

Características de la fusibilidad de cenizas de bagazo y de residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán - Argentina

Marcos Golato*, Gimena Zamora Rueda*, Cynthia Gutiérrez*, Gabriela Mistretta*,
Dora Paz* y Marcelo Ruiz*

RESUMEN

La temperatura de fusión de las cenizas de un combustible es un parámetro crítico ligado a la calidad del mismo y resulta imprescindible su conocimiento para valorar un posible comportamiento de aquellas en el interior del hogar de una caldera de vapor. Este parámetro es una característica del estado físico que adquieren las cenizas de una biomasa utilizada como combustible cuando se las somete a un calentamiento progresivo bajo ciertas condiciones y es función del tipo de biomasa, la composición química y el tipo de atmósfera circundante. Es una medida del potencial que tienen los materiales combustibles para formar escorias y que, finalmente, generan obturaciones e incrustaciones indeseables sobre las superficies interiores del hogar de las calderas, entre ellas los tubos de refrigeración de la cámara de combustión y paredes radiantes, los pasajes de aire en grillas, entre los tubos del sobrecalentador y el haz convectivo, etc. El presente trabajo muestra los resultados del análisis de la fusibilidad de las cenizas de bagazo y residuos agrícolas de cosecha (RAC) de la variedad LCP-85-384 de caña de azúcar de Tucumán – Argentina, según norma ASTM D 1857, determinados con un equipo analizador de fusibilidad de cenizas automatizado que trabaja bajo atmósferas controladas. Se analizaron 20 muestras de bagazos y 20 muestras de RAC, las cuales se procesaron en el Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI) de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), operando en atmósferas oxidante y reductora. Los resultados indican que las temperaturas promedio de inicio de la fusión (DT) para cenizas de bagazo se encuentran dentro del mismo orden magnitud y no muestran diferencias significativas cuando se las someten a un calentamiento en atmósferas oxidantes y/o reductoras. Un comportamiento similar se observó con las cenizas de RAC. Además, se observó que las temperaturas DT resultaron sensiblemente menores en el RAC respecto a la del bagazo para las atmósferas analizadas (1054,4 °C vs. 1081,1 °C, para atmósfera reductora; y de 1058,0 °C vs. 1110,0 °C para atmósfera oxidante, respectivamente).

Palabras clave: biomasa, cenizas, combustible, calderas de vapor, energía.

ABSTRACT

Fusibility characteristics of ash from bagasse and sugarcane harvest residues (RAC), at Tucumán, Argentina

Ash melting temperature of a fuel is a critical parameter linked to its quality and it is essential to assess its behavior inside the home of a steam boiler. This parameter is a characteristic of the physical state acquired by ashes of a biomass used as fuel when subjected to progressive heating under certain conditions and is related to the type of biomass, the chemical composition and surrounding atmosphere. It is a measure of the potential of combustible materials to form slags, which eventually generate undesirable plugging and encrustation on the interior surfaces of the boiler hearth, including combustion chamber cooling tubes and radiant walls, air passages in grids, between superheater tubes and convective beam, etc. We studied ash fusibility characteristics from bagasse and RAC of LCP-85-384 sugarcane variety at Tucumán, Argentina. According to ASTM D 1857, we used automated ash fusibility analyzer equipment operating under controlled atmospheres. Twenty bagasse samples and 20 RAC samples were processed at our Industrial Measurements and Testing Laboratory (LEMI), and analyzed in both oxidizing and reducing atmospheres. Results indicated that average melting start temperatures (SD) for bagasse ashes didn't show significant differences when heating in oxidizing or reducing atmospheres. A similar behavior was observed in RAC ashes. In addition, DT temperatures were significantly lower in RAC than in bagasse for both atmospheres (1054.4 °C vs. 1081.1 °C, for reducing atmosphere; and 1058.0 °C vs. 1110.0 °C for oxidizing atmosphere, respectively).

Key words: biomass, ash, fuel, steam boilers, energy.

Fecha de recepción: 28/04/2020 - Fecha de aceptación: 19/02/2021

* Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. E-mail: mgolato@eeaoc.org.ar

INTRODUCCIÓN

Las proyecciones sobre el uso creciente de diferentes tipos de biomásas como fuente de energía alternativa (Tonatto *et al.*, 2019; Díaz *et al.*, 2019; Feijóo *et al.*, 2015) han incrementado la demanda de caracterización de las mismas. Antes de comenzar a operar con nuevos biocombustibles en calderas de vapor, es de suma importancia adoptar medidas preventivas para evitar problemas de escorificación excesiva, deposiciones y obstrucción en la zona de grillas y pasajes de gases a través de los tubos del haz convectivo y sobrecalentador (Barboza Cortez *et al.*, 2008; Melissari, 2011).

Actualmente la industria azucarera de la región utiliza como fuente de energía alternativa residuos agrícolas de cosecha, cultivos energéticos, residuos leñosos, etc., que han causado algunos problemas en los sistemas de combustión tradicionales, debido principalmente, a la composición de sus cenizas ricas en potasio, sodio, cloro y fósforo. Estos forman eutécticos de bajo punto de fusión que integran zonas líquidas, las cuales aglomeran partículas sólidas (“fouling”) o funden por completo (“slagging”) (Nougués *et al.*, 2010; Melissari, 2014; Shi and Wang, 2015).

Por ello, con el objetivo de prever estos posibles inconvenientes debe realizarse un análisis de la fusibilidad de las cenizas para predecir el comportamiento de estas en el interior del hogar de una caldera de vapor. El punto de fusión de una ceniza es un parámetro crítico relacionado con la calidad de un combustible; a partir de esto es posible definir la factibilidad de aplicación de un combustible a escala industrial en generadores de vapor existentes, o redefinir la temperatura de diseño del horno de una caldera y de sus condiciones operativas.

Un estudio de fusibilidad de cenizas de una biomasa define una característica del estado físico que adquieren cuando son sometidas a un proceso de calentamiento progresivo para determinadas condiciones del ambiente que las rodea. La fusibilidad de las cenizas depende fundamentalmente de la composición de la biomasa, tamaño de partículas y distribución, relación aire-combustible y temperatura del horno (Haykiri-Acma *et al.*, 2010).

El ensayo de fusibilidad se basa en identificar, en conos de cenizas preformados, el cambio característico de forma (altura, superficie y ancho) que experimentan los mismos cuando son sometidos a un calentamiento progresivo en un horno eléctrico especial en presencia de una atmósfera controlada.

La Figura 1 muestra los perfiles de los conos de cenizas, pre-conformado inicialmente (cono 1); y deformados en función de la temperatura circundante en el interior del horno. La norma ASTM D1857-2010 define las

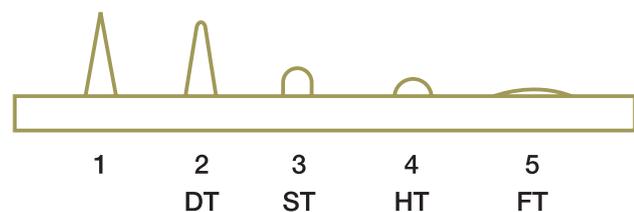


Figura 1. Perfiles de los conos de ceniza en función de las temperaturas características de fusibilidad, según ASTM D1857-04, 2010.

siguientes cuatro temperaturas características: inicial de deformación (DT), ablandamiento (ST), semiesfera (HT) y fluidización (FT) para una atmósfera oxidante (AO) y atmósfera reductora (AR). El cono 1, indicado en la Figura 1, representa la muestra inicial de ceniza sin acción de la temperatura.

El ensayo de fusibilidad de cenizas brinda una medida del potencial que tienen los materiales combustibles de formar escorias o incrustaciones indeseables en las superficies internas de los generadores de vapor.

El objetivo del presente trabajo es el análisis de los resultados de los ensayos de fusibilidad de las cenizas de dos materiales lignocelulósicos, como son el bagazo y el RAC de la caña de azúcar, para la variedad LCP-85-384 de Tucumán, Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante la zafra 2013 se recolectaron 20 muestras de bagazo de caña de azúcar de la variedad LCP-85-384, provenientes de ingenios tucumanos; y 20 muestras de RAC de igual variedad, originarios de campos cosechados con sistema tradicional de cosecha integral. Las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI) de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). Las determinaciones de fusibilidad de cenizas se realizaron en un equipo automatizado marca LECO, modelo AF700, que establece automáticamente las temperaturas DT, ST, HT y FT de hasta seis muestras de cenizas por ensayo, a través de un software de reconocimiento de imágenes (IRF), que funciona con algoritmos patentados basados en la norma ASTM D1857-2010.

Este análisis requiere de tratamientos previos de acondicionamiento de las muestras de biomasa: secado y calcinación. Para el proceso de secado se utilizó una estufa eléctrica, marca ORL, con circulación forzada de aire a 105 °C, durante ocho horas, y se trabajó hasta lograr peso constante siguiendo la norma ASTM D3173-87-1996 modificada. Posteriormente se trituraron las muestras de biomasa secas en un molino de cuchillas, marca Fritsch, modelo Pulverisette 19, con tamiz de 250 µm. La calcinación se realizó en un horno eléctrico del tipo mufla, marca ORL a 550 °C, durante ocho horas, y se trabajó hasta peso constante siguiendo la norma ASTM D5142-2002 modificada.

Luego, las muestras de cenizas obtenidas fueron molidas en un mortero de ágata y tamizadas hasta una granulometría menor a 75 µm. A continuación se humedecieron con una solución filtrada de dextrina al 10% y ácido salicílico al 0,1%, para favorecer la aglutinación y conservación del material, respectivamente. Posteriormente, se procedió a rellenar moldes cónicos estandarizados según lo indicado en la norma ASTM D1857-04-2010. La Figura 2 muestra un detalle de los conos de ceniza moldeados antes de ser analizados.

La velocidad de calefacción del horno, tanto para las muestras de bagazo de caña de azúcar como de RAC, fue de 10°C/min. El tiempo de análisis por ensayo (seis muestras) fue de cuatro horas.

El analizador AF700, es un moderno equipo automatizado que trabaja en AO y AR. En la primera, el gas predominante es una mezcla de CO₂ y O₂; y en la segunda



Figura 2. Conos de cenizas moldeados para el análisis de fusibilidad, según ASTM D1857-04, 2010.

es una mezcla de CO_2 y CO . Las proporciones de gases utilizadas en las mezclas patrón para generar las atmósferas mencionadas se indican en la Tabla 1. El flujo de gases adoptado en ambas atmósferas de trabajo fue de 2,5 lpm a 25 psi \pm 10% (1,72 bar), que es el flujo recomendado por el fabricante del equipo.

El registro y control de las temperaturas de deformación de los conos de ceniza se realizó por medio del

Tabla 1. Concentraciones de gases utilizadas en las mezclas patrones.

Tipo de atmósfera	Concentración O_2	Concentración CO	Concentración CO_2
AO ($\text{CO}_2 + \text{O}_2$)	49,7% \pm 0,2%	-	50,3% \pm 0,2%
AR ($\text{CO}_2 + \text{CO}$)	-	60,0% \pm 0,8%	40% \pm 0,8%



Figura 3. Equipo para la determinación de la fusibilidad de cenizas, marca LECO, modelo AF700, instalado en el LEMI-EEAOC.

“software” de reconocimiento de imágenes AF700 LECO © Software, versión 1.41. La Figura 3 muestra el equipo analizador utilizado en los ensayos.

Para el análisis estadístico de los datos se ajustó un modelo lineal general para la variable dependiente “temperatura de fusión”. Se evaluaron los factores: fusibilidad, atmósfera y biomasa, y sus interacciones. El modelo incluyó funciones de varianza “Varlden” para los tres factores mencionados, según Di Rienzo *et al.* (2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4 muestra una imagen real del perfil de los conos de cenizas en función de las temperaturas características de fusibilidad. Esta imagen representa un ensayo particular realizado sobre una muestra de RAC en condiciones de atmósfera reductora.

La Tabla 2 ofrece los resultados de la fusibilidad de las cenizas para las muestras de bagazo y RAC analizadas en atmósfera oxidante (AO) y atmósfera reductora (AR). Se indican las temperaturas medias de deformación alcanzadas (Media) y los errores estándar (E.E.) obtenidos en los ensayos. Además, se muestra el resultado del test a posteriori (DGC) con $\alpha = 0,05$, según Di Rienzo *et al.* (2019). Las medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Generalmente, las temperaturas bajo condiciones reductoras deben ser iguales o menores que en condiciones oxidantes; el mayor contenido de minerales en las muestras acrecienta las diferencias entre ambas atmósferas debido a la reducción de estos, formando compuestos de bajo punto eutéctico (Misra *et al.*, 1993). Este hecho se observó en los resultados indicados en la Tabla 2, donde la temperatura media DT para bagazo, trabajando en AR, fue de 1081,16 $\text{°C} \pm 8,87 \text{°C}$, y en AO de 1110,08 $\text{°C} \pm 12,73 \text{°C}$, sin mostrar diferencia significativa entre atmósferas.

Asimismo, se observó que la temperatura media ST en el bagazo no presentó una diferencia significativa en



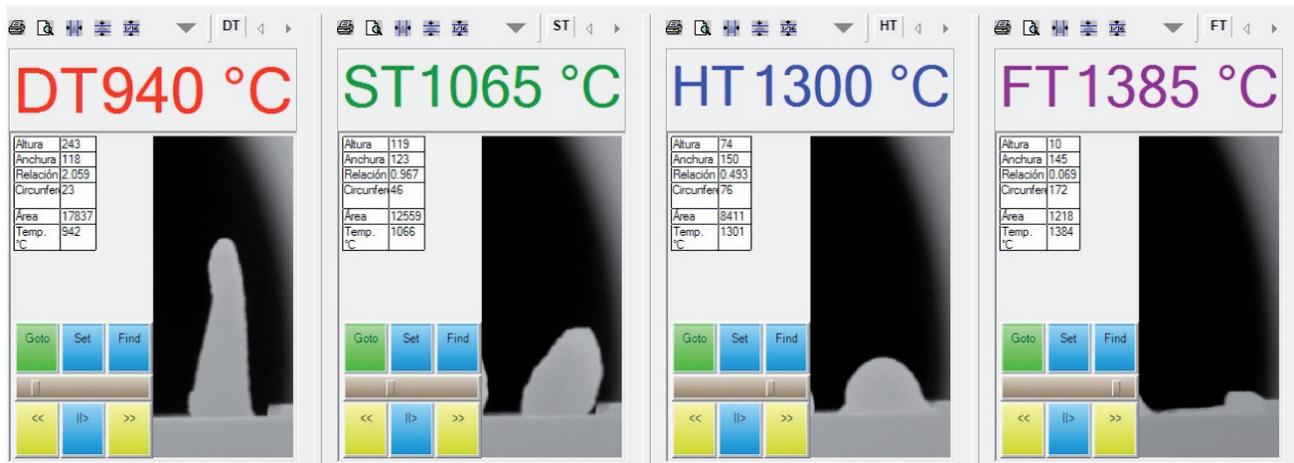


Figura 4. Perfil de los conos de cenizas en función de las temperaturas características de fusibilidad, según ASTM D1857-04, 2010.

AO y AR ($1235,17 \text{ °C} \pm 14,56 \text{ °C}$ vs. $1236,64 \text{ °C} \pm 10,14 \text{ °C}$). Las temperaturas medias HT y FT resultaron mayores en AR en 3,8% y 6,4%, respectivamente, contradiciendo en este caso lo indicado por Misra *et al.* (1993). Este hecho podría deberse a posibles elementos básicos que provocan en las cenizas características refractarias en condiciones de AR (Toscano and Corinaldesi, 2010; Niu *et al.*, 2013).

El valor mínimo de DT, para las muestras de bagazo analizadas, fue de alrededor de $922,00 \text{ °C}$ en AR y de $926,50 \text{ °C}$ en AO. En cuanto a la máxima temperatura de fusibilidad registrada (FT), se observó que en ambas atmósferas superó los $1455,0 \text{ [°C]}$, que es la máxima temperatura de trabajo ajustada en el equipo AF700 por cuestiones de seguridad.

La Tabla 2 también muestra los resultados del análisis de fusibilidad para las cenizas de RAC. Se observó que la DT media en AO ($1058,03 \text{ °C} \pm 10,80 \text{ °C}$), frente

a la AR ($1054,60 \text{ °C} \pm 7,52 \text{ °C}$), no presenta diferencia significativa. Sin embargo, las temperaturas ST ($1195,76 \text{ °C} \pm 12,35 \text{ °C}$); y HT ($1322,22 \text{ °C} \pm 8,33 \text{ °C}$) en AO presentan diferencias significativas de 5,3% y 3,8%, respecto a la AR ($1263,22 \text{ °C} \pm 8,61 \text{ °C}$ y $1375,22 \text{ °C} \pm 5,80 \text{ °C}$), respectivamente. Asimismo, se observó la no existencia de una diferencia significativa para la temperatura media FT en el RAC trabajando en ambas atmósferas.

Es importante destacar que el valor mínimo de la temperatura media DT, registrada para el RAC, fue de $945,9 \text{ °C}$ en AO y $974,5 \text{ °C}$ en AR. En cuanto a la temperatura máxima de fluidización (FT), resultó de $1457,20 \text{ °C}$ en AO y de $1455,20 \text{ °C}$ en AR, sin observar diferencias significativas en los valores de temperaturas para las atmósferas analizadas.

La Figura 5 muestra gráficamente la interacción entre las variables analizadas y en ella puede verse que el tipo de atmósfera no tiene influencia en la temperatura DT

para el uso del RAC como combustible; esto sucede de manera similar para el caso del bagazo de caña de azúcar. Sin embargo, si comparamos ambos combustibles, existen diferencias significativas cuando trabajan en AO y/o AR. El bagazo presentó una mayor temperatura media DT en relación al RAC.

Con respecto a las temperaturas medias ST del bagazo, se encontró que en el rango general entre 1200 °C y 1300 °C no existen diferencias significativas, incluso para el RAC operando en AR. No obstante, si se observó una diferencia para el RAC trabajando en AO.

Para el caso de las temperaturas medias HT, no se observaron diferencias significativas entre el RAC y el bagazo cuando trabajan en AR entre 1300 °C y 1400 °C . Sin embargo, en AO se observó una diferencia específica entre ambas biomásas. Por lo que es

Tabla 2. Medias ajustadas y errores estándares (E.E.), para temperaturas de fusión de cenizas de bagazo y RAC de Tucumán, en relación al tipo de atmósfera circundante.

Biomasa	Ambiente	Temperatura fusión	Medias \pm E.E. °C	Temp. mínima °C	Temp. máxima °C	DGC
Bagazo	AO	DT	$1110,08 \pm 12,73$	922,00	1236,50	H
		ST	$1235,17 \pm 14,56$	1008,40	1362,30	F
		HT	$1352,58 \pm 9,82$	1116,90	1455,00	D
		FT	$1440,42 \pm 5,24$	1281,60	1455,00	B
	AR	DT	$1081,16 \pm 8,87$	926,50	1212,10	H
		ST	$1236,64 \pm 10,14$	1063,50	1396,70	F
		HT	$1385,46 \pm 6,84$	1277,10	1446,10	C
		FT	$1453,88 \pm 3,65$	1431,40	1455,70	A
RAC	AO	DT	$1058,03 \pm 10,80$	945,90	1185,20	I
		ST	$1195,76 \pm 12,35$	1022,00	1302,50	G
		HT	$1322,22 \pm 8,33$	1168,20	1397,20	E
		FT	$1433,83 \pm 4,45$	1274,20	1457,20	B
	AR	DT	$1054,60 \pm 7,52$	974,50	1201,00	I
		ST	$1263,22 \pm 8,61$	1141,90	1367,40	F
		HT	$1375,22 \pm 5,80$	1168,20	1397,20	C
		FT	$1436,70 \pm 3,10$	1374,50	1455,20	B

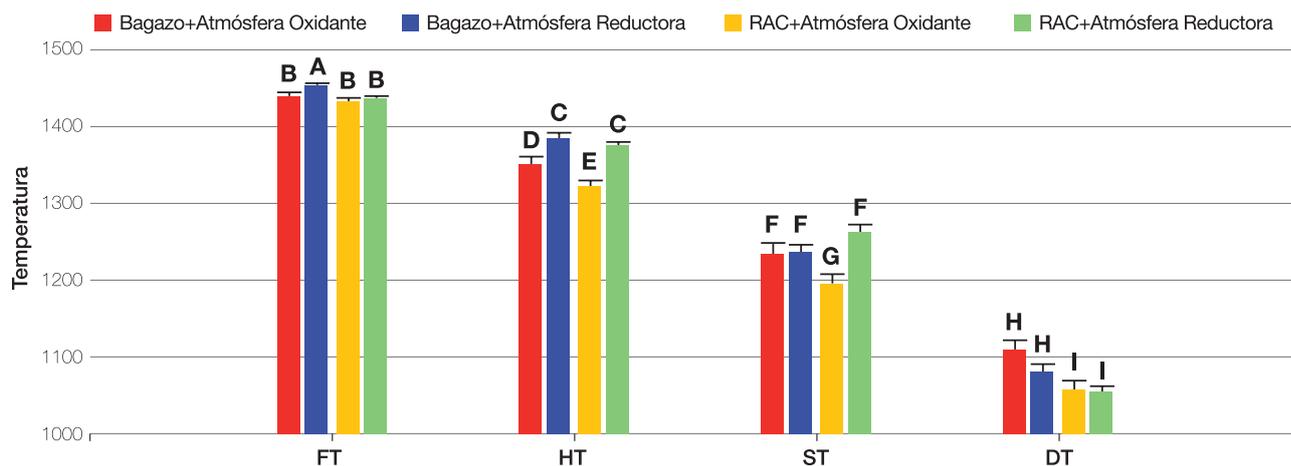


Figura 5. Interacción entre temperaturas de fusibilidad de cenizas de bagazo y RAC, trabajando en atmósferas reductoras y oxidantes.

de esperarse que si la temperatura del hogar de la caldera de vapor trabajase con un ambiente de gases reductores (elevada concentración de monóxido de carbono) usando bagazo, RAC o mezclas de ambos, las cenizas correspondientes no presentarían inconvenientes de fusibilidad para temperaturas menores al rango indicado. Sin embargo, si la atmósfera cambiara radicalmente a oxidante (mayor presencia de oxígeno), las cenizas del RAC tenderían a fundirse en el hogar para el mismo rango de temperatura.

Con respecto a las temperaturas medias FT, para un rango entre 1400 °C y 1450 °C el bagazo presentó una mayor temperatura en relación al RAC cuando trabajó en AR, lo que indicaría que este último fundiría primero sus cenizas. Como ya se mencionó, el RAC no presentó diferencias específicas de FT cuando operó en AO y/o AR.

La Tabla 3 muestra una comparación de las diferencias en los parámetros característicos de fusibilidad del bagazo de caña de azúcar y de RAC.

Tabla 3. Análisis de diferencias de los parámetros de fusibilidad de cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina.

Parámetros	Bagazo		RAC	
	Atmósfera reductora	Atmósfera oxidante	Atmósfera reductora	Atmósfera oxidante
(FT – DT) °C	372,7	330,3	400,0	375,8
Δ (FT-DT) °C	42,4		24,2	
Δ DT °C	28,9		28,6	
Δ DTR _{BZO/RAC} °C	26,6			
Δ DTO _{BZO/RAC} °C	52,0			

Donde:
 (FT – DT) °C: diferencia de temperatura entre el inicio de fusión y la fusión total.
 Δ (FT-DT) °C: diferencia de la variación de temperaturas entre atmósferas.
 Δ DT °C: variación de DT entre atmósferas.
 Δ DTR_{BZO/RAC} °C: variación de DT entre bagazo y RAC, trabajando en AR.
 Δ DTO_{BZO/RAC} °C: variación de DT entre bagazo y RAC, trabajando en AO.

Puede observarse que para bagazo la diferencia entre FT y DT fue de 372,7 °C en AR y 330,3 °C en AO. Estos resultados brindarían información del posible estado de las cenizas cuando existan variaciones de la temperatura del hogar en atmósferas ricas en monóxido de carbono

(reductora) u oxígeno (oxidante). Se encontró para bagazo que la variación entre FT y DT resultó menor en AO. Por otro lado, se determinó para esta misma biomasa que la diferencia de variación de temperaturas entre atmósferas (Δ (FT-DT)) fue de 42,4 °C.

Para las muestras de RAC analizadas se observó que la diferencia promedio entre FT y DT fue de 400,0 [°C] en AR y 375,8 °C en AO, con una diferencia de variación de temperatura entre atmósferas (Δ (FT-DT)) de 24,2 °C. Este valor resultó un 57% menor que para bagazo (42,4 °C). Esto podría deberse a la mayor o menor cantidad de elementos inorgánicos ácidos o básicos presentes en el RAC, como óxidos de Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, SiO₂, TiO₂ y Al₂O₃, según lo informado por Li *et al.* (2013).

En la Figura 6 pueden verse las interferencias encontradas por la acción de la atmósfera circundante en la variación de las temperaturas de fusión del bagazo y del RAC de caña de azúcar. Puede observarse mejor ahí cómo

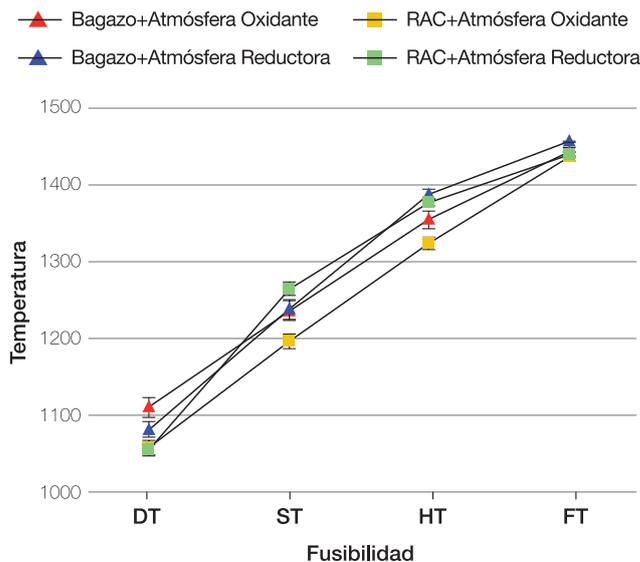


Figura 6. Variación de la temperatura de fusibilidad del bagazo y el RAC en relación a la atmósfera circundante.

el RAC operando en AO y/o AR presenta menores temperaturas medias DT que el bagazo trabajando en iguales condiciones atmosféricas.

Sin embargo, la diferencia entre atmósferas influye en las temperaturas medias ST, según la biomasa que se utilice. En la Figura 6 puede apreciarse cómo aumenta el rango de temperaturas para el RAC en relación al bagazo, mientras este último no mantiene una diferencia significativa para AR. Para el caso de las temperaturas medias HT, también puede observarse un mayor rango trabajando en diferentes atmósferas, manteniendo diferencias no significativas entre el RAC y el bagazo en AR, como se indicó anteriormente.

En cuanto a las temperaturas medias FT, en el comportamiento del RAC respecto al bagazo para las dos atmósferas analizadas no se observaron diferencias significativas operando en AO. No obstante, el bagazo presentó una mayor temperatura FT en relación al RAC trabajando en AR.

CONCLUSIONES

Los resultados del análisis de los datos de este estudio indican que la temperatura media DT para cenizas de bagazo no presentó diferencias significativas cuando fueron sometidas a AO y/o AR. En este caso, el valor promedio encontrado entre las temperaturas medias de ambas atmósferas fue de 1095,6 °C.

Para el caso del RAC, los resultados fueron similares a los hallados para bagazo. El tipo de atmósfera utilizada no representa una condición significativa, el valor de DT media encontrado para esta biomasa fue de 1056,3 °C. Los valores mínimos promedio de DT, trabajando en ambas atmósferas, fueron de 924,3 °C para bagazo y 960,2 °C para RAC.

De este estudio podría predecirse el comportamiento que tendrá el bagazo de caña de azúcar, el RAC o mezclas de ambos, cuando sean utilizados como combustibles en calderas de vapor, en función de la temperatura del hogar y del tipo de atmósfera circundante. Para calderas de vapor operando solo con bagazo, se prevé que trabajando con una atmósfera rica en oxígeno (AO), la temperatura media máxima del hogar deberá ser inferior a 1110,08 °C ± 12,73 °C, para no tener inconvenientes con la fusibilidad de sus cenizas. Asimismo, si el hogar presenta una atmósfera rica en monóxido de carbono (AR), la temperatura media máxima deberá ser menor a 1081,16 °C ± 8,87 °C.

Por otro lado, se determinó que las cenizas de bagazo poseen una menor variación de temperatura (FT - DT) en condiciones de AO (330,3 °C), respecto a la condición reductora (372,7 °C). La diferencia promedio de esta variación entre atmósferas fue de 42,4 °C.

Asimismo, la variación de temperaturas para las muestras de RAC analizadas fue de 375,8 °C en AO y 400,0 °C en AR. Para este caso, la diferencia de la variación de temperaturas entre las atmósferas fue de 24,2 °C, un 57% menor que para bagazo. Este hecho podría deberse a las características ácidas y/o básicas de los elementos inorgánicos presentes en las biombras ensayadas, que pueden afectar la estructura final de las cenizas durante la combustión formando sales de diferentes puntos de fusión. Esto podría comprobarse realizando un estudio de caracterización elemental de las cenizas con el objetivo de encontrar las concentraciones de los diez mayores elementos inorgánicos presentes en ellas (Fe₂O₃, CaO, MgO,

K₂O, Na₂O, P₂O₅, SiO₂, TiO₂, Al₂O₃ y SO₃), según lo indicado por Li *et al.* (2013) y Melissari (2012).

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Sección Agronomía de la Caña de Azúcar de la EEAOC por facilitar el muestreo y transporte de las muestras de RAC que se utilizaron en este estudio desde los diferentes campos cañeros de la región. Asimismo, se agradece a la Dra. Andrea Peña Malavera, de ITANOA-EEAOC, por su colaboración en el análisis estadístico de los datos del ensayo.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Barbosa Cortez, L. A.; E. E. Silva Lora y E. Olivares Gómez. 2008.** Biomasa para energía. UNICAMP, San Pablo, Brasil.
- Di Rienzo J. A.; F. Casanoves; M. G. Balzarini; L. Gonzalez; M. Tablada y C. W. Robledo. 2019.** InfoStat versión 2019. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en <http://www.infostat.com.ar>.
- Díaz, Jorge; Ostengo, Santiago; Costilla, Diego; Golato, Marcos Antonio; Aybar Guchea, Matías; Zossi, Silvia; Chavanne, Ernesto; Paz, Dora; Ruiz, Marcelo; Cuenya, María Inés. 2019.** "Energy traits in three sugarcane cultivars in Tucumán, Argentina". Revista industrial y agrícola de Tucumán 96 (2): 55 - 58.
- Feijóo, E.; M. A. Golato; F. J. Franck Colombres; D. Paz y G. J. Cárdenas. 2015.** Características energéticas de los residuos agrícolas de la cosecha en verde de la caña de azúcar. Rev. Industrial y Agrícola de Tucumán 92 (2): 23-32.
- Haykiri-Acma, H.; S. Yaman and S. Kucukbayrak. 2010.** Effect of biomass on temperatures of sintering and initial deformation of lignite ash. The Science and Technology of Fuel and Energy. Fuel 89, pp. 3063-3068.
- Li, Q. H.; Y. G. Zhang; A. H. Meng; L. Li and G. X. Li. 2013.** Study on ash fusion temperature using original and simulated biomass ashes. Fuel Processing Technology, Volume 107: 107-112.
- Melissari, B. 2011.** Evaluación de tecnologías de quema de biomasa en el Uruguay. Memoria Investigaciones En Ingeniería, (9), 55-66. Recuperado a partir de <http://revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/290>
- Melissari, B. 2012.** Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa. Fundación Dialnet, Universidad de la Rioja. Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica (10): 69-82.
- Melissari, B. 2014.** Problemas relacionados a cenizas de biombras con alto contenido de sales alcalinas y su mitigación, Ingeniería (12): 31-44.
- Misra, M. K.; K.W. Rangland and A. J. Baker. 1993.** Wood Ash Composition as a Function of Furnace Temperature. Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, U.S.D.A. Forest Products Laboratory, Madison, WI 53706, USA.

- Niu, Y.; W. Du; H. Tan; W. Xu; Y. Liu; Y. Xiong and S. Hui. 2013.** Further study on biomass ash characteristics at elevated ashing temperatures: The evolution of K, Cl, S and the ash fusion characteristics. *Bioresource Technology* (129): 642–645.
- Nogués, F. S.; D. García Galindo y A. Rezeau. 2010.** *Energías Renovables. Energía de la Biomasa. Volumen 1.* Prensa Universitaria de Zaragoza. España.
- Tonatto, J.; P. Garolera De Nucci; S. Casen; G. De Boeck; C. Gusils; M. Ruiz y E. R. Romero. 2019.** Experiencia asociativa para la producción comercial bioenergética: sorgo azucarado y caña de azúcar como cultivos complementarios en Tucumán, Argentina. *Rev. Industrial y Agrícola de Tucumán* 96 (1): 23-32.
- Toscano, G. and F. Corinaldesi. 2010.** Ash fusibility characteristics of some biomass feedstocks and examination of the effects of inorganic additives. *Journal of Agricultural Engineering (JAE), Riv. di Ing. Agr.* (2): 13-19.
- Shi, Y. and J. Wang. 2015.** Ash fouling monitoring and key variables analysis for coal fired power plant boiler. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, and Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education, Shanghai, China. *Thermal Science* 19 (1): 253-265.