas.	13
Figura 9. Esquema general del montaje experimental. 1. Muestra con termopares, 2. Muestra con medida infrarroja de la temperatura, 3. Muestra medida dieléctrica, 4. Sensor de puntas para las medidas dieléctricas, 5. Soporte impreso en 3D, 6. Superficie de emisividad certificada, 7. Cámara termográfica, 8. Sensores termopares tipo K, 9. Multiplexor Agilent 34972A LXI Data Acquisition, 10. Analizador de impedancia.	15
Figura 10. Congelador ACR45/87, Dycometal, S.L.	16
Figura 11. Multiplexor Agilent 34972A LXI Data Acquisition.	16
Figura 12. Analizador de impedancia 4294A.	17
Figura 13. Vista de la cámara Optris PI 160 Thermal Imager.	17
Figura 14. Vistas diseño 3D. a) Vista superior b) Vista inferior lateral c) Vista frontal trasera.	18
Figura 15. Soporte impreso 1) Sensor de dos puntas para medidas dieléctricas, 2) Superficie de emisividad certificada, 3) Soporte primer aguaymanto, 4) Cono canalizador de aire.	18
Figura 16. Evolución temperatura en la superficie y en el centro.	20
Figura 17. Termograma donde se muestra la transición vítrea de la muestra.	21
Figura 18. Emisividad calculada de la muestra durante el proceso de congelación; a la izquierda se muestra la evolución de la emisividad en el espectro de infrarrojo lejano y a la derecha se muestra la relación de la emisividad con la temperatura superficial.	22
Figura 19. Evolución del espectro de la constante dieléctrica en el rango de la radiofrecuencia durante el proceso de congelación.	22
Figura 20. Propiedades dieléctricas con respecto a la temperatura interna, donde a) es la constante dieléctrica en dispersión beta, b) factor de pérdidas en la dispersión beta y c) constante dieléctrica en dispersión alfa.	23

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del aguaymanto (Adaptado de Chuquizuta, 2023)	2
Tabla 2: Relación del trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030.	28
Tabla 3: Descripción de la alineación del TFM con los diferentes ODS.	28



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
D'ENGINYERIA AGRONÒMICA I DEL
MEDI NATURAL**



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
D'ENGINYERIA AGRONÒMICA I DEL
MEDI NATURAL**

1. INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN DEL DESARROLLO DE SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN EN PROCESOS DE CONGELACIÓN

La finalidad que persigue todo proceso de congelación es alargar la vida útil de los alimentos, reduciendo el deterioro fisicoquímico y bioquímico del alimento. La forma en la que se lleve a cabo este proceso afecta de forma significativa a las propiedades finales del producto. La congelación rápida reduce la movilidad del agua, retrasando las reacciones biológicas que requieren de energía, la cual el fruto obtiene de los carbohidratos mediante el ciclo de Krebs. Si la congelación se lleva a cabo lentamente aumenta el tamaño de los cristales, que crean más roturas en el tejido, que al ser descongelado acentúa la velocidad del deterioro y empeora las propiedades organolépticas del producto.

Es por ello que el desarrollo de procedimientos que reduzcan el tamaño de los cristales creados durante el proceso son de gran interés en la industria alimentaria. Dado la gran variabilidad entre los productos sometidos a congelación es necesario el desarrollo de sistemas de control no invasivos, ni destructivos, sencillos.

Este estudio permitirá el desarrollo de sistema de monitorización de congelación de aguaymanto mediante espectrofotometría de radiofrecuencia y termografía infrarroja par el control de los fenómenos físicos internos que se llevan a cabo en el producto.

1.2. AGUAYMANTO

El aguaymanto o *Physalis peruviana*, es una planta herbácea aprovechada por su fruto comestible (Maroto, 2002). Pertenece al género *Physalis*, este género abarca hasta 90 especies, siendo uno de los más grandes dentro de las Solenaceae (Dostert *et al.*, 2012).

Tanto la planta como el fruto de *P. peruviana* recibe un gran número de diferentes nombres comunes según la zona del mundo. Algunos de estos nombres comunes son: Aguaymanto, Capulí en Perú, Uchuva en Colombia, Uvilla en Ecuador, Cape Gooseberry o Golden Berry en países de habla inglesa (Carbajal, 2018).

El aguaymanto es una planta perenne de aproximadamente 300 cm de alto, con un recto de forma cilíndrica y poco ramificado densamente pubescente. El cáliz de este género se caracteriza por su elongación durante la fructificación rodeando el fruto comestible, quedando, colgando hacia abajo. Las características botánicas de esta baya esférica de color anaranjado, un cáliz de 5 sépalos de 2 cm de largo, con la peculiaridad de estar recubierto por un cáliz de color marrón en forma acampanada (Maroto, 2002)



Figura 1. Fruto de aguaymanto en su estadio de madurez comercial.

Durante el desarrollo fisiológico del fruto, se evidencia el cambio de color de verde a un amarillo anaranjado, que alcanza aproximadamente 2 cm de diámetro con un peso de entre 4 y 10 g, con un sabor agridulce. Además, el fruto posee hasta 200 semillas amarillas aproximadamente, con dimensiones de 1,25 y 2,5 mm (Dostert *et al.*, 2012).

Al tratarse de un fruto climatérico, su maduración continua después de haber sido cosechado. Esto permite un cierto control del ritmo de maduración durante el almacenamiento. El tiempo que es posible alargar esta etapa previa a la comercialización varía según se almacenen con o sin cáliz. Si el almacenamiento se lleva a cabo sin cáliz el fruto pierde su capa de protección no pudiéndose almacenar más de 4- 5 días, en cambio con cáliz es posible alargar este tiempo hasta un mes. Este tiempo máximo depende notablemente de las condiciones de cultivo, tales como: humedad del cáliz durante la cosecha y el tamaño del fruto, ya que los frutos más grandes tienden a agrietarse. Otra dificultad para el almacenamiento de estos frutos es debido a la aparición de infecciones fúngicas como *Penicillium* o *Brotrytis* en condiciones de baja temperatura (Dostert *et al.*, 2012).

En la Tabla 1 se muestra las propiedades fisicoquímicas del aguaymanto.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del aguaymanto (Adaptado de Chuquizuta, 2023)

Análisis Proximal	Guevara & Málaga, (2013)	Espinoza, 2016	Reyes et al., (2017)	Obregón et al., (2021)	Juntamay, (2010)
Humedad	81,53 %	78.9 %	79,8 g	78,9 %	82,31 %
Cenizas totales	1,17 g	1,1 g	1 g	1 g	7,17 %
Grasa	0,26 g	0,16 g	0 g	.....	0,22 %
Proteína	1,71 g	0,05 g	1,9 g	0,1 kcal	10,06 %
Fibra	4,37 g	4,9 g	4,9 g	4,9 %	16,39 %
Carbohidratos (g)	15,33	16	17,3	14,9	.....
Energía total (kcal)	70,50	.....	51	61,6	.....
Índice de madurez	8,62	.....	.....	8,7	.....
Azúcares reductores	4,96 g	.....	.....	26,85 %	22,49 %

Vitamina C (ácido ascórbico) (mg)	24,21	43	43,30	43	.....
Compuestos fenólicos totales (AGE: ácido gálico equivalente) (mg)	58,60	.....	.....	.....	.....
Carotenoides totales (B- caroteno eq.)	2,94 mg	1,61 mg	2640 ug	.....	.....

Esta información demuestra que el aguaymanto es un alimento rico en vitamina A (caroteno) y vitamina C (ácido ascórbico), además de proteínas, calcio, fósforo, y carbohidratos. Todo ello hace que se de gran valor para diferentes industrias como la farmacéutica y la química entre otras (Coronado-Pais & Rodríguez, 2014).

En la actualidad el uso principal que se le da al aguaymanto es como fruta fresca o como acompañante en ensaladas, también por sus jugos y jaleas, debido a su sabor agridulce que hace que sea utilizado como ingrediente en platos de comida, comercializando tanto en fresco como en deshidratado (Coronado-Pais & Rodríguez, 2014).

A *P. peruviana L.* se le atribuyen muchas propiedades medicinales como antiespasmico, diurético, antiséptico, sedante, analgésico, fortalecedor del nervio óptico, eliminación de parásitos intestinales y amebas. También se han descrito propiedades antidiabéticas, pero no hay estudios que indiquen efectos adversos (Rodríguez & Rodríguez, 2007).

Al mismo tiempo sus cálices son ampliamente empleados en la medicina popular como anticancerígenos, antimicrobianos, antipirético, diurético, inmunodulador y antiinflamatorio (Franco *et al.*, 2007).

La comercialización de este fruto se encuentra localizada especialmente en tres países, Colombia, Sudáfrica y Kenia. Comercializándose tanto fresco como deshidratado (Fischer *et al.*, 2005)

Uno de los motivos de su gran aceptación en el mercado es debido a su alto contenido en antioxidantes, tales como vitamina A, B y C, pero al mismo tiempo por su contenido en minerales y fitoesteroles (Puente *et al.*, 2011; Dostert *et al.*, 2012).

Como se puede ver en la figura 2, el principal importador de aguaymanto es Holanda, seguida de Estados Unidos, ambos países han sufrido un incremento exponencial de la demanda de esta baya en un periodo muy breve de tiempo.

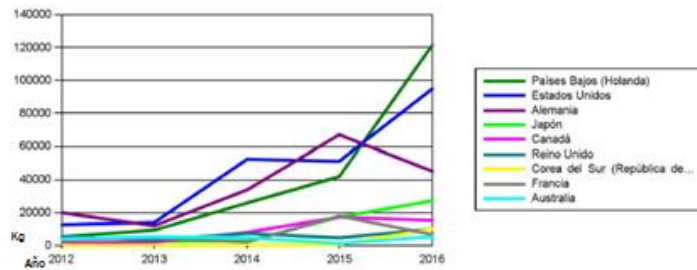


Figura 2. Evolución de las exportaciones de Perú de aguaymanto durante el 2012-2016. Adaptado de (Puente et al., 2011).

Como se puede observar en la figura 3, la principal forma de comercializar este fruto es en fresco, seguido de elaboraciones tradicionales como la conserva o la mermelada, y comercializándose apenas un 0,23% congelado.

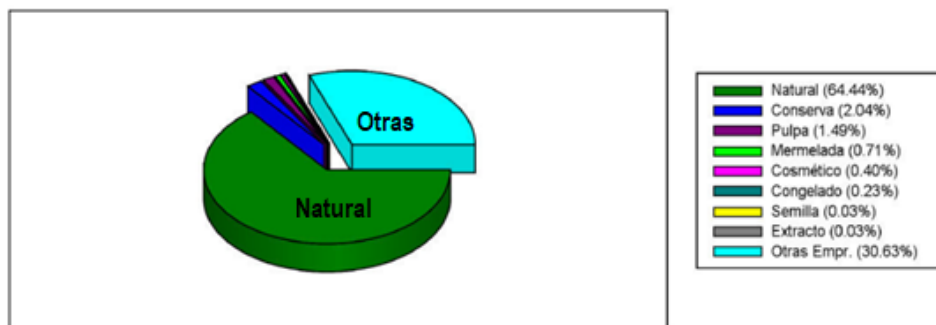


Figura 3. Evolución de las exportaciones de Perú de aguaymanto. (Adaptado de Puente et al., 2011).

En la actualidad la comercialización del aguaymanto presenta dos problemas el primero de ellos es la falta de estandarización del producto deshidratado como consecuencia del desconocimiento de la variabilidad genética de la especie. El segundo problema viene asociado a la grande demanda del fruto fresco, demanda que la producción no es capaz de cubrir (Carbajal, 2018).

1.3. SISTEMAS ACTUALES DE MONITORIZACIÓN DEL PROCESOS DE CONGELACIÓN

Dada la importancia del monitoreo del proceso de congelación de las matrices alimentarias, con el fin de obtener productos inocuos y de calidad nutricional, además de prolongar de su vida útil. Actualmente, la industria viene demandando y desarrollando tecnologías no invasivas, rápidas, precisas y de fácil uso para el control de congelación de productos agroalimentarios, para cada una de las fases de congelación, tales como: termopares, infrarrojos, etc....

Estos sistemas se pueden clasificar en no destructivo o destructivos/invasivo. Se consideran destructivos aquellos sistemas que requieren de contacto entre el producto y el sistema de

medida provocando la rotura o pérdida de características del producto como consecuencia del proceso de detección.

Medición de la temperatura de las muestras por sonda PT100/ termopares: Este sistema consiste en la medición puntual o prolongada de la temperatura de una muestra aleatoria, requiere del contacto entre el producto y el sensor de medida. Es un sistema muy sencillo y económico pero el contacto con la muestra produce daños en la misma, al mismo tiempo que puede ser una fuente de contaminación cruzada. Otra desventaja de este sistema es que el lugar óptimo de colocación de la sonda puede ser de difícil acceso.

Medición por contacto, necesita que se establezca contacto entre el sistema de medida y la superficie del producto a medir.

Medición por cámaras termográficas, es una técnica no invasiva, que puede ser portátil o fija. El conjunto de sensores que conforman el sistema dan como resultado la medida superficial de temperatura del alimento según su emisividad, por lo que requiere de calibración (Tomas, 2022; Cárcel & Clemente, 2022).

1.4. SISTEMAS DE ANALISIS POR IMPEDANCIAS Y PROPIEDADES DIELECTRICAS

1.4.1. Plano teórico de la espectrofotometría de baja frecuencia

La espectrofotometría de baja frecuencia ha sido empleada con éxito en el desarrollo de sensores diseñados para el control de calidad: desarrollo del sensor de contacto para la detección de miopatías de pectoral profundo en canales de ave, detección de estrías blancas en pechugas de pollo mediante las relajaciones, estimación de la composición de pasta cárnicas, en la clasificación de las variedades de manzana, en la segregación de los tejidos de mandarina, el grado de madurez de la granada, la congelación de patatas (Tomas, 2022).

La espectrofotometría es una técnica que se basa en el efecto del flujo de fotones en un medio determinado. Los fotones son partículas elementales capaces de transmitir fuerza electromagnética. Al tratarse de partículas que carecen de masa, no interactúan con la malla de Higgs de forma que su velocidad no se ve afectada por esta y se mantiene siempre a la velocidad de la luz. Los fotones presentan un spin de 1, lo cual hace que únicamente puedan acumular energía de vibración (Molina-Terriza *et al.*, 2007). Es por ello que la única forma en la que un fotón puede interferir con la materia que lo rodea es mediante su frecuencia de vibración (Hz), la amplitud de la onda (m) o la energía (eV) (figura 4). Las relaciones descritas por Maxwell permiten aplicar un modelo estándar para describir las interacciones entre partículas (Hawton, 2019). En estas relaciones determina que aquellos fotones que presentan una baja frecuencia de vibración presentan un bajo nivel de energía y una elevada penetración en la materia, lo cual

resulta de gran utilidad para el análisis y estudio de tejidos biológicos pudiendo determinar la composición química de los mismos (Molina-Terriza *et al.*, 2007).

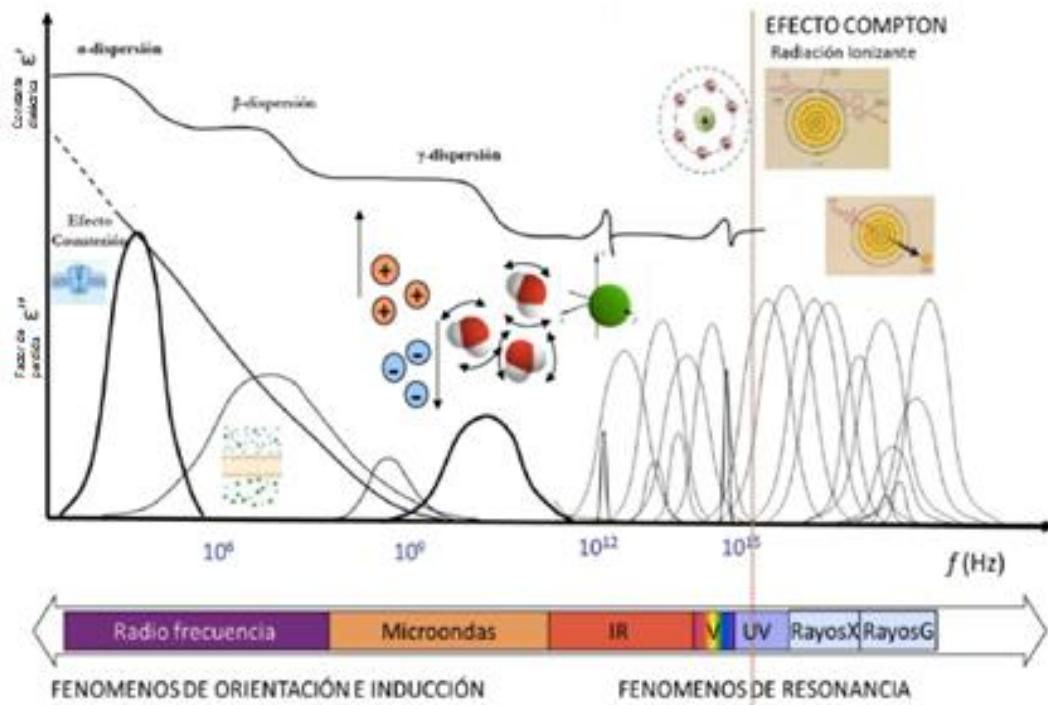


Figura 4. Representación de la constante dieléctrica y el factor de pérdidas en sistemas biológicos en función de la frecuencia (Adaptado de Traffano-Schiffo 2017b).

Una de las técnicas empleadas para el análisis de las interacciones de los fotones con el medio, es la utilización del término impedancia. Durante el flujo de fotones por un medio dieléctrico, se genera una resistencia al paso del mismo provocando un desplazamiento del campo eléctrico y magnético del medio Ecuaciones 1 y 2.

$$\vec{D} = \vec{\epsilon} * \epsilon_0 * E = (\epsilon' - \epsilon''j) * \epsilon_0 * E \quad (ec. 1)$$

$$\vec{B} = \vec{\mu} * \mu_0 * H = (\mu' - \mu''j) * \mu_0 * H \quad (ec. 2)$$

Entendiendo por \vec{D} el desplazamiento del campo eléctrico, \vec{B} el desplazamiento del campo electromagnético, E el campo eléctrico, H el campo magnético, ϵ la permitividad y μ permeabilidad.

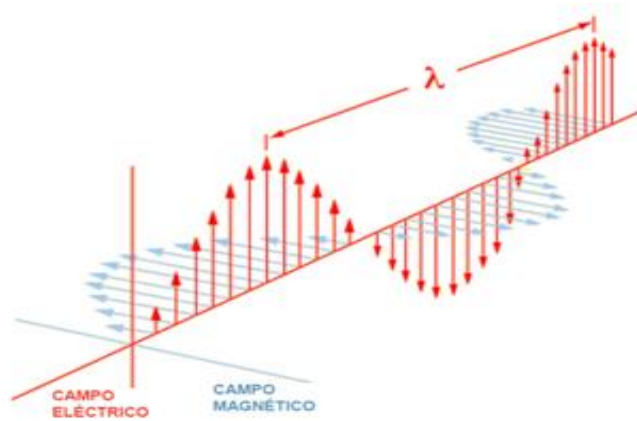


Figura 5. Representación del campo electromagnético, formado por el campo eléctrico (rojo) y el campo magnético (azul) (Adaptado de Tomas, 2022).

Debido a que los tejidos biológicos interactúan con mayor intensidad con el campo eléctrico, podemos asumir que su permeabilidad es próxima a la de vacío y pudiendo despreciar la interacción del campo magnético. Es por ello que la permitividad puede ser utilizada para analizar las interacciones de un flujo de fotones en un medio dieléctrico (Nelson & Datta, 2001; Mello *et al.*, 2014)

La permitividad (ϵ) es un vector y por tanto se puede definir como un número complejo, empleando la ecuación 3

$$\epsilon = \epsilon' + \epsilon''j \quad (\text{ec. 3})$$

En este número complejo, se denomina constante dieléctrica a la parte compleja (ϵ'), en ella se ve definida la capacidad de almacenar energía de un material mientras interactúa con un campo eléctrico. Esta energía almacenada es debida al desplazamiento de las cargas positivas y negativas de su posición de equilibrio, en contra de la atracción molecular y atómica. Parte de la energía de la onda se va perdiendo durante su propagación, a esta energía disipada se la conoce como la parte imaginaria de la ecuación o factor de pérdida (ϵ''). Por tanto, la forma en la que se dan los fenómenos de polarización están relacionados con los fenómenos de disipación y absorción de parte de la energía del campo eléctrico y estos con la disminución de la constante dieléctrica.

Al mismo tiempo, la permitividad al ser una propiedad vectorial, lo que permite describirla también como un número polar, teniendo como módulo la hipotenusa o resultante del factor de pérdida y la constante dieléctrica, y como desfase el ángulo que forma con la constante dieléctrica. Para describir las pérdidas se emplea la tangente del desfase, la cual se obtiene de dividir la parte real y la imaginaria. Esta tangente permite expresar la cantidad de energía dispersa por un tejido biológico.

Como resultado de la interacción entre una especie química, con mucha fuerza iónica, con un campo eléctrico entre Hz y MHz, se producen pérdidas de energía, produciendo una vibración, las cuales acaban dispersándose en forma de calor “conductividad iónica”. Es posible cuantificar la conductividad para el tramo comprendido entre Hz y 1 GHz.

En función de la frecuencia a la que vibre el fotón, se presentan diferentes interacciones con un sistema dieléctrico como tejido biológico, sistema coloidal o disolución (figura 6).

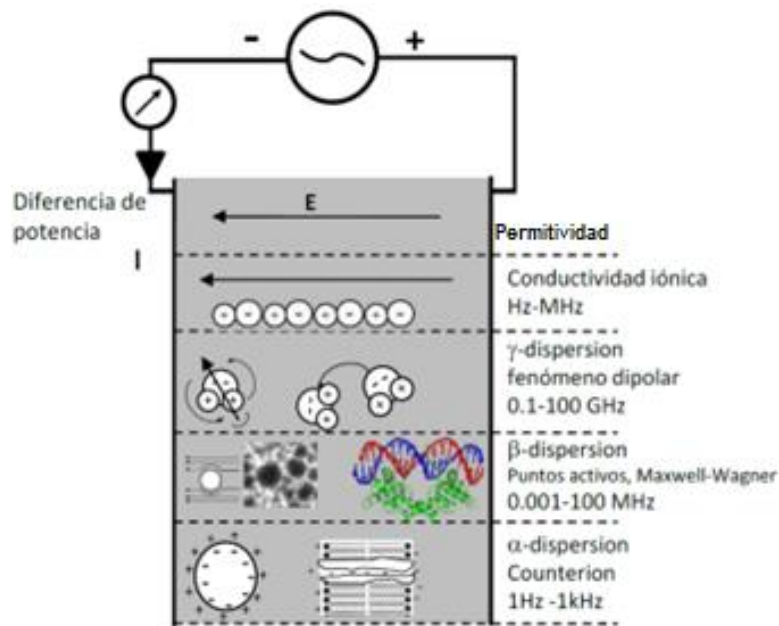


Figura 6. Esquema de los fenómenos que tienen lugar en un tejido biológico bajo un campo eléctrico (Adaptado de Castro-Giraldez et al., 2010)

Mediante los espectros obtenidos durante la evolución de la permitividad a lo largo de las diferentes frecuencias y aplicando la ecuación de Traffano-Schiffo, ecuación 4, es posible definir distintos parámetros del espectro, entre ellos la relajación del sistema (Traffano-Schiffo, 2017).

$$l\varepsilon'(\omega) = l\varepsilon'_{\infty} + \sum_{n=1}^3 \frac{\Delta l' \varepsilon_n}{1 + e^{(\log \omega^2 - \log \tau_n^2) * \alpha_n}} \quad (\text{ec. 4})$$

1.4.2. Plano teórico de la termografía de infrarrojos

La termografía infrarroja consiste en medir la temperatura de la superficie de un material empleando para ellos fotones captados de la superficie en el espectro infrarrojo o FIR. Con ello se permite obtener medidas constantes de la temperatura superficial, así como el reparto de esta por la superficie de medida de una forma no invasiva, ni destructiva al no entrar en contacto con el objeto (Tomas, 2022; Meola et al., 2017).

La termografía infrarroja ha demostrado ser una técnica muy útil y ampliamente utilizada para el análisis de materiales, empleándose en un estudio de muy diferente índole como puede ser en estudios realizados en la construcción, en la monitorización de procesos, en aeroespaciales, en industria agroalimentaria...

Esta medida se basa en la energía interna que poseen los átomos en su electrón orbital de valencia, siendo a la vez la más expuesta. El modelo atómico de Schrödinger demostró que la energía cinética de este electrón es la mayor aportación energética del átomo, la cual, al ser la más expuesta, recibe y libera constantemente fotones. Estos fotones emitidos mantienen la movilidad del nivel energético del electrón que lo emite, pudiendo así predecir la temperatura en la que se encuentra un material según el comportamiento de este. Fue Plank quien elaboro

una ley que permite predecir la temperatura de la superficie de cualquier cuerpo mediante la emisión de fotones, posteriormente esta ley fue actualizada por Stefan-Boltzman añadiendo el actual sistema de medida mediante infrarrojos. Esta ley describe como un cuerpo emite fotones con diferentes niveles de energía o frecuencia según su temperatura superficial, aquellos cuerpos con temperaturas cercanas al cero emiten frecuencias microondas (MW), los seres emiten frecuencias en el infrarrojo lejano (FIR), el sol (3000 K) emite en visible (VIS) y una enana blanca (12000 K) emite en ultravioleta (UV) (Usamentiaga *et al.*, 2014).

Un cuerpo se comporta frente a la recepción de fotones de 3 formas distintas (radiación): absorción, reflexión y transmisión. Estas tres formas de interacción se parametrizan con los siguientes factores adimensionales: absorbancia (α_λ), reflectancia (ρ_λ) y transmitancia (τ_λ). La suma de estos tres fenómenos es siempre 1 (ecuación 5).

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (\text{ec. 5})$$

La forma de cuantificar la cantidad de energía absorbida por un cuerpo que recibe radiación exterior se puede calcular mediante la ley de Stefan-Boltzmann (ecuación 6).

$$E_b = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{ec. 6})$$

Donde ε es la emisividad del cuerpo y representa la relación entre la energía absorbida y la energía recibida, teniendo un valor adimensional, σ es la constante de Stefan-Boltzmann $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ y T es la temperatura del cuerpo emisor expresado en K.

1.5. CONGELACIÓN

1.5.1. Teoría de Congelación, curva de congelación de alimentos.

La operación de congelación es una de las principales operaciones llevadas a cabo en la conservación de alimentos, esta operación ha sido ampliamente estudiada desde hace tiempo debido a su alta capacidad de conservación, preservación de la calidad y parámetros de seguridad (Kumar *et al.*, 2020; van der Sman, 2020).

Desde un punto de vista más físico, el proceso de congelación es un fenómeno de transferencia de calor durante el cual el alimento pierde calor por convección por sus superficies y por conducción desde su interior hacia el exterior (Rahman *et al.*, 2008).

La congelación de alimentos es un proceso mucho más complejo que el de la congelación del agua pura, esto es debido a que en el agua de los alimentos se encuentran disueltos solutos que se van concentrando conforme aumenta el agua congelada y disminuye el agua en estado líquido. Este suceso da como lugar a la conocida curva de enfriamiento (figura 7), en ella se muestra la evolución de la temperatura de congelación de un alimento frente a la fracción másica de agua líquida presente en el alimento (Talens, 2016).

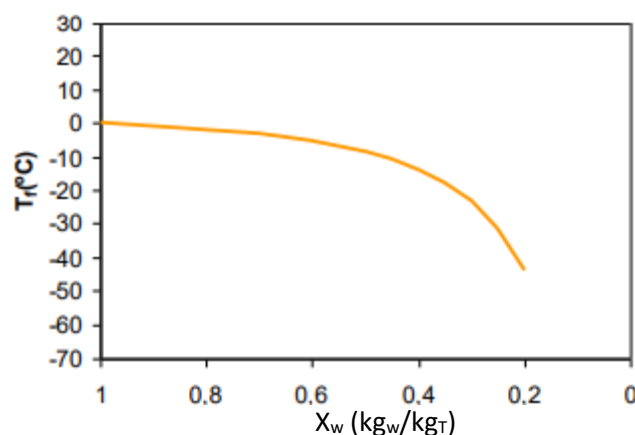


Figura 7. Curva teórica de congelación de alimentos (Adaptado de Talens, 2016)

Como se puede observar a medida que el contenido de agua disminuye y aumenta la de solutos, más disminuye el punto de congelación del producto (Talens, 2016). Es por ello por lo que la composición de un alimento es un factor muy importante durante el proceso de congelación.

Durante la congelación también se ven afectadas las reacciones fisicoquímicas y bioquímicas que tienen lugar en el alimento, como consecuencia de una menor disponibilidad de agua que evita que se favorezcan las reacciones deteriorativas (Singh & Heldman, 2001; Gómez *et al.*, 2007).

Dos factores de gran importancia durante el proceso de congelación son el tiempo y la velocidad en las que se dé, esto hace que sean dos factores determinantes en la calidad del producto. Si la congelación se lleva a cabo a gran velocidad se formarán cristales más pequeños, en cambio si el proceso se lleva a cabo de forma más lenta se producirán cristales de mayor tamaño produciendo más daños a la textura del alimento (Singh & Heldman, 2001).

El proceso de congelación se lleva a cabo en tres fases: 1) Prerrefrigeración o fase de enfriamiento: durante esta etapa el material es enfriado hasta la temperatura de congelación (T_m) retirando todo el calor sensible sin llegar al cambio de fase. 2) Congelación o cambio de fase: Durante esta etapa la mayor parte del agua es congelada 3) Atemperamiento o propagación de cristales de hielo: durante esta etapa el alimento llega a una temperatura estable (Gómez *et al.*, 2007; Castro-Giráldez *et al.*, 2014).

De forma general las curvas de congelación muestran subenfriamiento, como consecuencia de la superación de la barrera energética justo antes de que se inicie la congelación (Sahagian & Goff, 1996), descendiendo por debajo de la temperatura de congelación. A continuación, el proceso sufre un pequeño aumento de la libera energía, como consecuencia de la formación de los primeros cristales hielo, provocando un aumento momentáneo de la temperatura del sistema (Vega, 2019).

1.5.2. Principales modelos de congelación.

1.5.2.1. Robinson & Stokes.

Este modelo se basa en conocer la temperatura de congelación de la disolución. Para ello se emplea una muestra de la disolución depositada en el interior de un recipiente con camisa de circulación de líquidos, líquido del cual se establece la temperatura por debajo de 0°C.

Este modelo crea una relación entre la actividad de agua y el descenso crioscópico, de esta forma se puede conocer la actividad de agua de la disolución (ecuación 7). Esto puede ser una limitación en aquellos ensayos que no se lleven a cabo con productos líquidos, ya que limita su uso a aquellos productos con una actividad de agua superior al 0,8.

$$-\log a_w = 0,004207\Delta T_f + 2,1 * 10^{-6}\Delta T_f^2 \quad (ec. 7)$$

Siendo ΔT_f la diferencia entre la temperatura de congelación de la muestra y los 0°C, y la actividad de agua (a_w) (Tomas, 2022).

1.5.2.2. Fontan & Chirife.

Este modelo de congelación realizar mediciones directas de la a_w cuando esta es muy elevada presenta serias dificultades si se realiza con equipos de medida de a_w convencionales en el área de la alimentación (Prior *et al.*, 1977). Como alternativa a esta situación Miracco *et al.*, (1981), Chirife *et al.* (1981) y Rey *et al.*, (1981), relacionaron valores conocidos de temperatura de inicio de la congelación (T_m) en alimentos como frutas, verduras y carne con la a_w en sistemas con solutos (Chirife & Ferro-Fontan, 1982). Esta relación fue expresada en la ecuación 8.

$$-\ln a_w = 9,6934 * 10^{-3} * T_m + 4,761 * 10^{-6} * T_m^2 \quad (ec. 8)$$

Esta ecuación no tiene en consideración la temperatura a la que se encuentra el ambiente donde está la muestra, aunque este factor se considera despreciable para productos con alta a_w , asumiendo que es independiente de la temperatura ambiente (Chirife, 1981).

1.5.3. Teoría de la vitrificación, concepto de agua no congelable (Gordon y Taylor).

Como resultado de la congelación se genera un incremento rápido de la viscosidad del agua libre en el alimento, y con ello una disminución de la movilidad molecular dificultando el alcanzar un estado de equilibrio (Maroulis & Saravacos, 2003). Esto produce que se den estructuras deformes. El paso que se produce de este estado desordenado a un estable es conocido como la transición vítrea, la cual en cada alimento se produce a una temperatura, a la cual se le llama Temperatura vítrea (T_g). El punto en el que se de esta transición viene determinado por la composición de cada alimento (Telis & Sobral, 2002), si las moléculas disueltas pueden moverse fácilmente, será necesaria reducir más su temperatura hasta pasar de un estado gomoso a uno vítreo rígido (Gutiérrez *et al.*, 2014).

2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

2.1. OBJETIVOS

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un sistema de monitorización de congelación de aguaymanto mediante espectrofotometría de radiofrecuencia y termografía infrarroja.

2.2. PLAN DE TRABAJO

El plan de trabajo seguido para conseguir los objetivos del presente proyecto es el siguiente:

- Revisión bibliográfica de procesos actuales de detección de proceso de congelación, la termografía infrarroja y espectrofotometría de baja frecuencia.
- Puesta en de las metodologías a emplear
- Preparación y caracterización de las muestras.
- Monitorización del proceso de congelación.
- Tratamiento de datos e interpretación de resultados.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIAS PRIMAS

Se ha utilizado *Physalis peruviana* – Uchuva procedente de Ecuador, distribuido por la empresa Ammarket (Orihuela, Alicante). Las muestras se encontraban todas en un estadio de madurez comercial, llegando las muestras en cajas refrigeradas manteniéndose en el laboratorio refrigeradas a 6 °C para evitar daños por frío, hasta la realización del experimental.

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

A continuación, se describe el procedimiento y los equipos utilizados en el trabajo.

3.2.1. Metodología experimental

En cada medida experimental se llevó a cabo la congelación de 3 aguaymantos. Todos los aguaymantos empleados se encontraban en un estado fisiológico similar (comercial), median aproximadamente 5 cm de diámetro y previamente habían sido lavados y secados. En cada ensayo, uno de ellos se empleó para la medida de la temperatura superficial y del centro mediante termopares tipo K, el segundo fue empleado para la toma de la temperatura superficial mediante la cámara termográfica Optris PI 160 y termopares tipo K, previamente al aguaymanto posicionado en este puesto se le corto la parte superior y se secó la superficial del corte, y el tercero para la toma de la medida de propiedades dieléctricas mediante un sensor de puntas conectado al analizador de impedancias 4294A de Agilent (figura 8). Al mismo tiempo se

llevó a cabo el registro de la temperatura de una superficie de emisividad certificada (Optris GmbH, Berlín, Alemania) mediante un termopar tipo K y la cámara termográfica. Además, se midió la temperatura ambiental mediante un termopar tipo K.



Figura 8. Posicionamiento de los aguaymantos. (1) Medición de temperatura superficial y den centro de la muestra. (2) Medida de la temperatura superficial mediante cámara infrarroja. (3) Medidas dieléctricas.

Previo a la monitorización del proceso mediante espectrometría infrarroja se requiere de un ajuste previo del sistema de medida mediante el modelo de Stefan-Boltzman, el cual permite segregar la energía incidente sobre la superficie analizada y obtener la emisividad del cuerpo medido.

Para ello se empleo la ecuación 9, la cual permite calcula la energía recibida por la cámara mediante las temperaturas registradas.

$$E_T = \varepsilon_{cam} \sigma T_{cam}^4 \quad (ec. 8)$$

Siendo: E_T la energía detectada por el pirosensor ($W \cdot m^{-2}$), ε_{cam} emisividad indicada por el software (-), σ ($5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} K^{-4}$) y T_{cam} la temperatura dada por el software de la cámara muestra (K).

A la hora de aplicar este modelo se debe de tener en cuenta dos fenómenos de la transformación de la energía que llega hasta el sensor. El primero de ellos es que el fluido que separa la muestra y el pirosensor (aire en este caso), puede no ser totalmente transmisor, añadiendo un error a la medida. El segundo, la energía presente en el entorno puede producir una sobreestimación de la energía emitida por la superficie a medir. Es por ello que se aplicó la ecuación 9 desarrollada por Traffano-Schiffo *et al.*, 2014.

$$E_T = F \varepsilon_m \sigma T_m^4 + (1 - \varepsilon_e) \sigma T_e^4 - (1 - \tau_{air}) F \varepsilon_m \sigma T_m^4 \quad (ec. 9)$$

Siendo: E_T la energía detectada por el pirosensor ($W \cdot m^{-2}$), F el factor geométrico, ϵ la emisividad (-); σ la constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} K^{-4}$), T temperatura en Kelvin y τ la transmitancia. m = muestra; e = entorno; air = aire. Debido a que el ángulo de disposición de la cámara es 0° el factor geométrico tiene un valor de 1. Debido a la poca separación entre la cámara y la superficie de la muestra (15 cm) el ultimo termino es considerado despreciable.

Mediante la ecuación 10 es posible, conocer la temperatura real de la muestra medida mediante la cámara, mediante la emisividad de la muestra. Es para ello que son necesarios la superficie de emisividad certificada y el termopar que monitoriza su temperatura, así como el de la superficie de la muestra.

$$E_T^{ref} = \epsilon_{ref} \sigma T_{ref}^4 + E_{ent} \quad (ec. 10)$$

Siendo: E_T^{ref} la energía emitida por el material de referencia ($W \cdot m^{-2}$), ϵ_{ref} la emisividad de referencia (0,95) (-) σ la constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} K^{-4}$), T_{ref} temperatura de la superficie de referencia registrada con el termopar (K) y E_{ent} Energía emitida por el entorno ($W \cdot m^{-2}$).

La congelación de las muestras se llevó a cabo durante 44 minutos a $-40^\circ C$ en un arcón de congelación de circulación forzada de aire (Modelo ACR45/87, Dycometal, S.L., Barcelona, España). En el interior del mismo se colocó una caja de poliéster, la cual se colocaba siempre en el mismo punto mediante señalizaciones realizadas en el interior del arco. La finalidad de esta caja es situar el soporte impreso en el que se colocaron las muestras en condiciones de régimen turbulento en el centro del congelador. El soporte se imprimió en PLA mediante impresión 3D. Como tapa del congelador en la que se situara la cara infrarroja, se empleó una lámina de poliéster extruido de (68x52x4). Esta tapa fue sellada mediante cinta adhesiva alrededor de todo su perímetro con la finalidad que el interior de arcón quedara completamente sellado.

Las medidas tomadas mediante los termopares tipo K y la cámara infrarroja se realizaban de forma autónoma y continua a lo largo de toda la prueba. En cambio, las medidas dieléctricas se tomaron manualmente en los tiempos establecidos de: 0'', 1', 2.5', 5', 7', 9', 11', 13', 18', 23', 28', 32', 36', 40' y 44'.

En la siguiente figura se presenta el montaje experimental, con los equipos utilizados, la disposición de los sensores.

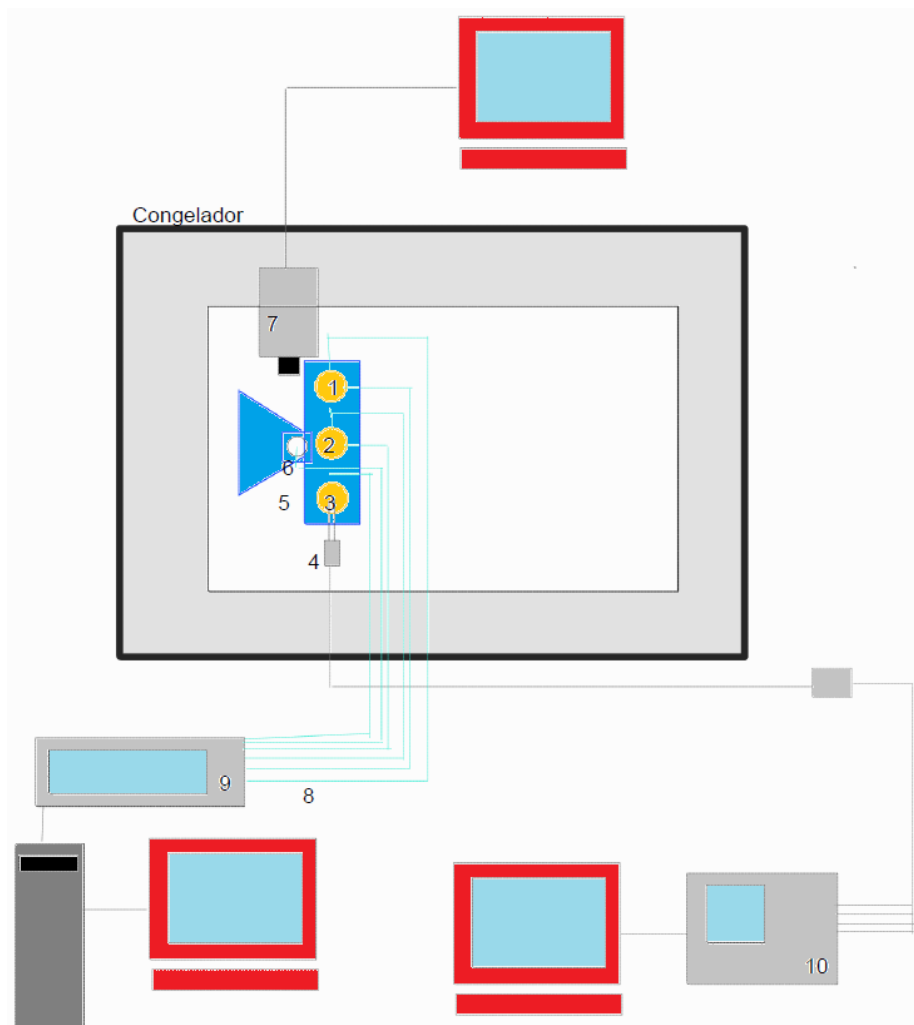


Figura 9. Esquema general del montaje experimental. 1. Muestra con termopares, 2. Muestra con medida infrarroja de la tempera, 3. Muestra medida dieléctrica, 4. Sensor de puntas para las medidas dieléctricas, 5. Soporte impreso en 3D, 6. Superficie de emisividad certificada, 7. Cámara termográfica, 8. Sensores termopares tipo K, 9. Multiplexor Agilet 34972A LXI Data Acquisition, 10. Analizador de impedancia.

3.2.2. Equipos

3.2.2.1. Congelador de flujo

Para llevar a cabo la congelación de las muestras se empleó el arcón de congelación con circulación forzada de aire, Modelos ACR45/87, Dycometal, S.L. (figura 10).



Figura 10. Congelador ACR45/87, Dycometal, S.L.

3.2.2.2. Datalogger para la medida de temperatura

Las mediciones de temperatura se llevaron a cabo mediante termopares tipo K conectados a multiplexor Agilent 34972A LXI Data Acquisition, el cual se conectó a un ordenador. En total se emplearon un total de 6 termopares tipo K: 2 conectados en el primer aguaymanto midiendo de igual forma la temperatura superficial y del centro de la muestra, 2 en el segundo aguaymanto midiendo de igual forma la temperatura superficial y del centro, 1 termopar midiendo la temperatura ambiental del congelador y un último termopar colocado sobre la superficie de emisividad certificada.



Figura 11. Multiplexor Agilent 34972A LXI Data Acquisition.

3.2.2.3. Analizador de Impedancias.

Para medir las propiedades dieléctricas de la fruta mientras se llevaba a cabo la congelación se empleó un sensor formado por dos agujas de acero de 10 mm de longitud y 0,8 mm de diámetro, separadas entre ellas 1,3 mm. El sensor se introdujo desde la parte inferior de la muestra a través de la piel del fruto. El sensor se desarrolló en el Instituto de Ingeniería de Alimentos (IAD-FoodUPV) de la Universidad Politécnica de Valencia. El sensor se conectó a un analizador de

impedancia 4294A (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, EE.UU.). El espectro dieléctrico se midió en la frecuencia de 40 Hz a 1MHz, calibrándose previamente en abierto y en cortocircuito.

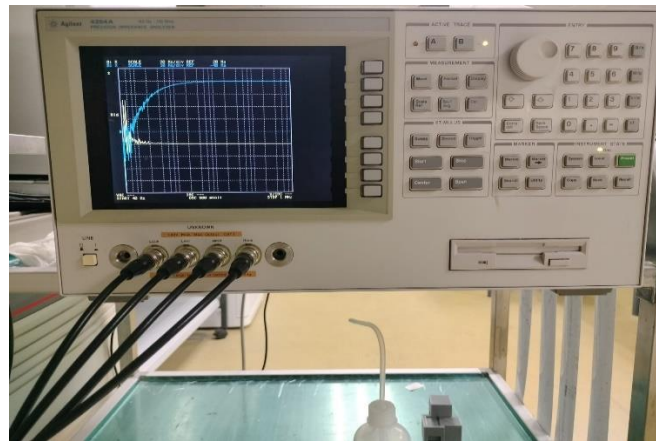


Figura 12. Analizador de impedancia 4294A.

3.2.2.4. Cámara infrarroja

La cámara utilizada es la Optris PI 160 Thermal Imager (Optris GmbH, Berlín, Alemania). Utiliza una matriz de plano focal bidimensional con 160 x 120 píxeles, un rango de espectral de 7,5-13 μ m, una resolución de 0,05 $^{\circ}$ C y una precisión de \pm 2%. La cámara utiliza Optris PI Connect (Optris GmbH, Berlín, Alemania). La cámara se encuentra directamente conectada a un ordenador para registrar todo el proceso. Se utilizó como referencia una superficie emisiva certificada de 25 mm de diámetro ($\epsilon = 0,95$) (Optris GmbH, Berlín, Alemania) para calcular la energía reflejada recibida por la cámara de infrarrojos.

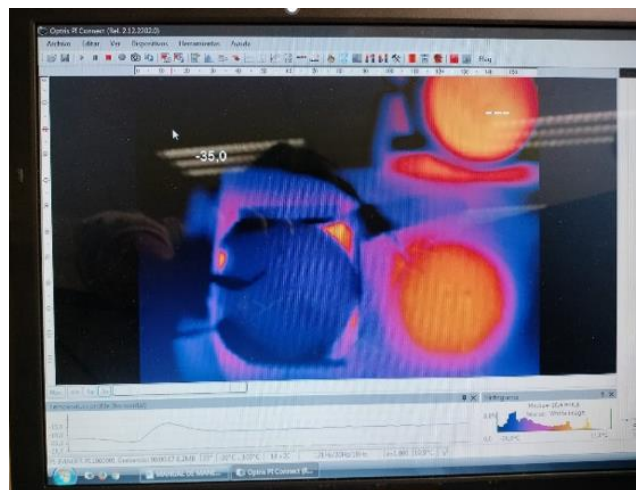


Figura 13. Vista de la cámara Optris PI 160 Thermal Imager.

3.2.2.5. Soporte impreso en 3D.

Previo al inicio de la fase experimental de este proyecto se llevó a cabo el diseño (figura 14) e impresión del soporte empleado.

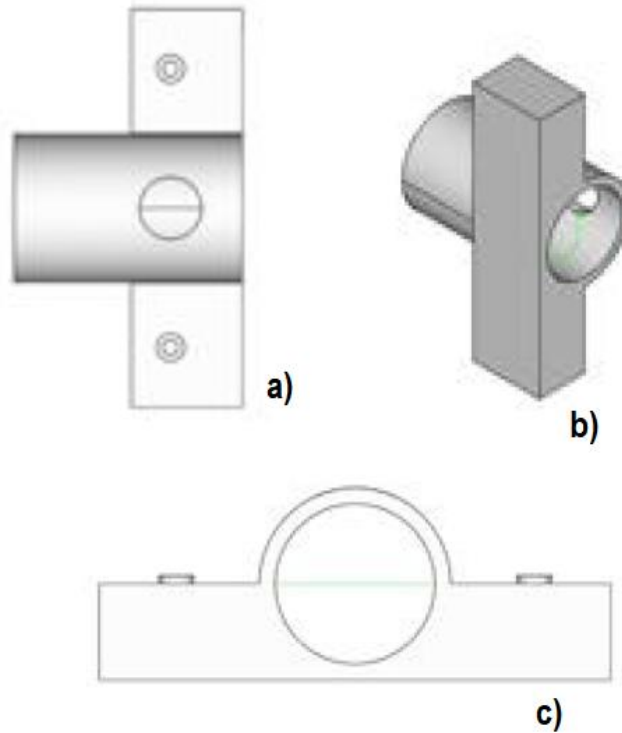


Figura 14. Vistas diseño 3D. a) Vista superior b) Vista inferior lateral c) Vista frontal trasera.

El soporte se imprimió en PLA mediante impresión 3D y posteriormente se le añadieron: la superficie de emisividad certificada, soporte en poliéster para el primer aguaymanto, cono canalizador de aire y el sensor de dos puntas para las medidas dieléctricas (figura 15).

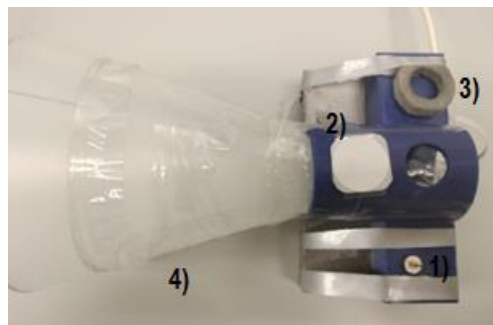


Figura 15. Soporte impreso 1) Sensor de dos puntas para medidas dieléctricas, 2) Superficie de emisividad certificada, 3) Soporte primer aguaymanto, 4) Cono canalizador de aire.

3.2.2.6. Calorimetría diferencia de barrido.

Se determinaron los valores de T_g' utilizando un calorímetro diferencial de barrido (DSC, 1 StareE System, Mettler-Toledo, Suiza). Las muestras de aguaymanto (10-20 mg) se colocaron en crisoles de aluminio de 40 μ L (Mettler Toledo, ME-00026763) y se pesaron en una balanza de precisión Mettler Toledo XS-205. Los crisoles se sellaron herméticamente. Se utilizó como referencia un crisol de aluminio vacío en todas las medidas. Se utilizó nitrógeno líquido como refrigerante que se vertió en el recipiente de refrigeración del equipo DSC. La calibración fue realizada por FlexCal, una función de calibración automática suministrada por los fabricantes. Para realizar los experimentos, las muestras se enfriaron a 5 $^{\circ}$ C/min hasta -50 $^{\circ}$ C, se mantuvieron durante 15 min a esa temperatura, y después se calentaron hasta la temperatura de annealing (-34 $^{\circ}$ C, basado en el trabajo de Vega-Galbez et al (2014).), se mantuvieron durante 60 min, enfriado a 5 $^{\circ}$ C/min hasta -50 $^{\circ}$ C, mantenido durante 15 min y después bajada a 5 $^{\circ}$ C/min hasta 20 $^{\circ}$ C. El análisis de transición vítrea permite conocer las temperaturas inicial, media y final del salto, una vez que se proporcionaron los límites de la transición, se tomó la temperatura media como T_g' . Las mediciones de DSC se realizaron por triplicado. Los datos obtenidos se analizaron con el software DSC proporcionado (software STARE, Mettler Toledo, Barcelona, España).

4. RESULTADOS

4.1. CURVA DE CONGELACIÓN

En la figura 16 se muestra la curva de congelación tomada en la superficie y el centro de la muestra durante el proceso de congelación. En la curva se muestran las distintas fases de la congelación explicadas en el apartado de introducción. El proceso se inicia con un descenso de temperatura de la muestra hasta alcanzar el subenfriamiento, aproximadamente a los 5 minutos en el centro de la muestra, a continuación, comienza el proceso de congelación hasta que aproximadamente a los 20 min comienza el proceso de enfriamiento del producto congelado. Si la muestra alcanza una temperatura suficientemente baja llegará a vitrificarse, es decir, alcanzara la temperatura de vitrificación.

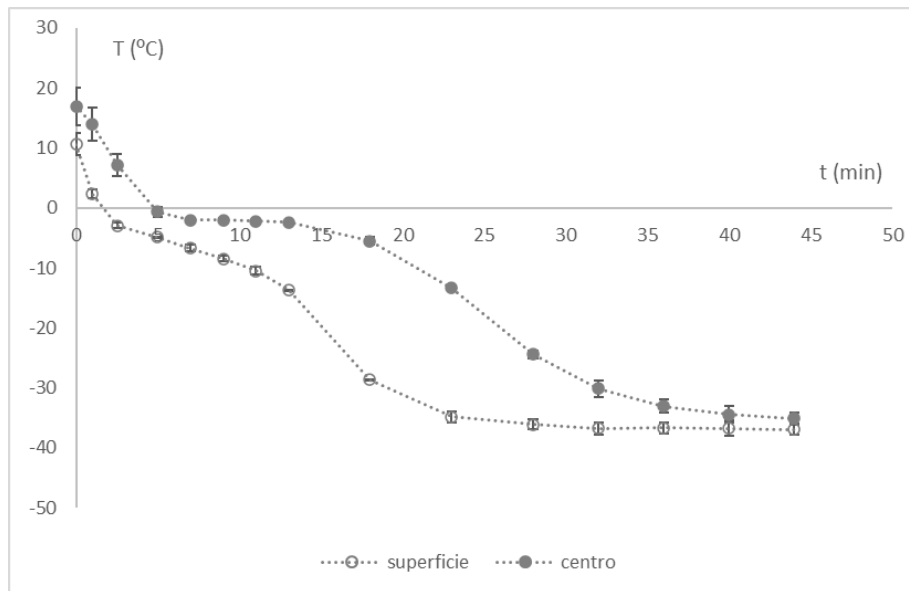


Figura 16. Evolución temperatura en la superficie y en el centro.

En cuanto a las temperaturas, la temperatura en la superficie del alimento disminuye más rápidamente y de una forma mas pronunciada que en centro del alimento, debido a que la transmisión de calor externa representa una barrera mayor a la transmisión de calor que la transmisión interna. En ambas curvas se pueden diferenciar las distintas fases de la congelación, explicadas en el párrafo anterior, empezando por la fase de enfriamiento en la cual inicia con la temperatura ambiente hasta antes de alcanzar los -5°C en la superficie del alimento. En este punto inicia la fase de congelación del agua del alimento momento en el cual la temperatura desciende más lentamente hasta los -15°C mientras tiene lugar la reducción de calor latente. Sobrepasado este punto inicia la fase de subenfriamiento en la cual la temperatura del alimento sigue descendiendo hasta estabilizarse a la temperatura de vitrificación.

4.2. CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA

Para poder determinar la temperatura de transición vítrea de la muestra se planteó un experimental de calorimetría espectral de barrido explicado en el apartado de materiales y métodos. En la figura 17 se puede observar la temperatura de transición vítrea (T_g), este punto se alcanzó cuando la temperatura de la muestra se encontraba a $-34,6^{\circ}\text{C}$.

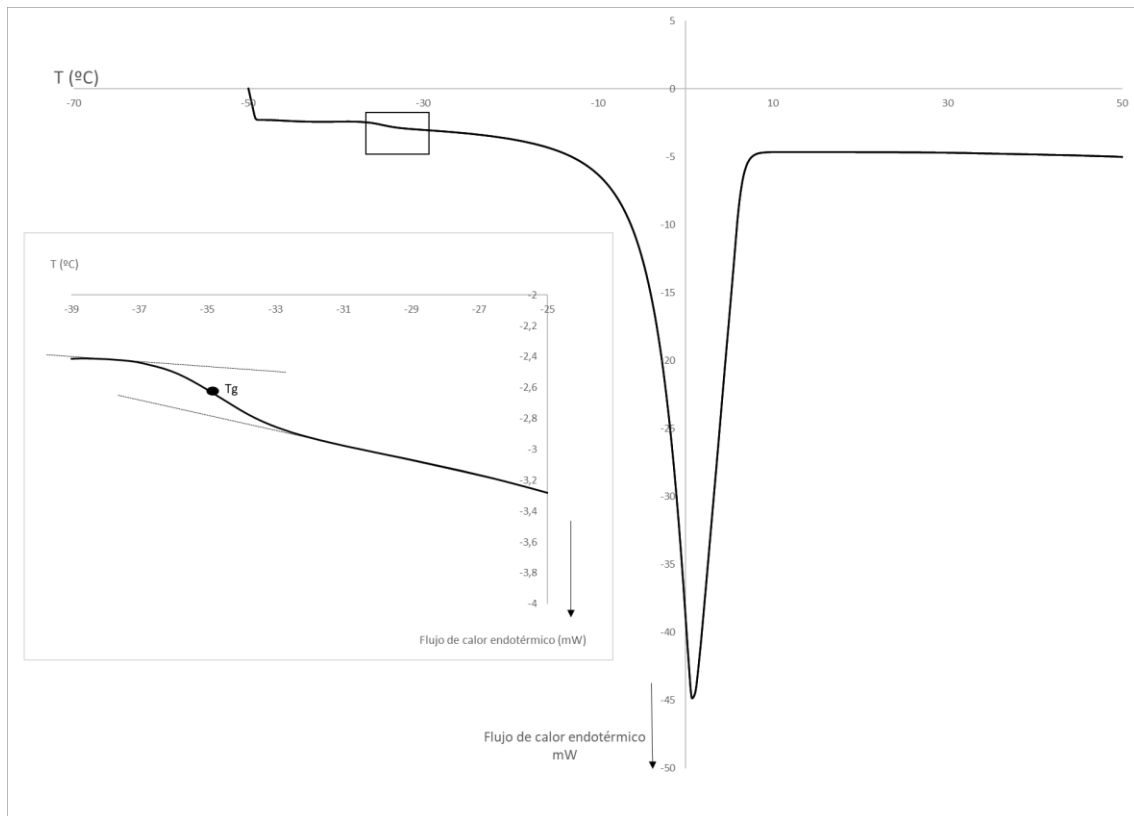


Figura 17. Termograma donde se muestra la transición vítrea de la muestra.

4.3. CÁLCULO DE LA EMISIVIDAD EN EL ESPECTRO DE INFRARROJO LEJANO (7-13 μm)

El cálculo de la emisividad se llevó a cabo empleando la temperatura de la superficie de emisividad conocida ($\epsilon = 0,95$), la cual sirvió de referencia. En la gráfica izquierda de la figura 18 se muestra la evolución de la emisividad durante el proceso de congelación, se puede observar que justo en la temperatura de transición vítrea la emisividad se estanca aproximadamente en 0,95. En la gráfica derecha de la figura 18, se muestra el efecto de la temperatura superficial sobre la emisividad, apareciendo 3 fases, la primera de ellas el efecto del descenso térmico en el producto no congelado, la segunda el proceso de congelación estable a una emisividad de 0,85 y posteriormente la fase de enfriamiento del producto congelado. Esta última fase termina con la vitrificación, la cual se puede apreciar nuevamente en la figura de la izquierda. El proceso de vitrificación comienza a una temperatura superficial de $-34,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ coincidiendo con el valor de transición vítrea obtenida por calorimetría espectral.

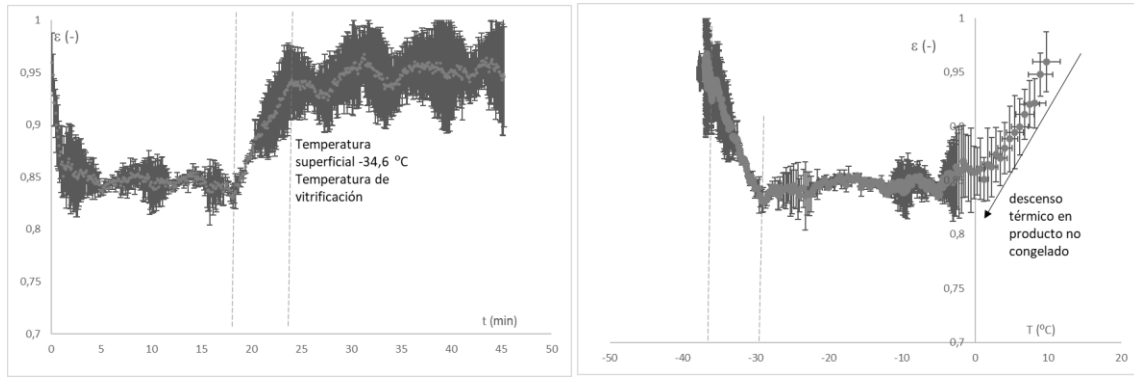


Figura 18. Emisividad calculada de la muestra durante el proceso de congelación; a la izquierda se muestra la evolución de la emisividad en el espectro de infrarrojo lejano y a la derecha se muestra la relación de la emisividad con la temperatura superficial.

Es decir que mediante la obtención de la emisividad de la muestra durante el proceso de congelación es posible determinar el punto de vitrificación de la superficie.

4.3. PROPIEDADES DIELECTRICAS

Con el fin de desarrollar una herramienta de monitorización del proceso de congelación mediante espectrofotometría de radiofrecuencia se desarrolló un sensor interno explicado en el apartado de materiales y métodos. En la figura 19 se muestra un ejemplo de la evolución del espectro de la constante dieléctrica en el rango de la radiofrecuencia (40 Hz a 1 MHz) de una muestra durante el proceso de congelación.

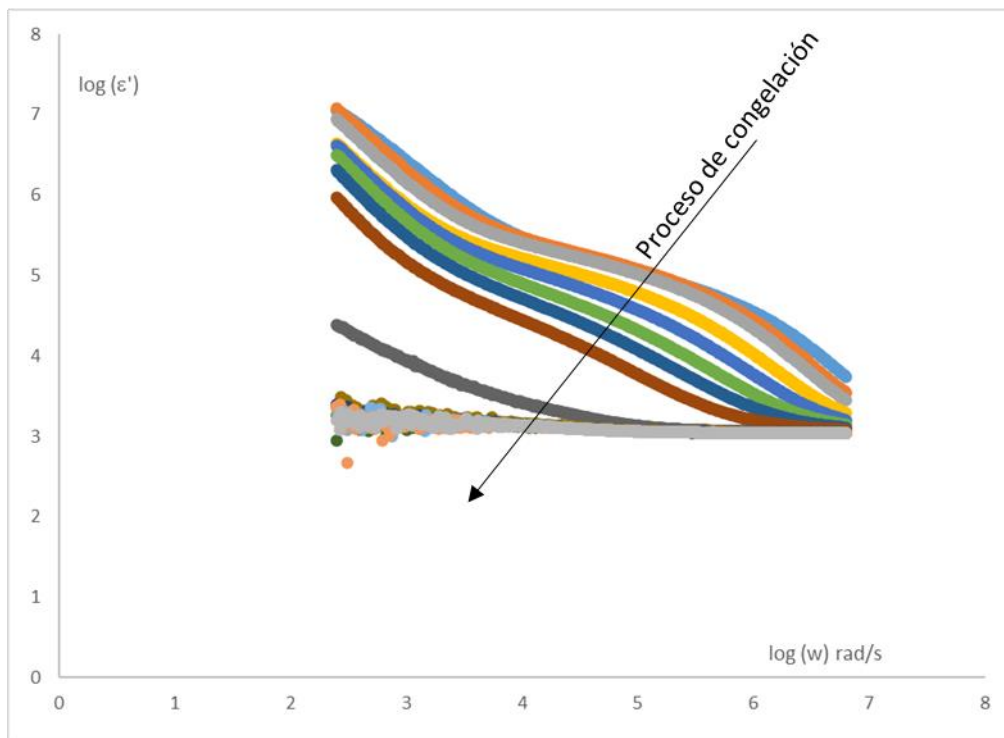


Figura 19. Evolución del espectro de la constante dieléctrica en el rango de la radiofrecuencia durante el proceso de congelación.

En esta figura se puede observar como el espectro de la constante dieléctrica se va aplanando comenzando con la región de menor frecuencia, o región alfa, donde el efecto de baja movilidad

de los iones va reduciendo el valor de dicha relajación. En el caso de alta frecuencia o dispersión beta, el aplanamiento por la aparición del fenómeno Maxwell-Wagner por la aparición de cristales de hielo se hace notable. Para poder determinar correctamente el efecto del proceso de congelación sobre estas dos relajaciones es necesario aplicar el modelo de Traffano-Schiffo, 2014 para determinar las relajaciones alfa y beta.

En las siguientes figuras se pueden determinar los siguientes puntos críticos en el proceso de congelación, siguiendo el modelo de Ross (2012), es posible determinar el punto de inicio de congelación determinando el máximo de la constante dieléctrica en la dispersión beta, ya que se ve afectado por el fenómeno de Maxwell-Wagner asociado a la tensión superficial del hielo. Este fenómeno también se puede observar en la dispersión alfa (figura 20c), ya que es una muestra con elevado número de electrolitos que cambian su movilidad al cambiar las relaciones de los mismos con el agua. El punto final de la congelación también es posible determinarlo, ya que, como se puede observar en la figura 20a hay un cambio de tendencia notable a una temperatura aproximadamente de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. La evolución de la constante dieléctrica en alfa por reducción de la movilidad de los iones, disminuye asociado en primer lugar a la crioconcentración y una vez termina el proceso de formación de cristales de hielo continúa disminuyendo la movilidad por el aumento de la viscosidad asociada a la disminución de la temperatura. La figura 20b muestra el factor de pérdidas en dispersión beta que presenta los mismos puntos críticos que la constante dieléctrica de la misma dispersión.

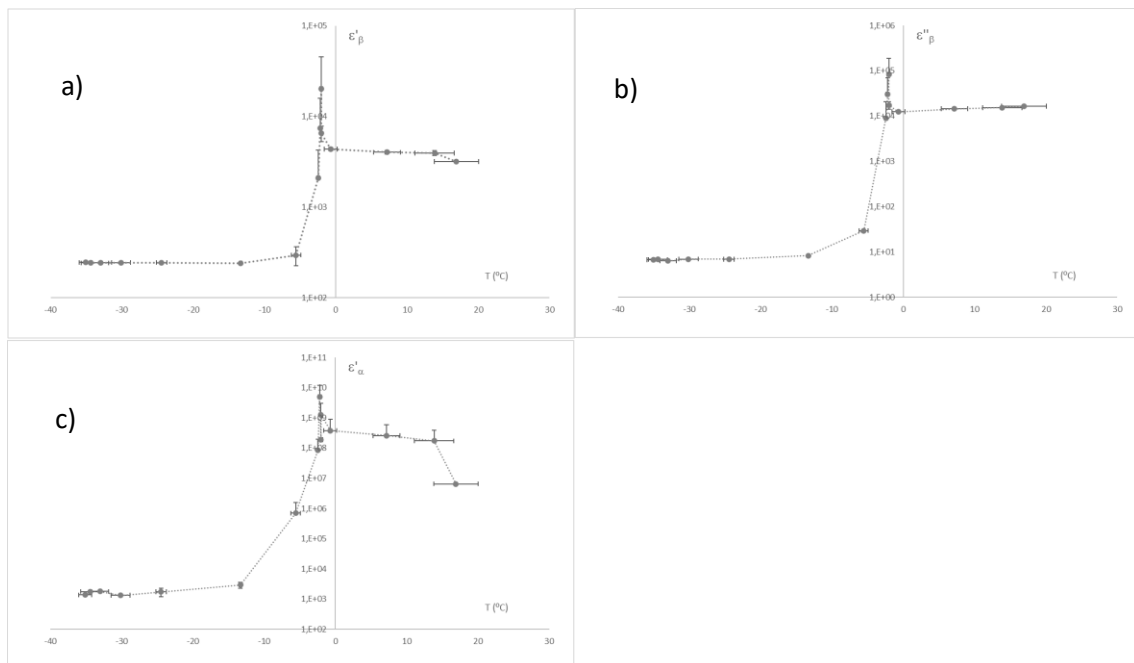


Figura 20. Propiedades dieléctricas con respecto a la temperatura interna, donde a) es la constante dieléctrica en dispersión beta, b) factor de pérdidas en la dispersión beta y c) constante dieléctrica en dispersión alfa.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten demostrar que la termografía infrarroja es una buena técnica para la monitorización del proceso de congelación de aguaymanto, mostrando la variación de temperatura superficial, siendo posible determinar ciertos puntos críticos gracias a la obtención de la emisividad durante el proceso como por ejemplo la transición vítrea.

La utilización de sensores basados en espectrofotometría de radiofrecuencia permite obtener no solo propiedades superficiales como la termografía infrarroja, sino también propiedades internas y medias de las muestras en el proceso de congelación, con el fin de determinar la aparición de puntos críticos que aseguren la correcta congelación de las muestras de aguaymanto.

6. BIBLIOGRAFIA

- Carbajal, Y. N., 2018: Caracterización citogenética de tres ecotipos de *Physalis* peruviana “Aguaymanto” provenientes del departamento de Cajamarca: Diversidad y evolución.
- Cárcel, J.A. & Clemente, G., 2022. Sistemas de medida de temperatura por infrarrojos.
- Castro-Giráldez, M., Balaguer, N., Hinarejos, E., & Fito, P. J., 2014. Thermodynamic approach of meat freezing process. Innovative Food Science & Emerging Technologies.
- Castro-Giraldez, M., Fito, P.J. & Toldrá, F., 2010. ‘Physical sensors for quality control during processing’, in Handbook of Meat Processing. Wiley-Blackwell Publishing USA.
- Chirife, J. & Ferro-Fontan, C., 1982. Water activity of fresh foods.
- Chirife, J.; Ferro-Fontán. C. & Vigo, S., 1981. A study of water activity prediction in molasses solutions. J. Agrlc. Food Chem., 29.
- Chuquizuta, T.S., 2023. Predicción de parámetros de calidad del aguaymanto durante su maduración fisiológica, deshidratación osmótica y congelación mediante espectroscopia de radiofrecuencia y microondas. Tesis doctoral.
- Coronado-Pais, N. & Rodríguez,C., 2014.Diseño de producto, proceso y planta para la producción industrial sostenible de néctar de aguaymanto.
- Dostert, N., Roque, J., Cano, A., La Torre, M. I., Weigend, M. & Luebert, F., 2012. Hoja botánica: Aguaymanto. *Physalis peruviana* L.
- Espinoza, R., 2016. Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta procesadora de aguaymanto deshidratado en la provincia de Celendín. Tesis de título. Universidad Nacional de Piura, Piura.
- Fischer, G., Miranda D., Piedrahita W. & Romero, J., 2005. Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Sede Bogotá.
- Franco, L.A., Matiz, G.E., Calle, J., Pinzón, R. & Ospina, L.F., 2007. Actividad antiinflamatoria de extractos y fracciones obtenidas de cálices de *Physalis peruviana* L. *biomedica*.
- Gómez, A. I., Cerón, T. G., Rodríguez, V. & Vázquez, M. M., 2007. Aspectos tecnológicos de la congelación en alimentos.
- Gutiérrez, L. F., Arias, S., Garzón, D., López, D. M. & Osorio, A., 2014. Transición vítrea en alimentos: sistemas binarios agua-carbohidratos.
- Hawton, M., 2019 Maxwell quantum mechanics, Physical Review A, 100.
- Kumar, P.K., Rasco,B.A.,Tang, J. & Sablani,S.S., 2020. Transiciones de estado/fase, recristalización del hielo y cambios de calidad en alimentos congelados sometidos a fluctuaciones de temperatura. Food Eng. Rev. 12.

- Machado-Velasco, K.M. & Vélez-Ruiz, J.F., 2008. Estudio de propiedades físicas de alimentos mexicanos durante la congelación y el almacenamiento. Revista Mexicana de Ingeniería Química, vol. 7, abril, 2008.
- Maroto, J.V., 2002. Horticultura Herbácea Especial. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Maroulis Z.B. & Saravacos G.D., 2003. Food process design. Marcel Dekker: New York. 5.
- Mello, P.A., Barin, J.S. & Guarnieri, R.A., 2014. Microwave Heating, in Flores, É.M. de M. (ed.) Microwave-Assisted Sample Preparation for Trace Element Analysis. Amsterdam: Elsevier.
- Meola, C., Boccardi, S. & Carlomagno, G. M., 2017. Infrared Thermography in the Evaluation of Aerospace Composite Materials. Woodhead Publishing.
- Miracco, J.L.; Alzamora, S.M.; Chirife, J. & Ferro-Fontán, C., 1981. On the water activity of lactose solutions. Journal of food science, 46: 1612.
- Molina-Terriza, G., Torres, J.P. & Torner, L., 2007. Twisted photons, Nature Physics, 3.
- Nelson, S.O. & Datta, A.K., 2001. Dielectric properties of food materials and electric field interactions, in Handbook of microwave technology for food application. CRC Press.
- Prior, B.A.; Casaleggio, C. & Van Vuuren, H.J.J., 1977. Psychrometric determination of water activity in the high a_w range. J. Food Protection, 40: 537.
- Puente, L. A., Pinto-Muñoz, C. A., Castro, E. S. & M. Cortés. 2011. Physalis peruviana Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit: A review. Food Research International 44 (7).
- Rahman, M.S.; Macahado-Velasco, K.M.; Sosa-Morales, M.E., & Velez-Ruiz, J.F., 2008. Freezing point: Measurement, data and prediction. In M.S.Rahman (Ed.) Food Properties Handbook.
- Rey, D.K. & Labuza, T.P., 1981. Characterization of the effect of solutes on the waterbinding and gel strength properties of carageenan. J. Food Sci., 46.
- Rivera, J. E., Herrera, A. & Rodríguez, L. E., 2003. Procesamiento de papa criolla precocida y congelada mediante la técnica de congelación individual (iqf), en seis genotipos promisorios de papa criolla (*solanum phureja*).
- Rodríguez, S. & Rodríguez, E., 2007. Efecto de la ingesta de Physalis peruviana (aguaymanto) sobre la glicemia postprandial en adultos jóvenes. Revista Médica Vallejana, 4(1).
- Sahagian M. E. & Goff, H. D., 1996. Fundamental aspects of the freezing process. L. E. Jeremiah (Ed.) Freezing effects on food quality. Marcel Dekker, Inc. Nueva York, EE. UU.
- Singh, R. P. & Heldman, D. R., 2001. Introduction to Food Engineering. Chapter 7: Food freezing.
- Talens, P., 2016. Determinación de la cantidad de agua congelable y no congelable presente en un alimento congelado.
- Telis V.R. & Sobral P.J., 2002. Glass transition for freeze-dried and air-dried tomato. Food Research International.
- Tomas, J.A., 2022. Fotónica aplicada a la monitorización de procesos y al desarrollo de sensores de la industria agroalimentaria.

Traffano-Schiffo, M.V. et al. (2014) Thermodynamic model of meat drying by infrared thermography, Journal of Food Engineering, 128.

Traffano-Schiffo, M.V., Castro-Giraldez, M. & Colom, R.J., 2017. 'Development of a Spectrophotometric System to Detect White Striping Physiopathy in Whole Chicken Carcasses', Sensors, 17.

Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J. & Bulnes, F.G., 2014. Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing, Sensors, 14.

Van der Sman, R.G.M., 2020. Impact of Processing Factors on Quality of Frozen Vegetables and Fruits, *Food Engineering Reviews*, 12.

Vega, S., 2019. Obtención de las isothermas de sorción de pollo a temperaturas próximas a la de congelación.

Villacreses, S. M., 2010. Optimización de un proceso de congelación en patacon congelado iqf.

ANEXO I. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030

Tabla 2: Relación del trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030.

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.		X		
ODS 3. Salud y bienestar.		X		
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.		X		
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.				X
ODS 12. Producción y consumo responsable.				X
ODS 13. Acción por el clima.				X
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				X

Tabla 3: Descripción de la alineación del TFM con los diferentes ODS.

ODS 2. Hambre cero
<p>La finalidad que persigue todo proceso de congelación es alargar la vida útil de los alimentos, reduciendo el deterioro fisicoquímico y bioquímico del alimento. Es por ello que se consigue alargar la vida útil del alimento y con ello que haya una mayor disponibilidad del mismo, favoreciendo la alimentación mediante el mismo durante un mayor periodo de tiempo o en lugares donde el alimento antes no podía llegar debido a un deterioro durante el transporte.</p> <p>Si somos capaces de preservar el aguaymanto durante un mayor periodo de tiempo y de hacer que llegue a zonas donde antes no podía ser transportado o lo hacia con una calidad nutricional menor, hacemos posible que la población pueda consumirlo y llevara una dieta más saludable.</p>
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.
<p>En un mundo en el que cada día se apuesta más por alimentos seguros y que aporten nutricionalmente a la dieta, se precisa de nuevos sistemas que permitan preservar los alimentos en su mejor estado nutricional y que al mismo tiempo reduzcan el efecto que este tratamiento pueda tener sobre las propiedades organolépticas del alimento, todo ello de una forma económicamente rentable.</p> <p>Es por ello que el desarrollo de nuevas técnicas que permitan este proceso en nuevos o antiguos productos, son fuente del desarrollo de nuevas industrias que lleven acabo su actividad mediante la aplicación de estas técnicas.</p>
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.

En relación con la ODS desarrollada anteriormente, el desarrollo de nuevas industrias lleva consigo la creación de nuevos puestos de trabajo y el desarrollo económico tanto de la zona donde se establezcan estas nuevas empresas como en los alrededores.