



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 101 (2):
29-34; 2024



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBES
Tucumán | Argentina

Av. William Cross 3150
T4101XAC - Las Talitas.
Tucumán, Argentina.

¹ Resultados
parciales del
trabajo de tesis de
maestría del Ing.
Marcos A. Golato.

Fecha de
recepción:
04/12/2023

Fecha de
aceptación:
02/07/2025

Variación de las temperaturas de fusión de cenizas de bagazo y residuos de cosecha de la caña de azúcar de Tucumán, Argentina en función de sus componentes mayoritarios¹

Marcos Golato*, Cynthia E. Gutiérrez*, G. del H. Zamora Rueda*, Norma Kamiya**, Dora Paz* y Marcelo Ruiz*.

* Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. ** Sección Química de los Productos Agroindustriales.
Email: mgolato@eeaoc.org.ar

RESUMEN

El proceso de formación de los residuos inorgánicos depende principalmente del tipo de combustible, la composición química, la temperatura del hogar de la caldera, el tipo de atmósfera, el tamaño y forma de las partículas, etc. Las propiedades físicas resultantes de las cenizas establecen si las mismas se adherirán a las superficies de transferencia de calor o serán arrastradas por el interior de la caldera hasta su descarga por la chimenea. Además, la aerodinámica del horno puede desempeñar un papel en el proceso de deposición de estos residuos, independientemente del tipo de calentamiento que se esté produciendo. En estudios previos se procesaron 30 muestras de bagazo provenientes de ingenios azucareros y 30 muestras de RAC recolectadas de campos cañeros de la provincia de Tucumán, Argentina, para la variedad de caña LCP 85-384, durante las zafas azucareras de 2016 a 2019, en ellos se determinaron los componentes mayoritarios encontrados en las cenizas de estas biomásas (Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 y SO_3). En el presente estudio se analizó la fusibilidad de estas cenizas, según ASTM D1865, en función de los elementos mayoritarios encontrados. Además, se determinaron los componentes ácidos (CA) y básicos (CB) en cenizas, y se obtuvieron correlaciones para la temperatura de fusión inicial (DT) para diferentes concentraciones de los elementos químicos presentes en ellas. En cenizas de bagazo se obtuvo en promedio 86,7% de CA y 13,3% de CB, alcanzando una DT mínima de 979°C. Para el caso del RAC, la DT mínima fue de 962°C para una proporción promedio de 67,8% de CA y 32,2% de CB. Se obtuvieron curvas de correlación para la fusibilidad de ceniza de bagazo y RAC de caña de azúcar, que podrían ser útiles para mejorar la regulación y control de los generadores de vapor de la industria azucarera, considerando la calidad de las cenizas del combustible utilizado.

Palabras clave: biomasa residual, bioenergía, combustibles para calderas.

ABSTRACT

Variation of melting temperatures of sugarcane bagasse and agricultural harvest residue ashes from tucumán, argentina, based on their major components

The formation process of inorganic residues mainly depends on the type of fuel, chemical composition, boiler furnace temperature, type of atmosphere, composition, size, and shape of the particles, etc. The resulting physical properties of the ashes determine whether they will adhere to heat transfer surfaces or be carried through the interior of the boiler until they are discharged through the chimney. Additionally, the furnace's

aerodynamics can play a role in the deposition process of these residues, regardless of the type of heating taking place. This paper provides information on the fusibility characteristics of bagasse ashes and sugarcane harvest residues (SCR) based on their elemental chemical composition for efficient management in steam boilers. In previous studies, 30 bagasse samples from sugar mills and 30 SCR samples collected from sugarcane fields in the province of Tucumán, Argentina, were processed during the 2016 to 2019 sugar harvests. All analyzed samples belonged to the LCP 85-384 cane varieties. Ash fusibility studies were conducted according to ASTM D1865, based on the major elemental components found in them (Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , and SO_3). Additionally, acidic (AC) and basic (BC) components in the ashes were determined, and correlations were obtained for the initial fusion temperature (DT) for different concentrations of the chemical elements in them. Bagasse ash gave an average of 86.7% CA and 13.3% CB, reaching a minimum DT of 979°C. For RAC, the minimum DT was 962°C, with an average ratio of 67.8% CA and 32.2% CB. Correlation curves were obtained for the ash fusibility of bagasse and sugarcane RAC, which could help improve regulation and control of steam generators in the sugar industry, by considering the quality of ash from the fuel used.

Key words: residual biomass, bioenergy, boiler fuels.

INTRODUCCIÓN

Las impurezas que acompañan a los combustibles son responsables del mantenimiento adicional, la reducción de la tasa de transferencia de calor y la corrosión en los generadores de vapor (Bryers, 1996). La naturaleza y la gravedad de la formación de depósitos por ensuciamiento y escoriación de cenizas fueron modificándose a medida que cambiaban los combustibles y sus impurezas. Además, el proceso de generación de vapor experimentó cambios a lo largo del tiempo, resultando calderas de vapor de mayor tamaño y eficiencia, por lo que fue necesario utilizar materiales más resistentes y aplicar mejores controles en los servicios de suministro de agua y combustible, con el objetivo de preservar la integridad de los equipos y prolongar su vida útil.

La norma ASTM D-1857 es un método de evaluación predictivo tradicional y constituye la base de las técnicas tradicionales de predicción del comportamiento de las cenizas (ASTM, 2010). No obstante, es necesario realizar experiencias prácticas adicionales para establecer la relación exacta de las pruebas de fusibilidad con la composición química real del combustible que se quema en el hogar de una caldera de vapor.

El proceso de formación de los residuos inorgánicos depende principalmente del tipo de combustible, la temperatura de la partícula, su composición, tamaño y forma, el tipo de atmósfera, etc. (Chong *et al.*, 2019). Las propiedades físicas resultantes de las cenizas establecen, en general, si se adherirán a las superficies de transferencia de calor. Además, la aerodinámica del horno puede desempeñar un papel en el proceso de deposición de estos residuos, independientemente del tipo de calentamiento que se esté produciendo (Niu *et al.*, 2016). Vamvuka y Zografos (2004) indicaron que para temperaturas de combustión elevadas aumenta la vaporización de algunas especies minerales incluidas en las cenizas, de modo que a 900°C estas se vuelven ricas en la mayoría de los óxidos, mientras se tornan más pobres en algunos compuestos, por ejemplo, el K_2O , ya que este compuesto y sus derivados son relativamente más volátiles. Además, observaron

que parte del azufre (S) se convierte en fase vapor y se libera hasta los 780°C.

Propiedades ácidas y básicas de las cenizas

Las características ácidas o básicas de las cenizas están relacionadas con su reactividad y su capacidad para formar compuestos ácidos (CA) o básicos (CB), lo cual depende de la forma en que se encuentran, de la presencia y la cantidad de otros componentes químicos y de la atmósfera que las rodea. Algunos metales, como el aluminio (Al) y el hierro (Fe), pueden formar compuestos ácidos cuando se oxidan en presencia de agua o ácido sulfúrico (Abbassi *et al.*, 2009). Otros metales, como el calcio (Ca), el magnesio (Mg), el sodio (Na) y el potasio (K), son comúnmente encontrados en forma de óxidos o hidróxidos en las cenizas y pueden tener propiedades básicas (Melissari, 2014). El silicio (Si) puede formar compuestos ácidos en ciertas condiciones, esto no significa que las cenizas que contienen Si sean necesariamente ácidas. La acidez o la basicidad de las cenizas dependen de la composición química total de las mismas, así como de las condiciones ambientales en las que se encuentran (Kleinhans *et al.*, 2018). En los sistemas a base de carbón, el Fe juega un papel importante en las propiedades de los depósitos de cenizas, ya que actúa como un eficaz fundente para los materiales formados por silicatos. En particular, el estado de oxidación del Fe en estos materiales es sensible a las condiciones de la atmósfera que los rodea, prevaleciendo el óxido férrico (Fe_2O_3) en condiciones oxidantes y formándose cantidades crecientes de óxido ferroso (FeO) en condiciones reductoras. El FeO incorporado a los silicatos conduce a puntos de fusión más bajos que el Fe_2O_3 . Las formas típicas del Fe en la estructura química de un combustible incluyen sulfuros como la pirita (FeS_2), sulfatos, óxidos, silicatos y carbonatos (Chambon *et al.*, 2018; Miles *et al.*, 1995).

Composición mayoritaria de las cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar

Golato *et al.* (2024) determinaron los elementos mayoritarios en cenizas de bagazo y RAC de caña de

azúcar de Tucumán, Argentina. La Figura 1 muestra estos resultados. Puede verse que la mayor proporción de componentes está dada por la sílice (SiO_2), seguida por Al_2O_3 y K_2O para el bagazo, y por CaO y K_2O para el residuo agrícola de cosecha (RAC).

Asimismo, estudios previos determinaron correlaciones entre los componentes mayoritarios encontrados en cenizas de bagazo y de RAC de la caña de azúcar de Tucumán, Argentina, y las temperaturas de fusión de las cenizas correspondientes (Golato, 2021; Golato *et al.*, 2021). La Tabla 1 muestra un resumen de estas correlaciones propuestas para diferentes concentraciones de componentes básicos (%CB) en cenizas fortificadas de bagazo y RAC de caña de azúcar en función de la atmósfera circundante, que puede ser oxidante (AO) o reductora (AR).

El objetivo del presente estudio fue evaluar la in-

fluencia de los componentes mayoritarios (CA y CB) encontrados en cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina, sobre la fusibilidad de aquellas. Este trabajo podría proporcionarles a los operadores de salas de calderas una herramienta para mejorar el control y la regulación del generador de vapor, permitiéndoles tomar decisiones más eficientes en sus tareas diarias.

MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de análisis realizados en estudios anteriores (Golato, 2021; Golato *et al.*, 2021), durante las zafas azucareras comprendidas entre 2016 y 2019 se procesaron 30 muestras de bagazo provenientes de ingenios azucareros y 30 muestras de RAC recolectadas de campos cañeros de la provincia de Tucumán, Argentina. Todas las

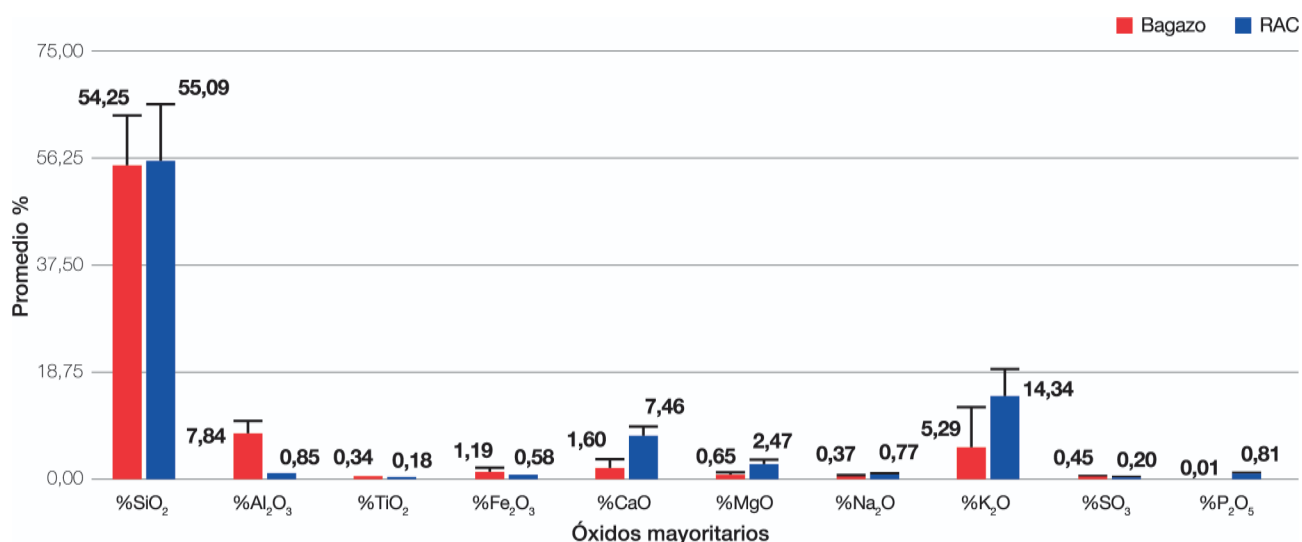


Figura 1. Composición química promedio de cenizas de bagazo y RAC de Tucumán, Argentina, según Golato *et al.* (2024).

Tabla 1. Correlaciones de fusibilidad de cenizas de bagazo y RAC en función de %CB y tipo de atmósfera circundante, adaptado de Golato (2021).

Tipo de biomasa	Tipo de atmósfera	Temperatura s/ ASTM D1857	Correlación con %CB	R ²
Bagazo	AO	FT°C	$= -13,953.(\%CB)^2 + 1492,6.\%CB + 1354,5$	0,2619
		HT°C	$= 13,035.(\%CB)^2 - 26,69.\%CB + 1386,5$	0,0673
		ST°C	$= 33,333.(\%CB)^2 - 81,1857.\%CB + 1354,5$	0,3357
		DT°C	$= 217,1.(\%CB)^2 - 222,57.\%CB + 1092,9$	0,2666
	AR	FT°C	$= -108,53.(\%CB)^2 + 148,7.\%CB + 1408,7$	0,2749
		HT°C	$= -149,52.(\%CB)^2 + 242,57.\%CB + 1303,9$	0,7312
		ST°C	$= -124,82.(\%CB)^2 + 213,5.\%CB + 1261,5$	0,4999
		DT°C	$= 277,39.(\%CB)^2 - 300,44.\%CB + 1011,7$	0,4007
RAC	AO	FT°C	$= -25,064.(\%CB)^2 + 12,267.\%CB + 1484,5$	0,2874
		HT°C	$= -59,98.(\%CB)^2 + 45,602.\%CB + 1348,9$	0,1473
		ST°C	$= 147,24.(\%CB)^2 - 158,13.\%CB + 1267$	0,2300
		DT°C	$= 349,94.(\%CB)^2 - 367,02.\%CB + 1169,6$	0,5780
	AR	FT°C	$= 357,06.(\%CB)^2 - 402,37.\%CB + 1533,6$	0,5657
		HT°C	$= 184,03.(\%CB)^2 - 135,88.\%CB + 1269,5$	0,0998
		ST°C	$= -89,649.(\%CB)^2 - 57,024.\%CB + 1128,9$	0,2129
		DT°C	$= 253,51.(\%CB)^2 - 243,87.\%CB + 1014,3$	0,6078

muestras pertenecían a la variedad de caña LCP 85-384. En el presente estudio se consideró que las cenizas (CZ) se encuentran constituidas por componentes básicos (CB) y componentes ácidos (CA), según la ecuación Ec. 1.

Ecuación 1

$$100\% CZ = (\%CB|_{cz} + \%CA|_{cz} + \%Otros|_{cz})$$

Donde:

$\%CB|_{cz}$: porcentaje de CB en la muestra de ceniza original, definido como:

Ecuación 2

$$\%CB|_{cz} = \sum (\%Fe_2O_3 + \%CaO + \%MgO + \%Na_2O + \%K_2O + \%P_2O_5)$$

$\%CA|_{cz}$: porcentaje de CA en la muestra de ceniza original, definido como:

Ecuación 3

$$\%CA|_{cz} = \sum (\%Al_2O_3 + \%SiO_2 + \%TiO_2)$$

$\%Otros|_{cz}$: porcentaje de indeterminados en la muestra original.

Con el objetivo de eliminar la influencia numérica del porcentaje de elementos indeterminados de la muestra de ceniza original ($\%Otros|_{cz}$), se corrigieron las proporciones de los óxidos correspondientes en relación a la masa total de los mismos por medio de Ec.4.

Ecuación 4

$$\%Óxido|_{corr.} = \frac{\%Óxido}{(100 - \%OtrosVcz)}$$

De esta manera la Ec.1 quedó definida como indica la ecuación Ec.5:

Ecuación 5

$$CZ|_{corr.} = (\%CB|_{czcorr.} + \%CA|_{czcorr.}) = 100\%$$

Además, para considerar la influencia de CA y CB en la fusibilidad de las cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar, se fortificaron muestras de cenizas de las biomásas en estudio con el agregado de óxidos comerciales puros, manteniendo iguales relaciones de CB y CA a los encontrados en cenizas de las biomásas originales. La Tabla 2 muestra las proporciones consideradas de CA y CB, de manera de obtener una variación representativa de todas las posibilidades de concentración de óxidos que se podrían presentar en las biomásas en estudio.

Para el caso del 100% de CA y 100% de CB, se formularon directamente con los compuestos puros proporcionados en igual relación a los encontrados en cenizas originales. En total se formularon 11 muestras de cenizas fortificadas de bagazo y 11 muestras de cenizas fortificadas de RAC, a las cuales luego se les realizó un análisis de fusibilidad en atmósfera oxidante (AO) y en at-

mósfera reductora (AR), siguiendo la metodología ASTM D1857. Además, se consideró como temperatura crítica la temperatura de inicio de fusión (DT), por ser la temperatura más baja que define el comienzo de la fusión de las cenizas.

Las cantidades en masa de estos elementos se determinaron por medio de las ecuaciones Ec.6 y Ec.7.

Ecuación 6

$$gCA|_{czcorr.} = (gSiO_2 + gAl_2O_3 + gTiO_2)$$

Ecuación 7

$$gCB|_{czcorr.} = (gFe_2O_3 + gCaO + gMgO + gNa_2O + gK_2O + gP_2O_5)$$

La determinación de la cantidad porcentual de CB en las cenizas de las biomásas ($\%CB$) se realizó por medio de la ecuación Ec.8.

Ecuación 8

$$\%CB = [(\sum CB) / (CB + CA)] \cdot 100$$

A partir de los datos de la Figura 1 y las proporciones indicadas en la Tabla 2 para las muestras de bagazo y RAC en estudio y, además, considerando las correlaciones de DT en AO y AR indicadas en Tabla 1, se elaboró un gráfico que muestra las variaciones de la temperatura DT en función de $\%CB$ para las mencionadas biomásas en estudio de Tucumán, Argentina.

Tabla 2. Variación de la composición de CA y CB en mezclas fortificadas de cenizas para las biomásas en estudio. Elaboración propia.

Mezcla	Composición de la mezcla
100% M1 _{Sint}	100% CA _{Sint}
100% M2 _{Sint}	90% CA _{Sint} + 10% CB _{Sint}
100% M3 _{Sint}	80% CA _{Sint} + 20% CB _{Sint}
100% M4 _{Sint}	70% CA _{Sint} + 30% CB _{Sint}
100% M5 _{Sint}	60% CA _{Sint} + 40% CB _{Sint}
100% M6 _{Sint}	50% CA _{Sint} + 50% CB _{Sint}
100% M7 _{Sint}	40% CA _{Sint} + 60% CB _{Sint}
100% M8 _{Sint}	30% CA _{Sint} + 70% CB _{Sint}
100% M9 _{Sint}	20% CA _{Sint} + 80% CB _{Sint}
100% M10 _{Sint}	10% CA _{Sint} + 90% CB _{Sint}
100% M11 _{Si}	100% CB

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra los CA y CB determinados a partir de la composición química mayoritaria encontradas en cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar de la variedad de caña LCP 85-384 en Tucumán según Golato *et al.* (2024). Se puede observar que el RAC posee un mayor contenido de CB en relación al bagazo (26,63% vs. 9,56%), lo que representa porcentualmente, en relación al total de elementos un %CB de 32,2% y de 13,3%, respectivamente.

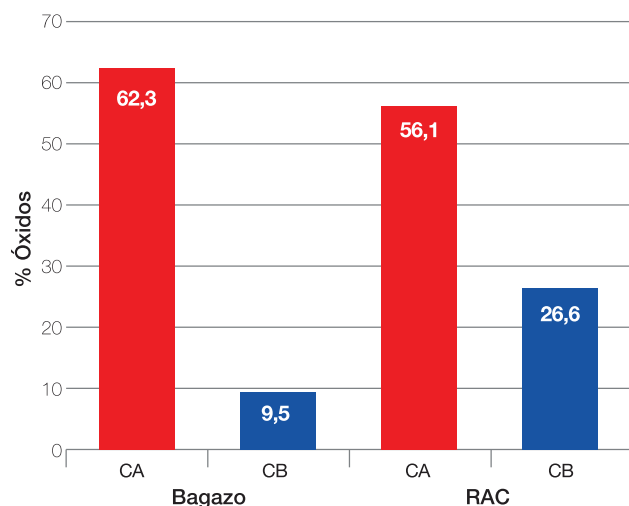


Figura 2. Componentes ácidos (CA) y básicos (CB) en cenizas de bagazo y RAC de Tucumán, Argentina.

La Figura 3 muestra para AO (líneas de trazo) y AR (líneas continuas) las curvas de correlación de fusibilidad de ceniza vs. concentración de CB en conjunto para bagazo y RAC de caña de azúcar de la variedad de caña LCP 85-384 en Tucumán. Si consideramos la concentración total promedio de %CB encontrado en cenizas de

bagazo de este estudio (13,3%) y las de RAC (32,2%), interceptando verticalmente con las curvas correspondientes a estas biomásas para AR y AO encontraríamos de manera aproximada las temperaturas de inicio de fusión DT. Para el bagazo en estudio sería de 979°C en AR y de 1069°C en AO, como se indica en la figura. En este caso, la amplitud máxima de fusibilidad por cambio en la atmósfera ($DT_{Bzo}^{AO} - DT_{Bzo}^{AR}$) resultaría de 90°C. De igual manera, para el caso del RAC, con %CB en cenizas de 32,2%, las temperaturas DT aproximadas en AO y en AR serían de 1088°C y 962°C, respectivamente. La amplitud máxima de fusibilidad por cambio en la atmósfera ($DT_{RAC}^{AO} - DT_{RAC}^{AR}$) resultaría de 126°C para la composición química determinada en cenizas de RAC. Estos resultados muestran en promedio una mayor amplitud de fusibilidad para las cenizas de RAC en relación al bagazo (126°C vs. 90°C). Esto indicaría en principio que ante un cambio de atmósfera, de AO a AR en el interior del hogar de una caldera, el RAC tendría un mejor comportamiento frente al bagazo, ya que la curva de variación de DT en función de CB% para el RAC se encuentra por arriba de la curva de DT para bagazo en AR.

No obstante, para la composición química encontrada en RAC (CB% = 32,2%), la DT promedio resultó menor en comparación con la DT del bagazo (962°C vs. 979°C), lo que implicaría un riesgo de inicio de fusión de las cenizas de RAC para esa concentración de %CB. Asimismo, el bagazo de caña de azúcar tendría una mayor probabilidad de alcanzar temperaturas críticas respecto al RAC para iguales concentraciones de %CB. Por consiguiente, resultaría conveniente desde este punto de vista utilizar mezclas de bagazo y RAC para atenuar el bajo nivel de fusibilidad del bagazo en similares condiciones de concentración de óxidos.

CONCLUSIONES

Para las muestras de la variedad de caña de azúcar LCP 85-384 estudiadas, las cenizas del RAC poseen

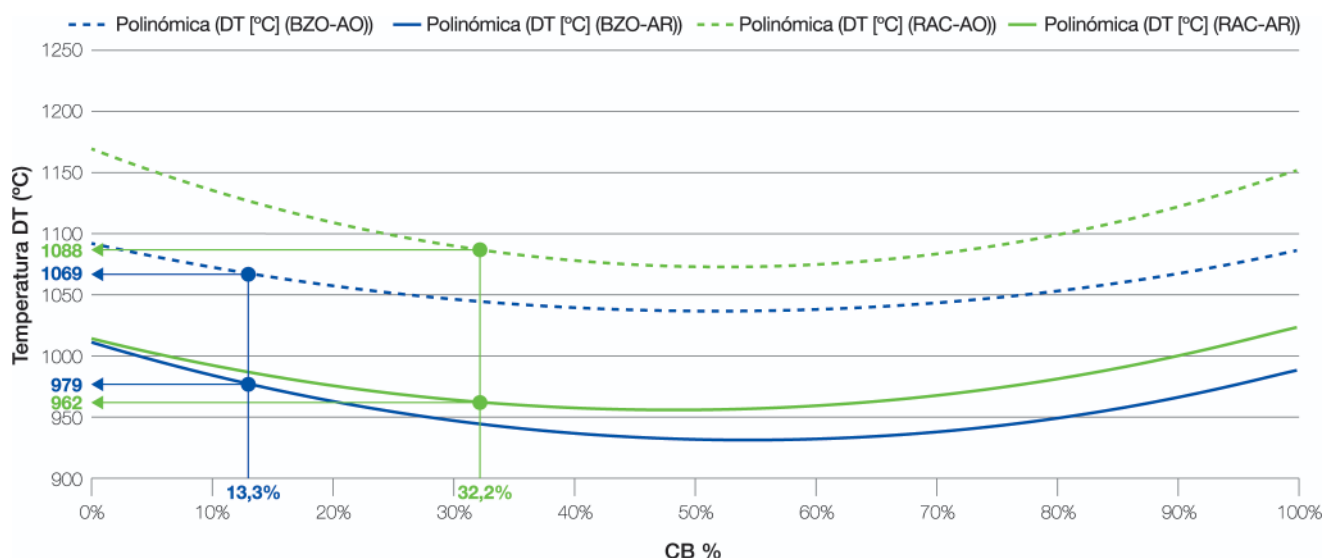


Figura 3. Curva de fusibilidad de cenizas de bagazo y RAC de la variedad de caña de azúcar LCP 85-384 de Tucumán, Argentina.

un mayor rango de amplitud de fusibilidad en relación a las cenizas del bagazo (126°C vs 90°C) cuando los combustibles trabajan entre atmósferas oxidantes (con exceso de aire) y reductoras (con deficiencia de oxígeno). Si se considera a la temperatura de DT como temperatura crítica, el RAC de caña de azúcar resultaría más flexible a los cambios de atmósfera en el interior del hogar de una caldera de vapor. No obstante, debido al mayor contenido de %CB en sus cenizas (32,2%) en relación al bagazo (13,3%), el RAC alcanzaría primero el estado inicial de fusión en AR. En el futuro se podría evaluar diferentes mezclas de bagazo y RAC con el fin de encontrar su mejor proporción para lograr componentes en las cenizas que generen niveles de fusibilidad aceptables.

■ AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Fca. Gabriela Juárez y a la Lic. Raquel Dellmans, de la Sección Química de los Productos Agroindustriales, por su colaboración en las determinaciones analíticas de las cenizas de bagazo y RAC; y al Dr. Ing. Agr. Eduardo Romero y al Ing. Agr. Sergio Casen, de la Sección Agronomía de Caña de Azúcar, por su colaboración en el muestreo de RAC de los diferentes campos cañeros de la provincia de Tucumán.

■ BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abbassi, R.; F. Khan & K. Hawboldt. 2009.** Prediction of minerals producing acid mine drainage using a computer-assisted thermodynamic chemical equilibrium model. *Mine Water and the Environment*, 28 (1), 74-78. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10230-008-0062-4>
- ASTM D1857-04. 2010.** Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash. American Society for Testing and Materials (ASTM). 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. USA.
- Bryers, R. W. 1996.** Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. *Progress in Energy and Combustion Science* 22 (1) 1996: 29-120. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128595000127>. Consultado 13/03/23.
- Chambon, C. L.; T. Y. Mkhize; P. Reddy; A. Brandt-Talbot; N. Deenadayalu; P. S. Fennell and J. P. Hallett. 2018.** Pretreatment of South African sugarcane bagasse using a low-cost protic ionic liquid: a comparison of whole, depithed, fibrous and pith bagasse fractions. *Biotechnol Biofuels* 11: 247. Disponible en: <https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s13068->

018-1247-0.pdf. Consultado 12/03/23.

- Chong, H.; J. Bai; A. Ilyushechkin; H. Zhao; L. Kong; H. Li; Z. Bai; Z. Guo and W. Li. 2019.** Effect of chemical composition on the fusion behaviour of synthetic high-iron coal ash. *Fuel* (253): 1465-1472. ISSN 0016-2361, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.135>. Consultado 14/02/23.
- Golato, M. A.; C. E. Gutiérrez; G. del H. Zamora Rueda; G. Juárez; N. Kamiya; D. Paz y M. Ruiz. 2024.** Características de las cenizas de bagazo y de residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar (RAC) de Tucumán, Argentina. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, en prensa.
- Golato, M. A.; G. Zamora Rueda; C. Gutiérrez; M. G. Mistretta; D. Paz y M. Ruiz. 2021.** Características de la fusibilidad de cenizas de bagazo y de residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán - Argentina. *Revista industrial y agrícola de Tucumán* 98 (2): 21-27.
- Golato, M. A., 2021.** Estudio de la variación de la temperatura de fusión de cenizas de calderas de biomasa en función de sus componentes ácidos y básicos. Tesis de Maestría en Ingeniería Bioenergética. Facultad Regional Tucumán. Universidad Tecnológica Nacional. Disponible en: <https://ria.utn.edu.ar/xmlui/handle/20.500.12272/6079>. Consultado 16/02/23.
- Kleinhans, U.; C. Wieland; F. J. Frandsen and H. Spliethoff. 2018.** Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior, *Progress in Energy and Combustion Science* 68: pp. 65-168. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.02.001>.
- Melissari, B. 2014.** Problemas relacionados a cenizas de biomasa con alto contenido de sales alcalinas y su mitigación. *Ingeniería* (12): 31-44.
- Miles, T. R.; T. R. Miles Jr.; L. L. Baxter; R. W. Bryers; B. M. Jenkins and L. L. Oden. 1995.** Alkali deposits found in biomass power plants. National Renewable Energy Laboratory, US Department of Energy. Disponible en: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/fy96/8142v1.pdf>. Consultado 12/03/23.
- Niu, Y.; H. Tan and S. Hui. 2016.** Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures. *Progress in Energy and Combustion Science* 52 (2016): 1-61. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2015.09.003>. Consultado 16/03/23.
- Vamvuka; D. and D. Zografos. 2004.** Predicting the behaviour of ash from agricultural wastes during combustion. *Fuel* 83: 2051-2057. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236104001358>. Consultado 12/03/23.