



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 101 (1):
35-42; 2024



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

Características de las cenizas de bagazo y de residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar (RAC) de Tucumán, Argentina

Marcos A. Golato*, Cynthia E. Gutierrez*, Gimena del Huerto Zamora Rueda*, Gabriela Juárez**, Norma Kamiya**, Dora Paz* y Marcelo R. Ruíz*

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

RESUMEN

El uso de biomasa combustible en calderas de vapor de la industria azucarera requiere evaluar sus características fisicoquímicas y energéticas debido a la variabilidad climática y el tipo de caña. Este estudio presenta los resultados de la caracterización de cenizas de bagazo de caña de azúcar y residuos de cosecha (RAC) de Tucumán, Argentina. Se analizaron 18 muestras provenientes de la variedad de caña LCP 85-384, a las cuales se les determinaron contenidos de cenizas, cloro (Cl) y azufre (S) siguiendo normas ASTM. Además, se determinaron contenidos de aluminio (Al), calcio (Ca), hierro (Fe), magnesio (Mg), potasio (K), silicio (Si), sodio (Na) y titanio (Ti), mediante técnicas de espectroscopia de absorción atómica (AAS) y espectroscopia de emisión atómica (AES). El contenido de fósforo (P) se determinó por colorimetría. En cenizas de bagazo, los principales componentes fueron: Si (241,1 g/kg), K (42,2 g/kg), Al (38,0 g/kg), Ca (11,0 g/kg) y Fe (7,8 g/kg), equivalentes a %SiO₂ (54,25%), %Al₂O₃ (7,84%), %K₂O (5,29%), %CaO (1,60%) y %Fe₂O₃ (1,2%). En las cenizas de RAC, los elementos principales fueron: Si (257,5 g/kg), K (119,1 g/kg), Ca (53,3 g/kg), Mg (14,9 g/kg) y Na (5,7 g/kg), equivalentes a %SiO₂ (55,09%), %K₂O (14,34%), %CaO (7,46%), %MgO (2,47%) y %Na₂O (0,8%). Estos resultados servirán como referencia para futuros análisis y para estimar el posible comportamiento de las cenizas en las calderas de vapor.

Palabras clave: biomasa, composición química, combustión.

ABSTRACT

Characteristics of bagasse ash and agricultural residues from sugar cane harvest (RAC) in Tucumán, Argentina

The use of biomass fuel in steam boilers in the sugar industry requires evaluating its physicochemical and energetic characteristics due to climatic variability and the type of cane. This study presents the results of the characterization of sugarcane bagasse ash and harvest residue (RAC) from Tucumán, Argentina. Eighteen samples from the LCP 85-384 cane variety were analyzed, determining ash, chlorine (Cl), and sulfur (S) contents following ASTM standards. Additionally, aluminum (Al), calcium (Ca), iron (Fe), magnesium (Mg), potassium (K), silicon (Si), sodium (Na), and titanium (Ti) contents in ashes were determined using atomic absorption spectroscopy (AAS) and atomic emission spectroscopy (AES) techniques. Phosphorus (P) content was determined by colorimetry. In bagasse ash, the main components were: Si (241.1 g/kg), K (42.2 g/kg), Al (38.0 g/kg), Ca (11.0 g/kg), and Fe (7.8 g/kg), equivalent to %SiO₂ (54.25%), %Al₂O₃ (7.84%), %K₂O (5.29%), %CaO (1.60%), and %Fe₂O₃ (1.2%). In RAC ashes, the main elements were: Si (257.5 g/kg), K (119.1 g/kg), Ca (53.3 g/kg), Mg (14.9 g/kg), and Na (5.7 g/kg), equivalent to %SiO₂ (55.09%), %K₂O (14.34%), %CaO (7.46%), %MgO (2.47%), and %Na₂O (0.8%). These results will serve as a reference for future analyses and to estimate the possible behavior of the ashes in steam boilers.

Key words: biomass, chemical composition, combustion.

Fecha de
recepción:
04/12/2023

Fecha de
aceptación:
18/09/2024

INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de mejorar la matriz energética de los procesos productivos, de manera de volverlos más sustentables y amigables con el medioambiente, se ha comenzado a tener mayor interés en el uso de la biomasa como fuente de energía. Actualmente, nuestro país posee un gran potencial para el aprovechamiento de diversas fuentes de biomasa debido a la producción agrícola, forestal y agroindustrial de que se dispone. Se estima una producción de biomasa seca proveniente de residuos foresto industrial mayor a 2 t/año, residuos de plantaciones (poda, raleo y tala rasa) mayor a 5 t/año, aprovechamiento sustentable de bosques nativos de más de 9 t/año y residuos agrícolas y agroindustriales, superior a 9 t/año. Esto hace un total de más de 25 t/año, equivalente a 6200 MW de potencia (Probiomasa, 2020). Si se considera la zafra 2016, la superficie plantada con caña de azúcar en Tucumán fue de 274.180 ha (Fandos *et al.*, 2016), adoptando un rendimiento conservador para este cultivo de 56,6 t/ha; y considerando que el 78% son tallos molibles y el 30% de bagazo en caña, la cantidad de bagazo anual equivaldría a 13,24 t/ha cosechada. Asimismo, considerando las necesidades agronómicas del suelo de acuerdo a recomendaciones técnicas de Tortora *et al.* (2013) y Fernández de Ullivarri *et al.* (2012), y a la eficiencia de la maquinaria recolectora/densificadora utilizada (Casen *et al.*, 2012; 2015), se determinó que el RAC seco factible de recolectar fue de 1.245.283 t, equivalente a 4,69 t/ha para la zafra 2014.

Para lograr un sistema de generación estable es importante conocer sobre las tecnologías de combustión y adecuarlas a las necesidades impuestas por el combustible que se desea utilizar. En particular, cuando se trata de residuos agroindustriales o de cultivos energéticos, la composición química resulta diferente al resto de las biomásas. Estos combustibles tienen mayor contenido de minerales, en particular sodio (Na), potasio (K), fósforo (P) y cloro (Cl); altos contenidos de cenizas de bajo punto de fusión y alto potencial corrosivo (Melissari, 2012; Pronobis, 2005). Según Feijóo *et al.* (2015) y Golato *et al.* (2017), es factible aprovechar el RAC como combustible adicional en calderas de vapor de la industria azucarera. No obstante, debido al elevado contenido de cenizas y la mayor cantidad de elementos básicos en su composición elemental, podrían presentarse bajas temperaturas de fusión en relación a las cenizas de bagazo. Además, podrían ocasionar un aumento de los depósitos en el hogar de la caldera o producir problemas de escorificación e incrustaciones en tubos y en partes internas del generador de vapor (Golato *et al.*, 2022).

En el presente trabajo se muestran los resultados de una caracterización elemental realizada en cenizas de bagazo y de RAC de caña de azúcar de Tucumán (Argentina) y una comparación con los resultados encontrados para estas biomásas de otras regiones del mundo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron y procesaron nueve muestras de bagazo provenientes de ingenios tucumanos y nueve muestras de RAC recolectadas de campos cañeros

durante las zafas azucareras 2016, 2017, 2018 y 2019. Todas las muestras analizadas pertenecen a la variedad de caña LCP 85-384. Se determinaron los componentes mayoritarios de las cenizas, según Pronobis (2005). Los metales considerados fueron: aluminio (Al), calcio (Ca), hierro (Fe), magnesio (Mg), potasio (K), silicio (Si), sodio (Na), titanio (Ti) y fósforo (P). Además, se determinaron los contenidos de cloro total (Cl) y azufre total (S) en las muestras de cenizas por ser elementos promotores de la corrosión y formación de depósitos en las superficies de intercambio de calor (Ojeda *et al.*, 2022).

Determinación del contenido de cenizas

El contenido de cenizas se determinó en base seca a partir de las muestras de biomásas recolectadas, empleando un horno tipo mufla marca ORL. Se trabajó a 550°C, durante ocho horas y hasta alcanzar peso constante, siguiendo la norma ASTM D 5142 modificada.

Determinación de cloro en cenizas

Para la determinación del contenido de Cl se siguió la metodología propuesta en la norma ASTM E 776-87 modificada, según Gutierrez *et al.* (2016). La modificación a la norma consistió en la realización de una valoración por precipitación, usando como indicador una solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), como indica el "Standard Methods" (2012) para la determinación de cloruros en agua, en vez de la valoración potenciométrica establecida en la norma original.

Determinación de azufre en cenizas

Para la determinación del contenido de S se siguió la metodología propuesta en la norma ASTM D 3177-02, creada originalmente para carbón mineral. Para ello se siguió el método B, también llamado "método de lavado de la bomba", donde se determinó el contenido de S mediante la combustión de una muestra de biomasa en bomba calorimétrica, según Mistretta *et al.* (2019).

Determinación de fósforo en cenizas

Para la determinación del contenido de P se determinó por colorimetría, siguiendo la metodología SMWW Part 4500-P-C, propuesta en el "Standard Methods" para agua y aguas residuales (SM, 2017).

Análisis de metales en cenizas

Las determinaciones de los contenidos de metales se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Metales, de la Sección Química de los Productos Agroindustriales de la Estación Experimental Agroindustrial (EEAOC), mediante la técnica de espectrometría de absorción atómica (EAA); salvo el K, que se realizó por emisión atómica (EEA), basada en la norma ASTM D 3682-01 modificada para biomasa.

Como punto de partida se procedió a la descontaminación de todo el material utilizado; este fue lavado con detergente no iónico y enjuagado varias veces con agua desionizada, para luego ser descontaminado con

ácido nítrico y enjuagado con agua desionizada. La preparación previa al análisis consistió en digestiones de las cenizas de las biomásas ensayadas, una por vía seca (cenizas carbonatadas) y otra por vía húmeda (en medio ácido).

Para el análisis de Ca, Fe, Mg, K y Na se siguió la metodología propuesta por Feng *et al.* (1999). Se prepararon cenizas carbonatadas de las muestras a partir de 0,5 g de las muestras iniciales y se calcinaron dos veces en mufla a 550°C durante 2 h. Luego se solubilizaron en ácido nítrico y se diluyeron a 50 ml en matraz de vidrio. Asimismo, para el análisis del Al, Si y Ti se realizó una digestión ácida. Para ello se pesó 0,1 g de muestra de ceniza original que se colocó en tubos de teflón, se agregó 4 ml de ácido nítrico concentrado y se calentó en baño termostático entre 95° y 100°C hasta la eliminación de los vapores pardos. Posteriormente, se agregó 2 ml de ácido fluorhídrico (HF) al 48%, continuando el calentamiento en el baño termostático por 15 min más. Se enfrió a temperatura ambiente y se diluyó a 25 ml en matraz de plástico.

Las concentraciones se determinaron por aspiración directa en la llama de las muestras digeridas, previa realización de una curva de calibración donde se esta-

bleció la relación Absorbancia-Concentración del analito. Para ello, se prepararon soluciones estándares de los metales a partir de estándares comerciales de 1000 mg/L trazables a NIST. Para la estabilización de estos estándares se utilizó ácido nítrico. En todos los casos se emplearon reactivos grado pro-análisis y agua desionizada de 18,2 MΩ cm.

Las absorbancias se leyeron en un espectrómetro de absorción atómica, marca PerkinElmer, modelo Analyst 100, empleando las condiciones estándares que se indican en Tabla 1, según lo indicado por Golato (2021).

Determinación de la concentración de óxidos en cenizas

Las determinaciones de los contenidos de los óxidos mayoritarios en las cenizas de bagazo y de RAC de caña de azúcar se realizaron según la estequiometría de las reacciones de oxidación de los metales, siguiendo la norma ASTM D 3682-01, conforme a la concentración de metales encontrados en dichas cenizas. La Tabla 2 muestra un resumen de las ecuaciones estequiométricas supuestas y las fórmulas utilizadas para las determinacio-

Tabla 1. Condiciones estándares para las determinaciones por EAA y EEA (Golato, 2021).

Metal	Longitud de onda [nm]	Método/Llama	Curva de calibración [mg/L] (lineal) [mg/L]	Se adiciona
Aluminio	309,3	EAA/Nitroso-acetileno	5, 10, 15 y 20	0,1 % de cloruro de potasio
Calcio	422,7	EAA/Aire-acetileno	1,5, 2,5 y 5,0	0,1 % de cloruro de potasio y 0,1 % de cloruro de lantano
Hierro	248,3	EAA/Aire-acetileno	0,25, 0,50, 1,0 y 1,5	Sin adicionales
Magnesio	285,2	EAA/Aire-acetileno	0,25, 0,50 y 1,0 (no lineal)	0,1 % de cloruro de potasio y 0,1 % de cloruro de lantano
Potasio	766,5	EEA/Aire-acetileno	0,1, 0,3 y 0,5	0,1 % de cloruro de lantano
Silicio	251,6	EAA/Nitroso-acetileno	20, 50 y 100	1,0 % de ácido fluorhídrico (HF)
Sodio	589,0	EAA/Aire-acetileno	0,1, 0,3 y 0,5	0,1 % de cloruro de potasio
Titanio	364,3	EAA/Nitroso-acetileno	10, 20 y 50	0,1 % de cloruro de potasio

Tabla 2. Ecuaciones utilizadas en la determinación de %Óxido a partir de los elementos mayoritarios encontrados en cenizas (Golato, 2021).

Elemento mayoritario	Peso atómico (metal/no metal) [g/mol]	Peso molecular (óxido) [g/mol]	Reacción estequiométrica (oxidación)	%Óxido
Silicio (Si)	28,08	60,07	$\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$	$\% \text{SiO}_2 = \text{Si} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \cdot \frac{\text{PM}_{\text{SiO}_2}}{\text{PA}_{\text{Si}} \cdot 10}$
Aluminio (Al)	27,00	102,00	$4 \text{ Al} + 3 \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ Al}_2\text{O}_3$	$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{Al} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \cdot \frac{\text{PM}_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{2 \cdot \text{PA}_{\text{Al}} \cdot 10}$
Titanio (Ti)	47,90	79,90	$\text{Ti} + \text{O}_2 \rightarrow \text{TiO}_2$	$\% \text{TiO}_2 = \text{Ti} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \cdot \frac{\text{PM}_{\text{TiO}_2}}{\text{PA}_{\text{Ti}} \cdot 10}$
Hierro (Fe)	55,8	159,2	$4 \text{ Fe} + 3 \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ Fe}_2\text{O}_3$	$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{Fe} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \cdot \frac{\text{PM}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}{2 \cdot \text{PA}_{\text{Fe}} \cdot 10}$
Calcio (Ca)	40,08	56,08	$2 \text{ Ca} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ CaO}$	$\% \text{CaO} = \text{Ca} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \cdot \frac{\text{PM}_{\text{CaO}}}{\text{PA}_{\text{Ca}} \cdot 10}$
Magnesio (Mg)	24,3	40,3	$2 \text{ Mg} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ MgO}$	$\% \text{MgO} = \text{Mg} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \cdot \frac{\text{PM}_{\text{MgO}}}{\text{PA}_{\text{Mg}} \cdot 10}$
Sodio (Na)	22,98	61,97	$4 \text{ Na} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ Na}_2\text{O}$	$\% \text{Na}_2\text{O} = \text{Na} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \cdot \frac{\text{PM}_{\text{Na}_2\text{O}}}{2 \cdot \text{PA}_{\text{Na}} \cdot 10}$
Potasio (K)	39,1	94,2	$4 \text{ K} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ K}_2\text{O}$	$\% \text{K}_2\text{O} = \text{K} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \cdot \frac{\text{PM}_{\text{K}_2\text{O}}}{2 \cdot \text{PA}_{\text{K}} \cdot 10}$
Fósforo (P)	30,97	141,94	$4 \text{ P} + 5 \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ P}_2\text{O}_5$	$\% \text{P}_2\text{O}_5 = \text{P} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \cdot \frac{\text{PM}_{\text{P}_2\text{O}_5}}{2 \cdot \text{PA}_{\text{P}} \cdot 10}$
Azufre (S)	32,06	80,06	$2 \text{ S} + 3 \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ SO}_3$	$\% \text{SO}_3 = \text{S} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \cdot \frac{\text{PM}_{\text{SO}_3}}{\text{PA}_{\text{S}} \cdot 10}$

nes de los porcentajes de óxidos (%Óxido), a partir de los elementos correspondientes y de sus pesos moleculares, considerando una reacción completa, según lo indicado por Golato (2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra los resultados obtenidos de la concentración de elementos mayoritarios encontrados en cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar, analizadas en el presente estudio. Los valores se encuentran expresados en gramo [g] del elemento por kilogramo [kg] de ceniza en base seca. La Figura muestra que los elementos de mayor proporción en cenizas de bagazo fueron el Si (241,1 g/kg), K (42,2 g/kg), Al (38,0 g/kg), Ca (11,0 g/kg) y Fe (7,8 g/kg); y en cenizas de RAC fueron el Si (257,5 g/kg), K (119,1 g/kg), Ca (53,3 g/kg), Mg (14,9 g/kg) y Na (5,7 g/kg).

Las concentraciones de Si y Al les infiere a las cenizas características ácidas, por lo que es de esperar que las mismas mantengan iguales propiedades en su estructura final. Por otro lado, es probable que el elevado contenido de K, en combinación con Si, Ca y Mg, influya negativamente en la estructura química final de las escorias por su condición alcalina, lo que traería aparejado problemas de fusibilidad a elevadas temperaturas, según lo observado por Nogués *et al.* (2010).

Comparando las cenizas de ambas biomásas, es de esperarse que el RAC presente cenizas con características más básicas respecto al bagazo, debido a los mayores contenidos de elementos alcalinos encontrados en esta biomasa, lo que provocaría menores temperaturas de fusión en las cenizas, según lo indicado por Vamvuka *et al.* (2017). La Figura 2 muestra las correspondientes con-

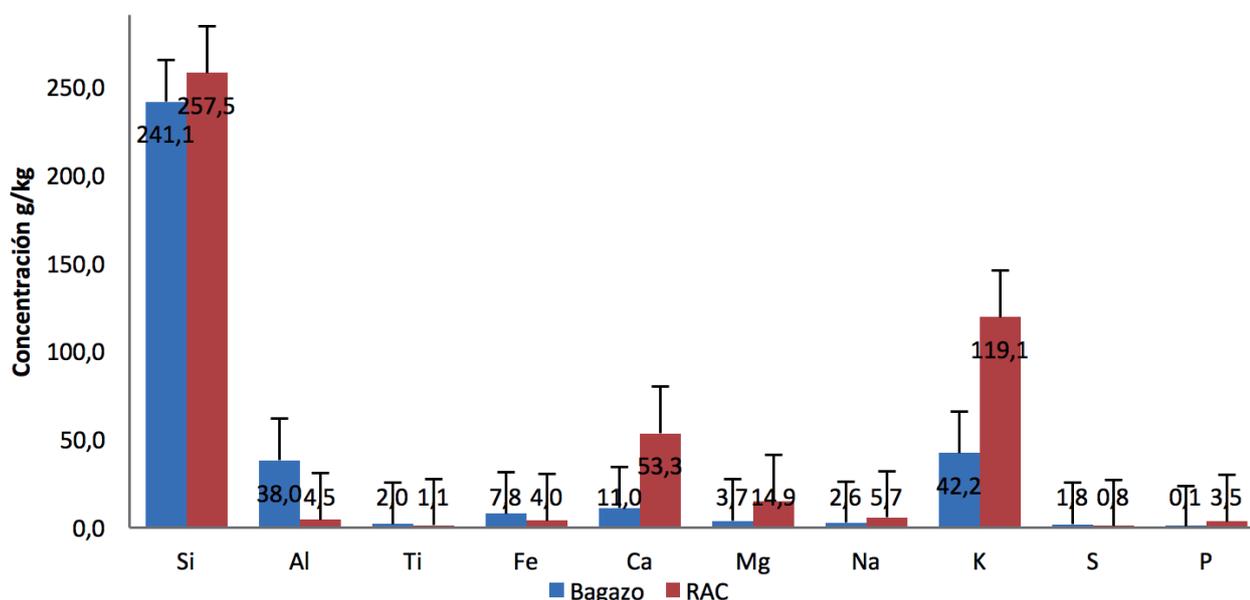


Figura 1. Concentración de elementos mayoritarios en cenizas de bagazo y RAC de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

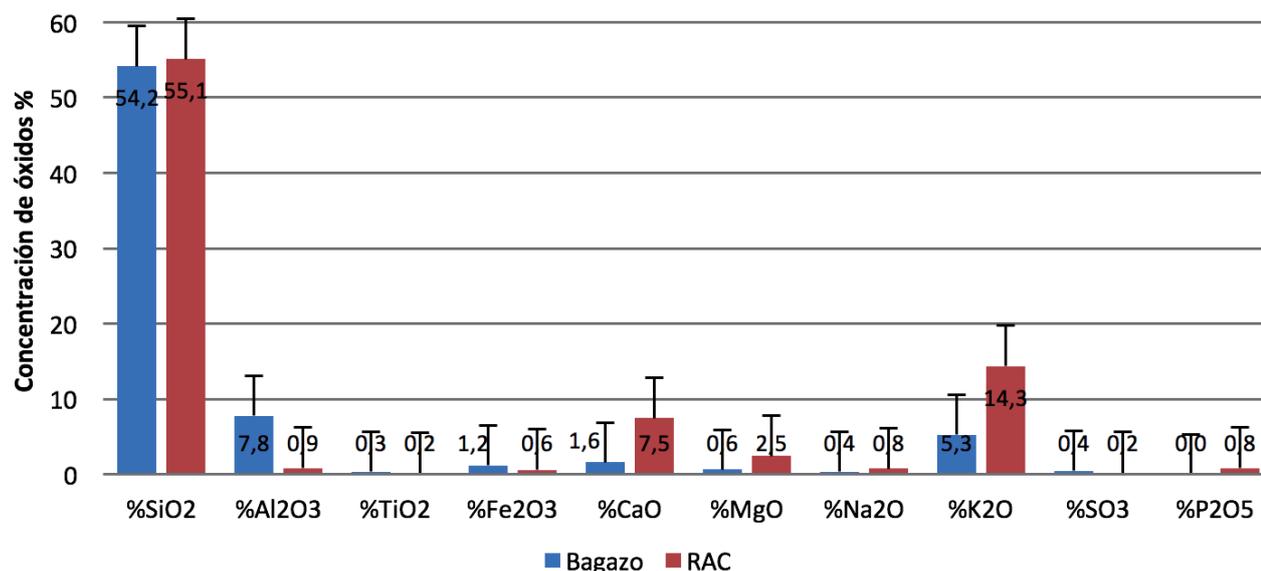


Figura 2. Concentración de óxidos mayoritarios en cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

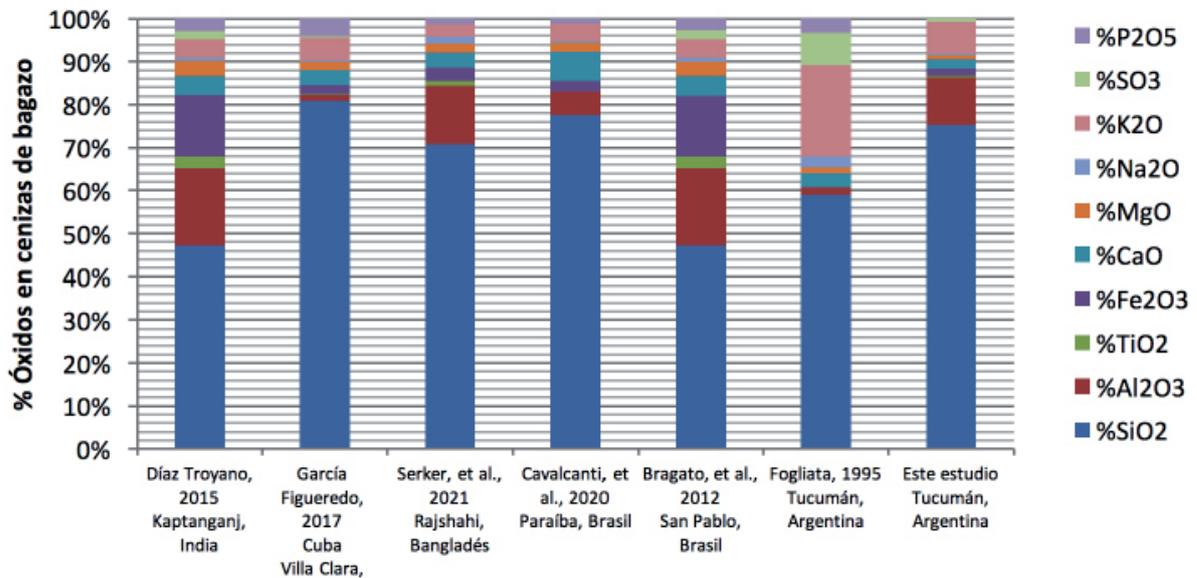


Figura 3. Composición química de cenizas de bagazo de caña de azúcar para diferentes regiones del mundo. Elaboración propia.

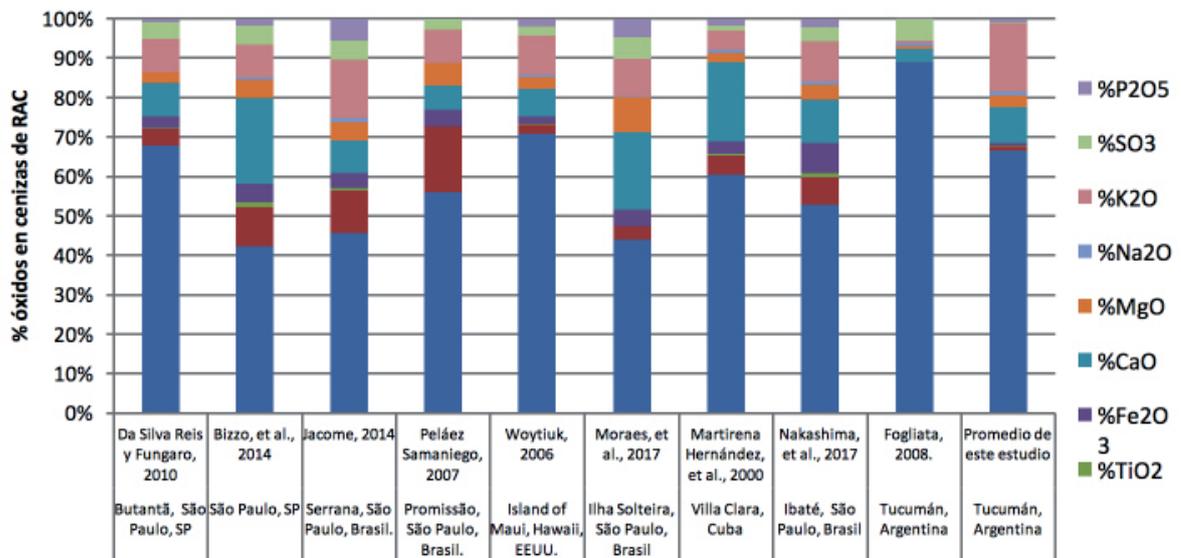


Figura 4. Composición química de cenizas de RAC de caña de azúcar para diferentes regiones del mundo. Elaboración propia.

centraciones promedio de los elementos mayoritarios (expresados como óxidos). Además, se indica el error típico como índice de dispersión para cada elemento analizado.

La Figura 3 muestra una comparación entre los óxidos mayoritarios encontrados en los bagazos de este estudio en relación a los informados por otros autores para diferentes regiones del mundo. Es importante observar que existen diferencias significativas entre los mismos, incluso para bagazos de nuestra región, según puede constatarse con los datos informados por Fogliata (1995). Este hecho podría deberse a diferencias en la variedad de caña de azúcar, tipo de cosecha, rendimiento de la máquina cosechadora, tipo de zona agroecológica (suelos diferentes), acondicionamiento de la biomasa para su estudio, técnicas diferentes de análisis, etc. No obstante, los valores informados se encuentran en igual orden de magnitud a los considerados de referencia.

La Figura 4 muestra una comparación promedio entre los óxidos mayoritarios encontrados en RAC de este estudio en relación a los informados para otras regiones del mundo. Aquí también se pueden observar diferencias significativas entre los parámetros analizados por similares causas a las indicadas para bagazo. No obstante, estos resultados se encuentran en igual orden de magnitud a los tomados de referencia.

CONCLUSIONES

Se observó que los principales componentes en las cenizas de bagazo de caña de azúcar fueron: Si (241,1 g/kg), K (42,2 g/kg), Al (38,0 g/kg), Ca (11,0 g/kg) y Fe (7,8 g/Kg); los óxidos mayoritarios equivalentes fueron: SiO₂ (54,2%), Al₂O₃ (7,8%), K₂O (5,3%), CaO (1,6%) y

Fe₂O₃ (1,2%). Con respecto al RAC, las cenizas presentaron los siguientes elementos principales: Si (257,5 g/kg), K (119,1 g/kg), Ca (53,3 g/kg), Mg (14,9 g/kg) y Na (5,7 g/kg); y los óxidos mayoritarios fueron: SiO₂ (55,1%), K₂O (14,3%), CaO (7,5%), MgO (2,5%) y Na₂O (0,8%). Comparando ambas biomásas, se puede observar que el RAC en promedio posee 6,8% más de Si en relación al bagazo. El contenido promedio de Al en bagazo fue 8,4 veces mayor en relación al RAC (38 g/kg vs. 4,5 g/kg). Estos elementos (Si y Al) infieren a las cenizas características ácidas, formadoras de estructuras vítreas compuestas por silicatos, donde la fusibilidad de las mismas dependerá de las concentraciones de los elementos alcalinos presentes, según lo indicado por Chong *et al.* (2019). Con respecto a los componentes alcalinos, el RAC presentó 4,84 veces mayores concentraciones de Ca en relación al bagazo (53,3 g/kg vs. 11,0 g/kg). Los contenidos de Mg en RAC también fueron mayores en aproximadamente cuatro veces (14,9 g/kg vs. 3,7 g/kg); y la concentración de K en RAC también resultó mayor en 2,84 veces (119,1 g/kg vs. 42,2 g/kg). Por ello, es de esperarse que la utilización de RAC como combustible de caldera tendría menores temperaturas de fusión de cenizas en relación al bagazo, ya que los elementos alcalinos infieren a las cenizas la formación de eutécticos de bajos puntos de fusión, según lo indicado por Vamvuka *et al.* (2017) en biomasa y lo observado por Golato *et al.* (2022a) para bagazo y RAC de Tucumán, Argentina.

Estos resultados servirán de base de comparación para futuros análisis de las biomásas estudiadas; además, a partir de los mismos podrían determinarse los índices de comportamiento de las cenizas que brindan las relaciones de deposición teórica que tendrían en el interior del hogar de una caldera de vapor, según Febrero Garrido (2015) y Pronobis (2005).

■ AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen 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

- Bizzo, W. A., P. C. Lenço, D. J. Carvalho y J. Paulo Soto Veiga, 2014.** The generation of residual biomass during the production of bio-ethanol from sugarcane, its characterization and its use in energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29: 589–603.
- Bragato M., J. Kulbushan, J. B. Carlson, J. A.S. Tenório y Y. A. Levendis, 2012.** Combustion of coal, bagasse and blends thereof: Part I: Emissions from batch combustion of fixed beds of fuels, *Fuel*, Volume 96: pp 43-50, ISSN 0016-2361. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.12.072>.
- Casen, S. D.; E. Romero; F. Leggio; A. Torres Bugeau; D. Perez; V. Paredes y E. Feijoo. 2015.** Manejo de los residuos agrícolas de la cosecha de caña de azúcar. Disponibilidad potencial y alternativas de enfardado. *Revista Avance Agroindustrial* 36 (4): 20-26.
- Casen, S. D.; L. A. Marto; M. M. Medina; R. E. Romero; A. Torres Bugeau y D. Perez. 2012.** Evaluación del desempeño de dos enfardadoras para la recolección de residuo agrícola de cosecha (RAC) de caña de azúcar en Tucumán. Disponible en: <http://www.eeaoc.org.ar/upload/contenido/pdf/20121122111107000000.pdf> Consultado en febrero de 2021.
- 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): pp. 1465-1472. ISSN 0016-2361, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.135> Consultado en diciembre de 2021.
- Da Silva Reis, T. V. y D. A. Fungaro. 2010.** Termoquímica de palha de cana-de-açúcar. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Disponible en: <https://www.ipen.br/biblioteca/2010/resumos/16173.pdf>
- Díaz Troyano; M. 2015.** Análisis de viabilidad técnica de un proyecto de valorización energética de residuos. Criterios básicos de diseño. *Combustión Biomass Service, S.L.(CBS)*. Puerto de Santa María, Cádiz, España. Disponible en: <https://cupdf.com/document/viabilidad-biomasas.html>
- Fandos, C.; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés; F. J. Soria y H. Salas. 2016.** Estimación del área implantada con cítricos en Tucumán en 2016 y comparación con años precedentes. Relevamiento satelital de cultivos de la provincia de Tucumán. *Reporte agroindustrial* 129. Disponible en: <http://www.eeaoc.org.ar/publicaciones/categoria/22/651/Estimacion-del-area-implantada-con-citricos-en-Tucuman-en-2016-y-comparacion-con-anos-precedentes.html> Consultado en diciembre de 2021.
- Febrero Garrido, L. 2015.** Contribuciones en la investigación de las cenizas y del ensuciamiento en calderas de combustión de biomasa: técnicas analíticas y contraste experimental. Tesis doctoral. *Escola de Enxeñería Industrial. Universidade de Vigo*. España. Disponible en: <http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/handle/11093/354>. Consultado en enero de 2022.
- 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. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán (RIAT)* 92 (2): 23-32.
- Feng, W.; S. Wu; A. Wharmby and A. Wittmeier. 1999.** Microwave digestion of plant and grain standard reference materials in nitric and hydrofluoric acid for multi-elemental determination by inductively coupled plasma mass spectrometry. *J. Anal. At. Spectrom* (14): 939 – 946.
- Fernández de Ullivarri, J; P. Digonzelli; M. Medina; F. Pérez Alabarce; F. Leggio Neme y A. Marto. 2012.** Efecto del residuo de la cosecha en verde de la caña de azúcar sobre la humedad del suelo en el este de Tucumán, R. Argentina. *Revista Avance Agroindustrial* 33 (2): 17-22.
- Fogliata, F. A. 1995.** Agronomía de la caña de azúcar.

- Tecnología, Costos y Producción. Ed. El Graduado. Tomo 1: pp. 187-189.
- Fogliata F. A., 2008.** Biocombustibles. Una mirada hacia el 2010. Su impacto en el país y en el NOA. 1. ed., Ed. El Graduado. Tucumán. Argentina.
- García Figueredo, Y. 2017.** Tesis "Desarrollo y caracterización de un material compuesto de matriz de aluminio". Grupo de Física de los Materiales. Facultad de Matemática, Física y Computación. Departamento de Física. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Santa Clara, Cuba. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/8703/Tesis%20YadelvysV.F.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Golato, M. A.; C. E. Gutierrez; G. del H. Zamora Rueda; G. Juárez; N. Kamiya y D. Paz. 2022.** Estudio preliminar de los índices de comportamiento y fusibilidad de las cenizas de bagazo y de los residuos de cosecha de la caña de azúcar (RAC) de Tucumán, Argentina. XXII Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar. Tucumán, Argentina.
- Golato, M. A.; C. E. Gutierrez; G. del H. Zamora Rueda; N. Kamiya y D. Paz, 2022a.** Estudio de la variación de las temperaturas de fusión de cenizas de bagazo y de residuos de cosecha de la caña de azúcar (RAC) de Tucumán, Argentina en función de sus componentes ácidos y básicos. XXII Reunión-Técnica Nacional de la Caña de Azúcar. Tucumán, Argentina.
- 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 final para obtener el título de Magister en Ingeniería Bioenergética. Universidad Tecnológica Nacional (UTN). Facultad Regional Tucumán (FRT). Tucumán, Argentina. Disponible en: https://ria.utn.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12272/6079/Tesis%20de%20Maestr%C3%ADa%20Goloto%202021_versi%C3%B3n%20final-final.pdf?sequence=1. Consultado enero 2022.
- Golato M. A.; E. A. Feijóo; F. J. Franck Colombres; D. Paz y G. J. Cárdenas. 2017.** Estudio preliminar del aprovechamiento de los residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar como combustible adicional para calderas bagaceras de Tucumán (Argentina). Revista industrial y agrícola de Tucumán (RIAT) 94 (2): 21-31.
- Gutiérrez, C.; M. G. Mistretta; G. Zamora Rueda; F. Peralta; M. A. Golato; M. Coronel; M. Ruiz y G. J. Cárdenas. 2016.** Contenido de cloro total en residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC) en Tucumán. Revista industrial y agrícola de Tucumán (RIAT) 93 (2): 19 - 25.
- Jacome, D. L. F., 2014.** Caracterização Físicoquímica das Cinzas de Palha de Cana de Açúcar Através de Análises Térmicas Simultâneas (STA). Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/296874497.pdf>
- Martirena Hernandez, J. F.; S. Betancourt; B. Middendorf; A. Rubio; L. Martinez; J. López y R. González. 2000.** Propiedades puzolánicas de desechos de la industria azucarera (primera parte). Materiales de Construcción - MATER CONSTR. 50: 71-78. Disponible en: 10.3989/mc.2000.v50.i260.392.
- Melissari, B. 2012.** Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa. Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica (10): 69-82.
- Mistretta, M. G.; C. Gutiérrez; G. Zamora Rueda; F. Peralta; M.A. Golato; D. Paz; G. J. Cárdenas y M. Ruiz. 2019.** Contenido de azufre total del residuo agrícola de la cosecha de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Revista industrial y agrícola de Tucumán 96 (1): 49 - 54.
- Moraes, J. C. B.; J. L. Akasaki; M. M. Tashima; L. Soriano; M. V. Borrachero y J. Payá. 2017.** Utilización de la ceniza de la paja de caña de azúcar (CPC) como puzolana en sustituciones parciales del cemento Portland. Asociación Española de Materiales Compuestos (AEMAC), vol 2 (1): 6-9. Disponible en: <http://revista.aemac.org/>
- Nakashima, G. T.; M. Provedel Martins, A. L. Santiago Hansted, H. Yamamoto, F. Minoru Yamaji. 2017.** Sugarcane trash for energy purposes: ¿Storage time and particle size can improve the quality of biomass for fuel?, Industrial Crops and Products, Volume 108: 641-648, ISSN 0926-6690. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.017>.
- Nogués, F. S; D. García Galindo y A. Rezeau. 2010.** Energías Renovables. Energía de la Biomasa. 1º Edición, Volumen 1 Prensa Universitaria de Zaragoza, Zaragoza-España.
- Ojeda, W.; F. Ospina; T. Pantoja y N. Gil. 2022.** Caracterización de depósitos generados en la combustión de RAC, bagazo y carbón en calderas del sector azucarero colombiano. XII Congreso Tecnicaña. Yumbo, Valle del Cauca, Colombia. pp. 948-960.
- Peláez Samaniego, M. R. 2007.** Uso de biocombustível da pirólise rápida da palha de cana em um motor de ciclo Otto. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Comissão de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Disponible en: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=473172>
- Perkin Elmer Instruments Inc. 2000.** Manual Part Number 0303-0152 Realse E, Norwalk, USA. Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (Probiomasa), 2020. Proyecto UTF/ARG/020/ARG. Banco de proyectos. Disponible en: http://www.probiomasa.gob.ar/sitio/es/bp_mapa.php Consultado en enero de 2022.
- Pronobis, M. 2005.** Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations. Biomass and Bioenergy 28: pp. 375-383. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096195340400193X> Consultado en diciembre de 2021.
- Serker, N. K.; R. U. Hafiz; A. H. M. Ashashanur Rahman y M. Ashikuzzaman. 2021.** Suitability of using sugarcane bagasse ash as partial replacement of cement in concrete. 5th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE 2020). CUET, Chattogram, Bangladesh. Disponible en: <https://>

www.researchgate.net/publication/349832430

Tortora, M. L.; L. Vera; N. Grellet Naval; J. Fernández de Ullivarri; P. A. Digonzelli y E. R. Romero. 2013.

Efecto de la cobertura con residuo agrícola de cosecha sobre el desarrollo de microorganismos de importancia agronómica y ambiental. Revista Avance Agroindustrial 34 (4): 32-26.

Vamvuka, D.; M. Trikouvertis; D. Pentari; G. Alevizos and A. Stratakis. 2017. Characterization and evaluation of fly and bottom ashes from combustion of residues

from vineyards and processing industry. Journal of the Energy Institute, 90 (4): 574-587. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.05.004>. Consultado en febrero de 2022.

Woytiuk, K. 2006. Sugar Cane Trash Processing for Heat and Power Production. Master's Thesis. Department of applied physics and mechanical engineering. Lulea University of Technology, Lulea, Switzerland. Disponible en: <https://www.divaportal.org/smash/get/diva2:1027772/FULLTEXT01.pdf>

