

Determinación de la difusividad térmica y los perfiles de temperatura de la papa entera (*Solanum tuberosum* L.) durante el calentamiento en un medio líquido

Determination of the thermal diffusivity and the temperature profiles of the whole potato (*Solanum tuberosum* L.) during heating in a liquid medium

José Francisco Moro Pisco ¹, Walter Francisco Salas-Valerio ².

¹Universidad Nacional Federico. Perú. Villarreal. ✉ josemoro63@hotmail.com

²Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú ✉ wfsalas@lamolina.edu.pe

Recibido 2020-09-22 Aceptado 2020-11-19

Resumen El objetivo de este trabajo fue determinar la difusividad térmica y modelar la transferencia de calor y la temperatura de la papa (*Solanum tuberosum* L.) durante el calentamiento en un medio líquido. Se utilizaron papas de la variedad Yungay. La metodología experimental se realizó mediante cinco etapas, tales como: determinación de las dimensiones características de la papa (diámetro equivalente), determinación de la difusividad térmica (α), obtención experimental de la temperatura a diferentes posiciones dentro de la papa con una temperatura del medio líquido a 70°C, el modelamiento se hizo con la ecuación de transferencia de calor por conducción en una sola dirección y la solución de dicha ecuación se realizó usando la metodología de las diferencias finitas (hacia adelante) el cual se elaboró de un programa de computación en Visual Basic Excel® para simular los perfiles de temperatura y por último se compararon los valores simulados con los valores experimentales. Los valores de la difusividad térmica se obtuvieron utilizando la curva de calentamiento de las muestras a las temperaturas de a 70°C. El valor del diámetro equivalente fue de 7,6536 cm. El valor experimental de la difusividad térmica (α) de la papa fue $1,49 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ la cual está dentro de lo esperado para raíces y tubérculos. Así mismo, se compararon los perfiles de temperaturas simulados con los perfiles de temperaturas experimentales en diferentes posiciones y se encontró que la temperatura central logró fijar con la temperatura en el centro de la papa con un nivel de error entre 1,37% y 7,83%.

Palabras claves: Calentamiento; Diferencias finitas; simulación; Tubérculos; Transferencia de calor

Abstract The objective of this work was to determine the thermal diffusivity of the potato and to model heat transfer and temperature in the potato (*Solanum tuberosum* L.) during heating in a liquid medium. Potatoes of the Yungay variety were used. The experimental methodology was carried out through five stages, such as: determination of the characteristic dimensions of the potato (equivalent diameter), determination of thermal diffusivity (α), experimental obtaining of the temperature at different positions within the potato with a temperature of liquid medium at 70 °C, modeling was done using the heat transfer equation by conduction in only one direction and the solution of said equation was performed using the methodology of finite differences (forward) was developed from a computer program in Visual Basic Excel® to simulate the temperature profiles and finally the simulated values were compared with the experimental values. The thermal diffusivity values were obtained using the heating curve of the samples at temperatures of 70 °C. The equivalent diameter value was 7,6536 cm. The experimental value of the thermal diffusivity (α) of the potato was $1,49 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ which is within the expected range for roots and tubers. Likewise, the simulated temperature profiles were compared with the experimental temperature profiles in distinct positions, and it was found that the central temperature managed to fix with the temperature in the center of the potato with an error level between 1.37% and 7, 83%.

Keywords: Potato, thermal diffusivity, finite differences, simulation

Introducción

La papa o patata (*Solanum tuberosum* L.) es una planta que pertenece a la familia Solanácea, originaria de América del Sur, cultivada en todo el mundo hace parte de la base de la alimentación de millones de personas. En el campo de la tecnología de alimentos, existen una gran cantidad de aplicaciones más allá de las convencionales para este tubérculo, desde los cosméticos y el alcohol hasta el papel prensa pasando por bolsas ecológicas de plástico a base de almidón de papa (FAO 2008).

La transferencia de calor es un proceso dinámico en el que la energía térmica se transfiere de un cuerpo con una temperatura más alta a otro cuerpo con temperatura más baja. La diferencia de temperatura entre la fuente de calor y el receptor de calor es la fuerza impulsora en la transferencia de calor (Zheleva y Kamburova 2009).

Los modelos numéricos y observacionales particularmente de procesos alimentarios, ha recorrido un largo camino y se ha convertido en una parte integral de la investigación y el diseño. De este modo, se espera el uso prudente de estos modelos para proporcionar una mejor eficiencia en el sector de la alimentación, proporcionando una mejor comprensión de los procesos y acortar el ciclo de diseño del producto y el proceso (Datta y Rattray, 2009). Los más complicados problemas de calor y transferencia de masa se resuelven con éxito mediante el uso de cualquiera de las técnicas de diferencias finitas o técnicas de elementos finitos. Estos métodos numéricos son capaces de manejar cualquier tipo de condición de frontera y la geometría del producto (Ansari, 1998).

Por la importancia del procesamiento industrial de la papa, el presente trabajo tiene como objetivo obtener la difusividad térmica y los perfiles de temperatura durante el calentamiento por inmersión en un medio líquido (agua), donde los efectos del calentamiento y el enfriamiento de los alimentos

durante el procesamiento tienen influencias extremadamente importantes sobre la calidad y las características del producto. También se presenta un modelo de la temperatura en el proceso de calentamiento en diferentes posiciones del producto; se elabora un programa de cómputo utilizando la técnica de diferencias finitas en VisualBasic Excel® para simular el calentamiento del producto a diferentes temperaturas y diferentes posiciones que finalmente se validaron los resultados mediante la comparación de los datos experimentales con los simulados por el programa elaborado.

Materiales Y Metodos

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el laboratorio de análisis Físicoquímico de los Alimentos de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Las papas que se usaron en este estudio fueron de la variedad Yungay cultivadas en el Distrito de Canta, Provincia de Lima.

Para el procesamiento y la ejecución del experimento se utilizaron termómetro (0 - 100°C), Pinzas, Cinta métrica, Cuchillo de acero inoxidable, Silicona, Cronómetro, Rejilla Soporte, Escalímetro, Vernier, Papelógrafo cuadrado. Los equipos utilizados incluyeron un Baño María (22°C - 100°C), Marca: Memmert, Modelo: DIN12876-3-KL-2; Sensor térmico de 1/162 pulgadas de diámetro; un transmisor con precisión de 0,25°C y resolución de 0,1°C entre el rango de 10 a 130°C, con una respuesta a cambios de 63% en 8 segundos (agua como medio) Tipo Pt100; Software Visual Basic Excel V6.0; proyector de transparencias; equipo de medición de la difusividad térmica de tipo cilíndrico de material acero inoxidable con radio (r) = 24 mm y altura (L) = 240 mm.

El experimento se realizó en cinco etapas: 1. Determinación de las dimensiones características de la papa; 2. determinación de la difusividad térmica (a); 3. obtención experimental de la temperatura a diferentes posiciones en la papa; 4. elaboración de un programa de simulación

en Visual Basic Excel® para simular los perfiles de temperatura y 5. validación del programa de simulación.

Determinación de las dimensiones de la papa

Para la determinación de la dimensión característica de la papa se utilizó un papelógrafo cuadrulado en la pared a una distancia de 2 m del proyector y con ayuda de regla graduada se determinó la escala o relación entre la medida real de 1 cm y la medida proyectada de 1 cm. La papa previamente lavada se proyectó para determinar su diámetro equivalente y se señaló mediante una línea continua en todo el contorno de la sombra de la papa proyectada en el papelógrafo. A partir de esta proyección se determinó a escala 50:1 las medidas del diámetro equivalente de la papa que fueron proyectadas en el papelógrafo y se efectuaron los cálculos del diámetro equivalente y ubicación de la posición requerida para la colocación del sensor. El diámetro equivalente se determinó tomando el promedio de las tres mediciones obtenidas (largo, ancho y alto). Se utilizó una papa y cada prueba se realizó en triplicado para cada experimento.

Determinación de la difusividad térmica (a)

Esta propiedad termofísica es obtenida bajo condiciones de conducción de calor en estado no estacionario, para su cálculo se utilizó la ecuación general de conducción de calor, convenientemente integrada, siendo su resolución analítica realizada al asumir que se calienta un cuerpo cilíndrico infinito, aplicándose entonces la serie de Fourier correspondiente. El historial “temperatura-tiempo”, se obtuvo del centro geométrico de la muestra que está preformada como cilindro y bajo determinadas condiciones de entorno. La forma de calentamiento resulta del agua que recircula a través del espacio dejado entre la pared lateral del equipo de medición de difusividad térmica y la del cilindro concéntrico

que contiene material aislante, tal como se muestra en la Figura 1. Las dimensiones del equipo de medición de difusividad térmica de acero inoxidable, donde se colocó las muestras de papa, fueron de 48 mm de diámetro interior (D) y 240 mm de longitud (L). El sensor forma parte del sistema de adquisición de datos de temperatura. Un módulo de conexión, uno de almacenamiento, el software de aplicación y un computador completan el sistema.

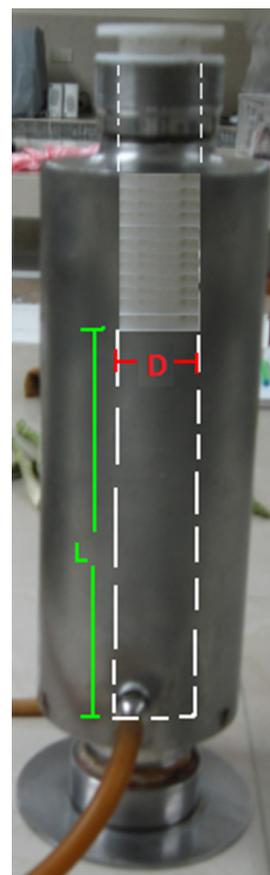


Figura 1. Equipo de medición de difusividad térmica

Cada papa fue cortada en cubos de 0,5 cm de lado vertidos en la cámara cilíndrica del equipo de medición de difusividad térmica, dicha cámara es cerrada colocando el tapón donde se aloja el sensor. El sensor ha sido programado para registrar la temperatura del centro geométrico de la mezcla cada minuto que dura el experimento. El sistema se conecta al equipo de baño maría y mediante baño térmico se recircula el agua a través de la primera y la segunda

cámara. Terminado el periodo de calentamiento de 70°C, se cambia el baño termostatizado para iniciar la etapa de enfriamiento a 20°C. Una vez fría la muestra, se retira el sensor y se ubica en el módulo de conexión para transmitir los datos registrados de temperatura-tiempo al computador para su almacenamiento y posibilitar así su posterior evaluación.

Para la determinación de la difusividad térmica se utilizó el procedimiento descrito por Muñoz (2002) y la ecuación 1 desarrollada por Dickerson en 1965 y se trabajó con el primer término de la función de primera clase de Bessel, cuyo primer parámetro es calculado a partir del número de Biot.

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{T - T}{T_e T_0} = 1,6 e^{-5,78 F_0} \quad (1.1)$$

Donde, el Número de Fourier (F_0) es:

$$F_0 = \frac{\alpha \theta}{r^2} \quad (1.2)$$

Es decir:

$$\frac{T - T}{T_e T_0} = 1,6 e^{-5,78 \frac{\alpha \theta}{r^2}} \quad (1.3)$$

$$\text{Log} \left(\frac{T_e - T_0}{T_e - T} \right) = \left(\frac{\alpha}{0,398 r^2} \right) \theta - \text{Log} 1,6 \quad (1.4)$$

$$y = mx - \text{Log} 1,6 \quad (1.5)$$

Donde:

T_e = Temperatura de las paredes del cilindro (°C)

T_0 = Temperatura inicial de la muestra (°C)

T = Temperatura en el punto más frío (°C)

θ = Tiempo transcurrido de transferencia de calor (s)

r = Radio del cilindro (m)

α = Difusividad Térmica (m²/s)

m = Pendiente de la recta (1/s)

Por lo tanto, la determinación de la difusividad térmica (α) se encontraría de la pendiente de la

curva del gráfico de la relación de temperatura con el tiempo donde:

$$m = \frac{\alpha}{0,398 r^2} \quad (1.6)$$

T_e = Temperatura de las paredes del cilindro a los 70°C, temperatura del medio líquido

T_0 = Temperatura inicial de la muestra (°C), la primera temperatura registrada a los cero (0) minutos.

T = Temperatura en el punto más frío (°C), última temperatura registrada a los 30 minutos.

Obtención experimental de la temperatura (T_{ij}) en diferentes posiciones de la papa.

La determinación de la temperatura se realizó con diferentes papas de diferente tamaño, para posiciones diferentes, respectivamente. Primero se efectuó la calibración del sensor y con un Vernier se tomaron las medidas del diámetro mayor de la papa. Se realizó la división del radio en cinco partes proporcionales, para determinar las posiciones:

$$r = \text{Radio de la Papa} = \text{Radio equivalente de la Papa} (r_e) \quad (1.7)$$

$$\Delta r = \frac{r}{5} \quad \text{División del radio de la Papa} \quad (1.8)$$

Las posiciones de la papa fueron

$$\frac{1}{5} r = 1\Delta r = 1ra \text{ Posición} = [0,0] = \text{Centro} = \text{Radio equivalente} (r_e) \quad (1.9)$$

$$\frac{2}{5} r = 2\Delta r = 2da \text{ Posición} = [0,2] \quad (1.10)$$

$$\frac{3}{5} r = 3\Delta r = 3ra \text{ Posición} = [0,4] \quad (1.11)$$

$$\frac{4}{5} r = 4\Delta r = 4ta \text{ Posición} = [0,6] \quad (1.12)$$

$$\frac{5}{5} r = 5\Delta r = 5ta \text{ Posición} = [0,8] \quad (1.13)$$

Se programó el equipo Data Trace para registrar la temperatura por minuto durante 30 minutos. Se colocó el sensor en las posiciones

determinadas, luego de efectuar la medida respectiva de su diámetro equivalente con el Vernier y así sucesivamente se realizó en las otras posiciones, en papas diferentes; previamente calibrado el sensor para cada medición de temperatura a realizar. La penetración del sensor se realizó en la papa en su posición correspondiente, según ecuación (1.14) y solamente utilizando como cierta parte de medida de la longitud total de 76 mm de la sonda del Sensor utilizado, tal como se muestra en la Figura 2.

$$Posición = \frac{Penetración}{Radio\ de\ la\ Papa} \quad (1.14)$$

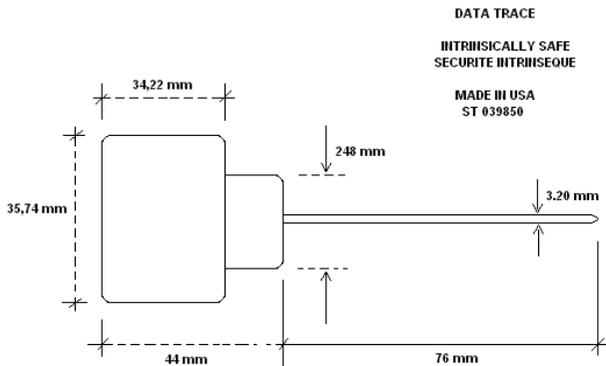


Figura 2. Dimensiones 33,74mm (Φ), 44 mm (largo) y 3,20 mm (Φ), 76 (Line) mm

Al cabo de los 30 minutos se retiró el equipo baño maría, se separa el sensor de la papa y se pone en enfriamiento a medio ambiente por 10 minutos para después obtener los datos de la interfaz del sensor para ser compilados por el software. Finalmente, los datos de temperatura que registró el sensor se utilizan para graficar las curvas de cada posición y luego obtener la difusividad térmica (α); tal como se muestra en la Figura 3.

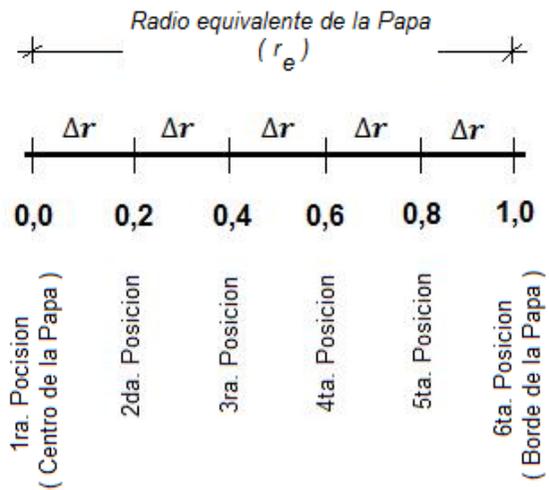


Figura 3. Posiciones del sensor en cada una de las divisiones del radio de la papa

Simulación de los perfiles de temperatura

Se utilizó el lenguaje Visual Basic Excel® y se escribió un programa de computadora para calcular la distribución completa de la temperatura transitoria dentro de la papa durante el calentamiento de inmersión. El programa de simulación se resolvió por el método de diferencias finitas, utilizando el método explícito (hacia adelante). Las suposiciones en el desarrollo del modelo matemático son que el tubérculo está simétricamente cerca de su eje longitudinal y que la difusividad térmica es isotrópica, es decir que posee las mismas propiedades físicas en todas las direcciones. Para obtener la solución de transferencia de calor para una esfera por el método de separación de variable, se utilizó otra ecuación (1.16) que proviene de la ecuación general (1.15) ya que es la ecuación diferencial que representa la transferencia de calor en estado no estacionario de una esfera. Mustafa (2011)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \alpha \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1.15)$$

Si : α = constante, la ecuación (1.15) se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.16)$$

Donde, la ecuación (1.16) está dada en una sola dimensión, es decir en una sola dirección (r) y las condiciones iniciales y de frontera son:

$$T_{(r,0)} = T_0 \quad (1.17)$$

$$\frac{dT}{dr} = 0; \quad \text{cuando: } r = 0 \quad (1.18)$$

$$-K \frac{dT}{dr} = h(T_R - T_W); \quad \text{cuando: } r = R \quad (1.19)$$

Donde:

T_0 = Temperatura central de la papa ($^{\circ}\text{C}$)

R = Radio de la esfera (m)

K = Conductividad térmica de la papa ($\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{K}}$)

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{K}}$)

T_R = Temperatura experimental en las diferentes posiciones ($^{\circ}\text{C}$)

T_W = Temperatura del agua de baño térmico ($^{\circ}\text{C}$)

Es decir, con las condiciones de frontera siguientes:

$$T(r, t = 0) = 20,152^{\circ}\text{C}$$

$$T(r = R, t) = 70^{\circ}\text{C}$$

Por lo tanto, la solución por diferencias finitas de las derivadas parciales de la ecuación (1.16) según Mustafa (2011) son:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{(i+1,j)} - 2T_{(i,j)} + T_{(i-1,j)}}{\Delta r^2} \quad (1.20)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{(i+1,j)} - T_{(i-1,j)}}{2\Delta r} \quad (1.21)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{(i,j+1)} - T_{(i,j)}}{\Delta t} \quad (1.22)$$

Es decir, la ecuación (1.16), será:

$$\begin{aligned} \frac{T_{(i+1,j)} - 2T_{(i,j)} + T_{(i-1,j)}}{\Delta r^2} + \frac{2}{r} \frac{T_{(i+1,j)} - T_{(i-1,j)}}{2\Delta r} = \\ = \frac{1}{r} \frac{T_{(i,j+1)} - T_{(i,j)}}{\Delta t} \quad (1.23) \end{aligned}$$

Pues para calcular los nodos de la esfera entre el centro y la superficie, según Mustafa (2011) será:

$$T_{(i,j+1)} = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} \left[\left(\frac{i-2}{i-1} \right) T_{(i-1,j)} + \left(\frac{\Delta r^2}{\alpha \Delta t} - 2 \right) T_{(i,j)} + \left(\frac{i}{i-1} \right) T_{(i+1,j)} \right] \quad (1.24)$$

Y para calcular el nodo central de una esfera según, Mustafa (2011); será:

$$T_{(i,j+1)} = \left(1 - \frac{6\alpha \Delta t}{\Delta r^2} \right) T_{(1,j)} + \frac{6\alpha \Delta t}{\Delta r^2} T_{(2,j)} \quad (1.25)$$

La difusividad térmica (α) para cada corrida del programa fue independiente de la temperatura. Para hacer los resultados más generales en la aplicación, éstos se presentaron en variables dimensionales a través de una gráfica.

Al desarrollar el modelo matemático, se asume que toda la transferencia de calor dentro de la papa es por conducción, el volumen de la papa es constante, no hay transferencia de masa desde o dentro de la papa, aunque ocurren cambios físicos o químicos durante el calentamiento son insignificantes en la producción de calor.

Validación del programa de simulación

Para la validación, el método experimental se hizo aplicando el método descrito por Muñoz (2002), el cual se realizó usando el sensor térmico para mayor precisión, mientras que con el Programa VisualBasic Excel® se aplicó también con igual precisión la ubicación de las posiciones donde se colocó el sensor térmico para obtener los perfiles de temperatura. Pues con los resultados por el método explícito (hacia adelante) se realizó la simulación de los valores de temperatura y se aplicó la Prueba MSE (Mean Squared Error) para determinar el error cuadrático medio entre los resultados simulados y los resultados experimentales.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para verificar el ajuste de las curvas experimentales con las curvas simuladas, se aplicó la Suma del Error Medio (MSE), tal como se indica en la ecuación (1.26), el cual consiste en evaluar las diferencias que existen entre las temperaturas reales y simuladas a lo largo del calentamiento.

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (X_P - X_e)^2 \quad (1.26)$$

Así mismo, para validar la simulación por diferencias finitas por el método explícito se utilizó el Módulo del porcentaje de desviación (%E), el cual consiste en que tanto se asemeja el valor de temperatura experimental con el valor simulado.

$$\% E = \frac{100}{m} \frac{\sum |X_e - X_p|}{X_e} \quad (1.27)$$

Donde:

X_P Valor de temperatura predicha (°C)

X_P Valor de temperatura experimental (°C)

m Numero de datos de temperatura.

RESULTADOS Y DISCUSION

Dimensiones de la papa

Las mediciones ejecutadas fueron muy importantes para determinar las medidas del contorno de la imagen proyectada sobre el papelógrafo, ya que después se logró determinar la posición, y se colocó el sensor con la penetración requerida de lo cual se obtuvo:

Radio de la Papa (r_e) = 3,8268 cm = 0,038268 m

En la Tabla 1 se presentan las dimensiones del radio equivalente (r_e) de las papas que fueron utilizadas para el experimento del calentamiento en un medio líquido, y en la Tabla 2 se muestra

las posiciones y penetración del sensor por cada muestra de papa

Determinación de la difusividad térmica (α) de la papa.

Se obtuvo utilizando el método descrito por Muñoz (2002), donde los datos experimentales obtenidos en el laboratorio fueron los resultados de dos muestras en el proceso de evaluación, tomando en cuenta la y la linealización de la ecuación (1.4):

$$\text{Log} \left(\frac{T_e - T_o}{T_e - T} \right) = \left(\frac{\alpha}{0,398 r^2} \right) \theta - \text{Log} 1,6$$

$$y = m(x) - b$$

Donde, "m" es la pendiente de la curva determinada en la Figura 4 y Figura 5.

Se determinó la difusividad térmica (α) teniendo en cuenta el radio del equipo del medición de difusividad termica (r) = 0,024 m y utilizando la ecuación (1.6). La pendiente (m) de la curva de la Figura 4 y Figura 5 fue de $6,47 \times 10^{-4}$ 1/s y $6,48 \times 10^{-7}$ 1/s; respectivamente, donde la difusividad térmica (α) para ambas curvas de penetración de calor fue $1,48 \times 10^{-7}$ m²/s y $1,49 \times 10^{-7}$ m²/s .

Dichos resultados obtenidos fueron similares a los datos reportados por Singh y Heldman (2009) de $1,23 \times 10^{-7}$ m²/s y $1,70 \times 10^{-7}$ m²/s , y por Vidaurre (2015) de $1,40 \times 10^{-7}$ m²/s y $1,46 \times 10^{-7}$ m²/s . Farinu y Baik (2007) mencionan que la variación de los datos se puede deber al estado de madurez, lugar de cosecha y variedad de la materia prima.

Obtención experimental de la temperatura (T_{ij}) a diferentes posiciones en la papa.

Con el sensor previamente calibrado se obtuvieron los datos de temperatura por cada una de las 5 posiciones de la papa por triplicado.

Tabla 1. Promedio del radio equivalente (r_e) de tres muestras de papa por cada proyección efectuada sobre el papelógrafo

Proyecciones mostradas	Muestras de papa	Radio equivalente (re) de 3 muestras de papa en cada proyección mostrada sobre el papelógrafo (cm)	Promedio del Radio equivalente (re) de las muestras de papa (cm)	Promedio total del Radio equivalente (re) de todas las muestras de papa (cm)
Proyección 01	Muestra 01	3,850	4,112	3,8268
	Muestra 02	4,485		
	Muestra 03	4,000		
Proyección 02	Muestra 04	3,570	4,098	
	Muestra 05	4,465		
	Muestra 06	4,260		
Proyección 03	Muestra 07	4,420	3,692	
	Muestra 08	3,320		
	Muestra 09	3,335		
Proyección 04	Muestra 10	3,510	3,622	
	Muestra 11	3,695		
	Muestra 12	3,660		
Proyección 05	Muestra 13	3,345	3,610	
	Muestra 14	4,240		
	Muestra 15	3,245		

Tabla 2. Posiciones y penetración del Sensor por cada muestra de papa

Posición del Sensor por cada muestra de papa	Penetración del Sensor por cada muestra de papa (cm)	Radio equivalente (re) de la papa en cada proyección mostrada sobre el papelógrafo (cm)	Promedio total del Radio equivalente (re) de las posiciones (cm)
1ra. Posición $1\frac{r}{5} = 1\Delta r = [0,0] = \text{centro}$	3,850 4,485 4,000	3,850 4,485 4,000	3,8268
2da. Posición $2\frac{r}{5} = 2\Delta r = [0,2]$	2,856 3,572 3,408	3,570 4,465 4,260	
3ra. Posición $3\frac{r}{5} = 3\Delta r = [0,4]$	2,652 1,992 2,001	4,420 3,320 3,335	
4ta. Posición $4\frac{r}{5} = 4\Delta r = [0,6]$	1,404 1,478 1,464	3,510 3,695 3,660	
5ta. Posición $5\frac{r}{5} = 5\Delta r = [0,8]$	0,669 0,848 0,649	3,345 4,240 3,245	

El sensor sumergido en agua a 70°C a baño maría, estuvo en constante agitación con la finalidad de que la transferencia de calor por convección fuera lo más uniforme posible.

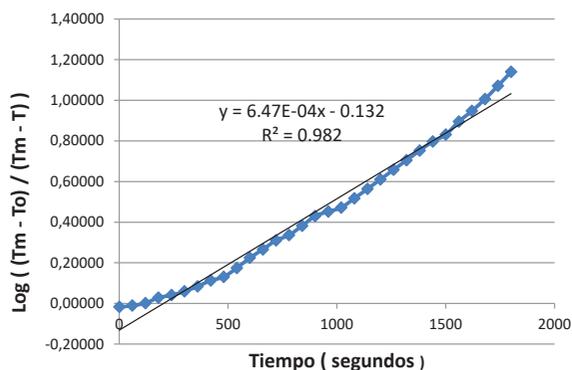


Figura 4. Curva de penetración de calor de la 1ra. Evaluación experimental

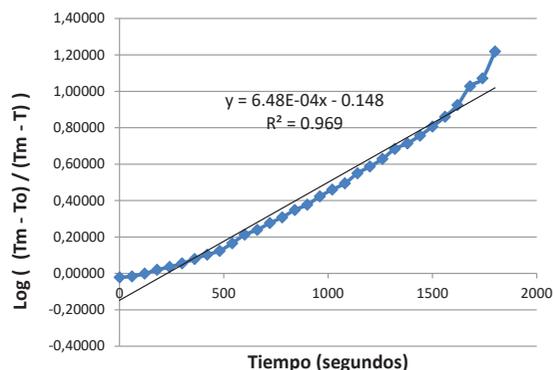


Figura 5. Curva de penetración de calor de la 2da. Evaluación experimental

Perfiles de temperatura en cada posición del sensor

Al realizar estudios de transferencia de calor y masa en el blanqueamiento de papas, Califano y Calvelo (1983) reportan que teniendo en cuenta a la papa como una matriz sólida (almidón, celulosa, sustancias pépticas y algunas proteínas) existe una fuerte disminución de la concentración de azúcares reductores cerca de la superficie de la papa, debido a la difusión de dichos azúcares al blanqueador y que, al mismo tiempo en la región central, la concentración aumenta en un 10% con respecto al valor inicial, como consecuencia de la hidrólisis enzimática. Así mismo, Farinu y Baik (2007) indican que las propiedades térmicas de los materiales alimenticios también dependen del porcentaje de espacios vacíos, la forma, el tamaño y la disposición de los espacios vacíos, la homogeneidad y la orientación de las fibras. Las temperaturas registradas por el sensor por cada minuto, durante los 30 minutos en posición 1 y 5 de la papa se representan en la Figura 6 y 7.

Conjunto de curvas de cada posición del Sensor

Durante los estudios realizados de la distribución de temperatura en camote durante el calentamiento por inmersión, Wadsworth

y Spadaro (1970) lograron determinar experimentalmente la distribución de la temperatura transitoria para varios tamaños de camote durante el calentamiento por inmersión a 55°C, 70°C, 80°C y 90°C y también fueron calculados la difusividad térmica (α) con base en curvas de calentamiento. Aquí se presenta el conjunto de curvas obtenidas por cada posición del sensor que representa el perfil de temperaturas que fueron registradas cada 30 minutos (Figura 8).

Programa de simulación en visualbasic excel® para simular los perfiles de temperatura.

Considerando el reporte de Yanniotis y Sundén (2007) el cual manifiesta que al estudiar el método explícito y el método implícito de diferencia finita, afirma que un esquema explícito simple con una malla moderadamente fina e incrementos de pasos (tiempo) puede proporcionar soluciones altamente confiables y precisas. Se comprobó que el programa elaborado en VisualBasic Excel® para simular las temperaturas mediante la transferencia de calor por diferencias finitas y por el Método Explícito (hacia adelante) resultó ser estable y convergente, la cual fue validada con la solución numérica. Dichos resultados conciernen con Vidaurre (2015) que modeló en papa y loche, la

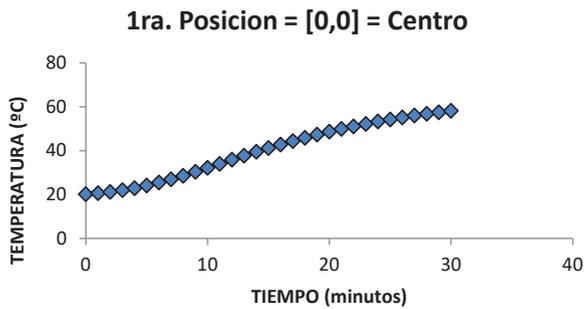


Figura 6. Perfil de temperatura en la 1ra. Posición.

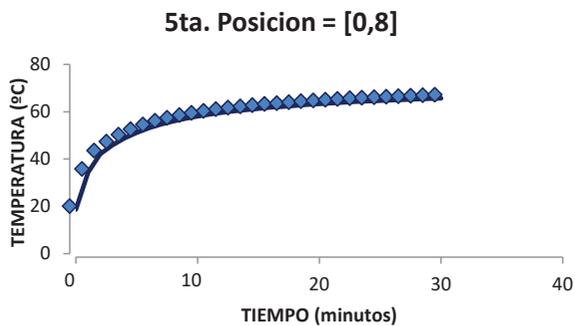


Figura 7. Perfil de temperatura en la 5ta. Posición.

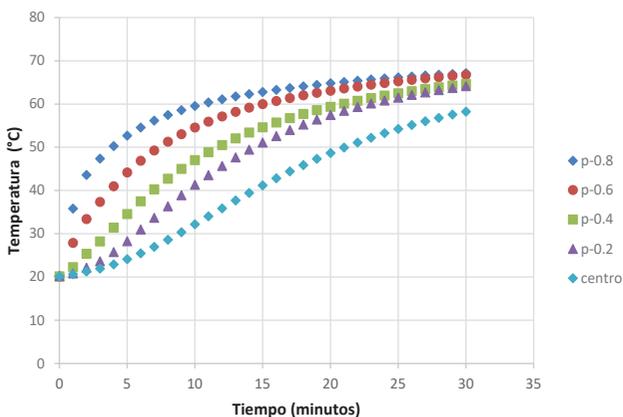


Figura 8. Perfil de temperatura estimado por el sensor en cinco posiciones de la papa

ecuación de difusión de calor en coordenadas cartesianas en tres dimensiones (3D), mediante el método analítico y el método numérico de diferencias finitas explícitas.

Validación del programa de simulación

Para la validación de los resultados simulados con los valores experimentales, se comparó el perfil de temperaturas simulado con el perfil de temperatura experimental en diferentes posiciones (Figura 9 10). Se comprobó que existe semejanza con un nivel de error en la simulación entre 1,37% y 7,83% al comparar las temperaturas obtenidas analíticamente con la simulación. La temperatura central experimental se fijó adecuadamente con el centro de la papa y así sucesivamente con los demás puntos experimentales hasta el Nodo 9; respectivamente (Figura 12). Los resultados de la simulación de la transferencia de calor utilizando el método de diferencias finitas explícitas, se obtuvieron con el Diámetro de la esfera: 0,07654 m, Temperatura inicial: 20,152 °C, Temperatura del medio: 70°C, Difusividad térmica: $1,49 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $\Delta t = 30 \text{ s}$, Número de nodos: 10, Tiempo total de calentamiento: 1800 s. La validación se llevó a cabo mediante la comparación con ejemplos planteados en la bibliografía, identificando las desviaciones y corrigiendo los errores detectados que disminuyeron el porcentaje de desviación de los valores de temperaturas obtenidos por el programa y los reportados en la bibliografía.

Comparación del perfil de los resultados experimentales y resultados simulados.

Los modelos y métodos numéricos ofrecen una herramienta eficiente y poderosa para simular, comprender y experimentar con los procesos de transporte en la industria alimentaria (Yanniotis y Sundén, 2007). Mediante este método y de acuerdo con los resultados obtenidos (Figura 11) la temperatura central experimental se fijó adecuadamente con el centro de la papa y así sucesivamente con los demás puntos experimentales hasta el Nodo 9; respectivamente (Figura 12). Así mismo, al realizar la comparación de los resultados

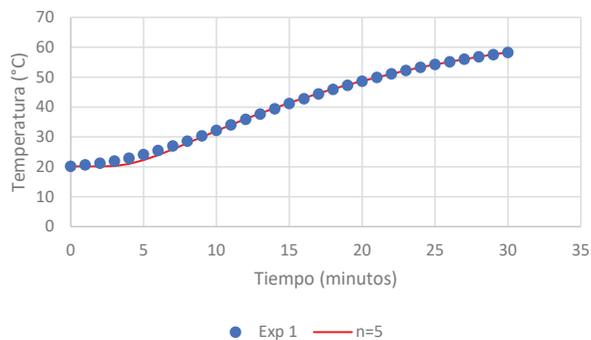


Figura 9. Perfil de temperatura simulada y temperatura experimental en la posición 1.

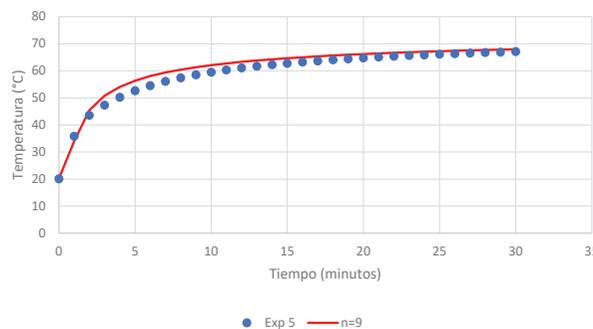


Figura 10. Perfil de temperatura simulada y temperatura experimental en la posición 5.

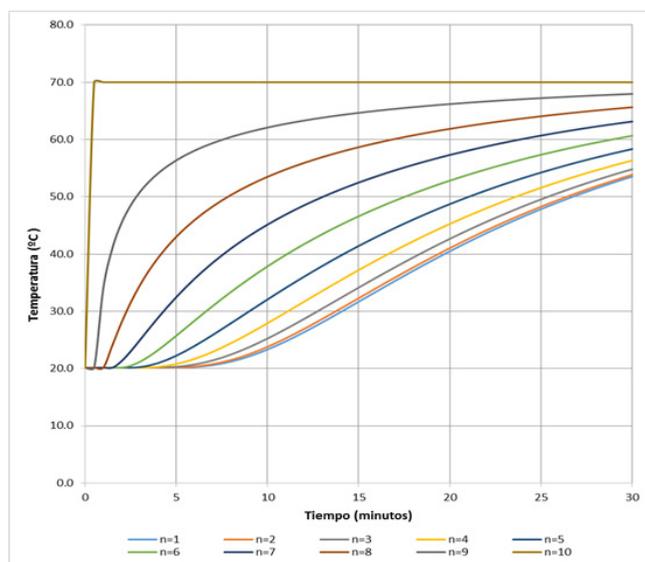


Figura 11. Perfiles de temperatura de los diferentes nodos simulados para la transferencia de calor de una esfera sometida a un medio de calentamiento.

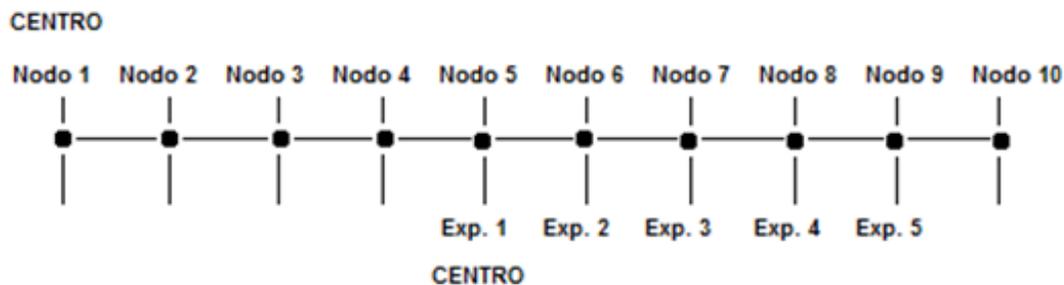


Figura 12. Comparación obtenida de los resultados experimentales y resultados simulados

simulados y resultados experimentales, se encontraron los grados de temperatura de error en la simulación y el porcentaje de error de desviación (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación de resultados simulados y resultados experimentales

Resultado simulado y experimental	Error de temperatura simulado (°C)	Error de simulación (%)
Nodo 5 - Experimento 1	0,5	1,37
Nodo 6 - Experimento 2	13,8	7,83
Nodo 7 - Experimento 3	4,3	4,64
Nodo 8 - Experimento 4	4,4	3,55
Nodo 9 - Experimento 5	4,5	3,09

Cuando se comparó el perfil de temperaturas simulado con el perfil de temperatura experimental en diferentes posiciones se encontró que la temperatura central experimental se fijó adecuadamente con el centro de la papa y así sucesivamente con los demás puntos experimentales hasta el nodo 9; respectivamente, con un nivel de error en la simulación entre 1,37% y 7,83%.

CONCLUSIONES

Los valores de la difusividad térmica (α) de la papa obtenidos experimentalmente fueron de $1,48 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y $1,49 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y se encuentran dentro del rango establecido en condiciones experimentales. El modelamiento de la temperatura con el método de diferencias finitas (hacia adelante) permitió obtener los valores de la temperatura distribuida internamente en la papa durante el calentamiento en medio líquido. La simulación numérica de la temperatura mediante transferencia de calor fue estable y convergente y fue factible con la aplicación VisualBasic® Excel. Las temperaturas obtenidas con el Programa de Simulación en VisualBasic® Excel no presentaron diferencias estadísticas significativas respecto a las temperaturas obtenidas experimentalmente. Para la validación de los valores experimentales con los valores simulados, se comparó el perfil de temperaturas simulado con el perfil de temperatura experimental en diferentes

posiciones y se encontró que la temperatura central experimental se fijó perfectamente con el nodo 5 y así sucesivamente con los demás puntos experimentales hasta el nodo 9. En la validación de los valores experimentales con los valores simulados se encontró que existe un nivel de error en la simulación entre 1,37% y 7,83%.

REFERENCIAS

- Ansari, F.A. 1998. Finite difference solution of heat and mass transfer problems related to precooling of food. *Energy Conversion and Management*, 40(8),795-802. https://www.cheric.org/research/tech/periodicals/doi.php?art_seq=70808
- Califano, A. N.; Calvelo, A. 1983. Heat and mass transfer during the warm water blanching of potatoes. *Journal of Food Science*, 48 (1), 220-225. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1983.tb14828.x>
- Datta, A. K.; Rattray, J. 2009. *Food process modeling*. In: *Food Engineering*. Vol. IV. Encyclopedia of life support systems.USA. 244 p. https://www.researchgate.net/publication/267297793_Food_process_modeling
- Food and Agriculture Organization-FAO. 2008. Año Internacional de la papa: La papa en el mundo. <http://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/index.html>
- Farinu, A; Baik O. 2007. Thermal properties of sweet potato with its moisture content and temperature. *International Journal of Food Properties*, 10(4), 703-719. <https://doi.org/10.1080/10942910601137482>
- Muñoz Vera, J.C. 2002. *Determinación de la difusividad térmica en pasta de Murta (Ugni molinae Turcz) en función de la temperatura*. Tesis de pregrado. Universidad Austral de Chile. Chile. 102p. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2002/fam971d/doc/fam971d.pdf>
- Mustafa O. 2011. *Handbook of food process modeling and statistical quality control*. 2da. Edición. Taylor Francis Group. New York.
- Singh, R.P; Heldman, D. 2009. *Introducción a la Ingeniería de los Alimentos*, 2da edición Editorial Acribia SA, Zaragoza. España.389 p.
- Vidaurre R, J.M. 2015. *Modelamiento de la transferencia de calor durante el escaldado del loche (Cucurbita moschata) y papa (Solanum tuberosum)*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 186 p. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2180>
- Wadsworth, J.I.; Spadaro, J.J. 1970. Transient temperature distribution in whole sweet potato roots during immersion heating. *Food Technology*. 24 (913), 77 - 84.
- Yanniotis, S.; Sundén, B. 2007. *Heat transfer in food processing. Recent developments and application*. Witt Press Southampton, Boston - USA. 11 p. <https://www.witpress.com/books/978-1-85312-932-2>
- Zheleva I.; Kamburova, V. 2009. *Modeling of heating during food processing*. Springer US. <https://www.springerprofessional.de/en/modeling-of-heating-during-food-processing/1473178>