

## Curvas de deshidratación del brócoli (*Brassica oleraceae* L var. *Italica Plenck*) y coliflor (*Brassica oleraceae* L var. *Botrytis* L)<sup>1</sup>

Dehydration curves in broccoli (*Brassica oleraceae* L var. *Italica Plenck*) and cauliflower (*Brassica oleraceae* L var. *Botrytis* L)

R. J. Maldonado<sup>2</sup> y E. Pacheco-Delahaye<sup>3</sup>

### Resumen

El brócoli es un cultivo que presenta una composición nutricional ventajosa en lo que respecta a proteínas, fibra y ceniza. El coliflor es una fuente de fibra rica en polisacáridos pectínicos. Los vegetales anteriormente citados, al ser deshidratados, su contenido en fibra aumenta considerablemente, de allí su importancia en aplicar este tipo de tecnología. Con la finalidad de conocer las características del proceso de secado en estos vegetales, se construyeron las curvas de secado a diferentes temperaturas de bulbo seco (60, 70 y 80°C) utilizando un deshidratador de bandeja. La humedad en estado fresco del brócoli y coliflor fueron de 92,11 y 92,2%, respectivamente. La humedad de equilibrio mas baja fue de 4,3% y 5,4% en las harinas obtenidas del brócoli y coliflor a la temperatura de 80°C, equivalentes a una reducción de humedad del 85 y 86%, respectivamente. Los resultados indican que a medida que la temperatura de secado aumenta, mayor es el descenso de la humedad del sólido, mayor la velocidad de secado en el periodo antecrítico y mas bajo es el tiempo de secado. En ambos vegetales, la zona de velocidad constante fue observado claramente a 60 y 70°C, no presentándose a la temperatura de 80°C. La humedad de equilibrio fue alcanzada a las dos horas de secado, con excepción del brócoli deshidratado a 60°C, el cual fue a la tercera hora.

**Palabras clave:** deshidratación, brócoli, coliflor, preservación.

---

Recibido el 26-6-2002 ● Aceptado el 8-11-2002

1 Trabajo financiado por el CDCH-UCV (PG 01.37.4447.99).

2 Ing. Agro. MSc. Prof Instructor. UCV. Facultad de Agronomía.

3 MSc. Dra. Prof. Titular. Autor para correspondencia. Laboratorio de Bioquímica de Alimentos, Instituto de Química y Tecnología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay 2105. Aragua, Venezuela. E-mail: olivier@telcel.net.ve

## Abstract

Broccoli is a crop that has an advantageous nutritional composition with respect to proteins, fiber and ash. Cauliflower is a fiber source rich in pectic polysaccharides. When the above mentioned vegetables are dehydrated, their fiber content increases significantly which explains the importance of applying this kind of technology. For the purpose of determining the drying processes in these vegetables, the drying curves at several dry bulb temperature (60, 70 and 80°C) were constructed, using a tray (cabinet) dryer. The moisture in fresh broccoli and cauliflower was 92,11 and 92,2%, respectively. The lowest equilibrium moisture content were 4,3% and 5,4 % in flours obtained from broccoli and cauliflower at 80°C, and were equal to moisture reduction of 85 and 86%, respectively. The results indicate that when the drying temperature is higher, the moisture decrease in the solid is greater; the drying rate in the pre-critical period is greater and the drying time is shorter. The constant-rate zone in both vegetables was clear at 60 and 70°C and not at 80°C. The equilibrium humidity level was reached after two hours of drying, with the exception of broccoli dehydrated at 60°C, in which case it was reached at the third hour.

**Key words:** Dehydration, broccoli, cauliflower, preservation

## Introducción

La deshidratación es un proceso empleado para la preservación de alimentos. Esta técnica consiste en la eliminación de la totalidad del agua libre de un sólido, lo que permite que se reduzcan las reacciones químicas e inhiban el crecimiento microbiano, por consiguiente, se prolonga la vida útil de los alimentos (3, 4, 15, 17). Las ventajas operativa de los productos deshidratados es que disminuye considerablemente el peso de los mismo (son más ligeros), ocupan menor volumen, lo cual consigue ahorros importantes en el almacenamiento y transporte, además su vida útil es mayor, relativamente barato y fácil de implementar (4).

El brócoli (*Brassica oleracea* var. *Itálica*) es una de las crucíferas más comúnmente consumida en la dieta

humana debido a que es un vegetal con aspectos nutritivos favorables, como la presencia de vitaminas, particularmente las que actúan como antioxidantes (ácido ascórbico y b-caroteno) y fibra dietaria (11). Además es un potente inductor de las enzimas que ejercen un efecto protector frente a los agentes químicos carcinogénicos (10).

Estudios sobre el proceso de deshidratación de inflorescencia del brócoli han logrado una disminución del contenido final de humedad a 5,6% en secadores de gabinete a 65°C por 4 horas (7). Otras investigaciones, como la publicada por Mulet *et al.* (16), han demostrado que la inflorescencia de brócoli se adecua a la características de un cuerpo poroso y la transferencia de masa se hace por un proceso de

difusión, en fase líquida o gaseosa, a través de su estructura interior.

El coliflor al igual que el brócoli, es una hortaliza crucífera, altamente apreciada, que se consume con bastante regularidad en la dieta del hombre. Se caracteriza por poseer una fuente rica de polisacáridos pectínicos el cual posee un rol importante en la dieta (5). La mayor porción de este vegetal es consumido fresco, cantidades limitadas son procesadas, de los cuales muchos son enlatados y deshidratados (12).

Femenia *et al.* (6), deshidrataron coliflor empleando temperaturas de 40, 50, 60 y 75°C utilizando un deshidratador de lecho fluidizado. Estos

investigadores encontraron que las temperaturas usadas para la deshidratación tuvieron un marcado efecto sobre la velocidad de secado, logrando una disminución de la humedad a aproximadamente 10%, en un tiempo de 30 minutos cuando se empleó temperaturas de 75°C y 80 minutos cuando fue utilizada la temperatura de 40°C.

Considerando las investigaciones anteriormente citadas, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del tratamiento térmico a 60, 70 y 80°C sobre el proceso de deshidratación del brócoli y coliflor en base a la humedad del sólido, velocidad y tiempo de secado.

## Materiales y métodos

**Materia prima.** Lotes de 1,5 Kg de brócoli y coliflor fresco por fabricación fueron adquiridos en supermercados de la ciudad de Maracay. Previamente a su procesamiento fueron separadas las hojas del tallo principal y se removieron las inflorescencias a través de un corte transversal a 5 cm del punto donde las flores se ramifican.

**Fabricación.** Las harinas de brócoli y coliflor fueron obtenidas de acuerdo al siguiente esquema tecnológico: selección y lavado de las inflorescencias, inmersión en 0,01% de ácido cítrico por un minuto, escurrido, troceado y picado a 0,25 cm<sup>2</sup> y deshidratado en un secador de bandeja marca, Proctor and Schwartz, SCM Corporation Philadelphia, PA. U.S.A, con diferentes temperaturas del bulbo seco (60, 70 y 80 °C) durante 4 horas.

La velocidad del aire fue de 11 m/s y la carga de trabajo 0,5 kg repartidas en cuatro bandejas de aluminio de 12x18,5 cm de área (0,022 m<sup>2</sup>) (125 g de material fresco por bandeja). El espesor del área de secado fue de 0,5 cm. El brócoli y coliflor deshidratado fueron molidos en un molino de martillo, envasado en frascos de vidrio y almacenado a temperatura de refrigeración (12°C).

**Proceso experimental de secado.** Los datos del proceso de secado (humedad del sólido vs. tiempo) fueron obtenidos pesando periódicamente las muestras a intervalos de 30 minutos durante la primera hora de secado y 1 hora después de este primer intervalo con una balanza marca Ohaus. La humedad inicial del material fresco y la del sólido deshidratado después de cada experimento fue determinado de

acuerdo al método establecido por la AOAC (1), donde el valor de humedad se obtiene por diferencia del peso inicial (1 g de muestra) con respecto al peso final una vez secado a 100°C en una estufa marca Memmerl, hasta llevar a peso constante.

Calculo de la humedad del sólido (ns) y velocidad de secado (-dns/dt). La humedad del sólido (ns) en las muestras del brócoli y coliflor a un determinado tiempo de secado fue calculada como la cantidad de agua en la unidad del sólido del alimento, expresado a por la formula aplicada por (19):

$$ns = (Psh - Pss) / Pss$$

Donde, ns es la humedad del sólido (kg H<sub>2</sub>O/kg ss), Psh es el peso del sólido húmedo, Pss el peso del sólido seco y la diferencia entre Psh-Pss es la masa de agua que presenta el alimento a un tiempo determinado. El peso del sólido seco (Pss) del alimento fue determinado por la ecuación:

$$Pss = ((100 - \% \text{humedad del alimento fresco}) \times Psh_0) / 100$$

Donde, Psh<sub>0</sub> es el peso del sólido húmedo al inicio del proceso de secado o lo que es igual la carga inicial de trabajo en kg.

La velocidad de secado, expresado como kg H<sub>2</sub>O/kg ss.h, fue calculado como la pérdida de humedad del sólido en la unidad de tiempo, más exactamente por el cociente diferencial (-dns/dt) (8).

Análisis estadístico de los datos. A los datos de humedad de equilibrio del brócoli y coliflor en las distintas temperaturas de secados fueron analizados aplicado un anavar en base a un diseño completamente

aleatorizado con n=4. Las medias de estos valores fueron comparadas con la prueba de Duncan, a un nivel de significancia de  $\mu=0,05$ , utilizando el paquete estadístico SAS (18).

Los datos promedios de la humedad del sólido (ns) en función del tiempo fueron representado en una gráfica para conocer los cambios de humedad del sólido durante el proceso de deshidratación en bandeja del brócoli y coliflor a 60, 70 y 80°C. La velocidad de secado en función de la humedad del sólido, es para describir la presencia o ausencia de los períodos de secado (período de inducción o zona o, de velocidad constante o zona I y decreciente o zona II) (14), característico en procesos donde hay transmisión de calor y transferencia de masa (secado por convección forzada de aire caliente) (4), además, conocer la cantidad de humedad de sólido que es eliminado en cada etapa y el porcentaje que representa con respecto a la humedad inicial del sólido al inicio de la media hora del proceso de secado, es posible identificar con claridad la velocidad y humedad crítica, entendiéndose velocidad crítica el punto donde termina el período de velocidad constante. El término humedad crítica hace referencia al punto en que la velocidad de secado comienza a disminuir hasta alcanzar la humedad de equilibrio (la humedad del alimento es igual a la de equilibrio con el aire de secado) en las gráficas de velocidad de secado vs. humedad del sólido (3). Tanto la humedad como la velocidad crítica se obtienen por interpolación en las referidas curvas de secado.

## Resultados y discusión

Humedad del brócoli y coliflor en estado fresco y deshidratado. En el cuadro 1 están los valores promedios de humedad inicial en estado fresco del brócoli y coliflor, así como la humedad de equilibrio alcanzadas después del proceso de deshidratación a 60, 70 y 80°C. Como puede observarse, la humedad en estado fresco o humedad inicial de ambos vegetales fueron de 92,11 y 92, 25% en brócoli y coliflor, respectivamente. Por otra parte la humedad de equilibrio alcanzadas después del proceso de deshidratación a 60 y 70°C en ambos vegetales, forman un grupo homogéneo que no presentan diferencias significativas a un nivel de significancia de  $\mu=0,05$ , pero son significativamente mayores al obtenido a 80°C. Esto demostró que a esta temperatura la humedad de equilibrio fue mucho más baja con respecto al resto de los tratamientos, lo cual equivale a una reducción de humedad en un 85 y 86% en el brócoli y coliflor, respectivamente. Barth *et al.* (2) determinaron el contenido de humedad del brócoli en estado fresco,

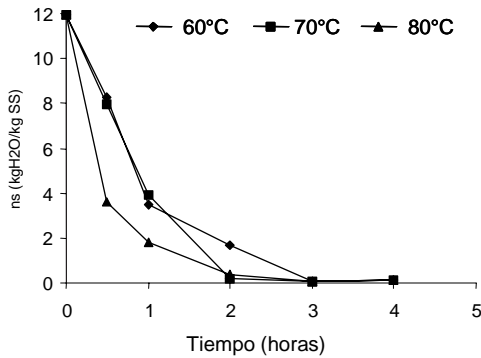
siendo este de 88,6%. Por su parte Femenia *et al.* (5) determinaron que el contenido de agua en las inflorescencia del coliflor fue de 96%. Debido a los altos porcentajes de humedad presentes en este material vegetal, el brócoli y coliflor, se caracterizan por ser altamente perecederos a temperatura ambiente cambiando a color amarillo, en el transcurso de 1 a 3 días en el caso del brócoli, y de esta manera se convierte en un producto no apto para su comercialización (9).

Cambios de la humedad del sólido con respecto al tiempo utilizando diferentes temperaturas de secado. En la figura 1 se presenta la media de los valores de humedad del sólido (kg H<sub>2</sub>O/kgSS) a lo largo del tiempo (h) en el proceso de deshidratación en bandeja del brócoli a 60, 70 y 80°C. Durante la primera hora del proceso, se observó una disminución significativa de la humedad del sólido en todas las temperaturas evaluadas. Esta disminución está incluso por debajo de la mitad del valor de humedad inicial

**Cuadro 1. Humedad del brócoli y coliflor en estado fresco y deshidratado.**

VEGETAL	Humedad inicial (%)	Humedad de equilibrio (%) <sup>1</sup>		
		60°C	70°C	80°C
Brócoli	92,11±0,2	6,49±0,04 <sup>a</sup>	5,33±0,01 <sup>a</sup>	4,3±0,36 <sup>b</sup>
Coliflor	92,25±0,1	7,84±0,90 <sup>a</sup>	8,19±0,5 <sup>a</sup>	5,43±0,5 <sup>b</sup>

<sup>1</sup> Humedad del vegetal después del proceso de deshidratación en bandeja a 60, 70 y 80°C. Valores promedios ± desviación estándar con n=4. Letras diferente denotan diferencias significativas en la prueba de comparación de medias de Duncan a un  $\mu=0,05$ .



**Figura 1. Cambios de la humedad del sólido durante el proceso de deshidratación en bandeja del brócoli a 60, 70 y 80°C**

del sólido, siendo comparables las caídas de humedad para las temperaturas de 60 y 70°C durante la primera hora de secado y más drásticas aún cuando observamos el perfil de secado del sólido a 80°C. Por otra parte, la caída de humedad del sólido es mucho más moderada (menor pendiente) a partir de la primera hora de secado.

Lo anterior es explicado por la facilidad de arrastre que tiene el proceso de secado debido a la presencia de agua libre en una superficie del sólido que está suficientemente saturada y que pasa directamente de la superficie al aire de arrastre antes de la primera hora de secado lo cual genera una fuerte caída de la humedad del sólido; luego, es moderada porque el agua primero tiene que pasar del interior a la superficie por mecanismos de difusión (13, 14). Este mecanismo es propio de alimentos altamente poroso como es el caso del brócoli (16).

A 80°C fue mucho más fuerte la caída de humedad porque a esta temperatura la evaporación del agua

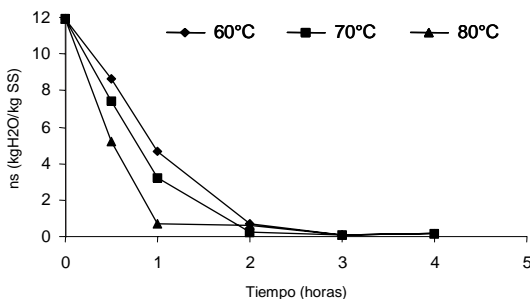
es más rápido. Posterior a la primera hora de secado los perfiles de deshidratación de las temperaturas de 70 y 80°C fueron acercándose hasta llegar a un punto de coincidencia que es logrado a la segunda hora del proceso el cual es prácticamente un valor cercano a la humedad de equilibrio.

Por su parte la deshidratación a 60°C se mantiene aún distante del contenido de humedad del sólido con respecto al resto de los tratamientos en este intervalo de tiempo, pero al transcurrir las 3 horas de secado todas alcanzaron la humedad de equilibrio. Como podemos observar, a pesar de las diferentes trayectorias de secado para las temperaturas de 70 y 80°C durante la primera hora de secado, ambas lograron contenidos de humedad semejante a la segunda hora, lo cual quiere decir que se obtiene el mismo efecto en la disminución del contenido de agua, no así para la temperatura de 60°C, en el que fue necesario exponer el alimento a periodos más prolongados de secado.

En la figura 2, se puede apreciar los cambios de la humedad del sólido en función del tiempo (h) en proceso de deshidratación en bandeja del coliflor a 60, 70 y 80°C. Durante la primera hora de secado fue registrada una fuerte caída de la humedad del sólido en todas las temperaturas de trabajo, para hacerse menos acentuada, luego de haber transcurrido esta primera hora, se alcanza la humedad de equilibrio en todos los tratamientos a partir de la tercera hora de secado. Al comparar la disminución de la humedad entre la segunda y tercera hora de secado con respecto a la primera vemos que es prácticamente despreciable. Al comparar la humedad del sólido entre las tres temperatura empleadas, se observa que fue más significativo la caída de humedad a los 80°C, luego le sigue a 70°C y por último a 60°C, cuya pendiente es menos pronunciada. Como puede observarse, prácticamente, al transcurrir la primera hora de secado el coliflor esta muy cercano a los valores de humedad de equilibrio, siendo a las 2 horas el tiempo necesario para deshidratarla empleando

temperaturas de 70°C. Femenia *et al.* (6), efectuaron estudios sobre el proceso de deshidratación del coliflor empleando un deshidratador de lecho fluidizado. Estos investigadores encontraron, que al igual que en la presente investigación, la temperatura, tuvo un marcado efecto sobre la pérdida de humedad del sólido, por otra parte los autores señalan que es necesario un tiempo mayor de 1 hora cuando se deshidrata coliflor a 40°C y solamente 30 minutos al emplear temperaturas de 75°C. Lo anterior indica que desde el punto de vista proporcional, concuerda con lo obtenido en esta investigación ya que al emplearse temperaturas de 60 y 70°C requieren mayor tiempo de secado (3 y 2 horas, respectivamente) mientras que a 80°C disminuyó significativamente a 1 hora. Jayaraman *et al.* (12), deshidrataron coliflores en secador de laboratorio por convección de aire forzada a 80°C por 2 horas, logrando un contenido final de agua del 5%.

Es interesante destacar en la curva de 80°C en ambos vegetales, que pequeñas variaciones en el tiempo de



**Figura 2.** Cambios de la humedad del sólido durante el proceso de deshidratación en bandeja del coliflor a 60, 70 y 80°C

secado para la primera hora de secado, generan grandes pérdidas de humedad. Lo anterior es importante, desde el punto de vista tecnológico y nutricional, porque hoy en día los procesos térmicos están diseñados utilizando altas temperatura a cortos tiempos, para evitar la pérdidas de características nutricionales como consecuencia de los tiempos excesivos de calentamiento (20). En este sentido es posible en el brócoli y coliflor, basados en las anteriores apreciaciones experimentales, proponer que el proceso de deshidratación en bandeja se inicie a 80°C durante una hora y terminar el proceso a 60°C, por una hora. Este cambio en los parámetros tecnológico va a permitir que el proceso de secado sea en menor tiempo (reducción del 50% con respecto al secado a los 60°C), lo que podría permitir una menor pérdidas de nutrientes, debido a la menor exposición del alimento a altas temperaturas.

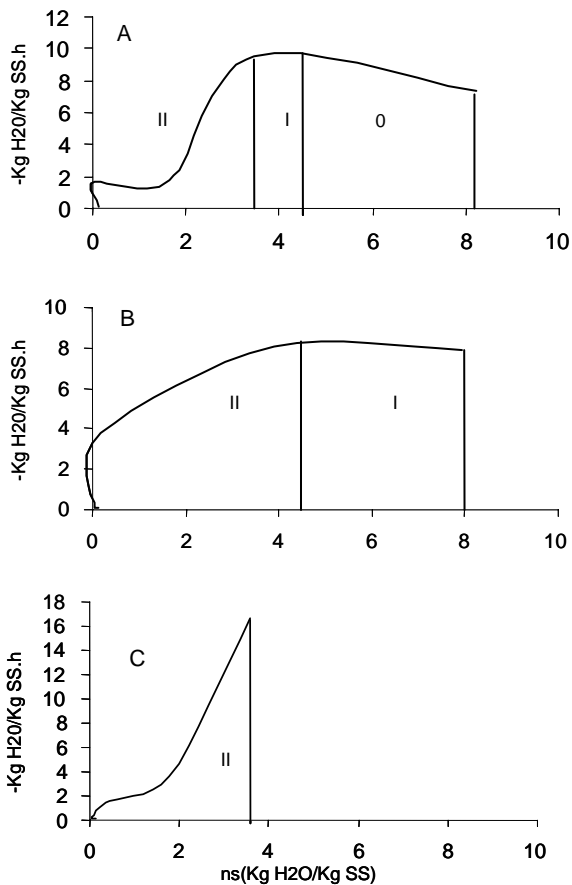
Cambios de la velocidad de secado del brócoli en función de la humedad del sólido. En las figuras 3(A), 3(B) y 3(C) son observados los cambios que experimenta la velocidad de secado en función de la humedad del sólido, durante el proceso de deshidratación del brócoli a 60, 70 y 80°C. Al analizar la figura 3(A) fue posible evidenciar la presencia de tres zonas de secado: zona 0 o zona de periodo de inducción, donde se inició con la humedad del sólido a 8,1 kg H<sub>2</sub>O/kg SS y finaliza cuando llega a 4,5 kgH<sub>2</sub>O/kg SS el cual representa una eliminación de la humedad en un 44%. Este periodo se caracterizó por un aumento progresivo de la velocidad de secado que va desde

7,5 a 10 kgH<sub>2</sub>O / kg SS.h.

La zona I o zona de velocidad constante, donde la superficie total expuesta del sólido está saturada de agua además el movimiento del agua desde el interior del sólido hasta la superficie ocurre en la misma velocidad de evaporación (3), el cual fue de 10 KgH<sub>2</sub>O/KgSS.h, lo que ocasionó una disminución de la humedad del sólido de 4,5 a 3,5 kgH<sub>2</sub>O/kgSS constituyendo solo el 12% de reducción de la humedad del sólido con respecto al valor inicial de humedad del sólido al inicio de la media hora del proceso de secado (8,1 kg H<sub>2</sub>O/kg SS). Este bajo porcentaje se explica porque al trabajar con estructuras sólidas, fibrosas o amorfas, el movimiento del líquido es por difusión, por lo tanto es probable que tenga períodos cortos de velocidad constante (8).

Posteriormente, la velocidad de secado comienza a decaer lentamente, dando comienzo al periodo de velocidad decreciente o zona II, que se inicia con la velocidad crítica de 10 kgH<sub>2</sub>O/kgSS.h correspondiente a una humedad crítica de 3,5 kgH<sub>2</sub>O/kgSS. Lo anterior se debe a que la difusión desde el interior, no puede suministrar todo el líquido que se evaporaría en la superficie, es decir, el agua líquida sobre la superficie fue insuficiente para mantener una película continua que recubra toda el área de secado, en consecuencia la velocidad de transferencia de agua de la superficie al medio de arrastre disminuye (15). Este periodo finaliza cuando la humedad libre se anula, es decir la velocidad de secado es cero. El mecanismo de difusión es muy lento dado que la humedad es parte integral de las estructuras sólidas que están





**Figura 3. Cambios de la velocidad de secado con respecto a la humedad del sólido durante el proceso de deshidratación del brócoli a 60 (A), 70 (B) y 80°C (C).**

atrapadas dentro de las fibras. Esta zona logró disminuir la humedad en un 56%, lo que significa que la mayor parte del proceso de secado está controlado por la velocidad de difusión del líquido (8).

El perfil de deshidratación del brócoli a la temperatura de 70°C evidencia dos zonas características, la zona de velocidad constante y la zona

de velocidad decreciente, tal como se observa en la figura 3(B). Existe una leve disminución de la velocidad crítica de 10 kgH<sub>2</sub>O/kgSS.h correspondiente a la curva de secado de 60 °C a 8,4 kgH<sub>2</sub>O/kgSS.h que es un valor muy cercano a lo que era el principio de la velocidad de inducción a los 60°C, esto permite ampliar el periodo de velocidad constante de 4,7 a 8 kgH<sub>2</sub>O/kgSS,

equivalente a un 41% en la reducción de la humedad del sólido. El mecanismo de secado se llega a estabilizar desde el principio debido al aumento de la temperatura y expansión de los poros, es probable entonces que el agua tenga mayor posibilidad de salida hacia la superficie lo cual facilita el movimiento del líquido desde el interior del material hacia la superficie (8). La reducción de humedad lograda en el periodo anterior (antecrítico), da inicio al periodo de velocidad decreciente, el cual reduce en un 59% la humedad del sólido hasta llevarla a 0,056 kgH<sub>2</sub>O/kgSS que es la humedad de equilibrio. Esto demuestra que aún prevalece el mecanismo de difusión del agua en un porcentaje bastante considerable. Además en este periodo la velocidad decreciente es una línea recta que depende de manera proporcional de la humedad del sólido, principalmente por la velocidad del movimiento de humedad dentro del sólido.

En cuanto al desempeño del proceso de deshidratación del brócoli a los 80°C expresado en los cambios de velocidad de secado (kgH<sub>2</sub>O/kgSS.h) con respecto a la humedad del sólido (kgH<sub>2</sub>O/kgSS) y observados en la figura 3(C), es posible apreciar la desaparición de las zonas de inducción y velocidad decreciente, incluso la humedad crítica fue de 3,7 kgH<sub>2</sub>O/kgSS 4 décimas por debajo de la mitad de la humedad inicial del sólido correspondiente al inicio de la media hora del proceso de secado (8,1 kgH<sub>2</sub>O/kgSS). También es importante destacar que la velocidad crítica aumentó considerablemente a 17 kgH<sub>2</sub>O/kgSS.h con respecto a los perfiles de deshidratación observados

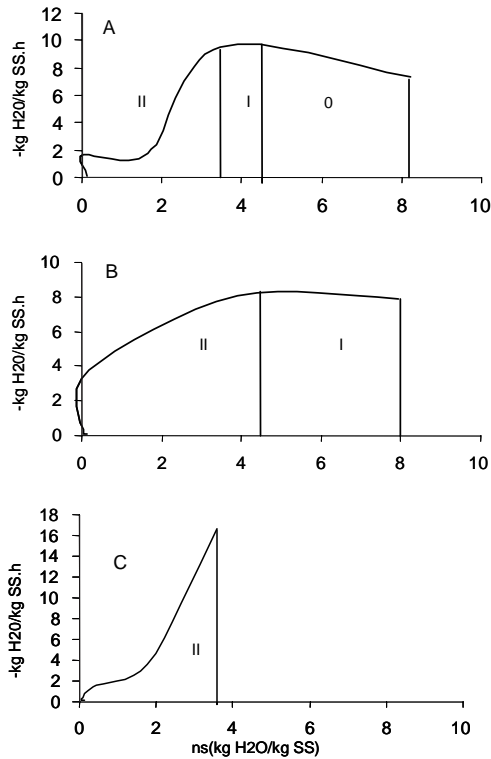
a los 60 y 70°C.

Por otra parte la zona de velocidad decreciente presentó dos tramos característicos, uno que se inicia con la velocidad crítica hasta llegar a 3 kgH<sub>2</sub>O/kgSS.h, en donde hay una rápida disminución de la velocidad de secado, siendo esta lineal con la humedad del sólido, y luego un periodo en la cual la pendiente es menos pronunciada disminuyendo muy lentamente hasta llegar a la velocidad nula.

Durante el primer periodo postcrítico, la velocidad de secado está regida por la evaporación del agua sobre una parte de la superficie útil total a través del mecanismo de difusión del líquido hacia la superficie. Durante el segundo periodo postcrítico, la superficie está seca, de modo que la velocidad de secado solo puede evaluarse atendiendo el proceso de transporte de humedad desde el interior del sólido a la superficie (14).

**Cambios de la velocidad de secado en función de la humedad del sólido durante el proceso de deshidratación del coliflor.** En las figuras 4(A), 4(B) y 4(C), están expresado los valores promedios de la velocidad de secado (kg H<sub>2</sub>O/kg SS.h) en función de la humedad del sólido durante el proceso de deshidratación del coliflor a 60, 70 y 80°C. El proceso de secado del coliflor a 60°C, tal como se muestra en la figura 4(A), tiene como características generales los siguientes aspectos: presencia de tres periodos de secado, velocidad y humedad crítica de 8 kgH<sub>2</sub>O/kgSS.h y 4,7 kgH<sub>2</sub>O/kgSS, respectivamente.

La zona de inducción o adaptación, se inicia con un aumento



**Figura 4. Cambios de la velocidad de secado con respecto a la humedad del sólido durante el proceso de deshidratación del coliflor a 60 (A), 70 (B) y 80°C (C).**

progresivo de la velocidad de secado de 7 hasta 8  $\text{kgH}_2\text{O/kgSS.h}$ , lo que permitió disminuir la humedad del sólido de 8,8 a 6  $\text{kgH}_2\text{O/kgSS}$  equivalente a una reducción de la humedad de un 32% con respecto a la humedad inicial del sólido (8,8  $\text{kgH}_2\text{O/kgSS}$ ) al inicio de la media hora del proceso de secado. En este período de estabilización las condiciones reinantes en la superficie del sólido se equilibran con las del aire de secado (3).

El período de velocidad constante, en la cual el proceso de secado esta en

su máxima velocidad, generó una pérdida de humedad del sólido de 6 a 4,7  $\text{kgH}_2\text{O/kgSS}$ , equivalente a un 15% de remoción de humedad. Es importante destacar que ambas regiones de secado lograron una disminución de la humedad del sólido en un 47%, el cual expresa la gran importancia que tienen estas dos zonas en la reducción de la humedad cuando existe una porción considerable de agua saturada en la superficie del sólido.

El resto de la humedad del sólido

(52,5%) fue removida durante el período de velocidad decreciente y se disminuyó de 4,7 a 0,08 kgH<sub>2</sub>O/kgSS. Por otra parte, hay que señalar que la disminución de la humedad en esta zona ocurrió en dos tramos, un primer tramo donde la pendiente de la velocidad es menos pronunciada cuya trayectoria es linealmente proporcional con la humedad del sólido y el segundo tramo apareció con una pendiente más pronunciada y de caída súbita, poco antes de llegar a la humedad de equilibrio, lo anterior es característico para sólidos cuyo mecanismo de transporte de humedad es por difusión (8).

Al estudiar la figura 4 (B), se observó que los períodos de secado se reducen a dos, el de velocidad constante y decreciente. Esto significa que el proceso de deshidratación se inició cuando la velocidad de secado es máxima (9 kgH<sub>2</sub>O/kgSS.h) a una humedad del sólido de 7,7 kgH<sub>2</sub>O/kgSS. La zona de velocidad constante provocó una disminución significativa del sólido de 7,7 a 4,4 kgH<sub>2</sub>O/kgSS equivalente a un 43%, mucho mayor con respecto a al periodo de velocidad constante para 60°C (11%). El periodo de velocidad decreciente fue iniciado cuando la humedad del sólido es crítica

(4,4 kgH<sub>2</sub>O/kgSS). Esta se caracterizó porque la velocidad de secado se mantiene lineal hasta 3 kgH<sub>2</sub>O/kgSS.h, e inversamente proporcional al contenido de humedad del sólido, luego súbitamente disminuye a la humedad de equilibrio (0,08 kgH<sub>2</sub>O/kgSS).

Con respecto al coliflor deshidratado a 80°C, tal como es presentado en la figura 4(C), el perfil de deshidratación presenta como característica principal la no presencia de la velocidad de adaptación y constante. Con solo dos período de velocidad decreciente, la primera etapa se inició cuando la humedad del sólido fue de 5,1 kgH<sub>2</sub>O/kgSS, con un descenso moderado de la velocidad que va desde la velocidad crítica (13,8 kgH<sub>2</sub>O/kgSS.h) hasta llegar a 10 kgH<sub>2</sub>O/kgSS.h en una pendiente lineal con respecto a la humedad del sólido, luego del cual ocurre una caída súbita de la velocidad de secado cuando la humedad del sólido es de 0,70 kgH<sub>2</sub>O/kgSS, hasta alcanzar la humedad de equilibrio que es 0,04 kgH<sub>2</sub>O/kgSS o 4,3 % de humedad. Esto ocurrió porque el suministro de agua desde el interior a la superficie es mucho más rápido, para tratar de mantener una lámina de agua con pocas variaciones.

## Conclusiones

La temperatura del bulbo seco afectó significativamente el descenso de humedad del sólido, la velocidad y tiempo de secado en ambos vegetales estudiados. La zona de velocidad constante se observó a 60 y 70°C, no

presentándose a la temperatura de 80°C. La humedad de equilibrio fue alcanzada a las dos horas de secado, con excepción del brócoli deshidratado a 60°C, el cual fue a la tercera hora.

## Agradecimiento

El presente trabajo de investigación fue realizado gracias al financiamiento otorgado por el CDCH

a través del proyecto de grupo N° 01.37.4447.99 y a la asistencia técnica de la TSU Gloria Betancourt.

## Literatura citada

1. Association of Official Analytical Chemists (A.O.A.C). 1995. 16<sup>th</sup> edition. Washington. D.C. (U.S.A).
2. Barth, M., E. Kerbel, S. Broussard y S. Schmidt. 1993. Modified atmosphere packaging protects market quality in broccoli spears under ambient temperature storage. *Journal of Food Science* 58:1070-1072.
3. Brennan, J., J. Butters., N. Cowell, y A. Lilley. 1998. Las operaciones de la ingeniería de los alimentos. 3<sup>ra</sup>. Ed. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza, España. p. 377-389.
4. Casp, A. y J. Abril. 1999. Procesos de conservación de alimentos. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. p. 325-340.
5. Femenia, A., J. Robertson, K. Waldron y R. Selvendran. 1998. Cauliflower (*Brassica oleracea* L), globe artichoke (*Cynara scolymus*) and chicory witloof (*Cichorium intybus*) processing by-products as sources of dietary fibre. *Journal Science and Food and Agriculture* 77: 511-518.
6. Femenia, A., R. Selvendran, S. Ring y J. Robertson. 1999. Effects of heat treatment and dehydration on properties of cauliflower fiber. *Journal Agriculture and Food and Chemistry* 47: 728-732.
7. Femenia, A., M. Bestard, N. Sanjuan, C. Rossello y A. Mulet. 2000. Effect of rehydration temperature on the cell wall components of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *Italica*) plant tissues. *Journal of Food Engineering* 46:157-163.
8. Foust, A., L. Wenzel, C. Clump, L. Maus y L. Andersen. 1997. Principios de operaciones unitarias. 2<sup>da</sup> Ed. Sexta reimpresión. Compañía editorial continental, S.A. de C.V. Mexico. p. 460-468.
9. Gnanasekharan, J., R. Shewfelt y N. Chinna. 1992. Detection of color changes in green vegetables. *Journal of Food Science* 57:149-154.
10. Gómez, M. y E. Rosa. 2000. Free amino acid composition in primary and secondary inflorescences of 11 broccoli (*Brassica oleracea* var *Italica*) cultivars and its variation between growing seasons. *Journal Science and Food and Agriculture* 81 :295-299.
11. Howard, L., E. Jeffery, M. Wallig y K. Barbara. 1997. Retention of phytochemicals in fresh and processed broccoli. *Journal of Food Science* 62: 1098-1100.
12. Jayaraman, K., D. Das-Gupta y N. Babu-Rao. 1990. Effect of pretreatment with salt and sucrose on the quality and stability of dehydrated cauliflower. *International Journal of Food Science and Technology* 25: 47-60.
13. Karathanos, V., G. Villalobos y G. Saravacos. 1990. Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. *Journal of Food Science* 55: 218-223.
14. Keck, B. 1997. Fruit and vegetable dehydration. *Food Technology International Europe*; p. 100-102.
15. McCabe, W., J. Smith y P. Harriott. 1991. Operaciones unitarias en ingeniería química. 4<sup>ta</sup> ed. McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A. Madrid. p. 830-846.
16. Mulet, A., N. Sanjuan., J. Bon y S. Simal. 1999. Drying model for highly porous hemispherical bodies. *European Food Research and Technology* 210: 80-83.

17. Ratti, C. 2001. Hot air and freeze drying of high-value foods: A review. *Journal of Food Engineering* 49: 311-319.
18. SAS Institute, Inc. 2000. SAS use r guide: Cary Ncusa USA. SAS®. Proprietary Software release 8.01. TS level 01MO. Licensed to University of Wisconsin site 0011564001.
19. Singh, P. y D. Heldman. 1997. Introducción a la ingeniería de los alimentos. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza, España. p. 16.
20. Varnam, A. y J. Sutherland. 1994. Leche y productos lácteos. Tecnología, química y microbiología. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza, España. p. 67.