

Crioconcentración del zumo de yacón (*Smallantus sonchifolius*)

Cryoconcentration of yacon juice (*Smallantus sonchifolius*)

Juan Federico Ramos Gómez¹, Cynthia Laura Huamán Sánchez²

RESUMEN

Objetivo: Determinar los parámetros óptimos para la crioconcentración del zumo de yacón. **Métodos:** Se utilizó el diseño completamente aleatorizado con arreglo factorial del tipo 2x3², para el primer y segundo ciclo de crioconcentración. Las variables independientes consideradas para el experimento fueron: temperatura de congelación (-5 y -10 °C), velocidad de centrifuga (1500; 3000 y 4500 rpm), tiempo de centrifugado (2; 4 y 6 min). Las variables (respuesta): concentración de sólidos solubles, expresados en °Brix en zumo concentrado y hielo separado, el pH en el zumo concentrado y el contenido de fructooligosacáridos (FOS) u oligofructanos, en el proceso de producción con parámetros óptimos. **Resultados:** Los parámetros óptimos determinados para el primer ciclo de crioconcentración del zumo de yacón fueron en temperatura de congelación de -10 °C; en velocidad de rotación centrífuga de 4500 rpm y 2 minutos de tiempo de centrifugación, con lo que se alcanzó una concentración de 48,32 °Brix, remanente de sólidos en el hielo separado de 0,67 °Brix y un pH de 6,1. En el segundo ciclo de crioconcentración se alcanzó 60 °Brix, con 10,33 °Brix de sólidos remanentes en el hielo y un pH de 5,9; utilizando -10 °C de temperatura de congelación, 3000 rpm de velocidad de centrifuga y 2 min de tiempo de centrifugación como parámetros óptimos. La relación entre la concentración de sólidos en el zumo y en el hielo separado indica que la velocidad de rotación de 1500 rpm, genera mayor remanente de sólidos en el hielo. **Conclusiones:** Para el primer ciclo de crioconcentración se considera óptimo la aplicación del tratamiento: 2 min x 4500 rpm x -10 °C y para el segundo ciclo: 2 min x 3000 rpm x -10 °C.

Palabras clave: Yacón crioconcentrado, concentrado de yacón, fructooligosacáridos, oligofructanos.

ABSTRACT

Objective: To determine the optimum parameters for the freeze concentration of yacon juice. **Methods:** Factorial was used the design completely randomized with arrangement of the type 2 x 3², for the first and second cycle of freeze concentration. The independent variables considered for the experiment were: freezing temperature (- 5 and - 10 °C), centrifugal (1500, 3000 and 4500 rpm) speed, spin (2; 4-6min) time. The variable response: concentration of soluble solids, expressed in °brix in juice made from concentrate and separate ice, pH in the concentrated juice and the contents of fructooligosaccharides (FOS) or oligofructans in the production process with optimal parameters. **Results:** Optimal parameters determined for the first cycle of freeze concentration of yacon juice were freezing from - 10 °C temperature; centrifugal speed of 4500 rpm and 2 min of centrifugation time, with what was achieved a concentration of 48,32 °Brix, remnants of solids in the ice separated from 0.67 °Brix and pH of 6.1. In the second cycle of freeze concentration was reached 60 °Brix, with 10.33 °Brix of solid remnants on the ice and a pH of 5.9; using freezing temperature - 10 °C, 3000 rpm speed centrifuge and 2 min of centrifugation as optimal parameters time. Relationship between the concentration of solids in the juice and the separate ice indicates that the rotational speed of 1500 rpm, generates more remnants of solids in the ice. **Conclusions:** For the first cycle of freeze concentration is considered optimum application of the treatment: 2 min x 4500 RPM -10 °C and the second cycle: 2 x 3000 rpm min - 10 °C.

Keywords: Yacon crioconcentrado, concentrate yacon, fructooligosaccharides, oligofructans.

¹Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú

²Natural Products NAR VID E.I.R.L

INTRODUCCIÓN

El yacón (*Smallanthus sonchifolius*) es una planta de la familia *Asteraceae*, originaria de las regiones Andinas, que crece entre los 1,000 a los 3,200 msnm las raíces tuberosas son en apariencia similares al camote, con sabor dulce y pulpa crujiente, siendo bastante consumidas en forma natural. A mediados de los años 80, se descubrieron las peculiaridades en su composición química y los beneficios para la salud humana, porque a diferencia de la mayoría de las especies tuberosas que almacenan energía en la forma de almidón, el yacón tiene como principal carbohidrato de reserva a los fructooligosacáridos (FOS), los cuales ejercen actividad bifidogénica a nivel de colon y otorgan mayor contenido de FOS, cuando las raíces son recién cosechadas. En este momento la hidrólisis del FOS, en azúcares simples (glucosa, fructosa y sacarosa), aún no se ha iniciado o es aún muy baja, lo que indica también que el mejor momento para ser procesadas o refrigeradas es inmediatamente después de la cosecha (Santana y Cardoso, 2008).

“En la raíz de yacón los investigadores Castro, Céspedes, Carballo, Bergenstahl y Tomberg, (2013), determinaron 8% de materia seca y 92% de humedad, con un contenido de sólidos solubles de 7,6 °Brix. También encontraron 10,4 g de fibra dietética total/100 g de materia seca (MS) de yacón; 8,7 g los determinaron en la fracción insoluble y 1,7 g en la fracción soluble. El contenido de FOS en las raíces de yacón utilizados en el experimento fue entre 24 y 35 g/100 g de MS. El contenido de fructosa libre entre 16 y 23 g/100 g de MS. Indican además que el contenido de fructosa en yacón puede aumentar como resultado de la hidrólisis enzimática de fructooligosacáridos e inulina. Los fructanos como los FOS, son considerados fibras actualmente. El yacón contiene altas concentraciones de FOS en la raíz de acuerdo a Chebut (2002) mencionado por Castro *et al.* (2013).

La composición química de las raíces yacón reportada por Fenner, De Oliveira y Zapata (2009) muestra una humedad de 88,69 ±

0,10%; acidez $1,62 \pm 0,10$ mL/100 g; pH $6,09 \pm 0,01$, contenido de sólidos solubles de $9,9 \pm 0,01$ °Brix, mientras Herman, *et al.* (1998) y Manrique, *et al.* (2012) mencionados por Fenner *et al.* (2009), reportan un promedio de 10,7 °Brix (con variación entre 9,9 a 12,6 °Brix) y contenidos promedio de 10 °Brix (con variación entre 8 a 12 °Brix) respectivamente.

Según Madrigal y Sangronis (2007), la inulina es un carbohidrato no digerible que está presente en muchos vegetales, frutas y cereales. En la actualidad, a nivel industrial se extrae de la raíz de la achicoria (*Cichorium intybus*) y se utiliza ampliamente como ingrediente en alimentos funcionales. La inulina y sus derivados (oligofructosa, fructooligosacáridos) son generalmente llamados fructanos, que están constituidos básicamente por cadenas lineales de fructosa. Entre las especies de plantas que producen fructanos se identifican las del grupo *Liliaceae* (ajo, cebolla espárrago, ajoporro) y *Compositae* (achicoria, patata o tupinambo y yacón). Las especies con mayor contenido de inulina la almacenan en la parte subterránea de la planta, las concentraciones presentadas por algunas de ellas son: Patata (*Helianthus tuberosus*) 89 g/100 g base seca, Achicoria (*Cichorium intybus*) 79, Raíz de Dalia (*Dahlia spp.*) 59, Cebolla (*Allium cepa* L.) 48,0 Ajoporro (*Allium porrum* L.) 37,0 Ajo (*Allium sativum*) 29, Yacón (*Smallanthus sonchifolius*) 27,0 Espárrago (*Asparagus officinalis* L.) 4,0 Cambur (*Musa cavendishii*) 2,0 Centeno (*Secale cereale*) 1,0. En la actualidad los fructanos son considerados “fibra funcional”, en base a una nueva clasificación de la fibra dietética que considera el efecto fisiológico en el individuo. Tanto la inulina, como la oligofructosa y los fructooligosacáridos o FOS presentan una estructura polimérica predominantemente lineal. Las diferencias radican en el grado de polimerización, siendo la inulina el compuesto con el mayor rango y promedio. Los FOS y la oligofructosa son muy similares, pero con diferencias estructurales asociadas a sus diferentes orígenes (hidrólisis enzimática de inulina para la oligofructosa y transfructosilación de sacarosa para los FOS). Las cadenas de moléculas de la oligofructosa son más largas que aquellas producidas por transfructosilación de la sacarosa. No todas

las cadenas tienen una glucosa terminal en la oligofructosa, pero los FOS si las tienen.

Las raíces de yacón acumulan una gran diversidad de azúcares variables significativamente en cantidad según el ecotipo, entre los que se encuentran: la fructosa, glucosa, sacarosa, trazas de almidón y oligosacáridos varios denominados también fructanos. Estos fructanos presentan un grado de polimerización de 3 a 10 unidades y representan un 67% de la materia seca total de la raíz según Douglas *et al.* (2002); Fletcher (1999) y Lachman *et al.* (2004) mencionado por Chacón (2006).

Los frutooligosacáridos conocidos también como oligofructanos u oligofructosas, pertenecen a una clase particular de azúcares conocidos como fructanos, compuesto por cadenas cortas de fructuosas, muy solubles en agua, tienen un ligero sabor dulce (poseen entre el 30 y 65% del poder edulcorante de la sacarosa) pero proporcionan tan sólo una cuarta parte del poder calórico de los carbohidratos comunes, por lo que son utilizados como edulcorantes, fibra dietéticos y prebióticos. La propiedad técnica en los alimentos de la oligofructuosa, principal componente del yacón, son el sabor dulce no residual, alta solubilidad, contribuye a dar textura, cuerpo y realza el sabor, viscosidad comparable con el jarabe de glucosa, es humectante, disminuye la temperatura de congelación, aumenta la temperatura de ebullición. Puede ser empleada, como alimento funcional en forma de dulces, confites, chocolates, goma de mascar, etc. (Polanco, 2011).

La crioconcentración es un método de eliminación de agua de una solución por enfriamiento y congelamiento hasta la formación y separación de cristales de hielo de alta pureza, de esta manera se logra obtener un producto de mayor concentración, sostienen que el agua se extrae en forma de cristales de hielo formados en el proceso tras la congelación del agua, siendo un método más rápido que la liofilización. (Ramírez, Ruiz, Moreno y Fabián, 2012).

Petzold, Moreno, Lastra, Rojas y Orellana, (2015), mencionan que comparado con la

tecnología de evaporación y de membrana, la crioconcentración tiene algunas ventajas potenciales significativas para producir un concentrado de alta calidad porque el proceso tiene lugar a bajas temperaturas en las que no existe una interfaz vapor/líquido. Reportan que trabajando con un tiempo de centrifugación de 10 min, a 20 °C y 4 600 rpm, en la crioconcentración de un jugo de arándano con 13 °Brix al inicio, alcanzaron 20, 26 y 33° Brix en el primer, segundo y tercer ciclo de crioconcentración, respectivamente. La cantidad de solutos atrapados en la fracción de hielo separada se ha determinado entre 2 y 12 °Brix en el primer y segundo ciclos de crioconcentración respectivamente. En la Crioconcentración de jugo de piña alcanzaron 20; 26 y 32 °Brix en el primer, segundo y tercer ciclo de crioconcentración respectivamente.

El año 2013, Petzold y Aguilera, realizaron una investigación, donde concluyen que la centrifugación es una técnica asistida eficaz para eliminar la solución concentrada de la matriz de hielo en un solo paso de congelación concentración de soluciones de sacarosa. Esta técnica tiene valores altos de soluto recuperados, llegando a aproximadamente 0,73 kg de sacarosa obtenidas por 1 kg de sacarosa inicial a 1 600 rpm de velocidad de centrifugación, independientemente de la concentración inicial de sacarosa y el método de la congelación. El rendimiento de la concentración por congelación centrífuga se atribuyó a la matriz de hielo que actúa como un sólido poroso a través del cual la solución concentrada se filtra a través de los canales de drenaje del hielo mejorado por la fuerza centrífuga.

Moreno, Hernández, Raventós, Robles y Ruiz (2014), reportan los resultados de la crioconcentración de café con 5,0% de concentración inicial, compuesta por siete etapas de concentración, donde la fracción concentrada de cada etapa entró en la siguiente etapa, habiendo luego de la séptima etapa obtenido una concentración de 32,6% de café. El hielo eliminado en promedio retuvo el 0,27% de café, sin embargo la cantidad de café retenido en los cristales de hielo se fue incrementando conforme la concentración de este se incrementa, así: en la primera etapa se retiene el 0,24% de café, en el segundo 0,7%; luego 0,5%; 1,7%; 4,4%; 7,3%; finalmente

8,1%. Las concentraciones del café que ingresó al congelador fueron de: 5,3% a la primera etapa, luego 9,2%; 13,1%; 17,0%; 20,9%; 24,8%; 28,7%, respectivamente. Siendo que La eficiencia de concentración aumentó a 99,2% y el rendimiento de soluto al 95%.

Sánchez, Ruiz, Raventós, Auleda y Hernández, (2010), mencionan que la crioconcentración de alimentos líquidos es una tecnología que minimiza pérdidas de componentes volátiles y termolábiles. Esto hace un producto con una calidad que no puede obtenerse por medio de procesos de concentración utilizados en la industria alimentaria, como la evaporación y la concentración de membrana. El proceso implica bajar la temperatura del producto a concentrar por debajo de su punto de congelación evitando alcanzar la temperatura eutéctica en el que Todos los componentes del producto solidifican a la vez. Si alcanzara al punto eutéctico del jugo, la separación se hace muy difícil. El objetivo fue obtener un hielo muy puro, es decir sólo agua, sin retener ningún sólido del producto y una solución concentrada en sólidos. Reportan además los resultados de la crioconcentración de zumo de naranja, utilizando una unidad de planta piloto para concentración de líquidos mediante una superficie fría donde la concentración de sólidos en el jugo mostró un incremento lineal en el tiempo a una velocidad de 0,75 °Brix/h hasta una concentración final de 28,8 °Brix. La concentración inicial del zumo de naranja fue de 11,1 °Brix (glucosa $29 \pm 0,4\%$, fructosa $27 \pm 0,4\%$ y sacarosa $44 \pm 0,4\%$).

Raventós, Hernández, Auleda y Ibarz (2007), reporta que resultados para la crioconcentración de sacarosa, glucosa y fructosa. Las soluciones iniciales de azúcar tenían una concentración de 5 °Brix en los tres casos. La concentración máxima fue alcanzada con sacarosa, con el menor tiempo de proceso, es decir 31,2 °Brix en 16,6 h. Los límites de concentración para glucosa y fructosa fueron de 26,6 °Brix en 19,2 h y de 27,5 °Brix en 19,6 h, en una etapa de concentración.

Bonilla, Vernon y Beristain, (2015), trabajaron en crioconcentración de piña (*Ananas*

comosus) con 12 °Brix iniciales, utilizado diferentes temperaturas de congelación (-15 °C, -20 °C, -30 °C y -40 °C). Encontraron que a menor temperatura de congelación la concentración final alcanzada en un ciclo de concentración fue mayor; así habiendo congelado a -15 °C concentraron hasta 21,7 °Brix, a -20 °C hasta 40,7 °Brix, a -30 °C hasta 47,9 °Brix y a -40 °C hasta 51 °Brix. El pH en este caso fue de 3,57 para el zumo fresco, y 3,52; 3,45; 3,43 y 3,42 para las respectivas temperaturas de congelación.

Aider y Halleux (2008), desarrollaron un estudio para la crioconcentración del jugo de cereza y albaricoque, a las temperaturas de -10 °C y -20 °C, en tres ciclos de concentración. En el jugo de albaricoque alcanzaron una concentración final de 35,5 °Brix, mientras que en el jugo de cereza obtuvieron una concentración de 45,5 °Brix. Habiendo, por añadidura, conservado una mayor cantidad de ácido ascórbico en comparación con otros métodos de concentración convencionales, al igual que una mayor intensidad del aroma en ambos productos. En este caso los ciclos de concentración mostraron mucha importancia en las concentraciones logradas, como el tipo de jugo, mientras que la temperatura de congelación no mostró ningún efecto en la concentración final lograda.

El desarrollo de la investigación es importante porque los resultados permitirán determinar la factibilidad tecnológica del uso de la congelación para la concentración del zumo de yacón y de los parámetros más apropiados para la producción a nivel piloto.

La hipótesis planteada, indica que la temperatura de congelación, la velocidad y el tiempo de centrifugación no afectan en el pH, mientras el contenido de oligofructanos y la concentración de sólidos solubles son afectadas de manera considerable.

El objetivo fue determinar el efecto de la temperatura de congelación, la velocidad y el tiempo de centrifugación en el pH, la concentración de sólidos solubles y el contenido de fructololigosácidos (FOS) del zumo de yacón inicial y en proceso de concentración.

MATERIAL Y MÉTODOS

La investigación desarrollada fue del tipo experimental, conducida haciendo uso del diseño completamente aleatorizado con arreglo factorial del tipo 2 x 3 x 3 con dos ciclos de concentración. Donde las variables independientes fueron: la temperatura de congelación (-5 y -10 °C), la velocidad de centrifugación (1500; 3000 y 4500 rpm) y el tiempo de centrifugación (2; 4 y 6 min). Las variables respuesta fueron: la concentración de sólidos solubles en el zumo, el pH, el contenido de fructooligosacáridos (FOS) y la cantidad de sólidos solubles perdidos en el hielo.

La materia prima utilizada fue yacón (*Smallantus sochifolius*), cuyas muestras fueron proporcionadas por productores certificados por INIA Huancayo. Estas raíces fueron sometidas a selección y clasificación, lavado y pelado, rallado y prensado esta última operación permitió la separación del zumo de yacón y la torta correspondiente. Una vez obtenido el zumo de yacón, este fue dividido en unidades experimentales de 3,0 kg cada uno, a los cuales se aplicaron los tratamientos previstos en el diseño experimental.

El proceso de crioconcentración se realizó a través de dos ciclos de concentración, en los cuales el zumo de yacón fue congelado utilizando temperaturas de -5 y -10 °C, luego centrifugados utilizando tres velocidades: 1500; 3000 y 4500 rpm, y tres tiempos de 2; 4 y 6 minutos. Al inicio del segundo ciclo la concentración del zumo fue estandarizado a 45°Brix.

Los equipos utilizados en el proceso experimental de crioconcentración fueron un congelador continuo con capacidad para congelar de 20 kg de zumo por hora, y una centrífuga con capacidad de 3,0 kg por carga, ambos equipos diseñados y construidos en tamaño piloto, financiados por Innovate Perú.

Las variables respuesta se tomaron en el zumo inicial, el zumo concentrado y en el hielo separado en el proceso. La concentración de sólidos solubles fue obtenida haciendo uso de

un refractómetro (brixómetro) digital ABBE de mesa marca Atago, modelo DR-A1, con rango de medición de 0 a 95 Brix, con compensación automática de temperatura. El método utilizado fue el 940,09; AOAC (1990), específico para determinación de sólidos y sólidos totales en bebidas y líquidos, con uso de refractómetro. Para la determinación de pH se utilizó el método 981,12 AOAC (1990), para vegetales y alimentos ácidos, el equipo utilizado fue un medidor de pH marca HANNA, modelo HI 2210, con compensación automática de temperatura, rango de medición 0 a 14 de pH. El contenido de fructooligosacáridos (FOS), fructosa, glucosa y sacarosa fue determinado utilizando el procedimiento adaptado por Jaime, Martín, Mollá, López y Esteban (2001).

El análisis estadístico de los datos de variables respuesta: contenido de sólidos totales en el zumo concentrado y en el hielo separado, como el pH, se hizo haciendo uso del software estadístico SPSS 21,0. Los datos del contenido de FOS, se utilizaron para mostrar la evolución del mismo en el proceso de crioconcentración con parámetros optimizados en el experimento.

RESULTADOS

La cantidad de sólidos solubles en el zumo de yacón recién extraído es de 8°Brix, el pH 6,24; fructooligosacáridos (FOS) 7,85 g/100 g, fructosa 1,76 g/100 g; glucosa 1,18 g/100 g y sacarosa 0,92 g/100 g. La cantidad de FOS en la raíz de yacón es de 2,99 g/100 g.

Los resultados del contenido de sólidos solubles totales en el zumo concentrado y en el hielo expresados en °Brix, en el primer ciclo de crioconcentración del zumo de yacón, que se inició con 8°Brix, se muestran en la Tabla 1. La variable respuesta concentración final en °Brix de la Tabla 1 fue sometida a la prueba de normalidad de Kolmogorov Smirnov, obteniéndose una significación de 0,207; mucho mayor que $\alpha = 0,05$; lo que indica que los datos se encuentran normalmente distribuidos y procede la aplicación del análisis estadístico paramétrico correspondiente.

Tabla 1. Contenido de sólidos totales y pH en zumo concentrado y hielo separado en el primer ciclo de crioconcentración

Temperatura	TIEMPO	Repetición	1500 rpm				3000 rpm				4500 rpm			
			ZUMO		HIELO		ZUMO		HIELO		ZUMO		HIELO	
			°Brix	pH	°Brix	pH	°Brix	pH	°Brix	pH	°Brix	pH	°Brix	pH
-5 °C	2 min	I	38	5,9	3	6,4	45	6,1	1	6,6	38	5,9	1	6,6
		II	37	5,9	3	6,5	45	6	1	6,7	38	5,9	1	6,5
		III	41	5,9	3	6,5	45	6	1	6,8	38	5,8	1	6,6
	4 min	I	47	5,8	2	6,6	41	6	1	6,6	37	5,9	1	6,6
		II	48	5,9	2	6,6	44	6	1	6,6	39	5,9	1	6,6
		III	41	5,7	1,5	6,6	42	6,1	1	6,6	38	5,9	1	6,6
	6 min.	I	44	5,9	2	6,6	47	6	1	6,6	38	6	1	6,8
		II	43	5,9	2	6,5	45	6	1	6,7	36	6,1	1	6,6
		III	43	5,9	1,5	6,6	45	6	1	6,7	37	6	1	6,7
-10 °C	2 min	I	42	5,9	2	6,4	30	6,3	2	6,8	48	6	0,5	6,9
		II	38	6	3	6,5	26	6,4	1	6,8	48	6,1	1	6,8
		III	37	6	2	6,4	35	6,2	1,5	6,7	49	6,1	0,5	6,8
	4 min	I	44	6	3	6,5	33	6,3	1	6,7	45	6,1	0	7
		II	45	5,9	3	6,5	24	6,4	0,5	6,9	45	6,1	0,5	6,9
		III	43	6	2	6,5	30	6,3	0,5	6,8	45	6,1	0,5	6,9
	6 min.	I	49	6,1	3	6,9	47	6,1	0,5	6,9	43	6,2	1	6,8
		II	45	6,1	3	6,7	47	6,1	1	6,8	41	6,2	1	6,8
		III	47	6,2	2	6,8	47	6,1	1	6,8	45	6,1	1	6,8

El análisis estadístico de los datos del contenido de sólidos solubles totales en el zumo concentrado, a través del ANVA ($\alpha = 0,05$), se muestra en la Tabla 2, donde se evidencia que los factores principales: tiempo de centrifugado (significación= 0,000) y velocidad de centrifuga (significación = 0,001) muestran efectos significativos, mientras la temperatura de congelación (sign = 0,899) genera efectos iguales en los resultados alcanzados. En cuanto a las interacciones de dos factores, los resultados

indican que cada una de las combinaciones de los niveles de factor genera diferencias significativas en los resultados de concentración alcanzados (sign de 0,000; 0,000 y 0,000 respectivamente). Cada uno de los tratamientos, producto de la interacción simultánea de los tres factores, también genera diferencias significativas en el contenido final de sólidos solubles totales (sign = 0,000).

Tabla 2. ANVA concentración final de sólidos solubles (°Brix) en el primer ciclo de crioconcentración del zumo de yacón

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	G.L.	Cuadrado medio	F	Sig.
A	158,778	2	79,389	17,356	0
B	81,333	2	40,667	8,891	0,001
C	0,074	1	0,074	0,016	0,899
A * B	405,889	4	101,472	22,184	0
A * C	97,815	2	48,907	10,692	0
B * C	631,259	2	315,63	69,004	0
A* B * C	173,519	4	43,38	9,484	0
Error	164,667	36	4,574		
Total	1713,333	53			

A= Tiempo de centrifugado (2; 4 y 6 min). B = Velocidad de centrifuga (1500; 3000 y 4500 rpm)
C = Temperatura de congelación (-5 °C y -10 °C).

La prueba de comparación múltiple de medias de Duncan, aplicado a los resultados de concentración media generada en el primer ciclo de concentración, por cada uno de los

tratamientos, como combinación de los niveles de factor de cada una de las tres variables independientes principales, se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Prueba de comparación múltiple de medias (PCMM) de Duncan para el efecto de la interacción de tres factores en la concentración de sólidos solubles durante el primer ciclo

Trat	Interacción	°Brix promedio	
10	4 min x 3000 rpm x -10 °C	29	f
4	2 min x 3000 rpm x -10 °C	30,33	f
17	6 min x 4500 rpm x -5 °C	37	e
5	2 min x 4500 rpm x -5 °C	38	e
11	4 min x 4500 rpm x -5 °C	38	e
1	2 min x 1500 rpm x -5 °C	38,67	e d
2	2 min x 1500 rpm x -10 °C	39	e d
9	4 min x 3000 rpm x -5 °C	42,33	d c
18	6 min x 4500 rpm x -10 °C	43	c b
13	6 min x 1500 rpm x -5 °C	43,33	c b
8	4 min x 1500 rpm x -10 °C	44	c b
3	2 min x 3000 rpm x -5 °C	45	c b a
12	4 min x 4500 rpm x -10 °C	45	c b a
7	4 min x 1500 rpm x -5 °C	45,33	c b a
15	6 min x 3000 rpm x -5 °C	45,67	c b a
14	6 min x 1500 rpm x -10 °C	47	b a
16	6 min x 3000 rpm x -10 °C	47	b a
6	2 min x 4500 rpm x -10 °C	48,33	a

Los resultados del contenido de sólidos totales en el zumo concentrado y en el hielo expresados en °Brix, y el pH de estos en el segundo ciclo de crioconcentración del zumo de yacón, que se inició con 45 °Brix, se muestran en la Tabla 4. La aplicación de la prueba de normalidad de Kolmogorov Smirnov,

a la concentración final de sólidos solubles °Brix, obtenido en el segundo ciclo de crioconcentración, arrojó una significación de 0,27; mucho mayor que $\alpha = 0,05$; lo que indica que los datos se encuentran normalmente distribuidos y es lícito utilizar el ANVA.

Tabla 4. Contenido de sólidos solubles totales y pH en zumo concentrado y hielo separado en el segundo ciclo de crioconcentración

Temperatura	TIEMPO	Repetición	1500 rpm				3000 rpm				4500 rpm			
			ZUMO		HIELO		ZUMO		HIELO		ZUMO		HIELO	
			°Brix	pH	°Brix	pH	°Brix	pH	°Brix	pH	°Brix	pH	°Brix	pH
-5 °C	2 min	I	56	5,6	35	5,7	53	6	6	6,1	52	5,8	8	6,3
		II	56	5,7	24	5,8	50	5,9	14	6,1	51	5,8	9	6,2
		III	58	5,7	34	5,7	50	6	11	6,1	52	5,8	9	6,2
	4 min	I	58	5,7	15	5,9	53	5,8	9	6,1	52	5,8	5	6,2
		II	58	5,7	16	5,9	53	5,8	12	6	53	5,7	3	6,3
		III	57	5,7	16	5,9	51	5,8	12	6,1	50	5,8	3	6,3
	6 min	I	51	5,9	15	5,9	51	5,9	11	6	53	5,7	2	6,3
		II	54	5,8	11	6,1	51	5,9	10	6,1	52	5,8	3	6,3
		III	52	5,9	16	6	51	5,9	10	6,1	52	5,8	1,5	6,3
-10 °C	2 min	I	57	6	35	6	60	6	11	6,2	55	5,9	9	6,4
		II	58	5,9	31	6,1	60	5,9	10	6,2	56	5,9	11	6,4
		III	58	6	29	6,1	60	5,8	10	6,2	55	5,9	8	6,4
	4 min	I	59	6	27	6,1	58	6	11	6,3	57	5,9	7	6,4
		II	58	6	21	6,1	57	6	15	6,2	57	5,9	9	6,4
		III	59	6,1	25	6,1	58	6	11	6,3	57	5,9	7	6,4
	6 min	I	58	5,9	20	6,2	60	6	7	6,4	57	6	6	6,6
		II	58	5,9	18	6,2	57	6	9	6,3	58	6	5	6,4
		III	56	6	16	6,3	58	6	7	6,3	58	6	5	6,5

El análisis estadístico de los datos del contenido de sólidos solubles totales en el zumo concentrado, a través del ANVA ($\alpha = 0,05$), se muestra en la Tabla 5, donde se lee que los factores principales tiempo de centrifugado (significación= 0,013), velocidad de centrifuga (sig = 0,000) y la temperatura de congelación (sign = 0,000) muestran efectos significativos. En cuanto a las interacciones de dos factores, los resultados indican que cada una de las combinaciones de los niveles de factor genera diferencias significativas en los resultados de concentración alcanzados (sign de 0,000; 0,012 y 0,000 respectivamente).

Cada uno de los tratamientos, producto de la interacción simultánea de los tres factores, también genera diferencias significativas en el contenido final de sólidos solubles totales (sign = 0,002).

La prueba de comparación múltiple de medias de Duncan, aplicado a los resultados de concentración media generada en el segundo ciclo de concentración, por cada uno de los tratamientos, como combinación de los niveles de factor de cada una de las tres variables independientes principales, se muestra en la tabla 6.

Tabla 5. ANVA concentración final de sólidos solubles (°Brix) en el segundo ciclo de criocentración del zumo de yacón

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	G.L.	Cuadrado medio	F	Sig.
A	9,037	2	4,519	4,880	0,013
B	56,148	2	28,074	30,320	0,000
C	308,167	1	308,167	332,820	0,000
A * B	34,963	4	8,741	9,440	0,000
A * C	9,333	2	4,667	5,040	0,012
B * C	53,778	2	26,889	29,040	0,000
A * B * C	19,556	4	4,889	5,280	0,002
Error	33,333	36	0,926		
Total	524,315	53			

A= Tiempo de centrifugado (2; 4 y 6 min). B = Velocidad de centrifuga (1500; 3000 y 4500 rpm).
C = Temperatura de congelación (-5 °C y -10 °C)

Tabla 6. PCMM de Duncan para el efecto de la interacción de tres factores en la concentración de sólidos solubles durante el segundo ciclo de criocentración

Trat	Interacción	°Brix Promedio	
3	2 min x 3000 rpm x -5 °C	51,00	e
15	6 min x 3000 rpm x -5 °C	51,00	e
5	2 min x 4500 rpm x -5 °C	51,67	e
11	4 min x 4500 rpm x -5 °C	51,67	e
9	4 min x 3000 rpm x -5 °C	52,33	e
13	6 min x 1500 rpm x -5 °C	52,33	e
17	6 min x 4500 rpm x -5 °C	52,33	e
6	2 min x 4500 rpm x -10 °C	55,33	d
1	2 min x 1500 rpm x -5 °C	56,67	d c
12	4 min x 4500 rpm x -10 °C	57,00	d c b
14	6 min x 1500 rpm x -10 °C	57,33	c b
2	2 min x 1500 rpm x -10 °C	57,67	c b
7	4 min x 1500 rpm x -5 °C	57,67	c b
10	4 min x 3000 rpm x -10 °C	57,67	c b
18	6 min x 4500 rpm x -10 °C	57,67	c b
16	6 min x 3000 rpm x -10 °C	58,33	c b a
8	4 min x 1500 rpm x -10 °C	58,67	b a
4	2 min x 3000 rpm x -10 °C	60,00	a

Al análisis de varianza del pH para el primer ciclo de concentración, muestra diferencias significativas para los factores velocidad de centrifuga (significación = 0,000) y temperatura de congelación (sign = 0,000), mientras los tres niveles del factor tiempo de centrifugado generan efectos iguales en el pH (sig = 0,066). La interacción de tiempo de centrifugado y velocidad de centrifuga genera efectos con diferencias significativas en el pH (sig = 0,000), mientras las interacciones de tiempo de centrifugado con temperatura de congelación (sig = 0,341) y

velocidad de centrifuga con temperatura de congelación (sig = 0,181), genera efectos iguales en el pH. Sin embargo cuando interaccionan los factores tiempo de centrifugado, velocidad de centrifuga y temperatura de congelación generan efectos significativamente diferentes en el pH.

El análisis de varianza del pH para el segundo ciclo de concentración, mostró un comportamiento parecido al del primer ciclo, así se tiene que los factores principales tiempo de

centrifugado (sign = 0,033), velocidad de centrifuga (sign = 0,000) y temperatura de congelación (sign = 0,000), afectaron de forma diferente en los resultados del pH. Las interacciones de los factores tiempo de centrifugado con temperatura de congelación (sign = 0,001) y velocidad de centrifuga con temperatura de congelación (sign = 0,000), afectaron de forma diferente al pH, mientras la interacción tiempo de centrifugado con velocidad de centrifuga (sign = 0,242), afectaron de forma igual en los resultados del pH. Finalmente, la interaccionan de los tres factores: tiempo de centrifugado, velocidad de centrifuga y temperatura de congelación (sing = 0,000), generaron efectos significativamente

diferentes en el pH.

La PCMM de Duncan aplicado al pH, para el primer ciclo de crioconcentración para la interacción de los tres factores, se resume en la Tabla 7, donde se muestra que los pHs más elevados se dan para los tratamientos 4 y 9 con 6,3 y 6,33 respectivamente, no existiendo diferencias significativas entre estas dos. Los pHs más bajos se dan para los tratamientos 7 y 5 con 5,8 y 5,87, tampoco existe diferencia significativa entre estas dos últimas. Los valores de pH para las demás interacciones se encuentran entre estos dos extremos.

Tabla 7. PCMM de Duncan para el efecto de la interacción de los tres factores en el pH del zumo concentrado

a. Primer ciclo de crioconcentración				b. Segundo ciclo de crioconcentración			
Trat	Interacción(*)	pH	Significación	Trat	Interacción(*)	pH	Significación
7	A ₂ x B ₁ x C ₁	5,80	h	1	A ₁ x B ₁ x C ₁	5,67	h
5	A ₁ x B ₃ x C ₁	5,87	h g	7	A ₂ x B ₁ x C ₁	5,70	h g
1	A ₁ x B ₁ x C ₁	5,90	g f	11	A ₂ x B ₃ x C ₁	5,77	g f
11	A ₂ x B ₃ x C ₁	5,90	g f	17	A ₃ x B ₃ x C ₁	5,77	g f
13	A ₃ x B ₁ x C ₁	5,90	g f	5	A ₁ x B ₃ x C ₁	5,80	f e
2	A ₁ x B ₁ x C ₂	5,97	g f e	9	A ₂ x B ₂ x C ₁	5,80	f e
8	A ₂ x B ₁ x C ₂	5,97	g f e	13	A ₃ x B ₁ x C ₁	5,87	e d
15	A ₃ x B ₂ x C ₁	6,00	f e d	4	A ₁ x B ₂ x C ₂	5,90	d c
3	A ₁ x B ₂ x C ₁	6,03	e d c	6	A ₁ x B ₃ x C ₂	5,90	d c
9	A ₂ x B ₂ x C ₁	6,03	e d c	12	A ₂ x B ₃ x C ₂	5,90	d c
17	A ₃ x B ₃ x C ₁	6,03	e d c	15	A ₃ x B ₂ x C ₁	5,90	d c
6	A ₁ x B ₃ x C ₂	6,07	e d c	14	A ₃ x B ₁ x C ₂	5,93	d c b
12	A ₂ x B ₃ x C ₂	6,10	d c b	2	A ₁ x B ₁ x C ₂	5,97	c b a
16	A ₃ x B ₂ x C ₂	6,10	d c b	3	A ₁ x B ₂ x C ₁	5,97	c b a
14	A ₃ x B ₁ x C ₂	6,13	c b	10	A ₂ x B ₂ x C ₂	6,00	b a
18	A ₃ x B ₃ x C ₂	6,17	b	16	A ₃ x B ₂ x C ₂	6,00	b a
4	A ₁ x B ₂ x C ₂	6,30	a	18	A ₃ x B ₃ x C ₂	6,00	b a
9	A ₂ x B ₂ x C ₂	6,33	a	8	A ₂ x B ₁ x C ₂	6,03	a

(*): A₁: 2 min; A₂: 4 min; A₃: 6 min; B₁: 1500 rpm; B₂: 3000 rpm; B₃: 4500 rpm; C₁: -5 °C; C₂: -10 °C

La PCMM de Duncan aplicado a los resultados de pH obtenidos en cada una de las muestras crioconcentradas para la interacción de los tres factores involucrados, en el segundo periodo de concentración se muestra en la Tabla 7, el mismo indica que los tratamientos 2; 3; 10; 16; 18 y 8, generan pHs entre 5,97 y 6,03, y que entre estos no existe diferencias significativas, mientras los valores más bajos de pH se tiene para las muestras que se procesaron con los

tratamientos 1 y 7 (5,67 y 5,70 respectivamente), y tampoco existe diferencia significativa entre estas. Los demás tratamientos generan pHs entre estos dos extremos.

El ANVA de la concentración de sólidos solubles remanentes en el hielo durante el primer ciclo de concentración muestra que los tres niveles del tiempo de centrifugado, como

de la velocidad de centrífuga generan contenidos remanentes de sólidos solubles en el hielo, estadísticamente diferentes (Sig. = 0,01 y 0,000 respectivamente), mientras que los dos niveles del factor temperatura de congelación no muestran diferencias significativas (Sig = 1,0). Las interacciones de dos factores muestran resultados estadísticamente iguales en el remanente de sólidos solubles en el hielo (Sig = 0,209 y 0,171), a excepción de la interacción velocidad de centrífuga x

temperatura de congelación (Sig = 0,011). Los tratamientos resultantes de la interacción de los tres factores generan diferencias estadísticas significativas (Sig = 0,000).

El ANVA para el segundo ciclo de crioconcentración muestra significación para los tres factores principales, y para la interacción de dos factores, mientras para la interacción de tres factores no muestra diferencias significativas (sig = 0,331)

Tabla 8. PCMM de Duncan para el efecto de la interacción de los tres factores en los sólidos solubles remanentes en el hielo

a. Primer ciclo de crioconcentración				b. Segundo ciclo de crioconcentración			
Trat	Interacción(*)	°Brix	Significación	Trat	Interacción(*)	°Brix	Significación
15	A ₃ x B ₂ x C ₁	0,33	g	9	A ₂ x B ₂ x C ₁	2,17	j
12	A ₂ x B ₃ x C ₂	0,67	g f	6	A ₁ x B ₃ x C ₂	3,67	j i
14	A ₃ x B ₁ x C ₂	0,67	g f	18	A ₃ x B ₃ x C ₂	5,33	j i h
17	A ₃ x B ₃ x C ₁	0,83	g f	15	A ₃ x B ₂ x C ₁	7,67	i h g
2	A ₁ x B ₁ x C ₂	1,00	f e	17	A ₃ x B ₃ x C ₁	7,67	i h g
3	A ₁ x B ₂ x C ₁	1,00	f e	3	A ₁ x B ₂ x C ₁	8,67	h g f
5	A ₁ x B ₃ x C ₁	1,00	f e	12	A ₂ x B ₃ x C ₂	9,33	h g f
6	A ₁ x B ₃ x C ₂	1,00	f e	2	A ₁ x B ₁ x C ₂	10,33	g f e
8	A ₂ x B ₁ x C ₂	1,00	f e	8	A ₂ x B ₁ x C ₂	10,33	g f e
9	A ₂ x B ₂ x C ₁	1,00	f e	11	A ₂ x B ₃ x C ₁	10,33	g f e
18	A ₃ x B ₃ x C ₂	1,00	f e	5	A ₁ x B ₃ x C ₁	11,00	g f e
11	A ₂ x B ₃ x C ₁	1,50	e d	14	A ₃ x B ₁ x C ₂	12,33	f e d
4	A ₁ x B ₂ x C ₂	1,83	d c	7	A ₂ x B ₁ x C ₁	14,00	e d c
7	A ₂ x B ₁ x C ₁	1,83	d c	4	A ₁ x B ₂ x C ₂	15,67	d c
10	A ₂ x B ₂ x C ₂	2,33	c b	16	A ₃ x B ₂ x C ₂	18,00	c
13	A ₃ x B ₁ x C ₁	2,67	b a	13	A ₃ x B ₁ x C ₁	24,33	b
16	A ₃ x B ₂ x C ₂	2,67	b a	1	A ₁ x B ₁ x C ₁	31,00	a
1	A ₁ x B ₁ x C ₁	3,00	a	10	A ₂ x B ₂ x C ₂	31,67	a

(*): A1: 2 min; A2: 4 min; A3: 6 min; B1: 1500 rpm; B2: 3000 rpm; B3: 4500 rpm; C1: -5 °C; C2: -10 °C

La PCMM de Duncan para el efecto de la interacción de los tres factores en el contenido remanente de sólidos solubles, se muestra en la Tabla 8a. Para el primer ciclo de crioconcentración se aprecia que los tratamientos 15; 12; 14 y 17 presentan los más bajos contenidos de sólidos solubles remanentes en el hielo entre 0,33 a 0,87° Brix, no existiendo diferencia estadística significativa entre ellos. En el otro extremo se tiene a los tratamientos 13; 16 y 1; que presentan los más altos contenido de sólidos solubles entre 2,67 a 3 °Brix, tampoco existe diferencia estadística significativa entre estas.

Para el segundo ciclo de crioconcentración

(Tabla 8b), se tiene que los tratamientos 9; 6 y 18; presentan los más bajos contenidos de sólidos solubles remanentes en el hielo, entre 2,17 a 5,33 °Brix; no existiendo diferencias estadísticas significativas entre estas. Los tratamientos 1 y 10 presentan los más altos contenidos de sólidos solubles remanentes que van entre 31 a 31,67 °Brix, no existiendo diferencias estadística significativa entre estas dos.

El efecto de los factores principales en la concentración de sólidos solubles, tanto en el primer ciclo de crioconcentración a), b), c) y para el segundo ciclo d), e) y f, se muestran en la Figura 1.

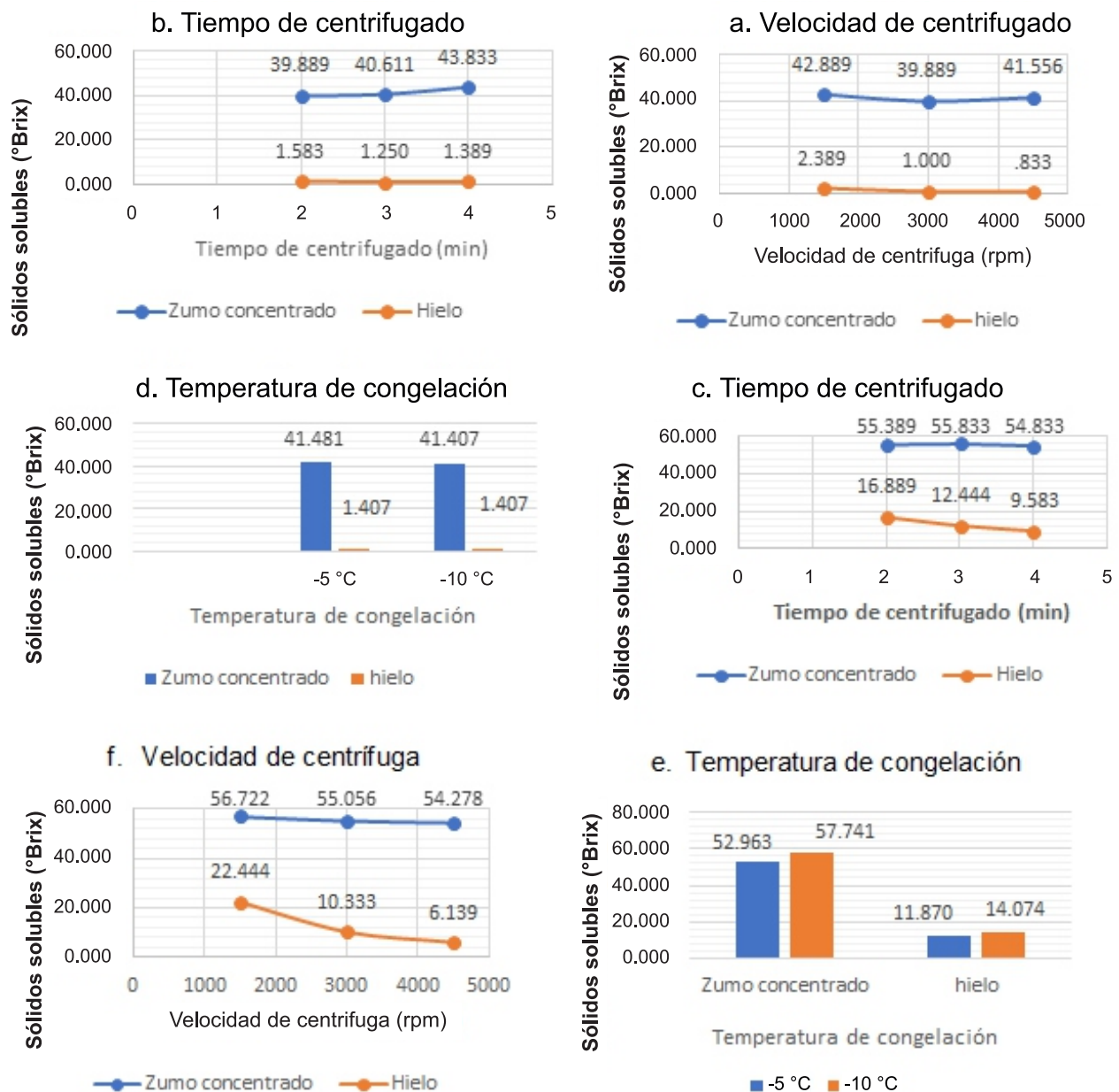


Figura 1. Concentración de sólidos solubles en zumo concentrado y en hielo afectado por cada nivel de factor de los factores principales: a, b y c primer ciclo; d, e y f segundo ciclo.

El ANVA para el pH, durante el primer ciclo de crioconcentración, muestra que existen diferencias estadísticas significativas entre los valores mostrados por cada uno de los niveles de los tres factores principales: tiempo de centrifugado ($\text{sig} = 0,001$), velocidad de centrifuga ($\text{sig} = 0,000$), temperatura de congelación ($\text{sig} = 0,000$), de igual manera por las interacciones de dos factores, a excepción de la interacción tiempo de centrifugado x temperatura de congelación ($\text{sig} = 0,362$). En la interacción de tres factores se tuvo una $\text{sig} = 0,001$.

Para el segundo ciclo de crioconcentración, el pH del hielo muestra que también que existen diferencias estadísticas significativas entre los valores mostrados por cada uno de los niveles de los tres factores principales: tiempo de centrifugado ($\text{sig} = 0,000$), velocidad de centrifuga ($\text{sig} = 0,000$), temperatura de congelación ($\text{sig} = 0,000$), de igual manera por las interacciones de dos factores, a excepción de la interacción tiempo de centrifugado x temperatura de congelación ($\text{sig} = 0,282$). En la interacción de tres factores se tuvo una $\text{sig} = 0,096$.

Tabla 9. PCMM de Duncan para el efecto de la interacción de tres factores en el pH del hielo

a. Primer ciclo de crioconcentración				b. Segundo ciclo de crioconcentración			
Trat	Interacción(*)	pH	Significación	Trat	Interacción(*)	pH	Significación
10	A2 x B2 x C2	6,43	i h	1	A1 x B1 x C1	5,73	g
1	A1 x B1 x C1	6,47	i h g	4	A1 x B2 x C2	5,90	f
13	A3 x B1 x C1	6,50	i h g	7	A2 x B1 x C1	5,97	f
3	A1 x B2 x C1	6,57	h g f	5	A1 x B3 x C1	6,07	e
7	A2 x B1 x C1	6,57	h g f	8	A2 x B1 x C2	6,07	e
4	A1 x B2 x C2	6,60	g f e	10	A2 x B2 x C2	6,07	e
5	A1 x B3 x C1	6,60	g f e	2	A1 x B1 x C2	6,10	e
6	A1 x B3 x C2	6,60	g f e	13	A3 x B1 x C1	6,10	e
8	A2 x B1 x C2	6,67	f e d	11	A2 x B3 x C1	6,20	d
9	A2 x B2 x C1	6,70	e d c	3	A1 x B2 x C1	6,23	d c
2	A1 x B1 x C2	6,70	e d c	16	A3 x B2 x C2	6,23	d c
11	A2 x B3 x C1	6,77	d c b	6	A1 x B3 x C2	6,27	d c
18	A3 x B3 x C2	6,80	c b	14	A3 x B1 x C2	6,27	d c
14	A3 x B1 x C2	6,80	c b	9	A2 x B2 x C1	6,30	d c
16	A3 x B2 x C2	6,80	c b	17	A3 x B3 x C1	6,33	c b
12	A2 x B3 x C2	6,83	b a	12	A2 x B3 x C2	6,40	b
17	A3 x B3 x C1	6,83	b a	15	A3 x B2 x C1	6,40	b
15	A3 x B2 x C1	6,93	a	18	A3 x B3 x C2	6,50	a

(*): A1: 2 min; A2: 4 min; A3: 6 min; B1: 1500 rpm; B2: 3000 rpm; B3: 4500 rpm; C1: -5 °C; C2: -10 °C

El ANVA para el pH, durante el primer ciclo de crioconcentración, muestra que existen diferencias estadísticas significativas entre los valores mostrados por cada uno de los niveles de los tres factores principales: tiempo de centrifugado ($\text{sig} = 0,001$), velocidad de centrifuga ($\text{sig} = 0,000$), temperatura de congelación ($\text{sig} = 0,000$), de igual manera por las interacciones de dos factores, a excepción de la interacción tiempo de centrifugado x temperatura de congelación ($\text{sig} = 0,362$). En la interacción de tres factores se tuvo una $\text{sig} = 0,001$.

La PCMM de Duncan para el efecto generado por la interacción de tres factores en el pH del hielo durante el primer ciclo de crioconcentración se presenta en la Tabla 9a, de donde se deduce que los tratamientos 10; 1 y 13, poseen los pHs más bajos que van de 6,43 a 6,50, no habiendo diferencias estadísticas

entre estas tres. Los valores de pH más altos lo poseen los tratamientos 12; 17 y 15, en el rango de 6,83 a 6,93, no habiendo diferencias significativas entre ellas.

Para el segundo ciclo de crioconcentración (Tabla 9b) el tratamiento 18 presenta un valor de 6,50, como valor más alto, diferente a todos los demás, y el tratamiento 1 el valor de pH más pequeño 5,73, también diferente a todos los demás.

La Figura 2 presenta la relación que se dio en la concentración de sólidos solubles totales entre el crioconcentrado obtenido con interacción de los tres factores involucrados en el proceso experimental y el hielo separado, en el primer ciclo de concentración, mientras la Figura 3 lo suscitado en el segundo ciclo de crioconcentración.

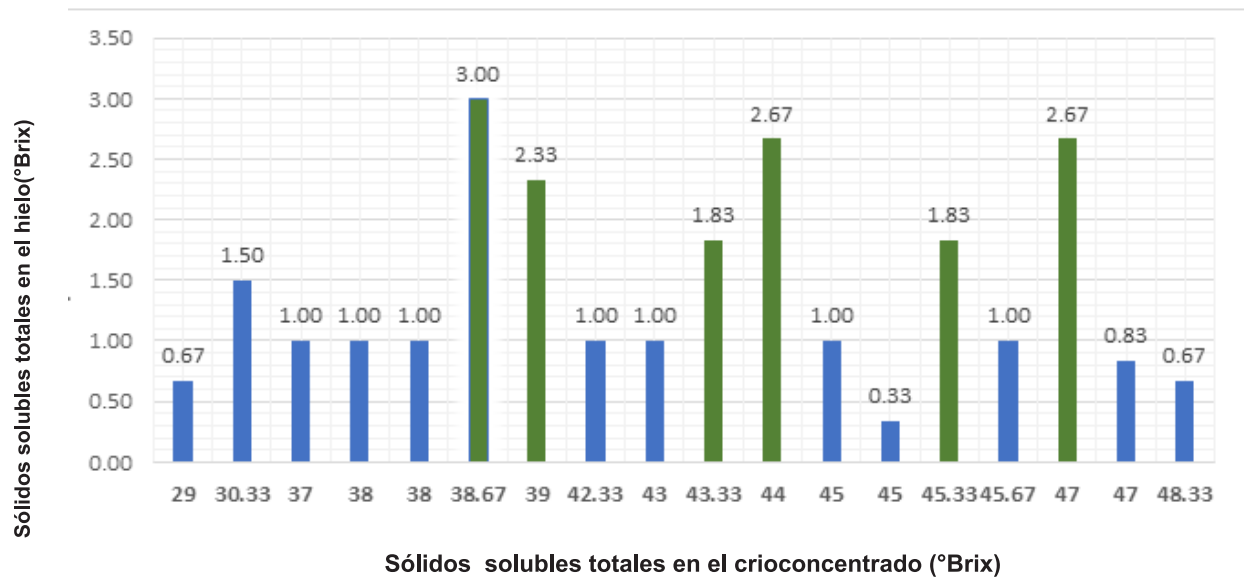


Figura 2. Relación entre el contenido de sólidos solubles en el crioconcentrado y en el hielo expresado en °Brix primer ciclo de concentración

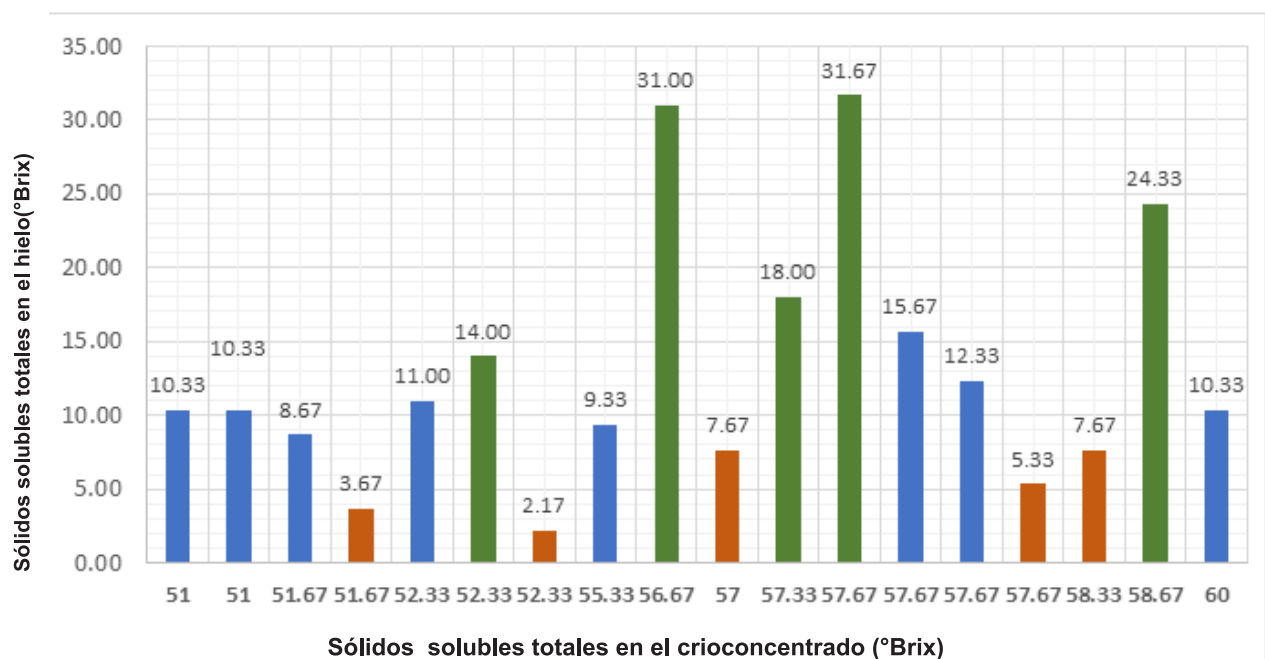


Figura 3. Relación entre el contenido de sólidos solubles en el crioconcentrado y en el hielo expresado en °Brix segundo ciclo de concentración

La evolución de la cantidad de FOS obtenido en el proceso de crioconcentración del zumo de yacón con parámetros optimizados fue el siguiente: raíz de yacón 2,99 g/100 g; en el zumo recién extraído de yacón 7,85 g/100 g y en el producto final 18,64 g/100 g además el producto terminado alcanzó los 60 °Brix de sólidos solubles totales y un pH de 5,9.

DISCUSIÓN

El contenido de sólidos solubles en el zumo de

yacón recién extraído fue de 8 °Brix, este valor es cercano al determinado por Castro *et al.* (2013), 8% y por Fenner *et al.* (2009), 9,9 °Brix, para la raíz de yacón, pero menor al reportado por Herman, *et al.* (1998) 10,7 °Brix (con rango entre 9,9 a 12,6 °Brix) y Manrique *et al.* (2012), 10 °Brix (con rango entre 8 a 12 °Brix). Las diferencias pueden deberse a cultivares o ecotipos diferentes de yacón utilizados en las diversas investigaciones, al tiempo de almacenamiento al que fueron sometidos después de la cosecha hasta el momento del análisis y/o a los niveles y tiempos de asoleamiento a los que fueron sometidos las raíces de yacón.

El pH del zumo de yacón fresco fue de 6,24; que muestra una característica neutra de esta. Con una cantidad de FOS de 7,85 g/100 g; en apariencia mucho menor al reportado por Castro *et al.* (2013) entre 24 y 35 g/100 g de MS, la diferencia se debe a las bases referenciales diferentes utilizados en los reportes (base húmeda en el caso de la investigación y base seca en el caso de Castro).

El contenido de fructosa 1,76 g/100 g, es diferente al reportado por Castro *et al.* (2013) entre 16 y 23 g/100 g de MS, debido fundamentalmente a la base referencial utilizada. Para glucosa 1,18 g/100 g y sacarosa 0,92 g/100 g no se tiene antecedentes con los cuales comparar.

De la Tabla 3, se deduce que los parámetros más apropiados para la crioconcentración de zumo de yacón en el primer ciclo de concentración, se dio con el uso de una temperatura de congelación de -10 °C; velocidad de rotación centrífuga de 4500 rpm y 2 minutos de tiempo de centrifugación, con lo que se alcanzó los 48,33 °Brix de sólidos solubles totales, con un incremento de concentración de 40,33 °Brix (considerando la concentración inicial de 8 °Brix). Bastante mayor al obtenido por Petzold *et al.* (2015) que alcanzaron 20 °Brix para arándano y piña en el primer ciclo de concentración utilizando 10 min de centrifugado a 4600 rpm y al reportado por Moreno *et al.* (2014), que para café alcanzó la concentración del 9,2% en la primera fase de concentración, también mayor al obtenido por Sánchez *et al.* (2010), que alcanzaron 28,8 °Brix en jugo de naranja en dos ciclos de concentración.

El resultado obtenido en la investigación (48,32 °Brix), es casi el doble al logrado por Raventós (2007), que crioconcentrando glucosa y fructosa alcanzó concentraciones de 26,6 °Brix y 27,5 °Brix respectivamente en un ciclo de concentración, ligeramente mayor al obtenido por Bonilla, *et al.* (2015), que crioconcentraron piña alcanzando 40,7 °Brix y 47,9 °Brix con temperaturas de congelación de -20 °C y -30 °C, pero ligeramente menor al obtenido por este equipo de investigación que obtuvo 51 °Brix con temperatura de congelación de -40 °C. Estos últimos resultados, muestran una relación inversa entre la temperatura de congelación y la concentración de sólidos totales alcanzados, y explica el resultado obtenido en el experimento, que utilizando la

temperatura de congelación de -10 °C como una de las variables independientes de importancia, generó una concentración elevada en la fracción no congelada del zumo de yacón (48,33 °Brix).

La velocidad de centrifugación de 4500 RPM, determinado como parámetro óptimo en esta fase de crioconcentración, generó alrededor de 3 396 ges, lo que explica la extracción más rápida del zumo concentrado, que solo llevó 2 minutos para alcanzar los 48,33 °Brix.

De la Tabla 6, se determina que en el segundo ciclo de crioconcentración se alcanzó los 60 °Brix en el contenido de sólidos solubles totales como valor más elevado, utilizando la interacción de -10 °C de temperatura de congelación, 3000 RPM de velocidad de centrífuga y 2 min de tiempo de centrifugación. Esta concentración es mayor al reportado por Petzold *et al.* (2015), para jugo de arándano 26 °Brix, en dos ciclos de concentración, con 10 min de tiempo y 4600 RPM de velocidad, mayor también al informado por Sánchez *et al.* (2010), para jugo de naranja donde solo alcanzó 28,8 °Brix, mayor también al reportado por Bonilla *et al.* (2015), que utilizando -40 °C de temperatura de congelación alcanzó los 51 °Brix usando jugo de piña.

La concentración de 60 °Brix también se muestra mayor al reportado por Aider y Halleux (2008), que en tres ciclos de concentración trabajando con -10 °C y -20 °C alcanzaron los 35,5 °Brix y 45,5 °Brix con jugo de albaricoque y cereza respectivamente.

La temperatura de -10 °C, se muestra nuevamente como temperatura óptima para la crioconcentración del zumo de yacón, debido a que a menor temperatura de congelación la concentración sólidos solubles totales de la fracción del zumo no congelado en el interior de la red de cristales de agua es mayor tal como fue demostrado por Bonilla, *et al.* (2015), además que esta temperatura genera una mayor dureza en los cilindros (cubos) congelados en comparación con -5 °C, esta mayor dureza facilita la operación de centrifugación.

En este caso fue necesario la aplicación de una menor velocidad de centrífuga 3000 rpm, que generó 1509 ges, casi la mitad que para la etapa anterior, es explicado por el hecho, que

cuanto mayor es la concentración de la solución que se congela, la disponibilidad de agua es menor, por lo que los cristales de agua que se forman lo hacen más alejados unos de otros, lo que da lugar a un cubo más "liviano" y con mayor porosidad. Estos espacios huecos son los que son utilizados para la salida de la solución no congelada y más concentrada, forzados por la velocidad centrífuga. La porosidad generada también explica el hecho de necesitar solo 2 min de tiempo para la salida de la solución concentrada.

El pH del zumo concentrado, en el primer ciclo de concentración (Tabla 7 a), va en el rango de 5,80 para el tratamiento 7 hasta 6,33 para el tratamiento 9, en cuanto al segundo ciclo de concentración (Tabla 7 b), el menor pH se reporta para el tratamiento 1 (5,67), muy cercano al menor valor alcanzado en el primer ciclo de concentración. El pH más elevado se encuentra en 6,03 y le corresponde al tratamiento 8. En general se puede manifestar que todos estos valores de pH se encuentran dentro del rango comprendido como característico para el yacón.

De la Tabla 8, se tiene que durante el primer ciclo de concentración la menor concentración de sólidos solubles en el hielo se dio con el tratamiento 15 (0,33 °Brix), explicado por el uso de la velocidad centrífuga de 3000 rpm, por un tiempo de 6 min. Mientras el más alto se produjo al utilizar el tratamiento 1 (3,00 °Brix), esto se explica porque en este último caso la velocidad utilizada fue de 1500 rpm, por un tiempo de 2 min, habiendo sido congelado el zumo congelado a -5 °C. Para el segundo ciclo de concentración, se determinó que el tratamiento 9, generó el más bajo contenido remanente de sólidos solubles en el hielo (2,17 °Brix), explicado también por el uso de 3000 rpm de velocidad y 4 min de centrifugación. En cambio el más alto contenido remanente se tuvo con el tratamiento 10 (31,67 °Brix), aun cuando en este caso se utilizó valores intermedios de los niveles de factor (4 min de centrifugación, 3000 rpm de velocidad de centrifugación y 10 °C de temperatura de congelación). Igual al obtenido con el tratamiento 1, (31,00 °Brix), cuando se utilizó 2 min de centrifugación, 1500 rpm de velocidad de centrifuga y -5 °C).

De la Figura 1 a), se desprende que al aumentar el tiempo de centrifugado se incrementa ligeramente la concentración de

sólidos solubles desde 38,39 16 °Brix para 2 min, hasta 43,83 °Brix para 6 min (para 4 min es de 40,61 °Brix), en cambio la cantidad de sólidos solubles remanentes en el hielo muestran una tendencia decreciente bastante baja, 1,58° Brix para 2 min, hasta 1,39 °Brix para 6 min. La Figura 7 b), muestra un comportamiento casi constante en el contenido de sólidos solubles en el zumo concentrado 42,89 °Brix; 39,89 °Brix y 41,56 °Brix, para las velocidades de 1500; 3000 y 4500 rpm respectivamente y el contenido de remanente de sólidos solubles en el hielo tiene una tendencia decreciente desde 2,36 °Brix, hasta 0,83 °Brix, para 1500 y 4500 rpm respectivamente. La Figura 1 c), indica que tanto la temperatura de congelación de -5 °C y de -10 °C, generaron concentraciones de sólidos solubles en el zumo de yacón de 41,48 °Brix y 41,41 °Brix respectivamente, no existiendo diferencias estadísticas significativas entre estos dos niveles de factor, tal como se evidencia en la Tabla 2 (sig = 0899), claro indicativo que la temperatura de congelación no afecta en forma diferente en la concentración de sólidos totales. Las Figuras 1 a), b) y c), muestran información del primer ciclo de crioconcentración.

Las Figuras d), e) y f), muestran información del segundo ciclo de crioconcentración. La Figura 1 d), muestra un comportamiento casi constante para el contenido de sólidos solubles en el zumo concentrado, que va de 55,39 hasta 54,83 °Brix, lo que permite concluir que los tiempos de centrifugado afectan de forma igual en el contenido final de sólidos solubles. En cambio en el contenido de sólidos solubles en el hielo, si tiene efecto estadístico significativo, es tal, que con 2 min de centrifugado se tuvo 16,89 °Brix, mientras que con 6 min se alcanzó 9,58 °Brix, contenidos mucho mayores a los obtenidos en el primer ciclo de centrifugación mostrado en la Figura 1 a). La Figura 1 e), muestra una ligera tendencia negativa del contenido de sólidos solubles en función de la velocidad centrífuga para el zumo concentrado, que va desde 56,72 hasta 54,28 °Brix para velocidades de 1500 y 4500 rpm. En lo relacionado a sólidos solubles en el hielo la tendencia también es negativa que va desde 22,44 hasta 6,14 °Brix con 1500 y 4500 rpm.

La Figura 1 f), muestra que cuando el zumo es congelado a -10 °C, logra obtener un concentrado con 57,74 °Brix y con -5 °C, 52,96 °Brix. Tendencia parecida se tiene en el

remanente de sólidos solubles en el hielo, con 11,87 °Brix para -5 °C y 14,07 °Brix para -10 °C. En general se observa que la cantidad de sólidos solubles remanentes en el hielo es mayor que en el primer ciclo de crioconcentración, porque el concentrado queda ocluido entre los cristales de hielo que generan escaso diámetro en los conductos por donde deben salir por acción de la fuerza centrífuga y que los gases generados en el equipo no son insuficientes aún con las velocidades operadas.

En cuanto al contenido de sólidos totales disueltos contenidos en el hielo separado en la primera fase de crioconcentración, se ha determinado, que la velocidad de 1500 rpm (barras verdes), genera una mayor cantidad de remanente de sólidos en el hielo, que van entre 1,83 a 3 °Brix, mientras que para las velocidades de 3000 y 4500 rpm este valor se encuentra por debajo de 1,50 (barras azules) y hasta un mínimo 0,33 °Brix, tal como puede verificarse en la Figura 2 y la Tabla 8 a).

Este mismo fenómeno se puede verificar en la Figura 2 y Tabla 8 b), donde la velocidad de 1500 rpm genera los más altos contenidos de remanente de sólidos totales disueltos en el hielo eliminado que van entre 14 a 31,67 °Brix, mientras las otras dos velocidades probadas generan remanentes por debajo de 10,33 y hasta un mínimo de 2,17 °Brix. La explicación de este fenómeno para ambos casos, está en que una mayor velocidad de rotación genera más gases, que obligan a la salida de la fracción no congelada del zumo de yacón (377 ges para 1500 rpm, 1509 ges para 3000 rpm y 3396 ges para 4500 rpm).

En el segundo ciclo de concentración además se verifica que la cantidad de sólidos remanentes en el hielo que se elimina es muchísimo mayor al presentado en el primer ciclo de concentración, lo que nos anima a plantear que la cantidad de sólidos remanentes en el hielo guarda relación directa con la concentración inicial del concentrado que se congela a mayor concentración de la solución que se congela mayor será el remanente de sólidos en el hielo separado (Figuras 1 y 2), fenómeno demostrado por Moreno *et al.* (2014), en la concentración de café, donde la cantidad de café retenido en los cristales de hielo se fue incrementando conforme la

concentración de este se incrementa, así: en la primera etapa se retiene el 0,24% de café, en el segundo 0,7%; luego 0,5%; 1,7%; 4,4%; 7,3%; finalmente 8,1%.

Es necesario informar también que en la primera etapa de crioconcentración la textura del hielo separado es duro, no teniendo tendencia a deformarse por la aplicación de la fuerza centrífuga, mientras en la segunda etapa, el hielo se deforma fácilmente, haciendo que esta se torne plana, durante la centrifugación. Esta deformación al parecer cierra los poros generados durante la congelación, lo que hace que sea más difícil la salida de la totalidad de la fracción del zumo no congelado y se evidencie en un mayor contenido de sólidos remanentes en el hielo separado.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial al Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad (Innovate Perú), que financió el proyecto, a través del convenio No 536-FIDECOM-INNOVATE PERU-PIMEN-2015.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aider, M. & Halleux, D. (2008). Production of concentrated cherry and apricot juices by cryoconcentration technology. *Food Science and Technology*, 41, 1768-1775.
- Bonilla, E., Vernon, E. & Beristain, C. (2006). Thermophysical properties of freeze-concentrated pineapple juice. *Italian Journal of Food Science*, 4, 18, 367 - 376.
- Castro, A., Céspedes, G., Carballo, S., Bergenstahl, B. & Tornberg, E. (2013). Dietary fiber, fructooligosaccharides, and physicochemical properties of homogenized aqueous suspensions of yacón (*Smallanthus sonchifolius*). *Food Research International*, 50, 392 - 400.
- Chacón, A. (2006). Perspectivas agroindustriales actuales de los oligofructosacáridos (FOS). *Agronomía Mesoamericana*, 17, 2, 265 - 286.

- Fenner, C., De Oliveira, A., & Zapata, C. (2009). Hot air drying of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and its effect on sugar concentrations. *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 2169–2175.
- Jaime, L., Martín-Cabrejas, M. A., Mollá, E., López-Andréu, F. J., & Esteban, R. M. (2001). Effect of storage on fructan and fructooligosaccharide of onion (*Allium cepa* L.). *Journal of agricultural and food chemistry*, 49(2), 982-988.
- Madrigal, L. & Sangronis, E. (2007). La inulina y derivados como ingredientes claves en alimentos funcionales. ARCHIVOS LATINOAMERICANOS DE NUTRICION. Órgano Oficial de la Sociedad Latinoamericana de Nutrición, 57, 4, 387–396.
- Moreno, F., Hernández, E., Raventós, M., Robles, C. & Ruiz, Y. (2014). A process to concentrate coffee extract by the integration of falling film and block freeze concentration, *Journal of Food Engineering*, 128, 88–95.
- Petzold, G. & Aguilera, J.M. (2013). Centrifugal freeze concentration. *Innovate Food Science and Emerging Technologies*, 20, 253-258.
- Petzold, G., Moreno, J., Lastra, P., Rojas, K. & Orellana, P. (2015). Block freeze concentration assisted by centrifugation applied to blueberry and pineapple juices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 30, 192-197.
- Polanco, P. M. (2011). *Caracterización morfológica y molecular de materiales de yacón (Smallanthus sonchifolius* Poep. & Endl) H. Robinson colectados en la eco región eje cafetero de Colombia. Tesis para optar el grado de Doctor, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Colombia.
- Santana, I. & Cardoso, M. (2008). Raíz tuberosa de yacón (*Smallanthus sonchifolius*): potencialidade de cultivo, aspectos tecnológicos e nutricionais, *Ciencia Rural*, 38, 3, 898-905.
- Sánchez, J., Ruiz, Y., Raventós, M., Auleda, J. & Hernández, E. (2010). Progressive freeze concentration of orange juice in a pilot plant falling film. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11, 644-651.
- Ramírez, H., Ruiz, R., Moreno, M. & Fabián, L. (2012). Crioconcentración en bloque de soluciones acuosas de café. *Vitae*, enero-abril, pp. 54-56.
- Raventós, M., Hernández, E., Auleda, J. & Ibarz, A. (2007). Concentration of aqueous sugar solutions in a multi-plate cryoconcentrator, *Journal of Food Engineering*. 79, 577–585.

Correo electrónico:

jragouncp@yahoo.es

Revisión de pares:

Recibido: 03-05-2017

Aceptado: 28-06-2017