



Estudio cinético de algunas características de calidad de un producto en polvo obtenido mediante secado por aspersión a partir de jugo de caña panelera y concentrado proteico de lactosuero dulce

Kinetic study of some quality characteristics of a powdered product obtained by spray drying of sugarcane juice and sweet whey protein concentrate

Diana Carolina Ruano-Uscategui¹, Héctor Ciro-Velásquez², Uriel Sepúlveda-Valencia³

¹Innovación Inteligente (INNOUS), Corporación Investigación, Innovación e Industria, Colombia.

Orcid: 0000-0003-4474-8267. Email: dcruanou@unal.edu.co

²Ingeniería Agrícola, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Orcid: 0000-0002-4398-0470. Email: hjciro@unal.edu.co

³ Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Orcid: 0000-0001-5660-4514. Email: jusepul@unal.edu.co

RECIBIDO: Octubre 30, 2017. ACEPTADO: Febrero 17, 2018. VERSIÓN FINAL: Marzo 30, 2018.

RESUMEN

Los productos obtenidos mediante secado por aspersión poseen estructuras amorfas cuya capacidad de absorción de agua durante el almacenamiento afecta sus propiedades fisicoquímicas. En este estudio se evaluó la cinética de absorción de agua y el cambio de las propiedades fisicoquímicas de un producto obtenido a partir de jugo de caña panelera (JCP) y concentrado proteico de suero (WPC), el cual fue expuesto al ambiente durante 36 horas simulando condiciones de almacenamiento a 25 °C y 70% de humedad relativa. El incremento en el contenido de humedad y la a_w fueron modelados usando los modelos de Peleg y exponencial con alta bondad de ajuste ($R^2 > 98\%$). Además, se observó disminución de la T_g , incremento en los parámetros de color a^* y b^* , aumento de tamaño de partícula y disminución de humectabilidad, generados por el efecto plastificante del agua, posibles reacciones de Maillard y aglomeración de partículas respectivamente.

PALABRAS CLAVE: Cinética, lactosuero dulce, jugo de caña, estabilidad.

ABSTRACT

The products obtained by spray drying have amorphous structures whose water absorption capacity during storage affects their physicochemical properties. This study evaluated the kinetics of water absorption and the change in the physicochemical properties of a product obtained from sugarcane juice (JCP) and whey protein concentrate (WPC), which was exposed to the environment for 36 hours simulating storage conditions at 25 °C and 70% relative humidity. The increase in moisture content and water activity (a_w) was modeled using the Peleg and exponential models with a high goodness of fit ($R^2 > 98\%$). In addition, a decreases in the T_g , increases in the color parameters a^* and b^* , increase in particle size and decrease in wettability was observed, generated by the plasticizing effect of water, possible Maillard reactions and particle agglomeration respectively.

ISSN Impreso: 1657 - 4583, En Línea: 2145 - 8456

Este artículo puede compartirse bajo la licencia **CC BY-ND 4.0** y se referencia usando el siguiente formato: D.C. Ruano-Uscategui, H. Ciro-Velásquez, U. Sepúlveda-Valencia, "Estudio cinético de algunas características de calidad de un producto en polvo obtenido mediante secado por aspersión a partir de jugo de caña panelera y concentrado proteico de lactosuero dulce," *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 2, pp. 127-140, 2018. Doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018012>

KEYWORDS: Kinetics, sweet whey, sugarcane juice, stability.

1. INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar o panelera (*Saccharum officinarum L.*) es una planta monocotiledónea perteneciente a la familia de las gramíneas, de cuyo tallo es posible extraer jugo con alto contenido de azúcares, que es utilizado en la producción de azúcar, panela y biocombustibles.

El cultivo de caña y producción de panela tienen gran importancia en Colombia por su significativa participación en el producto interno bruto (PIB) agrícola, generación de empleo y su papel en la seguridad alimentaria de la población [1]. La cadena de la panela beneficia a más de 350000 familias y ocupa el 12% de la población rural económicamente activa [1]. Colombia es el segundo productor de caña panelera en el mundo, después de la India y posee un área sembrada de 172373 hectáreas y una producción de 1312122 millones de toneladas al año [2]. Sin embargo, la cadena afronta diversas dificultades en todos los eslabones de la cadena, destacándose la falta de diversificación en la producción.

El WPC es el producto de la transformación de suero de leche mediante un proceso de separación por membranas (ultrafiltración) y constituye una fuente importante de proteínas que varía de 35-80% en peso [3, 4]. De acuerdo a Jovanović et al., [3] las proteínas mayoritarias del suero son la β -lactoglobulina (β -Lg) y la α -lactoalbúmina (α -La) y representan aproximadamente el 70% de la fracción proteica. El WPC es una alternativa para la recuperación de los nutrientes del suero, el cual al ser un subproducto de la industria quesera ha sido causa de graves problemas ambientales por su inadecuada disposición y vertimiento en fuentes hídricas [5]. El WPC ha sido usado como agente portador en procesos de secado por aspersión de productos ricos en azúcar, como jugo concentrado de remolacha [6], pulpa de tamarindo [7] y miel enriquecida [8] debido a su influencia sobre las propiedades, la estabilidad y el porcentaje de recuperación del polvo.

El proceso de secado por aspersión del sistema combinado JCP y WPC surge como una alternativa de producción de un polvo alimenticio con gran aporte energético y proteico proveniente de sus materias primas, sin embargo, su comportamiento frente a la absorción de agua debe ser estudiado.

El estudio de los fenómenos de absorción de agua de productos en polvo constituye una herramienta de gran ayuda para comprender los cambios que se presentan tanto en procesos de reconstitución del producto en polvo [9] como en el aseguramiento de la estabilidad

físicoquímica y microbiológica durante el almacenamiento [10]. Además puede ser de gran utilidad en la selección de materiales adecuados para empaque y condiciones de almacenamiento [11].

La absorción de agua conlleva a una serie de cambios en el producto resultado de transformaciones a nivel microscópico de las partículas que lo conforman, como es el caso de la aglomeración que provoca un producto no uniforme y difícil de manejar [12]. Esto sucede especialmente en productos con alto contenido de azúcar, los cuales tienden a pasar desde el estado amorfo al gomoso por sus características de baja temperatura de transición vítrea (T_g), alta higroscopicidad y alta solubilidad en agua [13, 14].

La cinética de absorción de agua ha sido estudiada en la hidratación de alimentos como frijol común [15], garbanzo [16], arroz rojo [17] y mandioca [18]; y materiales fibrosos como cáscara de coco [19] y *Raffia vinífera* con potencial para la construcción. Los modelos cinéticos más utilizados para explicar la cinética de absorción de agua en productos alimenticios son los modelos empíricos, entre los que se destacan los modelos de Pilosof et al. [20], Singh y Kulshrestha [21], Peleg [22] y exponencial. Sin embargo, Sopade et al. [23] a través del análisis del comportamiento de hidratación de WPC, WPI (aislado proteico de suero) y almidón de trigo determinó que los tres primeros modelos son matemáticamente iguales y cualquiera puede ser usado para describir el comportamiento de productos alimenticios y no alimenticios.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la cinética de absorción de agua de un producto en polvo obtenido mediante secado por aspersión a partir de un sistema combinado de JCP y WPC, y los cambios en contenido de humedad, actividad de agua, humectabilidad, color, T_g y morfología de partícula durante un proceso simulado de condiciones de almacenamiento a temperatura y humedad relativa constante.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

El JCP fue suministrado por un proveedor local del departamento del Antioquia y el WPC por el laboratorio de Lácteos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. El WPC fue obtenido mediante un proceso de ultrafiltración de lactosuero dulce usando separación por

membranas. La ultrafiltración del lactosuero se realizó por medio de una planta piloto de filtración (Perinox, España) equipado con un módulo de membrana en espiral y de polietersulfona para UF (3838 K131-HYV), considerando un factor de concentración de 18, presión transmembrana de 2 bar y temperatura constante de 45 °C.

2.2. Preparación de la muestra y secado por aspersión

El JCP y el WPC fueron pesados y posteriormente mezclados en un homogenizador Silverson L5 M-A a 5000 rpm durante 5 min, a una temperatura de 25 °C. Antes de alimentar al secador por aspersión, la solución fue filtrada en malla de 500 µm con el fin de retirar impurezas.

El proceso de secado por aspersión se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, en un secador por aspersión Vibrasec S.A., PSA1.5, bajo condiciones de temperatura de entrada de 130 °C, temperatura de salida de 88 °C, velocidad del disco atomizador de 21000 rpm y 78,83% de aporte de WPC en base seca. Dichas condiciones fueron obtenidas previamente mediante un proceso de optimización estadística usando un diseño experimental de superficies de respuesta.

2.3. Almacenamiento y seguimiento a propiedades fisicoquímicas

El producto en polvo fue colocado en cajas Petri y expuesto al ambiente en una cámara acondicionadora de ambientes tal como se observa en la **Figura 1**, la cual se mantuvo bajo condiciones de 70% de humedad relativa y 25 °C.

Se realizó un seguimiento a la ganancia de peso a diferentes tiempos: 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 24 y 36 horas. A cada muestra se le determinó el contenido de humedad, actividad de agua, humectabilidad y color, a excepción de la muestra de 36 horas a la que no se le determinó humectabilidad y color, debido a la alta aglomeración presentada y por ende la dificultad para la realización de estas pruebas.

Los resultados fueron comparados con leche en polvo comercial azucarada (adicionada aproximadamente con 27 % de azúcar y lecitina de soya), la cual fue sometida al mismo tratamiento que el polvo de JCP + WPC. La leche en polvo fue utilizada como un referente para realizar una comparación cualitativa con un producto disponible en el mercado, de buena aceptación por parte del consumidor y de excelente estabilidad en el almacenamiento. Las pruebas fueron realizadas por

triplicado. Adicionalmente se determinó temperatura de transición vítrea y morfología del producto en polvo para muestras de los tiempos 0, 4 y 12 horas.



Figura 1. Muestras de Polvo JCP + WPC y leche en polvo sometidas a 25 °C y 70% de humedad relativa. **Fuente.** Elaboración propia.

- **Humedad.** Se realizó según el método oficial 930.15 de la AOAC [24].
- **Actividad de agua (a_w).** Se determinó con un higrómetro de punto de rocío a 25 °C (Aqualab serie 4TE, Decagon, Devices, Pullman, WA, USA).
- **Humectabilidad.** La humectabilidad del polvo fue evaluada por el método estático sugerido por Freuding et al. [25] con algunas modificaciones propuestas por Ceballos et al. [26]. Una muestra de cada producto (1 g aproximadamente) fue colocada en un dispositivo con una corredera. Al retirarla el polvo se dejó caer para ponerlo en contacto con 100 ml de agua no perturbada dispuesta en un beaker con diámetro de 5 cm. El tiempo de humectación corresponde al tiempo de inmersión completa de la muestra en polvo en agua a 20 °C.
- **Color.** Se utilizó un medidor de color (modelo CR-400, Konica Minolta Inc, Japón), con iluminante D65, un observador de 2° como referencia y con escala CIE-L*a*b*. Las medidas de color se expresaron en términos de luminosidad L^* ($L^*=0$ para negro y $L^*=100$ para blanco) y parámetros de cromaticidad a^* ($-a^*$ para verde y $+a^*$ para rojo) y b^* ($-b^*$ para azul y $+b^*$ para amarillo)
- **Temperatura de transición vítrea.** Se determinó por calorimetría diferencial de barrido con el equipo DSC-Q200 (TA Instruments, New Castle, DE, USA), previamente calibrado con indio. Se pesó

aproximadamente 6 mg de muestra en capsulas de aluminio y se sometió a enfriamiento a una tasa de 5 °C por minuto hasta una temperatura de -40 °C y posteriormente se calentó a 5 °C por minuto hasta alcanzar una temperatura de 140 °C. La muestra tomada a las 12 horas fue enfriada hasta -90 °C.

- **Tamaño de partícula y morfología.** Se realizó mediante Microscopia electrónica de barrido (SEM) con el equipo EVO MA10 Carl Zeiss (Alemania), con un detector de Electrones secundarios y se trabajó con un voltaje de 15 kV y recubrimiento de las muestras con capa fina de oro. Las microfotografías se obtuvieron con aumentos de 500X, 1000X y 2000X. La determinación para tamaño de partícula se realizó con ayuda del programa ImageJ 1.50i (National institutes of health, USA).

2.4. Cinética de absorción de agua

El contenido de agua en el tiempo (t) en base seca y la relación de humedad (MR) se determinaron de acuerdo a las ecuaciones (1) y (2) respectivamente:

$$X(t) = \frac{m_t - m_0}{m_0} * 100 \quad (1)$$

$$MR(t) = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (2)$$

Donde m_t es la masa de la muestra, m_0 la masa de sólidos secos iniciales, y, X_0 , X_t y X_{eq} son los contenidos de humedad inicial, en el tiempo t y de saturación de la muestra respectivamente.

La cinética de absorción de agua fue estudiada ajustando los datos a los modelos de Peleg y exponencial.

- **Modelo de Peleg** [22]. Es un modelo de dos parámetros de ecuación no exponencial definido de acuerdo a la ecuación (3):

$$X(t) = X_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 * t} \quad (3)$$

Donde k_1 es constante de velocidad de Peleg ($h \cdot \%^{-1}$) y k_2 es la constante de capacidad de Peleg ($\%^{-1}$). La constante k_1 está relacionada de forma inversa a la velocidad a la cual ocurre la absorción de agua en el producto (ecuación (4)). La constante k_2 está relacionada con su capacidad para absorber agua, tal como se observa en la ecuación (5) que relaciona el contenido de humedad cuando el tiempo $t \rightarrow \infty$.

$$W_0 = \frac{1}{k_1} \quad (4)$$

$$X_{eq} = X_0 + \frac{1}{k_2} \quad (5)$$

- **Modelo exponencial.** Se obtiene a partir de la relación de humedad, como se observa a continuación:

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-k_e * t) \quad (6)$$

Donde k_e es la constante de velocidad de absorción de agua (h^{-1}).

Los parámetros cinéticos se obtuvieron a partir de los datos experimentales mediante regresión no lineal, con ayuda del programa Statgraphics Centurion XVI.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Humedad

La humedad del producto incrementó por la absorción de agua cuando el polvo entró en contacto directo con un ambiente de humedad relativa mayor, fenómeno que obedece a la naturaleza higroscópica del producto. Dupas-Langlet et al. [12] menciona que el contenido de humedad al cual un material sólido induce una presión de vapor de agua igual a la del ambiente que lo rodea define el comportamiento higroscópico del producto. En la Figura 2 es posible observar que el polvo de JCP + WPC posee mayor ganancia de humedad si se compara con la leche en polvo comercial. Esto se debe a las diferencias en composición de los dos productos analizados y la alta higroscopicidad tanto del WPC como de la sacarosa presente en el JCP, como también a la adición de lecitina de soya en el producto comercial que le confiere mayor estabilidad. Es importante mencionar que la leche mantuvo cierto grado de fluidez durante todo el ensayo, mientras que el polvo de JCP y WPC mantuvo su estructura hasta las tres horas con incipientes muestras de aglomeración. No obstante, a partir de las cuatro horas se evidencia la aglomeración del producto lo cual coincide con la morfología de la partícula en ese momento (ver numeral 3.5.). Las diferencias son resultado de la adición de JCP con alto contenido de sacarosa en el producto en polvo, lo cual gracias a su alta higroscopicidad, alta solubilidad en agua y baja Tg [13], favorece la

aglomeración de las partículas con el incremento del contenido de humedad.

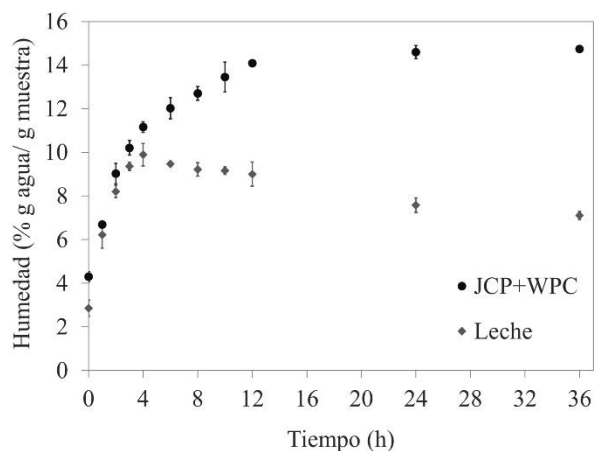


Figura 2. Evolución de la humedad del polvo de JCP + WPC y leche en polvo comercial. **Fuente.** Elaboración propia.

3.2. Actividad de agua (a_w)

La diferencia en la presión de vapor en el ambiente con respecto al interior del producto, es la fuerza impulsora que mueve la actividad de agua desde un valor inicial hasta llegar al equilibrio con el 70% de humedad relativa definida en la cámara. El polvo de JCP + WPC y la leche en polvo poseen un comportamiento similar en los tiempos y el incremento de la actividad de agua, tal como se observa en la Figura 3.

Sin embargo, el polvo de JCP + WPC tarda más tiempo en estabilizar su a_w con la humedad del ambiente. Esto posiblemente se debe a que, a pesar de la alta higroscopicidad del producto, la alta cantidad de proteínas de suero logran ligar mayor cantidad de agua a su estructura, lo cual puede ser favorecedor para el producto desde el punto de vista de estabilidad durante el almacenamiento. Sin embargo, este comportamiento podría ser el resultado del inicio de la aglomeración de las partículas de JCP + WPC, lo cual representa una barrera al equilibrio entre el producto y el ambiente.

3.3. Humectabilidad

En la Figura 4 es posible observar que existe una tendencia hacia la disminución del tiempo que tarda el producto en humedecerse completamente. Esto se debe a fenómenos de aglomeración que ocurren entre las partículas y la disminución de la superficie dentada en ellas. Esto coincide con lo mencionado por Ferrari et al, [27] quienes obtuvieron una disminución del tiempo de humectación considerable (de 120 a 15 s) al incrementar

el tamaño de partícula de polvo de mora de 74 a 200 μm después de procesos de aglomeración. Además, los autores mencionan que la superficie dentada de las partículas incrementa la humectabilidad del producto. Por tal razón, es posible que a medida que incrementa el contenido de humedad del polvo de JCP + WPC, las partículas comienzan a perder la superficie dentada, lo cual favorece la disminución del tiempo de humectabilidad del producto. Un proceso de secado con una etapa de aglomeración puede contribuir a mejorar propiedades como la humectabilidad y la dispersabilidad, tal como menciona Chever et al. [28] quienes evaluaron diversos métodos de aglomeración en polvo de mezclas de leche entera y azúcar.

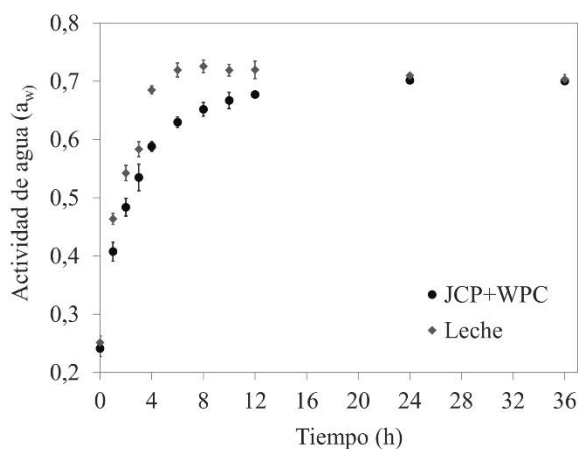


Figura 3. Evolución de la actividad de agua para polvo de JCP+WPC y leche en polvo comercial. **Fuente.** Elaboración propia.

Por otra parte, en la Figura 4 es posible observar una clara diferencia en los tiempos de humectabilidad del polvo de JCP y WPC al compararse con la leche en polvo. Murrieta-Pazos [9] menciona que la reconstitución se lleva a cabo en varios pasos: humectación, hundimiento, dispersión y solubilización. Visualmente durante el proceso se observó una humectación rápida de la leche en polvo, producto del desarrollo de todos los pasos durante la reconstitución. Sin embargo, el polvo de JCP+WPC desarrolla los procesos de humectación, dispersión y solubilización desde la superficie que se encuentra en contacto con el agua, siendo el hundimiento de las partículas casi imperceptible e incrementando así el tiempo de humectabilidad del producto.

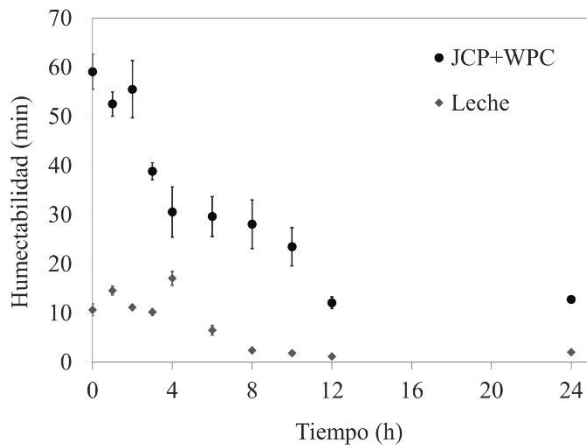


Figura 4. Evolución de la humectabilidad del polvo de JCP+WPC y leche en polvo comercial. **Fuente.** Elaboración propia.

3.4. Color

El color sufrió leves cambios en los parámetros L^* , a^* y b^* durante el estudio realizado, tal como se observa en la Figura 5. La luminosidad (L^*) se mantuvo en un rango de 63,11 a 73,52 con puntos máximos entre las 4 y 12 horas de exposición al ambiente, con una posterior disminución y estabilización a las 24 horas de almacenamiento. Esto se debe a que es un producto con tendencia al color blanco y cuya luminosidad incrementa con la ganancia de agua en las primeras etapas de absorción y cuando las partículas comienzan a sufrir cambios en su estructura comienza un proceso de oscurecimiento. La leche en polvo presenta un comportamiento similar con un mayor incremento en el valor L^* si se compara con el polvo de JCP + WPC.

En cuanto al parámetro a^* , el producto de JCP + WPC tuvo un valor muy cercano al neutro (rango entre -0,45 y 0,04), sin embargo, después de 24 horas de exposición incrementó a 0,97 debido posiblemente a reacciones de pardeamiento. El comportamiento del parámetro a^* de la leche fue similar pero dadas sus características varió en un rango de -2,73 y -1,55.

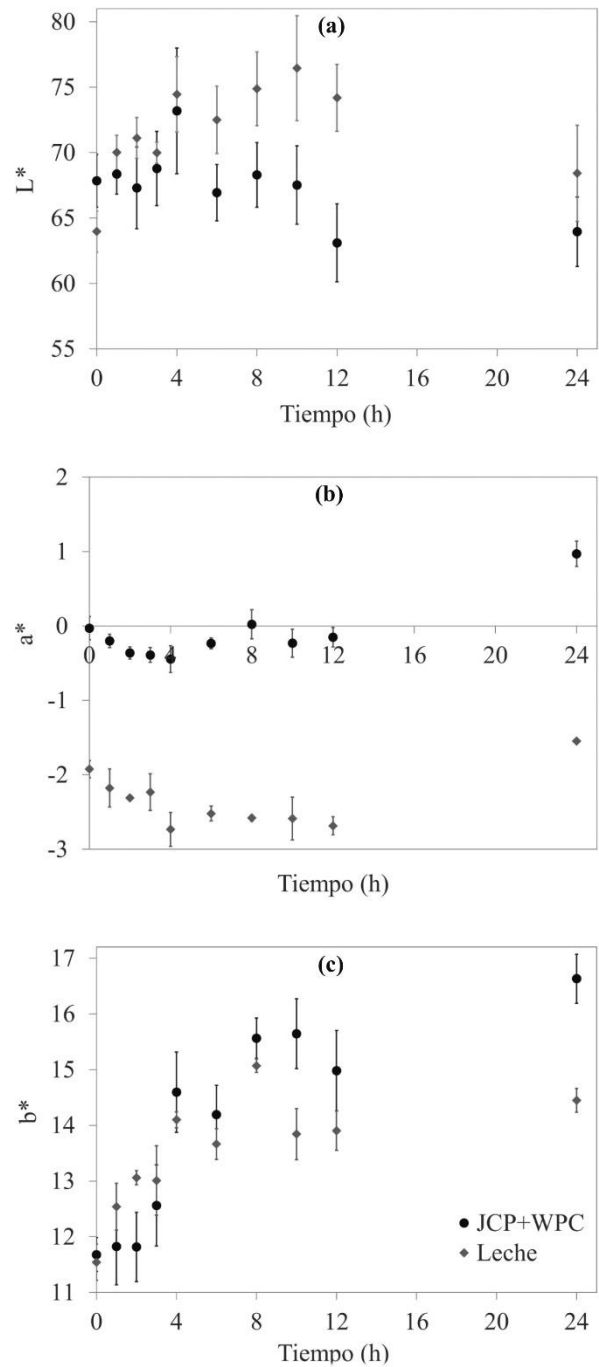


Figura 5. Evolución de parámetros de color (a) L^* , (b) a^* y (c) b^* para polvo de JCP + WPC y leche en polvo comercial. **Fuente.** Elaboración propia.

El parámetro b^* fue el más sensible al pasar de 11,68 a 16,63. El producto al estar en contacto directo con el ambiente sufre procesos de pardeamiento tornándose más amarillo con el paso del tiempo. El incremento del contenido de humedad favorece el desarrollo de procesos de deterioro del producto y posibles reacciones entre las sustancias que componen la matriz del polvo de JCP y WPC. La leche presentó un comportamiento similar con valores del parámetro b^* en el rango de 11,54-15,07 en las 24 horas de seguimiento.

Dados los resultados obtenidos se podría decir que el polvo de JCP y WPC es ligeramente más sensible a cambios de color durante el almacenamiento y exposición a ambientes con alta humedad relativa. El cambio de color hacia valores mayores de a^* y b^* es una evidencia del desarrollo de procesos de pardeamiento no enzimático o reacciones de Maillard [29], en la cual las proteínas ricas en lisina reaccionan con azúcares reductores [30] como la lactosa, fructosa y glucosa presentes en la muestra de estudio.

Los productos al ser de origen lácteo y obtenidos mediante secado por aspersión se encuentran en un rango similar en cuanto al color, con diferencias relacionadas a su estructura, composición, uso o no de aditivos y condiciones específicas de proceso y almacenamiento.

3.5. Tamaño de partícula y morfología

Los cambios en las propiedades fisicoquímicas de los productos en polvo son el resultado de cambios a nivel de su microestructura, causados por los efectos de las condiciones ambientales a las que son sometidos durante procesos de almacenamiento o preparación. El incremento de humedad como consecuencia de la absorción de agua desde el medio ambiente, provoca cambios en propiedades como la T_g y la solubilidad de las sustancias que componen el producto, hasta el punto en que las partículas sufren un colapso de su estructura original.

En la Figura 6 a se observa cada partícula separada con forma cercana a una esfera con presencia de indentaciones bien definidas, producto del proceso de secado por aspersión y la presencia de proteínas en la superficie de la partícula. Luego de 4 horas de exposición al ambiente con el aumento del contenido de humedad y la

disminución de la T_g , las partículas amorfas evidencian su transición a un estado gomoso (Figura 6b), cuya principal consecuencia es el incremento de la adhesividad y la unión de partículas. Estos cambios provocaron un incremento en el tamaño de partícula desde $14,61 \pm 0,3$ a $24,2 \pm 1,63$ μm entre los tiempos 0 y 4 horas.

Murrieta-Pazos et al. [9] reportó incremento del tamaño de partícula de leche en polvo con el incremento en la a_w , el cual atribuye inicialmente a la hinchazón de las partículas debido a la migración del agua hacia la matriz molecular amorfa y posteriormente a fenómenos de aglomeración conducidos por la lactosa. Chever et al. [28] obtuvo incremento en $D[4,3]$ de 54 μm a 133-308 μm para la aglomeración de polvo de mezclas de leche entera y azúcar.

En la Figura 6b es posible apreciar partículas con superficie más lisa y brillante, lo cual puede explicar el incremento del parámetro de color L^* en la muestra expuesta al ambiente durante 4 horas. Luego de 12 horas de exposición (Figura 6c) es evidente el colapso total de las partículas y la transformación del producto a un estado gomoso, sin evidencia de su estructura original. Por tal razón, no fue posible estimar un tamaño de partícula para la muestra tomada a las 12 horas. En este punto del proceso de absorción de agua, las características del producto cambiaron lo suficiente para considerar que no es apto para el consumo ya que no conserva las características de calidad propias de un producto en polvo.

Los resultados obtenidos coinciden con lo descrito por Araujo-Díaz et al. [31] quienes mencionan que la evolución de la morfología de las partículas puede atribuirse a la naturaleza química de los agentes portadores. En su caso evidenciaron que la adición de maltodextrina en el secado por aspersión de jugo de arándano provocó un cambio en las partículas desde el estado amorfo al gomoso con el incremento en la actividad de agua, mientras que la adición de inulina favoreció procesos de cristalización causados por las unidades de fructosa presentes en la inulina. Lo observado en la estructura de las partículas del polvo de JCP + WPC permite comprender los cambios presentados en cuanto a disminución de humectabilidad y cambios en el valor L^* de color.

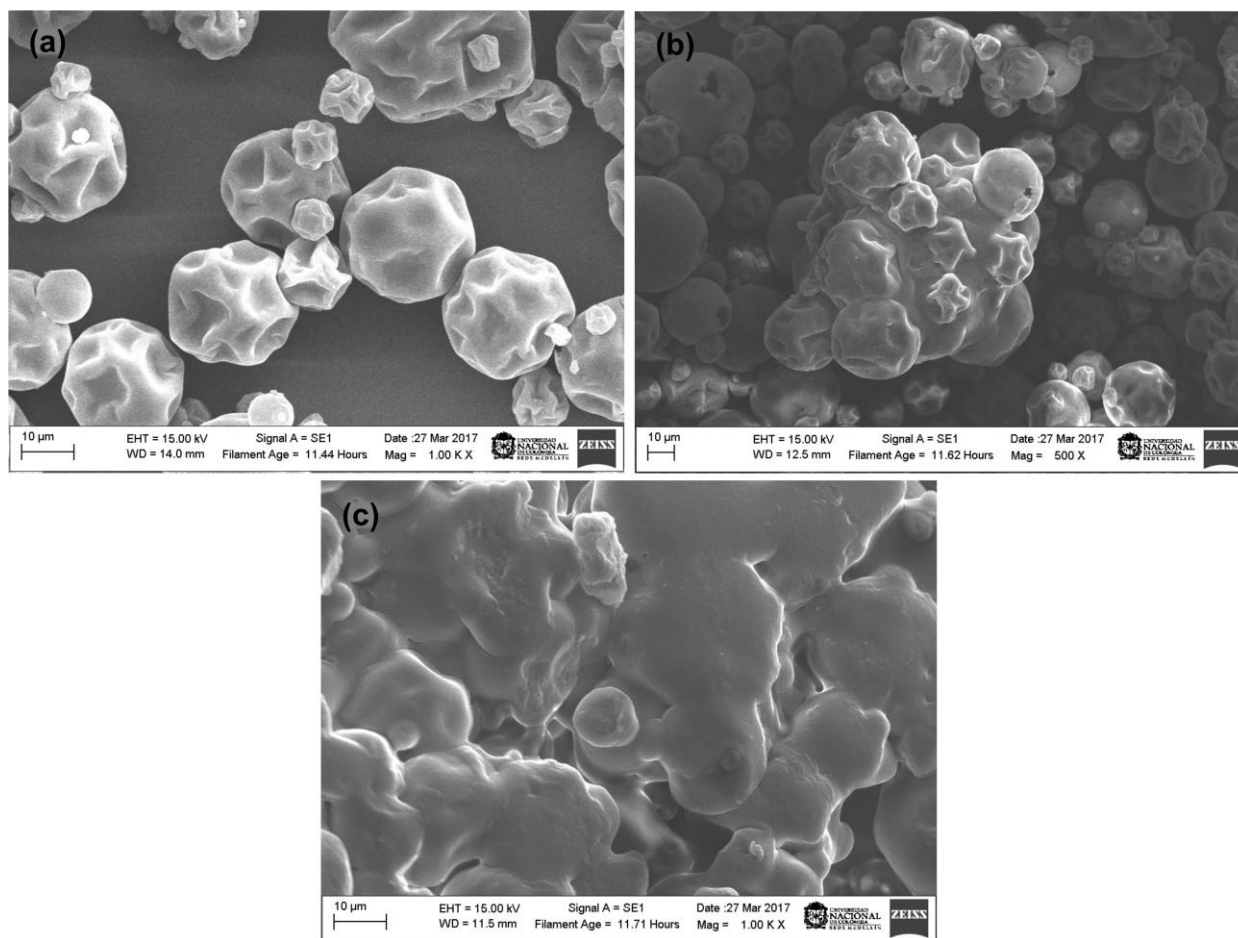


Figura 6. Muestras de polvo de JCP + WPC expuestas al ambiente durante (a) 0, (b) 4 y (c) 12 horas. **Fuente.** Elaboración propia.

3.6. Temperatura de transición vítrea (T_g)

Los resultados obtenidos permitieron determinar que la T_g del producto disminuyó a medida que incrementó el contenido de humedad de la muestra, lo cual obedece al efecto plastificante del agua confirmado por diversos autores [32, 33]. La T_g para las muestras analizadas a las 0, 4 y 12 horas fue de 11,91, -5,26 y -15,84 °C respectivamente (Figura 7), lo cual fue consecuencia del incremento de humedad desde 4,3% para la muestra analizada a las 0 horas hasta 11,16 y 14,71% para 4 y 12 horas de exposición. En los termogramas presentados en la Figura 7 se puede confirmar la presencia de T_g por el comportamiento presentado en el flujo de calor reversible y el incremento de la capacidad calorífica. Además es posible observar la presencia de endotermos causados posiblemente por procesos de relajación entálpica del producto en polvo. En el rango de temperaturas analizado no se observaron fenómenos de evaporación, fusión o degradación de sustancias.

Los valores de T_g para las sustancias que hacen parte del polvo de JCP y WPC reportadas por algunos autores son -135 °C para el agua [34], 65 °C para sacarosa [34] y 145,44 °C para WPC [7]. Los valores bajos de T_g presentados para el producto en polvo de JCP y WPC se deben a que las mezclas proteínas-azúcar no son compatibles y se refleja principalmente la T_g del azúcar en el sistema [35, 36] y la superación de la adhesividad entre partículas y con la cámara del secador se debe a la película proteica, con mayor T_g que T_g bulk de la mezcla [34]. Además de la sacarosa aportada por el JCP, el WPC aporta lactosa la cual contribuye a la disminución de T_g en el sistema y el incremento de la inestabilidad de las proteínas [37]. Fang y Bhandari [38] obtuvieron valores de T_g similares entre 14,12–15,34 °C en polvo de arrayan chino (*Myrica rubra Sieb. et Zucc*) obtenido mediante secado por aspersión.

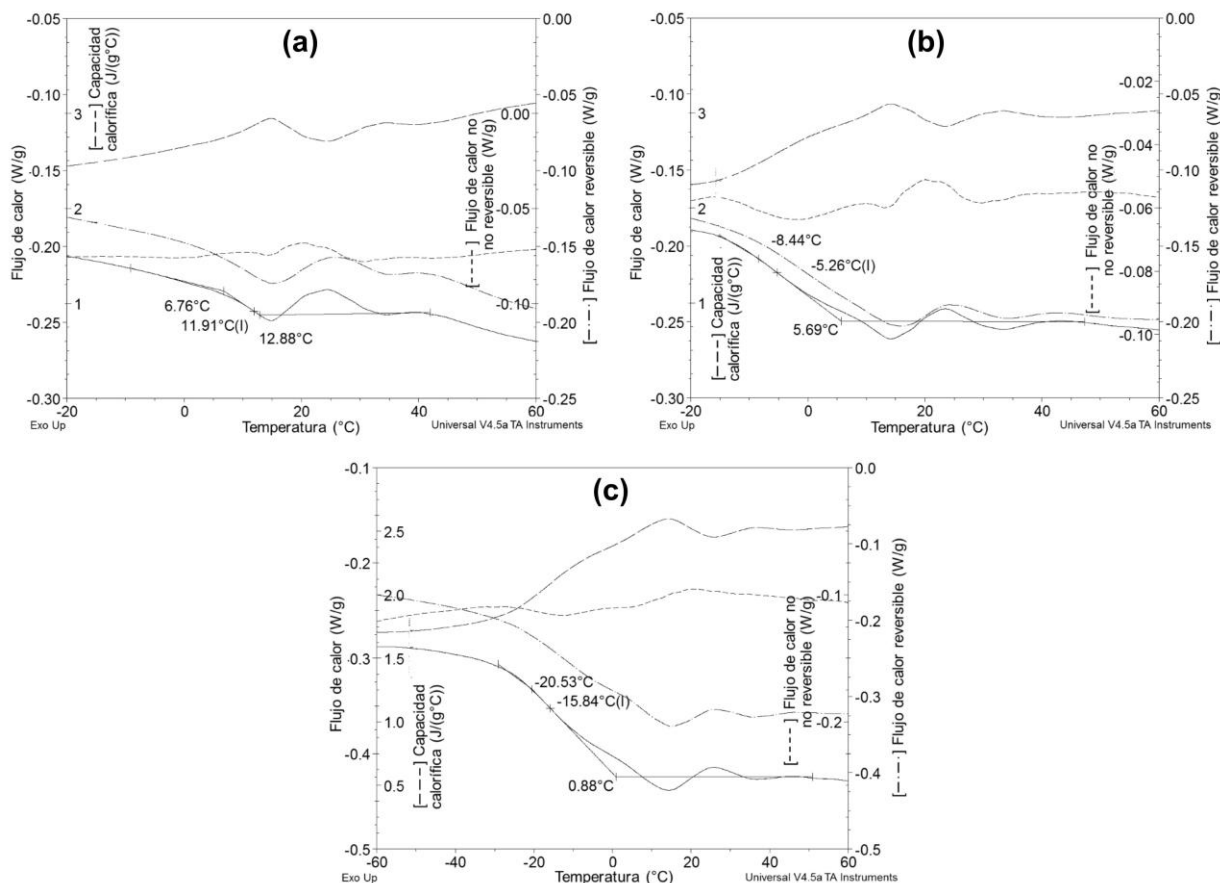


Figura 7. Termogramas para muestras de polvo de WPC + JCP expuestas al ambiente durante (a) 0, (b) 4 y (c) 12 horas **Fuente.** Elaboración propia.

3.7. Cinética de absorción de agua

De acuerdo al ajuste de datos con el modelo de Peleg el contenido de agua del polvo de JCP + WPC está dado por la ecuación (7).

$$X(t) = 4,49 + \frac{t}{0,2313 + 0,0692 * t} \quad (7)$$

El coeficiente de determinación obtenido fue de 99,37 %, lo cual sugiere un buen ajuste de datos tal como se observa en la Figura 8. Cabe resaltar que los valores presentados en cada tiempo evaluado corresponden al promedio aritmético de los resultados de las muestras.

La constante de velocidad de Peleg (k_1) es igual a 0,2313 h.%⁻¹. Al utilizar la ecuación (4) se obtiene que la velocidad inicial de absorción de agua es 4,32% por hora. La constante de capacidad de Peleg (k_2) obtenida es igual a 0,0692 %⁻¹. Al reemplazar en la ecuación (5) se obtiene que la humedad de equilibrio ($t \rightarrow \infty$) generada por el modelo es igual a 18,94%.

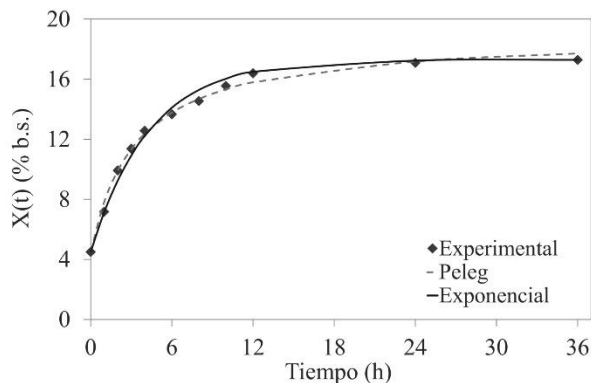


Figura 8. Comparación de los datos experimentales de contenido de humedad con los predichos por los modelos de Peleg y exponencial. **Fuente.** Elaboración propia.

Algunos autores ajustaron los datos experimentales al modelo de Peleg para absorción de agua por inmersión y obtuvieron valores de k_1 y k_2 iguales a 0,62-1,52 y 0,02 a 0,03 k_2 para la hidratación de almidón de trigo, WPI y WPC [23]; 0,1313-0,3385 y 0,0174-0,0124 para semillas de sésamo [39]; y 11,9-2,58 y 7,4-2,51 para remojo de pasta [40]. En general, los autores mencionan que las

constantes k_1 y k_2 disminuyen a medida que aumenta la temperatura, dado que la velocidad y la capacidad de absorción de agua incrementa a mayor temperatura.

La diferencia en las constantes obtenidas obedece a la naturaleza de cada material analizado y el hecho de que el modelo ha sido más utilizado en la absorción de agua por inmersión. Khazaei y Mohammadi [39] mencionan que la velocidad de absorción depende de la diferencia entre el contenido de humedad de saturación y el contenido de agua a un tiempo dado, siendo esta la fuerza impulsora del proceso que disminuye a medida que el contenido de humedad del producto incrementa.

Al realizar el ajuste de datos con el modelo exponencial se obtuvo como resultado las ecuaciones (8) y (9) para MR y contenido de agua respectivamente. Los valores de X_0 y X_{eq} para el cálculo de MR corresponden a los contenidos de humedad inicial y final respectivamente (0 y 36 horas).

$$MR = \exp(-0,2317 * t) \quad (8)$$

$$X(t) = -12,7974 * \exp(-0,2317 * t) + 17,29 \quad (9)$$

El valor de R^2 igual a 98,97% muestra un adecuado ajuste de datos, tal como se observa en la Figura 8. La constante de velocidad de absorción de agua (k_e) es igual a 0,2317 h^{-1} cuyo valor positivo indica la ganancia de agua en el proceso. El modelo exponencial ha sido aplicado en varios estudios, con valores de k_e entre 0,46- 8,08 para tratamientos de tejidos de mandioca macerados con una poligalacturonasa microbiana [18], 0,0247-0,049 para semillas de sésamo [39] y 1,9363-3,6147 para garbanzo (*Cicer arietinum* L.) [16]. Los autores observaron un incremento en k_e cuando se incrementó la temperatura del proceso.

De acuerdo a los valores obtenidos de R^2 para cada modelo es posible determinar que el modelo que mejor ajusta el comportamiento del contenido de humedad con respecto al tiempo del polvo de JCP y WPC es el modelo de Peleg. Sin embargo, es posible determinar que el modelo de Peleg ajusta mejor los datos en las primeras 10 horas de exposición del producto y posteriormente aun cuando los datos experimentales muestran estabilización del proceso de absorción el modelo muestra incremento en el contenido de humedad. Esto se puede verificar en la humedad de equilibrio obtenida igual a 18,94%, frente a la experimental que fue de 17,29%. Por su parte, el modelo exponencial, al incluir el valor de humedad de equilibrio en su modelo, hace un buen ajuste de los datos en la fase de equilibrio a partir de las 12 horas.

Los dos modelos estudiados han sido ampliamente estudiados en fenómenos de absorción de agua por inmersión, sin embargo, dado que la absorción de agua del ambiente es un fenómeno de la misma naturaleza, se determinó que los dos modelos describen la cinética de absorción de agua del polvo de JCP y WPC de forma adecuada.

El incremento en los valores de actividad de agua para el polvo de JCP y WPC muestra un comportamiento similar al presentado por el contenido de humedad. Por ello, la cinética de incremento de actividad de agua del producto fue modelada con los modelos de Peleg y exponencial, tal como se muestra en la Figura 9, con coeficientes de determinación de 99,60 y 98,88 %.

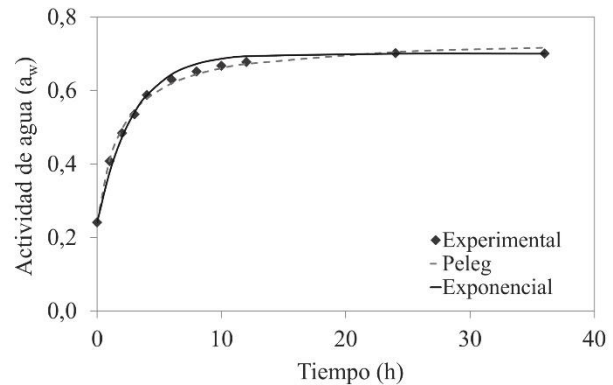


Figura 9. Comparación de los datos experimentales de actividad de agua con los predichos por los modelos de Peleg y exponencial. **Fuente.** Elaboración propia.

La a_w en el tiempo t de acuerdo al modelo de Peleg es descrita por la ecuación (10). La constante de velocidad de Peleg (k_1) es igual a 3,8918 h , de tal manera que la velocidad inicial de incremento de a_w es 0,2569 h^{-1} (ecuación (4)). La constante de capacidad de Peleg (k_2) obtenida es igual a 1,9953, lo cual permite determinar que la a_w de equilibrio ($t \rightarrow \infty$) es igual a 0,7424 (ecuación (5)).

$$a_w(t) = 0,2412 + \frac{t}{3,8918 + 1,9953 * t} \quad (10)$$

La actividad de agua en el tiempo t de acuerdo al modelo exponencial se muestra en la ecuación (11). La constante de velocidad de a_w (k_e) es igual a 0,3508 h^{-1} cuyo valor positivo indica la tendencia hacia el aumento de a_w del producto. Los valores de a_w inicial y en el equilibrio para el modelo exponencial fueron 0,2412 y 0,7 respectivamente, que corresponden a la a_w a las 0 y 36 horas de seguimiento.

$$a_w(t) = -0,4588 * \exp(-0,3508 * t) + 0,7 \quad (11)$$

Los resultados obtenidos permiten determinar que el modelo de Peleg presenta un mejor ajuste de datos, aunque los dos modelos utilizados presentan R^2 mayor al 98%. Sin embargo, el modelo de Peleg sobreestima el valor de equilibrio de a_w a las 36 horas de seguimiento y el cual dada la humedad relativa del ambiente a la que estuvo expuesto el polvo, debe ser igual a 0,70. Por su parte, el modelo exponencial al utilizar el valor de a_w de equilibrio presenta una fase de estabilización entre las 12 y 36 horas, como se observa en la Figura 9. Los resultados obtenidos no pueden ser comparados, ya que no se han realizado estudios que evalúen la cinética de absorción de agua desde el punto de vista del incremento de la a_w del producto.

4. CONCLUSIONES

El polvo obtenido a partir de JCP y WPC presenta un comportamiento característico de los productos obtenidos mediante secado por aspersión, en especial la alta higroscopicidad resultado de su naturaleza amorfa. Al exponer el producto a condiciones ambientales de 70% de humedad relativa y 25 °C, se obtuvo incremento en el contenido de humedad, actividad de agua, disminución de T_g y humectabilidad y cambios en el color, como consecuencia de la absorción de agua del entorno y cambios a nivel microestructural.

La cinética de absorción se evaluó a través del incremento del contenido de humedad y la a_w en el tiempo. En ambos casos los datos experimentales ajustaron mejor al modelo de Peleg con un R^2 de 99,37% y 99,6% respectivamente, confirmando que es un modelo que describe muy bien la humedad del producto en el tiempo para productos alimentarios y no alimentarios. El incremento de humedad del producto ocurre rápidamente en las primeras horas de exposición dado el mayor diferencial entre la presión de vapor entre el ambiente y el producto, hasta llegar al equilibrio aproximadamente a las 36 horas. Fue posible observar la fuerte dependencia de la T_g con respecto a la humedad del producto ya que pasó de 11,91 a -15,84 °C con el incremento de humedad desde 4,3% a 14,71% (b. h.) tras 12 horas de exposición.

Los cambios presentados evidencian la pérdida gradual de la calidad del producto en polvo debido a los cambios en sus propiedades fisicoquímicas provocados por la absorción de agua y la inexistencia de barreras de protección con el ambiente, y por ende la importancia del adecuado manejo y protección de los productos en polvo durante el almacenamiento.

Los cambios presentados en la humectabilidad permiten recomendar la evaluación de una etapa adicional de aglomeración en el proceso de secado con el fin de

disminuir el tiempo que tarda el polvo de JPC y WPC en humedecerse y/o la adición de agentes anti aglomerantes que favorezcan sus propiedades de reconstitución.

5. REFERENCIAS

- [1] G. Osorio Cadavid, "Buenas prácticas agrícolas - BPA- y buenas prácticas de manufactura -BPM- en la producción de caña y panela". Colombia: FAO, 2007.
- [2] Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, "Encuesta nacional agropecuaria 2013", 2014.
- [3] S. Jovanović, M. Bara, and O. Ma, "Whey proteins- Properties and Possibility of Application," *Mljekarstvo*, vol. 55, no. 3, pp. 215–233, 2005.
- [4] C. Wandrey, A. Bartkowiak, and S. E. Harding, "Materials for Encapsulation," in *Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing*, Springer, 2010, pp. 31–100.
- [5] M. M. Londoño, J. U. Sepúlveda, A. Hernández, and J. Parra, "Bebida fermentada de suero de Queso fresco con *Lactobacillus casei*," *Rev Fac Nal Agr Medellin*, vol. 61, no. 1, pp. 4409–4421, 2008.
- [6] B. Bazaria and P. Kumar, "Effect of whey protein concentrate as drying aid and drying parameters on physicochemical and functional properties of spray dried beetroot juice concentrate," *Food Biosci.*, vol. 14, pp. 21–27, 2016.
- [7] S. N. Bhusari, K. Muzaffar, and P. Kumar, "Effect of carrier agents on physical and microstructural properties of spray dried tamarind pulp powder," *Powder Technol.*, vol. 266, pp. 354–364, 2014.
- [8] Y. Suhag and V. Nanda, "Optimisation of process parameters to develop nutritionally rich spray-dried honey powder with vitamin C content and antioxidant properties," *Int. Journ. Food Sci. Technol.*, vol. 50, no. 8, pp. 1771–1777, 2015.
- [9] I. Murrieta-Pazos, C. Gaiani, L. Galet, B. Cuq, S. Desobry, and J. Scher, "Comparative study of particle structure evolution during water sorption: Skim and whole milk powders," *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 87, no. 1, pp. 1–10, 2011.
- [10] O. Paquet-Durand, V. Zettel, and B. Hitzmann, "Optimal experimental design for parameter estimation of the Peleg model," *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 140, pp. 36–42, 2015.

- [11] J. W. Rhim, S. Koh, and J. M. Kim, "Effect of freezing temperature on the rehydration properties of freeze-dried rice porridge," *Korean Journ. Food Sci. Technol.*, vol. 43, no. 4, pp. 484–491, 2011.
- [12] M. Dupas-Langlet, M. Benali, I. Pezron, K. Saleh, and L. Metlas-Komunjer, "The impact of deliquescence lowering on the caking of powder mixtures," *Powder Technol.*, vol. 270, pp. 502–509, 2015.
- [13] K. Khuenpet, N. Charoenjarasrerk, S. Jaijit, S. Arayapoonpong, and W. Jittanit, "Investigation of suitable spray drying conditions for sugarcane juice powder production with an energy consumption study," *Agric. Nat. Resour.*, vol. 50, no. 2, pp. 139–145, 2016.
- [14] D. Krishnaiah, R. Nithyanandam, and R. Sarbatly, "A critical review on the spray drying of fruit extract: effect of additives on physicochemical properties.," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 54, no. 4, pp. 449–473, 2014.
- [15] A. R. Piergiovanni, "Kinetic of water adsorption in common bean: Considerations on the suitability of peleg's model for describing bean hydration," *Journ. Food Process. Preserv.*, vol. 35, no. 4, pp. 447–452, 2011.
- [16] K. Prasad, P. R. Vairagar, and M. B. Bera, "Temperature dependent hydration kinetics of *Cicer arietinum* splits," *Food Res. Int.*, vol. 43, no. 2, pp. 483–488, 2010.
- [17] D. Ascheri and S. Bastos, "Propiedades de adsorción de agua de dos genotipos de arroz rojo," *Journ. Brazilian Assoc. Agric. Eng.*, vol. 35, no. 1, pp. 134–143, 2015.
- [18] M. M. Brousse, M. L. Vergara, E. R. Zubreski, N. E. Cruz, and M. A. Martos, "Cinética de absorción de agua de tejidos de mandioca macerados con una poligalacturonasa microbiana," *Rev. Cienc. y Tecnol.*, vol. 22, pp. 53–57, 2014.
- [19] D. Ndapeu, E. Njeugna, and N. R. Sikame, "Experimental Study of the Water Absorption Kinetics of the Coconut Shells (*Nucifera*) of Cameroun," *Mater. Sci. Appl.*, vol. 7, pp. 159–170, 2016.
- [20] A. M. R. Pilosof, R. Boquet, and G. B. Bartholomai, "Kinetics of Water Uptake by Food Powders," *Journ. Food Sci.*, vol. 50, no. 1, pp. 278–279, 1985.
- [21] B. P. N. Singh and S. P. Kulshrestha, "Kinetics of Water Sorption by Soybean and Pigeonpea Grains," *Journ. Food Sci.*, vol. 52, no. 6, pp. 1538–1541, 1987.
- [22] M. Peleg, "An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves," *Journ. Food Sci.*, vol. 53, no. 4, pp. 1216–1217, 1988.
- [23] P. A. Sopade, P. Y. Xun, P. J. Halley, and M. Hardin, "Equivalence of the Peleg, Pilosof and Singh-Kulshrestha models for water absorption in food," *Journ. Food Eng.*, vol. 78, no. 2, pp. 730–734, 2007.
- [24] AOAC Association of Official Analytical Chemists, *Official methods of analysis*, 15th edition. Washington, D.C., 1990.
- [25] B. Freudig, S. Hoge Kamp, and H. Schubert, "Dispersion of powders in liquids in a stirred vessel," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 38, no. 4, pp. 525–532, 1999.
- [26] A. M. Ceballos, G. I. Giraldo, and C. E. Orrego, "Effect of freezing rate on quality parameters of freeze dried soursop fruit pulp," *Journ. Food Eng.*, vol. 111, no. 2, pp. 360–365, 2012.
- [27] C. C. Ferrari, S. P. M. Germer, I. D. Alvim, F. Z. Vissotto, and J. M. de Aguirre, "Influence of carrier agents on the physicochemical properties of blackberry powder produced by spray drying," *Int. Journ. Food Sci. Technol.*, vol. 47, no. 6, pp. 1237–1245, 2012.
- [28] S. Chever, S. Méjean, A. Dolivet, F. Mei, C. M. Den Boer, G. Le Barzic, R. Jeantet, and P. Schuck, "Agglomeration during spray drying: Physical and rehydration properties of whole milk/sugar mixture powders," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 83, pp. 33–41, 2017.
- [29] G. Liu and Q. Zhong, "High temperature-short time glycation to improve heat stability of whey protein and reduce color formation," *Food Hydrocoll.*, vol. 44, pp. 453–460, 2015.
- [30] K. Li, M. W. Woo, and C. Selomulya, "Effects of composition and relative humidity on the functional and storage properties of spray dried model milk emulsions," *Journ. Food Eng.*, vol. 169, pp. 196–204, 2016.
- [31] S. B. Araujo-Díaz, C. Leyva-Porras, P. Aguirre-Bañuelos, C. Alvarez-Salas, and Z. Saavedra-Leos, "Evaluation of the physical properties and conservation of the antioxidants content, employing inulin and maltodextrin in the spray drying of blueberry juice," *Carbohydr. Polym.*, vol. 167, pp. 317–325, 2017.
- [32] M. A. Ruiz-Cabrera, C. Rivera-Bautista, A. Grajales-Lagunes, R. González-García, and S. J.

Schmidt, "State diagrams for mixtures of low molecular weight carbohydrates," *Journ. Food Eng.*, vol. 171, pp. 185–193, 2016.

[33] C. Vásquez, P. Díaz-Calderón, J. Enrione, and S. Matiacevich, "State diagram, sorption isotherm and color of blueberries as a function of water content," *Thermochim. Acta*, vol. 570, pp. 8–15, 2013.

[34] B. Adhikari, T. Howes, B. R. Bhandari, and T. a G. Langrish, "Effect of addition of proteins on the production of amorphous sucrose powder through spray drying," *Journ. Food Eng.*, vol. 94, no. 2, pp. 144–153, 2009.

[35] Z. Fang, R. Wang, and B. Bhandari, "Effects of Type and Concentration of Proteins on the Recovery of Spray-Dried Sucrose Powder," *Dry. Technol.*, vol. 31, no. 13–14, pp. 1643–1652, 2013.

[36] A. K. Shrestha, T. Howes, B. P. Adhikari, B. J. Wood, and B. R. Bhandari, "Effect of protein concentration on the surface composition, water sorption and glass transition temperature of spray-dried skim milk powders," *Food Chem.*, vol. 104, no. 4, pp. 1436–1444, 2007.

[37] E. A. Norwood, S. Pezennec, J. Burgain, V. Briard-Bion, P. Schuck, T. Croguennec, R. Jeantet, and C. Le Floch-Fouéré, "Crucial role of remaining lactose in whey protein isolate powders during storage," *Journ. Food Eng.*, vol. 195, pp. 206–216, 2017.

[38] Z. Fang and B. Bhandari, "Comparing the efficiency of protein and maltodextrin on spray drying of bayberry juice," *Food Res. Int.*, vol. 48, no. 2, pp. 478–483, 2012.

[39] J. Khazaei and N. Mohammadi, "Effect of temperature on hydration kinetics of sesame seeds (*Sesamum indicum L.*)," *Journ. Food Eng.*, vol. 91, no. 4, pp. 542–552, 2009.

[40] S. E. Cunningham, W. A. M. McMinn, T. R. A. Magee, and P. S. Richardson, "Modelling water absorption of pasta during soaking," *Journ. Food Eng.*, vol. 82, no. 4, pp. 600–607, 2007.