

## Cálculo de la viscosidad real de melazas (fluido no newtoniano) de ingenios de Tucumán

Gimena del H. Zamora Rueda\*, Romina A. Salazar\* y Marcelo Ruiz\*\*

### RESUMEN

La melaza se comporta como un fluido no newtoniano, es decir: no existe una relación constante entre el esfuerzo y la velocidad de rotación debido a características propias de su composición (contenido de gomas, polisacáridos, etc.); por ello, la determinación directa de viscosidad aparente no arroja un valor confiable. El cálculo de la viscosidad de un fluido no newtoniano involucra los parámetros de índice de flujo ( $n$ ) e índice de consistencia ( $K$ ). El objetivo de este trabajo fue realizar mediciones de viscosidad aparente y el cálculo de la viscosidad real como fluido no newtoniano. Se evaluaron ocho muestras de melaza de distintos ingenios de la provincia de Tucumán recolectadas durante la zafra 2015. Los resultados de viscosidad real se encontraron en un rango de 22,26 a 213,34 [Pa.s] y se comparó esta con la viscosidad aparente, con un error relativo que varía entre 6,09% a 51,02%. Se puede concluir que la metodología propuesta resulta útil para el cálculo de viscosidad real en melazas de ingenios de Tucumán, corroborando el comportamiento no newtoniano de este tipo de fluido.

**Palabras clave:** viscosidad, melaza, caracterización, consistencia.

### ABSTRACT

#### Estimation of real viscosity of molasses (non-Newtonian fluid) from sugar mills in Tucumán

Molasses from sugarcane process behaves as a non-newtonian fluid, that means, there is not constant relationship between the effort and the speed of rotation, because of the own characteristics of composition (gum content, polysaccharides, etc.), Then the direct determination of apparent viscosity does not yield a reliable value. Calculating the viscosity of a non-newtonian fluid involves parameters as flow index ( $n$ ) and consistency index ( $K$ ). The aim of this work was measure apparent viscosity from different molasses and calculates real viscosity as a non-newtonian fluid. Eight samples of molasses were evaluated from different mills in Tucuman were collected during the 2015. Results of real viscosity were found in a range of 22.26 to 213.34 [Pa.s] and this was compared with apparent viscosity measured, with relative error from 6.09% to 51.02%. We can conclude that the proposed methodology is useful for the calculation of real viscosity in molasses of mills Tucuman, corroborating the non-newtonian behavior of this type of fluid.

**Key words:** viscosity, molasses, characterization, consistency.

Artículo recibido: 27/09/16 y Aceptado: 2/05/17.

---

\*Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales

\*\*Química de los Productos Agroindustriales

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes (EEAOC) - Tucumán. e-mail: gzamora@eeaoc.org.ar

## INTRODUCCIÓN

La viscosidad es la propiedad de un fluido que mide su resistencia a fluir ante la presencia de un esfuerzo de cizallamiento. Esta se clasifica en viscosidad dinámica, viscosidad cinemática y viscosidad aparente. Se define como viscosidad dinámica ( $\eta$ ) a la fricción interna de un líquido o su tendencia a resistir el flujo; la unidad de esta en el sistema internacional es Pa.s (pascal por segundo). La viscosidad cinemática ( $\nu$ ) es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido; se mide en mm<sup>2</sup>/s (milímetros al cuadrado sobre segundo). La viscosidad aparente ( $\eta_{ap}$ ) es la viscosidad de un fluido no newtoniano expresada como si fuera un fluido newtoniano (Perry, 2001).

Un fluido puede tener un comportamiento newtoniano o no newtoniano. El primero se pone de manifiesto cuando el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la velocidad de deformación. En cambio, en los fluidos no newtonianos no existe una relación de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación. La viscosidad de estos fluidos varía en función de la temperatura, la velocidad de deformación o gradiente de velocidad y la aguja utilizada o spindle (Bourne, 1982).

La melaza es un fluido denso y viscoso que presenta un comportamiento no newtoniano. Contiene sacarosa, azúcares reductores, sales, compuestos solubles en álcali, gomas, polisacáridos, etc. Un parámetro importante a determinar en este compuesto es su viscosidad debido a que se encuentra estrechamente relacionada con la obtención del cristal de sacarosa, pero las características propias de su composición hacen que no se pueda obtener un valor de viscosidad confiable al emplearse un viscosímetro (Diez *et al.*, 2011 y Tolosa *et al.*, 2005). La viscosidad se vincula directamente con el gasto energético que se debe realizar para bombear la melaza dentro de la fábrica y además su valor puede indicarnos la presencia de posibles contaminaciones por acción de dextrinas y otros microorganismos. El objetivo de este trabajo fue mostrar las mediciones de viscosidad aparente y realizar el cálculo de la viscosidad real de la melaza de ingenios tucumanos como fluido no newtoniano; utilizar la técnica propuesta por Gil Zapata (1997) y observar la influencia de los diversos factores mencionados en los valores de viscosidad obtenidos. El trabajo de Gil Zapata (1997) se realizó con mieles finales para la determinación de la viscosidad aparente a una temperatura de 45°C en un rango de velocidad de 5 rpm a 100 rpm; asimismo proporcionó una fórmula para el cálculo de viscosidad real relacionada con los índices consistencia y de comportamiento de fluido, resultando valores de viscosidad para estas mieles en un rango de 17 a 70 Pa.s.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Procedimiento de obtención de la viscosidad real:** para la realización de este trabajo se utilizaron ocho muestras representativas de melaza recolectadas durante la zafra 2015 de distintos ingenios tucumanos, las cuales fueron sometidas a determinaciones de viscosidad aparente. Luego, con la información provista por el viscosímetro se realizó el cálculo de la viscosidad real de las aquellas. Estas determinaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Química de los Productos Agroindustriales de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), certificado con un Sistema de Gestión de calidad ISO 9000:2001.

**Determinación de viscosidad aparente ( $\mu$ ):** se realizó empleando la técnica propuesta en el artículo titulado Determinación de viscosidad en mieles finales. Consideradas como un fluido no newtoniano (Gil Zapata, 1997). Para medir la viscosidad aparente de las muestras se utilizó un viscosímetro marca Brookfield, modelo LVDV-II+. El procedimiento de medición consistió en ajustar el "set point" del baño termostático a una temperatura de 50°C. Se verificó la recirculación del agua caliente a dicha temperatura en el vaso portamuestra en el que luego se agregó la muestra de melaza, verificándose que no se formaran burbujas de aire y asegurándose de que la cantidad de muestra cubriera la ranura del agitador. Se homogeneizó la muestra y se seleccionó el spindle más adecuado para la lectura (resultando para este lote de muestras el spindle S65). Luego se seleccionó la velocidad de rotación (expresadas en revoluciones por minuto o rpm) y por último se realizaron las lecturas correspondientes con una espera de cinco minutos en cada una para su estabilización. Fueron determinados valores de viscosidad por lo menos a tres velocidades de rotación, para las cuales el porcentaje (%) de la escala de torque debía estar entre 10% y 90%, de modo de obtener un valor confiable registrándose los tres parámetros mencionados. Cabe destacar que el viscosímetro arroja valores de viscosidad en unidades de cp (centipoise).

La Figura 1 muestra el viscosímetro Brookfield modelo LVDV-II+ y el portamuestra empleados en la determinación de la viscosidad aparente de las muestras analizadas en este trabajo.

**Cálculo de viscosidad real ( $\eta$ ):** la ecuación 1 es la utilizada para calcular la verdadera viscosidad en el caso de los fluidos no newtonianos.

$$\text{Viscosidad [Pa.s]} = \eta = K \left( \frac{dy}{dt} \right)^{n-1}$$

Donde:

$\eta$ : viscosidad real, expresada en Pa.s.

**K:** índice de consistencia, expresado en Pa.sn.

**dy/dt:** gradiente de velocidad =  $4 \cdot \pi \cdot N/n$ .



Figura 1 Equipo viscosímetro Brookfield modelo LVDV-II+.

**n:** índice de comportamiento del flujo, adimensional. Esta medida indica el grado de comportamiento del fluido no newtoniano, puede ser mayor o menor a la unidad de acuerdo al tipo de comportamiento no newtoniano que presenta el fluido.

**N:** velocidad de rotación del spindle, expresada en  $\text{seg}^{-1}$ .

Hay que señalar que para calcular la viscosidad real de cada muestra en estudio a una velocidad dada debe realizarse en primer lugar la determinación de los valores de  $n$  y  $K$ .

El valor de  $n$  corresponde al valor de la pendiente resultante de la gráfica del torque en función de  $N$ , ambos en escala logarítmica. El torque depende del porcentaje de la escala que informa el equipo para cada velocidad (en adelante rpm) seleccionada y es proporcional al valor de torque para el 100% de la escala, dato brindado por el fabricante.

Para determinar el valor de  $K$  se calcula el esfuerzo cortante (con el valor de torque correspondiente y las dimensiones del spindle empleado) y el gradiente de velocidad o velocidad de corte (empleando el valor de  $n$  obtenido y cada velocidad de giro aplicada al fluido en estudio). Ambos parámetros son posteriormente graficados en escala logarítmica ( $\ln$  del gradiente de velocidad en función del  $\ln$  del esfuerzo cortante). La gráfica resulta en una recta cuya pendiente es nuevamente el valor de  $n$  antes obtenido y el antilogaritmo de su ordenada al origen arroja el valor de índice de consistencia conocido como  $K$ .

Finalmente la técnica compara el valor de viscosidad para cada velocidad de giro que arroja el

viscosímetro empleado (viscosidad aparente) con respecto a la viscosidad calculada, de modo de cuantificar el error que se comete al considerar a la melaza como un fluido newtoniano.

**Determinación del contenido de sólidos solubles (Brix% refractométrico):** las muestras también fueron sometidas a la evaluación de su concentración de sólidos en solución expresados en porcentaje peso/peso (%P/P), valor determinado empleando un refractómetro. Con este parámetro se tiene una mejor caracterización de la muestra de melaza.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Tablas 1 a 8 presentan los resultados obtenidos aplicando la metodología descrita a las ocho melazas estudiadas. En ellas se informan las lecturas realizadas de velocidad, porcentaje de la escala y viscosidad aparente; se incluyen, además, los cálculos intermedios realizados para obtener finalmente el valor de la viscosidad real para cada velocidad de giro aplicada. Cada tabla también informa el índice de comportamiento de flujo ( $n$ ) e índice de consistencia ( $K$ ) y el error relativo porcentual respecto del valor de viscosidad aparente.

Las Figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, a su vez, ilustran el comportamiento gráfico de las viscosidades obtenidas para las ocho muestras estudiadas. Las curvas de color rojo corresponden a la viscosidad aparente y las curvas de color azul a la viscosidad real calculada, ambas en función de la velocidad de giro del spindle. En estas se puede observar que los valores de viscosidad real obtenidos son

**Tabla 1. Resultados del ensayo de melaza del Ingenio 1 (86,98°Bx). Temperatura 50°C. Spindle S65.**

rpm	Escala [%]	N [seg <sup>-1</sup> ]	Torque [N-m]	Esfuerzo cortante [Pa]	Gradiente de velocidad [seg <sup>-1</sup> ]	Viscosidad aparente μ [cp]	Viscosidad aparente μ [Pa.seg]	Viscosidad real η [Pa.seg]	Error Relativo %
3	11,8	0,05	7,94E-06	31,22	0,816	47.990	47,99	37,81	26,91%
6	19,5	0,10	1,31E-05	51,6	1,631	38.992	38,99	32,24	20,95%
12	34,0	0,20	2,29E-05	89,97	3,263	33.693	33,69	27,49	22,58%
30	68,9	0,50	4,64E-05	182,31	8,157	27.554	27,55	22,26	23,78%
<b>n</b>						0,7699			
<b>K</b>						36,0800			

**Tabla 2. Resultados del ensayo de melaza del Ingenio 2 (87,58°Bx). Temperatura 50°C. Spindle S65.**

rpm	Escala [%]	N [seg <sup>-1</sup> ]	Torque [N-m]	Esfuerzo cortante [Pa]	Gradiente de velocidad [seg <sup>-1</sup> ]	Viscosidad aparente μ [cp]	Viscosidad aparente μ [Pa.seg]	Viscosidad real η [Pa.seg]	Error Relativo %
1,5	15,9	0,025	1,07E-05	42,07	0,362	127.000	127,00	116,52	9,00%
3,0	29,3	0,050	1,97E-05	77,53	0,725	117.000	117,00	106,24	10,13%
6,0	52,8	0,100	3,55E-05	139,71	1,449	106.000	106,00	96,87	9,42%
12,0	96,8	0,200	6,52E-05	256,14	2,898	96.979	96,98	88,33	9,79%
<b>n</b>						0,8668			
<b>K</b>						101,6800			

**Tabla 3. Resultados del ensayo de melaza del Ingenio 3 (88,52°Bx). Temperatura 50°C. Spindle S65.**

rpm	Escala [%]	N [seg <sup>-1</sup> ]	Torque [N-m]	Esfuerzo cortante [Pa]	Gradiente de velocidad [seg <sup>-1</sup> ]	Viscosidad aparente μ [cp]	Viscosidad aparente μ [Pa.seg]	Viscosidad real η [Pa.seg]	Error Relativo %
1,5	21,6	0,025	1,45E-05	57,15	0,458	173.000	173	132,10	30,96%
3,0	38,3	0,050	2,58E-05	101,34	0,916	153.000	153	106,22	44,03%
6,0	64,7	0,100	4,35E-05	171,20	1,832	129.000	129	85,42	51,02%
12,0	88,4	0,200	5,95E-05	233,91	3,664	103.000	103	68,69	49,96%
<b>n</b>						0,6855			
<b>K</b>						103,3400			

**Tabla 4. Resultados del ensayo de melaza del Ingenio 4 (89,02°Bx). Temperatura 50°C. Spindle S65.**

rpm	Escala [%]	N [seg <sup>-1</sup> ]	Torque [N-m]	Esfuerzo cortante [Pa]	Gradiente de velocidad [seg <sup>-1</sup> ]	Viscosidad aparente μ [cp]	Viscosidad aparente μ [Pa.seg]	Viscosidad real η [Pa.seg]	Error Relativo %
1,5	21,5	0,025	1,45E-05	56,89	0,369	172.000	172	154,67	11,21%
3,0	39,2	0,050	2,64E-05	103,73	0,738	157.000	157	139,44	12,59%
6,0	69,9	0,100	4,70E-05	184,96	1,477	140.000	140	125,71	11,36%
<b>n</b>						0,8505			
<b>K</b>						133,0600			

Tabla 5. Resultados del ensayo de melaza del Ingenio 5 (88,86°Bx). Temperatura 50°C. Spindle S65.

rpm	Escala [%]	N [seg <sup>-1</sup> ]	Torque [N-m]	Esfuerzo cortante [Pa]	Gradiente de velocidad [seg <sup>-1</sup> ]	Viscosidad aparente μ [cp]	Viscosidad aparente μ [Pa.seg]	Viscosidad real η [Pa.seg]	Error Relativo %
3	11,8	0,05	7,94E-06	31,22	0,816	47.990	47,99	37,81	26,91%
6	19,5	0,10	1,31E-05	51,6	1,631	38.992	38,99	32,24	20,95%
12	34,0	0,20	2,29E-05	89,97	3,263	33.693	33,69	27,49	22,58%
30	68,9	0,50	4,64E-05	182,31	8,157	27.554	27,55	22,26	23,78%
<b>n</b>						0,7699			
<b>K</b>						36,0800			

Tabla 6. Resultados del ensayo de melaza del Ingenio 6 (88,12°Bx). Temperatura 50°C. Spindle S65.

rpm	Escala [%]	N [seg <sup>-1</sup> ]	Torque [N-m]	Esfuerzo cortante [Pa]	Gradiente de velocidad [seg <sup>-1</sup> ]	Viscosidad aparente μ [cp]	Viscosidad aparente μ [Pa.seg]	Viscosidad real η [Pa.seg]	Error Relativo %
1,5	18,4	0,025	1,24E-05	48,69	0,352	147.000	147	138,56	6,09%
3,0	34,4	0,050	2,32E-05	91,02	0,705	138.000	138	128,49	7,40%
6,0	63,3	0,100	4,26E-05	167,50	1,409	130.000	130	119,16	9,10%
<b>n</b>						0,8912			
<b>K</b>						123,6900			

Tabla 7. Resultados del ensayo de melaza del Ingenio 7 (87,70°Bx). Temperatura 50°C. Spindle S65.

rpm	Escala [%]	N [seg <sup>-1</sup> ]	Torque [N-m]	Esfuerzo cortante [Pa]	Gradiente de velocidad [seg <sup>-1</sup> ]	Viscosidad aparente μ [cp]	Viscosidad aparente μ [Pa.seg]	Viscosidad real η [Pa.seg]	Error Relativo %
0,6	9,2	0,01	6,19E-06	24,34	0,151	184.000	184	167,93	9,57%
1,5	21,7	0,03	1,46E-05	57,42	0,378	172.000	172	143,66	19,72%
3,0	37,8	0,05	2,54E-05	100,02	0,757	154.000	154	127,67	20,63%
6,0	62,0	0,10	4,17E-05	164,06	1,514	124.000	124	113,45	9,30%
<b>n</b>						0,8297			
<b>K</b>						121,7500			

Tabla 8. Resultados del ensayo de melaza del Ingenio 8 (88,29°Bx). Temperatura 50°C. Spindle S65.

rpm	Escala [%]	N [seg <sup>-1</sup> ]	Torque [N-m]	Esfuerzo cortante [Pa]	Gradiente de velocidad [seg <sup>-1</sup> ]	Viscosidad aparente μ [cp]	Viscosidad aparente μ [Pa.seg]	Viscosidad real η [Pa.seg]	Error Relativo %
0,6	11,9	0,01	8,01E-06	31,49	0,171	238.000	238	187,01	27,27%
1,5	24,3	0,03	1,64E-05	64,30	0,428	194.000	194	146,44	32,48%
3,0	39,7	0,05	2,67E-05	105,05	0,857	159.000	159	121,71	30,64%
6,0	64,5	0,10	4,34E-05	170,67	1,713	129.000	129	101,15	27,53%
<b>n</b>						0,7331			
<b>K</b>						116,7800			



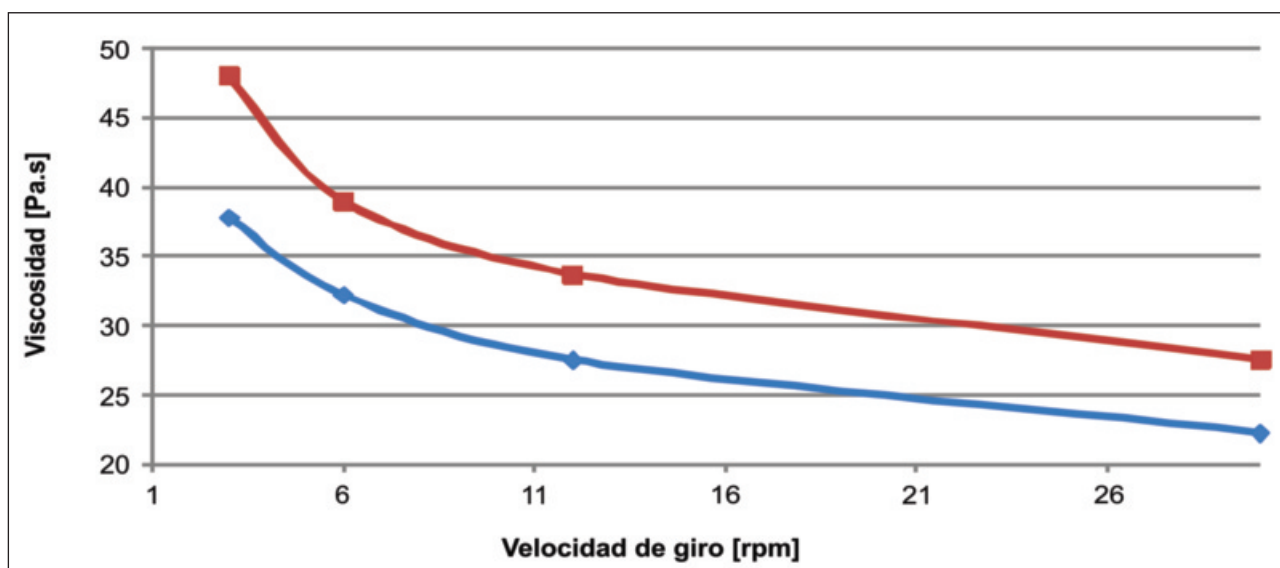


Figura 2. Curva de viscosidad aparente y viscosidad real en función de la velocidad de giro de Melaza 1 a 86, 89°BX a 50°C. Curva roja: viscosidad aparente; Curva azul: viscosidad real.

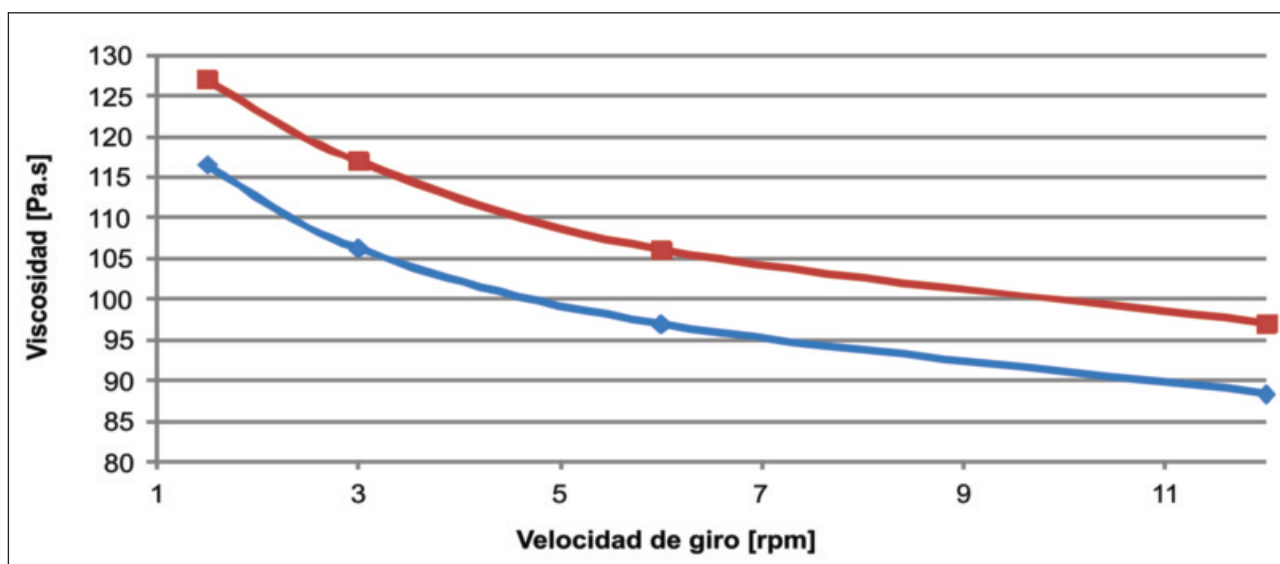


Figura 3. Curva de viscosidad aparente y viscosidad real en función de la velocidad de giro de Melaza 2 a 87,58°BX a 50°C. Curva roja: viscosidad aparente; Curva azul: viscosidad real.

menores que los resultados de viscosidad aparente, lo cual corrobora lo postulado en la sección de materiales y métodos.

A partir de todo lo informado se puede observar que los valores encontrados de  $n$  varían entre 0,6855 a 0,8912, todos menores a la unidad corroborando el comportamiento no newtoniano de tipo pseudoplástico de las muestras, siendo la melaza del ingenio 3 la que presentó mayores características de fluido no newtoniano

por haber presentado el mayor alejamiento de la unidad. Los valores de  $K$  resultaron en un rango de 36,08 a 161,77 [Pa.sn], presentando la melaza del ingenio 5 el mayor valor de consistencia. Estos valores dependen de las características propias de la melaza. Al analizar la viscosidad real de las muestras se observó que estas varían entre 26,22 a 213,34 [Pa.seg], donde el máximo valor corresponde a la melaza 6. Estos valores son semejantes a los obtenidos por Gil Zapata (1997), para

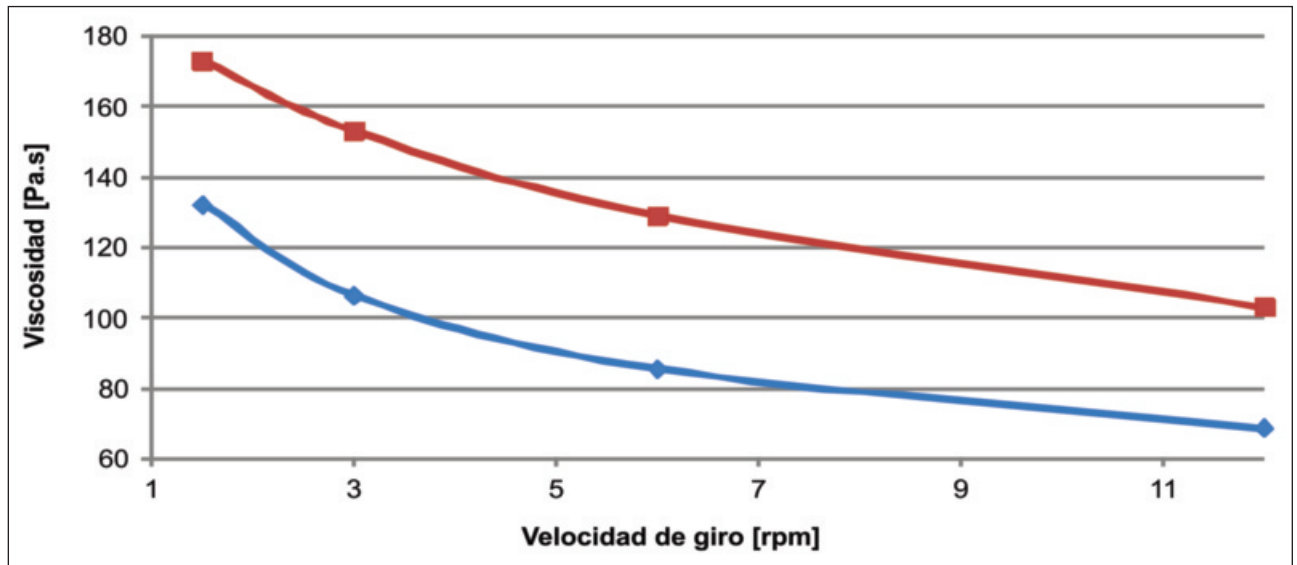


Figura 4 : Curva de viscosidad aparente y viscosidad real en función de la velocidad de giro de Melaza 3 a 88,52°BX a 50°C. Curva roja: viscosidad aparente; Curva azul: viscosidad real.

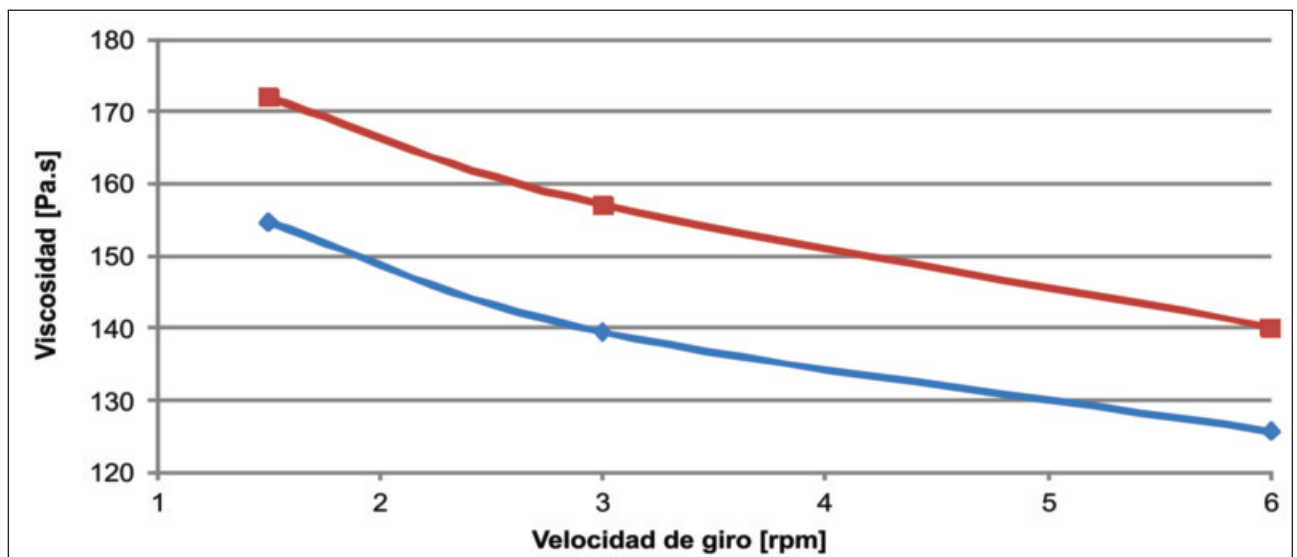


Figura 5. Curva de viscosidad aparente y viscosidad real en función de la velocidad de giro de Melaza 4 a 89,02°BX a 50°C. Curva roja: viscosidad aparente; Curva azul: viscosidad real.

melazas de ingenios colombianos.

En cuanto a la comparación de los resultados de viscosidad real con viscosidad aparente para las melazas analizadas, se observa que presentan errores relativos porcentuales que van desde 6,09% a 51,02%. Estos valores dependen de las características de la muestra y de su concentración. Estos errores relativos observados en Gil Zapata (1997) oscilan entre 11% a 49%.

## CONCLUSIONES

Los resultados del presente trabajo permiten concluir que en las melazas analizadas el índice de comportamiento de flujo que tiene a 0,70 arroja un error entre viscosidad real y aparente superior al 50%. Para índice de comportamiento de flujo superior a 0,80 fluctúa entre 6% y 15%. Asimismo la metodología aplicada para el

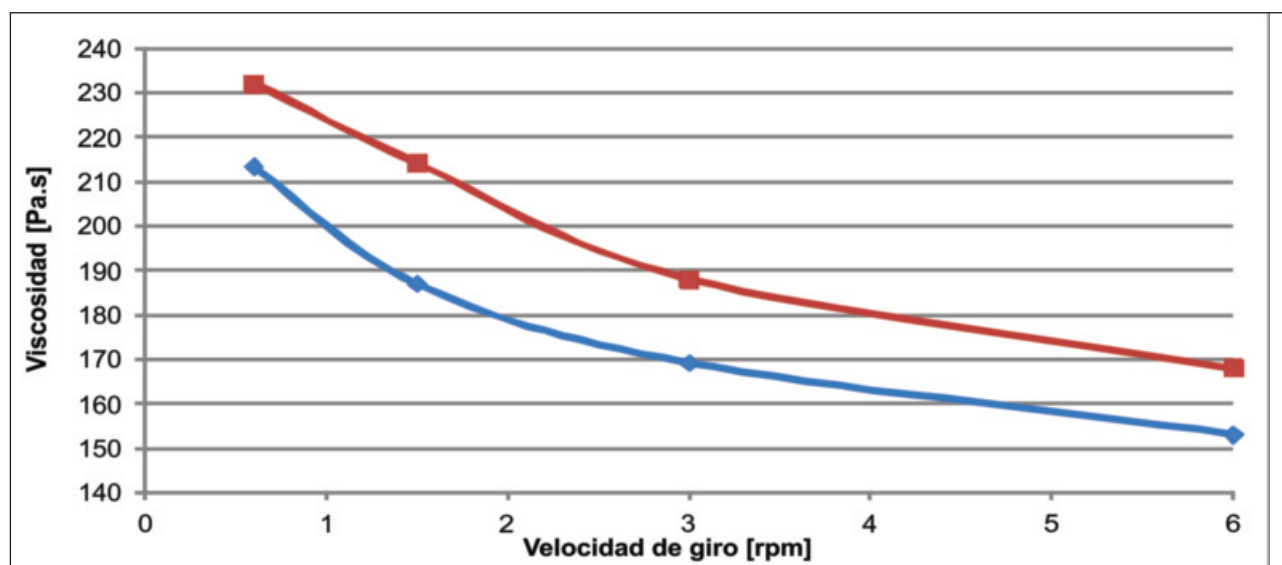


Figura 6. Curva de viscosidad aparente y viscosidad real en función de la velocidad de giro de Melaza 5 a 88,86°BX a 50°C. Curva roja: viscosidad aparente; Curva azul: viscosidad real.

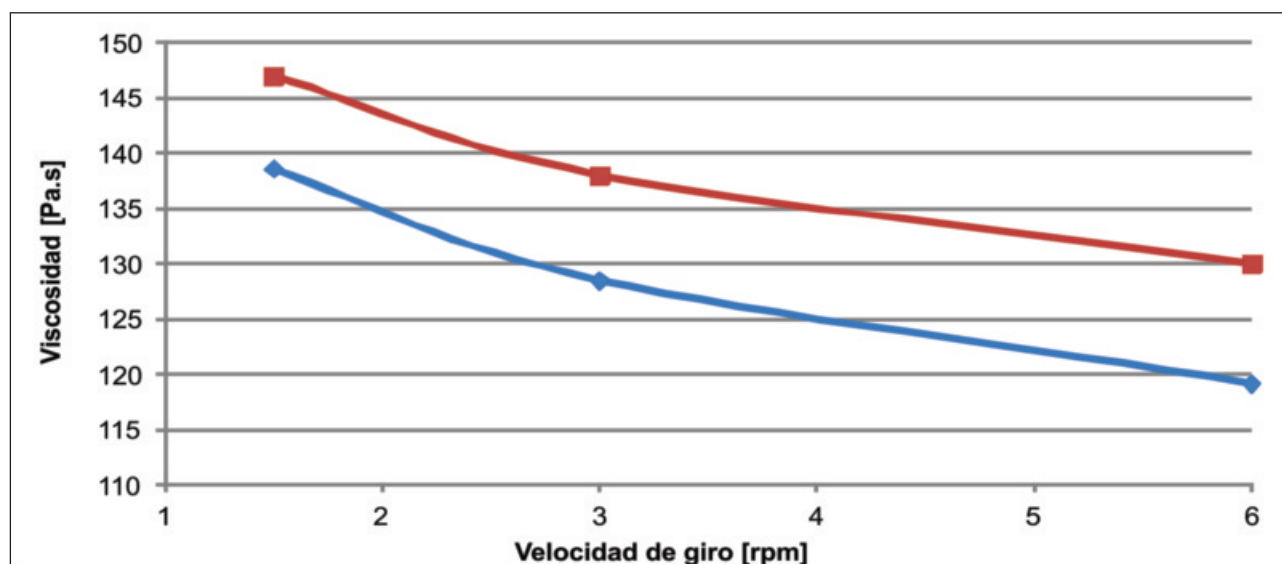


Figura 7. Curva de viscosidad aparente y viscosidad real en función de la velocidad de giro de Melaza 6 a 88,12°BX a 50°C. Curva roja: viscosidad aparente; Curva azul: viscosidad real.

cálculo de viscosidad real resulta adecuada y útil para las muestras de melaza provenientes de ingenios de Tucumán, corroborando que este fluido presenta un comportamiento no newtoniano. Estos datos permitirán en el futuro poder estimar en forma confiable la viscosidad real de una melaza en diferentes condiciones, para así tener mayor confiabilidad en los cálculos y el dimensionado de bomba y agitadores.

#### BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Bourne M. 1982.** Food texture and Viscosity. Concept and Measurement. 2º Edition. Academic Press New York London.
- Diez, O. A.; C. Cruz y G. J. Cárdenas. 2011.** Optimización energética para la producción simultánea de azúcar y alcohol en Tucumán, R. Argentina. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 88 (2): 27-40.



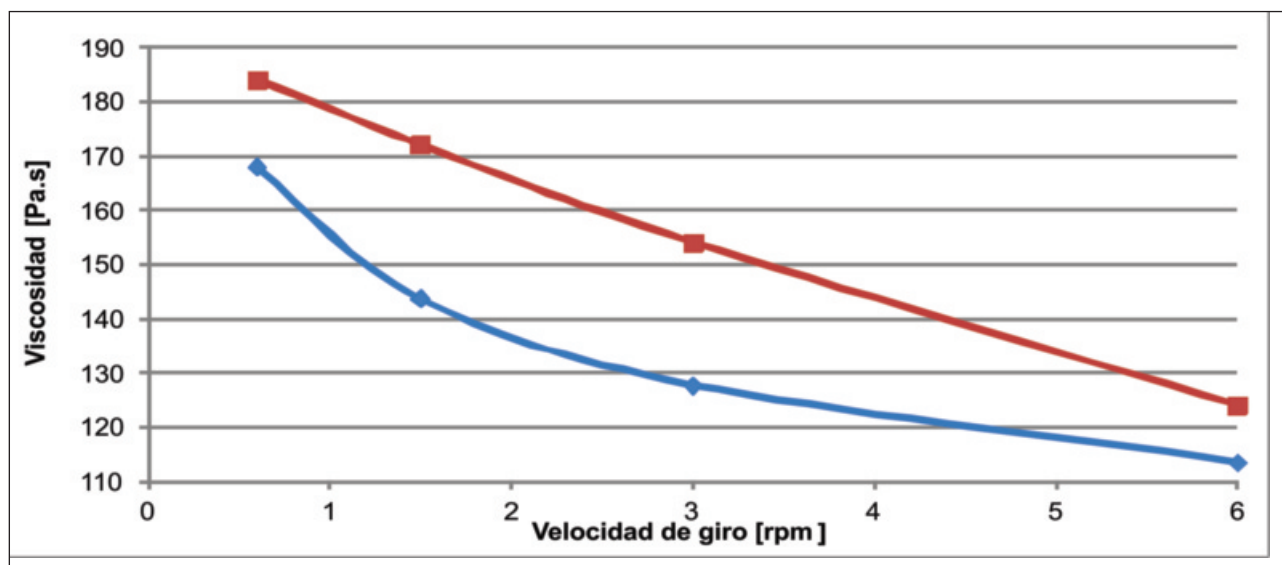


Figura 8. Curva de viscosidad aparente y viscosidad real en función de la velocidad de giro de Melaza 7 a 87,70°BX a 50°C. Curva roja: viscosidad aparente; Curva azul: viscosidad real.

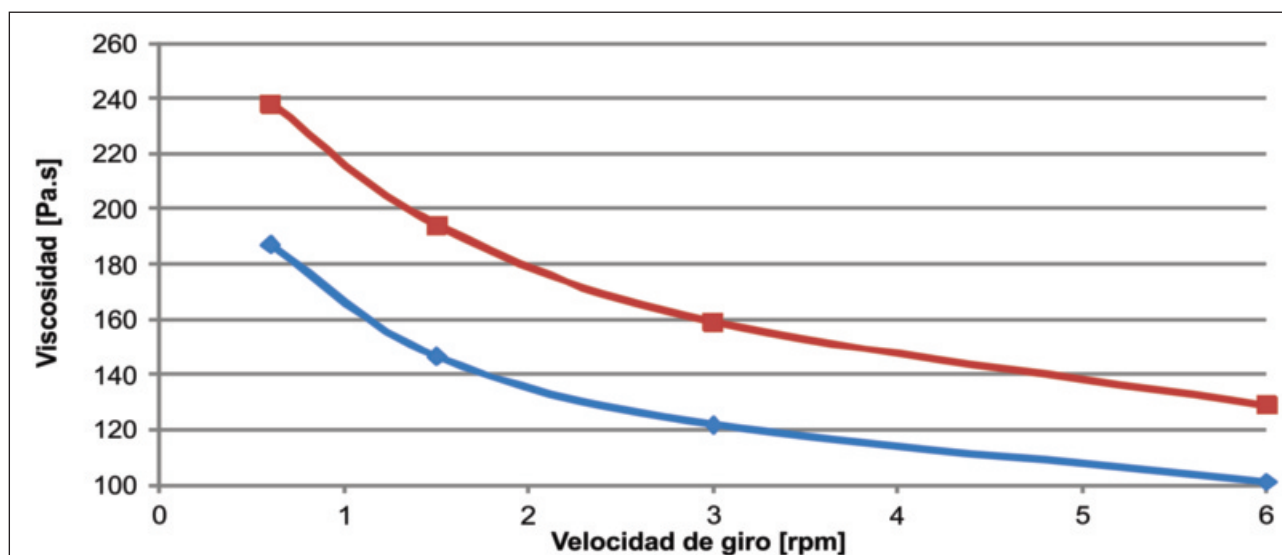


Figura 9. Curva de viscosidad aparente y viscosidad real en función de la velocidad de giro de Melaza 8 a 88,29°BX a 50°C. Curva roja: viscosidad aparente; Curva azul: viscosidad real.

**Gil Zapata, N. J. 1997.** Determinación de viscosidad en mieles finales. Consideradas como un fluido no newtoniano. IV Congreso Colombiano de la Asociación de Técnicos de la Caña de Azúcar. Cenicaña. Tecnicaña. Cali-Colombia, pp. 295-303.

**Perry, R. H. 2001.** Manual del Ingeniero Químico. 7°

edición, vol.1, cap.6. Editorial Mc Graw-Hill.

**Tolosa, D.; G. Juárez; N. Kamiya; M. Ruiz y G. J. Cárdenas. 2005.** Caracterización de melazas – contenidos de sodio, potasio, calcio y magnesio. III Congreso Argentino de Química Analítica, Merlo, San Luis.