

Propiedades termofísicas del jugo concentrado de lulo a temperaturas por encima del punto de congelación

Propriedades termofísicas de suco concentrado de lulo em temperaturas acima do ponto de congelamento

Glória Ines GIRALDO-GÓMEZ¹, Ana Lúcia GABAS², Vânia Regina Nicoletti TELIS³, Javier TELIS-ROMERO^{3*}

Resumen

En este trabajo fueron determinados experimentalmente el calor específico, conductividad térmica, difusividad térmica y densidad del jugo de lulo en el rango de contenido de agua de 0.55 a 0.90 (p/p en base húmeda) y en temperaturas variando de 4 a 78.6 °C. La conductividad térmica y el calor específico fueron obtenidos utilizando el mismo aparato – una célula constituida de dos cilindros concéntricos – operando en estado estacionario y no- estacionario, respectivamente. La difusividad térmica fue obtenida a través del método de Dickerson y la densidad determinada por picnometría. Tanto la temperatura como el contenido de agua presentaron una fuerte influencia en los datos experimentales de las propiedades termofísicas del jugo de lulo. Los resultados obtenidos fueron utilizados para obtener modelos matemáticos y predecir estas propiedades en función de la concentración y la temperatura.

Palabras-claves: calor específico; conductividad; densidad; difusividad; fruta.

Resumo

Neste trabalho, foram determinados experimentalmente o calor específico, a condutividade térmica, difusividade térmica e densidade de suco de lulo na faixa de conteúdo de água entre 0,55 e 0,90 (p/p em base úmida) e em temperaturas entre 4 e 78,6 °C. A condutividade térmica e o calor específico foram obtidos utilizando-se o mesmo equipamento – uma célula constituída de dois cilindros concêntricos – operando em estado estacionário e não estacionário, respectivamente. A difusividade térmica foi obtida através do método de Dickerson e a densidade determinada por picnometria. Tanto a temperatura como o conteúdo de água apresentaram grande influência nos dados experimentais das propriedades termofísicas do suco de lulo. Os resultados obtidos foram utilizados na obtenção de modelos matemáticos para prever estas propriedades em função da concentração e temperatura.

Palavras-chave: calor específico; condutividade; densidade; difusividade; fruta.

1 Introducción

El lulo de castilla o naranjilla (*Solanum quitoense Lam*) es una planta originaria de los Andes Sudamericanos, típica en Colombia en las regiones húmedas de clima medio y frío moderado, en donde crece en forma espontánea o en siembra. Su cultivo, aunque muy incipiente, se encuentra a lo largo del callejón interandino entre Colombia y Ecuador. Este se desarrolla bien entre los 1600 y 2500 m de altitud con temperaturas entre los 22 y 25 °C (GÓMEZ et al., 2004).

De acuerdo con los estudios de la Comunidad Económica Europea, el lulo es una de las frutas andinas con mayor posibilidad de exportación (TAMAYO et al., 2001). El jugo concentrado es una de las alternativas más claras.

El lulo presenta una variación de peso entre 18 y 191 g, diámetro ecuatorial entre 32 y 78 mm y diámetro polar entre 29 y 72 mm. El contenido de pulpa de la fruta está entre el 68 y el 72%. Las características fisicoquímicas de la pulpa son: pH alrededor de 2.5, °Brix entre 7 y 10, dependiendo del grado de

madurez de la fruta, acidez titulable expresada como porcentaje de ácido cítrico del 3% (GÓMEZ et al., 2004).

El conocimiento de las propiedades termofísicas del jugo de lulo en un amplio rango de concentraciones y temperaturas es de gran importancia en la industria de jugos concentrados refrigerados o congelados, ya que son vitales en operaciones unitarias como bombeo, intercambio de calor, evaporación, congelamiento y secado, las cuales deben ser correctamente proyectadas y controladas.

Se han realizado algunos trabajos relacionados con la determinación de calor específico y conductividad térmica de diferentes productos alimenticios fluidos como jugo de naranja (TELIS-ROMERO et al., 1998; MORESI; SPINOSI, 1980), leche reconstituida (REDDY; DATTA, 1994), leche concentrada (MINIM et al., 2002), yema de huevo (GUT et al., 2005), jugo de maracuyá, (GRATÃO et al., 2005), jugo de guanábana (GRATÃO; SILVEIRA-Jr.; TELIS-ROMERO, 2006), jugo de

Recebido para publicação em 12/3/2008

Aceito para publicação em 28/10/2008 (003303)

¹ Departamento de Física e Química, Universidade Nacional de Colômbia – UNAL, Manizales – A.A, 127, Colômbia

² Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo – USP, CP 23, CEP 13635-900, Pirassununga – SP, Brazil

³ Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual Paulista – UNESP, CEP 15054-000, São José do Rio Preto – SP, Brazil,

E-mail: javier@ibilce.unesp.br

*A quem a correspondência deve ser enviada

jugo (ASSIS et al., 2006), jugo de manzana (CONSTENLA; LOZANO; CAPRISTE, 1989), y jugo de tomate (CHOI; OKOS, 1983). Para productos de lulo no se encuentran en la literatura trabajos relacionados con propiedades termofísicas.

Los métodos para medir propiedades termofísicas han sido revisados por diferentes investigadores, Reidy y Rippen (1971), Mohsenin (1980), Singh (1982) y otros. Sweat (1995) recomienda métodos y estrategias que pueden ser empleados para medir propiedades térmicas de productos alimenticios.

Con frecuencia se realizan medidas experimentales de calor específico por medio de un calorímetro (RIEDEL, 1951; HWANG; HAYAKAWA, 1979), una técnica simple que requiere una cuidadosa calibración debido al calor específico del equipo. El calorímetro diferencial de barrido (DSC) es la mejor alternativa para la determinación experimental de esta propiedad, pero tiene la desventaja de su elevado costo (CONSTENLA; LOZANO; CAPRISTE, 1989; SWEAT, 1995).

La mayoría de trabajos donde se evalúa la conductividad térmica de productos alimenticios se ha realizado en material sólido (DONSÏ; FERRARI; NIGRO, 1996; LÓPEZ-RAMOS et al., 1993; PHAM; WILLIX, 1989). Se han descrito algunas técnicas de medida, como es el caso del método de la placa caliente “guarded hot plate” (AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE, 1970) o el método de la sonda “line heat source probe” (SWEAT; HAUGH, 1974; CHOI; OKOS, 1983). En líquidos, la principal fuente de error es la convección que aparece durante la realización de la medida. Sweat (1995) recomienda la adición de 0.5% de agar en agua cuando se mide la conductividad térmica con el método de la sonda. Para aceites y agua a altas temperaturas, se adiciona aproximadamente 1% en peso de fibra de vidrio “wool” con el objetivo de evitar la convección. Con el fin de minimizar la ineficiencia debido a la convección, Bellet, Sengelin y Thirriot (1975) desarrollaron un equipo basado en una celda constituida de dos cilindros coaxiales, separados por un pequeño espacio que se llena con la muestra. De acuerdo con estos autores, la convección puede evitarse si el espacio entre los dos cilindros es suficientemente pequeño y la diferencia entre las temperaturas de la pared no es muy grande. La conductividad térmica se obtiene de las ecuaciones que describen la transferencia de calor en régimen estacionario. El modelamiento matemático que envuelve el régimen no-estacionario de transferencia de calor se utiliza para determinar el calor específico del fluido empleando el mismo equipo, lo cual se convierte en la principal ventaja de este método.

La difusividad térmica puede determinarse indirectamente de la conductividad térmica dividida por el producto de la densidad y el calor específico. Este método de determinación tiene el inconveniente de adicionar errores experimentales involucrados en cada una de estas magnitudes. De manera alternativa, la difusividad térmica puede medirse directamente utilizando una técnica de transferencia de calor en régimen no-estacionario desarrollada por Dickerson (1965).

La propuesta de este trabajo fue medir la densidad, calor específico, conductividad térmica y difusividad térmica del

jugo de lulo en función de la temperatura y el contenido de agua y desarrollar correlaciones empíricas que predigan estas propiedades en diferentes condiciones.

2 Materiales y métodos

2.1 Materia-prima

Para la extracción del jugo se utilizó una despulpadora piloto y el tamizado se hizo a través de una malla de 1.6 mm. El jugo de lulo se extrajo de frutas con las siguientes características: (8.6 ± 0.4) °Brix, (67.6 ± 1.3) g.100 g⁻¹ contenido de pulpa, pH 2.42 ± 0.03 , (2.98 ± 0.02) g.100 g⁻¹ ácido cítrico y densidad (1.0488 ± 0.0038) g cm⁻³. El proceso de concentración se realizó utilizando un evaporador rotatorio (modelo TE-210, Tecnal, São Paulo, Brasil) al vacío. Las medidas de las propiedades termofísicas, se llevaron a cabo en un lote de concentrado de jugo de lulo (44.3 °Brix). El jugo se diluyó con agua destilada para obtener las diferentes concentraciones.

2.2 Medidas de densidad

La densidad del jugo de lulo en diferentes temperaturas y concentraciones fue determinada por triplicado, pesando en una balanza analítica el jugo de lulo contenido en un picnómetro volumétrico estándar (ASSIS et al., 2006). La temperatura de la muestra se equilibró en baño maria con termostato (modelo MA-184, Marconi, São Paulo, Brasil). Previamente el picnómetro de 25 ml se calibró con agua destilada a cada temperatura estudiada.

2.3 Determinación de la conductividad térmica y calor específico

Para medir la conductividad térmica y el calor específico a varias temperaturas y fracciones de agua se siguió el método descrito por Bellet, Sengelin y Thirriot (1975), basado en una celda cilíndrica, donde el líquido a ser medido llena el espacio anular formado por dos cilindros concéntricos. El equipo fue construido y se presenta en la Figura 1, con las siguientes características físicas:

- Dos (2) cilindros coaxiales de cobre (A y B), 220 mm de largo, separado por un espacio anular de 2 mm, el cual se llena con la muestra.
- Cubiertas de 50 mm de espesor (C) hechas de material de baja conductividad térmica (0.225 W/m.°C), para prevenir transferencia de calor axial.
- Cilindro interno (A) con una resistencia de calentamiento (D) hecha con alambre de constantán (resistencia 15 Ω), aislada eléctricamente por un barniz y enrollada a una barra de cobre.
- Dos (2) termopares tipo T (E) para medir la diferencia de temperatura entre los 2 cilindros localizados a la mitad, a lo largo de la celda. Los termopares fueron colocados dentro de surcos de 0.5 mm, paralelos al eje de la celda.

Para mantener la temperatura externa constante, la celda fue inmersa en baño maria con termostato (modelo MA-184,

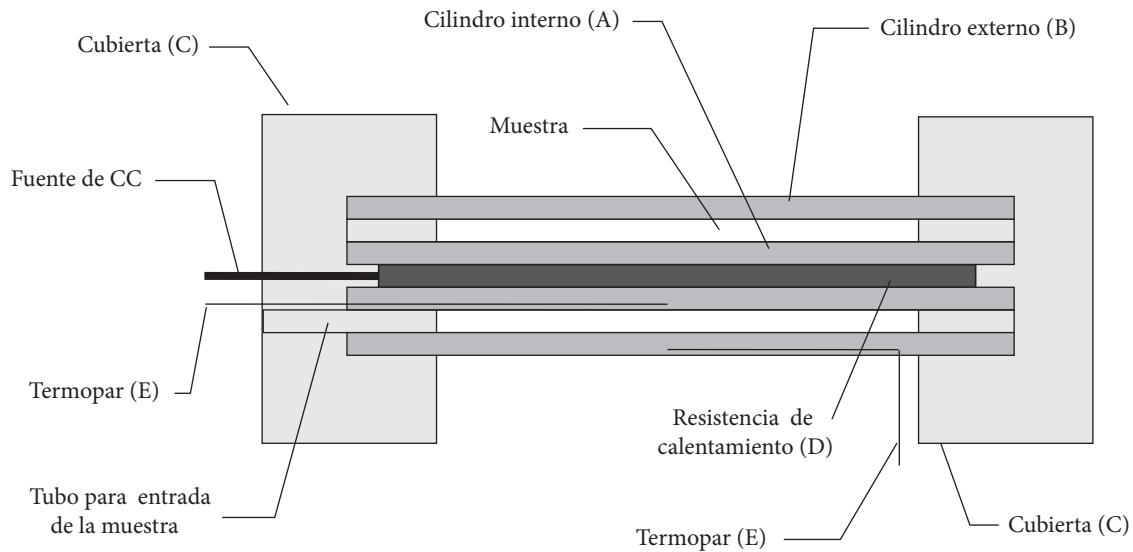


Figura 1. Corte longitudinal de la celda usada para mediciones experimentales de calor específico y conductividad térmica.

Marconi, São Paulo, Brasil). La corriente que alimenta la resistencia de calentamiento se realizó por medio de una fuente continua (modelo MPS-3006D, Minipa, São Paulo, Brasil), la cual permite ajustar la corriente con una estabilidad de 0.05%. Para monitorear la temperatura con una buena precisión (0.6 °C) se utilizó un sistema de adquisición de datos HP data logger modelo 75.000-B, una interfase HP-IB y una computadora con el programa escrito en IBASIC.

En el régimen estacionario, la solución de la ecuación de Fourier en coordenadas cilíndricas, con condiciones de frontera correspondientes, la transferencia de calor entre las dos superficies de los cilindros concéntricos mantenidas a temperatura constante, permiten determinar la conductividad térmica de la muestra de acuerdo con la Ecuación 1. El calor específico puede ser medido con el mismo equipo operando en régimen no-estacionario a través de un medio isotropito y homogéneo siguiendo la ecuación de conservación de la energía (Ecuación 2). Detalles de la operación de la celda y los cálculos involucrados son descritos por Telis-Romero et al. (1998) y por Bellet, Sengelin y Thirriot (1975)

$$k = \dot{q} \frac{\log(R_2/R_1)}{2\pi(T_1 - T_2)} \quad (1)$$

Donde \dot{q} es el flujo de calor; R_1 y R_2 son los radios externo e interno de los cilindros interno y externo, respectivamente; T_1 es la temperatura en estado estacionario del cilindro interno y T_2 es la temperatura en estado estacionario del baño con termostato.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

Donde T es la temperatura; t el tiempo; r es el radio del cilindro y ρ es la densidad de fluido.

La calibración de la celda se efectuó con agua destilada y glicerina. Esto permitió calcular la densidad (ρ') y el calor

específico (C_p') del material de la celda (cobre), el cual debe ser conocido para poder determinar las propiedades de la muestra. Los resultados obtenidos para el cobre utilizando agua fueron de 8890 kg/m³ y 703.4 J/kg.°C para densidad y calor específico, respectivamente. Con glicerina, los valores fueron 8886 kg/m³ y 706.6 J/kg.°C respectivamente. Los experimentos fueron realizados con el objetivo de verificar si estos valores se afectan por la temperatura. Los resultados presentaron diferencias en el rango de $\pm 2\%$. Considerando que éstas fueron pequeñas, se adoptaron valores promedio de ρ' y C_p' constantes.

2.4 Medidas de difusividad térmica

La difusividad térmica se determinó utilizando el método propuesto por Dickerson (1965). El equipo para realizar los experimentos consiste de una celda cilíndrica (radio interno de 24.75×10^{-3} m y longitud de 248.5×10^{-3} m) hecha de cromo con dos cubiertas de nylon en los extremos y con difusividad térmica de 1.09×10^{-7} m².s⁻¹, la cual es similar a la mayoría de los productos alimenticios en estado líquido. Dos (2) termopares tipo T se fijaron en el centro y en la superficie externa de la celda, la cual fue inmersa en un baño térmico con buena agitación (modelo MA-184, Marconi, São Paulo, Brasil) calentando a una tasa constante, y se monitoreó la evolución de las temperaturas en la pared y en el centro, para lo cual se empleó el mismo sistema de adquisición de datos utilizado en las medidas de calor específico y conductividad térmica.

Los cálculos se basaron en la solución de la conservación de energía, considerando régimen no-estacionario y flujo de calor constante unidimensional (radial), llegando hasta la Ecuación 3 en que la metodología está descrita en detalle en trabajos anteriores (TELIS-ROMERO et al., 1998; DICKERSON, 1965)

$$(T_R - T_0) = \frac{AR^2}{4\alpha_{\text{exp}}} \quad (3)$$

Donde $(T_R - T_0)$ es la diferencia de temperatura entre el centro y la superficie de la muestra; A es la tasa constante del calor y R el radio del cilindro.

2.5 Análisis de los datos

El análisis estadístico se realizó utilizando el procedimiento GLM (Modelo Linear General); para el ajuste de las funciones se empleó el procedimiento REG (Regresión Linear) del paquete estadístico SAS (1985). El grado de ajuste de las funciones se evaluó por los coeficientes de determinación (R^2), nivel de significancia (p), y análisis residual.

3 Resultados y discusiones

En las Figuras 2 a 5 se presentan los datos obtenidos de los calores específicos, conductividades térmicas, difusividades térmicas, y densidades del jugo de lulo medidos a siete contenidos de agua en un rango de 0.55 a 0.90 (w/w) a las temperaturas de 4.0, 10.3, 19.8, 28.8, 40.4, 54.6, 65.6 y 78.6 °C para un total de 56 valores experimentales medidos para cada propiedad termofísica.

Los valores experimentales de densidad mostrados en la Figura 2 presentaron una fuerte dependencia de esta variable con el contenido de agua, disminuyendo a medida que la fracción de solvente en la solución aumenta. La temperatura mostró una menor dependencia. Para determinar el efecto de la temperatura y el contenido de agua sobre la densidad se hizo un análisis de regresión múltiple, con el cual se obtuvo la Ecuación 4, que presenta un coeficiente de determinación $R^2 = 0.974$.

$$\rho = 1464.88 - 483.82X_w - 0.47T \tag{4}$$

Donde ρ es la densidad del jugo de lulo, en kg.m^{-3} , X_w el contenido de agua (masa de agua/masa total), y T es la temperatura en °C.

El análisis de la Ecuación 4 indica que la densidad se ve afectada inversamente por la temperatura y el contenido de agua debido a los coeficientes negativos que presentan estas dos variables. Su coeficiente de determinación indica que existe un alto grado de dependencia entre la densidad y las variables analizadas.

También fue evaluada una aproximación teórica propuesta por Constenla, Lozano y Capriste (1989), basada en expresiones termodinámicas para el volumen específico de una solución multicomponente. La Ecuación 5 expresa el resultado de este ajuste, la cual da una mayor correlación ($R^2 = 0.975$). En este caso, el efecto térmico en la densidad es incluido en el valor del agua pura, ρ_w .

$$\rho = \rho_w (1.46 - 0.49X_w) \tag{5}$$

La Figura 3 muestra la variación del calor específico en función del contenido de agua a las diferentes temperaturas. En ella se observa un incremento de esta variable con el aumento de la fracción de agua, al igual que en la densidad, la temperatura presentó un menor efecto que el contenido de agua.

Los datos experimentales fueron correlacionados por una función lineal de temperatura y contenido de agua dada por la Ecuación 6, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.974.

$$C_p = 1464.88 - 483.82X_w - 0.47T \tag{6}$$

Donde C_p es el calor específico en $\text{J/kg.}^\circ\text{C}$. La correlación obtenida fue semejante a la presentada por Telis-Romero et al. (1998) para jugo de naranja.

El modelo hallado indica que el calor específico se ve afectado en mayor grado por lo contenido de agua que por la temperatura, y ambas variables tienen un efecto negativo cuando

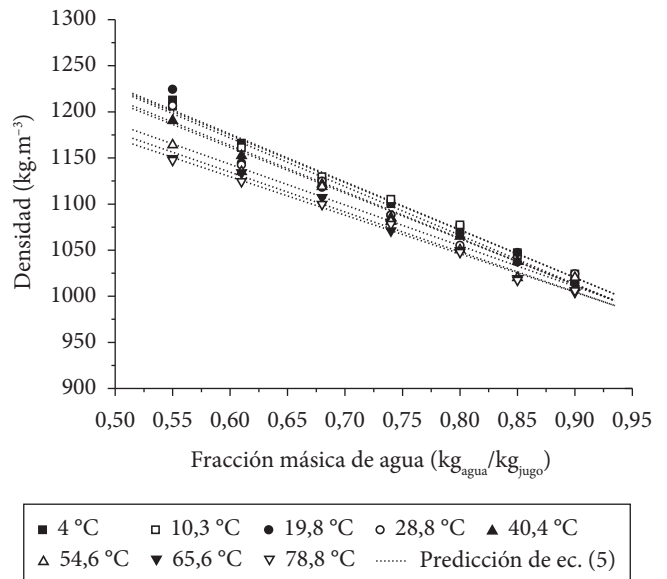


Figura 2. Densidad experimental del jugo de lulo en función del contenido de agua y de la temperatura.

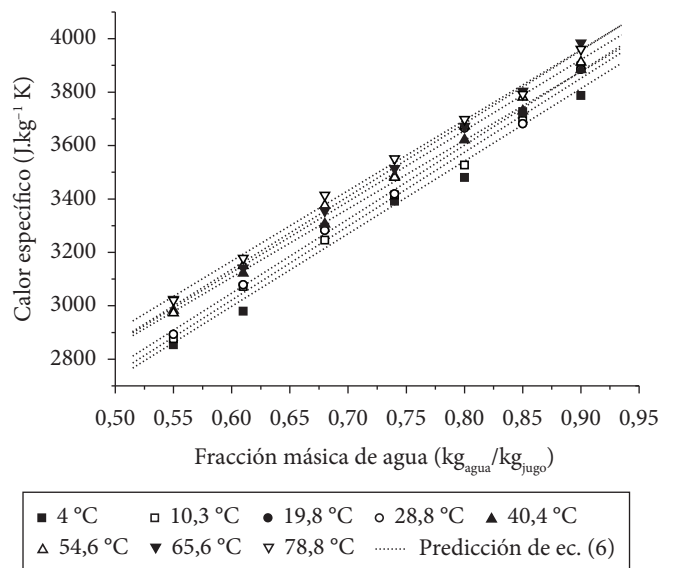


Figura 3. Calor específico experimental del jugo de lulo en función del contenido de agua y de la temperatura

son disminuidas. El coeficiente de correlación de 0.974 indica que el grado de relación existente entre el calor específico y las variables analizadas es alto, por lo que se podría decir que es un buen modelo predictorio.

La conductividad térmica se incrementa al aumentar tanto el contenido de agua como la temperatura; siendo mucho menor el efecto de este último factor. Estos resultados se muestran en la Figura 4. La Ecuación 7 muestra la dependencia lineal de la conductividad térmica con la concentración y la temperatura, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.982.

$$k = 0.137 + 0.367 X_w + 8.99 \times 10^{-4} T \quad (7)$$

Donde k es la conductividad térmica en $W/m \cdot ^\circ C$.

El análisis de la Ecuación 7 muestra que la conductividad térmica se ve afectada de manera directa por el contenido de agua y la temperatura.

También se probó un modelo aditivo presentado por Constenla, Lozano y Capriste (1989), basado en la conductividad térmica aparente y fracción volumétrica de cada componente en la solución. En este modelo, así como en la Ecuación 5, el efecto de la temperatura es incorporado a través de la conductividad térmica y densidad del agua pura. La correlación final es dada por la Ecuación 8 y el coeficiente de determinación (R^2) fue 0.992.

$$k = k_w (\rho / \rho_w) (0.050 + 0.810 X_w) \quad (8)$$

Donde k_w es la conductividad térmica del agua pura.

La difusividad térmica del jugo de lulo se incrementó con el aumento del contenido de agua y la temperatura, como se puede ver en la Figura 5. Un modelo empírico en función de estas dos variables se presenta en la Ecuación 9, con un R^2 de 0.937.

$$\alpha = 8.29 \times 10^{-8} + 5.27 \times 10^{-8} X_w + 2.76 \times 10^{-10} T \quad (9)$$

Donde α es la difusividad térmica en $m^2 \cdot s^{-1}$.

El signo de los coeficientes de la Ecuación 9 indica un efecto positivo de las dos variables sobre la difusividad térmica, ratificando lo expresado anteriormente.

Un modelo alternativo para predecir la difusividad térmica se basa en la expresión desarrollada por Riedel (1951) citado por Singh (1982). La correlación considera el efecto de la temperatura incluyendo la difusividad térmica del agua pura, α_w . La ecuación 10 presentó un mejor ajuste de los datos en el caso de jugo de lulo ($R^2 = 0.967$).

$$\alpha = 9.33 \times 10^{-8} + (\alpha_w - 9.77 \times 10^{-8}) X_w \quad (10)$$

Las constantes en la Ecuación (10) presentan algunas diferencias con las de la propuesta por Riedel (1951), y esto se podría explicar considerando que la Ecuación original fue resuelta para una serie de datos experimentales de una mezcla de productos alimenticios, incluyendo sólidos y semi-sólidos.

Las difusividades térmicas también pueden ser determinadas de acuerdo con su definición (Ecuación 11), utilizando los valores de densidad, calor específico y conductividad térmica medidos en este trabajo.

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (11)$$

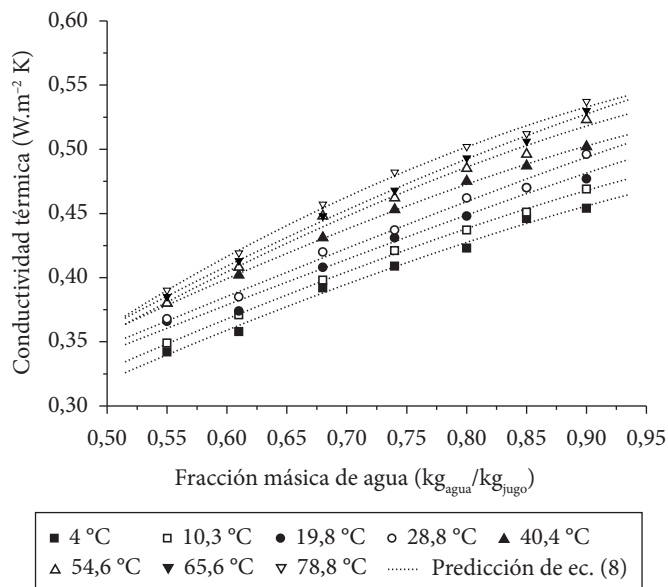


Figura 4. Conductividad térmica experimental de jugo de lulo en función del contenido de agua y de la temperatura.

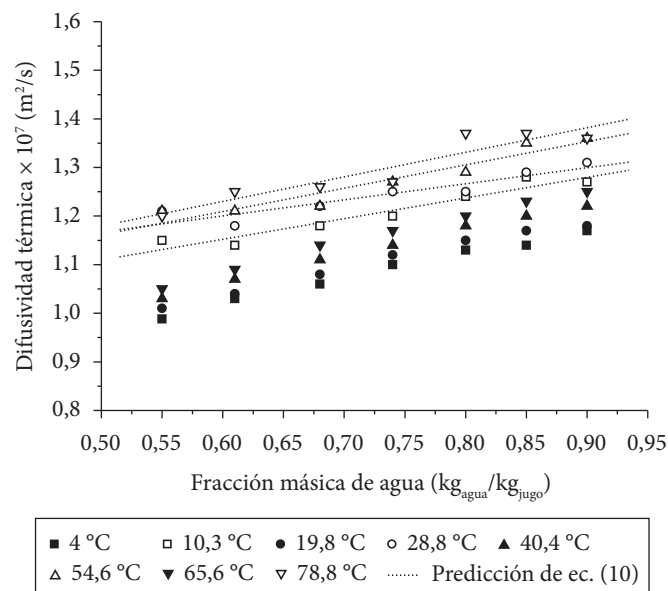


Figura 5. Difusividad térmica de jugo de lulo en función del contenido de agua y de la temperatura. Símbolos llenos corresponden a valores calculados usando la Ecuación 11 a las mismas temperaturas de los símbolos vacíos.

El error relativo entre la difusividad térmica experimental y la calculada, definida de acuerdo con la Ecuación 12, muestra que los valores calculados fueron siempre menores que los valores experimentales (Figura 5). El valor medio del error fue de 13.11%, con una desviación estándar de 4.06%. La comparación de los datos calculados con los experimentales mostró que los errores mayores se presentaron a las temperaturas superiores, por esto fueron solamente obtenidos los valores de difusividad térmica para temperaturas inferiores a 28.8 °C. Esto nos lleva

a concluir que conforme la temperatura aumenta también aumenta la convección dentro de la celda de Dickerson (1965), pudiendo causar una sobre-estimación de la difusividad térmica experimental.

$$\Delta\% \text{ error} = (\alpha_{\text{cal}} - \alpha_{\text{exp}}) \cdot 100 / \alpha_{\text{exp}} \quad (12)$$

Donde α_{cal} es la difusividad térmica calculada por la Ecuación 11 y α_{exp} es la difusividad térmica obtenida experimentalmente.

Las propiedades termofísicas del jugo de mora fueran recientemente obtenidas por Cabral et al. (2007). Estos autores obtuvieron valores semejantes de densidad, calor específico aparente, conductividad y difusividad, en función de la temperatura e concentración del jugo de mora. El calor específico aparente fue de 2.416 hasta 4.300 kJ.kg⁻¹°C.

4 Conclusiones

Los resultados experimentales de este trabajo mostraron que la temperatura y, principalmente el contenido de agua, tienen una fuerte influencia en las propiedades termofísicas del jugo de lulo. Los modelos teóricos y empíricos se ajustaron satisfactoriamente a los datos experimentales de densidad, calor específico, conductividad térmica, y difusividad térmica. Las Ecuaciones 5, 6, 8 y 10 son recomendadas para determinar estas propiedades para el jugo de lulo en el rango de contenido de agua de 0.55 a 0.9 y temperaturas variando de 4 a 78.6 °C. Estos resultados pueden ser utilizados para modelar la transferencia de calor y masa en el proceso de concentración del jugo de lulo, y consecuentemente obtener una correcta dimensión del equipo.

Reconocimientos

Los autores agradecen al Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Brasil (Procesos No. 474626/2004-0, No.491504/2004-7 y No. 471223/2006-9) y al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas” – Colciencias, Colombia, por el soporte financiero.

Referencias

- ASSIS, M. M. M. et al. Influence of temperature and concentration on thermophysical properties of yellow mombin (*Spondias mombin*, L.). **European Food Research and Technology**, v. 223, n. 5, p. 585-593, 2006.
- BELLET, D.; SENDELIN, M.; THIRRIOT, C. Determination des propriétés thermophysiques de liquides non-newtoniens à l'aide d'une cellule à cylindres coaxiaux. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 18, n. 10, p. 1177-1187, 1975.
- CABRAL, R. A. F. et al. Rheological and thermophysical properties of blackberry juice. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 3, p. 589-596, 2007.
- CHOI, Y.; OKOS, M. R. The thermal properties of tomato juice concentrates. **Transactions of the ASAE**, v. 26, n. 1, p. 305-311, 1983.
- CONSTENLA, D. T.; LOZANO, J. E.; CRAPISTE, G. H. Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature. **Journal of Food Science**, v. 54, n. 3, p. 663-668, 1989.
- DICKERSON Jr., R.W. An apparatus for measurement of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**, v. 19, n. 5, p. 198-204, 1965.
- DONSÌ, G.; FERRARI, G.; NIGRO, R. Experimental determination of thermal conductivity of apple and potato at different moisture contents. **Journal of Food Engineering**, v. 30, n. 3-4, p. 263-268, 1996.
- GÓMEZ, C. R. et al. Caracterización y Normalización Del Lulo de Castilla (*Solanum quitoense* L). In: MEMORIAS DEL SEMINARIO NACIONAL E INTERNACIONAL DE FRUTALES, 5, 2004, Manizales. **Anais... Manizales: Universidad Nacional de Colombia**, 2004. p. 161-168.
- GRATÃO, A. C. A. et al. Thermal properties of passion fruit juice as affected by temperature and water content. **Journal of Food Process Engineering**, v. 27, n. 6, p. 413-431, 2005.
- GRATÃO, A. C. A.; SILVEIRA Jr., V.; TELIS-ROMERO, J. Laminar Forced Convection to a Pseudoplastic Fluid Food in Circular and Annular Ducts. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 33, n. 4, p. 451-457, 2006.
- GUT, J. A. W. et al. Continuous pasteurization of egg yolk: Thermophysical properties and process simulation. **Journal of Food Process Engineering**, v. 28, n. 2, p. 181-203, 2005.
- HWANG, M. P.; HAYAKAWA, K. I. A specific heat calorimeter for foods. **Journal of Food Science**, v. 44, n. 2, p. 435-448, 1979.
- LÓPEZ-RAMOS, A. et al. Thermal properties of tropical fruits and vegetables. **Revista Española de Ciencia y Tecnología de Alimentos**, v. 33, n. 3, p. 271-283, 1993.
- MINIM, L. A. et al. Influence of temperature and water and fat contents on the thermophysical properties of milk. **Journal of Chemical and Engineering Data**, v. 47, n. 6, p. 1488-1491, 2002.
- MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York: Gordon and Breach, 1980.
- MORESI, M.; SPINOSI, M. Engineering factors in the production of concentrated fruit juices. 1. Fluid physical properties of orange juices. **Journal of Food Technology**, v. 15, n. 3, p. 265-276, 1980.
- PHAM, Q. T.; WILLIX, J. Thermal conductivity of fresh lamb meat, offals and fat in the range - 40 to + 30 °C: measurements and correlations. **Journal of Food Science**, v. 54, n. 3, p. 508-515, 1989.
- REDDY, C. H. S.; DATTA, A. K. Thermophysical properties of concentrated reconstituted milk during processing. **Journal of Food Engineering**, v. 21, n. 1, p. 31-40, 1994.
- REIDY, G. A.; RIPPEN, A. L. Methods for determining thermal conductivity in foods. **Transactions of the ASAE**, v. 14, n. 2, p. 248-254, 1971.
- RIEDEL, L. The refrigerating effect required to freeze fruits and vegetables. **Refrigerating Engineering**, v. 59, p. 670-673, 1951.
- SAS INSTITUTE. **SAS®User's guide: statistics**. Version 5. Cary, 1985.
- SINGH, R. P. Thermal diffusivity in food processing. **Food Technology**, v. 36, n. 2, p. 87-91, 1982.
- SWEAT, V. E. Thermal properties of foods. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. 2 ed. New York: Marcel Dekker, 1995. p. 99-138.
- SWEAT, V. E.; HAUGH, C. G. A thermal conductivity probe for small food samples. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 1, p. 56-58, 1974.
- TAMAYO, A. et al. **Frutales de clima frío moderado**. Rionegro Antioquia: Corpoica, 2001. p. 1.(Cartilla divulgativa)
- TELIS-ROMERO, J. et al. 1998. Thermophysical properties of Brazilian orange juice as affected by temperature and water content. **Journal of Food Engineering**, v. 38, n. 1, p. 27-40, 1998.