

## **CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE VINAZAS DE CAÑA DE AZÚCAR COMO POSIBLE BIOCOMBUSTIBLE PARA CALDERAS DE VAPOR BAGACERAS**

**G. del H. Zamora Rueda, M.G. Mistretta, F. L. Peralta, C. E. Gutiérrez, M. A. Golato, D. Paz y  
G.J. Cárdenas.**

Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI). Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). C.P. 4101- Las Talitas- Tucumán. [www.eeaoc.org.ar](http://www.eeaoc.org.ar) - Tel. 0381-4521000 e-mail: [gzamora@eeaoc.org.ar](mailto:gzamora@eeaoc.org.ar); [mediciones@eeaoc.org.ar](mailto:mediciones@eeaoc.org.ar)

*Recibido 08/08/16, aceptado 05/10/16*

**RESUMEN:** La vinaza es un líquido derivado de la destilación del vino resultante de la fermentación de jugos o mieles de caña de azúcar; posee un pH ácido con alto contenido de materia orgánica que si no se trata adecuadamente puede ser contaminante.

El objetivo de este trabajo es mostrar nuevos resultados de las características energéticas de vinazas de nuestra región para diferentes grados de concentración: 30, 40, 50 y 60 °Brix, con el objetivo de aprovechar este efluente como posible biocombustible para calderas de vapor de la industria azucarera. Los resultados promedio obtenidos fueron: 36,80 % de cenizas (b.s.); 1,02 a 1,26 g/cm<sup>3</sup> de densidad; 0,91 a 224,84 cp de viscosidad; punto de fusión de 850 a 900°C y poder calorífico superior (PCS) entre 1.008 a 3.356 kcal/kg. Este estudio sirve de base para el diseño de nuevos sistemas de transporte y de combustión de este posible fluido combustible.

**Palabras clave:** bioenergía, caña de azúcar, combustión, efluente

### **INTRODUCCIÓN**

El crecimiento en la producción de bioetanol proveniente de melazas de caña de azúcar durante los últimos años, fomentado por la Ley 26.093, y el aumento del corte del bioetanol en los combustibles líquidos de dos puntos, otorgado a comienzo de 2016, ha despertado el interés de los industriales azucareros por ofrecer una alternativa segura de disposición del efluente derivado del proceso de destilación de alcohol (vinaza), para que este biocombustible se convierta en un nuevo generador de la actividad sucroalcoholera de Tucumán.

En este sentido la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) viene trabajando hace algunos años en una serie de estudios destinados a evaluar sus características y aprovechamiento de la vinaza.

Estudios anteriores muestran la influencia de la concentración y de la temperatura en la viscosidad de vinazas provenientes de melazas de caña de azúcar (Cárdenas et al., 1985). Se analizaron, además, las composiciones y distribuciones de las incrustaciones provocadas al evaporar vinaza en equipos de concentración (Cárdenas et al., 1986), como así también la variación del calor específico de las vinazas a partir de la concentración de estas (Yocca et al., 1986). Asimismo, en el marco del Proyecto PFIP ESPRO 2009 del Consejo Federal de Ciencia y Tecnología (Cofecyt), se realizaron ensayos de quema de vinaza con mezclas de bagazo presecado y residuo agrícola de cosecha de caña (RAC) en calderas convencionales de la industria azucarera (Franck Colombres et al., en prensa).

Por otro lado, debido al convenio entre las industrias sucro-alcoholeras tucumanas y los gobiernos de Tucumán y Santiago del Estero, que establece vinaza cero en los cursos de los ríos desde enero de 2012, se continúa trabajando en las diferentes alternativas para obtener la mejor disposición de este

efluente. Actualmente, la técnica de aprovechamiento más difundida es el uso agrícola por medio de la aplicación de vinaza cruda en suelos cañeros de la provincia (Fadda y Morandini, 2008; Morandini et al., 2016), la elaboración de compost y, en menor medida, la producción de biogás (Marquetti et al., en prensa; Morandini y Quaia, 2013).

El conocimiento de parámetros físico-químicos y energéticos de un biocombustible permite evaluar su posible utilización y diseñar o rediseñar equipos y cañerías de transporte del mismo.

El contenido de ceniza (CZ) de la vinaza permite conocer la cantidad de residuos inorgánicos que dejará su combustión.

El poder calorífico superior (PCS) brindará información de la cantidad de calor liberado en la combustión completa de 1 kg de vinaza (en base seca), considerando el calor de condensación del vapor de agua proveniente de la humedad de la biomasa y del agua formada por la combustión del hidrógeno (Hugot, 1964).

El análisis de fusibilidad de cenizas es una medida del potencial que tienen los materiales combustibles de formar escorias, las cuales finalmente generan obturaciones e incrustaciones indeseables sobre las superficies interiores del hogar de un generador de vapor. Asimismo, la densidad y la viscosidad permiten conocer la fluidez con que se puede transportar el biocombustible por cañerías y la facilidad de atomización de este en el interior del hogar de las calderas.

El objetivo de este trabajo es mostrar los resultados de los análisis físico-químicos y energéticos realizados en vinazas provenientes de melazas de caña de azúcar para las actuales variedades de caña sembradas en Tucumán, para ser aprovechado este efluente como bioabono o posible biocombustible de calderas de vapor.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con ocho muestras de vinazas producidas a partir de la fermentación alcohólica de melazas de caña de azúcar de la variedad LCP 85-384, provenientes de diferentes ingenios azucareros de Tucumán, durante las zafas 2013 y 2014. Las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI) de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC).

Se midió la concentración de sólidos ( $^{\circ}\text{Bx}$ ) de las muestras de vinazas por medio de un brixómetro marca Brixstix. Luego se procedió a concentrar las muestras de vinazas en un equipo concentrador, hasta alcanzar diferentes grados de concentración ( $30^{\circ}\text{Bx}$ ,  $40^{\circ}\text{Bx}$ ,  $50^{\circ}\text{Bx}$  y  $60^{\circ}\text{Bx}$ ).

Para la determinación del contenido de cenizas (CZ%) se procedió a la calcinación de las muestras en intervalos de dos horas hasta peso constante a  $550^{\circ}\text{C}$ , en un horno mufla marca ORL, según ASTM D 5142-02 (ASTM, 2002) modificada.

Para la determinación de densidad se utilizó un densímetro volumétrico con escala 1-1,5, para un rango de temperatura de  $30$  a  $80^{\circ}\text{C}$ , siguiendo la metodología propuesta en IRAM- IAPG A 6616 (IRAM, 1998). La densidad absoluta ( $\rho$ ) se determinó a partir de tablas para la densidad del agua (Perry, 1984) expresada en unidades de  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

Para la determinación de la viscosidad ( $\mu$ ) se utilizó un viscosímetro rotacional marca Brookfield, modelo LVDV-II+, para un rango de temperaturas entre  $30^{\circ}$  y  $80^{\circ}\text{C}$ , siguiendo la metodología ASTM D 1436-03 (ASTM, 2005), expresada en unidades de cp.

El PCS se determinó en una bomba calorimétrica automatizada marca IKA, modelo C5000, en operación adiabática. Como soporte para la ignición de las muestras de vinaza diluidas se utilizó ácido benzoico, siguiendo la metodología ASTM D 2015-96 (ASTM, 1996), expresada en unidades de kcal/kg.

El análisis de fusibilidad de cenizas se realizó en atmósfera reductora ( $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$ ) con un equipo analizador de fusibilidad de cenizas, marca LECO, modelo AF700, siguiendo la metodología ASTM D 1857-03 (ASTM, 2003), que identifica cuatro temperaturas características: inicial de deformación (DT), ablandamiento (ST), semiesfera (HT) y fluidización (FT).

Para el análisis de datos estadísticos se utilizó el software estadístico Infostat (Infostat, 2008), los parámetros analizados serán: n (número de muestras), Media (promedio del lote de muestras), Rango (mínimo, máximo), coeficiente de desviación estándar porcentual (CV) y desviación estándar (DE).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra los resultados del contenido de cenizas en base seca (b.s.) de vinazas provenientes de melazas de caña de azúcar de Tucumán, analizadas para diferentes grados de concentración propuestos. El valor promedio de las muestras analizadas fue 36,80%, con un rango de 32,61 a 40,66%, un CV% de 9,11 y una D.E. de 3,35%. La variabilidad observada podría deberse al análisis de las diferentes vinazas ensayadas que provienen de distintas materias primas.

| Muestra | n | Media CZ [%] (b.s.) | Rango       | CV [%] | DE [%] |
|---------|---|---------------------|-------------|--------|--------|
| Vinaza  | 8 | 36,80               | 32,61-40,66 | 9,11   | 3,35   |

Tabla 1: Contenido de CZ% en b.s. para vinazas de Tucumán

La Tabla 2 muestra la variación de la densidad absoluta promedio ( $\rho$ ) en función de la concentración de sólidos disueltos, observados en un rango de temperaturas entre 30° y 80°C, con sus respectivos parámetros estadísticos. Se puede observar que para las vinazas estudiadas a 10, 30, 40, 50 y 60°Bx arrojaron valores medios de densidad en  $\text{g/cm}^3$  de 1,02; 1,13; 1,20; 1,19 y 1,26 respectivamente, a su vez, los resultados de CV% fueron de 1,40; 1,67; 1,51; 2,35 y 1,92 para las concentraciones mencionadas anteriormente y los valores de DE en  $\text{g/cm}^3$  en el lote de muestras se encontraron en un rango entre 0,01 y 0,03. Estos resultados se encuentran en igual orden de magnitud que Cárdenas et al., (1985).

| Muestra | n | °Bx | Media $\rho$ [ $\text{g/cm}^3$ ] | Rango     | CV [%] | DE [ $\text{g/cm}^3$ ] |
|---------|---|-----|----------------------------------|-----------|--------|------------------------|
| Vinaza  | 8 | 10  | 1,02                             | 1,01-1,40 | 1,40   | 0,01                   |
|         |   | 30  | 1,13                             | 1,10-1,15 | 1,67   | 0,02                   |
|         |   | 40  | 1,20                             | 1,18-1,23 | 1,51   | 0,02                   |
|         |   | 50  | 1,19                             | 1,15-1,23 | 2,35   | 0,03                   |
|         |   | 60  | 1,26                             | 1,23-1,29 | 1,92   | 0,02                   |

Tabla 2: Resultados de la variación de la densidad de vinazas de Tucumán, en función del grado de concentración y temperatura.

La Figura 1 presenta la variación de la densidad absoluta en función de la temperatura para diferentes concentraciones. Se observa curvas decrecientes en función de la temperatura, pero a medida que aumenta la concentración incrementa la densidad, es decir, que para 10°Bx alcanza una densidad promedio de 1,02  $\text{g/cm}^3$  y a 60°Bx el valor de densidad promedio fue de 1,26  $\text{g/cm}^3$ .

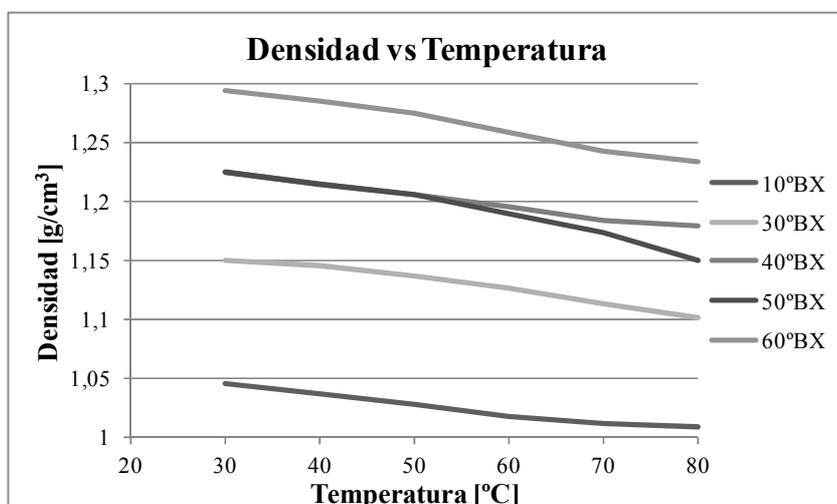


Figura 1. Variación de la densidad de vinazas de Tucumán, en función del grado de concentración y temperatura.

La Tabla 3 y Figura 2 muestran las variaciones promedios de la viscosidad de la vinaza para diferentes grados de concentración, observados en un rango de temperaturas entre 30° y 80°C. En la Figura 2 se puede observar que a hasta los 40°Bx, no hay variación significativa de la viscosidad en función de la concentración. A partir de este punto, la viscosidad aumenta considerablemente alcanzado valores de 224,84 cp a 60°Bx. A su vez, la Tabla 3 muestra los valores de viscosidad promedios determinados en este estudio a diferentes concentraciones 10, 30, 40, 50, 60°Bx, los cuales arrojan valores medios expresados en cp de 0,91; 2,10; 14,31; 164,25; 224,84 respectivamente. Los resultados de CV % fueron 13,57; 22,27; 28,92; 31,85 y 31,56 para las concentraciones, y por último, los valores de DE expresados en cp en el lote de muestras se encontraron en un rango entre 0,12 a 70,96, la variabilidad observada en estos parámetros podría deberse al análisis de diferentes vinazas. Estos resultados presentan características similares a los informados por Cárdenas et al., (1985).

| Muestra | n | °Bx | Media $\mu$ [cp] | Rango         | CV[%] | DE [cp] |
|---------|---|-----|------------------|---------------|-------|---------|
| Vinaza  | 8 | 10  | 0,91             | 0,80-1,12     | 13,57 | 0,12    |
|         |   | 30  | 2,10             | 1,58-2,91     | 22,77 | 0,48    |
|         |   | 40  | 14,31            | 9,53-21,40    | 28,92 | 4,14    |
|         |   | 50  | 164,25           | 112,50-256,30 | 31,85 | 52,32   |
|         |   | 60  | 224,84           | 135,98-315,24 | 31,56 | 70,96   |

Tabla 3. Resultados de la variación de la viscosidad de vinazas de Tucumán, en función del grado de concentración y temperatura.

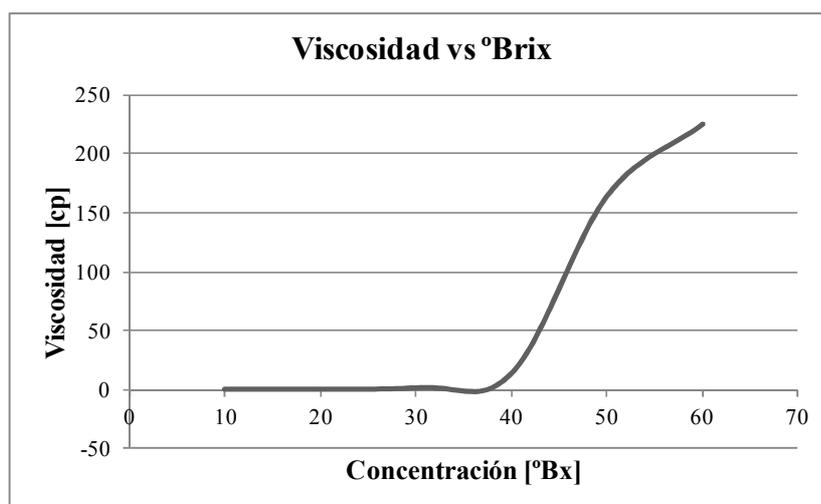


Figura 2. Variación de la viscosidad de vinazas de Tucumán, en función del grado de concentración y temperatura.

La Figura 3 muestra los resultados del PCS en función de la concentración de las vinazas analizadas. Los resultados muestran que el PCS aumenta aproximadamente a razón de 33,5 (kcal/kg/°Bx). El rango de valores de PCS obtenidos fue de 1.008 a 3.356 kcal/kg para vinazas concentradas entre 30°Bx y 100°Bx (vinaza seca); se encuentran en igual orden de magnitud que Zamora et al., (2012).

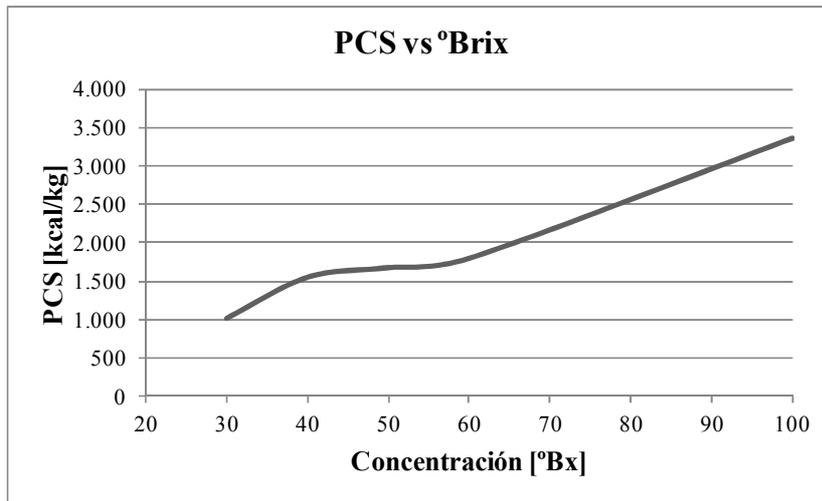


Figura 3. Variación del PCS en función de la concentración de la vinaza de Tucumán.

La Tabla 4 muestra los resultados promedio del análisis de fusibilidad de cenizas de la vinaza seca (100°Bx) proveniente de ingenios sucroalcoholeros de Tucumán, realizados en atmósfera reductora. Se puede observar que la ceniza de la vinaza comienza a deformarse a una temperatura de 957°C, alcanzando la etapa de fluidización de la misma a una temperatura de 1.407°C. La temperatura inicial de deformación (DT) se encuentra en igual orden de magnitud que la informada por Zamora et al. (2012).

| Muestra              | Temperaturas características de fusión |         |         |         |
|----------------------|--|---------|---------|---------|
|                      | DT [°C]                                | ST [°C] | HT [°C] | FT [°C] |
| Vinaza Seca (100°Bx) | 957                                    | 1.105   | 1.327   | 1.407   |

Tabla 4: Resultado del análisis de fusibilidad de cenizas en muestra de vinaza seca provenientes de ingenios de Tucumán.

## CONCLUSIONES

Se observa un marcado efecto de la concentración de la vinaza en los parámetros físico-químicos y energéticos de esta. Los resultados obtenidos para vinazas provenientes de melazas de caña de azúcar de la variedad LCP 85-384 se encuentran en el mismo orden de magnitud respecto de los datos encontrados en bibliografía. El contenido de ceniza promedio fue de 36,80%; el rango de valores de densidad obtenidos fue de 1,02 g/cm<sup>3</sup> a 1,26 g/cm<sup>3</sup>, para vinazas concentradas desde 10°Bx hasta 60°Brix, con un aumento de la densidad en función de la concentración y una disminución de la densidad en función de la temperatura.

Los valores de viscosidad determinados se encuentran en un rango de 0,91 cp a 224,84 cp para vinazas concentradas de 10°Bx hasta 60°Brix. Se observó, además, que a partir de 40°Bx la viscosidad aumenta considerablemente hasta los 60°Bx, a una razón aproximada de 11,5 (cp/°Bx).

Se determinó que el PCS de la vinaza concentrada aumenta aproximadamente a razón de 33,5 (kcal/kg/°Bx). El rango de valores obtenidos fue de 1.008 a 3.356 kcal/kg para vinazas concentradas entre 30°Bx y 100°Bx (vinaza seca).

Del análisis de fusibilidad se observó que el comienzo de la deformación de las cenizas de vinaza se produce para una temperatura de 957°C y alcanza la etapa de fluidización a una temperatura de 1.407°C.

Los resultados muestran como favorable el empleo y manejo de vinazas concentradas como posible biocombustible líquido para ser aprovechado de manera adicional en calderas de vapor bagaceras. No obstante, en estudios posteriores se deberá tener en cuenta el efecto de los productos finales de la combustión en el interior del hogar de un generador de vapor y la influencia energética del este.

## NOMENCLATURA

ASTM: American Society for Testing and Materials  
IRAM: Instituto Argentino de Normalización y Certificación  
CZ: Contenido de cenizas  
 $\rho$ : densidad absoluta  
 $\mu$ : viscosidad  
PCS: poder calorífico superior  
DT: temperatura inicial de deformación  
ST: temperatura de ablandamiento  
HT: temperatura de hemiesfera  
FT: temperatura de fluidización

## REFERENCIAS

- ASTM D 5142-02. 2002.** Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM D 2015-96 . 1996.** Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM D 1857-03. 2003.** Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM D 1436-03. 2005.** Standard Test Method for Testing of Brookfield Viscosity. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- Cárdenas, G. J; E. Yocca y R. M. Ruiz. 1985.** Influencia de las variaciones de concentración y temperatura en la viscosidad de vinazas de melazas de caña de azúcar. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 62 (2): 21-37
- Cárdenas, G. J; E. Yocca y A. A. Delfini. 1986.** Composición y distribución de las incrustaciones producidas al evaporar vinazas de melazas de caña de azúcar. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 63 (2): 45-59.
- Fadda, G. y M. Morandini. 2008.** El uso agrícola de la vinaza. Revisión de antecedentes y caracterización de las condiciones del área cañera tucumana para su aplicación. Publicación Especial 26. EEAOC
- Franck Colombres, F.; M. A. Golato; E. A. Feijóo; W. D. Morales; D. Paz y M. Octaviano.** Combustión de vinaza con materiales celulósicos en calderas bagaceras. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán (en prensa).
- Hugot, E. 1964.** Manual para ingenieros azucareros. 2ª impresión en español: Editorial Continental SA, DF México.
- Infostat** Programa estadístico versión 2008
- IRAM-IAPG A 6616. 1998.** Determinación de densidad, de densidad relativa y de densidad API. Método con densímetro.
- Marquetti, F.; C. F. Molina; W. D. Machado; C. Gusils y E. A. Quaia.** Caracterización de diferentes lodos inoculantes para un reactor anaeróbico de vinaza. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán (en prensa).
- Morandini, M. y E. Quaia. 2013.** Alternativas para el aprovechamiento de la vinaza como subproducto de la actividad sucroalcoholera. Dossier EEAOC. Revista Avance Agroindustrial 34 (2).
- Morandini, M.; C. Sotomayor; S. Sotillo; H. Rojas Quinteros y A. Sanzano. 2016.** Efecto de la aplicación de vinaza cruda en suelos cañeros de la provincia de Tucumán. XX Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar (SATCA).
- Perry, R. 1984.** Manual del Ingeniero Químico. 6º Edición. Editorial Mc Graw Hill. Tomo (1), pp. 3-75.

**Yocca, E.; L. E. Aralde y G. J. Cárdenas. 1986.** Variación del calor específico de vinazas de melazas de caña con la concentración. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 63 (1): 63-78.

**Zamora Rueda, G. del H.; H. C. Zalazar; M. A. Golato y D. Paz. 2012.** Caracterización energética de la vinaza en ingenios azucareros de Tucumán. V Jornadas de Jóvenes Investigadores de la UNT. Camino al Centenario.

## **ABSTRACT**

The vinasse is a liquid derived from the distillation of wine resulting from the fermentation of juice or sugar cane molasses. It has an acid pH, with high in organic matter, which if it is not well treated it could be contaminant.

The aim of this paper is to show new results of the energy characteristics of vinasse in our region, for different degrees of concentration: 30, 40, 50, and 60°Brix, with the object of making this effluent as possible biofuel for steam boilers of the sugar industry. The average results were: 36.80% ash (d.b.); 1.02 to 1.26 g/cm<sup>3</sup> density; viscosity 0.932 to 224.84 cp; melting point 850 to 900°C and higher calorific value (PCS) between 1008 to 3356 kcal/kg. This study results can be used as a base for the design of new transport systems and combustion for this possible combustible fluid.

**Keywords:** bioenergetics, sugar cane, combustion, fluid