

Estimación experimental y teórica de la temperatura inicial de congelación del loche (*Cucurbita moschata* Duch.), la mashua (*Tropaeolum tuberosum* R&P.) y el yacón (*Smallanthus sonchifolius* P&E.) con diferentes contenidos de agua

Experimental and theoretical estimate of temperature initial freeze of loche (*Cucurbita moschata* Duch.), mashua (*Tropaeolum tuberosum* R&P.) and yacon (*Smallanthus sonchifolius* P&E.) with different water contents

Lucerito Ortiz¹

¹ Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo, Av Juan XXIII 391 Lambayeque 14013, Lambayeque, Perú.

Mg., ✉ lucero.ortiz@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-2006-1607>, Tel. + 51 943181465

<http://dx.doi.org/10.25127/riagrop.20223.847>

<http://revistas.untrm.edu.pe/index.php/RIAGROP>
revista.riagrop@untrm.edu.pe

Recepción: 04 de mayo 2022

Aprobación: 05 de junio 2022

Este trabajo tiene licencia de Creative Commons.
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0
International Public License – CC-BY-NC-SA 4.0



Resumen

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar por métodos experimentales y teóricos la temperatura inicial de congelación (T1) del loche, la mashua y el yacón con diferentes contenidos de agua. Se trabajó con un colector de datos, un túnel de congelación, termocuplas y un ordenador personal. Las materias primas fueron acondicionadas, escaldadas y congeladas, registrándose la temperatura por cada segundo. La temperatura inicial de congelación se determinó utilizando el perfil de tiempo y temperatura para cada muestra, finalmente los resultados experimentales fueron comparados con cuatro modelos matemáticos y se eligieron los que tuvieron mayor ajuste con los resultados. El mayor contenido en sólidos solubles, acidez y pH lo obtuvo el loche, seguido la mashua y el yacón. El mayor contenido de proteína, fibra, cenizas y carbohidratos lo obtuvo el loche, el yacón obtuvo el mayor contenido de grasas.

Palabras claves: Temperatura inicial de congelación, contenido de agua, tiempo de congelación.

Abstract

The objective of this research work was to determine by experimental and theoretical methods the initial freezing temperature (T₁) of loche, mashua and yacón with different water contents. We worked with a data collector, a freezing tunnel, thermocouples, and a personal computer. The raw materials were conditioned, blanched and frozen, recording the temperature for each second. The initial freezing temperature was determined using the time and temperature profile for each sample, finally the experimental results were compared with four mathematical models and those that had the best fit with the results were chosen. The highest content of soluble solids, acidity and pH was obtained by loche, followed by mashua and yacón. The highest content of protein, fiber, ashes, and carbohydrates was obtained by loche, while yacón obtained the highest fat content.

Keywords: Initial freezing temperature, water content, freezing time.

1. INTRODUCCIÓN

La base de la congelación es reducir la temperatura a una menor que la del punto de congelación, teniendo como finalidad alargar la vida útil, por consiguiente, mantener las características organolépticas de vegetales como el loche, la mashua y el yacón. Materias primas con potencial exportador que pueden ser conservadas aplicando bajas temperaturas. Un parámetro importante es conocer es la temperatura inicial de congelamiento (T_f), ya que ésta nos ayuda a definir cuál es la temperatura más baja a la que los alimentos pueden ser refrigerados. Rahman et al. (2009) observaron una depresión de la temperatura inicial de congelación como una consecuencia de los constituyentes de los alimentos.

Los alimentos que se analizaron en esta investigación fueron diferentes en sus componentes; como por ejemplo algunos de ellos contienen elevados porcentajes de carbohidratos y fibras, mientras que otros solamente contienen cantidades significativas de agua. Existen diferentes factores que afectan el proceso de congelación, como: el contenido de agua libre y ligada del alimento; las

características de otros componentes de éstos, los sólidos solubles e insolubles; y otros factores como el calor específico, la entalpía, y la difusividad térmica (Jie et al., 2003).

Otros factores que influyen en el congelamiento de los alimentos son la microestructura, el tamaño de partícula, la porosidad y ciertos aspectos biológicos (la especie, la edad y el estado de madurez) (Devine et al, 1996; Hamdami et al, 2004). Bainy et al. (2015), realizaron estudios para determinar la temperatura inicial de congelación (T_f) de la hamburguesa de tilapia (*Oreochromis niloticus*). En esta investigación concluyeron que el uso de congelación rápida mejoró el proceso de congelación, además, demostraron que el método de la curva de congelación, utilizando un aparato experimental y refrigeradores domésticos simples, mide la temperatura inicial de congelación de alimentos con alto contenido de agua. Betalleluz y Velezmoro (2001), determinaron la temperatura inicial de congelación de jugos de granada, granadilla, sandía y uva, utilizando el método de curvas de congelación. Trabajaron con el modelo de Ferro et al. (1981) para predecir la temperatura inicial de congelación de soluciones binarias de

fructosa y sacarosa. De esta manera concluyeron que, para los jugos de frutas, el modelo no hace buenas predicciones de la temperatura inicial de congelación cuando el contenido de sólidos totales es mayor que 10%. Jie et al. (2003), estudiaron la correlación entre la temperatura inicial de congelación y los sólidos solubles de once variedades de frutas. Los resultados mostraron que existe una alta correlación negativa entre los sólidos solubles y la temperatura de congelación. El modelo matemático fue: Y (temperatura inicial de congelación) = $0.146694 - 0.19555 X$, siendo X el contenido de sólidos solubles. Todas las variedades tuvieron curvas de congelación típicas. Boonsupthip y Heldman (2007), desarrollaron un modelo matemático para la predicción de la temperatura inicial de congelación y de la fracción de agua congelada basado en la concentración y el peso molecular de los componentes del producto. El modelo propuesto proporcionó un método efectivo para la optimización de las relaciones entre formulaciones de productos y el proceso de congelación.

Determinar la temperatura inicial de congelación (T_f) de estos alimentos, ayudan a predecir las propiedades térmicas, tiempos de congelación y descongelación con el fin de optimizar el proceso y la calidad del producto (Rahman y Driscoll, 1994; Ribero et al., 2007). En la actualidad, existe poca información sobre cuáles son las temperaturas más adecuadas de refrigeración del loche, la mashua y el yacón, por lo tanto, determinar la temperatura inicial de congelación de estos alimentos, nos ayuda a definir cuál es la temperatura más baja a la que pueden ser refrigerados, sin la aparición de los cristales de hielo y por ende del rompimiento de la estructura celular. Las materias primas como

el loche, la mashua y el yacón pueden tener diferentes contenidos de agua según el lugar de procedencia y su estado de madurez, por lo tanto, en esta investigación, vemos la influencia del contenido de agua de las materias primas, sobre la temperatura inicial de congelación.

En la literatura existen diferentes modelos matemáticos teóricos como el de Chen (1987, 1988), Singh y Mannapperuma (1990) y modelos empíricos como el de Schwartzberg (1976), Chang y Tao (1981), Hoo y McLellan (1987), Chen et al. (1990), Jie et al. (2003) y Pham (1996), los cuales predicen la temperatura inicial de congelación considerando algunos componentes en los alimentos, algunos de ellos solamente consideran el contenido de agua y sólidos (Chen et al., 1990; Jie et al., 2003), mientras que otros utilizan toda la composición del alimento (Boonsupthip et al., 2009; Boonsupthip y Heldman, 2007).

Sobre la base de nuestro conocimiento, no existen antecedentes de estudios presentados en la literatura sobre investigación del proceso de congelación, por lo que se experimentó la medición de la temperatura inicial de congelación del loche, mashua y yacón. El objetivo principal de este trabajo fue llenar esta falta. La temperatura inicial de la operación de congelación obtenida en un congelador con convección forzada fue determinada y los resultados se compararon con los diferentes modelos matemáticos predictivos. Quedándonos con el de mayor asertividad.

En el presente trabajo se determinó el modelo más apropiado para predecir el T_f del loche, la mashua y el yacón con diferentes contenidos de agua cada una. Así mismo, el modelo más apropiado se podrá utilizar para predecir el T_f de otros tubérculos o raíces de nuestro país.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Reactivos

Para los análisis físico-químicos se utilizaron los siguientes reactivos: Ácido sulfúrico concentrado, ácido clorhídrico concentrado, etanol, hidróxido de sodio, hexano, sulfato de cobre, sulfato de potasio, fenol y silica gel, todos de la marca Merck.

2.2. Métodos de análisis

Se caracterizó el loche, la mashua y el yacón, mediante análisis físico-químicos y proximales.

2.2.1. Análisis físico-químicos

- a) **Determinación del pH.** Se determinó el pH de las muestras mediante el método potenciométrico (AOAC - 945.27) (AOAC, 2005).
- b) **Determinación de sólidos solubles.** Se determinó el °Brix de las muestras usando el método refractométrico (AOAC -920.151) (AOAC, 2005).
- c) **Determinación de acidez.** Se determinó el % de acidez de las muestras por el método de titulación (AOAC - 942.15) (AOAC, 2005).

2.2.2. Análisis proximal

- a) **Agua.** Se determinó el agua de las muestras mediante el método gravimétrico, el cual consiste en almacenar las muestras en estufa a presión atmosférica a 105 °C por 14 a 16 horas hasta obtener un peso constante (Método AOAC – 950.46) (AOAC, 2005).
- b) **Proteína.** Se determinó mediante el método semi-micro Kjeldhal, utilizando el factor $N \times 6.25$ para llevar el nitrógeno a proteína total (Método AOAC – 928.08) (AOAC, 2005).

- c) **Grasa.** Se determinó mediante el método Soxhlet, empleando diversos solventes orgánicos (hexano) (AOAC – 960.39) (AOAC, 2005).
- d) **Fibra Bruta.** Se determinó mediante digestión ácida y alcalina (AOAC – 962.09) (AOAC, 2005).
- e) **Cenizas.** Se determinó por incineración de la muestra en mufla a 600°C por 6 horas (AOAC – 923.03) (AOAC, 2005).
- f) **Determinación de Carbohidratos.** Se determinó por diferencia entre los componentes encontrados.

2.3. Metodología experimental

En esta sección se describen los procedimientos utilizados para determinar la temperatura inicial de congelación (T_f), así como las pruebas realizadas para cumplir con los objetivos planteados en el presente trabajo.

2.3.1. Acondicionamiento del Loche, Mashua y Yacón

Las materias primas fueron seleccionadas, lavadas manualmente, peladas con un cuchillo de acero inoxidable y luego fueron cortadas en forma de cubos de 2x2x2 cm con la ayuda de un vernier.

Se determinó el contenido de agua inicial de las muestras de loche, mashua y yacón y se procedió a secarlas hasta obtener tres niveles diferentes de contenidos de agua.

2.3.2. Escaldado del Loche, la Mashua y el Yacón.

Luego de obtener los cubos de 2x2x2 cm se procedió a escaldar. El escaldado se realizó en agua en ebullición durante un periodo de 3.5 minutos para los casos del loche y la mashua y

a 50°C por 2 minutos para el yacón. En el caso del yacón no se aplicó el mismo tiempo y temperatura que las materias primas mencionadas anteriormente, ya que el yacón es sensible al calor, pues se hizo la prueba escaldando el yacón a 100°C por 3.5 minutos y luego de sacarlo del vaso de precipitación mostró una coloración verde caña.

2.3.3. Proceso de congelación.

Los cubos de 2x2x2 cm de loche, mashua y yacón con diferentes contenidos de agua y previamente escaldados fueron insertados con una termocupla (TPK-01, TECPEL) en el centro del cubo donde se registraron las temperaturas (Figura 1).

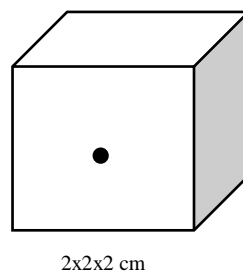


Figura 1. Posición central de inserción de la termocupla.

Las muestras fueron congeladas, en un equipo que contó con convección forzada, encendiéndose el botón de ventilación con 30 minutos de anticipación para asegurar la uniformidad de la temperatura en la cámara. Se registraron las temperaturas en el centro de cada cubo de 2x2x2 cm. Los perfiles de temperaturas de las muestras se tomaron por triplicado.

2.3.4. Medición de la temperatura.

Los valores de temperatura fueron adquiridos con una precisión de 0.2°C, por cada segundo. Se utilizó dos termocuplas tipo K (TPK-01, TECPEL), una fue incrustada hasta el punto céntrico geométrico de cada cubo de loche,

mashua y yacón y la otra termocupla se mantuvo suspendida en el medio de congelación, ambas termocuplas estuvieron conectadas a un multímetro digital (DTM – 5074, TECPEL®, Taiwán) y éste a la vez conectado a un ordenador personal (Toshiba Core I5). Con la ayuda del *software* de recolección de datos (DTM 500SW, TECPEL®, Taiwan), se adquirieron los datos de temperatura en tiempo real (Figura 2).

Una vez obtenidas las curvas de congelación se determinó el T_f utilizando el historial de tiempo y de temperatura de cada muestra (método de la curva).

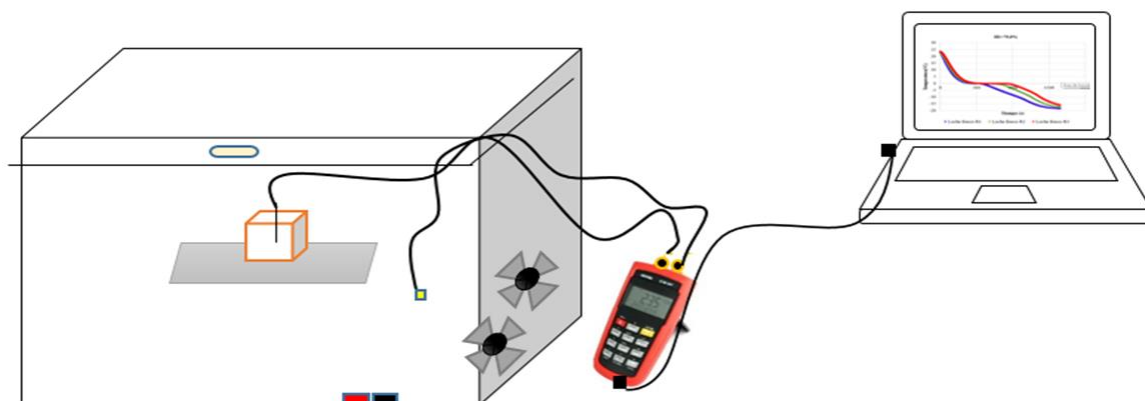


Figura 2. Sistema de adquisición de datos de temperatura durante la congelación de los vegetales.

2.3.5. Determinación de la temperatura inicial de congelación a diferentes contenidos de agua.

La temperatura inicial de congelación se determinó utilizando el perfil de tiempo y temperatura para cada muestra.

Para el caso de los vegetales que no mostraron subenfriamiento marcado, se utilizó el método de la tangente para determinar el T_f , y para el caso de muestras que presentaron subenfriamiento marcado se determinó el T_f cuando ocurre el incremento de temperatura.

Conociendo la temperatura inicial congelación experimental se obtuvo un promedio de la temperatura inicial de congelación para luego ser comparado con los diferentes modelos matemáticos predictivos, los cuales trabajan utilizando el contenido de agua, sólidos solubles y toda la composición del alimento.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran los modelos predictivos que se aproximan al valor experimental de la temperatura inicial de congelación a diferentes contenidos de agua de acuerdo a la materia prima.

Con respecto al asertividad de los diferentes modelos predictivos de la temperatura inicial de congelación podemos indicar que los mejores modelos predictivos de T_f fueron los de Jie et al. (2003) y Boonsupthip y Heldman (2007).

Para realizar un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias, se agruparon a las aguas de los vegetales en 3 categorías (H1, H2 y H3). En Tabla 2 se muestran los valores brutos de T_f del loche, mashua y yacón en las tres categorías de agua.

Tabla 1. Modelos predictivos que se aproximan al valor experimental de la temperatura inicial de congelación a diferentes contenidos de agua de acuerdo a la materia prima

Bloque Agua	Materia prima		
	Loche	Mashua	Yacón
H1 79.8 – 92.49	Jie <i>et al.</i> (2003) y Chang y Tao (1980)	Chen <i>et al.</i> (1990) y Boonsupthip y Heldman (2007)	Boonsupthip y Heldman (2007) y Chen <i>et al.</i> (1990)
H2 70.68 – 72.34	Jie <i>et al.</i> (2003) Chang y Tao (1980)	Jie <i>et al.</i> (2003) y Boonsupthip y Heldman (2007)	Chen <i>et al.</i> (1990) y Boonsupthip y Heldman (2007)
H3 61.55 – 68.21	Chang y Tao (1981) y Jie <i>et al.</i> (2003)	Jie <i>et al.</i> (2003) y Boonsupthip y Heldman (2007)	Chen <i>et al.</i> (1990) y Boonsupthip y Heldman (2007)

Tabla 2. Valores brutos de Tf del loche, mashua y yacón en las tres categorías de aguas

Bloque Agua	Materia prima		
	Loche	Mashua	Yacón
H1 79.80 – 92.49	-0.6	-0.7	-1.4
	-0.7	-0.8	-1.2
	-0.6	-1.0	-1.1
H2 70.68 – 72.34	-0.9	-2.9	-4.5
	-0.8	-2.6	-5.3
	-0.8	-3.9	-5.0
H3 61.55 – 68.21	-1.2	-3.6	-7.1
	-1.3	-3.7	-7.7
	-1.2	-3.1	-8.3

Como se presenta en la Tabla 2, en el bloque de agua H1 y H2 para el loche, el modelo de Jie et al. (2003) es el que mejor se aproximó al valor experimental de la temperatura inicial de congelación. Del mismo modo el modelo de Jie et al. (2003) y Boonsupthip y Heldman (2007) se adecuaron a la temperatura inicial de congelación de la mashua en los bloques de agua H2 y H3.

El modelo de Boonsupthip y Heldman (2007) obtuvo valores muy cercanos de temperatura inicial de congelación al obtenido experimentalmente con el yacón, específicamente en el bloque de agua H1.

El modelo de Jie et al. (2003) es un modelo predictivo que correlaciona la temperatura inicial de congelación con los sólidos solubles, pues según la literatura y los análisis proximales realizados, el mayor contenido de sólidos solubles en estado fresco lo tiene el loche por ello el modelo de Jie et al. (2003) se ajusta a la temperatura inicial de congelación experimental del loche tanto para H1 y H2. También el modelo es asertivo a valores de temperatura inicial de congelación de la mashua para el bloque de agua H2 y H3. El modelo hace una excepción en el yacón cuyos valores están alejados al valor experimental.

Con este modelo matemático se puede demostrar la relación entre la temperatura inicial de congelación y los sólidos solubles de frutas y en nuestro caso también de vegetales, ahora, con tan solo medir los sólidos solubles, podemos obtener la temperatura inicial de congelación fácilmente lo cual es importante determinar para su correcto almacenamiento y procesamiento. Por lo tanto, Jie et al. (2003) es un modelo matemático asertivo para determinar la temperatura inicial de congelación de manera rápida

Realizando el análisis de varianza (ANVA) al diseño de bloques completamente al azar (DBCA) de la temperatura inicial de congelación (Tabla 2), se observó que existe diferencia significativa entre los tipos de vegetales ($p < 0.05$) y las categorías de agua ($p < 0.05$).

Realizando pruebas de comparación de medias, mediante la prueba de Tukey, se concluyó que existe diferencias entre las medias del T_f para cada tipo de vegetal. Esto se evidencia en la Figura 3 donde se aprecia las diferencias entre los valores de (T_f) para cada tipo de vegetal.

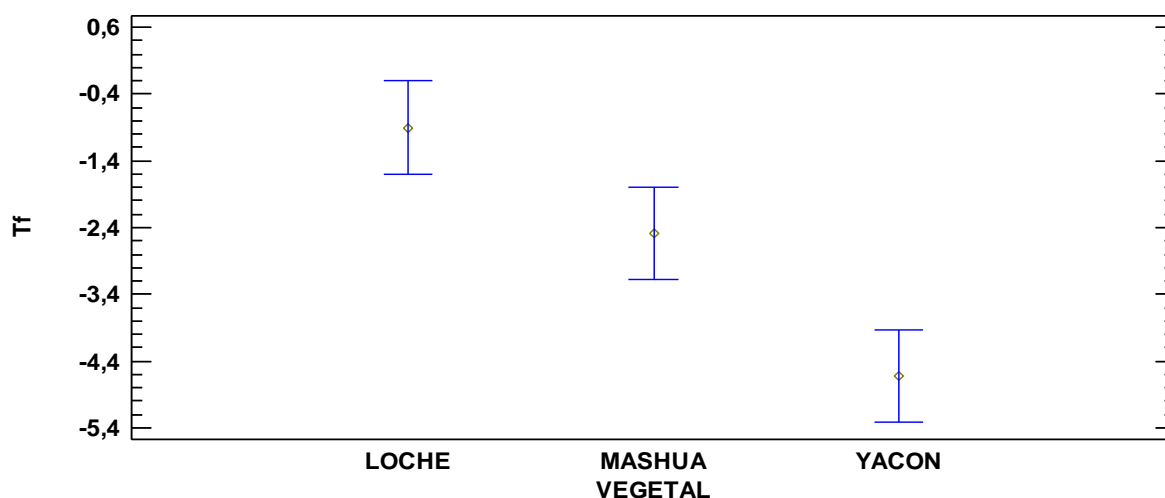


Figura 3. Diferencias entre los valores de (T_f) para cada tipo de vegetal.

De la misma forma se analizaron las medias entre los diferentes valores de aguaes, donde se determinó que los valores medios de T_f en las categorías de aguaes 2 y 3 (70.68 – 72.34 y 61.55 – 68.21 respectivamente) fueron similares, pero diferentes de la categoría 1 (79.80 – 92.49), la cual

corresponde a los valores de T_f cuando las muestras son frescas. Esto se puede evidenciar en el Figura 4 donde se muestran los valores medios de T_f para cada tipo de bloque (Categorías de aguaes).

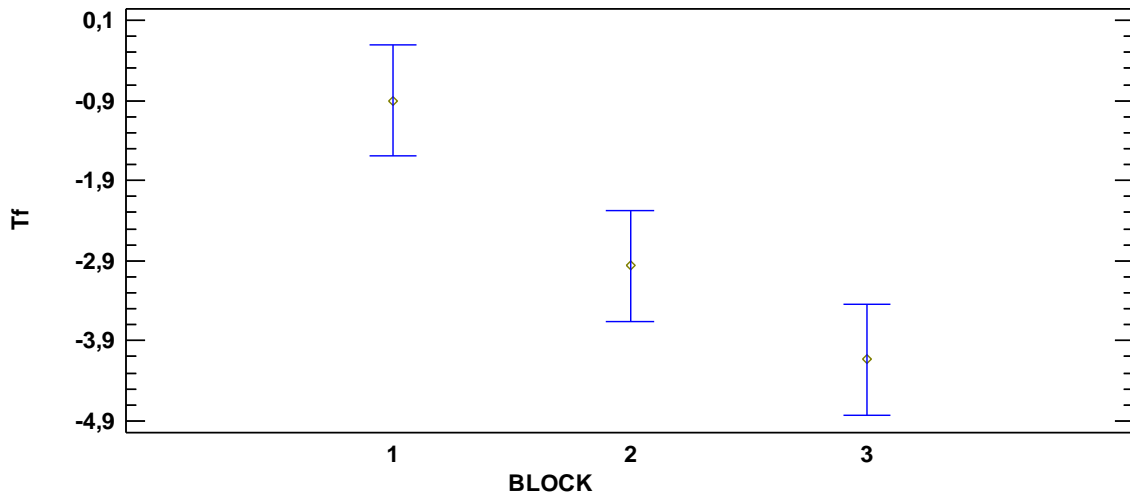


Figura 4. Valores medios de T_f para cada tipo de bloque (Categorías de aguas).

4. CONCLUSIONES

Se determinó de manera experimental y teórica la temperatura inicial de congelación del loche, la mashua y el yacón en estado fresco (79,80 - 92,49% de agua), y a dos diferentes aguas (70,68 - 72,34% y 61,55 - 68,21%). Encontrando que existe una relación directa entre el contenido de agua y la temperatura inicial de congelación; decreciendo el T_f a medida que disminuye el agua de las materias primas.

Se compararon los resultados experimentales de las temperaturas iniciales de congelación, encontrando que los modelos predictivos de Jie et al. (2003) y Chang y Tao (1980) fueron los más apropiados para predecir el T_f del loche a diferentes contenidos de agua. El modelo predictivo de Boonsupthip y Heldman (2007) fue el más apropiado para predecir el T_f de la mashua y el yacón a diferentes contenidos de agua.

Se concluye que el modelo predictivo de Boonsupthip y Heldman (2007) es una buena ecuación de predicción para el T_f de algunos

alimentos como la mashua y el yacón por el alto contenido de agua.

Declaración de intereses

Ninguna.

Referencias

- AOAC. (2005). Official Methods of Analysis (H. William & G. J. Latimer (eds.); 18a ed.).
- Bainy, E.M., Corazza, M.L. y Lenzi, M.K. (2015). Measurement of freezing point of tilapia fish burger using differential Scanning calorimetry (DSC) and cooling curve method. *Journal of Food Engineering*, 161: 82-86.
- Betalleluz-Pallarde, IL. y Velezmoro-Sanchez, C., (2001). Predicción del punto inicial de congelación de jugos de granada (*Punica Granatum L.*), granadilla (*Passiflora nítida H.B.K.*), sandía (*Citrullus lanatus*) y UVA (*Vitis vinífera*). *Anales Científicos*, UNALM, Perú.
- Boonsupthip, W. y Heldman, D.R. (2007). Prediction of frozen food properties during freezing using product composition. *J Food Sci*, 72(5):E254-63.
- Chen, C.S. (1987a). Relationship between water activity and freezing point depression of food systems. *Journal of Food Science*, 52(2): 433-435.
- Chen, C.S. (1988). Bound water and freezing point depression of concentrated orange juices. *Journal of Food Science*, 53(3): 983-984.

- Chang, H.D. & Tao, L.C. (1981). Correlation of enthalpies of food systems. *J. Food Sci*, 46: 1493.
- Chen, C.S., Nguyen, T. K. & Braddock, R.J. (1990). Relationship between freezing point depression and solute composition of fruit juice systems. *J. Food Sci*, 55(2), 566- 569.
- Devine, C.E., Bell, R., Lovatt, S., Chrystall, B.B. y Jeremías, L.E. (1996). *Las carnes rojas. En Congelación Efectos sobre la Calidad de los Alimentos*. Jeremías, LE (ed.). Marcel Dekker, Nueva York, 51- 84p.
- Ferro F., Chirife J. & Boquet R. (1981). Water Activity in multicomponent nonelectrolyte solutions. *Journal of Food Technology*, 16:553-559.
- Hamdami, N., Monteau, J.Y. & Le Bail, A. (2004). Transport properties of a high porosity model food at above and sub-freezing temperaturas. Part 1. Thermophysical properties and water activity. *Journal of Food Engineering*, 62, 373-383.
- Hoo, A.F. & McLellan, M.R. (1987). The contributing effect of apple pectin on the freezing point depression of apple juice concentrates. *Journal of Food Science*, 52(2): 372-374, 377.
- Jie, W., Lite, L. & Yan, D. (2003). The correlation between freezing point and soluble solids of fruits. *Journal of Food Engineering*, 60, 481-484.
- Pham, Q.T. (1996). Prediction of calorimetric properties and freezing time of foods from composition data. *J. Food Eng*, 30:95-107.
- Rahman, M.S., Machado-Velasco, K.M., Sosa-Morales, M.E. y Velez-Ruiz, J.F., (2009). *Freezing point: measurement, data and prediction*. En: Rahman, M.S. (Ed.), *Food Properties Handbook*, second ed. CRC Press, Boca Raton, 154-192p.
- Rahman, M.S. y Driscoll, R.H. (1994). Freezing points of selected seafoods (invertebrates). *International Journal of Food Science and Technology*, 29(1): 51-61.
- Ribero, G.G., Rubiolo, A.C. y Zorrila, S.E., (2007). Initial freezing point of mozzarella cheese. *J. Food Eng*, 81, 157-161.
- Singh, R.P. y Mannapperuma, J.D. (1990). *Development in food freezing*. In *Biotechnology Food Process Engineering*, Schwartzberg, H.G. and Rao, M.A. (eds.). Marcel Dekker, New York.
- Schwartzberg H.G. (1976). Effective heat capacities for the freezing and thawing of food. *J. Food Sci* 41:152-6.