

Evaluación de configuraciones inversas en hornos de deshidratado de ciruela.

Evaluation of inverse configurations in plum dehydration ovens.

Delia Paola Urfalino¹, Alicia Lucía Ordoñez², Jesica Worlock¹, Martín Daniele¹.

1.INTA EEA Rama Caída. 2.Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria-UNCUYO.

urfalino.delia@inta.gob.ar

Resumen

El deshidratado de ciruelas se realiza habitualmente en hornos a gas. Existen dos configuraciones típicas; en corriente paralela (CP) y en contracorriente (CC), siendo la segunda opción la más usual en Argentina. El propósito del trabajo fue comparar ambas disposiciones en iguales condiciones de operación para analizar si se justifica el cambio de logística en las empresas que trabajan a CC. Para ello, se determinaron tiempos de residencia de la fruta dentro del horno y temperatura y humedad entre la fruta. La reducción de peso final deseada se logró en tiempos equivalentes en ambas configuraciones, por lo cual no se justificaría el cambio de configuración. En el sistema de CC se presenta un incremento continuo en la temperatura y una disminución continua en la humedad entre la fruta. Mientras que en CP se pueden observar distintas etapas o pulsos en las cuales la temperatura es alta inicialmente y baja abruptamente con el ingreso de un nuevo carro en el sistema, lo cual también trae aparejado un aumento de humedad. El efecto de las variaciones de temperatura y humedad dentro del sistema debe complementarse con estudios de calidad en el producto final.

Palabras clave: ciruelas deshidratadas, corriente paralela, contracorriente, hornos.

Abstract

Plum drying is usually carried out in gas dehydrators. There are two typical operations; parallel flow (PF) and counterflow (CF), being the second option the most common in Argentina. The objective of this study was to compare both operation methods under the same functioning conditions to analyze whether the change in logistics is justified. For this, residence times of the fruit within the dehydrator and temperature and humidity among the fruit were determined. The desired final weight reduction was achieved in equivalent times in both operations methods; therefore, an operation change would not be justified. In CF system there is a continuous increase of temperature and a continuous decrease of humidity among the fruit. While in PF, different stages or pulses can be observed in which the temperature is initially high and drops abruptly with the entry of a new car into the system, which also increases the humidity. The effect of variations of temperature and humidity within the system must be complemented with quality studies of the final product.

Keywords: dried plums, parallel-flow, counter-flow, dehydrators.

1. Introducción

Las ciruelas deshidratadas o ciruelas pasas son producidas generalmente mediante la deshidratación en hornos de túneles. Las variedades de ciruelas utilizadas con este fin son d'Agen, d'Ente y Stanley. Todas ellas contienen un alto contenido de sólidos solubles (Newman et al., 1996). La variedad d'Agen representa el 84% de la producción argentina, siendo este país el cuarto productor mundial de ciruelas. En el sur de la provincia de Mendoza, se deshidrata aproximadamente el 70% de la ciruela d'Agen de Argentina (censo 2010, IDR). Su destino es mayormente la exportación, prácticamente no hay consumo interno. Sin embargo, Argentina presenta desventajas en competitividad con respecto a otros países productores, lo cual no le permite mantener estabilidad en el mercado.

La deshidratación es un proceso complejo que involucra la transferencia simultánea de calor y masa. La cantidad de energía requerida para secar un producto en particular depende de múltiples factores, tales como el contenido inicial de humedad, el contenido de humedad final deseado, la temperatura de secado, la humedad relativa y la velocidad del aire (Karim y Hawlader, 2005). En el caso del deshidratado de ciruelas, el proceso implica la eliminación de humedad hasta llevar a la fruta a un contenido de 18 – 20% de humedad final y una actividad acuosa (a_w) de 0,65 – 0,68. En este rango de a_w , se evitan problemas de desarrollo microbiano, lo cual permite almacenar la fruta largos periodos de tiempo (Newman et al., 1996). El proceso de secado se lleva a cabo normalmente en túneles a gas en los cuales las temperaturas del aire de proceso rondan los 65 a 85°C. El costo de la energía utilizada para este proceso es elevado, constituyendo

aproximadamente un cuarto del costo total de producción (Sabarez y Price, 1999).

En la actualidad hay dos configuraciones típicas de flujo de aire para los túneles de deshidratación, la disposición en corriente paralela (CP) y en contracorriente (CC), siendo la segunda opción la más usual en Argentina. En la configuración en CP el aire de admisión y la entrada de la fruta se hayan en el mismo extremo y, por consiguiente, las ciruelas experimentan inicialmente el contacto con aire a alta temperatura (80 - 90°C) y baja humedad y al finalizar el proceso la temperatura del aire es menor y presenta mayor humedad. Este sistema está caracterizado por poseer condiciones de secado muy rápidas en la zona del túnel en donde la fruta se encuentra con alto contenido de humedad; el enfriamiento originado por la evaporación de la humedad superficial de la fruta permite utilizar temperaturas elevadas sin dañar el producto (Miller, 1964). Por otro lado, los secaderos a CC tienen el ingreso de la fruta y la admisión del aire en extremos opuestos, por lo cual la fruta queda expuesta a menor temperatura (60 - 70°C) y mayor humedad al inicio del proceso y a mayor temperatura y menor humedad al finalizar el mismo.

Cuando las industrias que deshidratan ciruela d'Agen en Argentina tienen la posibilidad de ampliar su capacidad de producción o desean optimizarla, comienza la discusión sobre la configuración a emplear en la construcción de nuevos túneles de secado, y sobre la conveniencia de modificar la logística de las plantas procesadoras. Sin embargo, al no disponer de evidencia científica que fundamente el cambio, el cual implica elevados costos, en la mayoría de los casos se continúa con el sistema tradicional.

La información publicada sobre que configuración posee mayor capacidad de producción es antigua y se han realizado sugerencias sin utilizar los mismos parámetros de proceso en ambas configuraciones. En 1964 Miller, comparó un horno a CC operando a temperatura máxima de 74°C versus un horno en CP operando a una temperatura máxima de 90°C y concluyó que el sistema en CP permite un incremento del 37% de su capacidad debido a que el proceso es más rápido, pero incrementa el consumo de combustible en un 12%.

Se han publicado una serie de ventajas y desventajas por configuración. La configuración a CC presenta la ventaja de que cuando disminuye el ingreso de fruta a la planta elaboradora no es necesario mantener el túnel lleno de carros (Gentry, 1965) y la desventaja de que, en el extremo caliente del túnel, se pueden presentar problemas de sobresecado o quemado en las bandejas superiores (Gentry, 1965). Mientras que, la configuración a CP, presenta la ventaja de que el enfriamiento originado por la

evaporación de la humedad superficial de la fruta permite utilizar temperaturas elevadas sin dañar el producto (Miller, 1964; Gentry, 1965) y las desventajas de que, en el extremo caliente del túnel, se pueden presentar daños en la piel y pérdidas de jugo (Christie, 1926, citado en Miller 1964; Sabarez 1997). A su vez, requiere mantener el túnel lleno de carros, aunque éstos se encuentren sin fruta, lo que requiere bandejas adicionales y una estricta programación de la distribución de la carga, por lo cual el régimen de carga debería realizarse automatizadamente (Gentry, 1965).

Por otro lado, se desconoce el comportamiento real y dinámico de los parámetros de proceso dentro de los túneles, y no hay antecedentes de cómo estos puedan afectar la calidad (aspecto, sabor o aroma, color y valor nutricional).

El propósito del presente trabajo fue comparar ambas configuraciones (CP y CC) para determinar los tiempos de residencia de la fruta dentro del horno en iguales condiciones de temperatura de regulación del quemador (o sea igual gasto energético) y la obtención de los perfiles reales de temperatura y humedad entre la fruta dentro de los túneles de configuraciones inversas.

Los datos obtenidos en este trabajo sumado al modelado y a los análisis comparativos de la calidad del producto obtenido según la configuración de los túneles de secado (los cuales no se presentan en este trabajo) constituirán herramientas para decidir si se justifican o no los cambios de logística necesarios en las empresas existentes en la Argentina para trabajar con el sistema en CP en lugar del sistema tradicional a CC.

2. Materiales y métodos

2.1. Materia prima

Se utilizó ciruela (*Prunus domestica*) variedad d'Agen, proveniente de los montes frutales de la colección de INTA Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Rama Caída, (georreferencia: 34°40'03.93" S 68°23'37.80" O).

La misma se cosechó con un grado de madurez óptimo, correspondiente a un contenido de sólidos solubles mayor a 22 °Brix y 3 a 4 libras de presión por pulgada cuadrada. Estas determinaciones se realizaron tomando muestras aleatorias dentro del lote a cosechar. Los °Brix se midieron con un refractómetro digital Arcano DBR0045nD, mientras que la firmeza se determinó con un penetrómetro Turoni FT 327. Posteriormente, la fruta se cosechó manualmente y se cargó en cajones de 20 kilogramos.

Las ciruelas se clasificaron por tamaño y se seleccionaron las de calibre mediano (diámetro transversal mayor a 30,5 y menor a 35 mm). Los

cajones de fruta permanecieron en la planta piloto a temperatura ambiente por un lapso de tiempo no mayor a un día antes de iniciar su procesado.

Posteriormente, las ciruelas se lavaron (para eliminar restos de tierra y hojas) en una lavadora rotatoria de tambor y se distribuyeron en una sola capa sobre las bandejas, obteniendo un peso aproximado de $12,8 \pm 1$ kg por bandeja. Las mismas se colocaron en pilas de 26 unidades sobre los carros los cuales fueron trasladados en los rieles hacia el horno piloto.

2.2. Horno piloto

Para realizar los ensayos a escala semi-industrial se utilizó un horno con un túnel perteneciente a la Planta Piloto de Deshidratado de Frutas de la Estación Experimental Agropecuaria (E. E. A.) Rama Caída (Figura 1).



Figura 1. Horno Piloto INTA EEA Rama Caída.

El horno está construido en un contenedor aislado térmicamente con una capacidad interna de $33,1 \text{ m}^3$ y un potencial de carga máxima aproximada de 2 toneladas de ciruela fresca. El horno posee carros, que circulan por rieles, cada carro puede apilar 26 bandejas, conteniendo aproximadamente 315 ± 15 kg de ciruela fresca.

El horno piloto cuenta con:

Un quemador EQA modelo 181 serie 9250 para gas natural.

Un sistema automatizado de apertura y cierre de la puerta externa y lateral interna para recirculación de aire, con control automático a distancia desde PC o manual.

Un ventilador con regulador de velocidad entre 1 y 5 m/s.

Una balanza Balcopan de peso continuo (capacidad máxima de 600 kg), diseñada para

alta temperatura, la cual emite una señal a la PC permitiendo registrar el peso en forma continua.

2.3. Deshidratación

Se efectuaron 3 repeticiones por configuración, en contracorriente (CC) y en corriente paralela (CP), regulando en ambos casos el quemador a una temperatura de corte de 90°C (para asegurar que la temperatura máxima entre la fruta fuera $85 \pm 1,5^\circ\text{C}$), la velocidad de aire se reguló a flujo constante de 2,5 m/s.

Para evaluar la configuración a CC, el horno piloto se cargó inicialmente con 4 carros. Cuando el carro que se ubicaba frente al quemador alcanzó 1/3 de su peso inicial, se retiró e ingresó en el sistema un nuevo carro (carro N°5), en ese momento se consideró que el horno se hallaba en régimen. Luego, cada vez que se retiró un carro por el extremo de mayor temperatura del horno se repuso un carro con fruta fresca en el extremo de menor temperatura del mismo.

Para la configuración a CP, el horno piloto se cargó inicialmente con un solo carro ubicado frente al quemador, este permaneció en esa posición durante 5 horas. Luego se fueron introduciendo de a un carro (carros N° 2, 3 y 4), cada uno de ellos estuvo 5 horas frente al quemador. Posteriormente, cuando el carro N° 1 alcanzó 1/3 de su peso inicial se repuso un carro con fruta fresca por el extremo de mayor temperatura (carro N° 5), en ese momento se consideró que el horno se hallaba en régimen. Luego, cada vez que se retiró un carro por el extremo de menor temperatura del horno se repuso un carro con fruta fresca en el extremo de mayor temperatura del mismo.

En cada configuración ensayada (CC y CP) se procedió como se describe a continuación:

Para evaluar la capacidad de producción se determinó el tiempo de residencia de los carros en régimen dentro del horno, registrando la hora de ingreso y egreso de los carros dentro del período de reposición constante (carros 5 al 13, 9 repeticiones, Tabla 1).

Tabla 1. Esquema de repeticiones y muestreo en horno piloto para comparar configuraciones (CC y CP)

N° carro	1	...	4	5	...	9	...	13	14	15	16
CC				*R1		*R2		*R3			

CP				*R1			*R2			*R3			
	CARGA INICIAL	HORNOS EN RÉGIMEN						DESCARGA					

*R1: 1er Repetición y muestreo
 *R2: 2da Repetición y muestreo
 *R3: 3er Repetición y muestreo

Asimismo, en los carros N° 5, 9 y 13, se colocaron sensores i-button de temperatura/humedad entre la fruta en las bandejas 2 y 22 para identificar la máxima temperatura y mínima humedad a la que está expuesta la fruta durante el procesado. El proceso finalizó cuando la fruta llegó a 1/3 del peso inicial.

La pérdida de masa se registró en forma continua, para ello se colocó una balanza sobre la base de los carros (5, 9 y 13) y se ubicaron sobre la misma las bandejas con fruta. El peso se registró cada treinta minutos.

Se tomaron muestras representativas (aproximadamente 4,5 kilogramos) de la segunda bandeja de los carros 5, 9 y 13 de ambas configuraciones ensayadas. Las mismas se dividieron al azar en subgrupos y se colocaron en bolsas individuales de polietileno de alta densidad, a temperatura ambiente, para su posterior análisis de actividad acuosa (a_w).

2.4. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos se analizaron mediante el software estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2016).

La evaluación de los tiempos de residencia, de a_w y de la humedad se realizaron mediante pruebas de normalidad de los datos, análisis de la varianza (ANOVA) y comparación de las medias por test Least Significant Difference (LSD) (Balzarini et al., 2011). En todos los análisis efectuados se utilizó un nivel de confianza del 95%.

3. Resultados y Discusión

Los tiempos promedio de residencia en el proceso de deshidratación en planta piloto a CC y a CP se detallan en la Tabla 2. Los datos presentaron una distribución normal ($p = 0,5654$) considerando un nivel de confianza del 95% (test de Shapiro-Wilks modificado). A CC el tiempo de residencia promedio fue $21,06 \pm 1,53$ horas y en el caso de la configuración a CP fue $20,72 \pm 2,50$ horas. Mediante un ANOVA se comprobó que los tiempos de residencia no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las medias de ambos tratamientos según la configuración empleada ($p = 0,7375$). Asimismo, en el test LSD Fisher se observaron letras iguales indicando que no

hay diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos con un $\alpha=0,05$.

Carro N°	Tiempo de residencia CC (horas)	Tiempo de residencia CP (horas)
5	19,5	19
6	21,5	19,5
7	20,5	23
8	20	22,5
9	22	18
10	21	16,5
11	24	22
12	19	23
13	22	23
Promedio	$21,06 \pm 1,53$	$20,72 \pm 2,5$

Tabla 2. Tiempos de residencia a CC y CP

En la Figura 2 se observa el comportamiento de la temperatura del aire entre la fruta en un carro en el interior de un horno de deshidratación a CC. La temperatura se incrementa sostenidamente a medida que el carro avanza dentro del túnel.

Por otro lado, en el caso de la configuración en CP, se pueden observar distintas etapas (o pulsos), en las cuales la temperatura va incrementándose y luego baja abruptamente con el ingreso de un nuevo carro en el sistema (Figura 3).

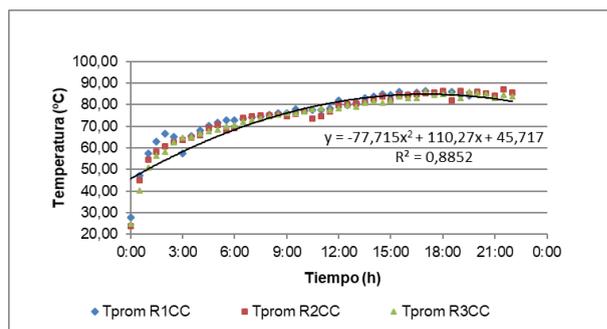


Figura 2. Temperatura entre la fruta durante la deshidratación a CC.

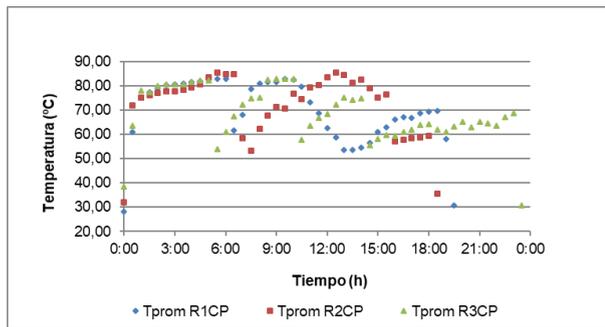


Figura 3. Temperatura entre la fruta durante la deshidratación con configuración en CP.

Respecto a la humedad del aire entre la fruta, en la configuración a CC, esta disminuye a medida que el carro avanza dentro del túnel alcanzando humedades mínimas promedio entre la fruta de $12 \pm 2\%$ (Figura 4).

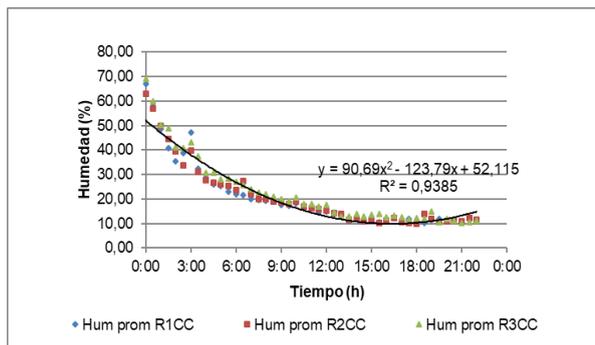


Figura 4. Humedad entre la fruta durante la deshidratación a CC.

En el caso de la configuración CP, la humedad del aire entre la fruta presenta un comportamiento por pulsos, disminuyendo al aumentar la temperatura y aumentando con el ingreso de un nuevo carro con fruta fresca en el sistema (Figura 5). Las humedades mínimas promedio entre la fruta son de $12,5 \pm 2,5\%$.

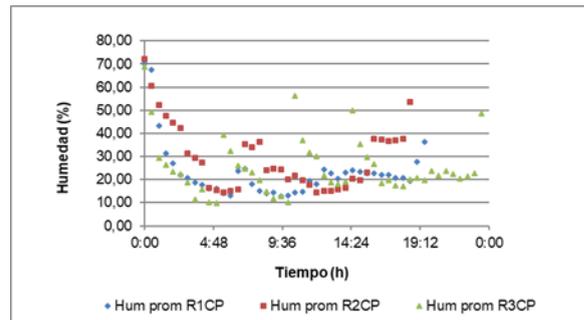


Figura 5. Humedad entre la fruta durante la deshidratación a CP.

En el presente ensayo se observó que al evaluar la deshidratación a CC versus CP, con temperatura máxima del aire inferior a 90°C y velocidad constante de $2,5 \text{ m/s}$; no hubieron diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos de residencia de los carros dentro de los túneles. Por lo tanto, ambas configuraciones poseen la misma capacidad de secado. Este resultado es contrario a la afirmación realizada por Miller M. W. en 1964, quien concluyó que el utilizar una configuración a CP permite un incremento del 37% de su capacidad debido a que el proceso es más rápido (menor tiempo de residencia), pero incrementa el consumo de combustible en un 12%. A partir de esta publicación, en E.E.U.U se recomendó el cambio de configuración en los hornos de deshidratado de ciruelas de CC a CP. Sin embargo, la comparación que realizó Miller no fue correctamente planteada ya que comparó un horno a CC operando a temperatura máxima de 74°C versus un horno en CP operando a una temperatura máxima de 90°C . El resultado del incremento en la velocidad de deshidratación hallado por Miller no puede atribuirse al cambio de configuración, si no al incremento de la temperatura. Lo cual no justificaría un cambio en la configuración, sino un aumento controlado de la temperatura de corte del quemador.

Por otro lado, en 2012 Sabarez realizó un modelado computacional en el cual simuló un horno funcionando a CP y uno funcionando a CC, con el objetivo de comparar la eficiencia de ambos sistemas. Los ensayos se realizaron en un horno de laboratorio, sin realizar ensayos en planta piloto, ni en industria debido a los costos y dificultades logísticas asociadas. Con dicho modelado se obtuvo un tiempo promedio de residencia de 17,4 horas para CP y de 18,6 horas para CC. Lo cual implica una diferencia de los tiempos de residencia menor al 6,5%. Para la realización de este modelado se supuso que en CP la temperatura del aire de secado era inicialmente de 85°C y decrecía linealmente

hasta llegar a 70°C, mientras que la humedad relativa del aire aumentaba de 15% a 30% (también de manera lineal); mientras que en CC el proceso era inverso.

En el presente ensayo pudo observarse que la variación de temperatura y humedad en el interior del túnel no ocurre de manera lineal, y que los comportamientos de estos parámetros en la configuración a CC y a CP no son exactamente inversos (Figuras 2 a 5). En el caso de CC, la temperatura aumenta y la humedad disminuye, de manera sostenida (no lineal). Mientras que, en el caso de CP, la temperatura y la humedad oscilan en pulsos. Los tiempos de residencia no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las medias de ambos tratamientos según la configuración empleada. Por lo tanto, podría inferirse que, la diferencia de 6,5% hallada por Sabarez en 2012 podría atribuirse a los supuestos del modelado más que a una diferencia real entre los tiempos promedio de residencia según la configuración.

El peso registrado cada 30 minutos se presenta en las Figuras 6 y 7 para cada configuración ensayada. En las mismas puede apreciarse que la pérdida de peso inicial es más rápida en la configuración en CP. Cuando se parte de un peso inicial promedio de 300 kg por carro, éste se reduce a la mitad en 12,36 horas en el caso de la configuración en CC y en 9,48 horas en CP. Sin embargo, la reducción final deseada o sea 1/3 del peso inicial, se logra en tiempos de residencia similares, ya que esta velocidad disminuye en el tiempo, por lo cual no influiría en la economía global del proceso en las condiciones evaluadas.

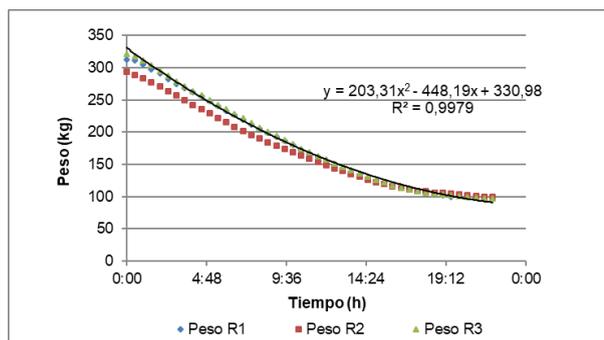


Figura 6. Evolución del peso en el tiempo en configuración en CC.

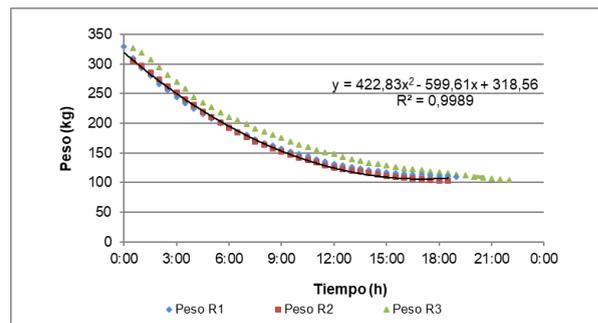


Figura 7. Evolución del peso en el tiempo en configuración en CP.

Con respecto a las características de la ciruela deshidratada obtenida mediante configuraciones inversas, la actividad acuosa (a_w) se determinó en el producto final como indicador de que el proceso había sido equivalente en ambos casos. La a_w promedio en el proceso de deshidratación a CC fue de $0,656 \pm 0,035$ y en el caso de la configuración a CP fue de $0,656 \pm 0,028$.

Los datos presentaron una distribución normal ($p_{a_w} = 0,0824$) considerando un nivel de confianza del 95% (test de Shapiro-Wilks modificado). Mediante un ANAVA se comprobó que no hubieron diferencias estadísticamente significativas en la actividad acuosa ($p_{a_w} = 0,9923$), en ambas configuraciones ensayadas. Asimismo, en el test LSD Fisher se observaron letras iguales indicando que no hay diferencias estadísticamente significativas con un $\alpha=0,05$.

4. Conclusiones

Los tiempos de residencia a CC y CP no presentaron diferencias estadísticamente significativas, por lo tanto, ambas configuraciones poseen la misma capacidad de secado.

La variación de temperatura y humedad del aire en el interior del túnel no ocurre de manera lineal. En CC la temperatura aumenta y la humedad disminuye, de manera sostenida. En CP la temperatura disminuye y la humedad aumenta oscilando en pulsos.

La pérdida de peso inicial es más rápida en la configuración en CP. Sin embargo, la reducción final deseada o sea 1/3 del peso inicial, se logra en tiempos de residencia equivalentes para ambas configuraciones.

La a_w de las ciruelas deshidratadas obtenidas a CC y a CP no presentaron diferencias estadísticamente significativas independientemente de la configuración evaluada.

Los resultados demuestran la relevancia que tiene para el sector industrial el disponer de información que contribuya a la toma de decisiones en la industria. El conocimiento de las ventajas y desventajas de cada configuración, de sus condiciones óptimas de operación, así como la necesidad de monitorear y controlar dichas condiciones durante la deshidratación industrial de ciruelas es indispensable para la optimización de los procesos.

El cambio de configuración y de la logística no se justifica económicamente por motivos vinculados a las capacidades de producción ni al gasto energético ya que operados de manera eficiente ambas configuraciones son equivalentes en dichos aspectos.

5. Referencias

Balzarini M., Di Rienzo J., Tablada M., González L., Bruno C., Córdoba M., Robledo W., Casanoves F. (2011). Introducción a la bioestadística, Aplicaciones con Infostat en Agronomía. Editorial Brujas. ISBN: 978-987-591-251-9, 383.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL: <http://www.infostat.com.ar>

Gentry J. P. (1965). Problems and possibilities with parallel-flow prune dehydration. Universidad de California Davis. URL: <http://ucanr.edu/repositoryfiles/1965-28.PDF-78493.pdf>

INSTITUTO DE DESARROLLO RURAL, MENDOZA – ARGENTINA. (2010). Ciruela para industria, censo frutícola provincial 2010, Mendoza – Argentina. URL: <http://www.idr.org.ar/wp-content/uploads/2012/07/Informe-Ciruela-Industria.pdf>

Karim, M. A.; Hawlader, M. N. A. (2005). Drying characteristic of banana: theoretical, modeling and experimental validation. Journal of Food Engineering, 70: 35-45.

Miller, M. W. (1964). Progress report on parallel and counter flow dehydration of prunes. California Dried Plum Board. Research reports, 12 - 14.

Newman, G. M.; Price, William E.; Woolf, Lawrence A. (1996). Factors influencing the drying of prunes 1. Effects of temperature upon the kinetics of moisture loss during drying. Food chemistry, 57(2), 241-244.

Sabarez H. (2012). Computational modelling of the transport phenomena occurring during convective

drying of prunes. Journal of Food Engineering, 111, 279-288.

Sabarez, H.; Price, W.E. (1999). A diffusion model for prune dehydration. Journal of food engineering, 42, 167-172.

Sabarez, H.; Price, W.E.; Back, P.J.; Woolf, L.A. (1997). Modelling the kinetics of d'Agen plums (*prunus domestica*). Food chemistry, 60(3), 371-382.