



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

FACULTAD REGIONAL TUCUMÁN

ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE FUSIÓN DE CENIZAS DE CALDERAS DE BIOMASA EN FUNCIÓN DE SUS COMPONENTES ÁCIDOS Y BÁSICOS

Magister en Ingeniería Bioenergética

Esp. Ing. Mec. Marcos A. Golato

Tutor: Dra. Dora Paz

Co-tutor: Dra. Norma Kamiya

20/10/2021

AUTORIDADES DE UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

Rector: Ing. Héctor Aiassa

Vicerrector: Ing. Haroldo Avetta

AUTORIDADES DE FACULTAD REGIONAL TUCUMÁN

Decano: Mg. Ing. Walter Fabián Soria

Vicedecano: Ing. Juan Esteban Campos

Secretario Académico: Ing. Luis D'Alessandro

Secretario Administrativo: CPN. Jorge Eduardo Sueldo

Secretario de Ciencia y Tecnología: Mg. Ing. Patricia Albarracín

Secretario de Extensión Universitaria: Ing. Miguel Ángel Terrera

Secretario de Asuntos Estudiantiles: Srta. Noemí Murillo

Director de Graduados: Lic. Daniel Vásquez

Director de Escuela de posgrado: Dra. Marta Pesa

Director Carrera de posgrado Ing. Bioenergética: Ing. Gerónimo Cárdenas

Sub director de la Carrera de posgrado Ing. Bioenergética: Dr. Carlos Gusils

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presente no hubiera sido posible sin la colaboración de mi familia, amigos y de algunos destacados profesionales. Entre los cuales se encuentran mi amada esposa Milagro, mi hijo Felipe (la razón de mi vida); el Mg. Eugenio Quaia (Nino), la Dp. Lilian Rodríguez (Kenny), el Dg. Silvio Salmoiraghi; la Farm. Gabriela Juárez; la Ing. Mónica Coronel, la Dra. Silvia Zossi, la Dra. Andrea Peña Malavera; el Dr. Eduardo Romero; el Dr. Juan Carlos Luján; la Dra. Norma Kamiya; y mis queridas compañeras de trabajo, las Ings. Gimena Zamora Rueda, Cynthia Gutierrez y Gabriela Mistretta. Un agradecimiento especial para la Dra. Dora Paz por su enseñanza y generosidad; y a la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (mi segunda casa).

INDICE TEMÁTICO

1.	INTRODUCCIÓN GENERAL.....	14
1.1	Ensayos normalizados de fusibilidad de cenizas de un combustible.	16
1.2	La importancia del contenido de hierro (Fe) en la fusibilidad de las cenizas.	18
1.3	El diseño del horno y los depósitos de cenizas	20
1.4	Relación entre los componentes básicos y ácidos de las cenizas.	21
1.5	Influencia de los álcalis en el ensuciamiento con cenizas.	23
1.6	Viscosidad de las cenizas de un combustible.....	25
1.7	Mecanismo de fusión de las cenizas de un combustible.	27
1.8	Indicadores basados en la composición química de las cenizas.	30
1.9	Influencia de las cenizas en la calidad de una biomasa combustible.	32
1.10	Estudios de fusibilidad de las cenizas de biombras.	33
1.11	Composición global de las cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar.....	38
1.12	Matriz energética Argentina.	39
1.13	Producción de energía con biomasa en Argentina.	41
1.14	Producción potencial de energía con biomasa en Tucumán.	42
1.15	El bagazo de caña de azúcar.....	42
1.16	Residuos de la cosecha de la caña de azúcar (RAC).....	44
1.17	Otros residuos agrícolas con potencial energético	44
2.	OBJETIVOS E HIPOTESIS.....	46
2.1	Objetivo GeneRal	46
2.2	Objetivos Específicos.....	46
2.3	HIPÓTESIS	47
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
3.1	Índices de comportamiento de las cenizas de un combustible	48
3.1.1.	Relación base-ácido ($R_{B/A}$) como índice de escorificación	48
3.1.2.	Índice de sinterización (IS).....	49
3.1.3.	Índice de ensuciamiento (AI).....	49
3.1.4.	Índice de escorificación por acción del azufre (R_s).....	49
3.1.5.	Índice de deposición “fouling” (F_u).....	50
3.1.6.	Índice de reacción del potasio (I_{K-SiO_2}).....	50
3.1.7.	Índice de sulfatación ($I_{Sulf.}$).....	50

3.1.8. Índice de corrosión ($I_{S/Cl}$).....	51
3.1.9. Índice de formación de silicatos ($I_{Ca/Si}$)	51
3.1.10. Índice de erosión ($I_{Erosión}$)	51
3.1.11. Índice de viscosidad (S_R)	52
3.2 Composición de las cenizas de las biomásas combustibles.	52
3.3 Características de los óxidos comerciales puros utilizados como patrones	53
3.4 Caracterización físico-química y energética de las biomásas analizadas.....	55
3.4.1 Análisis inmediatos realizados en muestras de bagazo y RAC	55
3.4.2 Determinación del poder calorífico eN muestras de bagazo y RAC.....	55
3.4.3 Determinación del contenido de cloro en cenizas de bagazo y RAC.....	56
3.4.4 Determinación del contenido de azufre en cenizas de bagazo y RAC.....	56
3.4.5 Análisis de metales en cenizas de bagazo y RAC	56
3.4.6 Determinación de la concentración de óxidos en cenizas de bagazo y RAC.....	58
3.4.7 Análisis de la fusibilidad de las cenizas.....	59
3.4.8 Sensibilidad de los óxidos en la fusibilidad de las cenizas.....	60
3.4.9 Formulación de las cenizas sintéticas por medio de los óxidos comerciales puros.....	60
3.5 Estudio de la fusión de cenizas sintéticas sobre placas de acero estándar.	62
4. RESULTADOS y DISCUSIÓN.....	64
4.1 Índices globales del comportamiento de las cenizas de bagazo de caña de azúcar.....	64
4.2 Índices globales del comportamiento de las cenizas de RAC de caña de azúcar.....	65
4.3 Índices de comportamiento de las cenizas de carbón mineral.....	65
4.4 Caracterización físico-química y energética de las biomásas analizadas.....	66
4.5 Metales mayoritarios en cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar de Tucumán Argentina. 67	
4.6 Óxidos mayoritarios en cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar de Tucumán - Argentina. 68	
4.7 Índices de comportamiento de las cenizas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán - Argentina.	71
4.8 Índices de comportamiento de las cenizas de RAC de caña de azúcar de Tucumán – Argentina.74	
4.9 Composición real de las muestras sintéticas.	77
4.10 Fusibilidad de las cenizas sintéticas para el estudio de sensibilidad de los componentes.....	78
4.11 Sensibilidad de los óxidos ácidos en las cenizas sintéticas formuladas.	80
7.11.1 Sensibilidad del $\%Al_2O_3$ sobre la fusibilidad de las cenizas sintéticas formuladas.....	80
7.11.2 Sensibilidad del $\%SiO_2$ sobre la fusibilidad de las cenizas sintéticas formuladas.....	81
7.11.3 Sensibilidad del $\%TiO_2$ sobre la fusibilidad de las cenizas sintéticas formuladas.....	83
4.12 Sensibilidad de óxidos básicos en las cenizas sintéticas formuladas.	85

4.12.1	Sensibilidad del %Fe ₂ O ₃ sobre la fusibilidad de las cenizas sintéticas.....	85
4.12.2	Sensibilidad del %CaO sobre la fusibilidad de las cenizas sintéticas formuladas.....	86
4.12.3	Sensibilidad del %MgO sobre la fusibilidad de las cenizas sintéticas formuladas.	88
4.12.4	Sensibilidad del %Na ₂ O sobre la fusibilidad de las cenizas sintéticas.	90
4.12.5	Sensibilidad del %K ₂ O sobre la fusibilidad de las cenizas sintéticas.....	92
4.12.6	Sensibilidad del %P ₂ O ₅ sobre la fusibilidad de las cenizas sintéticas.	94
4.12.7	Sensibilidad del %SO ₃ sobre la fusibilidad de las cenizas sintéticas.....	96
4.13	Sensibilidad del índice "AI" sobre la fusibilidad de las cenizas sintéticas.....	97
4.14	Incidencia de los óxidos mayoritarios sobre a la fusibilidad de las cenizas sintéticas.....	99
4.15	Resultado de la formulación de las cenizas sintéticas de bagazo y de rac de caña de azúcar.	100
4.16	Fusibilidad de cenizas las sintéticas de bagazo y rac en función de sus componentes ácidos y básicos.	100
4.16.1	Fusibilidad de cenizas sintéticas de bagazo en Atmósfera Oxidante.	103
4.16.2	Fusibilidad de cenizas sintéticas de bagazo en Atmosfera Reductora.	104
4.17	Fusibilidad de las cenizas sintéticas de RAC en función de componentes ácidos y básicos	106
4.17.1	Fusibilidad de cenizas sintéticas de RAC en Atmósfera Oxidante	107
4.17.2	Fusibilidad de cenizas sintéticas de RAC en Atmósfera Reductora.	109
4.18	Correlación de temperaturas de fusión de cenizas sintéticas de bagazo y RAC en función de sus componentes ácidos y básicos	111
4.19	Resultados del estudio de fusión de las cenizas sintéticas sobre placas de acero estándar. ..	112
5.	CONCLUSIONES	116
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	120
7.	ANEXO	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Relaciones de deposición teórica de comportamiento de cenizas de madera, según Febrero Garrido, 2015.	32
Tabla 3.1. Características del multipatrón KH_2PO_4 , según Merck, 2021.	53
Tabla 3.2. Características del H_2SO_4 utilizado como patrón, según Merck, 2021.....	54
Tabla 3.3. Óxidos comerciales puros considerados en la formulación de las cenizas sintéticas. Elaboración propia.	54
Tabla 3.4. Condiciones estándares para las determinaciones por EAA y EEA. Elaboración propia, según Perkin Elmer, 2000	57
Tabla 3.5. Ecuaciones utilizadas en la determinación de %Óxidos a partir de los elementos metálicos en cenizas. Elaboración propia.	58
Tabla 3.6. Concentraciones de gases patrones para las definiciones de las AO y AR. Elaboración propia.....	59
Tabla 3.7. Variación de la composición de CA y CB en mezclas sintéticas de cenizas de biomosas. Elaboración propia.	61
Tabla 4.1. Resultados promedio de la caracterización físico-química y energética de las muestras de “bagazo” analizadas. Elaboración propia.....	66
Tabla 4.2. Resultados promedio de la caracterización físico-química y energética de las muestras de “RAC” analizadas. Elaboración propia.....	66
Tabla 4.3. Comparación de los componentes de las cenizas de bagazo analizadas en este estudio en relación a los encontrados globalmente. Elaboración propia.	69
Tabla 4.4. Comparación de los componentes de las cenizas de RAC analizadas en este estudio en relación a los encontrados globalmente. Elaboración propia.	70
Tabla 4.5. Comparación de los índices de comportamiento de las cenizas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán respecto a los encontrados globalmente. Elaboración propia.....	71
Tabla 4.6. Comparación de los índices de comportamiento de las cenizas de RAC de caña de azúcar de Tucumán respecto a los encontrados globalmente. Elaboración propia.	74
Tabla 4.7. Resultados del análisis de la fusibilidad en AO para el estudio de la sensibilidad de los componentes de las cenizas. Elaboración propia.....	78
Tabla 4.8. Resultados del análisis de la fusibilidad en AR para el estudio de la sensibilidad de los componentes de las cenizas. Elaboración propia.....	78
Tabla 4.9. Resultados del análisis de la fusibilidad en AO de las cenizas sintéticas de bagazo seleccionada de Tucumán - Argentina. Elaboración propia.	101
Tabla 4.10. Resultados del análisis de la fusibilidad en AR de las cenizas sintéticas de bagazo seleccionada de Tucumán - Argentina. Elaboración propia.	101
Tabla 4.11. Resultados del análisis de la fusibilidad en AO de las cenizas sintéticas de RAC seleccionados de Tucumán - Argentina. Elaboración propia.....	102
Tabla 4.12. Resultados del análisis de la fusibilidad en AR de las cenizas sintéticas de RAC seleccionados de Tucumán - Argentina. Elaboración propia.....	102
Tabla 4.13. Diferencias de temperaturas de fusibilidad de cenizas sintéticas de bagazo de Tucumán, trabajando en AO en función de los CA y CB. Elaboración propia.....	104
Tabla 4.14. Diferencias de temperaturas de fusibilidad de cenizas sintéticas de bagazo de Tucumán, trabajando en AR en función de los CA y CB. Elaboración propia.	106

Tabla 4.15. Diferencias de temperaturas de fusibilidad para cenizas sintéticas de RAC de Tucumán, trabajando en AO en función de los CA y CB. Elaboración propia.....	108
Tabla 4.16. Diferencias de temperaturas de fusibilidad para cenizas sintéticas de RAC de Tucumán, trabajando en AR en función de los CA y CB. Elaboración propia.	110
Tabla 7.1. Comparación de la composición de cenizas de carbón y depósitos de cenizas en paredes de agua de calderas. Adaptado de Borio y Lavasseur, 2006.....	129
Tabla 7.2. Composición y temperatura de fusión de cenizas de carbones y lignitos de USA, según Fernández Diez, 2000.....	129
Tabla 7.3. Efecto del Na ₂ O soluble en la resistencia de sinterización, según Fernández Diez, 2000 .	130
Tabla 7.4. Análisis inmediato de tres carbones seleccionados (modificado de Fernandez Diez, 2000)	130
Tabla 7.5. Análisis químico de cenizas de biomasa (% óxidos) en función de la temperatura de combustión. Adaptado de Vamvuka y Zografos, 2004	130
Tabla 7.6. Contenidos generales de óxidos mayoritarios de cenizas de bagazos de caña de azúcar para diferentes regiones. Elaboración propia.	131
Tabla 7.7. Contenidos generales de óxidos mayoritarios de cenizas de RAC de caña de azúcar para diferentes regiones. Elaboración propia.....	132
Tabla 7.8. Características productivas de los principales cultivos de Argentina. Fuente: adaptado de Montico y Di Leo, 2009.	133
Tabla 7.9. Potencial de energía térmica que podría producirse con los principales residuos agrícolas de Tucumán, según Golato, 2018.	133
Tabla 7.10. Potencial de EE que podría producirse con los principales residuos agrícolas de Tucumán, según Golato, 2018.	133
Tabla 7.11. Índices globales del comportamiento de la fusibilidad de cenizas de bagazo de caña de azúcar, para diferentes autores consultados. Elaboración propia.	134
Tabla 7.12. Índices globales del comportamiento de la fusibilidad de cenizas de RAC de caña de azúcar, para diferentes autores consultados. Elaboración propia.	135
Tabla 7.13. Índices de comportamiento para carbón mineral bituminoso de alto y bajo volátiles. Elaboración propia.	136
Tabla 7.14. Resultados de la caracterización físico-química y energética de las muestras de “bagazo” analizadas. Elaboración propia.	137
Tabla 7.15. Resultados de la caracterización físico-química y energética de las muestras de RAC analizadas. Elaboración propia	138
Tabla 7.16. Resultados de la composición de las cenizas de bagazo de caña de azúcar analizadas en este estudio. Elaboración propia	139
Tabla 7.17. Resultados de la composición de las cenizas de RAC analizadas en este estudio. Elaboración propia	139
Tabla 7.18. Contenidos de óxidos mayoritarios en muestras seleccionadas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.....	140
Tabla 7.19. Contenidos de óxidos mayoritarios en muestras seleccionadas de RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia	141
Tabla 7.20. Índices de comportamiento de la fusibilidad de cenizas de bagazo seleccionadas para este estudio. Elaboración propia.	142
Tabla 7.21. Parámetros adicionales utilizados en las determinaciones de los índices de comportamiento de las cenizas de bagazo de caña de azúcar. Elaboración propia.....	143

Tabla 7.22. Índices de comportamiento de la fusibilidad de cenizas de RAC seleccionadas para este estudio. Elaboración propia.	144
Tabla 7.23. Parámetros adicionales utilizados en las determinaciones de los índices de comportamiento de las cenizas de RAC de caña de azúcar. Elaboración propia	145
Tabla 7.24. Composición real de las muestras de cenizas sintéticas para el estudio de sensibilidad de los componentes. Elaboración propia.	146
Tabla 7.25. Fusibilidad de cenizas sintéticas para estudio de sensibilidad de los óxidos mayoritarios trabajando en AO. Elaboración propia.	147
Tabla 7.26. Fusibilidad de cenizas sintéticas para estudio de sensibilidad de los óxidos mayoritarios trabajando en AR. Elaboración propia.	147
Tabla 7.27. Formulación de las cenizas sintéticas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán - Argentina. Elaboración propia.	148
Tabla 7.28. Formulación de las cenizas sintéticas de RAC de caña de azúcar de Tucumán - Argentina. Elaboración propia.	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perfiles de los conos de ceniza en función de las temperaturas características de fusibilidad, según ASTM, 2010.....	17
Figura 2. Imagen de los conos de cenizas, antes y después del análisis de fusibilidad. Elaboración propia.....	17
Figura 3. Influencia del hierro en cenizas de carbón en función de la temperatura de fusión inicial DT, según Fernández Diez, 2000.	20
Figura 10. Variación de la viscosidad de escorias de carbón en función del %Fe total, según Fernández Diez, 2000.....	27
Figura 11. Disminución de las temperaturas de fusibilidad de las cenizas de carbón en función de las relaciones “ α ” y S/A, según Chong, et al., 2019.	29
Figura 12. Constitución de la materia que forman las cenizas de una biomasa, según Zevenhoven-Onderwater, 2001.....	34
Figura 13. Temperaturas de fusión de cenizas de biomosas tratadas, según Vamvuka y Zografos, 2004.	35
Figura 14. Mecanismos de transporte de las cenizas, según Yang, 2016.....	37
Figura 15. Mecanismo de formación de las cenizas en el interior de una caldera de vapor, según Melissari, 2012.....	38
Figura 16. Matriz energética Argentina. Fuente: Elaboración propia, según SEN, 2020.....	40
Figura 17. Potencia instalada por medio del Proyecto RenovAr 2 según SEN, 2020.....	41
Figura 18. Superficie con caña de azúcar (color verde) en Tucumán para la campaña 2017. Según Fandos, et al., 2017a.....	43
Figura 19. Placas de acero SA-192A utilizadas en el ensayo de fusión de las cenizas sintéticas. Elaboración propia.....	62
Figura 20. Placas de acero SA-192A utilizadas en el ensayo de fusión de cenizas sintéticas. Elaboración propia.....	62
Figura 21. Desviación de las temperaturas de fusibilidad en AO en función de la variación de las concentraciones de los óxidos mayoritarios estudiados. Elaboración propia.....	79
Figura 22. Desviación de las temperaturas de fusibilidad en AR en función de la variación de las concentraciones de los óxidos mayoritarios estudiados. Elaboración propia.....	79
Figura 23. Sensibilidad del Al_2O_3 en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia....	80
Figura 24. Sensibilidad del Al_2O_3 en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia. ...	81
Figura 25. Sensibilidad del $\%SiO_2$ sobre la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.	82
Figura 26. Sensibilidad del $\%SiO_2$ sobre la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.	83
Figura 27. Sensibilidad del $\%TiO_2$ sobre la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.	84
Figura 28. Sensibilidad del $\%TiO_2$ sobre la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.	84
Figura 29. Sensibilidad del $\%Fe_2O_3$ en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia. 85	85
Figura 30. Sensibilidad del $\%Fe_2O_3$ en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.86	86
Figura 31. Sensibilidad del $\%CaO$ en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia... 87	87
Figura 32. Sensibilidad del $\%CaO$ en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia. .. 88	88

Figura 33. Sensibilidad del %MgO en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.	89
Figura 34. Sensibilidad del %MgO en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.	90
Figura 35. Sensibilidad del %Na ₂ O en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.	91
Figura 36. Sensibilidad del %Na ₂ O en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.	91
Figura 37. Sensibilidad del %K ₂ O en la fusibilidad de las cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.	92
Figura 38. Sensibilidad del %K ₂ O en la fusibilidad de las cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.	93
Figura 40. Sensibilidad del %P ₂ O ₅ en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.	95
Figura 41. Sensibilidad del %SO ₃ en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.	96
Figura 42. Sensibilidad del %SO ₃ en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.	97
Figura 43. Sensibilidad del índice AI sobre la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.	98
Figura 44. Sensibilidad del índice AI sobre la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.	98
Figura 45. Incidencia de los óxidos mayoritarios sobre DT para cenizas sintéticas trabajando en AO. Elaboración propia.	99
Figura 46. Incidencia de los óxidos mayoritarios sobre DT para cenizas sintéticas trabajando en AR. Elaboración propia.	100
Figura 47. Fusibilidad de cenizas sintéticas de bagazo de Tucumán – Argentina en función de %CB trabajando en AO. Elaboración propia.	103
Figura 48. Fusibilidad de cenizas sintéticas de bagazo de Tucumán – Argentina en función de %CB trabajando en AR. Elaboración propia.	105
Figura 49. Fusibilidad de cenizas sintéticas de RAC de Tucumán – Argentina en función de %CB trabajando en AO. Elaboración propia.	107
Figura 50. Fusibilidad de cenizas sintéticas de RAC de Tucumán – Argentina en función de %CB, trabajando en AR. Elaboración propia.	109
Figura 51. <i>Variación de DT para cenizas sintéticas de bagazo de Tucumán-Argentina en función de %CB para AO y AR. Elaboración propia.</i>	111
Figura 52. <i>Variación de DT para cenizas sintéticas de RAC de Tucumán-Argentina en función de %CB para AO y AR. Elaboración propia.</i>	112
Figura 53. Resultados de la fusión de cenizas a 900 [°C] sobre placas de acero de material estándar de tubos de calderas. Elaboración propia.	113
Figura 54. Resultados de la fusión de cenizas a 1.100 [°C] sobre placas de acero de material estándar de tubos de calderas. Elaboración propia.	114

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

AA	Aditivo ácido
AB	Aditivo básico
AI	Índice de ensuciamiento
BNA	Banco de la Nación Argentina.
BP	British Petroleum
CA	Componentes ácidos
CAA	Centro Azucarero Argentino
CAMMESA	Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima.
CB	Componentes básicos
CE	Consumo específico.
DE	Desviación estándar
DEP	Dirección de Estadísticas de la Provincia de Tucumán
DT	Temperatura de deformación inicial.
EAA	Espectrometría de absorción atómica
EE	Energía Eléctrica
EE_{Bruta}	Energía Eléctrica Bruta.
EEA	Espectrometría de emisión atómica
EFDA	European Fusion Development Agreement.
ENARSA	Energía Argentina S.A.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
FODER	Fondo Fiduciario para el Desarrollo de Energías Renovables.
FR	Factor de residuo.
FT	Temperatura de fluidización.
F_U	Índice de deposición "Fouling"
GAT	Grupos de Asistencia Técnica.
GEI	Gases efecto invernadero.
HT	Temperatura de hemiesfera.
IAPG	Instituto Argentino del Petróleo y el Gas.
I_{Ca/Si}	Índice de formación de silicatos.
I_{Erosión}	Índice de erosión
INDEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
I_{S/Cl}	Índice de corrosión
I_{K-SiO2}	Índice de reacción del potasio.
IS	Índice de escorificación
I_{Sulf.}	Índice de sulfatación
MEyM	Ministerio de Energía y Minería de la Rep. Argentina.
MEM	Mercado Eléctrico Mayorista
MinAgr	Ministerio de Agroindustria de la Rep. Argentina.
MS	Muestra sintética
MW	Megawattio
MWh	Megawattio-hora
OPEP	Organización de Países Exportadores de Petróleo.
OETEC	Observatorio de la Energía, la Tecnología y la Infraestructura de Desarrollo.
PA	Peso atómico
PAH	Pequeño Aprovechamiento Hidroeléctrico.
PCS	Poder calorífico superior.
PCI	Poder calorífico inferior.
PM	Peso molecular
R_{B/A}	Relación base-ácido.
R_s	Índice de escorificación por azufre.
SADI	Sistema Argentino de Interconexión.
SAGPyA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos.
SEN	Secretaría de Energía de la Nación.
S_R	Índice de viscosidad de las cenizas.
ST	Temperatura de ablandamiento.

RESUMEN

El presente trabajo brinda información sobre las características de la fusibilidad de las cenizas de bagazo y de los residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC), en función de sus componentes elementales para un uso eficiente de las mismas en calderas de vapor. Se realizó una búsqueda bibliográfica de la composición elemental de las cenizas y del carbón mineral, las cuales sirvieron de referencia para su comparación con los resultados del presente estudio. 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, durante las zafas azucareras 2016, 2017, 2018 y 2019. Todas las muestras analizadas pertenecieron a la variedad de caña LCP85-384.

Se realizó un estudio de sensibilidad de los componentes elementales de las cenizas sobre la fusibilidad de las mismas, según ASTM D1865. Se determinaron los índices de comportamiento de las cenizas (índice de escorificación, sinterización, ensuciamiento, escorificación por azufre, deposición, reacción del potasio, sulfatación, corrosión, formación de silicatos, erosión y de viscosidad). Se obtuvieron correlaciones para las temperaturas de fusión críticas para diferentes concentraciones de componentes ácidos (CA) y básicos (CB) en cenizas elaboradas a partir de óxidos comerciales puros en proporciones similares a las encontradas en las cenizas de las biomásas originales. Se determinó que las cenizas de bagazo y de RAC de caña de azúcar de nuestra región presentan una composición mayoritaria diferente a las encontradas en otras regiones del mundo. Las cenizas de bagazo y de RAC de Tucumán resultaron mayormente ácidas con mayor tendencia a la fusibilidad de las mismas y mayor grado de ensuciamiento de las cenizas de RAC respecto al bagazo. Se observó que las cenizas de RAC poseen un mayor rango de amplitud de fusibilidad, cuando el mismo trabaja entre atmósferas oxidantes y reductoras, por lo que la biomasa resultaría más flexible a los cambios de atmósferas en el interior del hogar de una caldera de vapor. No obstante, las cenizas de RAC de este estudio presentaron en promedio una menor temperatura de fusión inicial, por lo que tendría una mayor probabilidad de alcanzar condiciones críticas en relación al bagazo para bajas relaciones aire-combustible. Asimismo, se han encontrado correlaciones cuadráticas entre las temperaturas de inicio de fusión (DT) y el %CB de las cenizas que permiten determinar en forma rápida la fusibilidad del bagazo o RAC conociendo la composición química de sus cenizas. Las cenizas de bagazo analizadas, poseen en promedio 87,67% de CA y 12,33% de CB; y alcanza una temperatura mínima DT de 979 [°C]. Para el caso del RAC la temperatura mínima DT fue de 962 [°C] para un porcentaje promedio de 67,62% de CA y 32,38% de CB.

Palabras Clave: Fusibilidad de cenizas, biomasa, bioenergía, combustión.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

En la actualidad los productores agrícolas y la industria en general, han comenzado a tomar conciencia del uso desmedido de los combustibles de origen fósil, tal vez impulsados por los evidentes cambios en el medioambiente por efecto del calentamiento global, o tal vez por el elevado precio que exhiben los mismos, y que deben pagar indefectiblemente para lograr mover sus máquinas y manufacturar sus productos. Este hecho los lleva a considerar nuevas fuentes de energía para lograr compensar el déficit energético-económico que se les presenta.

Por otro lado, los gobiernos deben garantizar políticas que tiendan a regular el uso de los combustibles de manera sustentable, que permitan fomentar las energías renovables por medio de leyes y lograr una matriz energética equilibrada. A pesar de ello, la implementación de estas Leyes se dificulta por la falta de mayor información y políticas claras que no permiten garantizar y tomar créditos para realizar inversiones a largo plazo, ya que toda empresa debe lograr un reembolso económico para dar continuidad productiva y ganancia.

De igual modo, la falta de información técnica es otro factor de importancia que dificulta el desarrollo de un proyecto, ya que muchas veces las suposiciones limitan la efectividad en lograr cuentas precisas, que son fundamentales a la hora de materializar en detalle y poner en marcha un plan de ejecución.

Actualmente existen relevamientos detallados de algunos recursos biomásicos, pero generalmente enfocados en el análisis de productividad agrícola y/o alimenticia, sin valorar su potencial energético, ni la de sus residuos como posibles fuentes de energía, que se podrían aprovechar de manera directa o indirecta para mejorar la matriz energética de la provincia y de la región (PROBIOMASA, 2017; Valeiro *et al.*, 2017; Razo *et al.*, 2007 y Valdes Delgado, 2007).

La provincia de Tucumán cuenta con un alto potencial biomásico formado por subproductos directos e indirectos, cultivos energéticos y materiales derivados de otros usos (FAO, 2016). Los mismos se pueden clasificar como dendro-combustibles y agro-combustibles, los primeros son los provenientes del desmonte, árboles de plantaciones energéticas, operaciones de raleo y poda. Los segundos, son los subproductos de los cultivos agrícolas, plantaciones herbáceas energéticas, subproductos de la industria alimenticia, frutas y semillas e incluso los residuos sólidos urbanos (RSU). Asimismo, debido a esta gran actividad agroindustrial que tracciona otros diferentes sectores industriales como la metalmecánica, la alimenticia y la producción de energía eléctrica, brinda a la región una gran posibilidad de desarrollo.

El cultivo de la caña de azúcar presenta una importante producción de biomasa, parte de ella es utilizada como principal combustible de la industria azucarera; y otra parte residual se deja en campo sin aprovechamiento energético.

El área cañera cosechable en la última década muestra una tendencia creciente en general hasta la zafra 2013, cuando se registró el valor máximo de la serie, alrededor de 280.000 [ha]. Entre 2014 y 2017, se constató una alternancia en la producción del cultivo, luego entre 2018 y 2020 se registró un incremento en relación a las zafras precedentes, alcanzando las 276.000 [ha]. Esto se debió a una mejora en la capacidad productiva de los cañaverales, sumada a la ligera ampliación del área cañera, que permitió un incremento en la producción de azúcar crudo, azúcar refinado y alcohol. Las estimaciones para la zafra 2020, indicaron una molienda máxima de 15.395.000 [t] de caña de azúcar con una producción probable total de azúcar o azúcares equivalentes cercanas a 1.655.000 [t] (Fandos *et al.*, 2020).

El potencial energético de una biomasa para ser utilizado como posible combustible en procesos de cogeneración o para generación directa de energía, debe evaluarse no tan solo desde el punto de vista de su densidad energética o capacidad de generar energía por unidad de masa, sino además, deben considerarse otros parámetros que definen su cualidad como combustible. Considerar solamente el contenido de humedad, cenizas y poder calorífico de un combustible como únicos parámetros de evaluación para tomar una decisión para el uso de una biomasa como fuente de energía, podría conducir a un error significativo, ya que, existen otros fenómenos que se producen durante el proceso de combustión, los cuales condicionan a mediano o largo plazo la integridad de los equipos de proceso necesarios. Estos podrían causar problemas económicos trascendentales, debido a paradas imprevistas o a roturas importantes, causados por una mala operación o por desconocimiento en la calidad y manejo del combustible utilizado en los equipos de combustión y accesorios.

El proceso de generación de vapor como fuente de calor o medio para generar electricidad, utilizando biomasa combustible, comenzó con el cambio de siglo. Desde un principio, las impurezas que acompañaban los combustibles fueron responsable del mantenimiento adicional, reducción de la tasa de transferencia de calor y corrosión en los generadores de vapor (Brayers, 1996). La naturaleza y gravedad de la formación de depósitos por ensuciamiento y escoriación de cenizas, fue modificándose a medida que cambiaban los combustibles y sus impurezas. Además, el proceso de generación de vapor fue evolucionando y con ello las calderas de vapor fueron aumentando de tamaño y eficiencia, por lo que se necesitó mejores materiales y mayores controles en los servicios de suministro de agua y combustible, con el objetivo de guardar integridad y aumentar la vida útil de los equipos.

Actualmente existen relevamientos detallados del cultivo de la caña de azúcar como materia prima para la elaboración de azúcar, alcohol y energía (Menéndez y Hilbert, 2013; Perez *et al.*, 2017; Fandos *et al.*, 2017a; Iburguren *et al.*, 2017; Casen *et al.*, 2015; Casen *et al.*, 2012; Fernandez de Ullivarri *et al.*, 2012 y Flores Marco *et al.*, 2008), pero generalmente enfocados en el análisis de productividad agrícola y/o alimenticia, sin valorar con exactitud su fuerte potencial energético y posibles limitaciones; tampoco la de sus residuos que se podrían aprovechar como fuentes de energía para generar electricidad de manera directa o indirecta (Feijoo *et al.*, 2015 y Diaz *et al.*, 2017); y de este modo, mejorar la matriz energética de una provincia o región (Dagna, 2014).

1.1 ENSAYOS NORMALIZADOS DE FUSIBILIDAD DE CENIZAS DE UN COMBUSTIBLE.

La norma ASTM D-1857 es un método de evaluación predictivo tradicional y han formado la base de las técnicas tradicionales de predicción del comportamiento de las cenizas (ASTM, 2010). Estas pruebas definen escalas de referencia que brindan información real sobre un combustible. La norma se utiliza en general de manera comparativa para combustibles de comportamientos conocidos. No obstante, los resultados del análisis no siempre indican información suficiente para lograr una comparación precisa.

Esta técnica de medición intenta registrar el hecho de que la materia mineral está formada por una mezcla de diversos compuestos, cada uno de los cuales tiene su propio punto de fusión como mencionamos anteriormente, pero a medida que se calienta el cono de ceniza pirométrico, algunos de estos compuestos se funden antes que otros, provocando mezclas de materiales licuados y otros sin fundir que producen tensiones y deformaciones adicionales que cambian con el aumento de temperatura a medida que se funden más minerales. Por ello, los resultados de la fusibilidad de cenizas en laboratorio pueden ser bastantes diferentes de las condiciones experimentadas en la caldera.

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 D-1857-04 define las 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 representa la muestra inicial de ceniza sin acción de la temperatura.

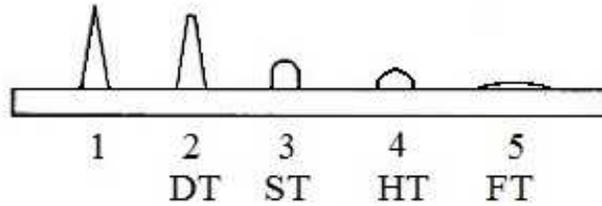


Figura 1. Perfiles de los conos de ceniza en función de las temperaturas características de fusibilidad, según ASTM, 2010.

La Figura 2 muestra una imagen real de los conos fabricados con cenizas de caldera antes del análisis de fusibilidad. Asimismo, se puede observar una imagen térmica del perfil de los conos cuando son sometidos a elevadas temperaturas durante el análisis de fusibilidad.

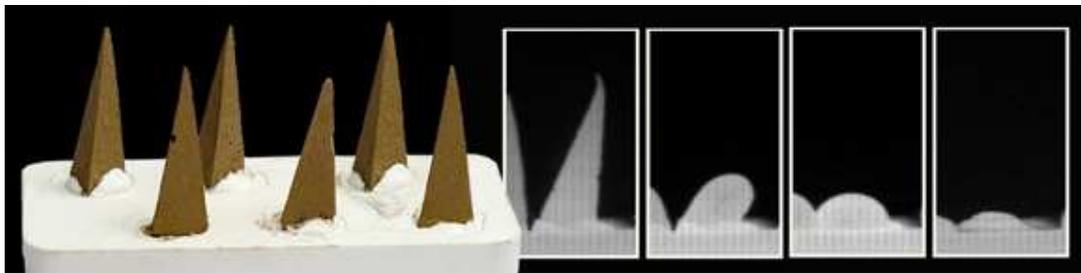


Figura 2. Imagen de los conos de cenizas, antes y después del análisis de fusibilidad. Elaboración propia.

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. No obstante, es probable que la ceniza utilizada en la técnica ASTM, 2010, pueda no representar la composición de los depósitos de ceniza que realmente se adhieren a las superficies de los tubos o en las paredes de agua en hogares de calderas de vapor. A menudo, existe una gran discrepancia entre la composición de la ceniza fundida del análisis de fusibilidad realizado en laboratorio y la que se encuentra como depósitos en tubos o en las paredes de agua antes mencionadas. Ésta es una de las principales críticas a las técnicas de análisis de fusibilidad de cenizas, ya que existen diferencias entre las predicciones de la temperatura de fusión y el valor real de escoriación, observados experimentalmente en hornos de calderas.

En Tabla 7.1 del Anexo puede verse los resultados de la experiencia realizada por Borio y Levasseur, 2006, para tres unidades generadoras de vapor ensayadas. Es interesante observar el enriquecimiento del hierro en los depósitos de las paredes de agua en relación a la composición de las cenizas de carbón fundidas en el ensayo ASTM.

Por lo general, se puede asumir que la temperatura de fusión de los depósitos en las paredes de agua no será superior a las temperaturas de fusión ASTM, pero las temperaturas de fusión de los depósitos pueden ser y suelen ser más bajas que las

temperaturas de fusión de ASTM. Esto se debe a la deposición selectiva de componentes de menor punto de fusión que producen enriquecimientos de material con menor punto de fusión.

Aunque se cree que los métodos estandarizados indican características probables de la formación de “clínker” a partir de un carbón combustible, ninguna prueba de fusibilidad de una muestra bien mezclada de ceniza, tiene en cuenta la distribución física de las impurezas en el combustible cuando se quema. Para ello, es necesario realizar experiencias prácticas adicionales para establecer la relación exacta de estas pruebas de fusibilidad realizadas en laboratorio con la formación real de “clínker” en el hogar de una caldera.

1.2 LA IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE HIERRO (FE) EN LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS.

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 Fe férrico (Fe_2O_3) en condiciones oxidantes y formándose cantidades crecientes de Fe 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 el carbón incluyen a: sulfuros como la pirita (FeS_2), sulfatos, óxidos, silicatos y carbonatos (Miles *et al.*, 1985).

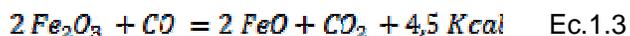
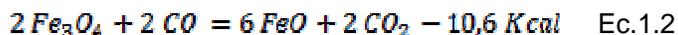
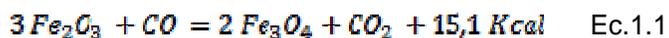
A medida que estos componentes se calientan en una determinada atmósfera, se transforman y modifican su estructura química, comenzando a disociarse a 1.100 [°C] para formar una solución sólida que contiene óxido ferroso (FeO). El grado de disociación aumenta con la temperatura de modo que finalmente todo el Fe_2O_3 se convierte en magnetita (Fe_3O_4) a una temperatura próxima a 1.350 [°C]. Por lo tanto, a la temperatura de ablandamiento de la ceniza en el aire (atmósfera oxidante), el contenido de hierro entra en reacción como Fe_2O_3 (sólido), y varía su composición hasta Fe_3O_4 .

Asimismo, el Fe_2O_3 forma compuestos con el SiO_2 y se requieren elevadas temperaturas para su fusión y, en consecuencia, se presenta una condición deseada para las cenizas de un combustible, ya que no existirían problemas de ablandamiento de las mismas durante el proceso de combustión. Es por ello que las escorias de carbón son mucho más refractarias y más viscosas que las formadas por mezclas calentadas bajo condiciones reductoras, favorables a la formación de FeO.

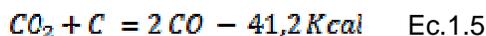
Ahora, si las cenizas se calientan en una atmósfera reductora de hidrógeno y vapor de agua o monóxido de carbono y dióxido de carbono, el Fe_2O_3 se reduce en gran medida a FeO que actúa como agente fundente y vuelve más fusible a las cenizas, lo que provoca una

disminución de la viscosidad, dando lugar a una disolución importante del Fe_2O_3 , formando silicatos ferrosos y silicatos ferro-cálcicos. Esta propiedad está relacionada con los CA y CB que constituyen las cenizas, una escoria con un índice básico elevado resulta de mayor viscosidad y viceversa (Pezzano, 1976).

El hogar de una caldera trabajando a una temperatura próxima a $800^{\circ}C$, comienza a reducir indirectamente los óxidos de hierro de las cenizas en presencia de una atmósfera reductora, producida por el monóxido de carbono (CO) generado durante la combustión. Las reacciones de reducción que se producen son las indicadas por medio de Ec.1.1, Ec.1.2 y Ec.1.3.



Cuando los óxidos alcanzan temperaturas del orden de $850^{\circ}C$ a $950^{\circ}C$, el Fe presente en las cenizas se encuentra casi totalmente como FeO. Para temperaturas superiores a $950^{\circ}C$ se produce la reducción directa y final de estos óxidos en Fe metal, según el mecanismo indicado por Ec.1.4, Ec.1.5 y Ec.1.6.



En base a estos conceptos precedentes sobre la fusibilidad de cenizas de carbón, observados por diferentes autores y que aún se encuentran en vigencia, ya que no fueron objetados hasta el momento, se tomaron como base para estudiar en detalle las particularidades del caso, incluso se encontraron nuevas relaciones y parámetros que pueden predecir el comportamiento de las cenizas durante el proceso de combustión.

Fernández Diez, 2000 observó el efecto que tiene la concentración de hierro en cada una de sus formas e indicó cómo es la variación de la temperatura de deformación inicial (DT) en función del contenido de Fe total en cenizas. Esto lo realizó para un gran número de muestras de carbón mineral de USA.

La Figura 3 muestra los resultados de esta experiencia. Estos resultados demuestran que cuando aumenta la cantidad de Fe en la ceniza, existe una gran diferencia en la fusibilidad de las mismas para diferentes condiciones de la atmósfera circundante. Cuando esta última es del tipo oxidante, la DT resulta mayor que para condiciones reductoras. El autor también indicó que para pequeñas cantidades de hierro en las cenizas de carbón, estos efectos son insignificantes.

Fernández Diez, 2000, también demostró que en las cenizas de carbones ligníticos con pequeñas cantidades de Fe, la temperatura de fusión se ve muy poco afectada por el estado de oxidación del mismo. Además, observó que para cenizas con altos niveles de Ca y Mg en condiciones oxidantes las temperaturas de fusión son menores que en condiciones reductoras. En la Tabla 7.2 del Anexo se muestran los resultados del trabajo mencionado.

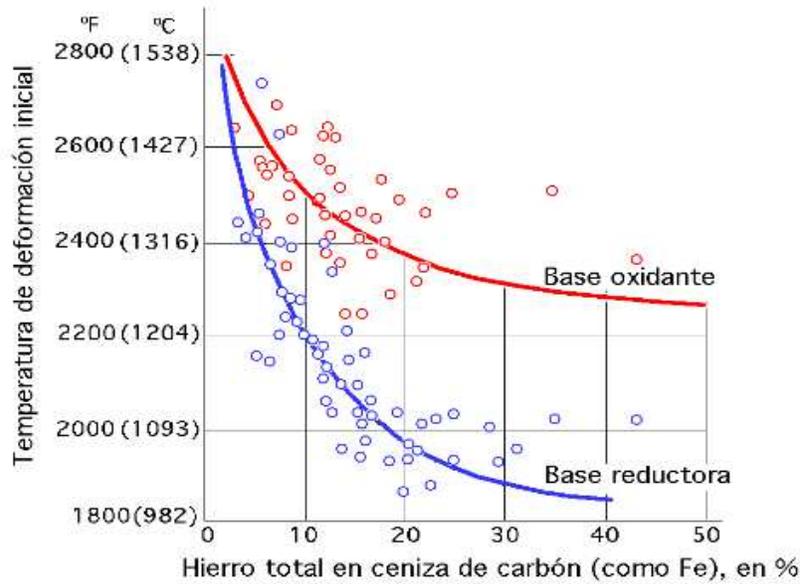


Figura 3. Influencia del hierro en cenizas de carbón en función de la temperatura de fusión inicial DT, según Fernández Diez, 2000.

1.3 EL DISEÑO DEL HORNO Y LOS DEPÓSITOS DE CENIZAS

A pesar de nuevas investigaciones realizadas en esta área (Chong *et al.*, 2019; Niu *et al.*, 2016; Febrero Garrido, 2015; James *et al.*, 2012; Melissari, 2014; etc.), existen vacíos en la comprensión fundamental de los mecanismos responsables del comportamiento del material mineral. Si bien, hay un conocimiento sustancial sobre el proceso de deposición, la complejidad del tema no permite una discusión detallada. Sin embargo, se puede indicar la importancia de las condiciones de operación de un horno en los resultados descritos anteriormente.

Para una determinada composición de carbón o biomasa combustible, las temperaturas del horno y los tiempos de residencia generalmente dictan las transformaciones físicas y químicas que se producen en las cenizas.

El proceso de formación de los residuos inorgánicos depende principalmente del tipo de combustible, temperatura de la partícula, composición, tamaño, forma, tipo de atmósfera, etc. Las propiedades físicas resultantes de las cenizas, generalmente establecen 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.

Por otro lado, el interés en mejorar el proceso de combustión, aumentando la superficie de contacto aire-combustible, por medio de una molienda o picado de este último, ha evidenciado este concepto. Se ha encontrado que partículas de ceniza más pequeñas seguirán las líneas de corriente del gas y será menos probable que golpeen las superficies de transferencia de calor. Ésta hipótesis es lógica para aquellas partículas de ceniza que provocan deposición debido a un mecanismo de impacto. Además del tamaño de las partículas, la densidad y la forma de las mismas también afectan el comportamiento aerodinámico. Es menos probable que las partículas esféricas fundidas sigan las líneas de corriente del gas que aquellas partículas angulares o irregulares de igual masa, debido a la diferencia en las fuerzas de arrastre que se interponen (Borio y Levasseur, 2006).

Los pasajes de gases y cavidades en el interior de un horno de una caldera de vapor, se diseñan normalmente para que se formen depósitos sinterizados que se puedan limpiar. Este es un compromiso de diseño por parte de las empresas fabricantes de calderas de vapor, ya que las mismas pueden ser de gran tamaño (económicamente no competitivas) y producir depósitos secos y polvorientos; o calderas pequeñas y producir en operación normal depósitos de cenizas fundidas.

Debido a la complejidad de la formación y deposición de las cenizas, es lógico evaluar primero cuáles son los componentes claves y responsables de estos mecanismos. El contenido de Fe y Na en las cenizas se han considerado típicamente como los más importantes, la materia mineral restante a menudo tiene efectos secundarios.

1.4 RELACIÓN ENTRE LOS COMPONENTES BÁSICOS Y ÁCIDOS DE LAS CENIZAS.

Fernández Diez, 2000, indicó que los componentes de la ceniza del carbón se pueden dividir y agrupar en básicos y ácidos, según:

- Componentes básicos (CB): el hierro (Fe), los metales alcalino-térreos calcio (Ca) y magnesio (Mg), y los metales alcalinos sodio (Na) y potasio (K).
- Componentes ácidos (CA): el silicio (Si), el aluminio (Al) y el titanio (Ti).

Ambos componentes tienden a combinarse para formar compuestos con temperaturas de fusión menores. El autor indicó que la experiencia demostró que las proporciones de componentes básicos y ácidos son un indicativo del comportamiento de la fusión y de las características de la viscosidad de la ceniza del carbón. Además, indicó que el análisis elemental permite calcular los porcentajes de CB y CA y la relación entre ambos (B/A), por medio de las Ec.1.7, Ec.1.8 y Ec.1.9.

$$\%CB = \frac{(Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O) \times 100}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O} \quad \text{Ec. 1.7}$$

$$\%CA = \frac{(SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2) \times 100}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O} \quad \text{Ec. 1.8}$$

$$B/A = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \quad \text{Ec.1.9}$$

El autor también indicó que el intervalo de valores que toma la relación B/A (Ec.1.9), para el caso del carbón mineral, se encuentra entre $0,1 < \text{Básico/Acido} < 9,0$; y se extiende desde 0,1 para una ceniza muy ácida, hasta 9,0 para una ceniza muy básica.

Además, el autor reveló que las cenizas muy ácidas o muy básicas tienen altas temperaturas de fusión y ablandamiento. La presencia de componentes básicos en una ceniza ácida, reduce la temperatura de ablandamiento y la viscosidad; y viceversa, Cuando los porcentajes básicos y ácidos son bastantes parecidos, las temperaturas de fusión y las viscosidades de la ceniza se reducen a valores mínimos.

La Figura 4 muestra los resultados del estudio mencionado, donde las temperaturas de fusión mínimas se presentaron con 40% - 50% de componentes básicos, equivalente a una relación $0,7 > \text{Básico/Acido} > 0,8$. Asimismo, se observó que la relación $0,5 > \text{Básico/Acido} > 1,2$, indica una alta tasa de escorificación. El estudio reveló, además, que en esta última condición, todos los componentes influyen por igual provocando el mismo efecto sobre las características de ablandamiento de la ceniza.

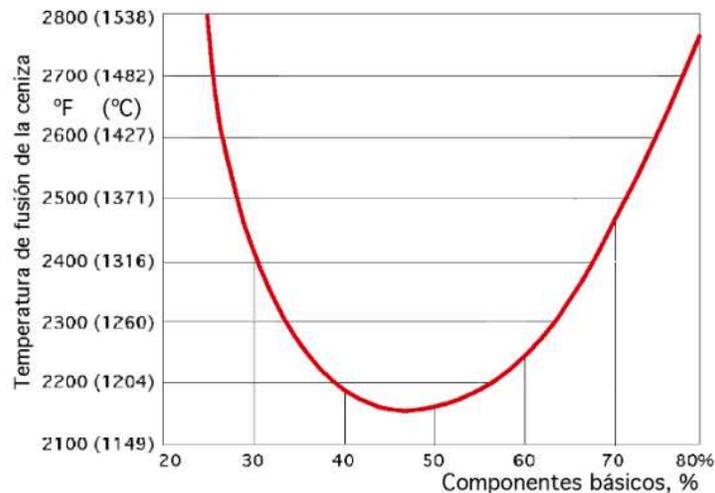


Figura 4. Variación de la temperatura de fusión de la ceniza de carbón en función de los componentes básicos, según Fernández Diez, 2000.

1.5 INFLUENCIA DE LOS ÁLCALIS EN EL ENSUCIAMIENTO CON CENIZAS.

Los metales alcalinos Na y K se vaporizan en el hogar a elevadas temperaturas, las reacciones con el azufre (S) presente en los gases de combustión y con otros elementos de la ceniza, forman compuestos que contribuyen a la formación de deposiciones sobre las superficies de convección.

Fernández Diez, 2000, indicó la existencia de un ensayo de resistencia a la sinterización para determinar la relación entre el contenido total de álcalis en carbones bituminosos y el grado de ensuciamiento de sus cenizas. Este ensayo consistió en la medida de la resistencia a la compresión de bolitas elaboradas con cenizas volantes en polvo, calentadas en aire durante un determinado período de tiempo a temperaturas entre 816°C a 982°C. El autor indicó que la aplicación de este método, junto con la observación de las condiciones de ensuciamiento en calderas de vapor en funcionamiento, demostró que los carbones que provocan elevados grados de ensuciamientos son los que producen cenizas volantes con elevada resistencia a la sinterización y viceversa. Además, demostró para carbones bituminosos que el Na es el elemento que más afecta al ensuciamiento de la caldera y tiene un gran efecto sobre la resistencia de sinterización.

En la Figura 5 puede verse el efecto de la alcalinidad producida por el Na ($\%Na_2O$) en cenizas de carbón mineral, se observa cómo el aumento del contenido de este elemento acrecienta la resistencia a la sinterización y disminuye la temperatura correspondiente. Además, puede verse que a partir de 900°C aproximadamente, bajas concentraciones de Na_2O (hasta 0,23%), las cenizas volantes producidas no presentarían riesgos de ensuciamiento, ni problemas de sinterización.

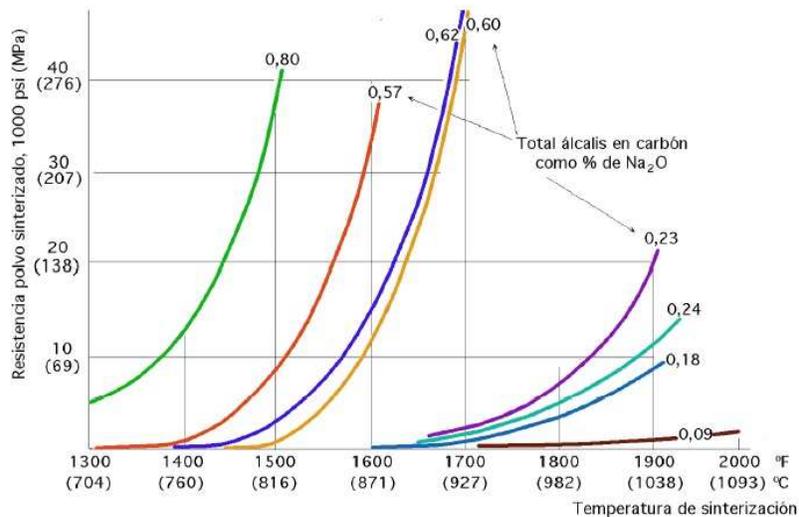


Figura 5. Efecto de la alcalinidad ($\%Na_2O$) en cenizas de carbón mineral, según Fernández Diez, 2000.

En la Tabla 7.3 del Anexo puede verse el efecto del Na_2O soluble en agua en la resistencia a la sinterización, se observa cómo el lavado del carbón disminuye el contenido de Na_2O en la ceniza en un 70%, mientras que el contenido de K, que en principio era superior al de Na, disminuye sólo un 4%. En estos casos, la resistencia a la sinterización disminuyó un 96,8% (de 119,3 [MPa] a 3,8 [MPa]).

Por otro lado, en el mismo trabajo se indicó que la relación entre la resistencia de sinterización y el porcentaje de Na soluble presente en la ceniza es función de la relación Base/Ácido (B/A) definida anteriormente por la Ec.1.9. La combinación de un alto contenido en Na y elevada relación B/A, facilita grandes resistencias de sinterización y viceversa (ver Figura 6).

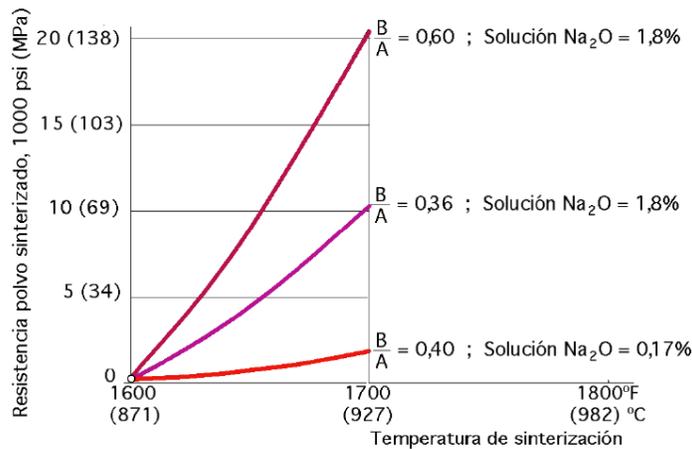


Figura 6. Influencia de la relación B/A y del Na soluble sobre la resistencia de sinterización de carbones bituminosos, según Fernández Diez, 2000.

Fernández Diez, 2000, también observó un fuerte efecto del Na_2O en la velocidad de deposición de las cenizas en el interior de las calderas para cenizas de carbones ligníticos con relaciones de $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{Fe}_2\text{O}_3$ mayores a 1.

La Figura 7 muestra los resultados de la experiencia realizada, se observa que un aumento del 5% en la concentración de $\%\text{Na}_2\text{O}$, el incremento en la deposición resultó de 1% aproximadamente. Cabe destacar que en principio este incremento puede resultar bajo, pero multiplicado por la cantidad de cenizas volantes, resultarían valores significativos.

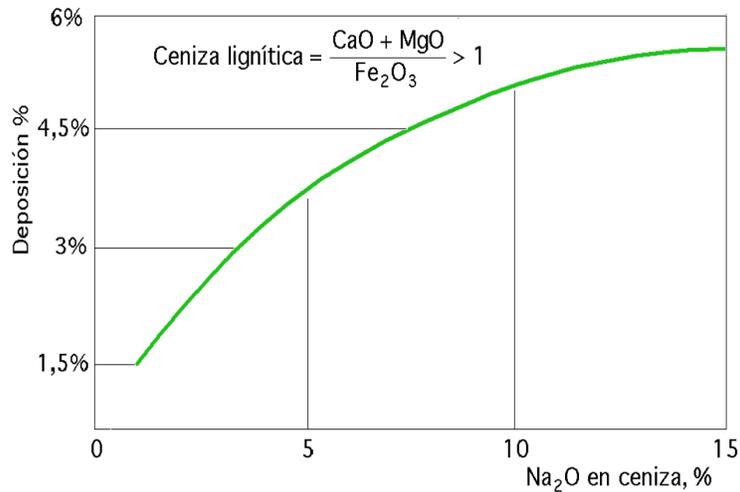


Figura 7. Efecto del %Na₂O en la velocidad de deposición de las cenizas de lignito, según Fernández Diez, 2000.

1.6 VISCOSIDAD DE LAS CENIZAS DE UN COMBUSTIBLE

La viscosidad de las cenizas es un parámetro útil para indicar si los residuos que deja un combustible sólido son adecuados para su utilización en el hogar de una caldera de vapor. Este parámetro afecta a la velocidad con que los depósitos de cenizas fluyen por las paredes, con incidencia sobre el rendimiento de los equipos de extracción como ser los sopladores de hollín instalados en las paredes laterales del hogar de la caldera y en zonas del sobrecalentador de vapor.

En generadores de vapor que utilizan carbón mineral como combustible, la escoria fluye fácilmente con una viscosidad inferior a 250 [P]; la temperatura a la que alcanza esta viscosidad es la que se define como temperatura “T₂₅₀” de la ceniza y su valor máximo preferido para las aplicaciones en hogares que queman carbón mineral con fondo húmedo (hogares de ceniza fundida), es de 1.345°C. Valores bajos de T₂₅₀ indican bajas temperaturas de fusión y, por lo tanto, una mayor escorificación.

La Figura 8 muestra los resultados encontrados por Fernández Diez, 2000, donde correlacionó la temperatura T₂₅₀ y la composición de cenizas por medio de las relaciones B/A y SiO₂/Al₂O₃ en muestras de cenizas bituminosas y ligníticas para CA > 60% (Ec.9). Se puede observar que para B/A < 0,3 existe una influencia de la relación SiO₂/Al₂O₃ sobre la viscosidad de las cenizas.

El autor indicó que el “Si” y el “Al” son componentes ácidos; sin embargo, los porcentajes más altos de sílice tienden a elevar la temperatura T₂₅₀ y la de fusión.

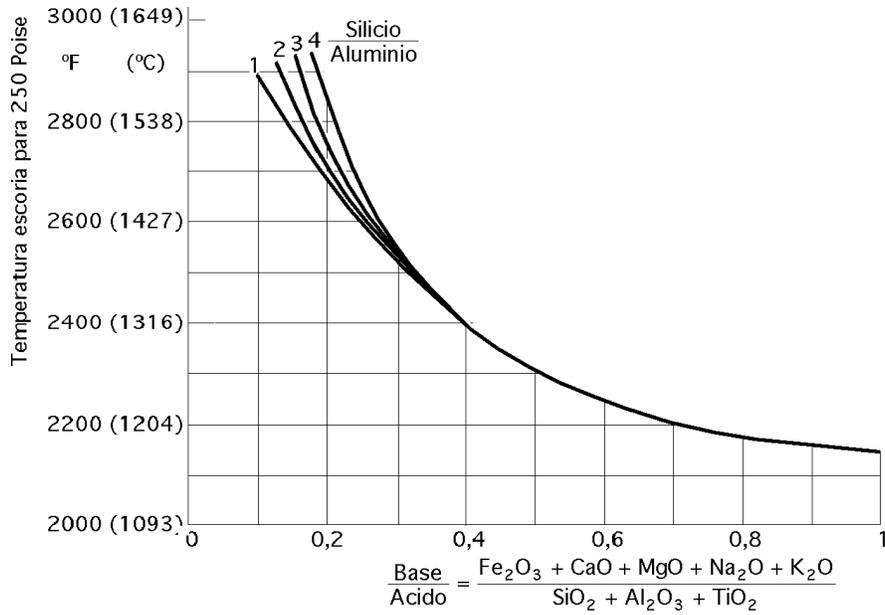


Figura 8. Temperatura T_{250} en función de la relación B/A y SiO_2/Al_2O_3 , según Fernández Díez, 2000.

La Figura 9 muestra los resultados de la variación de la temperatura T_{250} en función de %CB (Ec.8) y del porcentaje de elementos alcalinos térreos respecto a los alcalinos totales (%Dolomía); y del hierro definido según la Ec. 1.10. Estos resultados fueron determinados para cenizas ligníticas con un contenido de CA < 60%.

$$\% \text{ Dolomía} = \frac{(CaO + MgO) \times 100}{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O} \quad \text{Ec.1.10}$$

Para una concentración de %CB cualquiera la T_{250} se incrementa con el aumento del %Dolomía, lo que indica que el Ca y el Mg tienden a elevar la temperatura de viscosidad y de fusión correspondientes. Por ejemplo, para un aumento de %CB entre 50% a 55% y una relación de %Dolomía del 50%, produce un aumento en la temperatura de fusión de aproximadamente un 5,0% (de 1095°C a 1150°C), mientras que para un %Dolomía de 75%, el incremento sería de aproximadamente 17,6% (de 1065°C a 1288°C).

Cabe indicar que el autor reveló, además, que el aumento de los otros componentes básicos (Fe, Na y K), tienden a disminuir la T_{250} .

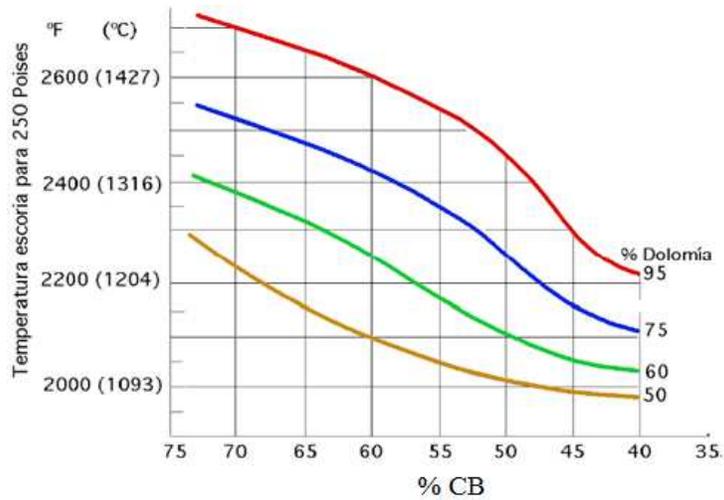


Figura 9. Variación de T_{250} en función de B/A y del %Dolomía para cenizas de carbón ligníticas, según Fernández Diez, 2000.

La Figura 10 muestra la variación de la viscosidad de las escorias de carbón mineral en función del %Fe en las cenizas. Por ejemplo, se puede observar que para una concentración de %Fe igual a 20% y un aumento en la temperatura de aprox. 9% (de 1.260°C a 1.371°C), la rebaja de la viscosidad fue de 200 [P] a 35 [P], o sea una disminución de 82,5%.

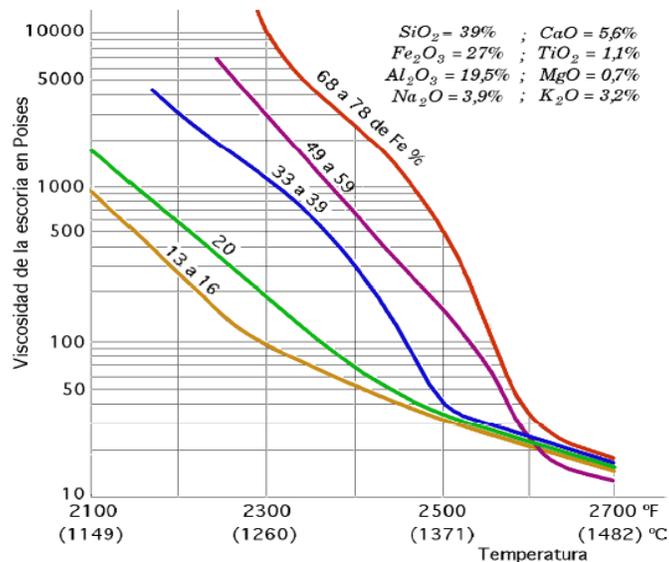


Figura 10. Variación de la viscosidad de escorias de carbón en función del %Fe total, según Fernández Diez, 2000.

1.7 MECANISMO DE FUSIÓN DE LAS CENIZAS DE UN COMBUSTIBLE.

Chong *et al.*, 2019, indicó que el proceso de fusión de las cenizas se desarrolla en tres etapas:

- (1) transformación mineral (deformación y sinterización de las partículas),
- (2) formación de la fase líquida inicial,
- (3) fusión progresiva de la fase sólida residual.

En una primera etapa consideró la especie mineral como el parámetro clave. Indicó que el aumento de la relación α (Ec.1.11) y de la relación S/A (Ec.1.12), favoreció la formación de mineral con bajo punto de fusión. Además, observó que S/A también influye significativamente en la segunda etapa, con mayores relaciones S/A correlacionadas con una temperatura más baja y un contenido más alto de la fase líquida inicial. Por el contrario, la tercera etapa se aceleró mediante una intensa transferencia de masa, ya que la viscosidad de la fase líquida disminuyó drásticamente al aumentar el valor α .

$$\alpha = \frac{(gCaO)}{(gSiO_2 + gAl_2O_3)} \quad \text{Ec.1.11}$$

$$\frac{S}{A} = \frac{(gSiO_2)}{(gAl_2O_3)} \quad \text{Ec.1.12}$$

El proceso de fusión puede indicarse como el mecanismo de “ablandamiento-fusión” que se presenta con cambios de viscosidad y flujo lento, producido por la elevada temperatura; o como el mecanismo de “fusión-disolución” referido a la generación de fundidos iniciales y activos de baja temperatura con baja viscosidad (Gupta *et al.*, 1998).

Chong *et al.*, 2019, también indicó que la fusibilidad de las cenizas de carbón dependen en gran medida del mineral y la composición química. La temperatura de ablandamiento de las mismas se asocia con el enriquecimiento del cuarzo (SiO_2); de la caolinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), que es un mineral de arcilla o silicato estratificado; y de la illita ($(K,H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}$), que es un filosilicato, y además por la falta de hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) y goetita ($\alpha-Fe_3O_4(OH)$).

En general, las temperaturas de fusión disminuyen con el aumento de Na_2O , Fe_2O_3 y con el aumento de la relación S/A (SiO_2/Al_2O_3) (ver Ec.1.12), alcanzando un mínimo con un contenido de CaO de 30 o 35% en peso. Asimismo, se observó elevadas temperaturas de fusión con la formación de minerales de alto punto de fusión, como el Cuarzo (SiO_2), mullita ($Al_6Si_2O_{13}$), anortita ($CaAl_2Si_2O_8$) y gehlenita ($Ca_2Al_2SiO_7$), pero con la adición de elementos fundentes como por ejemplo la cal (CaO), beneficia la transformación de estos minerales en minerales de bajo punto de fusión.

Se considera que la progresión de DT a FT se debe principalmente a un cambio en la viscosidad de la fase líquida. La alta viscosidad de la fase líquida también ralentiza la tasa de contracción de las cenizas de carbón, lo que conduce a elevadas temperaturas de fusión.

Por lo tanto, el proceso de fusión de cenizas depende de las propiedades tanto de la fase sólida como de la líquida.

En la Figura 11 se muestra en el gráfico (a) cómo disminuyen las temperaturas DT, ST, HT y FT con el aumento de la relación “α” (ver Ec.1.11) desde 0,14 a 0,75, incrementando la concentración de CaO en las muestras de carbón analizadas en el estudio. Los contenidos de CaO fueron: 10,0% (muestra Ca10), 20,4% (muestra Ca20), 27,0% (muestra Ca27) y 35,0% (muestra Ca35), respectivamente. Asimismo, en el gráfico (b) puede verse la variación de las temperaturas normalizadas con el aumento de la relación S/A (ver Ec.1.12), que lo hace desde 1,0 a 4,0. En esta experiencia se realizó para contenidos de SiO₂ de: 30,6% (muestra SA1), 40,8% (muestra SA2), 45,9% (muestra SA3) y 49,0% (muestra SA4).

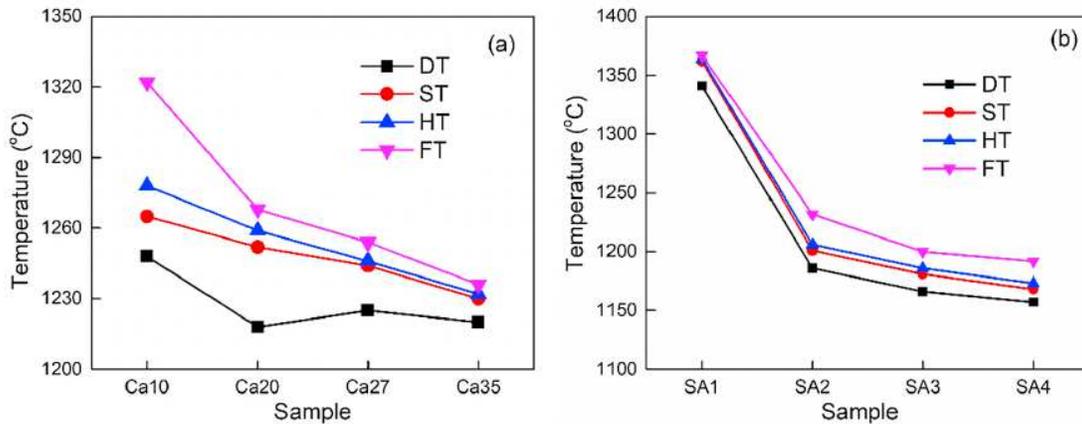


Figura 11. Disminución de las temperaturas de fusibilidad de las cenizas de carbón en función de las relaciones “α” y S/A, según Chong et al., 2019.

Las temperaturas de fusibilidad caen al aumentar el valor “α” (ver Ec.1.11), debido a la formación de minerales de bajo punto de fusión, esta disminución de la temperatura también se observó con el aumento de S/A (ver Ec.1.12), que los autores lo atribuyen a la generación masiva de la fase amorfa (formación del estado sólido en estructura desordenada).

Por otro lado, Chong et al., 2019 informaron que la fusibilidad está relacionada con la relación base a ácido (B/A) de los componentes de las cenizas (ver Ec.1.9). Pero en las experiencias adicionaron como óxidos básicos al óxido de sodio (Na₂O) y al óxido de potasio (K₂O); y como óxido ácido, al óxido de titanio (TiO₂), por lo que la relación B/A quedó definida de manera similar a la Ec.1.9.

$$B/A = \frac{(\%CaO + \%Fe_2O_3 + \%MgO + \%Na_2O + \%K_2O)}{(\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%TiO_2)}$$

En este trabajo se mencionó que las cenizas de carbón presentaron las temperaturas de fusión más bajas cuando B/A está cerca de 1,0. Sin embargo, también se indicó que mientras la fusibilidad disminuye a medida que aumenta S/A, la relación B/A permanece constante, lo que sugiere que S/A es un parámetro importante para las cenizas de carbón para una misma relación. Esto puede atribuirse a la transformación mineral relacionada por medio de la Ec.1.11.

La Ec.1.9 también fue propuesta por Vamvuka y Zografos, 2004, Pronobis, 2005 y por James *et al.*, 2012, para determinar la relación de B/A, incluso para muestras de cenizas de biomasa. Sin embargo, esta relación de deposición ha sido establecida para combustibles con bajos contenidos en fósforo, como el carbón. El P₂O₅ tiene una temperatura hemisférica de 569°C y se puede deducir que un alto contenido en fósforo intensificará las fases de baja temperatura de fusión, así parece correcto localizar el óxido de fósforo en el numerador. Por ello, Pronobis, 2005, indicó que puede adicionarse este componente en el numerador de la relación B/A, quedando así definida la Ec.1.13.

$$B/A = \frac{(\%CaO + \%Fe_2O_3 + \%MgO + \%Na_2O + \%K_2O + \%P_2O_5)}{(\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%TiO_2)} \quad \text{Ec. 1.13}$$

El autor reportó valores de B/A de 0,557 para carbones bituminosos de alta escoria y de 0,214 para los de baja escoria. El autor también reveló resultados del índice B/A para mezclas de carbón con biomasa (madera y paja), indicando valores sensiblemente mayores a los indicados anteriormente (0,559 y 0,216, respectivamente). Estos resultados los consideró lógicos debido a que las biomásas que se utilizaron en los ensayos son del tipo lignocelulósicas, que aportan mayores contenidos de SiO₂ y de metales alcalinos.

1.8 INDICADORES BASADOS EN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS CENIZAS.

El comportamiento de las cenizas en el hogar de una caldera de vapor puede ser evaluado por medio de CA y CB definidos anteriormente. Las ecuaciones Ec.1.11, Ec.1.12 y Ec.1.13 son algunas relaciones utilizadas para este propósito.

Las experiencias de la combustión del carbón permitieron desarrollar índices o correlaciones teóricas basadas en resultados empíricos con el fin de predecir de manera muy acertada, el comportamiento de un determinado recurso respecto a la escorificación y ensuciamiento que provocan las cenizas.

Estos índices en algunos casos pueden ser extendidos a la evaluación de biomásas utilizadas como combustibles de calderas de vapor (Nogués *et al.*, 2010). No obstante, Kaer, 2001, indicó que las biomásas presentan una mayor complejidad de sus cenizas, debido a

una mayor presencia de compuestos alcalinos y cloro, que se combinan y forma cloruro de potasio (KCl), que posteriormente provoca un aumento de las cenizas volantes (“fly ash”); y por consiguiente una mayor tasa de acumulación de depósitos en las últimas etapas de los pasajes de gases en un generador de vapor, particularmente en zonas de transferencia de calor del tipo convectivas.

Existen índices de comportamiento de las cenizas que permiten evaluar el grado de ensuciamiento, escorificación y posible corrosión que podría presentarse trabajando con un combustible sólido y que desarrollen cenizas con elementos componentes de ciertas características y proporciones, que modifican la estructura final de las mismas en presencia de elevadas temperaturas y en función del ambiente que las rodea.

Por otro lado, Fernandez Diez, 2000, indicó que para el diseño del hogar de un generador de vapor y la evaluación de un combustible desde el punto de vista de sus cenizas, se debe considerar el peso de estas cenizas referido a la unidad de aporte de calor, según las ecuaciones Ec. 1.14 y Ec.1.15. La Ec.1.16 fue escrita en unidades del Sistema Internacional de Medida (SI) para poder comparar posteriormente este índice con los que se obtendrán en el presente estudio.

$$\frac{\text{Ceniza (\% en peso)}}{\text{PCS (Btu/lb)}} \times 10^4 = \frac{\text{lb}_{\text{ceniza}}}{10^6 \text{ Btu}} \quad \text{Ec.1.14}$$

$$\frac{\text{Ceniza (\% en peso)}}{\text{PCS (kJ/kg)}} \times 10^3 = \frac{\text{kg}_{\text{ceniza}}}{\text{MJ}} \quad \text{Ec.1.15}$$

$$\frac{\text{Ceniza (\% en peso)}}{\text{PCS (MJ/kg)}} \times 10^3 = \frac{\text{kg}_{\text{ceniza}}}{\text{GJ}} \quad \text{Ec.1.16}$$

La Tabla 7.4 del Anexo muestra el resultado de un análisis inmediato realizado por el autor para tres tipos de carbones diferentes: bituminoso, sub-bituminoso y lignito. En la tabla se identifican los contenidos de humedad, materia volátil, carbono fijo, contenidos de cenizas, poder calorífico superior y los índices determinados a partir de las Ec.1.14, Ec.1.15 y Ec.1.16. Se observa que el contenido en ceniza es de 9 a 10% en peso, las mismas varían significativamente desde el punto de vista del aporte calorífico. En la tabla mencionada también puede observarse que el lignito introduce una cantidad de ceniza tres veces mayor a la que le corresponde al carbón bituminoso de alto en volátiles.

Las relaciones B/A calculadas con Ec.1.12 y Ec.1.13, indican sólo una tendencia potencial de ensuciamiento que podría presentarse con las cenizas de carbón mineral. Existen otras relaciones específicas, como el índice de escorificación o “slagging” (R_S), el ratio de “slag” (S_R), indicativo del grado de viscosidad de la escoria o “slag”; y el índice de ensuciamiento o

“fouling” (F_U). Febrero Garrido, 2015, resumió las ecuaciones correspondientes para la determinación de los parámetros antes mencionados para cenizas de madera (ver Tabla 1.1). Estas formulaciones coinciden con los indicados por Nogués *et al.*, 2010. Cada compuesto indicado en la tabla es correspondiente a su concentración en porcentaje en peso de cenizas en base seca. El parámetro “ S^d ” se refiere a la concentración en peso de azufre en base seca del combustible.

Tabla 1.1. Relaciones de deposición teórica de comportamiento de cenizas de madera, según Febrero Garrido, 2015.

Nombre	Ecuación	Número de ecuación	Rangos aproximados
Ratio base-ácido	$B/A = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$	(1)	
Ratio base-ácido (simplificado)	$B/A (simp) = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$	(2)	(*)
Ratio base-ácido (+P)	$B/A (+P) = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O + P_2O_5}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$	(3)	
Índice de “slagging”	$R_S = (B/A) \cdot S^d$	(4)	$R_S < 0.6$ bajo $R_S = 0.6 - 2.0$ medio $R_S = 2.0 - 2.6$ alto $R_S > 2.6$ extremadamente alto
Ratio de “slag”	$S_R = \frac{SiO_2}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO} \cdot 100$	(5)	$S_R > 72$ bajo $72 \geq S_R > 65$ medio $S_R < 65$ alto
Índice de “fouling”	$F_U = (B/A) \cdot (Na_2O + K_2O)$	(6)	$F_U \leq 0.6$ bajo $0.6 < F_U \leq 4.0$ alto $F_U > 4.0$ extremadamente alto (tendencia a sinterizar los depósitos)

(*) No existe un consenso claro en la literatura relativa a estos ratios. Pronobis *et al.*, 2005, encontraron un ensuciamiento bajo para $B/A_{(simp)} = 0,7$ y alto o severo para $B/A = 0,4 - 0,7$. Por otra parte, Viana *et al.*, 2012, mencionaron que sólo se podía esperar ensuciamiento cuando $B/A < 0.75$.

1.9 INFLUENCIA DE LAS CENIZAS EN LA CALIDAD DE UNA BIOMASA COMBUSTIBLE.

Las cenizas de un combustible influyen fuertemente en el diseño de calderas convencionales y modernas y en los parámetros operativos de los generadores de vapor a través de factores como el tipo y la cantidad de incrustaciones, escorias y formación de aglomerados de cenizas sinterizados o fundidos (“clinkers”).

Una característica clave de la estructura de la ceniza es el rango de temperatura en el que la misma se ablanda y se funde. Dado que las cenizas son una mezcla heterogénea de elementos mayormente inorgánicos, algunas partículas de las mismas se funden a temperaturas más bajas que otras, brindando a una única muestra un rango de temperaturas de “fusión”.

La versión actual de la norma ASTM D-1857 (ASTM, 2010), define las pruebas analíticas y cuatro "puntos de control" que caracterizan el comportamiento de las cenizas de carbón mineral en relación a su fusibilidad. Si bien esta norma indica el procedimiento para el análisis de la fusibilidad de muestras de carbón, la misma puede ser generalizada para el análisis de cualquier tipo de biomasa sólida o material inorgánico (Golato *et al.*, 2021).

Las calderas diseñadas para funcionar "en seco", con una ceniza de alta temperatura de fusión, no pueden operar eficazmente "en húmedo", con una ceniza de escoria fluida y viceversa. La capacidad de predecir las temperaturas de fusión de las cenizas es útil cuando se considera la quema de mezclas de combustibles por razones económicas y/o de cumplimiento ambiental, o cuando se consideran algunos aditivos para cumplir con aspectos técnicos. Por ejemplo, en calderas que queman carbón se les agrega piedra caliza para el control de la contaminación por azufre. En cualquier situación, las propiedades de fusión de las cenizas tienen una dependencia no lineal con la composición mineral de los combustibles (Córdoba, 2015).

1.10 ESTUDIOS DE FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS DE BIOMASAS.

Los estudios antes mencionados sobre la fusibilidad de las cenizas de carbón mineral se hicieron extensivos a otros combustibles sólidos, como por ejemplo, los biocombustibles del tipo lignocelulósicos (Miles *et al.*, 1985, Bryers, 1996, Vamvuka y Zografos, 2004, James *et al.*, 2012, etc.).

Algunos residuos agrícolas se consideran de suma importancia para la producción de energía a través de la combustión. El comportamiento térmico de las cenizas también puede predecirse mediante análisis químicos, mineralógicos, microscópicos y térmicos. También es factible la eliminación de elementos problemáticos para reducir la escoriación y el ensuciamiento en los hornos mediante la lixiviación de estos combustibles de biomasa con agua.

Por otro lado, Miles *et al.* (1985) indicaron que hay muy poco hierro en muestras de biomasa en relación al carbón mineral, por lo tanto en este caso el hierro juega un papel menor en los depósitos de cenizas, excepto en circunstancias especiales. Además, observaron que las diferentes formas de hierro en la biomasa indican que poseen elementos con mayor capacidad de intercambio iónico en relación al carbón mineral.

Zevenhoven-Onderwater (2001), observó las diferentes fracciones en que se presenta la materia que forma las cenizas (ver Figura 12). Pudo distinguir dos grandes constituyentes en la ceniza: el material intrínseco y el material extrínseco. El primero es inherente al combustible y se puede desglosar en tres fracciones: los minerales incluidos en la estructura del recurso, los elementos inorgánicos asociados orgánicamente y las sales solubles. El

segundo grupo corresponde al material agregado durante el cultivo, extracción y/o cosecha, transporte y adecuación del combustible.

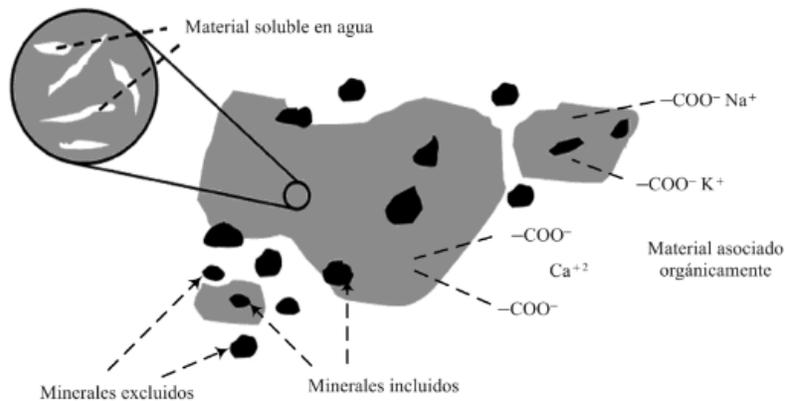


Figura 12. Constitución de la materia que forman las cenizas de una biomasa, según Zevenhoven-Onderwater, 2001.

Vamvuka y Zografos, 2004, estudiaron las tendencias de deposición mediante el uso de índices empíricos para cenizas de biomasa. La caracterización de las muestras analizadas en ese estudio, reveló que las mismas eran bajas en cenizas y en azufre (%S), pero ricas en CaO, K₂O, P₂O₅ y níquel (Ni). En el trabajo se propuso una lixiviación con agua (lavado), resultó en reducciones significativas de cenizas (hasta un 40%) y de elementos indicados como problemáticos tales como el %K (hasta un 93%), %Na (hasta un 96%), %P (hasta un 85%) y %Cl (hasta un 97%); incluso la disminución de algunos metales pesados (Cu, Mo, Pb y As), lo que provocó un mejor comportamiento respecto a la fusibilidad de las cenizas. Los autores encontraron que operando con temperaturas de combustión más bajas (< 900°C) y con el proceso de lixiviación con agua, redujeron sustancialmente el potencial de ensuciamiento debido a los álcalis, lo que demostraron que no debe esperarse problemas relacionados con las cenizas en calderas que utilizan residuos agrícolas con cierto grado de limpieza o pre-tratamiento.

La Tabla 7.5 del Anexo muestra los resultados del análisis químico de las cenizas de orujo de olivo, madera de olivo, madera de citrus y brotes de vid, quemadas con diferentes temperaturas de combustión (600°, 780° y 900°C, respectivamente). Es importante observar que a mayor temperatura de trabajo, menor es la pérdida por ignición. Estas mismas se cuantifican como el material volatilizado durante el proceso de combustión. Como puede observarse, los niveles de cenizas son altos en Ca, K y P y en menor medida en Mg, los cuales son nutrientes esenciales para las plantas y agentes de mejoramiento del suelo. Además, el orujo y la madera de olivo contienen cantidades considerables de sílice, según se indica en el estudio. Estos elementos son de importancia para la fusión y deposición de

cenizas en hornos; y lo realizan mediante mecanismos de vaporización, condensación o reacciones secundarias (Miles *et al.*, 1995, Melissari, 2012, y Niu *et al.*, 2013).

Además, Vamvuka y Zografos, 2004 indicaron que para temperatura de combustión elevada aumenta la vaporización de algunas especies minerales incluidas en las cenizas, de modo que a 900°C las mismas se vuelven ricas en la mayoría de los óxidos, mientras se tornan más pobres en K₂O, ya que este compuesto y sus derivados son relativamente más volátiles. Además, observaron que parte del azufre se convierte en fase vapor y que se libera hasta los 780°C, fenómeno que observaron para todas las muestras de biomasa analizadas.

La Figura 13 muestra los resultados del análisis de fusibilidad de las cenizas ensayadas en el trabajo. Se observa la diferencia en el comportamiento de la fusibilidad de las muestras lavadas (l) en comparación con las no lavadas (u). Los autores mencionaron que la mayor diferencia de temperaturas entre IDT y FT, implica una tasa de ensuciamiento más lenta, obteniéndose la menor de ésta para la madera de olivo. Los autores indicaron, además, que los resultados obtenidos son consistentes con las composiciones de las cenizas de la Tabla 7.5 (ver Anexo).

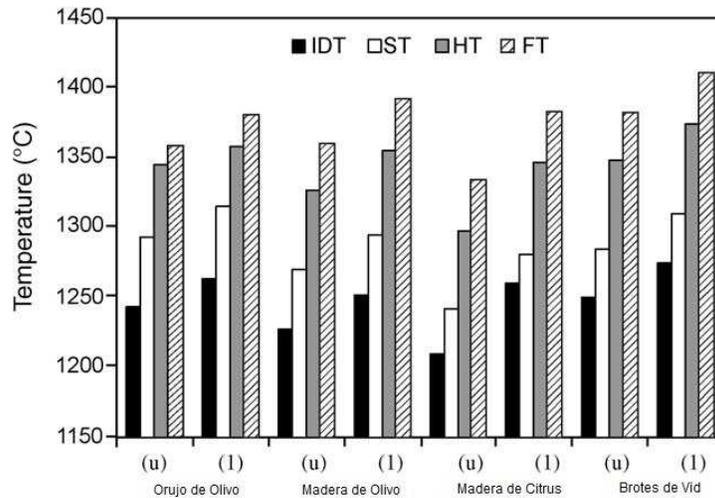


Figura 13. Temperaturas de fusión de cenizas de biomasa tratadas, según Vamvuka y Zografos, 2004.

Se indicó que la remoción de los metales alcalinos, así como el cloro y el azufre por lavado, al mismo tiempo que el enriquecimiento relativo de las cenizas con componentes de calcio, fue beneficioso para aumentar las temperaturas de fusión. Finalmente el trabajo concluyó que el hecho de que el aumento de las temperaturas de fusión de los materiales lavados no fuera superior a 50°C, puede explicarse por el muy alto contenido de calcio en las muestras originales.

Cabe destacar que estos resultados se basan en la producción de cenizas elaboradas en laboratorio y podrían presentarse diferencias con las cenizas reales encontradas en una caldera. Las cenizas de laboratorio contienen minerales sin reaccionar y son más finas. En un horno real, la incineración y la deposición dependen no sólo de las propiedades del combustible, sino también del diseño de la caldera y las condiciones de funcionamiento de la misma.

Por otro lado, Vamvuka y Zografos, 2004 indican que los metales alcalinos son relativamente volátiles y forman cloruros, hidróxidos y sulfatos, que producen mezclas de sales fundidas en superficies y en combinación con la sílice pueden formar silicatos alcalinos, que crean escorias y ensucian fácilmente a temperaturas normales los hornos de calderas. Además, observan que el cloro es un facilitador de la vaporización de los álcalis, lo que lleva a la condensación de los cloruros en las superficies de transferencia de calor en la caldera y promueve el desarrollo de sulfatos alcalinos corrosivos. Los autores demostraron que el lavado de las biomásas disminuyen los problemas de deposición en hornos de calderas de vapor.

Yang, 2016 indicó que las partículas de cenizas volantes deben transportarse a las superficies de deposición para generar la deposición de cenizas y que generalmente, pueden haber al menos cinco mecanismos de transferencia de partículas de ceniza a las superficies de deposición: impacto por inercia, termoforesis, condensación, difusión y reacciones químicas. La Figura 14 muestra un esquema del mecanismo de transporte mencionado. El autor observó que el impacto por inercia y la termoforesis involucran las partículas sólidas, mientras que la condensación y las reacciones químicas afectan a la fase gaseosa. La difusión puede tener un efecto sobre el transporte de las fases sólida y gaseosa cerca de la superficie de calentamiento, pero tiene un efecto más fuerte sobre el movimiento de las partículas submicrométricas. Por otro lado, los depósitos formados por difusión y termoforesis se distribuyen uniformemente alrededor del tubo, mientras que el depósito formado por el impacto inercial, se formará sólo en el lado del tubo aguas arriba con depósito corriente arriba en forma de montaña.

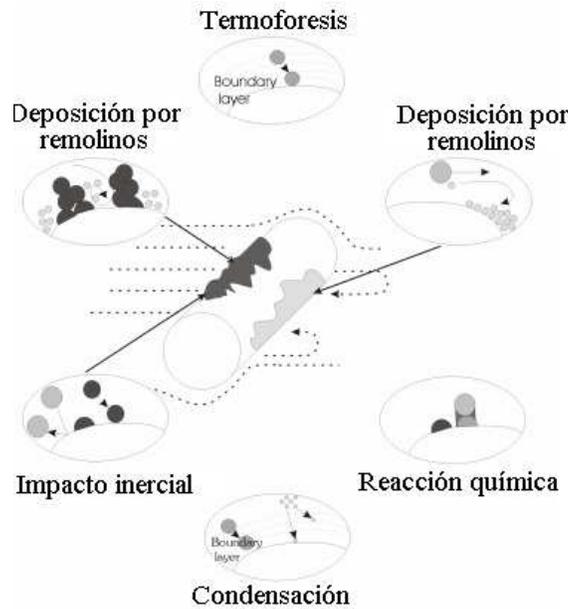


Figura 14. Mecanismos de transporte de las cenizas, según Yang, 2016.

Por otro lado, Melissari, 2012 estudió el proceso de formación de las cenizas durante la combustión y sus características tanto físicas como químicas. Indicó que los metales y óxidos son parcialmente evaporados por las altas temperaturas dentro de las partículas de combustible y pasan a formar parte activa en reacciones en la fase gaseosa. La cantidad que se volatiliza depende de las características del combustible, de la atmósfera alrededor de la partícula y de la tecnología del hogar de la caldera.

En su recorrido por la caldera precipitan cuando baja la temperatura y pueden nuclearse en superficie de finas partículas de CaO, pasando a formar parte de los gases como “fly-ash” (tamaño < 1 [µm]). Debido a un proceso de reoxidación-nucleación-coalescencia estas partículas se aglomeran componiendo un tipo de ceniza de tamaño mayor a 10[µm], denominado “fly-ash” grueso. La Figura 15 muestra el mecanismo de formación de las cenizas según lo descrito por el autor.

Más tarde Niu *et al.*, 2016, han estudiado el efecto de los óxidos de silicio, aluminio y potasio sobre cenizas fundidas mediante la adición de los compuestos correspondientes, determinando la escorificación existente durante la combustión de diferentes biomásas residuales de China. Ellos encontraron que la adhesión de SiO₂ en cenizas de biomásas con alto contenidos de potasio, produce la formación de silicatos de bajo punto de fusión por la acción del cloruro de potasio (KCl) que se forma durante la combustión.

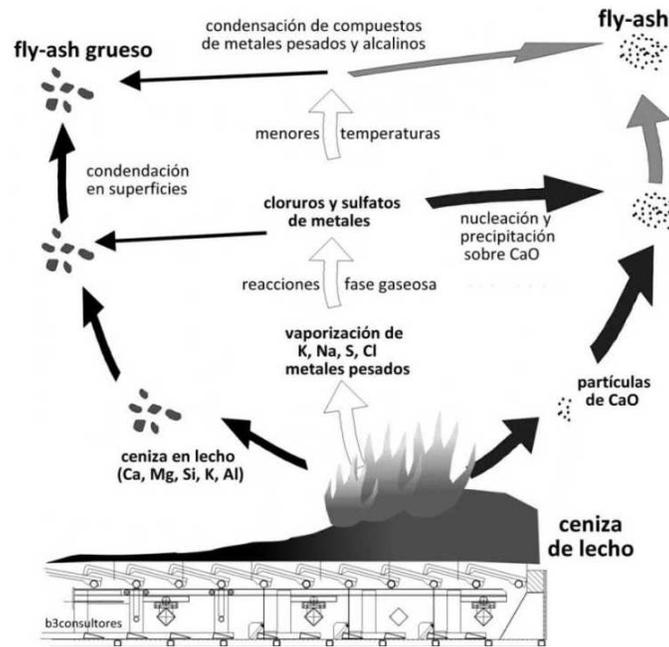


Figura 15. Mecanismo de formación de las cenizas en el interior de una caldera de vapor, según Melissari, 2012.

Mlonka-Mędrala, 2020, señaló que la presencia y concentración de metales alcalinos, compuestos de potasio, silicio y calcio tienen el mayor impacto en las temperaturas de fusión de las cenizas de una biomasa lignocelulósica. El autor reveló que el potasio se encuentra en las cenizas normalmente como cloruro de potasio (KCl), sulfato de potasio (K_2SO_4), carbonato de potasio (K_2CO_3) y fosfato de potasio (K_3PO_4); con temperaturas de fusión de $770[^\circ C]$, $1.069[^\circ C]$, $891[^\circ C]$ y $1380[^\circ C]$ respectivamente. Estas sales al combinarse fundamentalmente con SiO_2 y CaO , forman eutécticos de gran influencia en el comportamiento de fusión de las cenizas.

1.11 COMPOSICIÓN GLOBAL DE LAS CENIZAS DE BAGAZO Y RAC DE CAÑA DE AZÚCAR.

En la Tabla 7.6 del Anexo pueden observarse un resumen de los contenidos de los óxidos mayoritarios presentes en cenizas de bagazos de caña de azúcar encontrados por diferentes autores para distintas regiones y zonas agroecológicas en donde se produce azúcar de caña (Díaz Troyano, 2015; Miles *et al.*, 1995; García Figueredo, 2017; etc.).

De igual manera en la Tabla 7.8 puede observarse el resumen de los contenidos de los óxidos mayoritarios presentes en cenizas de RAC de caña de azúcar, encontrados globalmente para distintas regiones y zonas agroecológicas (Carvajal y Briseño, 2005; Junqueira Franco *et al.*, 2012; Nakashima *et al.*, 2017; etc.). Cabe indicar que los estudios

encontrados para RAC fueron menores que para el caso del bagazo, donde la mayoría de ellos fueron realizados para caña de azúcar cultivada en Brasil.

Asimismo, es importante destacar también que algunos de los estudios consultados se encontraban orientados a la caracterización de las cenizas de bagazos y de RAC de caña de azúcar para la formulación de morteros cementicios, con el objetivo de mejorar sus características de durabilidad, resistencia a esfuerzos y a condiciones climáticas expuestas y sirven de base para analizar el comportamiento puzolánico (reacción puzolánica), de un material aglomerante para reaccionar con hidróxido de calcio y formar compuestos hidráulicos similares a los que se generan durante la hidratación del cemento (Arif *et al.*, 2016).

Por otro lado, esta caracterización de los componentes de las cenizas también es útil para llevar a cabo estudios de comportamiento mecánico de las mismas cuando son sometidas a elevadas temperaturas y a diferentes tipos de atmósferas, como ser el interior del hogar de una caldera de vapor. Fogliata, 1995 indicó que las sustancias minerales de la caña de azúcar provienen del suelo y tienen una marcada influencia en el contenido de sales tanto en el jugo de caña como en la fibra. El autor expresó como prueba de ello que existen cultivos de caña que crecen en suelos salinos y/o sódicos, donde el jugo de caña posee un notable incremento de sales solubles, causando por consiguiente problemas en la fabricación de azúcar. Además, el autor indicó que el contenido de elementos minerales en el jugo de un tallo maduro aumenta con el transcurrir de los meses durante la cosecha y que los elementos minerales contenidos en las hojas y tallos desde la brotación hasta la cosecha, disminuyen con la edad.

El análisis que realizó sobre la fibra, demostró que la proporción de elementos minerales es distinta a la del jugo de caña, pues en aquella predomina la sílice (SiO_2), seguido del potasio (K) y en menor medida los demás elementos. Esto ocasiona la formación de un mineral vítreo muy sólido de color verdoso en las calderas de los ingenios cuando se quema bagazo. El autor observó que este material vítreo estaba compuesto por 75% de SiO_2 , seguido en menor medida por K_2O , CaO , MgO y Na_2O ; y que los mismos mantienen cierta proporcionalidad con los datos originales del bagazo. Asimismo, observó que en hojas de caña, la composición de las cenizas tenía la misma proporción que la del tallo con predominio de SiO_2 , seguido de K_2O y de los otros elementos.

1.12 MATRIZ ENERGÉTICA ARGENTINA.

La distribución de fuentes de energía primaria en Argentina, se compone de un espectro similar al de 1970. Hace 51 años teníamos una dependencia del 89% de las energías fósiles (petróleo y gas). Actualmente el panorama no ha cambiado, en base a los últimos datos de

la Secretaría de Energía (SEN, 2020), nuestro país posee una producción de energía primaria del 89,5%, de las cuales el 55% corresponde a gas natural y el 34,5% a petróleo, incluso ese año hubo una importación de energía proveniente de fuente nuclear de 2778 [miles Tep] y 871 [miles Tep] de carbón mineral.

En la Figura 16 puede verse la actual matriz energética de la Argentina, basada en la oferta interna de energías primarias. Se observa que el 89,5% de energía consumida en el país proviene de combustibles fósiles, o sea, se genera mediante recursos no renovables, por lo que a medida que se van consumiendo disminuyen las reservas sin reposición, por lo que en algún momento se producirá una crisis de disponibilidad.

Debido al agotamiento de los yacimientos primarios convencionales y a la ausencia de inversiones en exploración intentando su reemplazo, las opciones de sustitución se concentraron en la importación de enormes volúmenes de combustibles; y desde el 2012 en la exploración y desarrollo de recursos no convencionales.

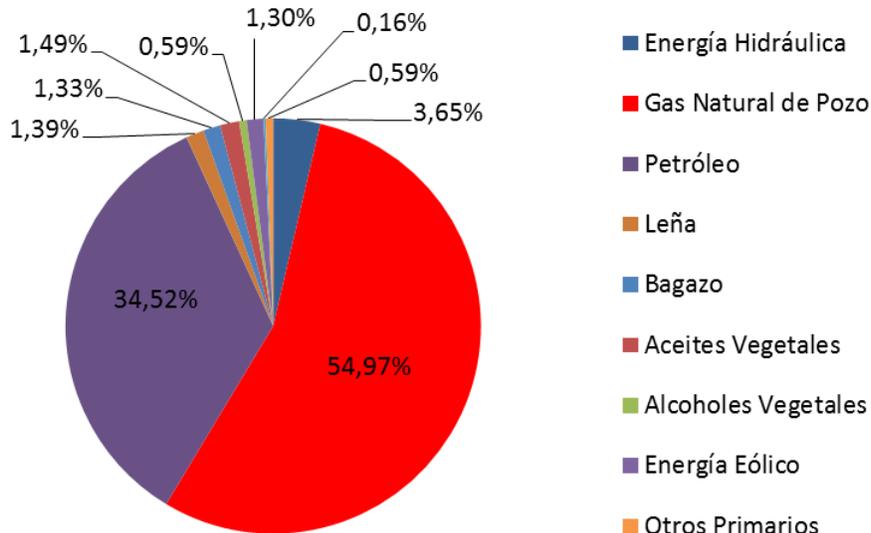


Figura 16. Matriz energética Argentina. Fuente: Elaboración propia, según SEN, 2020.

En el año 2017 Argentina dispuso una convocatoria abierta nacional e internacional para la presentación de proyectos vinculados a la generación de energía eléctrica provenientes de fuentes renovables (Resolución 275-E/2017, de la Secretaría de Energía de la Nación), en el marco del “Programa RenovAr (Ronda 2). La respuesta a esta convocatoria fue muy favorable, ya que permitió aumentar la provisión de energía eléctrica a la red nacional y mejorar la matriz energética. En la Figura 17 pueden verse los resultados del Proyecto RenovAr 2, donde hasta la fecha hubo un incremento de la potencia instalada de aproximadamente 2.007 [MW].

Potencia instalada [MW]. RenovAr 2

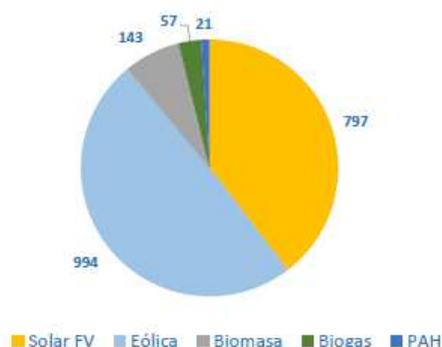


Figura 17. Potencia instalada por medio del Proyecto RenovAr 2 según SEN, 2020.

La Ley 27.640 de la República Argentina, sancionada el 15 julio de 2021, extiende la vigencia del régimen de promoción para la producción y uso sustentable de biocombustibles. Esta Ley tiene vigencia hasta el año 2030 y establece nuevos porcentajes de cortes para nafta y gasoil en relación con los distintos componentes que participen de su elaboración: en el caso de la nafta, pauta un mínimo obligatorio de 12% de bioetanol y una eventual reducción al 9%. Para el gasoil el corte mínimo del biodiesel será de un 5%, con una eventual reducción al 3%, mientras que para el caso de la caña de azúcar deberá contempla un mínimo de 6% de mezcla obligatoria.

1.13 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA CON BIOMASA EN ARGENTINA.

Argentina se va posicionando gradualmente a nivel internacional en estos temas, disponiendo de un gran potencial de biomasa para la producción de energía, ya sea a partir de cultivos especiales para bioenergía (cultivos energéticos), como especies herbáceas (sorgo, arundo donax, miscanto, bambú, pasto elefante, pasto varilla, etc.), cultivos leñosos (Chopo, Acacia, Sauce, Álamo, Pino, etc.); y a partir de residuos que dejan las actividades agrarias, como los cereales (arroz, avena, cebada, centeno, mijo, maíz, sorgo y trigo), oleaginosas (colza, girasol, lino y soja) e industriales (algodón y caña de azúcar) (Montico y Di Leo, 2009). Para este último caso, el residuo originado en la cosecha o rastrojo, son restos de hojas y tallos que quedan en el terreno y cumplen un rol clave en la cobertura del suelo en los esquemas de producción de siembra directa (Ibarguren *et al.*, 2017).

En la Tabla 7.9 del Anexo se muestra la superficie cosechada (ha), producción (%), rendimiento promedio (t/ha) y producción (t) de los quince cultivos agrícolas más importantes de Argentina (Montico y Di Leo, 2009), lo que nos brinda una idea de que en el país hay provincias que disponen de significativas cantidades de residuos de biomasa, lo

que posibilitaría implementar sistemas de conversión térmicos para la generación de energía eléctrica y/o calor para procesos.

No obstante, si no se analizan previamente las condiciones de uso de estas biomásas residuales, esta posibilidad pondría en riesgo la calidad de los suelos, debido al significativo rol que cumplen los rastrojos sobre en la sustentabilidad de los agro-ecosistemas, más en aquellas provincias con alta productividad agrícola.

1.14 PRODUCCIÓN POTENCIAL DE ENERGÍA CON BIOMASA EN TUCUMÁN.

En los últimos años la industria de Tucumán, estuvo sujeta a restricciones en el suministro de energía eléctrica y gas. El sistema de transporte eléctrico sobre el que se asienta el abastecimiento de la provincia es 132 KV, el cual se muestra insuficiente, debido al fuerte crecimiento registrado en la demanda de energía y a la falta de inversiones encaminadas al aumento de generación eléctrica y su distribución, por lo que se observa un agotamiento de la capacidad eléctrica instalada (Flores Marco *et al.*, 2008).

El aprovechamiento de los recursos biomásicos procedentes de las economías regionales, como los derivados de la industria azucarera, vienen creciendo en los últimos años y se muestran como una oportunidad para la cogeneración de energía eléctrica. Además, existen otros recursos biomásicos que deberían comenzar a estudiarse en detalle, como son los residuos del manejo de las plantaciones de cítricos (poda y renovación de limoneros), los residuos de la cosecha del trigo, maíz, derivados de la cosecha de la soja y los provenientes de la industria forestal.

Asimismo, la provincia de Tucumán presenta zonas marginales de bajas precipitaciones, con suelos salinos y de elevada radiación solar, que podrían ser aprovechadas para el cultivo de diferentes variedades de especies herbáceas para la producción de energía.

1.15 EL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

La biomasa proveniente de la industria azucarera que más resulta aprovechable desde el punto de vista energético es el bagazo de la caña de azúcar y los residuos agrícolas cañeros (RAC). Además, existen estudios que muestran a la vinaza como un residuo posible de aprovechar energéticamente (Franck Colombres *et al.*, 2016; Khairnar *et al.*, 2013 y Ramaiah y Chikhlikar, 1986).

La Figura 18 muestra la distribución geográfica del área cañera cosechable para la zafra 2017, según Fandos *et al.*, 2017a. La superficie con caña de azúcar de Tucumán para la zafra 2016, fue de 274.180 [ha] (Fandos *et al.*, 2016a), se adoptó un rendimiento conservador para el cultivo de caña de azúcar de 56,6 [t/ha] y que el 78% son tallos

molibles, por lo que la cantidad de bagazo anual equivale a 13,24 [t] por hectárea cosechada.

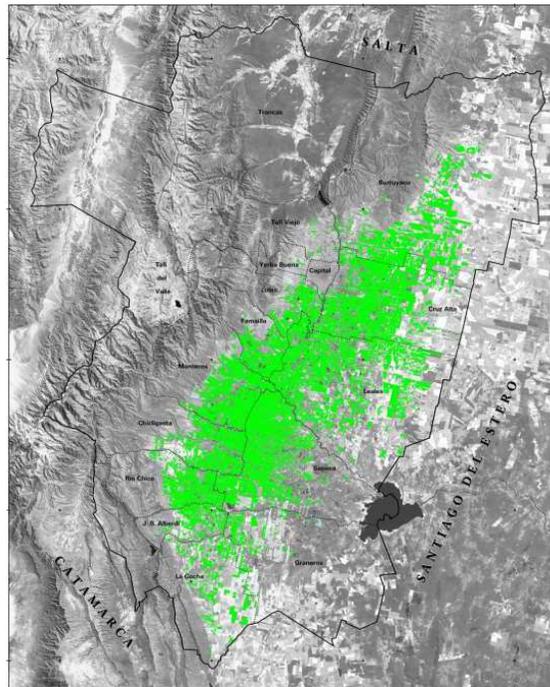


Figura 18. Superficie con caña de azúcar (color verde) en Tucumán para la campaña 2017. Según Fandos et al., 2017a.

La biomasa lignocelulósica es una materia prima renovable atractiva para la producción de biocombustibles. El Bagazo de caña de azúcar, pertenece a este grupo, es el principal subproducto de la industria de la caña de azúcar. Contiene aproximadamente 50% de celulosa, 25% de hemicelulosa y 25% de lignina (Ashok et al., 2000).

Este combustible representa el 30% de los tallos verdes molidos y es el residuo fibroso que se obtiene de la extracción del jugo de la caña de azúcar. El mismo se obtiene con un 50% de humedad aproximadamente, dependiendo del ajuste de los molinos de extracción de jugo y de la cantidad de agua de imbibición utilizada. Esta última es el agregado de agua que se le realiza al bagazo para extraer por lavado la mayor cantidad posible de azúcar contenida en el mismo. Dicha operación se realiza a la salida de cada molino de un tándem de molienda; y representa un beneficio importante al obtener una mayor extracción de azúcares. No obstante, el uso excesivo de agua de imbibición, trae consigo un bagazo con mayor contenido de humedad, lo que atenta al poder calorífico inferior del mismo, y por lo consiguiente una menor energía del combustible, cuando sea utilizado en las calderas de vapor (González Pérez et al., 2010). Además, la eficiencia del trabajo del tándem se mide por porcentaje de sacarosa aparente (%Pol) y por el consumo energético asociado (Corrales Suárez et al., 2013).

1.16 RESIDUOS DE LA COSECHA DE LA CAÑA DE AZÚCAR (RAC)

Respecto al uso del RAC como combustible, el mismo depende de la variedad de la caña de azúcar y de su posibilidad de ser recolectado en la zona agroecológica donde se encuentra cultivada la caña. Durante la zafra 2014, la Provincia de Tucumán tuvo disponible 265.250 [ha] de caña de azúcar, de las cuales el 63% se ubicaron en la llanura deprimida, el 23% en la zona de pedemonte y el restante 14% en la llanura Chaco Pampeana, donde se logró un rendimiento cultural promedio de 56,6 [t/ha] (Casen *et al.*, 2015).

Considerando 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 (Digonzelli *et al.*, 2006 y Casen *et al.*, 2012), 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. El RAC como posible combustible para ser aprovechado en calderas de vapor es factible según Feijóo *et al.*, 2015 y Golato *et al.*, 2017. No obstante, debido a los mayores contenidos de cenizas y a las más bajas temperaturas de fusión registradas en esta biomasa en relación a las cenizas de bagazo, podrían traer un aumento de los depósitos en el hogar de la caldera y producir problemas de escorificación y/o incrustación en tubos y en partes internas de la unidad de generación de vapor.

1.17 OTROS RESIDUOS AGRÍCOLAS CON POTENCIAL ENERGÉTICO

Golato, 2018, indicó que existen otros residuos agrícolas de cultivos de la provincia que podrían ser aprovechados energéticamente. La Tabla 7.10 del Anexo muestra una valoración energética y el potencial de energía térmica que podría producirse con las biomásas residuales provenientes de las principales actividad agrícolas e industriales de Tucumán.

El autor definió parámetros de comparación como la cantidad de biomasa residual total generada por el cultivo durante una campaña (R [t/zafra]); el factor de residuo o cantidad aprovechable del mismo (FR [$t_{residuo}/t_{biomasa}$]); el contenido de humedad del recurso (W [%]), el poder calorífico inferior de las biomásas (PCI [kJ/kg]); la energía total que podría producirse ($E_{prod.}$ [MJ]); las correspondientes unidades equivalentes al petróleo (Uep [$t_{biomasa}/t_{petróleo}$] y $Mtep$) y las toneladas equivalentes de petróleo por unidad de área cultivada ($Tepha$ [Tep/ha]). Se observó que de todos los cultivos considerados, el que mayor cantidad de residuos deja en campo con posibilidades de aprovechamiento energético es el trigo, ya que es el que posee mayor FR (4,54), seguido del maíz con 1,14.

Además, indicó que la poda de citrus, el bagazo y el RAC de caña de azúcar, poseen un FR prácticamente similar (promedio 0,22 [$t_{residuo}/t_{biomasa}$]), por lo que aportarían la misma cantidad

de residuos por tonelada de biomasa generada. En ese estudio se consideró también a la vinaza residual proveniente de la fabricación de alcohol de melaza de caña de azúcar como posible fuente de energía. Se indicó que la incidencia energética que tendría la vinaza a 65 [°Bx] sería prácticamente despreciable frente al resto de las biomásas residuales, ya que el FR resultó muy bajo respecto a los otros cultivos ($3,46 \times 10^{-3}$ [$t_{\text{residuo}}/t_{\text{biomasa}}$]).

En la Tabla 7.11 del Anexo puede verse el potencial de producción de EE que tendría la provincia de Tucumán con el uso de los residuos de cosecha mencionados según Golato, 2018. El autor definió a CE [t/MWh] como el consumo específico de la biomasa por unidad de energía generada; EE_{Bruta} [MWh] a la cantidad de energía eléctrica bruta que podría producirse y a EE_{Neta} [MWh] como la cantidad de energía eléctrica neta posible a producir. Asimismo, observó que para obtener la misma unidad de energía el bagazo con 50% de humedad, necesita un 38,6% más de biomasa que el RAC con 15% de humedad, lo que lo vuelve muy competitivo a este último como biocombustible para la generación de energía eléctrica.

Este potencial de producción de EE con el uso de biomasa residual de los principales cultivos de Tucumán, indicarían una viabilidad para su aprovechamiento desde el punto de vista energético. No obstante, para llevar a la práctica este potencial resultaría necesario evaluar estos recursos desde el punto de vista de la calidad del combustible, específicamente los aspectos relacionados con sus cenizas.

2. OBJETIVOS E HIPOTESIS

2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta tesis fue estudiar las características de fusibilidad de las cenizas de las biomásas lignocelulósicas residuales de la actividad azucarera de Tucumán, específicamente la del bagazo de caña de azúcar y de los residuos agrícolas de cosecha de la caña (RAC), en relación a la composición de sus elementos químicos mayoritarios básicos y ácidos de origen inorgánico.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una búsqueda de antecedentes sobre la composición de las cenizas de bagazo y de RAC a nivel regional y mundial. Comparar los componentes mayoritarios elementales de las cenizas en estudio con las encontradas en carbón mineral y determinar los índices de comportamiento utilizados normalmente en cenizas de carbón. Para ello, se seguirán las metodologías propuestas por Pronobis, 2005, Vamvuka y Zografos, 2004, Nogués *et al.*, 2010, James *et al.*, 2012 y Pintana y Tippayawong, 2016.

- Seleccionar muestras de bagazo y de RAC de las principales variedades de caña de azúcar de la provincia de Tucumán, Argentina. Realizar la caracterización fisicoquímica y energética de las mismas por medio del análisis del contenido de humedad (W), cenizas (Cz), carbono fijo (CF), sólidos volátiles (SV), azufre (S), cloro (Cl), metales (Si, Al, Ti, Fe, Ca, Mg, Na, K y P), poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI).

- Determinar las concentraciones de los óxidos correspondientes a los metales considerados como elementos mayoritarios ácidos al SiO_2 , Al_2O_3 y TiO_2 ; y como básicos al Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 y P_2O_5 , según Niu *et al.*, 2010 y Melissari, 2014. Posteriormente, determinar los índices de comportamiento de las cenizas de las biomásas en estudio para evaluar la posibilidad de escorificación, sinterización, ensuciamiento, deposición, corrosión, formación de silicatos, erosión y fluidización de las mismas. Además, determinar las temperaturas características de fusión, según ASTM D1857-2010.

- Estudiar la sensibilidad e incidencia de los componentes mayoritarios ácidos y básicos de cenizas de bagazo y de RAC sobre la fusibilidad de las mismas, considerando atmósferas oxidantes (AO) y reductoras (AR).

- Estudiar la variación de la fusibilidad de las cenizas de las biomásas en estudio en función de la variación de los CB de las mismas, considerando AO y AR.
- Determinar una correlación entre la temperatura de inicio de la fusión (DT) de las cenizas en función de la variación de la concentración de CB para prever el posible comportamiento deficiente en el hogar de una caldera de vapor.
- Finalmente, realizar un estudio cualitativo de la fusión de las cenizas originales de bagazo, RAC y de cenizas elaboradas sintéticamente para diferentes composiciones de CA y CB sobre placas de acero estándar de tubos de caldera.

2.3 HIPÓTESIS

Las biomásas lignocelulósicas presentan características fisicoquímicas y energéticas que dependen del tipo y origen de las mismas, sistema de recolección y acondicionamiento para su combustión en un generador de vapor, según observaron Zamora Rueda *et al.*, 2016a. En general las estructuras químicas encontradas en cenizas de biomasa (Vamvuka y Zografos, 2004, Arif *et al.*, 2016, etc.), son similares a las halladas en cenizas de carbón mineral y en la producción de “clínker” (Castañón *et al.*, 2012). Es por ello que las cenizas de biomasa son utilizadas como complementos y/o aditivos para la formulación de morteros cementicios (Singh *et al.*, 2000, Souza *et al.*, 2011 y Serker *et al.*, 2021).

Por esto se consideró como hipótesis que las cenizas de bagazo y de RAC de caña de azúcar al tener estructuras químicas similares, poseen una fusibilidad e índices de comportamientos en igual orden de magnitud que las encontradas en carbón mineral y en otras biomásas lignocelulósicas. Además, según lo observado por Fernández Llorente y Carrasco García, 2005 y Baxter, 1998, existen frecuentes problemas durante la combustión de biomasa en calderas de vapor, asociados a la existencia de cenizas con fracciones de componentes inorgánicos que influyen notoriamente en el proceso de incineración y que les confiere características físicas y químicas indeseables, relacionados con fenómenos de corrosión, erosión, deposición y escorificación. Por lo que estos fenómenos, también observados en generadores de vapor de nuestra región, se deberían a las características puntuales de las cenizas de las biomásas en estudio. Las mismas tendrían CA y CB que afectarían directamente la temperatura de ablandamiento de las cenizas en las zonas reductoras y oxidantes del lecho combustible del hogar de la caldera de vapor.

Por ello, el diseño y/o adecuación de un generador de vapor alimentado con biomásas residuales, se encontraría sujeto a factores que resultarían relevantes de analizar dada la gran variedad de características que presentan las regiones en cuanto a la calidad de los suelos, clima, tecnología de recolección, etc. Esto fue observado por Melissari, 2012 y Liu *et al.*, 2013, para biomásas de otras regiones.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ÍNDICES DE COMPORTAMIENTO DE LAS CENIZAS DE UN COMBUSTIBLE

En el presente estudio se consideraron como índices de evaluación del comportamiento de las cenizas en el interior del hogar de una caldera de vapor que operan con bagazo y RAC de caña de azúcar, los indicadores basados en la composición química de las mismas. Estos índices nos brindan información para prever una posible escorificación, sinterización, ensuciamiento, deposición, corrosión, formación de silicatos, erosión y fluidización de dichas cenizas. Para ello, se tomaron diversos indicadores propuestos para cenizas de biomasa por Vamvuka y Zografos, 2004, Nogués *et al.*, 2010 y James *et al.*, 2012.

Estos parámetros fueron evaluados para los datos encontrados en bibliografía referidos a la composición química de las cenizas de bagazo y de RAC de caña de azúcar de Tucumán y del mundo (ver Tablas 7.7 y 7.8 del Anexo). Asimismo, como referencia se determinaron estos índices para carbón mineral de alto y de bajo volátiles, cuyas características y composición química fueron informadas por Fernández Diez, 2000.

3.1.1. RELACIÓN BASE-ÁCIDO ($R_{B/A}$) COMO ÍNDICE DE ESCORIFICACIÓN

Se evaluó la relación base-ácido ($R_{b/a}$) de las cenizas de las biomásas analizadas a partir de la composición de los óxidos mayoritarios comúnmente encontrados en los de combustibles sólidos. Para ello, se utilizó la Ec.3.1 en donde los valores de los óxidos se consideraron en por ciento en peso.

$$R_{B/A} = \frac{(\%CaO + \%Fe_2O_3 + \%MgO + \%Na_2O + \%K_2O + \%P_2O_5)}{(\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%TiO_2)} \quad \text{Ec. 3.1}$$

En el análisis de este índice se tuvo en cuenta lo indicado por Pronobis, 2005 que determinó lo siguiente:

$R_{B/A} < 0,75$ no existe peligro de escorificación.

$R_{B/A} \sim 0,75$ presenta bajo peligro de escorificación.

$R_{B/A} > 0,75$ presenta alto peligro de escorificación.

3.1.2. ÍNDICE DE SINTERIZACIÓN (IS)

Se consideró como índice de sinterización (IS) a la relación de óxidos alcalinos térreos (CaO + MgO), respecto a los alcalinos (K₂O + Na₂O), según la Ec.3.2.

$$IS = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%K_2O + \%Na_2O} \quad Ec.3.2$$

Fernández Llorente y Carrasco García, 2005, indicaron que para IS > 2 la ceniza de una biomasa no presentaría riesgo de sinterización.

3.1.3. ÍNDICE DE ENSUCIAMIENTO (AI)

Se determinó el índice de ensuciamiento (AI) por medio de la Ec.3.3, este parámetro tiene en cuenta la concentración de álcalis en cenizas respecto al PCS del combustible.

$$AI = \frac{\%K_2O + \%Na_2O}{PCS} \quad [kg/GJ] \quad Ec.3.3$$

Nougués *et al.*, 2010, establecieron que valores por debajo de 0,17 [Kg/GJ], los contenidos de álcalis no son problemáticos. Entre 0,17 [Kg/GJ] y 0,34 [Kg/GJ] existe un riesgo de ensuciamiento; y por encima de 0,34 [Kg/GJ] la biomasa será problemática en relación con el ensuciamiento.

3.1.4. ÍNDICE DE ESCORIFICACIÓN POR ACCIÓN DEL AZUFRE (Rs)

Se evaluó la tendencia a la escorificación por influencia del contenido de azufre (%S) del combustible por medio de la Ec. 3.4 propuesta por Pronobis, 2005.

$$Rs = R_{b/a} \cdot \%S \quad Ec.3.4$$

Dónde:

R_{b/a} es la relación base-ácido (ver Ec.3.1).

%S es el contenido porcentual de azufre en el combustible.

El autor demostró una baja tendencia a la escorificación de las cenizas de un combustible sólido para valores de Rs < 0,6.

3.1.5. ÍNDICE DE DEPOSICIÓN “FOULING” (F_u)

Este índice es una medida de la tendencia al ensuciamiento por medio de las cenizas, también definido como “índice de ensuciamiento (R_f)” por Pintana y Tippayawong, 2016; y se refiere a la deposición seca de partículas de cenizas o la condensación de componentes inorgánicos volátiles en superficies de transferencia del calor. Este índice se determinó a partir de la Ec. 3.5.

$$F_u = R_{b/a} \cdot (\%K_2O + \%Na_2O) \quad \text{Ec.3.5}$$

Pronobis, 2005 determinó que:

$F_u < 0,6$ baja tendencia a la deposición de las cenizas.

$0,6 < F_u \leq 40$ alta tendencia a la deposición de las cenizas.

$F_u > 40$ extremadamente alta tendencia a la deposición de las cenizas.

3.1.6. ÍNDICE DE REACCIÓN DEL POTASIO (I_{K-SiO_2})

Este índice es una medida de la tendencia de la sílice a reaccionar con sales de potasio para formar silicatos de potasio, según lo indicado por Nogués *et al.*, 2010. Este parámetro cuanto mayor resulte mayor es la probabilidad que haya formación de eutécticos de bajo punto de fusión debido a la reacción del silicio con el potasio. Este parámetro se determinó mediante la relación de las cantidades molares entre el “K $\left[\frac{\text{mol K}}{\text{kg ceniza}}\right]$ ” y el “Si $\left[\frac{\text{mol Si}}{\text{kg ceniza}}\right]$ ”, según la Ec. 3.6.

$$I_{K-SiO_2} = \frac{K}{Si} \left[\frac{\text{mol K}}{\text{mol Si}} \right] \quad \text{Ec.3.6}$$

Con respecto a este índice no se encontraron valores de referencia en la bibliografía consultada.

3.1.7. ÍNDICE DE SULFATACIÓN ($I_{SULF.}$)

Este índice resulta también una medida de la tendencia de la sílice a reaccionar con sales de potasio y la posible sulfatación del mismo, según lo indicado por Nogués *et al.*, 2010. Si bien los sulfatos de potasio poseen relativamente altas temperaturas de fusión (1069 [°C]), estos sulfatos poseen características corrosivas sobre las superficies metálicas. En el presente estudio se determinaron los índices mencionados según la Ec.3.7.

$$I_{\text{Sulf.}} = \frac{K}{Si+S} \left[\frac{\text{mol}_K}{\text{mol}_{Si} + \text{mol}_S} \right] \quad \text{Ec.3.7}$$

Para este índice no se encontraron valores de referencia en la bibliografía consultada.

3.1.8. ÍNDICE DE CORROSIÓN ($I_{S/Cl}$)

Este índice es una medida de la tendencia a formar sulfatos y cloruros de potasio de la forma K_2SO_4 y KCl respectivamente. Este parámetro es un indicador de riesgo de la corrosión según Nogués *et al.*, 2010. Este índice se determinó según la Ec.3.8.

$$I_{S/Cl} = \frac{S}{Cl} \left[\frac{\text{mol}_S}{\text{mol}_{Cl}} \right] \quad \text{Ec.3.8}$$

Con respecto a este índice no se encontraron valores de referencia en la bibliografía consultada.

3.1.9. ÍNDICE DE FORMACIÓN DE SILICATOS ($I_{Ca/Si}$)

Este parámetro es una medida de la disponibilidad del calcio a reaccionar con la sílice y formar silicatos de la forma $CaSiO_3$ de elevados puntos de fusión (1.250 a 1.500 [°C]). Este índice se determinó según Nogués, *et al.*, 2010 mediante la Ec.3.9. Al igual que en los casos anteriores, no se encontraron valores de referencia para este índice.

$$I_{Ca/Si} = \frac{Ca}{Si} \left[\frac{\text{mol}_{Ca}}{\text{mol}_{Si}} \right] \quad \text{Ec.3.9}$$

3.1.10. ÍNDICE DE EROSIÓN ($I_{\text{Erosión}}$)

Este índice es una medida de la disponibilidad del sodio y del potasio a reaccionar con la sílice y formar sus correspondientes silicatos (Nogués *et al.*, 2010). La sílice sin reaccionar debido a su carácter cristalino posee propiedades erosivas, por lo que para cenizas con bajos contenidos de Na y K ($I_{\text{Erosión}} \sim 0$), las probabilidades de que las cenizas generen erosión son elevadas. Este índice se determinó mediante la Ec.3.10, puede observarse que a menor valor del índice, mayor resultaría la erosión debido a existencia de una mayor cantidad de SiO_2 sin reaccionar con el K_2O y el Na_2O . No se encontraron datos de este índice en la bibliografía consultada.

$$I_{\text{Erosión}} = \frac{Na+K}{Si} \left[\frac{\text{mol}_{Na} + \text{mol}_K}{\text{mol}_{Si}} \right] \quad \text{Ec.3.10}$$

3.1.11. ÍNDICE DE VISCOSIDAD (S_R)

Según Pintana y Tippayawong, 2016, el índice de viscosidad de las cenizas es uno de los mejores parámetros para predecir la tendencia a la escoriación y fluidización de las mismas, ya que conduce a una mejor comprensión de la estructura de la escoria. La viscosidad de la escoria está relacionada con la composición química de ceniza y se definió por medio de la Ec.3.11.

$$S_R = \frac{\%SiO_2}{\%SiO_2 + \%Fe_2O_3 + \%CaO + \%MgO} \times 100 \quad \text{Ec.3.11}$$

Los autores indicaron que cenizas con $S_R > 72$ tienen bajas probabilidades de fluidizarse y con $S_R < 65$ las probabilidades son altas.

3.2 COMPOSICIÓN DE LAS CENIZAS DE LAS BIOMASAS COMBUSTIBLES.

En el presente estudio se consideró que cada muestra de ceniza (CZ), se encuentra constituida por componentes básicos (CB) y componentes ácidos (CA), según la Ec. 3.12.

$$100\% \text{ CZ} = (\%CB|cz + \%CA|cz + \%Otros|cz) \quad \text{Ec. 3.12}$$

Dónde:

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

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

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

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

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

Por otro lado, 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, según Ec.3.13.

$$\%Óxido|_{corr.} = \frac{\%Óxido}{(100 - \%Otros|cz)} \quad \text{Ec.3.13}$$

De esta manera la Ec. 3.12 queda definida como se indica en la Ec.3.14:

$$CZ|_{corr.} = (\%CB|cz_{corr.} + \%CA|cz_{corr.}) = 100\% \quad \text{Ec. 3.14}$$

Asimismo, se consideró que debe cumplirse que las relaciones entre los CA y CB de la muestra de ceniza original promedio, respecto a la muestra total, deben ser iguales a las relaciones entre los CA y CB corregidos, respecto a la masa total de estos elementos, según Ec. 3.15 y Ec.3.16. Este hecho resultaría lógico debido a resultan relaciones de iguales proporciones.

$$\frac{\%CA|cz}{CZ} = \frac{\%CA|cz}{CZ|corr.} \quad \text{Ec. 3.15}$$

$$\frac{\%CB|cz}{CZ} = \frac{\%CB|cz}{\%CB|czcorr.} \quad \text{Ec. 3.16}$$

3.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS ÓXIDOS COMERCIALES PUROS UTILIZADOS COMO PATRONES

Como patrón de K₂O y P₂O₅ se utilizó “Di Hidrógeno Fosfato de Potasio” (KH₂PO₄) y para ajustar las relaciones entre el K y el “P” en la mezcla se utilizó nitrato de potasio (KNO₃). En Tabla 3.1 se indican las características del multipatrón de K y P utilizado.

Tabla 3.1. Características del multipatrón KH₂PO₄ según Merck, 2021.

Peso molecular (PM)	136,08	[g/mol]
Concentración de K	287,32	[gK/kg KH ₂ PO ₄]
Concentración de P	227,59	[gP/kg KH ₂ PO ₄]

Por medio de la Ec.3.18 se determinó la cantidad de K equivalente a K₂O, luego con la Ec. 3.19 se determinó la cantidad de KH₂PO₄ necesario. Posteriormente se determinó la cantidad de “P” que aportó el multipatrón por medio de la Ec.3.20.

$$g_K [g] = \frac{M_K [g/mol]}{M_{K_2O} [g/mol]} * g_{K_2O} [g] \quad \text{Ec. 3.18}$$

$$g_{KH_2PO_4} [g] = \frac{g_K [g] * 1000}{287.32} \quad \text{Ec. 3.19}$$

$$g_P [g] = \frac{g_{KH_2PO_4} [g] * 227.59}{1000} \quad \text{Ec.3.20}$$

Asimismo, como patrón de SO₃ se utilizó ácido sulfúrico (H₂SO₄) puro. En Tabla 3.2 muestra las características del patrón utilizado para la formulación del azufre.

Tabla 3.2. Características del H₂SO₄ utilizado como patrón, según Merck, 2021.

Peso molecular (PM)	98,08	[g/mol]
Peso específico (PE)	1,83	[g/ml]

Por medio de la Ec.3.21 se determinó la cantidad en masa de azufre equivalente a SO₃, luego se determinó la cantidad correspondiente de ácido a través de la Ec.3.22 y finalmente la cantidad a dosificar en la mezcla se determinó mediante la Ec.3.23. Esta dosificación se realizó mediante una micropipeta automática de volumen variable de 0,5 a 10 [μL], marca DLab TopPette.

$$g_s[g] = \frac{M_s[g/mol]}{M_{SO_3}[g/mol]} * g_{SO_3}[g] \quad \text{Ec. 3.21}$$

$$g_{H_2SO_4}[g] = \frac{g_s[g]*1.83}{1000} \quad \text{Ec.3.22}$$

$$\mu L_{H_2SO_4}[\mu L] = g_s[g] * 1000 \quad \text{Ec.3.23}$$

En Tabla 3.3 se pueden observar los óxidos comerciales puros utilizados en las formulaciones de las muestras sintéticas. Para cada óxido considerado como patrón se indica: marca, número de lote, número de registro del compuesto químico (CAS) y concentración del mismo.

Tabla 3.3. Óxidos comerciales puros considerados en la formulación de las cenizas sintéticas. Elaboración propia.

Producto	Marca	Nº Lote	CAS	Concentración
SiO ₂	Merck KGaA	107712	14808-60-7	99,8%
Al ₂ O ₃	Cicarelli	64330	1344-28-1	99,4%
TiO ₂	Biopack	9474.06	13463-67-7	99,5%
Fe ₂ O ₃	Sigma-Aldrich	MKCD6729	1309-37-1	99,0%
CaO	Biopack	5232018	1305-78-8	99,5%
MgO	Biopack	15252016	1309-48-4	99,5%
Na ₂ O	Aldrich Chemistry	MKCF4836	1313-59-3	80,0%
K ₂ O (KNO ₃)	Merck KGaA	HC57108430	7732-18-5	1000mgK/l
P ₂ O ₅ (KH ₂ PO ₄)	Merck KGaA	AM0449573	7778-77-0	99,5%
SO ₃ (H ₂ SO ₄)	Anedra	24340-1	7664-93-9	98%

3.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA Y ENERGÉTICA DE LAS BIOMASAS ANALIZADAS

Los estudios de caracterización se realizaron en el Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI), de la Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales; y en el Laboratorio de Metales, de la Sección Química de los Productos Agroindustriales, ambos laboratorios pertenecientes a la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), de la provincia de Tucumán, Argentina.

Las biomásas analizadas fueron bagazo de la caña de azúcar y residuos de la cosecha de la misma, denominado RAC. Para ello, se procesaron 30 muestras de bagazo provenientes de ingenios tucumanos y 30 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 LCP85-384.

3.4.1 ANÁLISIS INMEDIATOS REALIZADOS EN MUESTRAS DE BAGAZO Y RAC

Los análisis inmediatos se realizaron siguiendo la metodología utilizada indicada en la norma ASTM D 5142-02 modificada, según Zamora Rueda *et al.*, 2016b. Se determinaron contenidos de cenizas (%CZ), sólidos volátiles (%SV), y carbono fijo (%CF).

Para ello, se utilizó un equipo analizador termogravimétrico (TGA), marca LECO, modelo TGA 701, ajustado con curvas de calibración para cada tipo de biomasa, según Mistretta *et al.*, 2014. Dichas curvas se lograron a partir de ensayos realizados en mufla en comparación con los obtenidos por TGA. Los autores definieron dichas curvas como “RAC-modificado” y “Bagazo-1”, que proveen instrucciones de manera automática para el secado de las muestras a 110 [°C] y su posterior volatilización a 750 [°C], durante cinco minutos en una atmósfera controlada de nitrógeno. Luego, por gravimetría determina el contenido de %SV y procede a la calcinación de las muestras a 900 [°C] hasta peso constante en presencia de una atmósfera de oxígeno. Finalmente el equipo determina también por diferencias el %CZ y %CF.

3.4.2 DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO EN MUESTRAS DE BAGAZO Y RAC

Las determinaciones del poder calorífico superior (PCS) en base seca, se realizaron en bomba calorimétrica automatizada, marca IKA, modelo C5000, operando de manera adiabática, siguiendo la metodología ASTM D 2015-96, según lo indicado por Cruz *et al.*, 2016.

Con respecto al poder calorífico inferior (PCI) en base húmeda, las determinaciones se realizaron por cálculo por medio de la Ec.3.24, según lo indicado por Fejió *et al.*, 2015.

$$\text{PCI [kJ/kg]} = \text{PCS} \cdot (1 - w) - 2442 \times [9 \cdot \text{H} \cdot (1 - \text{Cz}) \cdot (1 - w) + w] \quad \text{Ec.3.24}$$

Dónde:

PCS: Poder calorífico superior, en [kJ/kg].

w: contenido de humedad del combustible, en [kg_{agua}/kg_{combustible}].

Cz: contenido de cenizas del combustible, en [kg_{ceniza}/kg_{combustible seco}].

H: contenido de hidrógeno elemental del combustible, en [kg_H/kg_{combustible seco libre de ceniza}].

En las determinaciones de PCI se consideró para ambas biomásas un contenido de hidrógeno igual a 6,0% según datos del autor antes mencionado.

3.4.3 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CLORO EN CENIZAS DE BAGAZO Y RAC

Para la determinación del contenido de cloro total 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 (K₂Cr₂O₇), como se indica en el Standard Methods (2012) para la determinación de cloruros en agua, en vez de la valoración potenciométrica establecida en la norma original, ya que el instrumento necesario se encontraba fuera de servicio.

3.4.4 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AZUFRE EN CENIZAS DE BAGAZO Y RAC

Para la determinación del contenido de azufre total (%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 %S mediante la combustión de una muestra de biomasa en bomba calorimétrica, según Mistretta *et al.*, 2019.

3.4.5 ANÁLISIS DE METALES EN CENIZAS DE BAGAZO Y RAC

Las determinaciones de Al, Ca, Fe, Mg, K, Si, Na y Ti en las muestras de RAC y bagazo se realizaron en el Laboratorio 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) y de emisión atómica (EEA). Para ello, se efectuaron previamente 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 2 veces en mufla a 550 [°C] durante 2 [hs]. 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 colocaron 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 [mín.] 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 en donde se estableció la relación Absorbancia-Concentración del analito. Para ello, se prepararon soluciones estándares de los metales a partir de estándares 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 la Tabla 3.4, según lo indicado por PerkinElmer, 2000.

Tabla 3.4. Condiciones estándares para las determinaciones por EAA y EEA. Elaboración propia, según PerkinElmer, 2000.

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

Todo el material utilizado fue lavado con detergente no iónico, enjuagado varias veces con agua desionizada, posteriormente fueron descontaminados con ácido nítrico y enjuagados con agua desionizada. Este método descrito fue modificado de la norma ASTM D 3682-01 para biomasa. El método de prueba normalizado considera el análisis de los elementos mayoritarios y minoritarios comúnmente encontrados en los residuos de combustión de procesos de utilización carbón mineral.

3.4.6 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ÓXIDOS EN CENIZAS DE BAGAZO Y RAC

Las determinaciones de los contenidos de óxidos conformes a los metales encontrados por las técnicas mencionadas de EAA y EEA, se realizaron según la estequiometría de las reacciones de oxidación de los metales. En la Tabla 3.5 puede verse un resumen de las ecuaciones estequiométricas consideradas y las fórmulas utilizadas en las determinaciones de los porcentajes de óxidos a partir de los elementos metálicos correspondientes y de sus pesos moleculares, considerando reacción completa.

Tabla 3.5. Ecuaciones utilizadas en la determinación de %Óxidos a partir de los elementos metálicos en cenizas. Elaboración propia.

Metal	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	$2 \text{ S} + 3 \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ SO}_3$	$\% \text{SO}_3 = \text{S} \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \cdot \frac{\text{PM}_{\text{SO}_3}}{\text{PA}_{\text{S}} \cdot 10}$

3.4.7 ANÁLISIS DE LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS

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.

Para este análisis se requirió 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 D 5142 – 02 modificada, según lo indicado por Zamora Rueda *et al.*, 2016c.

Posteriormente se trituraron las muestras de biomasa secas en un molino de cuchillas, marca Fritsch, modelo Pulverisette 19 y se homogeneizaron en tamaño 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 mencionada. 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 conservado del material, respectivamente. Posteriormente, se procedió a rellenar moldes cónicos estandarizados según lo indicado en la norma ASTM D1857 (ASTM, 2010).

La velocidad de calefacción del horno del equipo AF700, tanto para las muestras de bagazo de caña de azúcar como de RAC, fue de 10 [°C/min]. Los ensayos se realizaron con un tiempo de duración de cuatro horas cada 6 muestras. Para lograr las AO y AR se utilizaron mezclas de gases patrones según las proporciones indicadas en Tabla 3.6. El flujo de gases adoptado para ambas atmósferas de trabajo fue de 2,5 [lpm] a 25 [psi] + 10% (1,72 [bar]), según lo propuesto por Golato *et al.*, 2021.

Tabla 3.6. Concentraciones de gases patrones para las definiciones de las AO y AR. Elaboración propia.

Tipo de atmósfera	Concentración O ₂	Concentración CO	Concentración CO ₂
AO (CO ₂ +O ₂)	49,7% + 0,2%	-	50,3% + 0,2%
AR (CO ₂ +CO)	-	60,0% + 0,8%	40% + 0,8%

3.4.8 SENSIBILIDAD DE LOS ÓXIDOS EN LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS

Con el objetivo de conocer la influencia de las concentraciones de los óxidos mayoritarios encontrados en cenizas sobre la fusibilidad de las mismas, se realizó la formulación de muestras ficticias (sintéticas) compuestas por óxidos comerciales puros, en las cuales se tuvo en cuenta una variación de la concentración del óxido en función del valor promedio encontrado en la correspondiente biomasa. Para ello, se consideró un valor por arriba del promedio encontrado y otro por debajo, por lo que en total se formularon 30 muestras sintéticas como puede verse en Tabla 7.24 del Anexo. Estas formulaciones se realizaron por medio gravimétrico con una balanza analítica marca Shimadzu, modelo AUY 220, con capacidad máxima de 220 [g] y resolución de 0,1 [mg].

Para el caso del K_2O , P_2O_5 y SO_3 se utilizaron como patrones de referencia para el aporte de K, P y S, cantidades determinadas de nitrato de potasio (KNO_3), di hidrógeno de fosfato de potasio (KH_2PO_4) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) respectivamente, en función de las concentraciones reales de estos elementos en las cenizas de las biomásas en estudio.

Posteriormente se analizó la fusibilidad de las muestras según ASTM D1857 y se correlacionaron los resultados con las composiciones químicas de las muestras sintéticas por medio de un análisis estadístico multivariado, siguiendo la metodología propuesta por Balzarini *et al.*, 2015, mediante el software de análisis estadístico “InfoStat v.2019p”. Asimismo, se realizó un análisis de componentes principales (ACP), utilizando un gráfico “biplot”, que permitió examinar todos los datos en un espacio de menor dimensión al espacio original de las variables y correlacionar las dependencias de las mismas entre ellas.

3.4.9 FORMULACIÓN DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS POR MEDIO DE LOS ÓXIDOS COMERCIALES PUROS.

Con el objetivo de lograr diferentes proporciones de CA y CB que consideren todas las posibles combinaciones que podrían encontrarse en cenizas de bagazo y de RAC de caña de azúcar, se formularon mezclas de óxidos comerciales puros (cenizas sintéticas), conservando iguales proporciones entre los elementos que componen los CA y los CB, en relación a las proporciones reales encontradas en cenizas de las biomásas mencionadas.

Para ello, se partió inicialmente de la relación en peso entre los CA encontrados en la biomasa original, definiendo la cantidad total de cenizas sintéticas ácida ($CA|_{Sint}$), de igual manera se determinó la cantidad total de cenizas sintéticas básicas ($CB|_{Sint}$). Luego se disminuyó en 10% entre 100% a 0% la mezcla sintética, mientras que los $CB|_{Sint}$ se aumentaron en 10% entre 0% a 100% la misma mezcla.

La Tabla 3.7 muestra en detalle cómo se conformaron las diferentes muestras sintéticas para obtener una variación representativa que considere todas las posibilidades de concentración de óxidos en cenizas de una biomasa lignocelulósica. Para ello, se formularon 11 muestras de cenizas sintéticas las cuales posteriormente se dividieron y se les realizó un análisis de fusibilidad según ASTM D1857 para AO y AR.

Es importante indicar que se consideró para la muestra 100% M1_{|Sint} las cantidades (en masa) corregidas de CA reales existentes en las cenizas de las biomásas analizadas (%CA|cz_{corr.}), según la Ec.3.25. A partir de esta se fueron reduciendo los CA según Tabla 3.7. De igual modo, se consideró para la muestra 100% M11_{|Sint}, las cantidades de CB reales existentes en las cenizas (%CB|cz_{corr.}), según la Ec.3.26.

$$gCA|cz_{corr.} = (gSiO_2 + gAl_2O_3 + gTiO_2) \quad Ec.3.25$$

$$gCB|cz_{corr.} = (gFe_2O_3 + gCaO + gMgO + gNa_2O + gK_2O + gP_2O_5) \quad Ec.3.26$$

Tabla 3.7. Variación de la composición de CA y CB en mezclas sintéticas de cenizas de biomásas. 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 _{Sint}	100% CB _{Sint}

Posteriormente se realizó una correlación entre las temperaturas de fusión y las diferentes concentraciones totales de CA [%] y CB [%] en las cenizas sintéticas formuladas. Para ello, se consideró como temperatura crítica la correspondiente a la de inicio de la fusión (DT) y se observó la variación de la misma en función de la concentración total de CB (%CB) para las mezclas consideradas. Para encontrar la correlación entre la composición química de las cenizas sintéticas y las correspondientes temperaturas DT, se utilizó un análisis de dispersión de los datos y se graficaron las curvas de tendencia que mejor se correspondían con el mayor coeficiente de correlación (R²), para ello se utilizó una planilla de cálculo Excel v.2010.

3.5 ESTUDIO DE LA FUSIÓN DE CENIZAS SINTÉTICAS SOBRE PLACAS DE ACERO ESTÁNDAR.

Con el objetivo de corroborar los resultados teóricos del estudio de la fusibilidad de las cenizas sintéticas, elaboradas a partir de las mezclas de los óxidos comerciales puros, se realizó una experiencia cualitativa de fusión de las mismas, dispuestas como coberturas sobre placas de acero estándar, sometidas a dos temperaturas diferentes (900 [°C] y 1.100 [°C]) en un horno eléctrico durante 8 horas.

Para esta experiencia se confeccionaron placas de acero provenientes de un tubo de caldera nuevo del tipo SA-192A de 3" de diámetro (78,7 [mm]), las que fueron cortadas del mismo con dimensiones de 25 [mm] ancho por 25 [mm] de largo, manteniendo el espesor del tubo de 5,2 [mm].

La Figura 19 muestra las placas de acero fabricadas para el ensayo. Las coberturas de cenizas sintéticas se confeccionaron con los óxidos comerciales puros según el procedimiento indicado para la confección de la Tabla 18. Pero con el objetivo de simplificar la cantidad de ensayos, se elaboraron mezclas intermedias para ambas biomásas estudiadas, a saber: (100%CA+0%CB); (75%CA+25%CB); (50%CA+50%CB); (25%CA+75%CB) y (0%CA+100%CB).

Para lograr un espesor uniforme y homogéneo de las coberturas de cenizas sobre las placas, se agregó 0,5 [ml] de agua destilada a cada muestra y se mezcló hasta lograr una pasta semisólida que facilitó su colocación y adherencia, logrando un espesor sobre las placas de aproximadamente 2 [mm]. Asimismo, a modo de referencia se elaboraron coberturas de cenizas reales de las biomásas estudiadas.

Posteriormente se introdujeron las placas con sus correspondientes coberturas en una mufla eléctrica de 4,5 [kW] de potencia, marca ORL, modelo ORL-III, con control automático de temperatura y dimensiones de la cámara interna (ancho, alto y fondo) de: 250 [mm] x 170 [mm] x 250[mm], respectivamente.



Figura 19. Placas de acero SA-192A utilizadas en el ensayo de fusión de las cenizas sintéticas. Elaboración propia.

La Figura 20 muestra las coberturas de las cenizas sintéticas elaboradas con las diferentes mezclas de óxidos según lo indicado en la Tabla 3.7. Posteriormente fueron sometidas a la acción del calor en la mufla eléctrica.



Figura 20. Placas de acero SA-192A utilizadas en el ensayo de fusión de cenizas sintéticas. Elaboración propia.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ÍNDICES GLOBALES DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CENIZAS DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR.

En la Tabla 7.11 del Anexo pueden verse los índices de comportamiento de la fusibilidad de cenizas de bagazo de caña de azúcar determinados en base a los datos de composición encontrados en bibliografía (ver Tabla 7.6). Estos resultados fueron obtenidos siguiendo la metodología propuesta anteriormente para las concentraciones de óxidos mayoritarios de los bagazos correspondientes. Se indican los contenidos totales de CA, CB y los porcentajes correspondientes en relación al total de cenizas (%CA y %CB); el PCS y el PCI, las concentraciones de azufre (S), potasio (K), silicio (Si), calcio (Ca) y cloro (Cl); y la relación base-ácido de la muestra (CB/CA).

Además, se indicaron las concentraciones de S, K, Si, Ca y Cl en diferentes unidades con el objetivo de facilitar la interpretación y el cálculo de los índices de comportamiento de las cenizas de bagazo.

Asimismo, la tabla muestra los índices de: alcalinidad (IS), ensuciamiento (AI), tendencia a la escoriación por azufre (Rs), deposición “fouling” (F_u), el índice de reacción entre el potasio y el silicio (I_{K-Si}), sulfatación del potasio ($I_{sulf.}$), corrosión por azufre y cloro ($I_{S/Cl}$) y el índice de reacción entre el calcio y el silicio (I_{Ca-Si}). Además, se puede observar el índice que caracteriza las cenizas de un combustible en relación a los componentes alcalinos respecto a la sílice ($I_{Erosión}$). Finalmente, se muestra el índice de viscosidad o “Slag” (S_R), que nos da la idea de la tendencia de las cenizas a fluir en contacto con las paredes internas del hogar de un generador de vapor.

Estos resultados definidos como globales, servirán de referencia para ser comparados más adelante con los obtenidos en este estudio para la variedad de caña de azúcar de mayor producción en nuestra región. Es importante observar que los valores del comportamiento de la fusibilidad de las cenizas encontrados para Tucumán, a partir de la composición elemental informada por Fogliata, 1995; resultan valores muy diferentes a los determinados para los diversos autores consultados siguiendo la misma metodología de cálculo. Este hecho se debe sin duda alguna a la variabilidad existente en la composición de las cenizas (ver Tabla 7.6), que como se mencionó anteriormente, podría a su vez deberse a los diferentes tipos de suelos encontrados en las diversas regiones del mundo que cultivan caña de azúcar.

Es importante destacar que las cenizas de bagazo de caña de azúcar encontradas globalmente resultaron mayormente ácidas. Pero, las provenientes de Tucumán representaron las de menor proporción ácida, esto podría atribuirse principalmente a los

bajos contenidos de Al y Ti, pero con un mayor contenido de K, S y Na. Además, el bagazo de nuestra región presentó el menor contenido de Fe en relación al resto de las regiones consultadas.

4.2 ÍNDICES GLOBALES DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CENIZAS DE RAC DE CAÑA DE AZÚCAR.

En la Tabla 7.12 pueden verse los índices de comportamiento de la fusibilidad de cenizas de RAC de caña de azúcar determinados para los diferentes autores consultados. Los resultados obtenidos se determinaron siguiendo la metodología propuesta anteriormente en base a los datos relevados de la composición (ver Tabla 7.7).

Al igual que en el caso anterior para bagazo, estos parámetros fueron definidos como globales y servirán de referencia para ser comparados más adelante con los obtenidos en el presente estudio para las variedades de caña de azúcar de nuestra región.

Es importante observar que los parámetros del comportamiento de la fusibilidad de las cenizas de RAC encontrados para Tucumán, a partir de la composición elemental informada por Fogliata, 1995; también resultaron diferentes a los encontrados en bibliografía y se calcularon siguiendo la misma metodología propuesta. Este hecho también se debe sin duda alguna a la variabilidad existente en la composición de las cenizas (ver Tabla 7.7) como ya se había mencionado anteriormente. Asimismo, las diferencias observadas a su vez podrían deberse a los diferentes tipos de suelos de las regiones del mundo en las que se cultivan caña de azúcar.

Es importante destacar que sólo se ha encontrado una única referencia de la composición química del RAC en Tucumán (Fogliata, 1995), no resultando estos parámetros representativos de la región, por lo que se consideró con mayor detalle la referencia global.

Es importante indicar que las cenizas de RAC de caña de azúcar, encontradas en bibliografía, resultaron mayormente ácidas, por lo que estos residuos tendrían elevadas temperaturas de fusión, salvo el RAC para la región de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil, donde CA = 39,80% (según Moraes *et al.*, 2017), cuya proporción de CB fue mayor en aproximadamente un 11% respecto a CA, por lo que es de esperar una menor fusibilidad de sus cenizas.

4.3 ÍNDICES DE COMPORTAMIENTO DE LAS CENIZAS DE CARBÓN MINERAL

A partir de los datos de la Tabla 7.2 (ver Anexo) proporcionados por Fernández Diez, 2000, se determinaron los índices de comportamiento de las cenizas para dos tipos diferentes de carbones minerales bituminosos de bajo y de alto volátiles, siguiendo la metodología

propuesta en este estudio. En la Tabla 7.13 del Anexo pueden observarse los resultados mencionados. Estos valores servirán de referencia para ser comparados con los encontrados para las biomásas analizadas en este estudio.

Es importante destacar que los carbones con bajos volátiles resultaron mayormente ácidos (91,60%) en relación a los de alto volátiles (71,30%), esto indicaría que los primeros presentarían puntos de fusión más elevados y tendrían una ceniza más viscosa que los segundos. No obstante, para ambos tipos de carbones su clasificación sería del tipo ácida, ya que la relación CB/CA para estos combustibles se encuentra cercano a 0,1, según lo observado por Fernández Díez, 2000. Para los carbones minerales analizados no se indicaron concentraciones de cloro, por lo que no se informó el índice $I_{S/Cl}$ correspondiente.

4.4 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y ENERGÉTICA DE LAS BIOMASAS ANALIZADAS.

En 7.14 y Tabla 7.15 del Anexo se muestran los resultados completos de los análisis mencionados para cada muestra ensayada. Se revelan el valor promedio, rango de valores y desviación estándar (DE). Además, se indican las identificaciones de las muestras de origen y su fecha de muestreo.

En Tabla 4.1 y 4.2 pueden observarse un resumen promedio de los resultados de la caracterización fisicoquímica y energética de las muestras de bagazo y de RAC de caña de azúcar analizadas en el presente estudio.

Tabla 4.1. Resultados promedio de la caracterización fisicoquímica y energética de las muestras de "bagazo" analizadas. Elaboración propia.

	W [%]	Ceniza [%]	CF [%]	SV [%]	S [%]	Cl [%]	PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]
Promedio	52,49	7,12	60,15	32,59	0,22	0,12	17.499	6.472
Rango	44,52 - 59,58	3,49 - 14,88	15,98 - 80,00	14,10 - 79,21	0,04 - 0,71	0,04 - 0,29	15.911 - 18.113	4.880 - 8.112
DE	3,30	3,35	26,44	27,50	0,16	0,06	529	696

Tabla 4.2. Resultados promedio de la caracterización fisicoquímica y energética de las muestras de RAC analizadas. Elaboración propia.

	W [%]	Ceniza [%]	CF [%]	SV [%]	S [%]	Cl [%]	PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]
Promedio	25,94	12,95	17,04	70,04	0,37	0,21	16.508	10.750
Rango	4,46 - 71,90	7,72 - 23,13	14,83 - 19,34	62,04 - 73,97	0,09 - 0,79	0,08 - 0,52	14..957-17.539	2.439-15.454
DE	18,63	4,48	1,15	3,47	0,20	0,10	753	3.394

Los resultados mostrados en las tablas, coinciden en igual orden de magnitud con los datos informados por Carbajal *et al.*, 2005, Zamora Rueda *et al.*, 2019, Zamora Rueda *et al.*, 2016a; Feijóo *et al.*, 2015 y Mistretta *et al.*, 2014, para RAC y bagazos de caña de azúcar. Para el caso del RAC puede observarse que la DE informada sobre el contenido de humedad promedio resultó elevado (18,63%), esto podría deberse a los diferentes días de muestreo según puede observarse en Tabla 7.15; y por lo tanto, diferentes tiempos de secado del material en campo. Este hecho afectó los resultados del PCI calculado por ser una función del contenido de humedad del material (ver Ec. 3.24).

Para el caso de las muestras de bagazo la DE resultó menor (3,30%), esto indicaría una mejor homogeneidad de los resultados, ya que en general en la industria azucarera los equipos de molienda de caña de azúcar se encuentran ajustados de manera de obtener un contenido de humedad en bagazo cercano al 50%.

Es importante observar que el contenido de cloro en el RAC resultó aproximadamente el doble que el correspondiente en bagazo (0,21% vs 0,12%). Los demás parámetros evaluados se encuentran en igual orden de variabilidad para este tipo de biomasa lignocelulósica analizada.

4.5 METALES MAYORITARIOS EN CENIZAS DE BAGAZO Y RAC DE CAÑA DE AZÚCAR DE TUCUMÁN ARGENTINA.

En la Tabla 7.16 del Anexo puede observarse los resultados de las determinaciones de los contenidos de los metales mayoritarios encontrados en cenizas de las muestras de bagazo 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 tabla muestra que los componentes de mayor proporción en las cenizas son el “Si” (68,9%), el K (12,0%) y el “Al” (10,9%), siendo el primero y el último, elementos con características ácidas, por lo que es de esperar que las cenizas mantengan las mismas propiedades ácidas en su estructura final. Asimismo, el contenido de K también representa una importante fracción en las cenizas, por lo que es probable que influya negativamente en la estructura química final de la escoria por su propiedad alcalina.

En la Tabla 7.17 del Anexo se observan los resultados de los análisis de los metales considerados en las cenizas de las muestras de RAC ensayadas. Puede verse que la proporción de “Si” (55,44%), resultó la mayor de todas, seguidas por el K (25,63%) y el Ca (11,48%).

Comparando ambas biomásas, se puede indicar que el RAC posee una mayor cantidad de “Si” por kg de biomasa en relación al bagazo (257,5 g/kg vs. 241,1 g/kg), aproximadamente un 6,8% más. No obstante, el porcentaje en peso resultó mayor en bagazo (68,9%) respecto

al RAC (55,44%), esto se debe a la mayor cantidad de Ca y K encontrada en este último combustible en relación al bagazo (3,1% y 12,0% respectivamente).

Con respecto al contenido de Mg, el mismo resultó 3,2 veces mayor en el RAC respecto al bagazo (3,2% vs. 1,0%).

Es importante destacar que el contenido de Al en bagazo (10,9%), resultó muy superior respecto al RAC (0,97%). También el Fe en cenizas de bagazo (2,2%) resultó mayor que en RAC (0,87%); y el contenido de Ca en bagazo (3,1%) resultó menor en relación al RAC (11,48%).

Con respecto al S, se encontró que la concentración del mismo en cenizas de bagazo fue de 0,5%, aproximadamente 2,7 veces el contenido de este elemento en relación al RAC (0,18%). Los contenidos de P determinados en bagazo fueron despreciables (por debajo de la cifra significativa considerada) en relación al RAC (0,76%).

4.6 ÓXIDOS MAYORITARIOS EN CENIZAS DE BAGAZO Y RAC DE CAÑA DE AZÚCAR DE TUCUMÁN - ARGENTINA.

En la Tabla 7.18 del Anexo pueden verse los resultados de los contenidos de óxidos mayoritarios determinados a partir de ASTM D 3682-01, correspondientes a los metales encontrados en bagazo de caña de azúcar de Tucumán – Argentina (ver Tabla 7.16). Se indican el valor promedio, valores máximo, mínimo y la desviación estándar (DE) como índice de dispersión para cada elemento analizado. Asimismo, se indica el valor “Promedio corregido” para eliminar la influencia de los elementos indeterminados (%Ind.). La Tabla 7.18 muestra que la concentración promedio de SiO₂ fue de 54,25%, este valor se encontró en igual orden de magnitud que los valores encontrados por Fogliata, 1995, para nuestra región. Los valores de Al₂O₃ y de Fe₂O₃ (7,84% y 1,19%, respectivamente), se encuentran por arriba de los informados por el mencionado autor. La concentración determinada de K₂O para este estudio fue 5,29%, un 71% menor al valor informado por Fogliata, 1995 (18,30%). Con respecto al Na₂O, la concentración determinada en el presente trabajo fue menor en 82,4% en comparación a la determinada por Fogliata, 1995 (0,37% vs. 2,10%), al igual que las de CaO (1,60% vs 2,80%), MgO (0,65% vs 1,20%) y P₂O₅ (0,011% vs 2,80%), no obstante los valores determinados se encuentran dentro del rango de valores encontrados para bagazos de otras regiones de mundo como se verá más adelante. Estos resultados representan datos propios para nuestra región y servirán de base para las determinaciones de los índices característicos de la fusibilidad de las cenizas.

En la Tabla 7.19 del Anexo pueden verse los contenidos de los óxidos correspondientes a los metales informados en Tabla 7.17 para las muestras de RAC seleccionadas y analizadas para este estudio. Al igual que en el caso anterior se indica el promedio, valores máximo y

mínimo, DE y promedio corregido. La mencionada Tabla 7.19 muestra que el contenido promedio de SiO₂ determinado en este estudio (55,09%), se encontró levemente por debajo del valor informado por Fogliata, 1995 para RAC (57,40%). El valor de K₂O resultó mayor en aproximadamente 34 veces (14,34% vs 0,42%), al igual que los contenidos de CaO (7,46% vs 2,10%), MgO (2,47% vs 0,48%) y P₂O₅ (0,81% vs 0,09%). Con respecto al SO₃ se encontró en este estudio una concentración menor a la informada por el autor de la referencia (0,20% vs 3,50%).

En la Tabla 4.3 puede verse una comparación entre los contenidos de óxidos mayoritarios encontrados en cenizas de bagazo de este estudio (Tabla 7.18) y los encontrados en la bibliografía a nivel global (Tabla 7.6). Se indica el valor promedio, rango y DE para cada componente analizado. Los valores se encuentran referidos a base seca (b.s.).

Tabla 4.3. Comparación de los componentes de las cenizas de bagazo analizadas en este estudio en relación a los encontrados globalmente. Elaboración propia.

ÓXIDOS	Presente estudio			Valores globales		
	Promedio	Rango	DE	Promedio	Rango	DE
%SiO ₂	54,25	44,03 a 68,00	8,66	61,55	46,60 a 79,90	11,95
%Al ₂ O ₃	7,84	4,29 a 10,65	2,26	7,67	0,50 a 17,70	6,06
%TiO ₂	0,34	0,21 a 0,43	0,08	1,04	0,09 a 2,63	1,22
%Fe ₂ O ₃	1,19	0,31 a 2,62	0,79	5,35	0,10 a 14,14	4,99
%CaO	1,60	0,35 a 6,50	1,90	4,72	1,78 a 11,20	2,55
%MgO	0,65	0,15 a 1,88	0,58	2,86	1,10 a 10,20	2,36
%Na ₂ O	0,37	0,14 a 0,82	0,22	1,28	0,25 a 4,40	1,18
%K ₂ O	5,29	0,94 a 23,24	7,20	5,43	2,10 a 18,30	4,32
%SO ₃	0,45	0,28 a 0,58	0,10	2,06	0,10 a 6,50	1,96
%P ₂ O ₅	0,01	0,01 a 0,01	0,00	2,57	0,90 a 6,00	1,54
%TOTAL	71,97	59,28 a 88,85	-	92,38	72,90 a 99,49	-
% ind.	28,03	11,15 a 40,72	-	7,62	0,51 a 27,10	-

Se puede observar que el %SiO₂ (54,25%) en las cenizas de bagazo de este estudio, resultó un valor dentro del rango global de los datos tomados como referencia (46,60% a 79,90%), al igual que las concentraciones de %Al₂O₃ (7,84%), %TiO₂ (0,34%), %Fe₂O₃ (1,19%), %Na₂O (0,37%), %K₂O (5,29%) y %SO₃ (0,45%), se encontraron dentro de los rangos de referencia. Para el caso de la concentración de %CaO (1,60%), la misma se encontró por debajo del rango global, pero cercano al valor mínimo (1,78%). La concentración promedio encontrada de %MgO (0,65%), estuvo por debajo del rango global al igual que la de %P₂O₅ (0,01%), donde este último presentó valores muy por debajo del valor mínimo global (0,90%). Puede verse que las DE determinadas en los distintos

componentes de las cenizas, resultaron menores a las DE globales, excepto para %K₂O. Este hecho resulta lógico debido principalmente a las diferencias que existen globalmente en las variedades de caña, suelos, sistemas de cosecha y preparación de las mismas. Asimismo, en la Tabla 4.4 se observa una comparación entre los contenidos de los óxidos mayoritarios encontrados en las cenizas de RAC de este estudio (Tabla 7.19) y las informadas por los autores consultados (Tabla 7.7). Los resultados se encuentran referidos a base seca (b.s.).

Tabla 4.4. Comparación de los componentes de las cenizas de RAC analizadas en este estudio en relación a los encontrados globalmente. Elaboración propia.

ÓXIDOS	Presente estudio			Valores globales		
	Promedio	Rango	DE	Promedio	Rango	DE
%SiO ₂	55,09	36,23 a 67,79	9,81	51,07	36,50 a 67,12	9,90
%Al ₂ O ₃	0,85	0,77 a 1,08	0,10	6,97	2,05 a 15,80	4,75
%TiO ₂	0,18	0,14 a 0,24	0,04	0,63	0,17 a 1,17	0,44
%Fe ₂ O ₃	0,58	0,42 a 0,81	0,13	3,82	1,83 a 7,49	1,72
%CaO	7,46	4,78 a 9,79	1,59	10,42	0,71 a 21,15	6,58
%MgO	2,47	1,30 a 3,63	0,85	3,72	0,81 a 7,30	1,83
%Na ₂ O	0,77	0,42 a 1,15	0,22	1,12	0,12 a 4,90	1,56
%K ₂ O	14,34	7,02 a 22,06	4,74	7,90	1,08 a 14,66	3,51
%SO ₃	0,20	0,15 a 0,29	0,05	3,43	1,37 a 4,96	1,19
%P ₂ O ₅	0,81	0,59 a 1,15	0,18	2,37	0,80 a 5,52	1,58
%TOTAL	82,76	56,13 a 92,27	-	77,78	7,50 a 99,56	-
% ind.	17,24	7,73 a 43,87	-	22,22	0,44 a 92,50	-

Se puede observar que el contenido promedio de %SiO₂ encontrado en las muestras de RAC analizadas (55,09%), fue mayor al promedio global (51,07%), no obstante se encontró dentro del rango global de los datos tomados como referencia (36,50% a 67,12%). Las concentraciones de %Al₂O₃ (0,85%), %Fe₂O₃ (0,58%) y %SO₃ (0,20%), se encontraron por debajo de los rangos de referencia. Para el resto de los óxidos, las concentraciones se encontraron dentro de los rangos globales. Cabe indicar que si bien la concentración de %K₂O determinada en este estudio (14,34%), se encuentra dentro del rango de referencia (1,08% a 14,66%), el valor se localiza muy cercano al límite máximo, por lo que es de esperar, al igual que lo observado en el bagazo, que el RAC posea formación de eutécticos de relativamente baja fusibilidad. Además, se pudo observar en base a las DE encontradas, el índice de variabilidad fue menor para los valores analizados en este estudio respecto a los valores globales a excepción del %SiO₂ y %K₂O, que presentaron valores cercanos pero por arriba de la media global (9,81% vs. 9,50% y 4,74% vs. 3,51%).

4.7 ÍNDICES DE COMPORTAMIENTO DE LAS CENIZAS DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR DE TUCUMÁN - ARGENTINA.

La Tabla 4.5 muestra una comparación entre los índices de comportamiento de las cenizas de bagazos de este estudio (Tabla 7.20) y los correspondientes índices globales promedio (Tabla 7.11). Asimismo, en Tabla 7.21 del Anexo se muestra los parámetros adicionales utilizados en las determinaciones de los índices de comportamiento de las cenizas. Los CA totales determinados (62,43%), se encontraron dentro del rango global de referencia (52,20% a 81,70%), y representan un 89,4% del promedio global (CA [%] = 69,86%). No obstante, la relación de los elementos ácidos respecto al total (%CA = 87,67%), se encontró por arriba del rango de valores globales (54,98% a 85,49%). Lo que indica que las cenizas de bagazo de nuestra región serían mayormente ácidas en relación a las encontradas en otras regiones del mundo. Con respecto a los CB totales del presente estudio (9,55%), los mismos se encontraron levemente por debajo del valor mínimo global (10,58%) y representan casi el 45% del promedio global encontrado en cenizas de bagazo (21,22%). Asimismo, la relación de los elementos básicos respecto al total (%CB = 12,33%), se encontró por debajo del rango de los valores globales (14,51% a 33,27%).

Tabla 4.5. Comparación de los índices de comportamiento de las cenizas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán respecto a los encontrados globalmente. Elaboración propia.

ÍNDICES	Presente estudio			Valores globales		
	Promedio	Rango	DE	Promedio	Rango	DE
CA [%]	62,43	51,38 a 76,50	8,25	69,86	52,20 a 81,70	9,33
CB [%]	9,55	2,91 a 33,82	9,65	21,22	10,58 a 33,10	8,08
%CA	87,67	0,62 a 0,96	0,10	75,96	54,98 a 85,49	10,01
%CB	12,33	0,04 a 0,38	0,10	22,66	14,51 a 33,27	7,58
CB/CA	0,16	0,05 a 0,61	0,18	0,32	0,17 a 0,61	0,15
IS	0,53	0,26 a 1,01	0,24	1,34	0,20 a 2,53	0,65
AI [kg_{ceniza}/GJ]	3,27	0,65 a 14,03	4,32	4,13	2,37 a 11,27	3,51
Rs	0,03	0,01 a 0,12	0,03	0,04	0,02 a 0,06	0,01
F_u	0,92	0,05 a 14,79	4,81	3,39	1,14 a 10,67	3,23
I_{K-Si}	0,13	0,02 a 0,59	0,18	0,46	0,00 a 4,00	1,33
I_{Sulf.}	0,13	0,02 a 0,58	0,18	1,97	0,00 a 17,58	5,85
I_{S/Cl}	1,80	1,11 a 3,18	0,69	25,62	0,04 a 46,09	23,45
I_{Ca/Si}	0,03	0,01 a 0,14	0,04	0,12	0,03 a 0,59	0,14
I_{Erosión}	0,14	0,03 a 0,62	0,19	0,48	0,08 a 1,94	0,57
S_R	94,12	84,43 a 97,82	3,90	82,17	67,99 a 92,52	9,63

La relación base/ácido promedio determinada para las muestras analizadas ($CB/CA = 0,16$), se encontró levemente por debajo del rango de valores observados globalmente (0,17 a 0,61). El índice promedio de elementos alcalinos térreos respecto a los alcalinos (IS) para las muestras de este estudio fue de 0,53 y DE igual a 0,24, un 39,5% menor al promedio global de 1,34 y DE global de 0,65. No obstante, este índice promedio se encuentra dentro del rango global de referencia (0,20 a 2,53). En relación al carbón mineral, el IS del bagazo de caña de azúcar se asemeja al índice encontrado en carbón bituminoso de bajo volátiles (IS = 0,60).

El índice promedio de álcali "Al" encontrado para el bagazo fue de 3,27 [kg_{ceniza}/GJ], un valor por debajo del promedio global de 4,13 [kg_{ceniza}/GJ], pero con mayor DE en relación a los datos globales ($4,32 > 3,51$), seguramente debido a la mayor variación de los componentes alcalinos encontrados en las muestras de la biomasa estudiada. En comparación con el carbón mineral el índice resultó aproximadamente 5 veces mayor para el bagazo, respecto a los determinados para carbones bituminosos de bajos y altos volátiles (0,67 y 0,77 respectivamente).

El promedio del índice de escorificación encontrado en bagazo fue de $R_s = 0,03$, este valor se encuentra dentro del rango global de referencia (0,02 a 0,06). En relación al carbón mineral, cuyo índice R_s presenta una gran variabilidad para carbones bituminosos (0,06 a 1,33), las cenizas de bagazo presentaron un resultado más cercano al encontrado en carbones de bajo volátiles. No obstante, se podría esperar poca tendencia a la escorificación por ser $R_s < 0,6$, según lo indicado por Pronobis, 2005.

Con respecto al índice de deposición " F_u " determinado para las muestras de bagazo analizadas en este estudio, el mismo fue de 0,92; un 72,8% menor al promedio global para esta misma biomasa (3,39) y se encuentra por debajo del rango global observado (1,14 a 10,67). En comparación con el carbón mineral bituminoso (F_u entre 0,18 y 0,93) (ver Tabla 7.13), las muestras de bagazo tendrían una leve tendencia a la deposición, ya que el promedio resultó mayor a 0,6 (Pronobis, 2005).

Respecto al índice de reacción entre el potasio y el silicio (I_{K-Si}), el valor promedio determinado fue de $I_{K-Si} = 0,13$. Se observó que para las muestras de bagazo analizadas, existiría una menor disponibilidad de la sílice para formar sales con el potasio en función del valor del índice promedio determinado para bagazos a nivel global ($I_{K-Si} = 0,46$). No obstante, el valor determinado en el estudio se encuentra dentro del rango global (0,00 a 4,00). En relación al carbón bituminoso, el bagazo promedio de este estudio posee un índice aproximadamente 3,25 veces mayor (0,13 vs 0,04). Esto indicaría una mayor tendencia del bagazo de la caña de azúcar a formar sales de potasio que el carbón mineral, por el mayor contenido de K en la biomasa.

Asimismo, el índice de sulfatación ($I_{\text{Sulf.}}$) promedio encontrado para las muestras de bagazos analizadas fue de 0,13. Este valor resultó menor al promedio global ($I_{\text{Sulf.}} = 1,97$), por lo que es de esperar tener una menor formación de compuestos con azufre durante la descomposición de la biomasa en relación a los bagazos de otras regiones. No obstante, como el índice es mayor a cero, se podrían presentar formaciones de sulfatos en las cenizas volantes y de fondo (FeSO_4 , CaSO_4 , K_2SO_4 , etc.); elementos gaseosos como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el sulfuro de carbonilo (COS), que son especies corrosivas para los metales interiores de las calderas de vapor (Nogués, *et. al.*, 2010). En comparación con el carbón mineral, los bagazos analizados presentaron un valor promedio de $I_{\text{Sulf.}}$ Igual a 3,25 veces mayor respecto al promedio determinado para el combustible fósil (0,04). Este hecho se debe seguramente al contenido de azufre encontrado en los bagazos analizados ($\text{S} = 0,22\%$), valor que se encuentra por arriba del rango global encontrado en la bibliografía para esta misma biomasa (0,01% a 0,12%).

El índice de corrosión por azufre y cloro ($I_{\text{S/Cl}}$), determinado para las muestras de cenizas de analizadas fue de 1,80; dicho valor se encontró muy por debajo del promedio global (25,62). Este hecho podría deberse al menor contenido promedio de cloro de las cenizas encontradas en la bibliografía consultada ($\text{Cl} = 0,01$ [mol/kg]), respecto al promedio determinado para las muestras de cenizas ensayadas (0,03 [mol/kg]). En este índice se observó una gran variabilidad en los valores globales encontrados ($\text{DE} = 23,45$), respecto a los resultados del estudio ($\text{DE} = 0,69$). No se encontraron valores de este índice para los carbones de referencia.

Con respecto al índice de disponibilidad de Ca para reaccionar con el "Si", el mismo fue en promedio de $I_{\text{Ca/Si}} = 0,03$, un 25% del promedio determinado en base a los datos de bibliografía ($I_{\text{Ca/Si}} = 0,12$). No obstante, el valor de este índice para Tucumán se encuentra en el rango de valores observados globalmente (0,03 a 0,59). En relación al carbón bituminoso, el índice resultó levemente mayor al encontrado en el combustible fósil ($I_{\text{Ca/Si}} = 0,02$). Este hecho podría deberse a la mayor presencia relativa de Ca en la biomasa respecto al carbón, por lo que las cenizas de bagazo tendrían mayor tendencia a la formación de silicatos de calcio (Ca_2SiO_4) de elevado punto de fusión (aprox. 1.345°C), según lo observado por Vamvuka y Zografos, 2004.

El índice de erosión ($I_{\text{Erosión}}$) promedio determinado en las muestras de bagazo analizadas (0,14) resultó aproximadamente un 29% menor a la media observada en la bibliografía ($I_{\text{Erosión}} = 0,48$). Esto mostraría que el bagazo de nuestra región tendría mayor tendencia a erosionar los interiores de una caldera de vapor en relación al bagazo de otros países. Esto se debería a la mayor incidencia de los contenidos de Na y K a nivel global en relación al menor contenido de SiO_2 encontrado en bagazos de Tucumán (ver Tabla 4.3). Con respecto al carbón bituminoso (promedio 0,04), el bagazo resultó menos erosivo (ver Tabla 7.13).

Esto podría deberse principalmente a los menores contenidos de Na y K en el carbón en relación al “Si” que resultaron prácticamente similares en ambos combustibles (promedio bagazo 253,58 [g/kg] vs. promedio carbón 250,75 [g/kg]).

Finalmente, el índice de viscosidad (S_R) para las cenizas de bagazo, resultó en promedio de 94,12, un 12,7% mayor al valor medio determinado de la literatura ($S_R = 82,17$). Esto indica que las cenizas de bagazo de nuestra región, poseen mayor tendencia a volverse viscosas en relación al promedio global. Además, el valor determinado se encuentra por arriba del valor límite propuesto por Pronobis, 2005 ($S_R = 72$). Para el caso del carbón mineral de referencia, se encontraron valores diferentes entre el carbón bituminoso de bajos volátiles y el de altos volátiles, cuyos valores de S_R fueron: 92 y 65, respectivamente. Se puede observar que el bagazo de caña de azúcar presentaría un comportamiento similar al carbón bajo en volátiles.

4.8 ÍNDICES DE COMPORTAMIENTO DE LAS CENIZAS DE RAC DE CAÑA DE AZÚCAR DE TUCUMÁN – ARGENTINA.

La Tabla 4.6 muestra una comparación entre los índices de comportamiento promedio encontrados en este estudio (ver Tabla 7.22 del Anexo) con los determinados globalmente para las cenizas de RAC de caña de azúcar (ver Tabla 7.12 del Anexo). Asimismo, en la Tabla 7.23 del Anexo se muestran los parámetros adicionales utilizados en los cálculos de los índices de comportamiento de las cenizas.

Tabla 4.6. Comparación de los índices de comportamiento de las cenizas de RAC de caña de azúcar de Tucumán respecto a los encontrados globalmente. Elaboración propia.

LUGAR	Presente estudio			Valores globales		
	Promedio	Rango	DE	Promedio	Rango	DE
CA [%]	56,13	37,27 a 68,75	9,82	47,77	39,30 a 69,46	26,14
CB [%]	26,63	18,86 a 34,09	4,82	30,98	7,50 a 45,07	11,95
%CA	67,62	59,16 a 74,74	5,26	50,27	47,41 a 89,02	27,87
%CB	32,38	25,26 a 40,84	5,26	34,25	10,98 a 52,59	12,65
CB/CA	0,49	0,34 a 0,69	0,12	0,57	0,12 a 1,11	0,30
IS	0,73	0,39 a 1,21	0,26	1,84	0,25 a 3,99	1,16
AI	10,81	5,66 a 16,34	3,53	6,25	0,64 a 12,61	3,77
Rs	0,08	0,04 a 0,16	0,03	0,85	0,17 a 1,95	0,67
F _u	47,98	23,05 a 95,36	24,31	5,28	0,11 a 11,82	3,74
I _{K-Si}	0,0146	0,01 a 0,03	0,0054	0,0020	0,0001 a 0,0041	0,0011
I _{Sulf.}	0,0145	0,01 a 0,02	0,0054	0,0056	0,0001 a 0,0386	0,0116
I _{S/Cl}	0,86	0,48 a 1,57	0,39	5,57	0,35 a 12,07	4,05
I _{Ca/Si}	0,17	0,06 a 0,35	0,11	0,24	0,04 a 0,56	0,18
I _{Erosión}	0,02	0,01 a 0,03	0,01	0,02	0,00 a 0,06	0,02
S _R	83,65	78,36 a 88,47	2,99	60,98	57,39 a 95,70	32,19

En la mencionada Tabla 4.6 se puede ver que el valor promedio de CA fue de 56,13% resultó por arriba del promedio global (47,77%), no obstante el valor se encontró dentro del rango global considerado de referencia (39,30% a 69,46%). La relación de los elementos ácidos respecto al total (%CA = 67,62%), también se encontró dentro del rango de valores globales (47,41% a 89,02%).

La cantidad promedio total de CB determinado fue de 26,63%, el mismo se encontró por debajo del valor promedio global (30,98%); y la relación porcentual de los CB respecto al total óxidos fue de 32,38%, este parámetro también se halló por debajo del promedio global (34,25%). No obstante, el valor de %CB se situó dentro del rango de valores globales observados (10,98% a 52,59%).

La relación CB/CA determinada en RAC fue de 0,49, este valor se encontró dentro del rango de valores observados globalmente (0,12% a 1,11%). En relación al valor promedio global de CB/CA (0,57), el resultado del estudio se encontró por debajo del mismo en aproximadamente un 14%.

El índice IS determinado para este estudio fue de 0,73, lo que representa un 39,7% del valor promedio global determinado (1,84). La DE encontrada para este parámetro fue de 0,26, menor a la DE global (1,16). Este índice se halló dentro del rango global considerado de referencia (0,25 a 3,99). No obstante, el valor promedio indicaría la existencia de riesgos de sinterización por efecto de los óxidos alcalinos (K_2O y Na_2O), lo que provocaría deposición de sus cenizas en el interior de un generador de vapor, ya que $IS < 2$ según lo indicado por Fernández Llorente y Carrasco García, 2005. En relación al carbón mineral, el índice "IS" del RAC de caña de azúcar presentó un valor dentro del rango observado en carbones bituminosos (0,60 a 0,96), por lo que se espera un comportamiento similar desde el punto de vista de la sinterización. Con respecto al bagazo ($IS = 0,53$), el RAC tendría menor riesgo a la sinterización.

El índice promedio de álcali "Al" encontrado en RAC fue de 10,81 [kg_{ceniza}/GJ], un valor por arriba del promedio global de 6,25 [kg_{ceniza}/GJ], los valores determinados en este caso para la DE (3,53) se hallaron en igual orden de magnitud que el promedio global de referencia (3,77). En comparación al carbón mineral el índice "Al" para RAC resultó aproximadamente 15 veces mayor (promedio Al = 0,72 [kg_{ceniza}/GJ]) (ver Tabla 7.13 del Anexo). Este hecho se debe principalmente al mayor contenido de cenizas en RAC (promedio 12,95%), respecto al carbón tomado como referencia (9,6%) y al menor PCS de la biomasa. Esto indicaría un elevado riesgo de ensuciamiento por deposición de las cenizas de RAC, según Nougues, *et al.*, 2010 ($Al > 0,34$). En relación al bagazo ($Al = 3,27$ [kg_{ceniza}/GJ]), el RAC posee un valor de este índice 3,3 veces superior, por lo que tendría mayor riesgo de ensuciamiento respecto al bagazo.

El índice de escorificación encontrado en RAC fue de $R_s = 0,08$, valor por debajo del rango global de referencia (0,17 a 1,95). En relación al carbón mineral, este índice se encontró en el límite inferior del rango determinado para carbones bituminosos (0,06 a 1,33), por lo que es de esperar en las cenizas de RAC un comportamiento similar respecto a la fusibilidad de los carbones bituminosos bajo en volátiles, o sea, poca tendencia a la escorificación según Pronobis, 2005 ($R_s < 0,6$). En relación al bagazo ($R_s = 0,03$), el RAC presentó un mayor coeficiente ($R_s = 0,08$), por lo que tendría una menor tendencia a la escorificación para las condiciones de temperatura necesaria.

Con respecto al índice de deposición " F_u " para las muestras de RAC analizadas fue de 47,98, aproximadamente 9 veces mayor en relación al promedio global determinado para esta misma biomasa (5,28); y 4 veces mayor al valor máximo del rango de referencia global (0,11 a 11,82). Esto indica que el RAC como combustible de caldera, presentaría riesgo de sinterización de sus cenizas ($F_u > 40$). En comparación con el bagazo (0,92), el RAC tendría mayor compromiso de sinterización de sus cenizas.

Respecto al índice de reacción entre el potasio y el silicio (I_{K-Si}), el valor promedio determinado para el RAC fue de 0,0146, aproximadamente 7,3 veces mayor al valor encontrado a nivel global (0,0020) y aproximadamente un 11% en relación al bagazo de este estudio (0,13). Esto indicaría que el RAC tendría un comportamiento más parecido al carbón bituminoso (0,04) que al bagazo en relación a este índice.

Asimismo, el índice " $I_{Sulf.}$ " encontrado en promedio para el RAC de este estudio fue de $I_{Sulf.} = 0,0145$, un valor prácticamente similar al hallado en RAC a nivel global ($I_{Sulf.} = 0,0056$) e inferior al carbón mineral (0,04) en aproximadamente un 36,2%. Por ello, es de esperar tener una baja tendencia a la formación de compuestos de azufre durante la descomposición térmica de esta biomasa. Cabe hacer notar que el contenido de "S" promedio determinado en las muestras de RAC analizadas ($S = 0,16\%$) (ver Tabla 7.23), se encuentra por debajo del rango global encontrado en bibliografía (0,55% a 1,98%) (ver Tabla 7.12).

Con respecto al índice de corrosión $I_{S/Cl}$, el valor promedio en cenizas de RAC fue 0,86, el mismo resultó muy inferior al promedio global encontrado en esta biomasa (5,57), pero dentro del rango observado globalmente (0,35 a 12,07). Este hecho podría deberse, al igual que en el caso del bagazo, al menor contenido de azufre de las cenizas analizadas (promedio $S = 0,05$ [mol/kg]) (ver Tabla 7.23), respecto al promedio global (0,43 [mol/kg]). Además, influye el menor contenido de cloro encontrado (promedio $Cl = 0,07$ [mol/kg]), en relación al valor promedio determinado globalmente (promedio $Cl = 0,21$ [mol/kg]).

Con respecto al índice $I_{Ca/Si}$ el valor promedio resultó de 0,17, menor al promedio global de 0,24. No obstante, el valor de este índice para Tucumán se encuentra en el rango de valores observados en la bibliografía para RAC (0,04 a 0,56). En relación al bagazo ($I_{Ca/Si} =$

0,03) este índice resultó 6 veces mayor y respecto al carbón bituminoso ($I_{Ca/Si} = 0,02$), resultó mayor en 8 veces en proporción al combustible fósil. Este hecho se debería a la mayor presencia de Ca en la biomasa en relación al carbón mineral, por lo que habría una mayor tendencia a tener elevados puntos de fusión si no hubiera presencia de componentes alcalinos de K y Na.

El índice de erosión ($I_{Erosión}$) promedio determinado en las muestras de RAC analizadas fue de $I_{Erosión} = 0,02$. Este valor resultó similar al encontrado en bibliografía y un 67% menor al determinado en carbón bituminoso de bajo volátiles (0,03). Este parámetro resultó un 14,3% respecto al encontrado en bagazo ($I_{Erosión} = 0,14$). Esto se debe principalmente a los mayores contenidos de Na y K encontrados en las muestras de bagazo respecto a las de RAC, expresados en [mol/kg] (ver Tablas 7.21 y 7.23).

Finalmente, el índice de viscosidad para las cenizas del RAC resultó en promedio de $S_R = 83,65$, un 37,1% mayor al valor medio encontrado en bibliografía para esta misma biomasa ($S_R = 60,98$), no obstante este parámetro se encontró dentro del rango global determinado (57,39 a 95,70). Esto indicaría que las cenizas de RAC de nuestra región, poseen menor tendencia a volverse viscosas en relación al promedio global, ya que el parámetro se encontró por arriba del valor límite propuesto por Pronobis, 2005 ($S_R = 72$).

En relación al carbón mineral utilizado de referencia, tendría un comportamiento cercano al carbón bituminoso de bajos volátiles ($S_R = 92,02$), con temperaturas “ T_{250} ” y de fusión relativamente elevadas. En comparación con el bagazo de caña de azúcar ($S_R = 94,12$), el índice de viscosidad para las cenizas de RAC resultó menor en 11% aproximadamente, lo que indicaría una mayor tendencia a volverse viscosas en relación a las cenizas de bagazo.

4.9 COMPOSICIÓN REAL DE LAS MUESTRAS SINTÉTICAS.

En la Tabla 7.24 del Anexo pueden verse los resultados de la formulación de las muestras ficticias compuestas por los óxidos comerciales puros. La misma se encuentra dividida para los CA y CB. Se indica el peso de cada elemento y el porcentaje correspondiente en relación a la masa total de la muestra. Este cuadro permitió la elaboración de estas muestras ficticias de los óxidos mayoritarios encontrados en cenizas de combustibles sólidos.

Para el caso del K_2O , P_2O_5 y SO_3 se indican, además, las cantidades de KNO_3 , KH_2PO_4 y de H_2SO_4 , utilizados como patrones de K, P y S. Asimismo, se informa el peso total de la muestra formulada y se destaca en color amarillo el rango de variación logrado sobre el valor de concentración para cada elemento tomado de referencia.

4.10 FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS PARA EL ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE LOS COMPONENTES.

En Tablas 7.25 y 7.26 del Anexo se muestran los resultados del análisis de la fusibilidad de las cenizas sintéticas elaboradas para el estudio de la sensibilidad de los componentes de las mismas, realizadas en AO y AR, según ASTM D1865-03. Las muestras indicadas fueron formuladas a partir de la variación de los óxidos mostrados en la Tabla 7.24.

Las Tablas 4.7 y 4.8 muestran un resumen de las Tablas 7.25 y 7.26 respectivamente. Se indican los promedios, valores máximos y mínimos de cada serie para los ensayos realizados en AO y AR.

Tabla 4.7. Resultados del análisis de la fusibilidad en AO para el estudio de la sensibilidad de los componentes de las cenizas. Elaboración propia.

Atmósfera oxidante					
Muestras	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]	FT-DT [°C]
Promedio	1095	1224	1272	1478	383
Máx.	1160	1335	1390	1500	445
Mín.	1005	1100	1110	1295	290

Tabla 4.8. Resultados del análisis de la fusibilidad en AR para el estudio de la sensibilidad de los componentes de las cenizas. Elaboración propia.

Atmósfera reductora					
Muestras	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]	FT-DT [°C]
Promedio	974	1134	1182	1276	302
Máx.	1050	1290	1355	1450	545
Mín.	905	995	1005	1070	125

La Figura 21 muestra las desviaciones de las temperaturas de fusión para las muestras sintéticas trabajando en AO. Puede verse la variación de la fusibilidad, principalmente de la temperatura DT entre las muestras M1 a M6 que corresponden a la variación de los CA (específicamente al Al_2O_3 y al SiO_2).

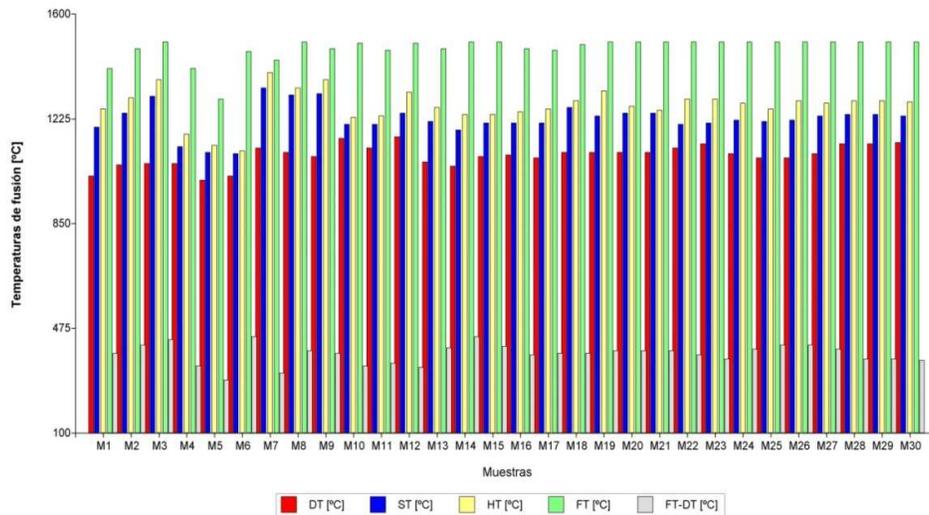


Figura 21. Desviación de las temperaturas de fusibilidad en AO en función de la variación de las concentraciones de los óxidos mayoritarios estudiados. Elaboración propia.

La Figura 22 muestra las desviaciones de temperatura para las muestras sintéticas pero trabajando en AR. Aquí se observa que las variaciones más importantes se encontraron en ST, HT y FT, mientras que DT se mantuvo prácticamente constante. Este hecho indicaría que en el hogar de una caldera de vapor, trabajando en AR, los CA tendrían un mayor efecto entre las temperaturas de fusión de las cenizas. No obstante, la amplitud o rango de fusibilidad (FT-DT) resultó mayor en AO (promedio 383 [°C]), respecto a la AR (promedio 302 [°C]).

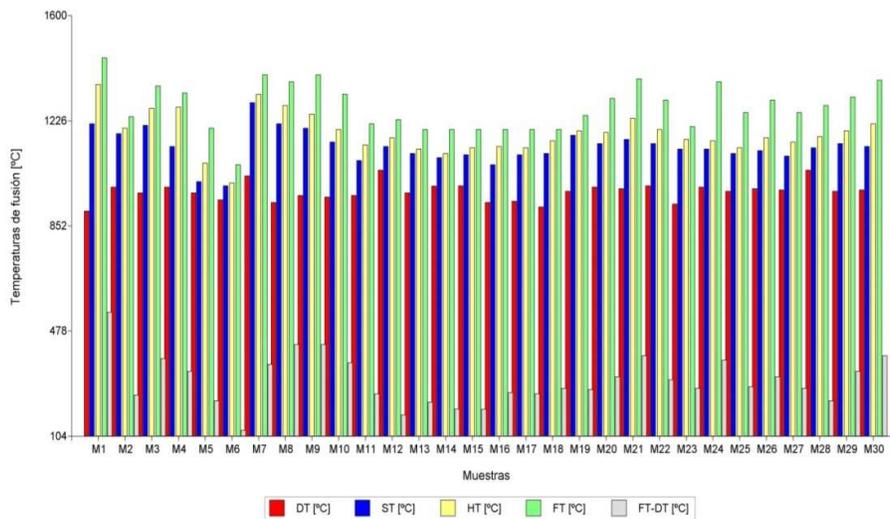


Figura 22. Desviación de las temperaturas de fusibilidad en AR en función de la variación de las concentraciones de los óxidos mayoritarios estudiados. Elaboración propia.

4.11 SENSIBILIDAD DE LOS ÓXIDOS ÁCIDOS EN LAS CENIZAS SINTÉTICAS FORMULADAS.

A continuación se indicarán los resultados del estudio de sensibilidad de los diferentes óxidos mayoritarios encontrados en muestras de cenizas de combustibles sólidos. Se destacó en colores las temperaturas de fusión correspondientes: DT (azul), ST (rojo), HT (verde) y FT (gris). Cada punto indicado representa una muestra de la Tabla 7.24. En la figura sólo se indicaron las numeraciones de la dispersión de los valores correspondientes a DT.

4.11.1 SENSIBILIDAD DEL $\%Al_2O_3$ SOBRE LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS FORMULADAS.

En la Figura 23 puede verse para AO que un aumento en la concentración de Al_2O_3 en las cenizas desde 6,71% a 13,78%, se registró un incremento en la temperatura DT entre 1.052 [°C] hasta 1.098 [°C]. A partir de este punto, la temperatura disminuyó hasta 1.050 [°C], correspondiente a una concentración del óxido de 21,68%.

Asimismo, la ST registró un aumento creciente desde 1.144 [°C] hasta 1.295 [°C] para el rango de variación del óxido analizado (6,71% a 21,68%). Igual tendencia se observó para HT, con el incremento de temperatura de 1.190 [°C] hasta 1.345 [°C]. Con respecto FT se observó un aumento de la temperatura desde 1.455 [°C] hasta 1.487 [°C] cuando el incremento en la concentración de Al_2O_3 fue de 6,71% a 21,68%.

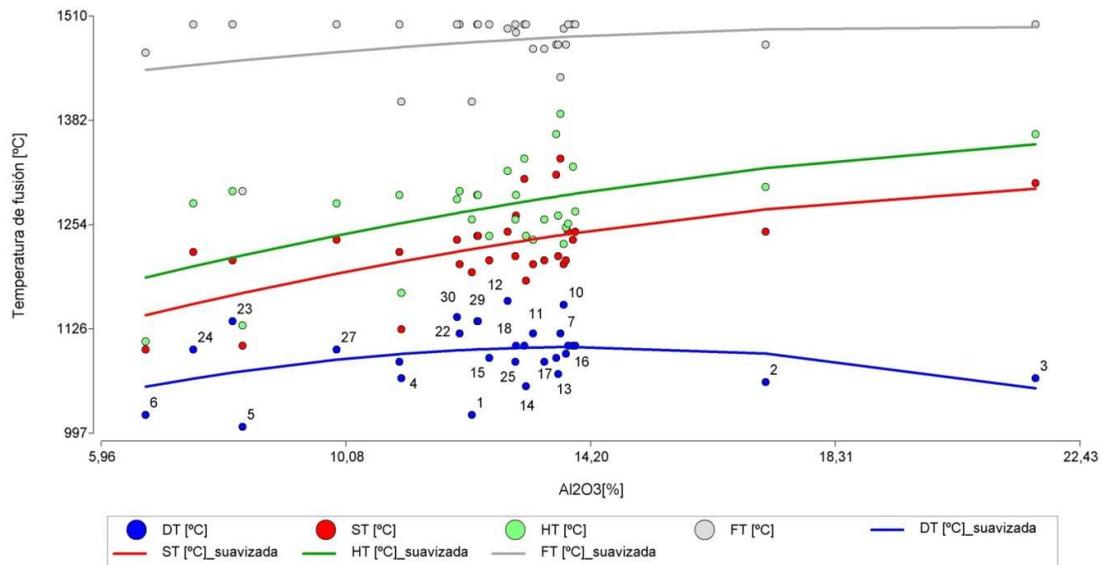


Figura 23. Sensibilidad del Al_2O_3 en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.

En la Figura 24 se observan las variaciones de las temperaturas de fusibilidad con el aumento del óxido trabajando en AR. La temperatura DT se mantuvo prácticamente constante (promedio 974,1 [°C]) en todo el rango evaluado de concentración de Al_2O_3 (de 6,71% a 21,68%). Las temperaturas ST y HT tuvieron un comportamiento similar que el observado en AO, pero con incrementos desde 1.050 [°C] hasta 1.202 [°C] y desde 1.091[°C] hasta 1.245 [°C] respectivamente. La temperatura FT aumentó levemente desde 1.208 [°C] hasta 1.307 [°C]), manteniéndose constante sobre esa temperatura.

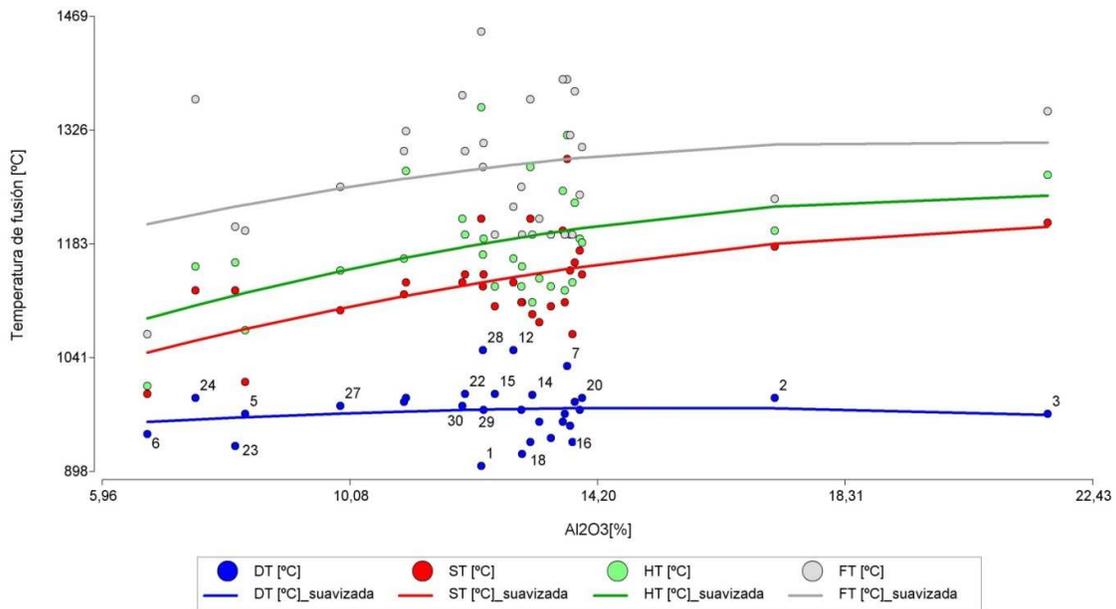


Figura 24. Sensibilidad del Al_2O_3 en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.

4.11.2 SENSIBILIDAD DEL $\%SiO_2$ SOBRE LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS FORMULADAS.

En la Figura 25 puede verse que para el rango de variación propuesto de $\%SiO_2$ (8% a 52%), se registró una disminución de DT (de 1.116 [°C] a 1.006 [°C]) trabajando en AO. Este hecho podría deberse a la formación de silicatos generados a partir del K_2O y SiO_2 contenidos en la ceniza y que durante la combustión se combinan y se transforman en silicatos de potasio cristalinos (de la forma K_2SiO_3). Esta tendencia también se observaron para las temperaturas ST y HT, donde las disminuciones fueron desde 1.273 [°C] a 1.084 [°C] y desde 1.317 [°C] a 1.107 [°C], respectivamente.

Con respecto a FT pudo observarse una disminución desde 1.500 [°C] para 8 [%] de SiO₂ hasta 1.371 [°C] con 41[%] de SiO₂; y a partir de este punto se observó un incremento de la temperatura de fusión hasta alcanzar 1.426 [°C] con 52% de SiO₂. Esto podría deberse a la fusión de algunos compuestos alcalinos térreos (principalmente Ca y Mg) que se combinan con la sílice para formar sus correspondiente silicatos con elevados puntos de fusión.

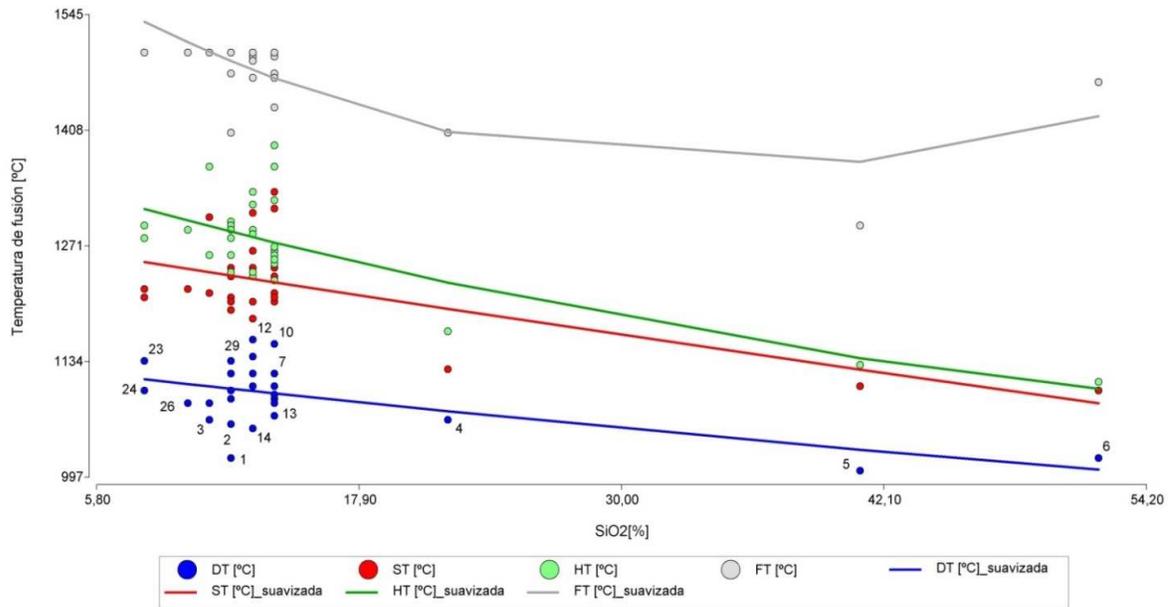


Figura 25. Sensibilidad del %SiO₂ sobre la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.

La Figura 26 muestra como la temperatura DT en AR, se mantuvo prácticamente constante (promedio 974,1 [°C]) en todo el rango de variación de la sílice (8% a 52%). Con respecto a ST, también se observó una disminución de la misma desde 1.139 [°C] a 968 [°C]. La tendencia de la temperatura HT en AR fue en aumento desde 1.158 [°C] hasta 1.214 [°C] para 22 [%] de SiO₂, luego se registró una caída de la temperatura hasta 989 [°C] para 52% de SiO₂. En relación a la temperatura FT, se observó un leve incremento desde 1.275 [°C] hasta 1.295 [°C], donde se mantuvo constante hasta alcanzar una concentración de SiO₂ de 22%, a partir de la cual comenzó su disminución de temperatura con el incremento del óxido y hasta alcanzar 1.071 [°C] para 52% de SiO₂.

Es importante destacar que las diferencias promedio de las temperaturas de fusión observadas entre las atmósferas analizadas fue de 120,4 [°C] para DT; 90,0 [°C] para ST; 90,5 [°C] para HT y 201,5 [°C] para FT. Observándose siempre menores temperaturas de fusión en AR en relación a las encontradas en AO.

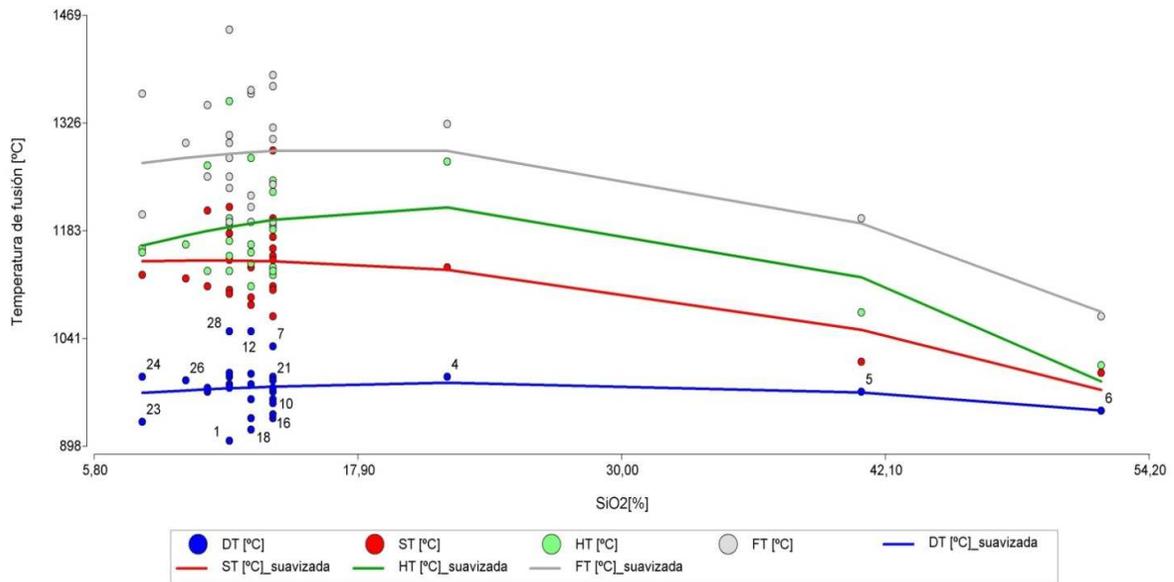


Figura 26. Sensibilidad del %SiO₂ sobre la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.

4.11.3 SENSIBILIDAD DEL %TiO₂ SOBRE LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS FORMULADAS.

En la Figura 27 puede verse que en AO el aumento en la concentración de TiO₂ entre 1% y 8%, provocó una disminución en DT desde 1.120 [°C] a 1.094 [°C] para 8% TiO₂. A partir de este punto comenzó un incremento en DT hasta 1.105 [°C] para 14% TiO₂. Una tendencia similar se registró en ST, donde la disminución de temperatura fue desde 1.341 [°C] y hasta 1.197 [°C] para un incremento del TiO₂ entre 1% y 8%, luego con el aumento creciente del óxido en la mezcla (hasta 14%) se alcanzó una temperatura de 1.232 [°C]. De igual manera esta disminución se observó en HT desde 1.382 [°C] hasta 1.254 [°C] para un incremento del TiO₂ desde 1% al 8%, a partir del cual los aumentos en la concentración del óxido (desde 8% hasta 14%), provocaron un aumento en HT hasta 1.281 [°C]. La FT registró un aumento paulatino de la temperatura desde 1.453 [°C] hasta 1.489 [°C] con incrementos de TiO₂ entre el 1% y 14%.

En la Figura 28 se observa para AR cómo la DT resultó prácticamente constante (promedio 974,1 [°C]) para el aumento del TiO₂ entre el 1% y 14%. La experiencia registró una disminución de ST desde 1.270 [°C] hasta 1.104 [°C] para incrementos del óxido entre el 1% y 11%. A partir de este punto, se observó un leve aumento hasta 1.145 [°C] para la concentración final de 14%. La HT disminuyó desde 1.302 [°C] para el 1% TiO₂ hasta 1.155 [°C] para una concentración del 11% TiO₂. Luego, se incrementó la temperatura hasta alcanzar finalmente 1.183 [°C] para el 14% TiO₂.

La temperatura FT registró una disminución desde 1.398 [°C] con 1% TiO₂, hasta 1.254 [°C] y 11% TiO₂. Luego se registró un leve aumento de FT hasta la temperatura final de 1.270 [°C] y 11% TiO₂. Es importante destacar cómo el cambio de atmósfera condicionó la FT con el incremento del %TiO₂ en el rango analizado.

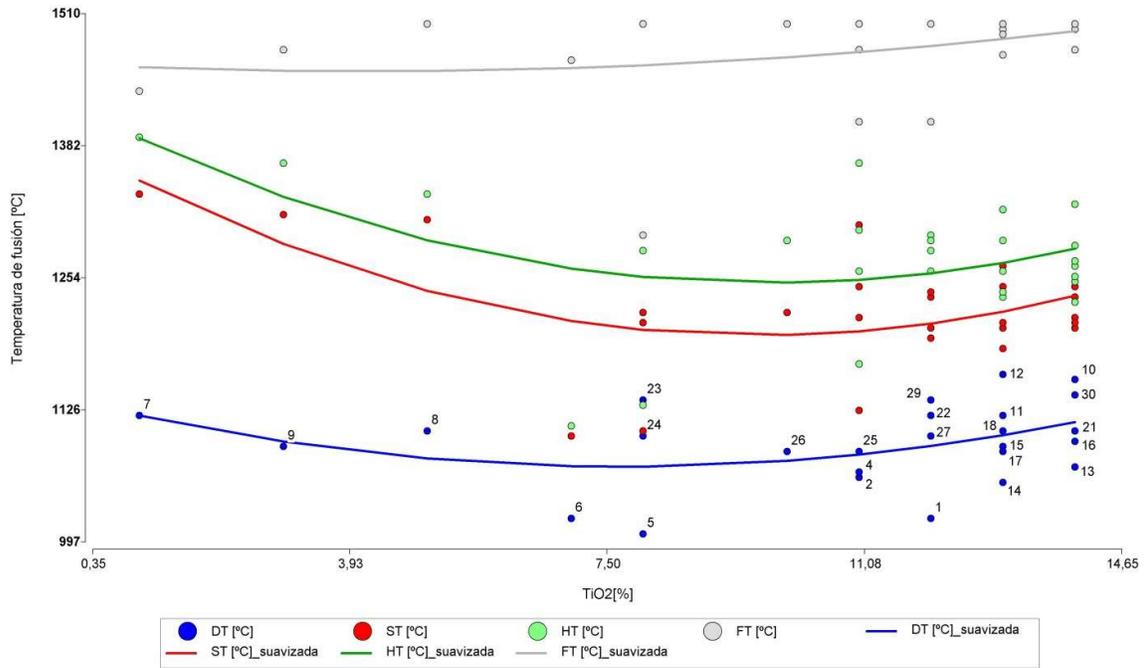


Figura 27. Sensibilidad del %TiO₂ sobre la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.

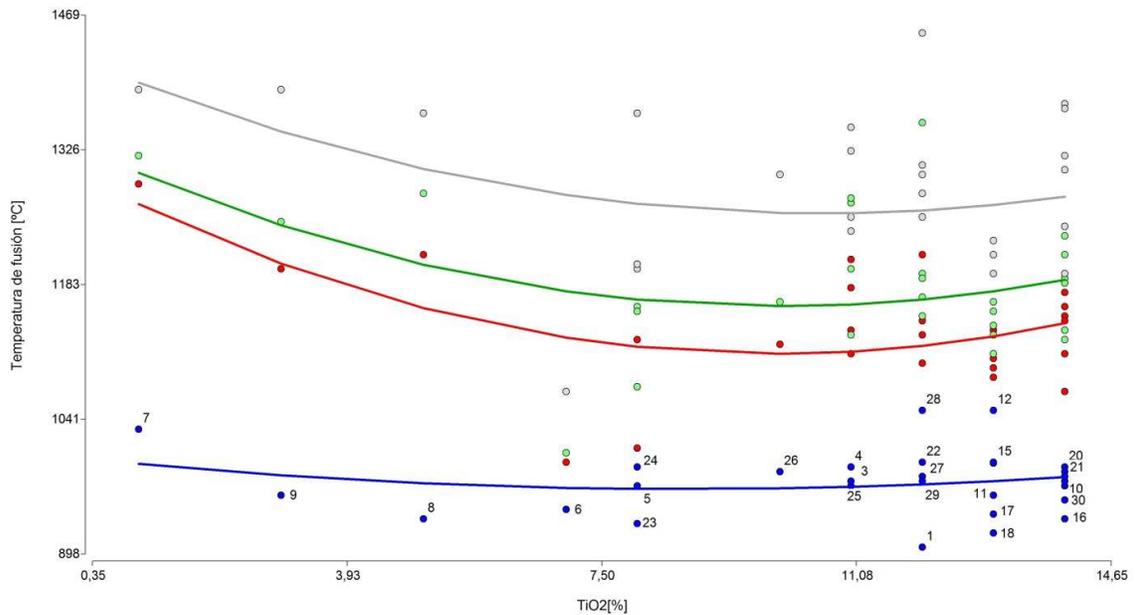


Figura 28. Sensibilidad del %TiO₂ sobre la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.

4.12 SENSIBILIDAD DE ÓXIDOS BÁSICOS EN LAS CENIZAS SINTÉTICAS FORMULADAS.

A continuación se indican los resultados del estudio de sensibilidad para los diferentes óxidos mayoritarios básicos encontrados en las muestras de cenizas de combustibles sólidos.

4.12.4 SENSIBILIDAD DEL %Fe₂O₃ SOBRE LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS.

La Figura 29 muestra un descenso de la temperatura DT trabajando en AO desde 1.147 [°C] hasta 1.074 [°C], para un incremento del contenido de Fe₂O₃ de 3% a 10%. Luego con el aumento de la concentración del óxido se observó un leve ascenso de la DT hasta alcanzar 1.109 [°C] con 14% Fe₂O₃. La temperatura ST registró un leve descenso desde 1.194 [°C] y 3% Fe₂O₃ hasta 1.181 [°C] y aproximadamente 5% Fe₂O₃, luego aumentó hasta alcanzar finalmente 1.254 [°C] con 14% Fe₂O₃. Con respecto a HT, la misma sufrió un aumento constante desde 1.207 [°C] hasta 1.297 [°C] para el incremento en el rango evaluado. Finalmente, FT tuvo un comportamiento de disminución desde 1.485 [°C] con 3% Fe₂O₃ hasta 1.459 [°C] con 8% Fe₂O₃. Posteriormente, aumentó la temperatura hasta alcanzar nuevamente los 1.485 [°C] con 14% Fe₂O₃.

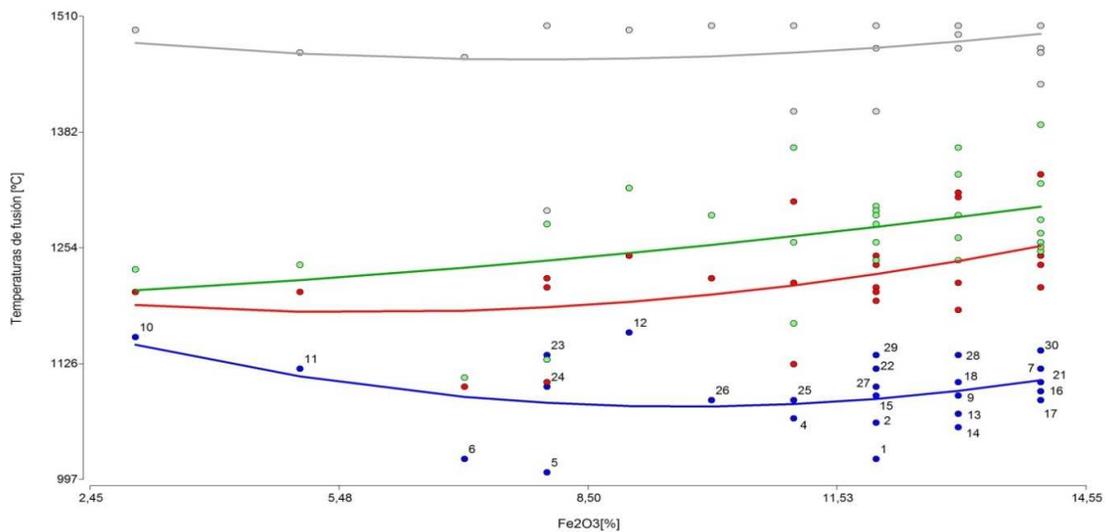


Figura 29. Sensibilidad del %Fe₂O₃ en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.

La Figura 30 muestra que en AR la DT registró un leve aumento desde 947 [°C] para 3% Fe₂O₃ hasta 980 [°C] y 10% de concentración del óxido. Luego, se mantuvo la temperatura prácticamente constante hasta alcanzar el 14% Fe₂O₃. La ST registró un paulatino ascenso

desde 1.095 [°C] con 3% Fe₂O₃, hasta 1.155 [°C] con 14% Fe₂O₃. Un comportamiento similar se obtuvo en HT, en este caso el aumento fue desde 1.049 [°C] hasta 1.207 [°C]. La FT registró un leve descenso desde 1.298 [°C] con 3% Fe₂O₃, hasta 1.252 [°C] con aproximadamente 7% Fe₂O₃. Luego, se observó un incremento de la temperatura hasta alcanzar 1.301 [°C] con el 14% Fe₂O₃.

Cabe indicar que en general se verifica las observaciones de Fernández Díez, 2000 en relación a la disminución de DT trabajando en AO con el aumento de la concentración de Fe₂O₃ entre 3% y 10% aproximadamente. Una situación similar se observó para FT.

En condiciones reductoras no se cumplieron las observaciones indicadas por el autor mencionado, este hecho podría deberse a las interferencias causadas por las concentraciones de CaO y MgO de la mezcla sintética. Esto también fue observado por el autor.

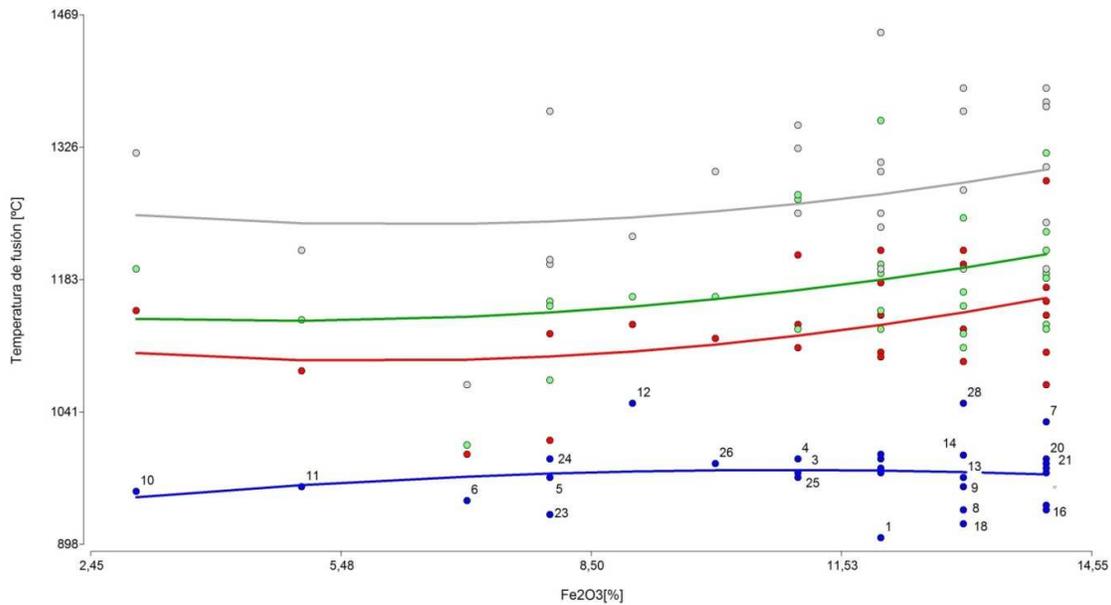


Figura 30. Sensibilidad del %Fe₂O₃ en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.

4.12.5 SENSIBILIDAD DEL %CaO SOBRE LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS FORMULADAS.

La Figura 31 muestra un ascenso de la temperatura DT trabajando en AO desde 1.058 [°C] con 3% CaO hasta 1.115 [°C] con 14% CaO. La temperatura ST registró una leve tendencia a disminuir desde 1.190 [°C] (3% CaO) hasta aproximadamente 1.178 [°C] con 7% CaO, luego se observó un incremento con el aumento del óxido (14% CaO) hasta 1.254 [°C]. Una tendencia similar se obtuvo con HT, disminuyendo desde 1.232 [°C] con 3% CaO, hasta

aproximadamente 1.225 [°C] con 7% CaO, luego se incrementó hasta 1.299 [°C] para 14% CaO. Asimismo, la FT disminuyó desde 1.473 [°C] (3% CaO) hasta 1.455 [°C] con 4% CaO, luego se incrementó con el aumento de la concentración de óxido hasta 1.484 [°C] y 14% CaO.

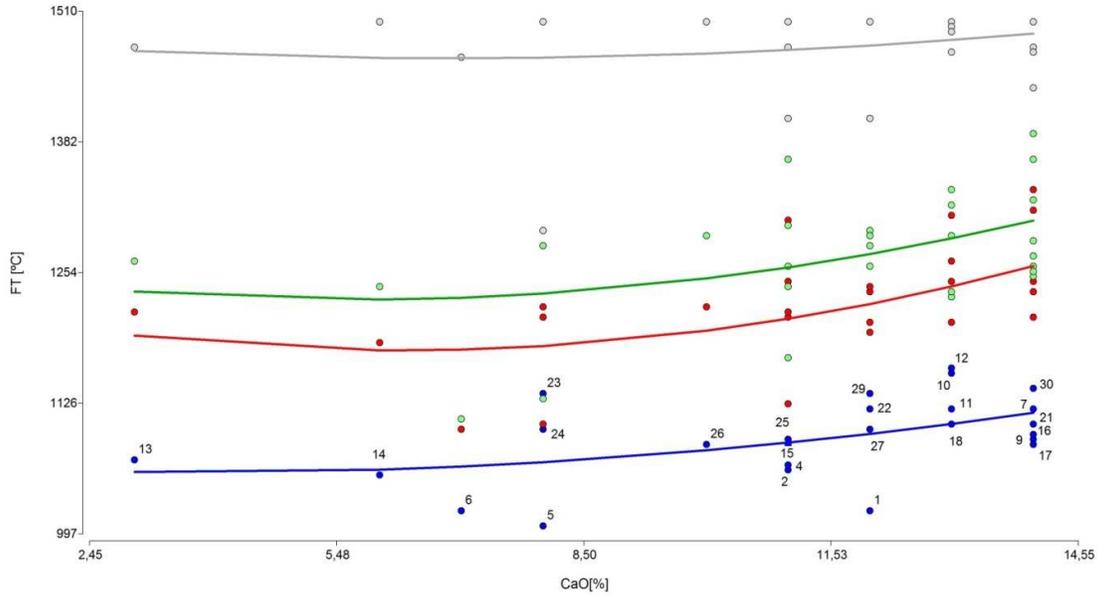


Figura 31. Sensibilidad del %CaO en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.

La Figura 32 muestra la variación de las temperaturas de fusibilidad con el incremento de la concentración de CaO trabajando en AR. Puede verse que DT se mantuvo prácticamente constante con un promedio de 1.134,3 [°C] en el rango de aumento del %CaO evaluado (3% a 14%). La temperatura ST registró hasta un 7% CaO un valor constante de 1.077 [°C], luego experimentó un crecimiento de la temperatura con el aumento del porcentaje de CaO hasta alcanzar en promedio 1.154 [°C] (14% CaO). La tasa de crecimiento de HT fue en aumento desde aproximadamente 1.077 [°C] para 3% CaO, hasta 1.199 [°C] con 14% CaO. En igual sentido la FT registró en promedio un aumento creciente desde 1.155 [°C] con 3% CaO, hasta 1.290 [°C] con 14% CaO.

Estos resultados coinciden con los observados por Fernández Diez, 2000; que indicó que el aumento de Ca en las cenizas, tienden a elevar la temperatura de viscosidad y de fusión correspondientes.

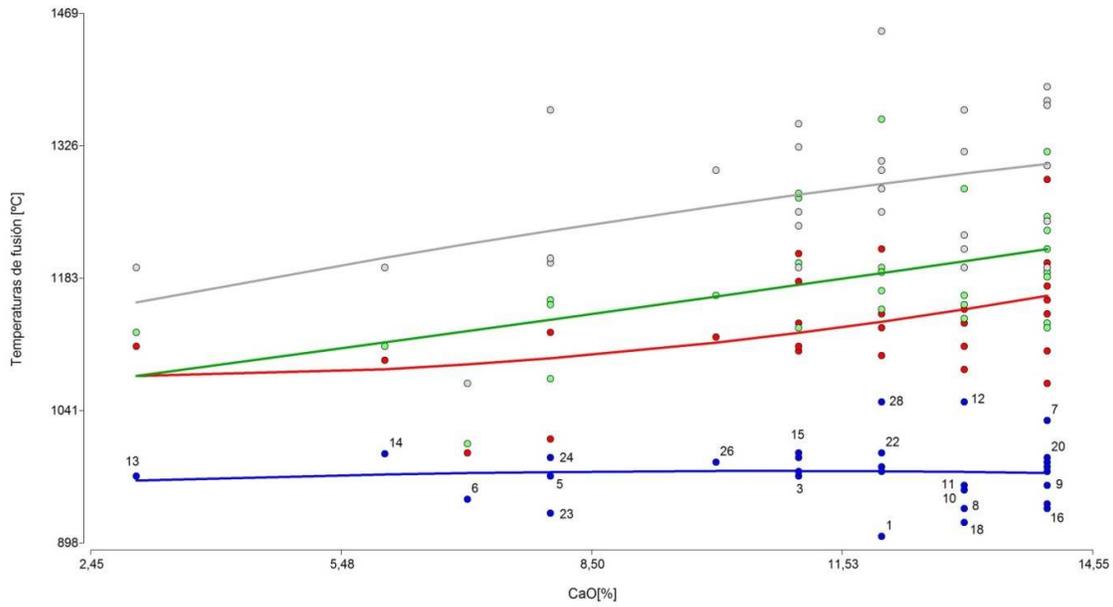


Figura 32. Sensibilidad del %CaO en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.

4.12.6 SENSIBILIDAD DEL %MgO SOBRE LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS FORMULADAS.

En la Figura 33 puede verse los resultados del estudio de la sensibilidad del %MgO sobre la fusibilidad de las cenizas ficticias trabajando en AO. La temperatura DT acusó desde 1.098 [°C] y 1% MgO una leve disminución hasta 1.071 [°C] para 7% MgO. A partir de la cual comenzó su ascenso hasta alcanzar 1.125 [°C] para 15% MgO.

Comportamientos similares tuvieron el resto de las temperaturas típicas de fusibilidad. La ST disminuyó desde 1.221 [°C] con 1% MgO hasta aproximadamente 1.181 [°C] para 7% MgO, luego comenzó su ascenso con el aumento de la concentración del óxido hasta 1.272 [°C] para 15% MgO. En igual sentido la HT disminuyó levemente desde 1.254 [°C] con 1% MgO hasta aproximadamente 1.228 [°C] con 6% MgO, a partir de la cual comenzó su ascenso hasta 1.272 [°C] para 15 %MgO.

Con respecto a FT, la tasa de cambio fue menor registrándose una leve disminución de la temperatura desde 1.476 [°C] con 1% MgO hasta aproximadamente 1.457 [°C] para 7% MgO, luego se incrementó la temperatura hasta alcanzar los 1.500 [°C] para 15% MgO.

Estos resultados coinciden parcialmente con los observados por Fernández Díez, 2000; ya que el aumento de la cantidad de Mg en las cenizas, elevaron las temperaturas de fusión en AO sólo a partir del 7% MgO en la mezcla sintética.

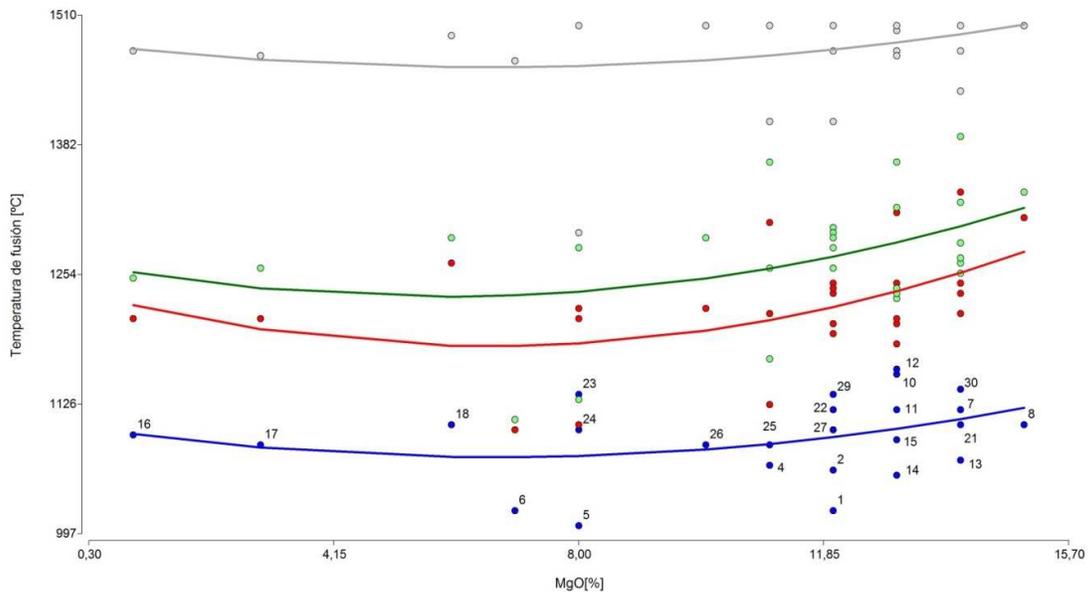


Figura 33. Sensibilidad del %MgO en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.

La Figura 34 muestra la sensibilidad del %MgO sobre temperaturas de fusibilidad en AR. La DT registró un crecimiento prácticamente constante desde 922 [°C] (1% MgO) hasta aproximadamente 984 [°C] (15% MgO). La ST se mantuvo discretamente constante (promedio 1.075 [°C]) entre 1% al 6% de MgO, luego se observó un aumento hasta una temperatura de 1.183 [°C] (15% MgO). Un comportamiento similar se observó con HT, donde el incremento de la temperatura fue desde 1.127 [°C] (1% MgO), hasta 1.233 [°C] para 15% MgO. Finalmente la FT mantuvo un crecimiento constante con el aumento de la concentración de % MgO, la temperatura promedio aumentó desde 1.180 [°C] (1% MgO) hasta 1.326 [°C] (15% MgO).

Estos resultados coinciden parcialmente con los observados por Fernández Diéz, 2000, ya que el aumento de la cantidad de Mg en las cenizas, sólo elevaron las temperaturas de fusión a partir del 7% MgO en la mezcla sintética.

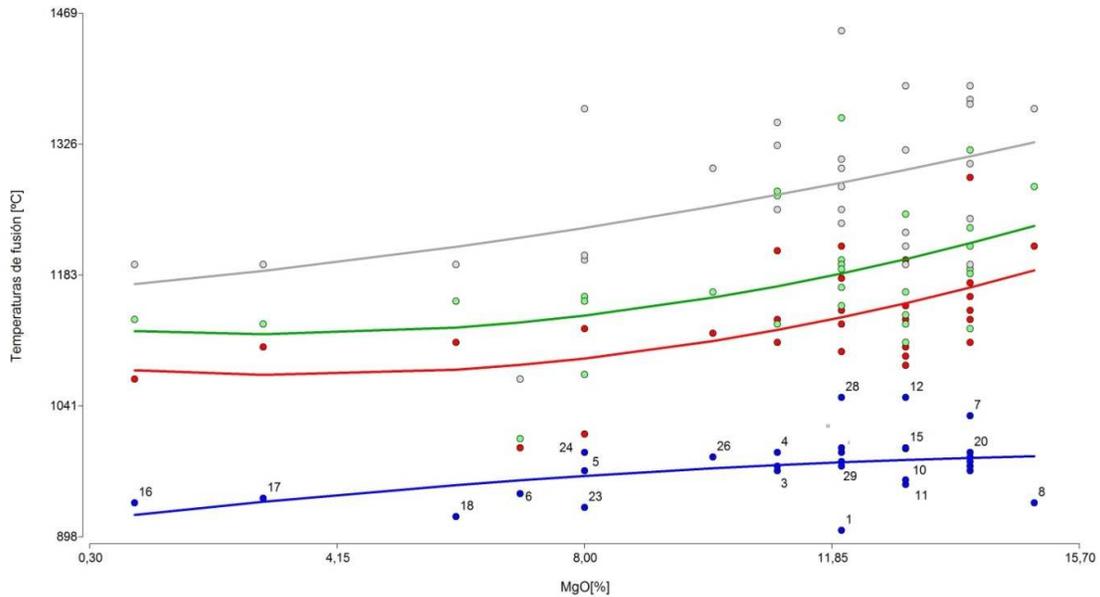


Figura 34. Sensibilidad del %MgO en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.

4.12.7 SENSIBILIDAD DEL %Na₂O SOBRE LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS.

En la Figura 35 se observan los resultados logrados para el análisis de sensibilidad del %Na₂O en AO, la experiencia mostró que DT disminuye desde 1.105 [°C] (0,47% Na₂O) hasta 1.060 [°C] (7% Na₂O), luego se incrementó hasta alcanzar 1.115 [°C] (14% Na₂O). La ST obtuvo una similar tendencia, disminuyó desde 1.243 [°C] (0,47% Na₂O) hasta 1.172 [°C] (7% Na₂O), luego se incrementó hasta alcanzar 1.254 [°C] (14% Na₂O). La temperatura HT registró un descenso desde 1.282 [°C] (3,91% Na₂O) hasta 1.224 [°C] (8,03% Na₂O), luego aumento la temperatura hasta 1.302 [°C] (14% Na₂O). Finalmente FT disminuyó desde 1.500 [°C] (0,47% Na₂O) hasta 1.453 [°C] (7% Na₂O) para luego aumentar con el incremento del óxido hasta 1.481 [°C] (14% Na₂O).

En la Figura 36 se observan los resultados para AR de la temperatura DT, la misma se mantuvo constante en 974 [°C] en todo el rango evaluado del óxido (0,47% a 14% Na₂O). La temperatura ST registró una disminución desde 1.155 [°C] (0,47% Na₂O) hasta aprox. 1.090 [°C] (7% Na₂O), luego se incrementó hasta alcanzar 1.163 [°C] (14% Na₂O). La HT descendió desde 1.195 [°C] (0,47% Na₂O) hasta 1.138 [°C] (7% Na₂O) y se incrementó hasta alcanzar 1.212 [°C] (14% Na₂O). Finalmente la FT disminuyó desde 1.297 [°C] hasta 1.240 [°C] para un aumento de la concentración de %Na₂O de 0,47% a 7%, luego creció la temperatura hasta alcanzar 1.290 [°C] con el aumento de la concentración del óxido hasta el 14%.

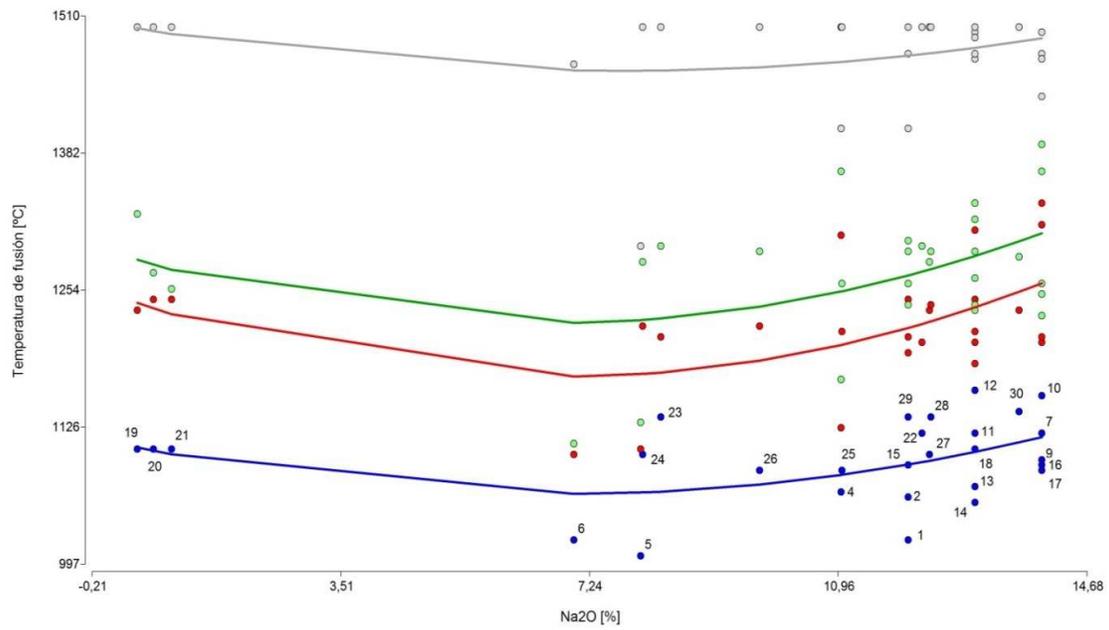


Figura 35. Sensibilidad del %Na₂O en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.

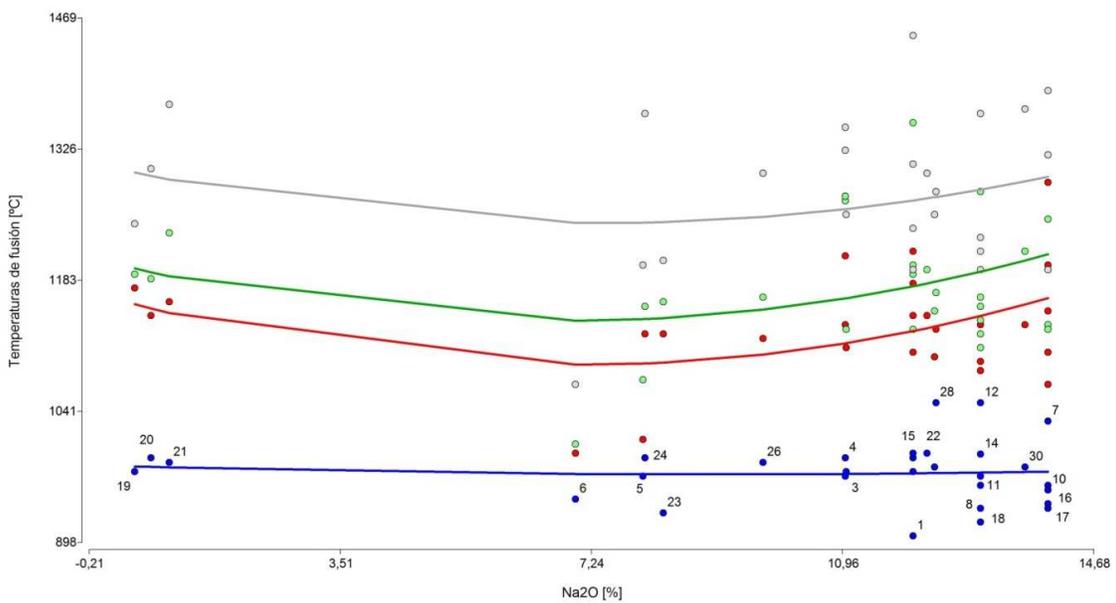


Figura 36. Sensibilidad del %Na₂O en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.

4.12.8 SENSIBILIDAD DEL %K₂O SOBRE LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS.

La Figura 37 muestra para AO un incremento de DT desde 1.073 [°C] con 1,92% K₂O hasta 1.131 [°C] con 8,44% K₂O, luego se mantuvo la temperatura prácticamente constante hasta alcanzar una concentración de 34,40% K₂O, a partir de la cual la temperatura disminuyó bruscamente hasta aproximadamente 1.100 [°C] para 39,60% K₂O. La ST aumentó desde 1.207 [°C] con 1,92% K₂O hasta 1.257 [°C] con 8,44% K₂O y a partir de esta concentración tuvo una leve disminución de la temperatura hasta 1.238 [°C] para 34,40% K₂O. Luego, se observó una fuerte disminución hasta 1.192 [°C] para la concentración límite de 39,60% K₂O. La HT tuvo un comportamiento parecido a ST pero el aumento de temperatura se registró desde de 1.238 [°C] con 1,92% K₂O hasta 1.330 [°C] y 8,44% K₂O; luego la temperatura se mantuvo constante hasta alcanzar una concentración de K₂O de 34,40%; y a partir de este punto la temperatura cayó fuertemente hasta los 1.255 [°C] para 39,60% K₂O. La temperatura FT aumentó desde 1.453 [°C] (1,92 %K₂O) hasta 1.521 [°C] (8,44 %K₂O). A partir de este punto se mantuvo prácticamente constante con el incremento de la concentración de K₂O hasta alcanzar los 34,40%, dónde la temperatura cayó fuertemente hasta 1.475 [°C] para 39,60% K₂O.

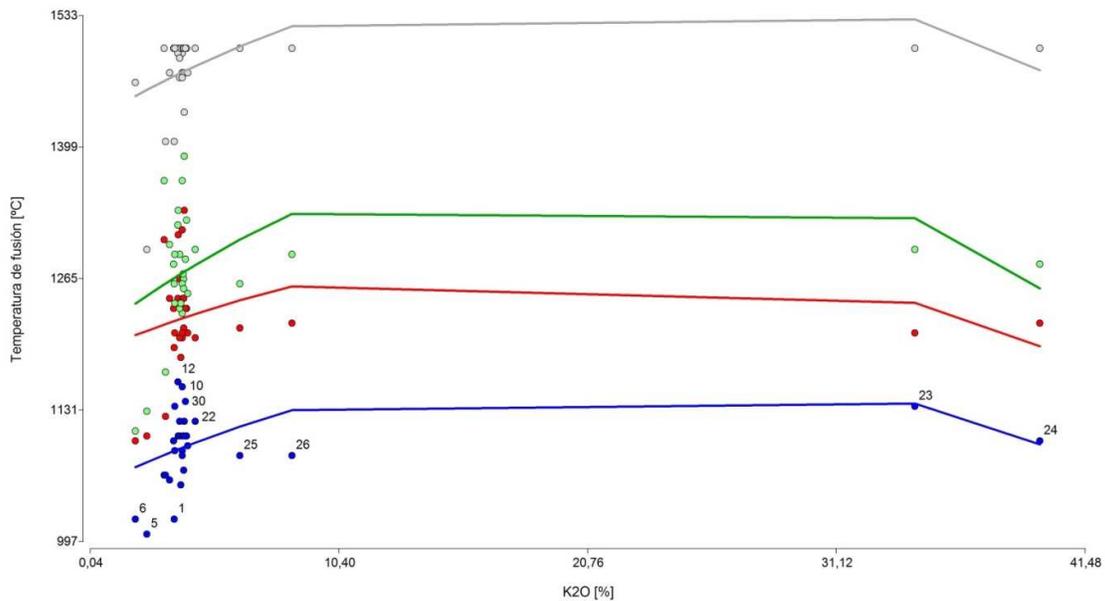


Figura 37. Sensibilidad del %K₂O en la fusibilidad de las cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.

La Figura 38 muestra para AR que la temperatura DT se mantuvo constante (promedio 974 [°C]) en todo el rango evaluado (1,92% a 39,60% K₂O). La ST aumentó desde 1.120 [°C] (1,92 %K₂O) hasta 1.161 [°C] (8,44 %K₂O), luego disminuyó levemente la temperatura hasta 1.140 [°C] con 34,40% K₂O; y a partir de allí disminuyó finalmente hasta 1.100 [°C] para la concentración de 39,60 %K₂O. La temperatura HT se incrementó desde 1.170 [°C] (1,92 %K₂O) hasta 1.200 [°C] (8,44 %K₂O) aproximadamente, luego descendió con el incremento del %K₂O hasta 1.170 [°C], a partir de la cual se observó un marcado descenso hasta los 1.140 [°C] con 39,60% K₂O. La FT experimentó un leve aumento de la temperatura desde 1.270 [°C] para 1,92% K₂O hasta 1.291 [°C] con 39,60% K₂O.

Se observó que las temperaturas de fusibilidad de las cenizas en AR resultaron menores a las encontradas en AO con el aumento del %K₂O en el rango analizado. Además, se observó que las variaciones de las mencionadas temperaturas también resultaron menores en AR respecto a la AO, por lo que el incremento del %K₂O no tendría importancia práctica en la fusibilidad de las cenizas cuando se trabaje en hogares en condiciones reductoras. No obstante, el rango de fusibilidad (FT – DT) resultó 103 [°C] menor en AR (promedio 334 [°C]) en relación a la AO (promedio 437 [°C]).

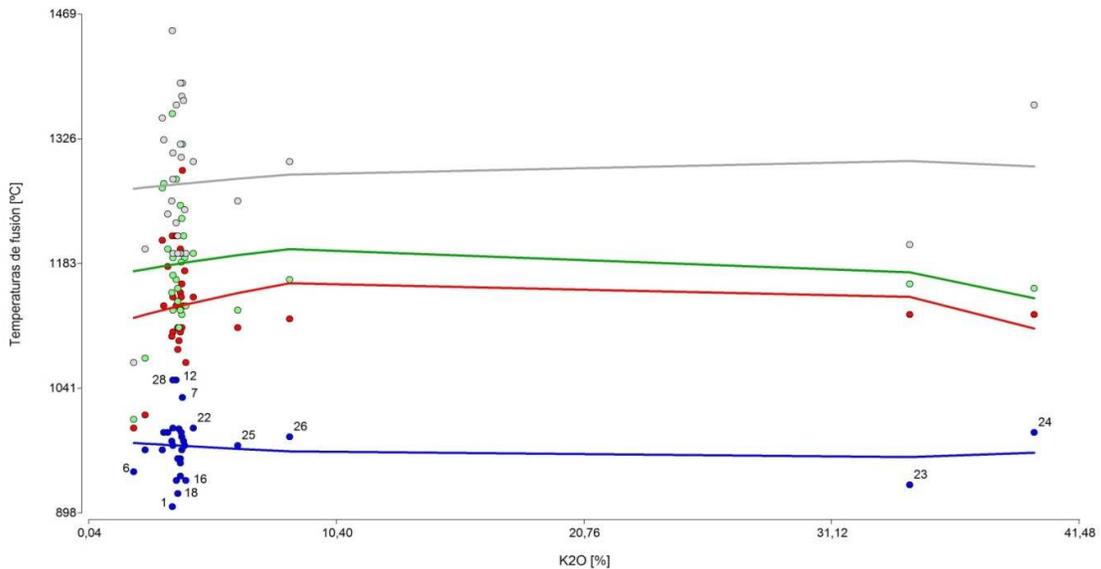


Figura 38. Sensibilidad del %K₂O en la fusibilidad de las cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.

4.12.9 SENSIBILIDAD DEL %P₂O₅ SOBRE LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS.

La Figura 39 muestra para AO un incremento de las temperaturas de fusibilidad. La DT registró un aumento desde 1.050 [°C] (0,91 %P₂O₅) hasta 1.102 [°C] (3,33 %P₂O₅), luego se mantuvo constante hasta una concentración de 4,99 %P₂O₅ y posteriormente descendió hasta 1.082 [°C] para 6,71 %P₂O₅. La temperatura ST también registró un incremento con el aumento de la concentración de óxido, desde 1.143 [°C] (1,87% P₂O₅) hasta 1.247 [°C] (4,99% P₂O₅) y posteriormente descendió hasta 1.210 [°C] para 6,71% P₂O₅. Con respecto a HT el crecimiento fue desde 1.199 [°C] (0,91 %P₂O₅) hasta 1.301 [°C] (4,99% P₂O₅), luego descendió levemente hasta 1.280 [°C] (6,71 %P₂O₅). Finalmente FT mantuvo un crecimiento constante desde 1.448 [°C] (0,91 %P₂O₅) hasta 1.500 [°C] (6,71% P₂O₅).

El comportamiento de las temperaturas en AR con el incremento de %P₂O₅ se observa en la Figura 40. La temperatura DT se mantuvo prácticamente constante (promedio 974 [°C]). La temperatura ST se incrementó desde 1.061 [°C] (0,91 %P₂O₅) hasta 1.142 [°C] (3,11 %P₂O₅), luego se mantuvo constante hasta alcanzar una concentración de 4,99 %P₂O₅, a partir de ahí la temperatura disminuyó hasta 1.138 [°C] y 6,71 %P₂O₅. La temperatura HT tuvo un comportamiento similar a ST, incrementó su temperatura desde 1.110 [°C] a 0,91 %P₂O₅ hasta 1.183 [°C] a 3,26 %P₂O₅ donde se mantuvo constante hasta 4,99 %P₂O₅, luego descendió hasta 1.138 [°C] para 6,71 %P₂O₅. Finalmente la temperatura FT aumentó desde 1.236 [°C] con 0,91 %P₂O₅ hasta 1.289 [°C] para una concentración de 6,71 %P₂O₅.

En general se observó que el incremento de %P₂O₅ en el rango de concentraciones evaluado (0,91% a 6,71%), produjo un leve aumento de las temperaturas de fusión tanto en AO como en AR. En esta última atmósfera el incremento resultó menor y más constante en la temperatura DT como puede observarse en las Figuras 39 y 40.

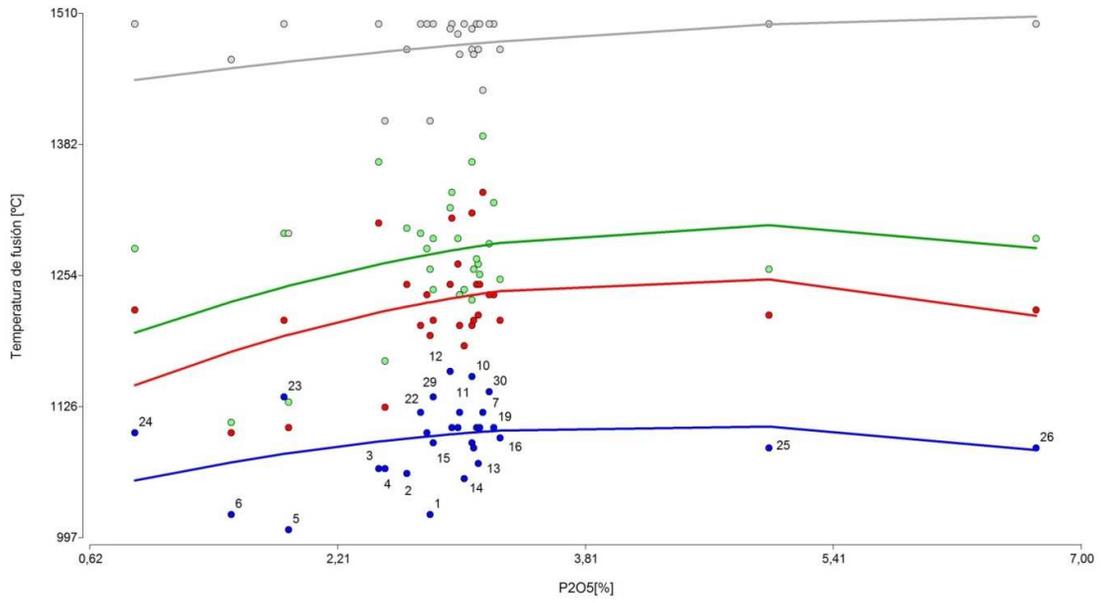


Figura 39. Sensibilidad del %P₂O₅ en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.

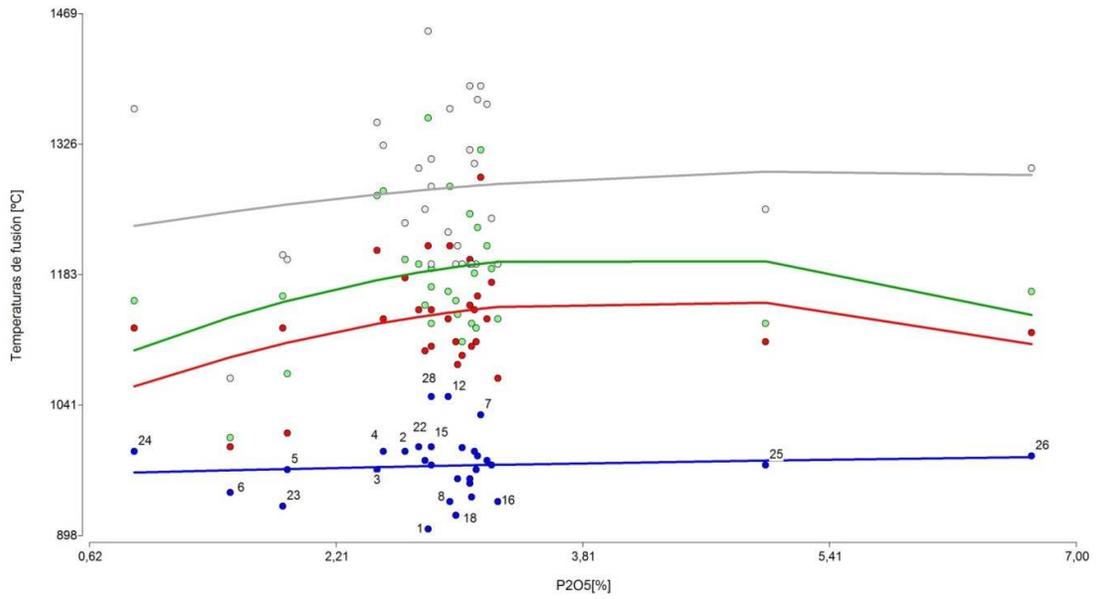


Figura 40. Sensibilidad del %P₂O₅ en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.

4.12.10 SENSIBILIDAD DEL %SO₃ SOBRE LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS.

La Figura 41 muestra para AO un incremento constante para DT desde 1.070 [°C] a 0,88 %SO₃ hasta 1.155 [°C] a 4,03 %SO₃. La temperatura ST se incrementó desde 1.162 [°C] (0,88 %SO₃) hasta 1.254 [°C] (2,72 %SO₃), luego descendió a 1.235 [°C] cuando la concentración aumento hasta 4,03 %SO₃. Con respecto a HT la temperatura ascendió desde 1.210 [°C] (0,88 %SO₃) hasta 1.304 [°C] (2,72 %SO₃) y luego descendió hasta 1.285 [°C] (4,03 %SO₃). La temperatura FT registró un incremento constante desde 1.455 [°C] con 0,88 %SO₃ hasta alcanzar los 1.500 [°C].

En la Figura 42 puede verse el estudio para la AR, se determinó que con el aumento de la concentración de %SO₃ entre 0,88% a 4,03%, la temperatura DT disminuyó levemente desde 987 [°C] hasta 965 [°C] para 2,72% SO₃, luego ascendió hasta alcanzar finalmente los 987 [°C]. La temperatura ST registró un incremento desde 1.068 [°C] hasta 1.165 [°C] (2,72% SO₃), luego disminuyó con el aumento de la concentración del óxido hasta 1.130 [°C]. La HT tuvo un comportamiento similar, aumentó desde 1.107 [°C] con 0,88% SO₃, hasta 1.219 [°C] para 2,72% SO₃, luego acusó una leve disminución de la temperatura hasta 1.196 [°C] para 4,03% SO₃. Finalmente la FT aumentó desde 1.219 [°C] hasta 1.363 [°C] en el rango de incremento del óxido.

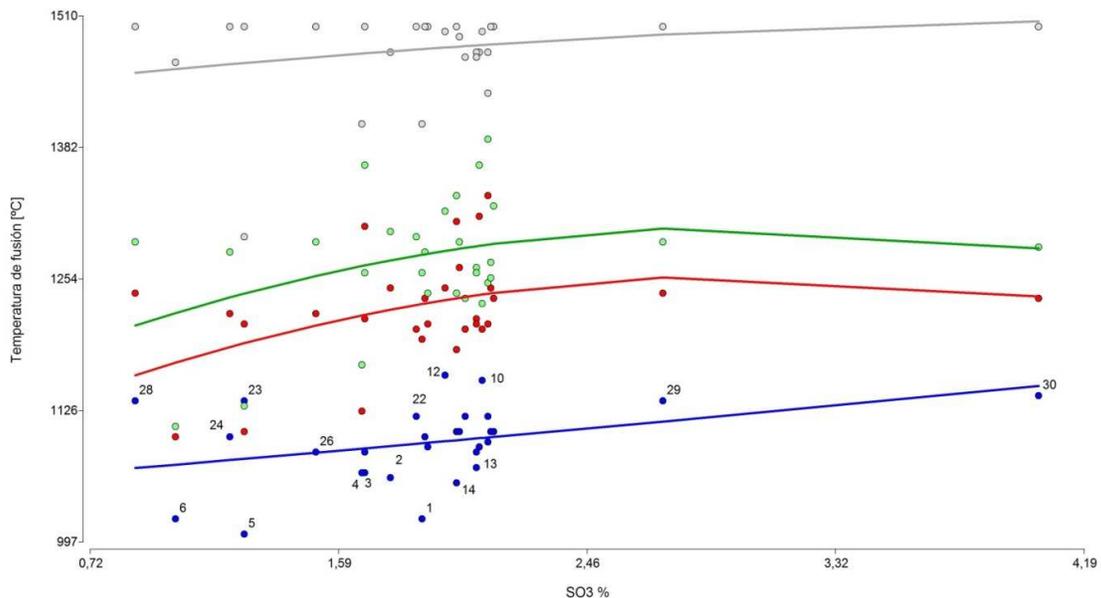


Figura 41. Sensibilidad del %SO₃ en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.

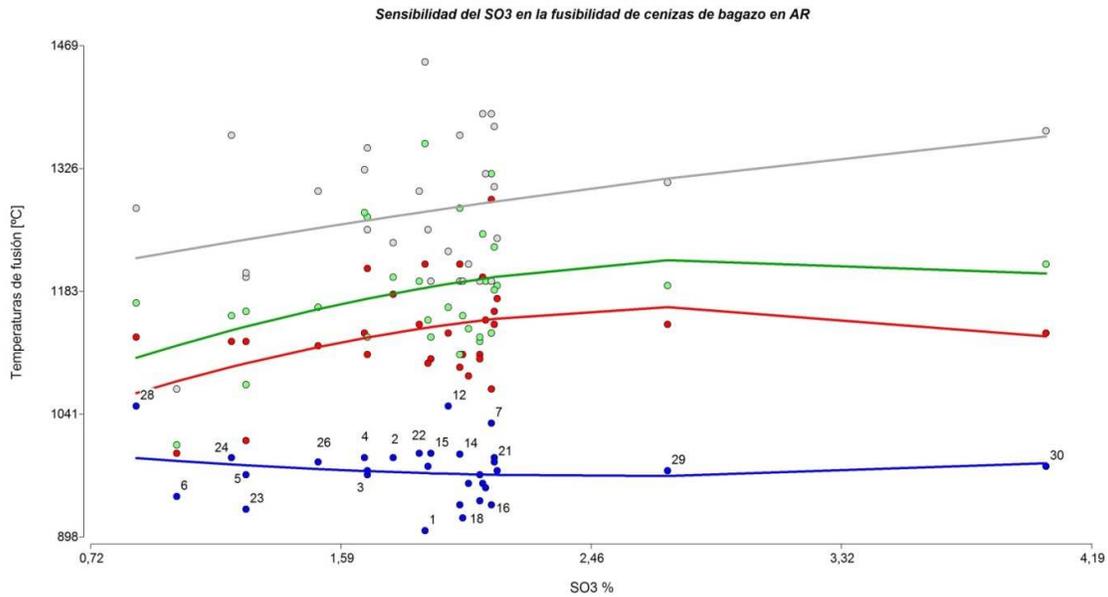


Figura 42. Sensibilidad del %SO₃ en la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.

4.13 SENSIBILIDAD DEL ÍNDICE “AI” SOBRE LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS

En la Figura 43 puede verse los resultados del estudio de la sensibilidad del índice “AI” sobre la fusibilidad de las cenizas de bagazo realizados en AO. Se puede observar que a medida que aumentó “AI” (mayor tendencia al ensuciamiento), desde 7 a 14 [kg/GJ] la temperatura DT creció desde 1.051 [°C] hasta 1.126 [°C], a partir de este punto comenzó a disminuir con el aumento del índice hasta alcanzar el límite máximo evaluado (22 [kg/GJ]), donde se registró una temperatura de 1.050 [°C].

De la experiencia se observó que la temperatura ST aumentó desde 1.142 [°C] para 7 [kg/GJ] hasta 1.297 [°C] y 22 [kg/GJ]. La HT también aumentó desde 1.188 [°C] hasta 1.352 [°C] al igual que la temperatura FT que lo hizo desde 1.441 [°C] hasta 1.492 [°C] para 14 [kg/GJ] y se mantuvo constante con el incremento del índice.

De igual manera en la Figura 44, se observa la sensibilidad del índice “AI” para las muestras de cenizas sintéticas ensayadas en AR. En este caso la DT presentó se mantuvo relativamente constante en todo el rango evaluado (promedio 974 [°C]). La ST aumentó desde 1.050 [°C] hasta 1.202 [°C] y la HT lo hizo de igual manera desde 1.092 [°C] hasta 1.249 [°C]. Con respecto a la temperatura FT, el incremento de la misma fue desde 1.205 [°C] hasta 1.286 [°C].

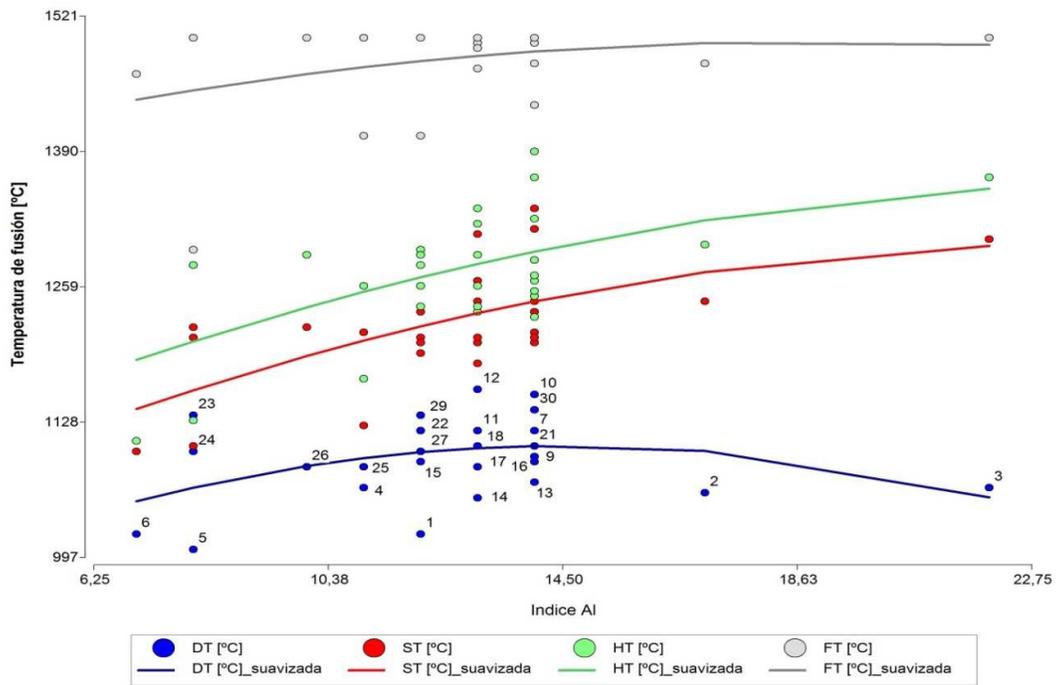


Figura 43. Sensibilidad del índice AI sobre la fusibilidad de cenizas sintéticas en AO. Elaboración propia.

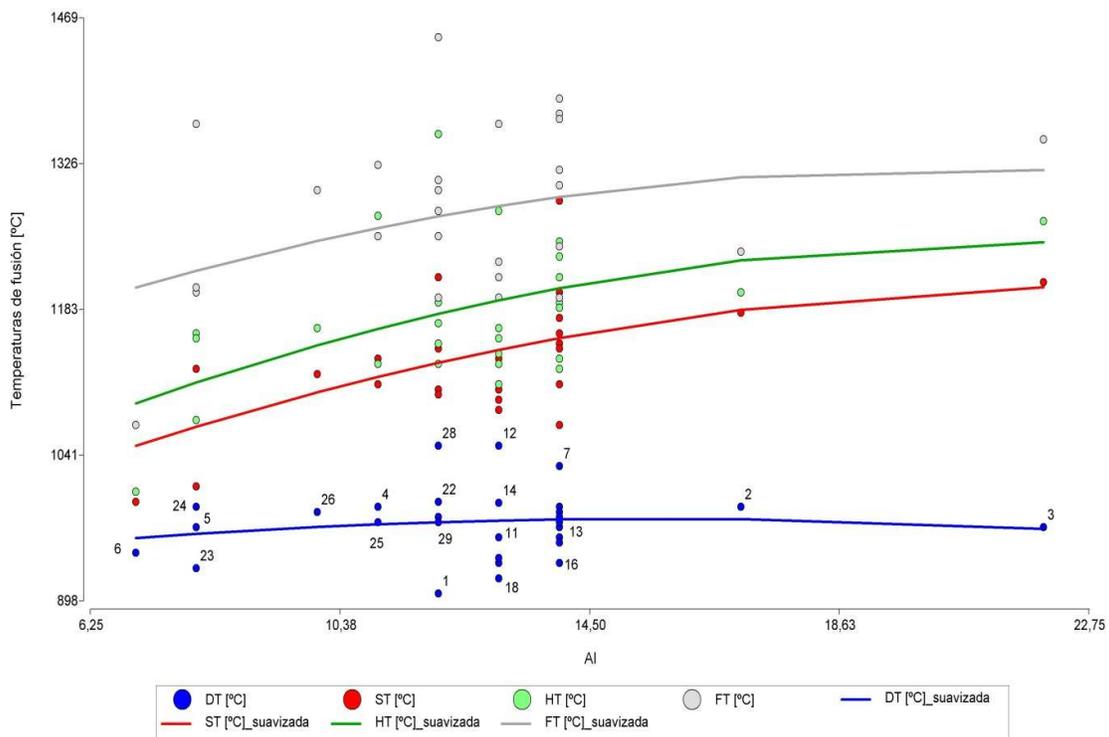


Figura 44. Sensibilidad del índice AI sobre la fusibilidad de cenizas sintéticas en AR. Elaboración propia.

Analizando las Figuras 43 y 44, se observó que trabajando en AR el rango de variación de la fusibilidad de las cenizas resultó más acotado, obteniéndose temperaturas más bajas en

relación a la AO. Asimismo, es importante destacar que se observó mayor influencia de la AO sobre la temperatura DT con el aumento del índice "AI", mientras que en AR la DT se mantuvo prácticamente constante.

4.14 INCIDENCIA DE LOS ÓXIDOS MAYORITARIOS SOBRE A LA FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS

En la Figura 45 puede verse el gráfico "biplot" resultante del análisis de componentes principales en el cual se observa una correlación negativa del %SiO₂ respecto a DT en AO, mientras que existe un aporte positivo de Na₂O sobre esta temperatura. Asimismo, se observa que la temperatura DT tiende a ser independiente de la concentración de Fe₂O₃ y del Al₂O₃. Por otro lado, la concentración de K₂O en el rango evaluado no presentó influencia sobre DT.

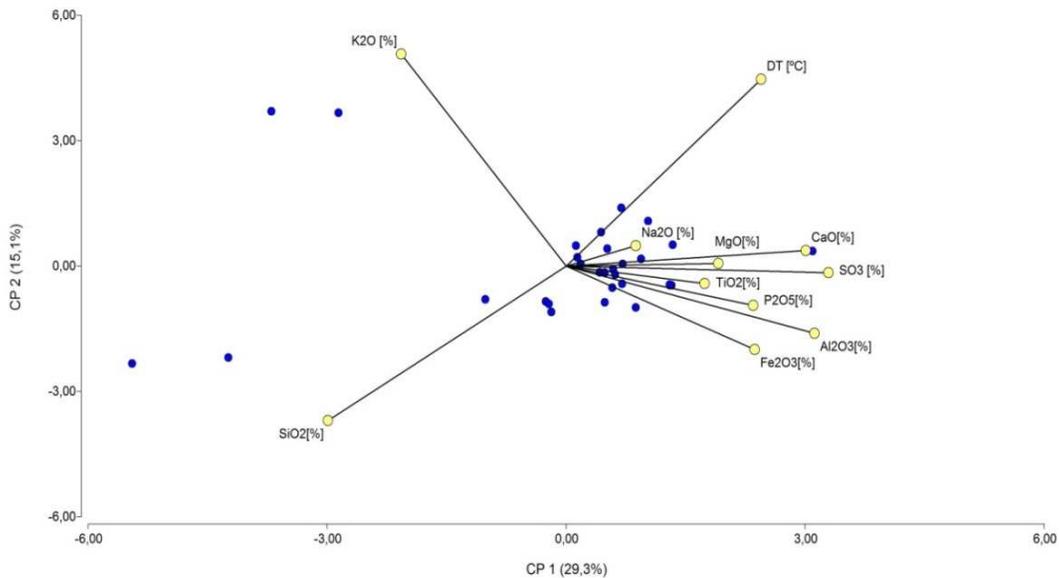


Figura 45. Incidencia de los óxidos mayoritarios sobre DT para cenizas sintéticas trabajando en AO. Elaboración propia.

En la Figura 46 puede verse el análisis "biplot" realizado para AR. Se observa una independencia del K₂O, CaO, SO₃ y Ti₂O sobre DT. El resto de los elementos no aportan una correlación significativa, salvo el MgO que posee una fuerte asociación positiva sobre DT.

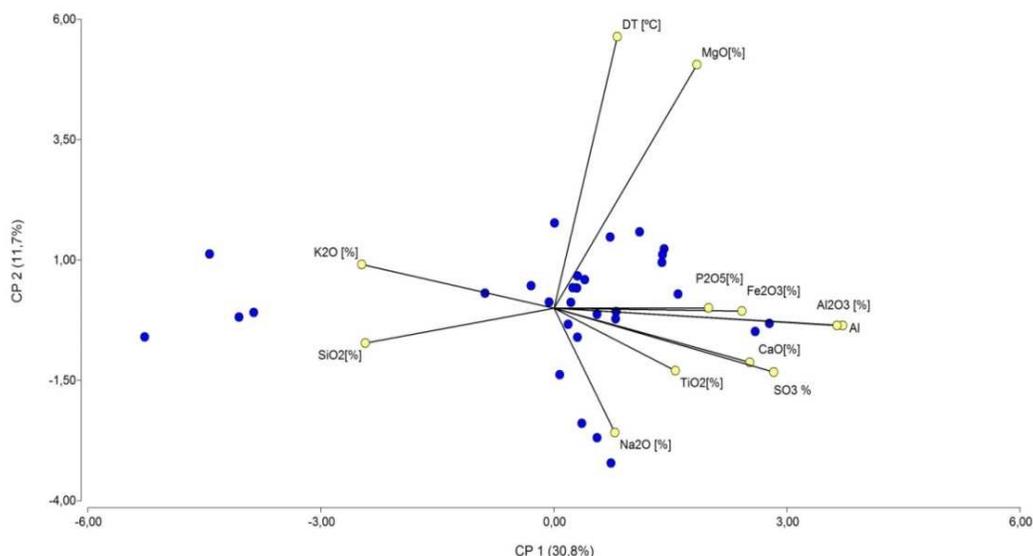


Figura 46. Incidencia de los óxidos mayoritarios sobre DT para cenizas sintéticas trabajando en AR. Elaboración propia.

4.15 RESULTADO DE LA FORMULACIÓN DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS DE BAGAZO Y DE RAC DE CAÑA DE AZÚCAR.

En Tabla 7.27 y 7.28 del Anexo pueden verse los resultados de las formulaciones de las cenizas sintéticas de bagazo y de RAC de caña de azúcar de Tucumán – Argentina. Los valores mostrados representan las cantidades en peso de los óxidos comerciales puros que fueron considerados en las elaboraciones de las correspondientes muestras. Las magnitudes se encuentran expresadas en gramos de óxido.

4.16 FUSIBILIDAD DE CENIZAS LAS SINTÉTICAS DE BAGAZO Y RAC EN FUNCIÓN DE SUS COMPONENTES ÁCIDOS Y BÁSICOS.

A continuación se muestran los resultados del análisis de la fusibilidad de las cenizas sintéticas de bagazo y de RAC de caña de azúcar, según las proporciones de CB indicados en las mencionadas Tabla 7.27 y 7.28.

En Tablas 4.9 y 4.10 se observan los resultados normalizados de la fusibilidad de las muestras de cenizas sintéticas de bagazo, ensayadas en AO y AR respectivamente. Así mismo, se indican los promedios de las temperaturas características y el rango de variación de cada serie. De igual manera las Tablas 4.11 y 4.12, muestran los resultados de los análisis de fusibilidad en AO y AR, respectivamente. Estos resultados corresponden a las muestras de cenizas sintéticas de RAC elaboradas a partir de las relaciones de óxidos comerciales encontrados para este estudio.

Tabla 4.9. Resultados del análisis de la fusibilidad en AO de las cenizas sintéticas de bagazo seleccionada de Tucumán - Argentina. Elaboración propia.

Bagazo - Atmósfera Oxidante					
Muestras	%CB	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]
M1 (1,0 CA)	0,0	1175	1310	1345	1500
M2 (0,9 CA+0,1CB)	1,7	1090	1370	1390	1490
M3 (0,8 CA+0,2CB)	3,7	1070	1370	1395	1480
M4 (0,7 CA+0,3CB)	6,2	1035	1370	1399	1490
M5 (0,6 CA+0,4CB)	9,3	1035	1325	1405	1490
M6 (0,5 CA+0,5CB)	13,4	1070	1360	1390	1490
M7 (0,4 CA+0,6CB)	18,8	1045	1330	1380	1500
M8 (0,3 CA+0,7CB)	26,5	1050	1360	1385	1500
M9 (0,2 CA+0,8CB)	38,2	1055	1315	1360	1480
M10 (0,1 CA+0,9CB)	58,1	1055	1310	1375	1480
M11 (1,0CB)	100,0	1080	1310	1375	1480
Promedio		1069	1339	1382	1489
Máx.		1175	1370	1405	1500
Mín.		1035	1310	1345	1480

Tabla 4.10. Resultados del análisis de la fusibilidad en AR de las cenizas sintéticas de bagazo seleccionada de Tucumán - Argentina. Elaboración propia.

Bagazo - Atmósfera Reductora					
Muestras	%CB	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]
M1 (1,0 CA)	0,0	1085	1290	1330	1400
M2 (0,9 CA+0,1CB)	1,7	1020	1290	1325	1400
M3 (0,8 CA+0,2CB)	3,7	985	1285	1325	1480
M4 (0,7 CA+0,3CB)	6,2	980	1235	1285	1400
M5 (0,6 CA+0,4CB)	9,3	960	1240	1285	1400
M6 (0,5 CA+0,5CB)	13,4	940	1235	1325	1400
M7 (0,4 CA+0,6CB)	18,8	930	1330	1355	1420
M8 (0,3 CA+0,7CB)	26,5	960	1341	1365	1480
M9 (0,2 CA+0,8CB)	38,2	940	1332	1385	1450
M10 (0,1 CA+0,9CB)	58,1	975	1335	1395	1450
M11 (1,0CB)	100,0	975	1350	1395	1450
Promedio		977	1297	1343	1430
Máx.		1085	1350	1395	1480
Mín.		930	1235	1285	1400

Tabla 4.11. Resultados del análisis de la fusibilidad en AO de las cenizas sintéticas de RAC seleccionados de Tucumán - Argentina. Elaboración propia.

RAC - Atmósfera Oxidante					
Muestras	%CB	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]
M1 (1,0 CA)	0,0	1227	1271	1315	1494
M2 (0,9 CA+0,1CB)	5,0	1138	1265	1360	1484
M3 (0,8 CA+0,2CB)	10,6	1119	1234	1365	1474
M4 (0,7 CA+0,3CB)	16,9	1057	1259	1369	1484
M5 (0,6 CA+0,4CB)	24,0	1097	1219	1375	1484
M6 (0,5 CA+0,5CB)	32,2	1105	1203	1360	1484
M7 (0,4 CA+0,6CB)	41,6	1076	1272	1350	1494
M8 (0,3 CA+0,7CB)	52,5	1084	1263	1355	1494
M9 (0,2 CA+0,8CB)	65,5	1098	1189	1330	1474
M10 (0,1 CA+0,9CB)	81,0	1110	1215	1345	1474
M11 (1,0CB)	100,0	1137	1271	1345	1474
Promedio		1113	1242	1352	1483
Máx.		1227	1272	1375	1494
Mín.		1076	1189	1315	1474

Tabla 4.12. Resultados del análisis de la fusibilidad en AR de las cenizas sintéticas de RAC seleccionados de Tucumán - Argentina. Elaboración propia.

RAC - Atmósfera Reductora					
Muestras	%CB	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]
M1 (1,0 CA)	0,0	1045	1160	1315	1500
M2 (0,9 CA+0,1CB)	5,0	1005	1105	1140	1500
M3 (0,8 CA+0,2CB)	10,6	971	1110	1235	1500
M4 (0,7 CA+0,3CB)	16,9	948	1135	1290	1500
M5 (0,6 CA+0,4CB)	24,0	963	1109	1360	1500
M6 (0,5 CA+0,5CB)	32,2	974	1114	1245	1500
M7 (0,4 CA+0,6CB)	41,6	951	1085	1285	1385
M8 (0,3 CA+0,7CB)	52,5	986	1165	1175	1385
M9 (0,2 CA+0,8CB)	65,5	961	1152	1215	1395
M10 (0,1 CA+0,9CB)	81,0	980	1123	1285	1455
M11 (1,0CB)	100,0	1020	1160	1340	1500
Promedio		982	1129	1262	1465
Máx.		1045	1165	1360	1500
Mín.		948	1085	1175	1385

4.16.1 FUSIBILIDAD DE CENIZAS SINTÉTICAS DE BAGAZO EN ATMÓSFERA OXIDANTE.

La Figura 47 muestra los resultados para este estudio del análisis de la fusibilidad de las cenizas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán, Argentina, logrados en AO en relación a sus CA y CB. En la experiencia se observó que la temperatura DT disminuyó desde 1.095 [°C] para la mezcla de ceniza sintética realizada con 100% de CA (1,0CA) hasta aproximadamente 1.035 [°C] para 50% CA y 50% CB (0,5CA+0,5CB), luego se observó un incremento en la temperatura con el aumento de %CB hasta alcanzar 1.080 [°C] para 100% CB (1,0CB).

Con respecto a ST, se observó que a partir de la mezcla de 1,0 CA la temperatura promedio manifestó una disminución con el aumento de %CB desde 1.350 [°C] hasta 1.310 [°C] para 100% CB (1,0 CB). La temperatura HT registró una sensible disminución con el aumento de %CB desde 1.390 [°C] (1,0CA) hasta 1.375 [°C] (1,0 CB). La FT también registró una sensible disminución de la temperatura con el aumento de %CB desde 1.500 [°C] (1,0 CA) hasta 1.480 [°C] (1,0 CB).

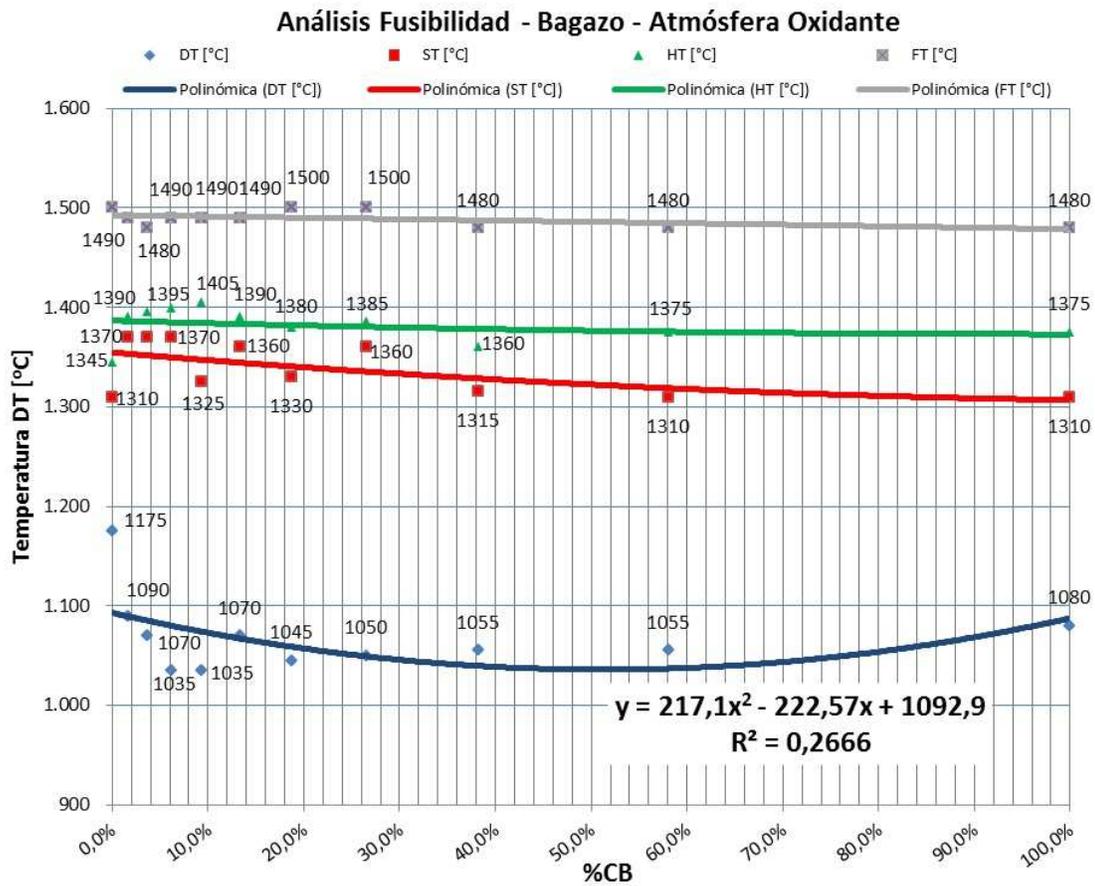


Figura 47. Fusibilidad de cenizas sintéticas de bagazo de Tucumán – Argentina en función de %CB trabajando en AO. Elaboración propia.

Además, en la Figura 47 se puede observar que la mayor distribución de puntos se encuentra a la izquierda del gráfico para bajas concentraciones de %CB, ya que, como se mencionó anteriormente, el bagazo de nuestra región presentó característica ácida (promedio %CA = 87,67%).

La regresión encontrada para DT que mejor se ajustó a la dispersión de los valores obtenidos del ensayo en AO, fue una regresión del tipo cuadrática ($R^2 = 0,2666$) y se encuentra representada por la Ec. 4.1.

$$DT [^{\circ}C] = 217,1.(\%CB)^2 - 222,57.(\%CB) + 1092,9 \quad \text{Ec. 4.1}$$

En la Tabla 4.13 pueden verse las diferencias de las temperaturas normalizadas para la fusibilidad del bagazo trabajando en AO en función de las diferentes cantidades de CB [%] en la mezcla sintética. Es importante destacar que la mayor amplitud de fusibilidad (FT - DT) se encontró para un rango de CB [%] entre 30% a 60% con un valor máximo de 420 [°C].

Tabla 4.13. Diferencias de temperaturas de fusibilidad de cenizas sintéticas de bagazo de Tucumán, trabajando en AO en función de CB [%]. Elaboración propia.

Muestras	CB [%]	ST-DT [°C]	HT-ST [°C]	FT-DT [°C]
M1 (1,0 CA)	0,0	262	32	400
M2 (0,9 CA+0,1CB)	1,7	264	33	403
M3 (0,8 CA+0,2CB)	3,7	267	34	407
M4 (0,7 CA+0,3CB)	6,2	270	35	412
M5 (0,6 CA+0,4CB)	9,3	273	37	417
M6 (0,5 CA+0,5CB)	13,4	277	39	424
M7 (0,4 CA+0,6CB)	18,8	282	42	431
M8 (0,3 CA+0,7CB)	26,5	286	45	440
M9 (0,2 CA+0,8CB)	38,2	289	50	448
M10 (0,1 CA+0,9CB)	58,1	282	57	448
M11 (1,0CB)	100,0	219	66	391
Promedio		270	43	420
Máx.		289	66	448
Mín.		219	32	391

4.16.2 FUSIBILIDAD DE CENIZAS SINTÉTICAS DE BAGAZO EN ATMOSFERA REDUCTORA.

La Figura 48 muestra los resultados de la fusibilidad de las cenizas de bagazo de Tucumán ensayadas en AR. Se observó que la DT experimentó una disminución con el incremento de

%CB desde 1.020 [°C] (1,0 CA) hasta 935 [°C] para 50% CB (0,5CA + 0,5CB), luego registró un aumento de la temperatura hasta 985 [°C] para 100% CB (1,0 CB).

La temperatura ST tuvo un incremento gradual con el aumento de CB [%] desde 1.290 [°C] para 100%CA (1,0 CA), hasta 1.350 [°C] para 100%CB (1,0 CB). La HT tuvo un comportamiento similar, la misma creció desde 1.330 [°C] hasta 1.395 [°C] para 60% de CB aproximadamente (0,4CA + 0,6CB). Con respecto a la temperatura FT, la misma aumento desde 1.400 [°C] (1,0CA) hasta 1.459 [°C] con 68% de CB, luego descendió finalmente hasta 1.450 [°C] (1,0 CB).

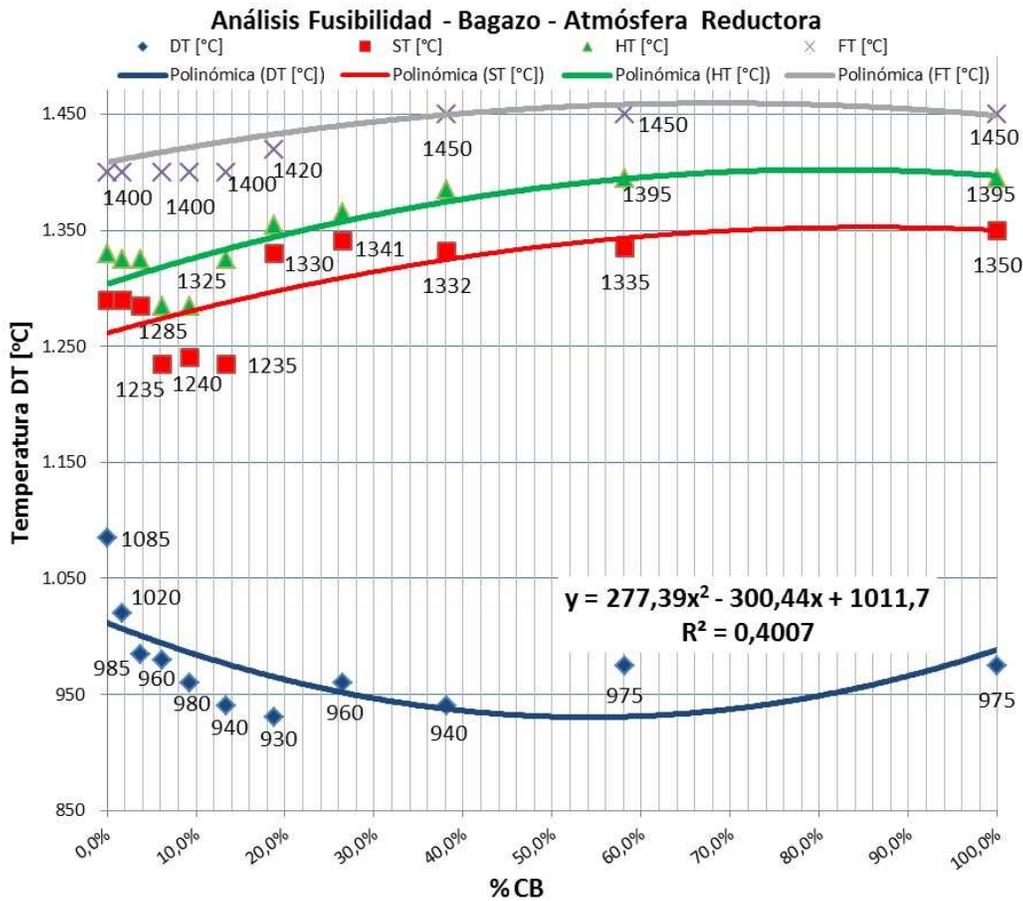


Figura 48. Fusibilidad de cenizas sintéticas de bagazo de Tucumán – Argentina en función de %CB trabajando en AR. Elaboración propia.

En este caso la regresión encontrada para DT que mejor se ajustó a la dispersión de los valores obtenidos del ensayo en AR, fue también del tipo cuadrática ($R^2 = 0,4007$) según la Ec. 4.2.

$$DT [^{\circ}C] = 277,39.(%CB)^2 - 300,44.(%CB) + 1011,7 \quad \text{Ec. 4.2}$$

En Tabla 4.14 pueden verse las diferencias de las temperaturas normalizadas de fusibilidad del bagazo trabajando en AR en función de %CB. En este caso la mayor amplitud de

fusibilidad (FT-DT) se encontró entre 30% y 60% de %CB con una amplitud promedio de 510 [°C] aproximadamente.

Tabla 4.14. Diferencias de temperaturas de fusibilidad de cenizas sintéticas de bagazo de Tucumán, trabajando en AR en función de %CB. Elaboración propia.

Atmósfera Reductora				
Muestras	%CB	ST-DT	HT-ST	FT-DT
M1 (1,0 CA)	0,0	250	42	397
M2 (0,9 CA+0,1CB)	1,7	258	43	404
M3 (0,8 CA+0,2CB)	3,7	268	43	413
M4 (0,7 CA+0,3CB)	6,2	280	44	423
M5 (0,6 CA+0,4CB)	9,3	294	45	436
M6 (0,5 CA+0,5CB)	13,4	311	46	450
M7 (0,4 CA+0,6CB)	18,8	332	47	468
M8 (0,3 CA+0,7CB)	26,5	358	48	489
M9 (0,2 CA+0,8CB)	38,2	387	50	512
M10 (0,1 CA+0,9CB)	58,1	413	51	528
M11 (1,0CB)	100,0	362	47	460
Promedio		319	46	453
Máx.		413	51	528
Mín.		250	42	397

Este estudio muestra como el bagazo de caña de azúcar presenta en AR una mayor amplitud entre sus límites de fusibilidad (promedio FT-DT = 453 [°C]), respecto a la AO (promedio FT-DT = 420 [°C]). Esto indicaría que en condiciones atmosféricas reductoras las cenizas de bagazo presentarían una tasa de ensuciamiento más lenta según lo indicado por Vamvuka y Zografos, 2004. No obstante, es interesante observar que la variación de las diferencias de temperaturas (ST-DT) resultaron menores en AO respecto a la AR (270 [°C] vs 319 [°C], respectivamente), lo que podría provocar en estas condiciones una menor resistencia al ablandamiento de las cenizas.

4.17 FUSIBILIDAD DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS DE RAC EN FUNCIÓN DE COMPONENTES ÁCIDOS Y BÁSICOS

A continuación se muestran los resultados del estudio del análisis de la fusibilidad de las cenizas de RAC sintéticas de Tucumán, Argentina, logrados para AO y AR en relación a los %CB en cenizas.

Al igual que en el caso anterior se indican las regresiones que mejor se ajustaron a los datos obtenidos de los ensayos realizados de fusibilidad de las cenizas para esta biomasa. Se indican, además, las diferencias de temperaturas de fusibilidad para este estudio.

4.17.1 FUSIBILIDAD DE CENIZAS SINTÉTICAS DE RAC EN ATMÓSFERA OXIDANTE

En la Figura 49 se observan los resultados del análisis de la fusibilidad de las cenizas sintéticas elaboradas con los óxidos comerciales puros manteniendo las relaciones de los mismos pre-existentes en el RAC de caña de azúcar de Tucumán.

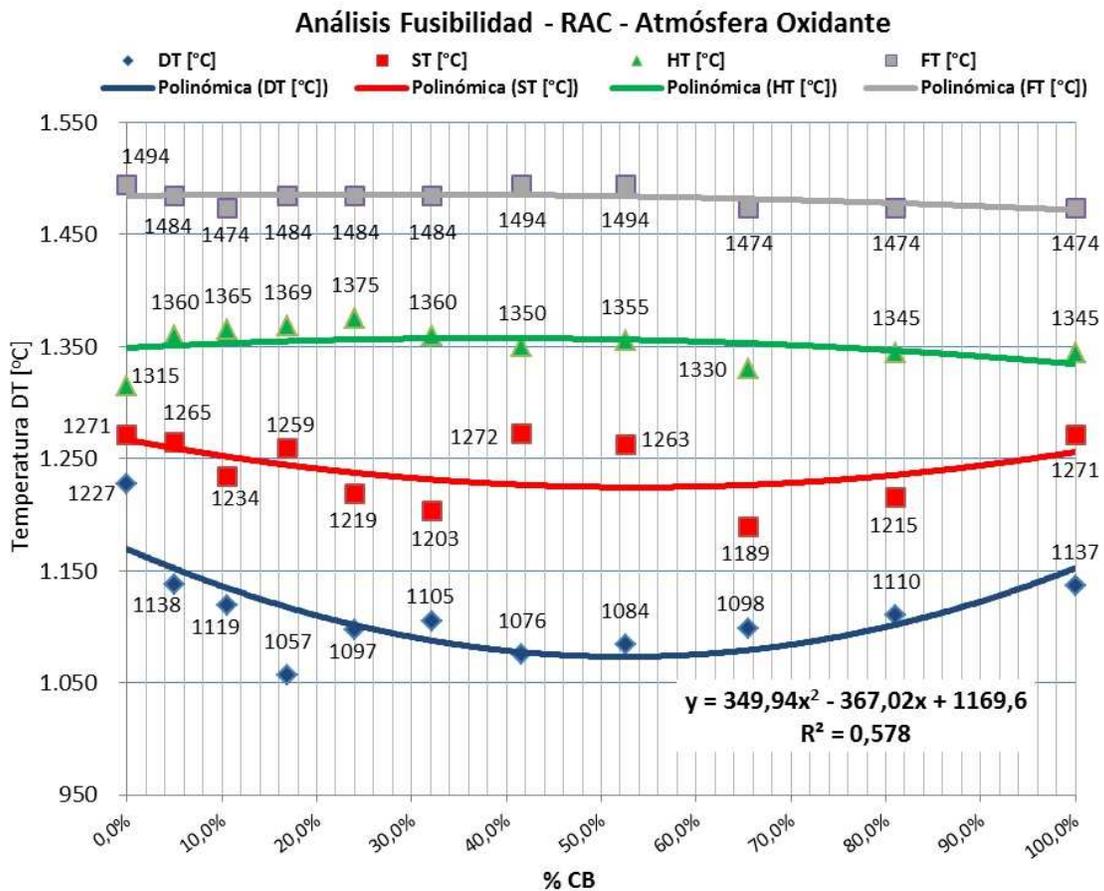


Figura 49. Fusibilidad de cenizas sintéticas de RAC de Tucumán – Argentina en función de %CB trabajando en AO. Elaboración propia.

En la experiencia se observó que DT experimentó una disminución desde 1.170 [°C] para 100% de CA hasta aproximadamente 1.074 [°C] para 50% de CB, luego se registró un aumento de la temperatura con el incremento de %CB hasta 1.152 [°C] con 100% de CB. La temperatura ST registró un leve descenso desde 1.271 [°C] para 100% de CA hasta alcanzar 1.203 [°C] para una mezcla con 50% de CB (0,5CA+0,5CB). La HT aumentó

levemente su temperatura con el incremento de CB [%], desde 1.315 [°C] hasta 1.375 [°C] para %CB entre 40% y 60%. Luego disminuyó paulatinamente hasta alcanzar 1.345 [°C] con 100% de CB. Con respecto a la temperatura FT, la misma se mantuvo prácticamente constante en todo el rango de evaluado (promedio 1.483 [°C]).

Para este caso, la regresión encontrada para DT que mejor se ajustó a la dispersión de los valores obtenidos del ensayo en AO fue también del tipo cuadrática ($R^2 = 0,578$) y se encuentra representada por la Ec. 4.3.

$$DT [^{\circ}C] = 349,94.(\%CB)^2 - 367,02.(\%CB) + 1169,6 \quad \text{Ec. 4.3}$$

En la Tabla 4.15 pueden verse las diferencias de las temperaturas de fusibilidad para el RAC de caña de azúcar de este estudio trabajando en AO en función de los contenidos totales de CA y CB considerados. En este caso la mayor amplitud de fusibilidad (FT-DT) se obtuvo entre el 50% y el 80% de CB con una amplitud promedio de 405 [°C].

Tabla 4.15. Diferencias de temperaturas de fusibilidad para cenizas sintéticas de RAC de Tucumán, trabajando en AO en función de %CB. Elaboración propia.

Atmósfera oxidante				
Muestras	%CB	ST-DT	HT-ST	FT-DT
M1 (1,0 CA)	0,0	97	82	315
M2 (0,9 CA+0,1CB)	5,0	107	92	333
M3 (0,8 CA+0,2CB)	10,6	117	101	351
M4 (0,7 CA+0,3CB)	16,9	127	110	368
M5 (0,6 CA+0,4CB)	24,0	136	119	384
M6 (0,5 CA+0,5CB)	32,2	144	126	398
M7 (0,4 CA+0,6CB)	41,6	149	131	408
M8 (0,3 CA+0,7CB)	52,5	151	132	411
M9 (0,2 CA+0,8CB)	65,5	147	126	402
M10 (0,1 CA+0,9CB)	81,0	134	111	376
M11 (1,0CB)	100,0	104	78	319
Promedio		128	110	370
Máx.		151	132	411
Mín.		97	78	315

4.17.2 FUSIBILIDAD DE CENIZAS SINTÉTICAS DE RAC EN ATMÓSFERA REDUCTORA.

En la Figura 50 se observan los resultados del análisis de la fusibilidad de las cenizas sintéticas de RAC de caña de azúcar de Tucumán. En esta experiencia se observó que DT disminuyó desde 1.045 [°C] con 100% de CA [%] hasta aproximadamente 951 [°C] con 50% de CB, luego registró un aumento de la temperatura hasta 1.020 [°C] para 100% de CB.

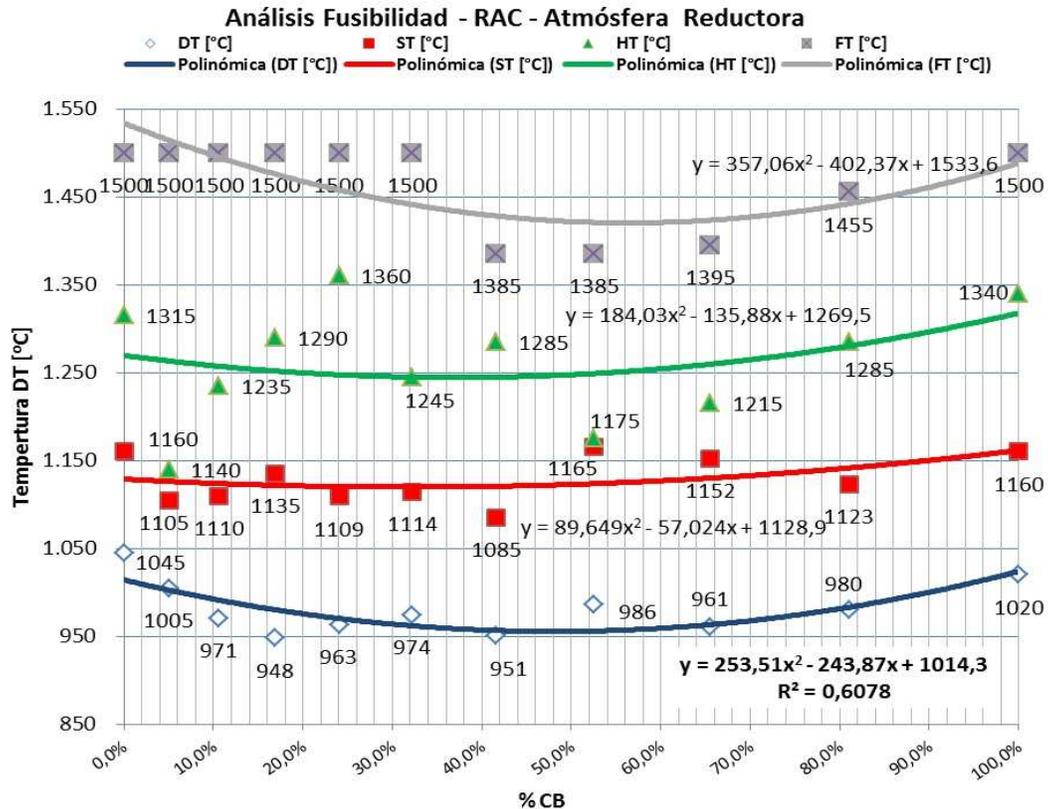


Figura 50. Fusibilidad de cenizas sintéticas de RAC de Tucumán – Argentina en función de %CB, trabajando en AR. Elaboración propia.

La temperatura ST registró una leve disminución desde 1.160 [°C] hasta alcanzar 1.109 [°C] para una mezcla entre 20% a 35% de CB, luego se observó un incremento paulatino con el aumento de %CB hasta 1.160 [°C] con 100% CB. La HT registró una ligera disminución de temperatura con el aumento de CB [%], desde 1.315 [°C] hasta 1.245 [°C] con 32% de CB, luego se mantuvo constante hasta una concentración de 44% de CB [%], para luego aumentar hasta alcanzar 1.340 [°C] con 100% de CB.

Con respecto a la temperatura FT, la misma disminuyó desde 1.500 [°C] con 100% de CA (1,0CA) hasta 1.385 [°C] para 50% de CB. Luego la temperatura aumentó hasta alcanzar nuevamente los 1.500 [°C] con 100% de CB (1,0 CB).

La regresión encontrada para DT trabajando en AR se encuentra representada mediante la Ec. 4.4, con $R^2 = 0,6078$.

$$DT [^{\circ}C] = 253,51.(\%CB)^2 - 243,87.(\%CB) + 1014,3 \quad \text{Ec. 4.4}$$

En Tabla 4.16 se observan las diferencias de las temperaturas normalizadas de fusibilidad para cenizas sintéticas de RAC de caña de azúcar, trabajando en AR en función de %CB. En este caso la mayor amplitud de fusibilidad (FT-DT) se encontró entre 20% y 30% de CB con un valor promedio en ese rango de 536 [°C].

Tabla 4.16. Diferencias de temperaturas de fusibilidad para cenizas sintéticas de RAC de Tucumán, trabajando en AR en función de %CB. Elaboración propia.

Atmósfera Reductora				
Muestras	CB [%]	ST-DT	HT-ST	FT-DT
M1 (1,0 CA)	0,0	115	141	519
M2 (0,9 CA+0,1CB)	5,0	124	137	512
M3 (0,8 CA+0,2CB)	10,6	133	133	504
M4 (0,7 CA+0,3CB)	16,9	141	130	495
M5 (0,6 CA+0,4CB)	24,0	150	127	487
M6 (0,5 CA+0,5CB)	32,2	158	125	479
M7 (0,4 CA+0,6CB)	41,6	164	124	471
M8 (0,3 CA+0,7CB)	52,5	168	125	465
M9 (0,2 CA+0,8CB)	65,5	167	129	460
M10 (0,1 CA+0,9CB)	81,0	158	139	459
M11 (1,0CB)	100,0	138	156	464
Promedio		147	133	483
Máx.		168	156	519
Mín.		115	124	459

Al igual que en el caso del bagazo, el RAC posee un mayor límites de fusibilidad cuando trabaja en AR (promedio FT-DT = 483 [°C]), en relación a la AO (promedio FT-DT = 370 [°C]), lo que indicaría un mejor comportamiento en condiciones reductoras, según Vamvuka y Zografos, 2004.

Por otro lado, la amplitud del rango de ablandamiento de las cenizas de RAC (ST-DT) también resultó mayor en AR (147 [°C]) en relación a la AO (128 [°C]), lo que implicaría un mayor riesgo de ensuciamiento en los interiores del hogar de la caldera cuando trabaje en AO.

4.18 CORRELACIÓN DE TEMPERATURAS DE FUSIÓN DE CENIZAS SINTÉTICAS DE BAGAZO Y RAC EN FUNCIÓN DE SUS COMPONENTES ÁCIDOS Y BÁSICOS

En la Figura 51 pueden verse en un mismo gráfico las correlaciones encontradas entre las temperaturas DT y la cantidad de %CB en cenizas sintéticas de bagazo de caña de azúcar, trabajando en AO y AR (ver Ec. 4.1 y 4.2, respectivamente).

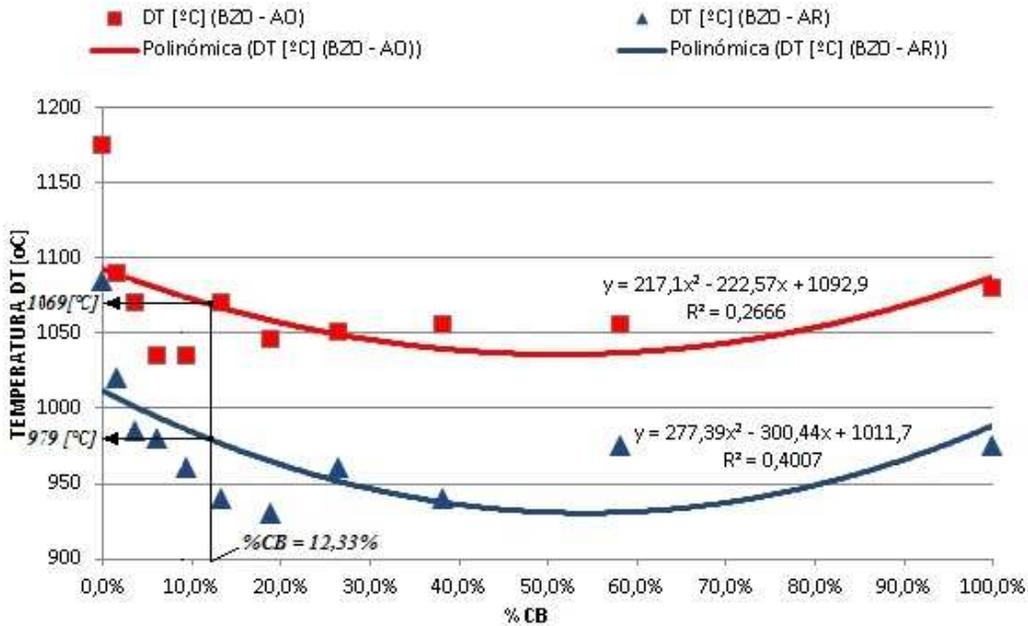


Figura 51. Variación de DT para cenizas sintéticas de bagazo de Tucumán-Argentina en función de %CB para AO y AR. Elaboración propia.

Si consideramos la concentración total promedio de %CB encontrado en las cenizas de bagazo de este estudio (12,33%), interceptando la curva correspondiente a la AR encontraríamos de manera aproximada la temperatura de inicio de fusión DT que para el bagazo en estudio sería de 979 [°C] como se indica en la figura. Asimismo, la temperatura DT trabajando en AO sería de 1069 [°C]. En este caso la amplitud máxima de fusibilidad por cambio en la atmósfera ($DT_{Bzo-AO} - DT_{Bzo-AR}$), resultaría de 90 [°C].

En la Figura 52 pueden verse las curvas de correlación para el RAC de caña de azúcar trabajando en AO y AR (ver Ec. 4.3 y 4.4, respectivamente). Si consideramos al igual que en el caso anterior, el %CB promedio en cenizas del RAC de este estudio (32,38%), se encontraría con ayuda del gráfico de manera aproximada las temperaturas DT en AO y en AR, las cuales serían: 1.088 [°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 las cenizas.

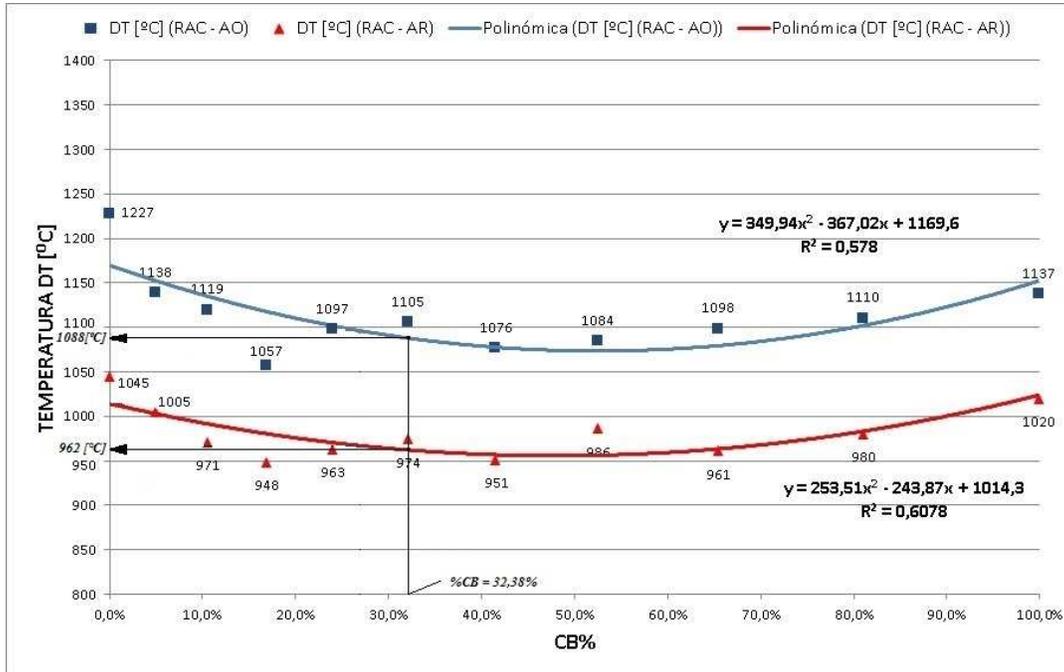


Figura 52. Variación de DT para cenizas sintéticas de RAC de Tucumán-Argentina en función de %CB para AO y AR. Elaboración propia.

Si se considera a DT como temperatura crítica, los resultados muestran en promedio una mayor amplitud de fusibilidad para las cenizas de RAC de nuestra región en relación al bagazo (126 [°C] vs. 90 [°C]). Esto indicaría en principio que ante un cambio de atmósfera en el interior del hogar de una caldera, el RAC en estudio tendría un mejor comportamiento frente al bagazo. No obstante, para la composición química encontrada en el RAC, la DT promedio resultó menor en comparación con la DT del bagazo (962 [°C] vs. 979 [°C], respectivamente), lo que implicaría para el RAC un riesgo de inicio de fusión en esas condiciones.

Cabe destacar la importancia de contar con este tipo de regresiones que permitan determinar de manera aproximada las temperaturas de inicio de fusión (DT), conociendo los CB y/o CA, determinados previamente por medio de un análisis químico de las cenizas.

4.19 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FUSIÓN DE LAS CENIZAS SINTÉTICAS SOBRE PLACAS DE ACERO ESTÁNDAR.

La Figura 53 muestra los resultados del ensayo de fusión de las cenizas propias y sintéticas realizadas en mufla eléctrica a 900[°C]. A este nivel de temperatura las muestras de cenizas de RAC y bagazo (Bzo), sin adición de óxidos, se mostraron sin deformación alguna, sólo se observó un agrietamiento de la cobertura posiblemente debido a la eliminación de la humedad de equilibrio e intrínseca del material.

La muestra sintética de RAC con 100%CA presentó una estructura sólida de aspecto granular adherida al metal de la placa de manera estable. A medida que aumentaron los CB (25%CB y 50%CB), se observaron estructuras porosas de cenizas sinterizadas y adheridas firmemente al metal con una clara deformación de las mismas. Para mayores concentraciones de CB (75%CB y 100%CB), las estructuras se tornaron pulverulentas de fácil eliminación mecánica.

Con respecto a las cenizas sintéticas de bagazo, se observaron aglomerados en las estructuras de las cenizas no sinterizadas. Estas adherencias al metal fueron sólidas y firmes hasta la mezcla 50%CA+50%CB. A partir de la ésta última, las estructuras de las cenizas se tornaron más frágiles y de moderada eliminación mecánica.

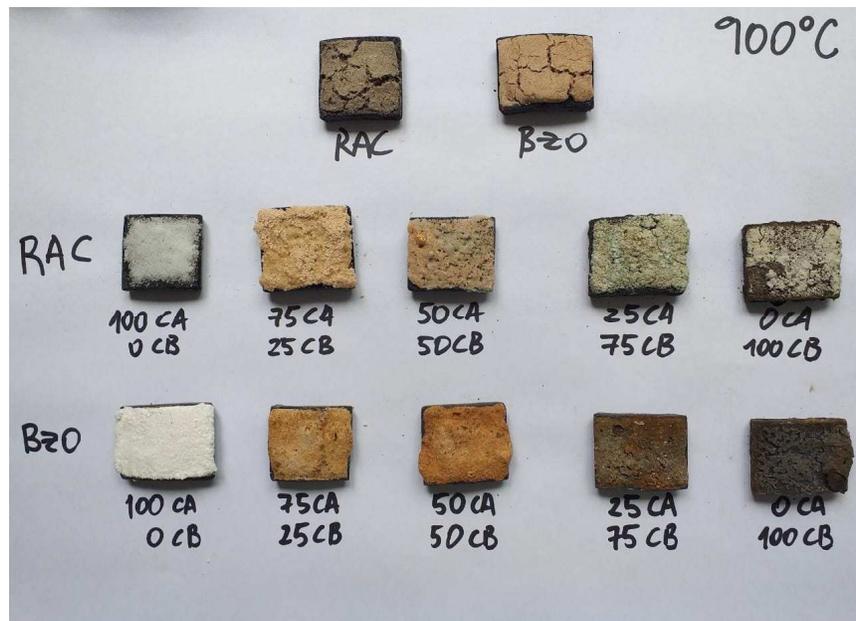


Figura 53. Resultados de la fusión de cenizas a 900 [°C] sobre placas de acero de material estándar de tubos de calderas. Elaboración propia.

La Figura 54 muestra los resultados del ensayo de fusión de las cenizas propias y sintéticas realizadas en mufla eléctrica a 1.100[°C]. Para esta temperatura las muestras de cenizas de RAC y Bzo propias (sin adición de óxidos), mostraron una estructura sólida, estable y de espesor delgado, fundida sobre el metal. La misma presentó una característica rugosa y sin posibilidades de remoción mecánica. Se observaron pequeñas formaciones de material sinterizado en los bordes de las placas.

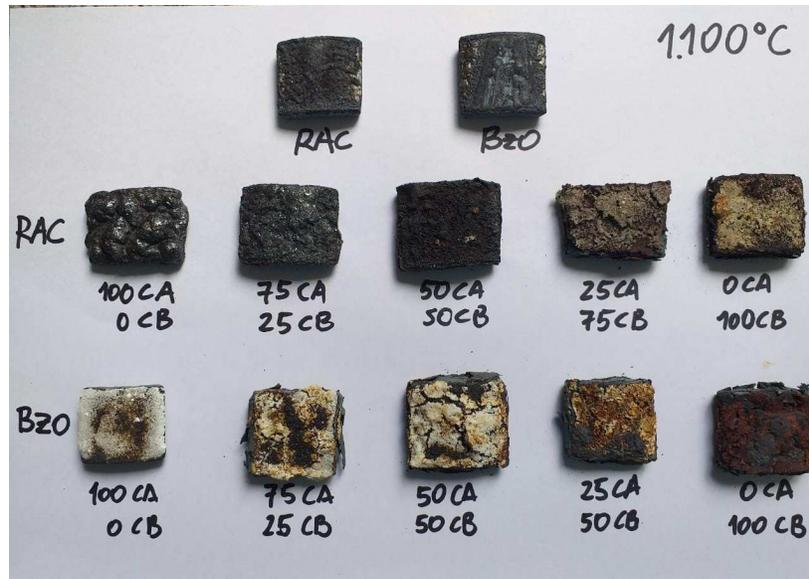


Figura 54. Resultados de la fusión de cenizas a 1.100 [°C] sobre placas de acero de material estándar de tubos de calderas. Elaboración propia.

Para la muestra de RAC con 100%CA, se observó un aumento irregular del volumen del material con aspecto cristalino brillante de alta dureza, adherido fuertemente al metal y de muy difícil remoción. A medida que aumentaron los CB la estructura cristalina se fue opacando pero manteniendo la fuerte adherencia con el metal hasta alcanzar la proporción 50%CA+50%CB. A partir de la cual, la estructura formada presentó un aspecto pulverulento de fácil remoción mecánica debido a la no adherencia de las cenizas al metal. Con respecto a las cenizas sintéticas de Bzo, se observaron estructuras cristalinas sólidas de bajo espesor y adheridas al metal con moderada dificultad de remoción. No presentó un aspecto sinterizado, ni aglomerado de las cenizas. En las siguientes proporciones estudiadas (25%CB y 50%CB), se identificaron estructuras más frágiles de aspecto granular de baja densidad y de más fácil remoción que en la proporción anterior. Para las proporciones (75%CB y 100%CB), las estructuras de las cenizas se tornaron frágiles y ferrosas con una notoria corrosión del metal que manifestó una oxidación y expansión del mismo con pérdida de espesor.

Es probable que a 900 [°C] la atmósfera circundante haya sido del tipo oxidante, mientras que a 1.100 [°C] la condición haya sido reductora. Este último hecho podría comprobarse con la aparición de una coloración del tipo ferrosa para las proporciones de 50%CB y 100%CB, según lo indicado por Miles *et al.*, 1985 y Pezzano, 1976. En las anteriores proporciones las coberturas de cenizas mantuvieron el color blanco propios del Al_2O_3 y TiO_2 . Asimismo, los resultados cualitativos del estudio de la fusión de las cenizas sintéticas sobre placas de acero estándar, coinciden con lo encontrado en el estudio de la fusibilidad de las biomásas analizadas, donde se observó una mayor resistencia al inicio de fusión del bagazo

de caña de azúcar en relación al RAC, según lo observado en las Figuras 51 y 52 para las correspondientes concentraciones promedio de %CB encontradas en las biomásas. Fue claro observar que a 1.100 [°C] las cenizas de RAC con 50%CA y 50%CB, presentaron aspectos en las coberturas de cenizas con mayor grado de fusión que para el caso del bagazo, donde se observaron coberturas de cenizas sin fundir para las mismas condiciones de temperatura.

Si bien estos ensayos se realizaron en condiciones particulares de calentamiento y de atmósfera circundante, la experiencia mostró correlación con el estudio teórico de la fusibilidad de las cenizas sintéticas y con algunos antecedentes encontrados en la bibliografía. Además, guardan relación con los observados en la experiencia práctica de la operación y mantenimiento de las calderas de vapor bagaceras.

5. CONCLUSIONES

A lo largo de la presente tesis se hicieron contribuciones para el conocimiento de las características que definen un probable comportamiento general de las cenizas de un combustible sólido en el interior del hogar de un generador de vapor. Específicamente se han evaluado de manera experimental, a través de distintas técnicas analíticas de caracterización térmica y química, las cenizas de bagazo y de los residuos de cosecha de la caña de azúcar (RAC) de Tucumán – Argentina.

Se demostró que el comportamiento de las cenizas depende principalmente de su composición, por lo que resulta imprescindible su caracterización química y energética, no obstante, existen otros parámetros que influyen directa e indirectamente, como la temperatura del hogar de la caldera, su atmósfera interna que dependerá de la relación aire-combustible, tamaño y forma de las partículas, y fundamentalmente de la operación y regulación del equipo.

En este trabajo se elaboraron muestras de cenizas sintéticas tomando como base las proporciones de los elementos inorgánicos existentes en cenizas reales de las biomásas mencionadas, provenientes de ingenios azucareros y de campos cañeros de Tucumán. Para ello, se consideraron óxidos comerciales puros para la formulación de diferentes mezclas con el objetivo de variar las proporciones de los componentes ácidos (CA) y básicos (CB), de manera de que las cantidades de CA disminuyan en 10% entre 100% a 0%, mientras que los CB aumenten en 10% entre 0% y 100%. Posteriormente se correlacionaron cada una de las proporciones encontradas con las temperaturas de fusión de las cenizas sintéticas, determinadas mediante un análisis de fusibilidad según ASTM D1857-03; y la composición elemental de las mismas, halladas por medio de espectrometría de absorción atómica. Se han considerado como elementos mayoritarios al Si, Al, Ti, Fe, Ca, Mg, Na, K, S y P; y se determinaron los óxidos correspondientes, según ASTM D 3682-01.

Dichas correlaciones se informaron por medio de ecuaciones y gráficos que permiten encontrar de manera rápida las temperaturas de inicio de fusión (DT), a partir de un análisis químico de composición elemental.

A lo largo de los trabajos realizados en esta tesis se presentaron conclusiones específicas que se resumen a continuación:

- Los principales componentes de las cenizas de bagazo de nuestra región tienen las siguientes concentraciones en promedio: $\text{SiO}_2 = 54,25\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 7,84\%$, $\text{TiO}_2 = 0,34\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1,19\%$, $\text{CaO} = 1,60\%$, $\text{MgO} = 0,65\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 0,37\%$, $\text{K}_2\text{O} = 5,29\%$,

$\text{SO}_3 = 0,45\%$ y $\text{P}_2\text{O}_5 = 0,01\%$. Las concentraciones encontradas a nivel global fueron: $\text{SiO}_2 = 61,55\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 7,67\%$, $\text{TiO}_2 = 1,04\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 5,76\%$, $\text{CaO} = 4,72\%$, $\text{MgO} = 2,86\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 1,28\%$, $\text{K}_2\text{O} = 5,43\%$, $\text{SO}_3 = 2,06\%$ y $\text{P}_2\text{O}_5 = 2,57\%$. Estos resultados muestran las bajas concentraciones de los óxidos respecto a los datos globales, salvo el Al_2O_3 que registró un valor mayor en 2,2%.

Las concentraciones promedio de los principales componentes de las cenizas de RAC fueron: $\text{SiO}_2 = 55,09\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,85\%$, $\text{TiO}_2 = 0,18\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,58\%$, $\text{CaO} = 7,46\%$, $\text{MgO} = 2,47\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 0,77\%$, $\text{K}_2\text{O} = 14,34\%$, $\text{SO}_3 = 0,20\%$ y $\text{P}_2\text{O}_5 = 0,81\%$. Las encontradas a nivel global fueron: $\text{SiO}_2 = 51,07\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 6,97\%$, $\text{TiO}_2 = 0,63\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 3,82\%$, $\text{CaO} = 10,42\%$, $\text{MgO} = 3,72\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 1,12\%$, $\text{K}_2\text{O} = 7,90\%$, $\text{SO}_3 = 3,43\%$ y $\text{P}_2\text{O}_5 = 2,37\%$. Estos resultados muestran mayores concentraciones de SiO_2 y K_2O ; y bajas concentraciones de Fe_2O_3 , Al_2O_3 , P_2O_5 y SO_3 , respecto a las halladas globalmente.

Estos resultados indican que las cenizas de bagazo y de RAC locales presentan características diferentes a las localizadas en otras regiones del mundo, probablemente se deba a los distintos tipos de suelos, variedades de caña, sistemas de cosecha y preparación.

- Las cenizas de bagazo de Tucumán resultaron mayormente ácidas ($\%CA = 87,67\%$ y DE igual a $0,10\%$) en relación a la media global ($\%CA = 75,96\%$ y $DE = 10,01\%$), por lo que es de esperar una menor tendencia a la fusibilidad de las mismas en nuestra región, según lo indicado por Fernández Diez, 2000. Con respecto al RAC, las cenizas resultaron también ácidas ($\%CA = 67,62\%$ y $DE = 5,26\%$), respecto al promedio global ($50,27\%$ y $DE = 27,87\%$), por lo que se esperaría en esta biomasa una menor tendencia a la fusibilidad en relación al bagazo.
- Según los índices de comportamiento de las cenizas de las biomásas analizadas, indicarían que no existirían riesgos de escoriación por parte de las mismas, ya que el promedio de la relación CB/CA resultaron menores al límite máximo de $0,75$, según Pronobis, 2005. El índice base/ácido en bagazo fue de $0,16$ y en RAC de $0,49$. No obstante, ambas biomásas sí presentarían riesgos de sinterización, ya que los promedios de los índices de la relación óxidos alcalinos térreos a óxidos alcalinos (IS), fueron en bagazo de $0,53$ y en RAC de $0,73$, menores al límite máximo de 2 , propuesto por el mismo autor.

Por otro lado, el índice de álcalis (AI) para bagazo fue de $3,27$ y para RAC de $10,81$, valores muy por arriba de $0,34$, según lo indicado por Vamvuka y Zografos, 2004, por lo que ambas biomásas tendrían elevada tendencia a la deposición y posible escoriación de alcanzar las temperaturas críticas de fusión.

Con respecto al índice promedio de escoriación por acción del azufre, para el bagazo fue de $R_s = 0,03$, menor al límite inferior de 0,60 propuesto por Pronobis, 2005, lo que se presupone una baja tendencia a este fenómeno. Para el caso del RAC (promedio $R_s = 0,08$), también existiría una baja tendencia a la escoriación por acción del azufre contenido en sus cenizas.

El índice de deposición determinado en el bagazo de este estudio fue de $F_u = 0,92$, menor a la media global (3,39) y por debajo del rango de referencia (1,14 a 10,67). Esto indicaría según Pronobis, 2005 una baja tendencia al ensuciamiento de las cenizas por deposición. En relación al RAC, esta biomasa tendría una elevada tendencia al ensuciamiento ($F_u = 47,98$), mayor al límite máximo propuesto por el mencionado autor ($F_u = 40$).

Con respecto al índice de erosión de las cenizas ($I_{Erosión}$), el cual nos proporciona una idea de la disponibilidad de la sílice a reaccionar con las sales de K y Na (Nogués *et al.*, 2010), en promedio para el bagazo en estudio fue de $I_{Erosión} = 0,14$, valor menor al promedio global encontrado (0,48). Esto mostraría que el bagazo de nuestra región tendría mayor tendencia a erosionar los interiores de una caldera de vapor en relación al bagazo de otros países. Esto se debería al menor contenido de SiO_2 y mayor de K_2O encontrados en bagazos de Tucumán.

Para el caso del RAC el índice $I_{Erosión}$ fue de 0,02, valor similar al promedio global encontrado. En relación al bagazo en estudio el índice resultó un 86% menor, lo que indicaría que el RAC resultaría más erosivo que el bagazo, seguramente debido al mayor contenido de SiO_2 que no reaccionaría con el K_2O quedando libre.

- Finalmente para el bagazo de caña de azúcar en estudio se observó un índice de viscosidad promedio ($S_R = 94,12$), que resultó mayor al valor medio encontrado en literatura ($S_R = 82,17$), y por arriba del límite propuesto por Pronobis, 2005 ($S_R > 72$), esto indicaría que las cenizas presentarían baja escoriación (alta viscosidad). Para el caso del RAC el índice promedio fue de $S_R = 83,65$, mayor al promedio encontrado en bibliografía ($S_R = 60,98$), y mayor al límite de referencia indicado por el autor. Esto también mostraría que las cenizas RAC como las de bagazo no tendrían tendencia a fluidizarse. Comparando ambas biombras, las cenizas de bagazo tendrían menor tendencia a su fluidización, seguramente debido a los mayores contenidos de %CaO (7,46%) y %MgO (2,47%) en relación al RAC.
- Se observó que el RAC posee un mayor rango de amplitud de fusibilidad de sus cenizas en relación al bagazo (126 [°C] vs 90 [°C], respectivamente), cuando el combustible trabaja entre una atmósfera oxidante (con exceso de aire) y otra reductora (con deficiencia de oxígeno); y si se considera a la temperatura de inicio de fusión (DT) como temperatura crítica. Es decir, 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, el debido al mayor contenido de CB en sus cenizas (32,38%) en relación al bagazo (12,33%), alcanzaría primero el estado inicial de fusión de las mismas.

Por otro lado, el bagazo de la caña de azúcar tendría una mayor probabilidad de que alcance 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.

- Se han encontrado correlaciones cuadráticas entre las temperaturas DT para cenizas de bagazo y de RAC de caña de azúcar, en función de las concentraciones de %CB que las constituyen. Con estas correlaciones se determinaron las proporciones críticas de CA y CB con las cuales se alcanzaron las mínimas temperaturas de inicio de fusión ($DT_{\min.}$) en AR. Para bagazo se obtuvo una $DT_{\min.}$ de 979 [°C], con un porcentaje de CA de 87,67% y de CB de 12,33%. Para el caso del RAC la $DT_{\min.}$ fue de 962 [°C] para un porcentaje de CA de 67,62% y CB de 32,38%.

Se destaca la importancia de contar con estas correlaciones que permiten estimar de manera rápida la calidad de un combustible con el objetivo de predecir un posible mal comportamiento del mismo durante su combustión, evitando de esta manera, paradas imprevistas y los elevados costos asociados al mantenimiento de las unidades productoras de vapor. Además, permitiría estudiar el comportamiento del bagazo y del RAC bajo alguna condición específica que se desee investigar. Por ejemplo, la influencia del agregado de dolomita refractaria con la biomasa al ingreso del horno para elevar el punto de fusión de la misma; el lavado de la caña de azúcar en el ingreso a fábrica para disminuir el material inorgánico del cultivo durante su procesamiento; como así también la influencia del secado del bagazo en la calidad del combustible desde el punto de vista de sus cenizas.

Por esto es que se propone para futuros trabajos el consolidar los modelos propuestos y/o metodologías a través de nuevos ensayos más controlados, con el objetivo de modelar y conocer el comportamiento de otras biomásas como posibles combustibles de calderas bagaceras, por ejemplo, los residuos de la poda del citrus, chips de maderas, residuos de la cosecha del trigo y del maíz, sorgo fibroso y otros cultivos energéticos, incluso el uso de vinazas provenientes de destilerías de alcohol de caña de azúcar como potenciales combustibles para la generación de energía.

Se puede concluir que los objetivos propuestos fueron cumplidos satisfactoriamente con resultados aceptables respecto a experiencias y datos encontrados en bibliografía y en

actividades industriales. Debido a la gran variabilidad de los elementos que intervienen en las actividades agrícolas y fabriles relacionadas con el manejo, procesamiento y calidad de la caña de azúcar como fuente de materia prima para la generación de azúcar, alcohol y energía, los resultados obtenidos resultan representativos para nuestra región.-

6. BIBLIOGRAFÍA

Arif, E.; M. W. Clark y N. Lake. 2016. Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production. *Construction and Building Materials*, Volume 128: 287-297. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816317068>

Ashok Pandey, C. R. Soccol, P. Nigam, V. T. Soccol, 2000. Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: sugarcane bagasse; *Bioresource Technology*, 74: p. 69-80.

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.

Balzarini M., Bruno C., Córdoba M. y Teich I. 2015. Herramientas en el Análisis Estadístico Multivariado. Escuela Virtual Internacional CAVILA. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Monica-Balzarini/publication/286931204_Herramientas_en_el_Analisis_Estadistico_Multivariado/links/5670e57808ae0d8b0cc1001a/Herramientas-en-el-Analisis-Estadistico-Multivariado.pdf

Baxter L. L.; T. R. Miles; T. R. Miles Jr.; B. M. Jenkins; T. Milne; D. Dayton; R. W. Bryers y L. L. Oden. 1998. The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences. *Fuel Processing Technology* 54: 47-78.

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.

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*, Volume 22, Issue 1, 1996: pp 29-120. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360128595000127>.

British Petroleum, 2013. Statistical Review Of World Energy. Disponible en: http://www.bp.com/content/dam/bpcountry/fr_fr/Documents/Rapportsetpublications/statistical_review_of_world_energy_2013.pdf

British Petroleum, 2015. Statistical Review Of World Energy. Disponible en: http://www.bp.com/content/dam/bpcountry/fr_fr/Documents/Rapportsetpublications/statistical_review_of_world_energy_2015.pdf

Borio R. W. y A. A. Levasseur, 2006. Overview of coal ash deposition in boilers. Combustion engineering, inc. Disponible en:

<https://www.semanticscholar.org/paper/OVERVIEW-OF-COAL-ASH-DEPOSITION-IN-BOILERS-R.-Borio/a860c2f87dc7f395080fc779ffbc75d5cbe60025>

Carvajal, A.; A. L. Gómez y C. O. Briceño. 2005. Estimation of the heating value of bagasse blended with different quantities of trash as a biomass fuel. Proc. ISSCT, Vol. 25: pp. 150-156.

Casen S. D.; Marto, L. A.; Medina, M. M.; Romero R. E.; Torres Bugeau, A. y Perez, D. 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.eaac.org.ar/upload/contenido/pdf/20121122111107000000.pdf>

Casen, S.; 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 Vol. 36 (4): p. 20-26.

Castañón; A. M.; S. García Granda; A. M. Guerrero y F. Gómez Fernández. 2012. Estudio de las fases mineralógicas del clínker en una cementera española, utilizando el método de Rietveld. Revista Dyna, año 79, Nro. 173, pp. 41-47. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v79n173/a05v79n173.pdf>

Cavalcanti, E.J.C.; M. Carvalho y D.R.S. da Silva, 2020. Energy, exergy and exergoenvironmental analyses of a sugarcane bagasse power cogeneration system, Energy Conversion and Management, Volume 222, 113232, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113232>. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420307767>

Chambon, C. L., T. Y. Mkhize, P. Reddy, A. Brandt-Talbot, N. Deenadayalu, P. S. Fennell y 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>

Chong H., J. Bai, A. Ilyushechkin, H. Zhao, L. Kong, H. Li, Z. Bai, Z. y Guo, 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>.

Córdoba, P. 2015. Status of Flue Gas Desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs. Fuel (144): pp 274-286. ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.065>

Corrales Suárez, J. M.; J. M. Gil Ortiz; P. D. Remédios Castañeiras; Y. Masjuan Leyva y J. A. Gil Ceballo. 2013. Ahorro energético en tándem de molinos de caña de azúcar mediante regulación de presiones hidráulicas. Revista Ingeniería Mecánica. Vol. 16 (3), p. 186-193.

Cruz, M. C.; G. del H. Zamora Rueda; M. A. Golato y D. Paz. 2016. Experiencias entre laboratorios. Caracterización de biomásas regionales. Argentina (Tucumán) y Brasil (Itajubá). Rev. Avance Agroindustrial 37 (4): pp. 34-39.

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>

Dagna C. A., 2014. Matriz Energética Argentina: Qué se debe hacer?. Entrevista al portal Carta Financiera. Disponible en: <http://www.cartafinanciera.com/commodities/matriz-energetica-argentina-que-se-debe-hacer/>

Díaz, G.F.; G. Zamora Rueda; M. Mistretta; C. Gutierrez; F. Peralta; M. Golato y D. Paz. 2017. Estudio preliminar de la caracterización energética de la poda de limón en la provincia de Tucumán. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán. Tomo 94 (2).

Díaz Troyano; M. 2015. Análisis de viabilidad técnica de un proyecto de valorización energética de residuos. Criterios básicos de diseño. Combustion Biomass Service, S.L. (CBS). Puerto de Santa María, Cádiz, España. Disponible en: <https://cupdf.com/document/viabilidad-biomasas.html>

Digonzelli P.; Alonso L.; Casen S.; Giardina J.; Romero E.; Leggio Neme F.; Scandaliaris J.; Alonso J.; Fernández de Ullivarri J. y Tonatto J. 2006. Manejo de los residuos de la cosecha en verde de la caña de azúcar: evaluación preliminar de máquinas enfardadoras. Avance Agroind. 27 (4): 14-18.

Fandos, C.; J. Scandaliaris; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y F. J. Soria; J. Giardina; J. F. de Ullivarri y E. R. Romero. 2020. Relevamiento satelital de cultivos en la provincia de Tucumán. Área cosechable y producción de caña de azúcar y azúcar para la zafra 2020 en Tucumán. Reporte Agroindustrial N° 190 (ISSN 2346-9102). Disponible en: <https://www.eeaoc.gob.ar/wp-content/uploads/2020/06/RA190-ULTIMA-VERSION.pdf>. Consultado en diciembre de 2020.

Fandos, C.; J. Scandaliaris; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y F. J. Soria. 2017a. Área cosechable y producción de caña de azúcar y azúcar para la zafra 2017 en Tucumán. Relevamiento satelital de cultivos de la provincia de Tucumán. Reporte agroindustrial N°138. Disponible en: <http://www.eeaoc.org.ar/publicaciones/categoria/22/709/Area-cosechable-y-produccion-de-cana-de-azucar-y-azucar-para-la-zafra-2017-en-Tucuman.html>

Fandos, C.; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés; F. J. Soria y H. Salas. 2016a. 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 N°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>

FAO, 2016. Análisis espacial del balance energético derivado de biomasa Metodología WISDOM Provincia de Tucumán. Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Disponible en: http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/WISDOM_Tucuman_baja.pdf. Consultado en diciembre de 2020.

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>

Feijóo, E. A.; 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 caña de azúcar de Tucumán. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán. Tomo 92 (2): 23-32.

Feng, W.; S. Wu; A. Wharmby y 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* Vol. 33 (2): p. 17-22.

Fernández Diez, P. 2000. Efecto de la ceniza del combustible en el diseño y funcionamiento de centrales térmicas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Fundación DIALNET. Logroño, La Rioja, España. Disponible en: https://files.redsauce.net/js/pdfjs/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fsm1.redsauce.net%2FAppController%2Fcommands_RSM%2Fapi%2Fapi_getFile.php%3FitemID%3D189%26propertyID%3D20%26RStoken%3D59e8ac1045d03e2ff6564c0638315f38

Fernández Llorente M.J., y Carrasco García J.E., 2005.“Comparing methods for predicting the sintering of biomass ash in combustion”. *Revista Fuel*, N° 84, pp. 1893–1900.

Flores Marco N., Anschau A. y Carballo S., 2008. Uso de Biomasa para la generación de energía eléctrica en la provincia de Tucumán. AVERMA (Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente) V12: 06.27 - 06.32

Fogliata, F. A., 1995. Agronomía de la caña de azúcar. Tecnología, Costos y Producción. Ed. El Graduado. Tomo 1: pp. 187-189.

Franck Colombres, F. J.; M. A. Golato; E. A. Feijóo; W. D. Morales; D. Paz y M. Octaviano. 2016. Combustión de vinaza con materiales celulósicos en calderas bagaceras de ingenios de la provincia de Tucumán (R. Argentina). *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, num.1 (2016): 9-18.

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.; G. Zamora Rueda; C. Gutierrez; M. G. Mistretta; D. Paz; M. Ruíz. 2020. 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*. En prensa, aceptado en febrero de 2021.

Golato, M. A. 2018. Valoración energética de biomásas residuales para generación de energía en Tucumán – Argentina. Trabajo Integrador de la Carrera de Especialización en Ingeniería Bioenergética. Facultad Regional Tucumán (FRT). Universidad Tecnológica Nacional (UTN) Diciembre de 2018.

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*, num.2 (2017): 21 - 31.

González Pérez, F; J. A. Castellanos Álvarez y J. F. Puertas Fernández. 2010. Método para determinar la cantidad de agua de imbibición a utilizar en la industria de azúcar de caña. Revista Ingeniería Mecánica. Vol. 13 (1): pp. 41-48.

H. Viana, D.J. Vega-Nieva, L. Ortiz Torres, J. Lousada, J. Aranha, 2012. Fuel characterization and biomass combustion properties of selected native woody shrub species from central Portugal and NW Spain, Fuel, Vol. 102: pp. 737-745.

Gupta, S. K.; Wall, T. F.; Creelman, R. A. y Gupta, R. P. 1998. Ash fusion temperatures and the transformations of coal ash particles to slag. Fuel Process Technol 56: pp. 33-43.

Gutierrez, 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), num.2 (2016): 19 - 25.

Hiltunen, M.; V. Barišić y E. Coda Zabetta. 2008. Combustion of different types of biomass in CFB boilers. 16th European Biomass Conference Valencia Spain. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228412245_Combustion_of_different_types_of_biomass_in_CFB_boilers

Ibarguren, L.; A. Bertona y C. Reborá, 2017. Siembra directa: el rol de los rastrojos. Revista de Divulgación Científica, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, N°7, ISSN 2422-6254. Disponible en: <http://experticia.fca.uncu.edu.ar/numeros-antteriores/n-3-2015/85-siembra-directa-el-rol-de-los-rastrojos>

Jacome, D. L. F., 2014. Caracterização Físico-química 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>

James, A. K.; W. R. Thring; S. Helle y H. S. Ghuman. 2012. Ash Management Review. Applications of Biomass Bottom Ash. Energies 2012, 5, 3856-3873; doi:10.3390/en5103856.

Disponible en: www.mdpi.com/journal/energies

Jenkins, B. M.; L. L. Baxter; T. R. Miles Jr. y T. R. Miles. 1998. Combustion properties of biomass. Fuel Processing Technology 54: 17-46. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382097000593>

Kær, S. K. 2001. Numerical investigation of ash deposition in straw-fired boilers: Using CFD as the framework for slagging and fouling predictions. Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet. Disponible en: <https://vbn.aau.dk/en/publications/numerical-investigation-of-ash-deposition-in-straw-fired-boilers->

Khairnar, P.; F. Chavan y V. R. Diware. 2013. Generation of energy from distillery waste water. International journal of science, spirituality, business and technology (IJSSBT), Vol. 2 (1): p. 29-35.

Ley Nacional Nº 26.190. 2015. Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica y creación de la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico (CAMMESA). Disponible en: <http://portalweb.cammesa.com/Documentos%20compartidos/Noticias/Ley%2026190.pdf>

Ley Nacional Nº 27.191. 2016. Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica. Modificación de la

Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico (CAMMESA). Disponible: <http://portalweb.cammesa.com/Documentos%20compartidos/Noticias/Ley%20N%C2%B0%2027191-2015.pdf>

Liu, B.; Q. He; Z. Jiang; R. Xu and B. Hu. 2013. Relationship between coal ash composition and ash fusion temperatures. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University, Hamnkou Road, Nanjing, Jiangsu, PR China. Fuel 105: pp. 293–300.

Martirena Hernández, J. F.; S. Betancourt Rodríguez; B. Middendorf, A. Rubio; I. Martínez Fernández; I. Machado López y R. Gonzalez López. 2000. Propiedades puzolánicas de desechos de la industria azucarera (primera parte). Materiales de Construcción, Vol. 50 (2): pp. 71-78. Disponible en: <file:///C:/Users/MGolato/Downloads/PropiedadespuzolanicasderesidyosdelaindustriaazucareraPrimeraparte.pdf>

Martirena Hernández, J.F.; B. Middendorf; M. Gehrke y H. Budelmann. 1998. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: Study of the reaction. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 11, pp. 1525–1536. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884698001306>

Massazza, F., 1998, Pozzolana and pozzolanic cements. Hewlett, P. C. (Ed). Lea's chemistry of cement and concrete, 4 Ed. New York: J. Wiley, p. 487. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750662567500229?via%3Dihub>

Menéndez, J. E. y J. A. Hilbert, 2013. Cuantificación y uso de biomasa de residuos de cultivos en Argentina para bioenergía. Informes Técnicos Bioenergía. Año 2 N° 4, Instituto Nacional de Tecnología Agrícola (INTA). Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-imp-inta-cuantificacion_y_uso_de_biomasa_de_residuos_de_c.pdf

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.

Melissari, B. 2014. Ash related problems with high alkali biomass and its mitigation - Experimental evaluation. Memoria Investigaciones en Ingeniería, num. 12, ISSN 2301-1092, ISSN (en línea) 2301-1106.

Merck KGaA, 2021. Potasio dihidrogenofosfato. Ficha de datos de seguridad (MSDS o SDS), certificado de análisis y de calidad (CoA y CoQ), expedientes, folletos y otros documentos disponibles. Darmstadt, Alemania. Disponible en: https://www.merckmillipore.com/AR/es/product/Potassium-dihydrogen-phosphate.MDA_CHEM-104873

Miles, T. R.; T. R. Miles Jr; L. L. Baxter; R. W. Bryers; B. M. Jenkins y 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>

Mistretta, M. G.; G. Zamora Rueda; F. Peralta; C. Gutiérrez; M. V. Bravo; H. Zalazar; E. A. Feijóo; M. A. Golato; D. Paz y G. J. Cárdenas. 2014. Metodologías termogravimétricas para la determinación del contenido de cenizas en bagazo y en residuos agrícolas de la cosecha en verde de la caña de azúcar en Tucumán. Rev. Avance Agroindustrial N°35 (4).

Mistretta, M.G.; C. Gutierrez; G. Zamora Rueda; F. Peralta; M.A. Golato; D. Paz; G.J. Cárdenas y M. Ruíz. 2019. Contenido de azufre total del residuo agrícola de la cosecha de

caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Revista industrial y agrícola de Tucumán, num.1 (2018): 49 - 54.

Mlonka-Mędrala, A.; A. Magdziarz; M. Gajek; K. Nowińska y W. Nowak. 2020. Alkali metals association in biomass and their impact on ash melting behaviour. Fuel, Volume 261. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236119317752>

Montico, S. y N. Di Leo. 2009. Energía potencialmente obtenible de los rastrojos de cultivos en Argentina. X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del MERCOSUR. pp 1979-1986. ISBN 978-950-673-748-1.

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, nº 1, pág. 6-9. Disponible en: <http://revista.aemac.org/>

Morales Muñoz, R., L. Agudo Martínez y J. Espinosa Tasón. 2016. Nota Técnica "Disponibilidad de residuos de cosecha de arroz y maíz para la producción de etanol". Revista Ciencia Agropecuaria 24: pp. 83-92. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá (IDIAP). Disponible en: <file:///D:/Mis%20documentos/ESPECIALIZACI%C3%93N/TESIS/Residuos%20agr%C3%ADcolas/DISPO-NIBILIDAD-DE-RESIDUOS-DE-COSECHA-DE-ARROZ-Y-MAZ-PARA-LA-PRODUCCIN-DE-ETANOL.-Rodolfo-Morales-Muoz-et-al..pdf>

Niu, Y.; H. Tan; X. Wang; Z. Liu; H. Liu; Y. Liu y T. Xu. 2010. Study on fusion characteristics of biomass ash. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University. Shaanxi, China. Bioresource Technology 101: 9373–9381.

Niu, Y.; W. Du; H. Tan; W. Xu, Y. Liu; Y. Xiong y 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 (2013) 642–645. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.065>

Niu, Y.; H. Tan y 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>

Nogués, F.S; D. García Galindo y A. Rezeau. (2010). Energías Renovables. Energía de la Biomasa. Volumen 1. Prensa Universitaria de Zaragoza.

Observatorio de la Energía, Tecnología e Infraestructura para el Desarrollo (OETEC), 2021. La producción de gas cayó 8,6% durante el 2020. Disponible en: <https://www.oetec.org/nota.php?id=5146&area=2>

Pérez D., V. Paredes, G. Rodríguez y E. Romero. 2017. Estadísticas, costos y margen bruto del cultivo de caña de azúcar, campaña 2015/16 vs 2014/15. Gasto de plantación para la zafra 2017 en Tucumán. Estadísticas y márgenes de cultivos tucumanos. Reporte Agroindustrial N°134. Disponible en: <http://www.eaac.org.ar/upload/publicaciones/archivos/689/20170113110700000000.pdf>

Perkin Elmer Instruments Inc, 2000. Manual Part Number 0303-0152 Realse E, Norwalk, USA.

Pezzano, P. A., 1976. Siderurgia. Elementos de la siderurgia. Fabricación del arrabio. Fabricación de los aceros. Productos siderúrgicos. La técnica de fusión y colado. Técnica de la laminación y forjado. 3^{ra} ed., Ed. Alsina.

Pintana, P. y N. Tippayawong, 2016. Predicting Ash Deposit Tendency in Thermal Utilization of Biomass. ENGINEERING JOURNAL, Volume 20, Issue 5: pp. 16-24. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/311358701_Predicting_Ash_Deposit_Tendency_in_Thermal_Utilization_of_Biomass

Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (PROBIOMASA), 2017. Proyecto UTF/ARG/020/ARG. Banco de proyectos. Disponible en: http://www.probiomasa.gob.ar/sitio/es/bp_mapa.php. Consultado en septiembre de 2020.

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 Febrero de 2021.

Ramaiah N.A y V.G. Chikhlikar, 1986. Energy generation through distillery effluent treatment. Deccan Sugar Institute, Pune, India. ISSCT Congress Jakarta. Disponible en: <http://www.issct.org/pdf/proceedings/1986/1986%20Ramaiah%20Energy%20Generation%20Through%20Distillery%20Effluent%20Treatment.pdf>

Razo, C., C. Ludeña, A. Saucedo, S. Astete Miller, J. Hepp y A. Vildósola. 2007. Producción de biomasa para biocombustibles líquidos: el potencial de América Latina y el Caribe. Unidad de Desarrollo Agrícola. División de Desarrollo Productivo y Empresarial N°181. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago de Chile. Disponible en: file:///D:/Mis%20documentos/Bibliograf%C3%ADa/Publicaciones/BIOCOMBUSTIBLES/Producci%C3%B3n%20de%20biomasa%20para%20biocombustibles%20l%C3%ADquidos_El%20potencial%20de%20am%C3%A9rica%20latina%20y%20el%20Caribe.%20Razo%20et%20al.%202008.pdf. Consultado en noviembre de 2017.

Secretaría de Energía de la Nación (SEN), 2020. Balances energéticos nacionales. Secretaría de Gobierno de Energía, Subsecretaría de Planeamiento Energético, Dirección Nacional de Información Energética. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>

Serker, N. K.; R. U. Hafiz; A. H. M. Ahashanur 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>

Silva Lora, E. E., 2002. Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte. 2 ed., Editora Interciencia Ltda. Rio de Janeiro. Brasil.

Singh, N. B., Singh, V. D. y Rai, S., 2000, “Hydration of bagasse ash-blended Portland cement”, Cement and Concrete Research, V.30, n.9, pp. 1485-1488. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884600003240>

Souza A.E.; S.R. Teixeira, G.T.A. Santos, F.B. Costa y E. Longo, 2011. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. Journal of Environmental

Management, Volume 92, Issue 10: 2774-2780. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.020>.

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 Vol. 34 (4): p. 32-26.

Valdes Delgado, A. 2007. Empleo de la biomasa azucarera como fuente de alimento, energía, derivados y su relación con la preservación del medio ambiente (BAZDREAM). Taller Gestão de energia e resíduos na agroindústria socroolcoholeira. Red Temática IVH. Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Pirasununga, São Paulo, Brasil. Disponible en: <http://www.usp.br/green/downloads/6%20-%20Antonio%20Valdes.pdf>. Consultado en Abril de 2017.

Valeiro, A., R. Portocarrero, E. Ullivarri y J. Vallejo. 2017. Los Residuos de la Industria Sucro-Alcoholera Argentina. Serie: Gestión de residuos de la industria sucro-energética argentina. INTA - EEA Famallá. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_residuos_sucro_alcoholera_argentina.pdf

Vamvuka; D. y D. Zografos. 2004. Predicting the behaviour of ash from agricultural wastes during combustion. Fuel 83 (2004) 2051–2057. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236104001358>

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.diva-portal.org/smash/get/diva2:1027772/FULLTEXT01.pdf>

Yang, X., 2016. Development of Ash Deposition Prediction Models through the CFD Methods and the Ash Deposition Indice. A thesis submitted to the degree of Doctor of Philosophy. Department of Mechanical Engineering. University of Sheffield, South Yorkshire, England. Disponible en: <https://etheses.whiterose.ac.uk/17127/1/Thesis-xy-2017.pdf>

Zamora Rueda, G del H.; M.G. Mistretta; C.E. Gutierrez; M.A. Golato; D. Paz and G.J. Cárdenas. 2019. Energy characterization of sugarcane bagasse in Tucumán, Argentina. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT), volume 30, 1000–1004.

Zamora Rueda, G. del H., G. Mistretta, C. E. Gutierrez, F. L. Peralta, M. Golato, M. Ruiz, D. Paz y G. J. Cárdenas. 2016a. Características energéticas del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán y su análisis como combustible adicional de calderas bagaceras. Rev. Avance Agroindustrial 37 (3): pp. 14-18.

Zamora Rueda, Gimena; Gutierrez, Cynthia; Mistretta, Marina Gabriela; Peralta, Florencia; Golato, Marcos Antonio; Ruíz, Marcelo y Dora Paz. 2016b. Determinación del contenido de humedad del bagazo de caña de azúcar por medio de microondas". Revista industrial y agrícola de Tucumán, num.2: pp. 7-12.

Zevenhoven-Onderwater, M. 2001. Ash forming matter in biomass fuels. Abo. Kemisk-Tekniska Fakulteten, Finland: N. p., 2001. Disponible en: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20322697>

7. ANEXO

Tabla 7.1. Comparación de la composición de cenizas de carbón y depósitos de cenizas en paredes de agua de calderas. Adaptado de Borio and Levasseur, 2006.

Unidades ensayadas	1		2		3	
	Cenizas fundidas	Depósitos paredes de agua	Cenizas fundidas	Depósitos paredes de agua	Cenizas fundidas	Depósitos paredes de agua
% SiO ₂	47,0	33,3	50,2	55,1	49,7	41,8
% Al ₂ O ₃	26,7	18,0	16,9	14,6	16,5	15,8
% Fe ₂ O ₃	14,6	43,5	5,9	18,3	12,0	28,5
% CaO	2,2	1,2	12,8	7,2	6,5	9,0
% MgO	0,7	0,5	3,5	2,0	0,9	0,9
% Na ₂ O	0,4	0,2	0,6	0,5	1,1	0,6
% K ₂ O	2,3	1,6	0,8	0,6	1,5	0,9
% TiO ₂	1,3	0,8	0,9	0,8	1,1	0,7
% SO ₃	1,1	0,5	12,0	0,1	2,0	0,2

Tabla 7.2. Composición y temperaturas de fusión de cenizas de carbones y lignitos de USA, según Fernández Díez, 2000.

Tipo	Bituminoso	Bituminoso				Subbituminoso	Lignito
	Bajos volátiles	Altos volátiles					
Capa	Pocahontas 3	Nº 9	Nº 6	Pittsburgh	---	Antelope	Texas
Ubicación	W. Virginia	Ohio	Illinois	W. Virginia	Utah	Wyoming	Texas
Ceniza, % s.s.	12,3	14,1	17,4	10,9	17,1	6,6	12,8
Azufre, % s.s.	0,7	3,3	4,2	3,5	0,8	0,4	1,1
Análisis de ceniza, % en peso							
SiO ₂	60	47,3	47,5	37,6	6111,1	28,6	41,8
Al ₂ O ₃	30	23	17,9	20,1	211,6	11,7	13,6
TiO ₂	1,6	1	0,8	0,8	1,1	0,9	1,5
Fe ₂ O ₃	4	22,8	20,1	29,3	4,6	6,9	6,6
CaO	0,6	1,3	5,8	4,3	4,6	27,4	17,6
MgO	0,6	0,9	1	1,3	1	4,5	2,5
Na ₂ O	0,5	0,3	0,4	0,8	1	2,7	0,6
K ₂ O	1,5	2	1,8	1,6	1,2	0,5	0,1
SO ₃	1,1	1,2	4,6	4	2,9	14,2	14,6
P ₂ O ₅	0,1	0,2	0,1	0,2	0,4	2,3	0,1
FUSIBILIDAD DE LA CENIZA							
Temperatura de deformación inicial, °F							
Reductora	2.900+	2030	2000	2030	2180	2280	1975
Oxidante	2.900+	2420	2300	2265	2240	2275	2070
Temperatura de ablandamiento, °F							
Reductora	-	2450	2160	2175	2215	2290	2130
Oxidante	-	2605	2430	2385	2300	2285	2190
Temperatura hemisférica, °F							
Reductora	-	2480	2180	2225	2245	2295	2150
Oxidante	-	2620	2450	2450	2325	2290	2210
Temperatura de fluidificación, °F							
Reductora	-	2620	2320	2370	2330	2315	2240
Oxidante	-	2670	2610	2540	2410	2300	2290

Tabla 7.3. Efecto del Na₂O soluble en la resistencia de sinterización, según Fernández Diez, 2000.

Análisis ceniza	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Resistencia ceniza sinterizada	
Carbón bruto	45	180	21	0,8	8,8	0,9	1,6	2,4	17.300 psi	119,3 MPa
Carbón lavado	49,8	20,9	22,9	1,0	1,6	1,0	0,5	2,3	550 psi	3,8 MPa

Tabla 7.4. Análisis inmediato de tres carbones seleccionados (modificado de Fernández Diez, 2000).

	Humedad %	Materias volátiles%	Carbono fijo %	Poder calorífico Btu/lb	Ceniza %	Lb _{ceniza} /10 ⁶ Btu	Kg _{ceniza} /MJ	Kg _{ceniza} /GJ
Bituminoso alto en volátiles	3,1	42,2	45,4	9,4	12.770	7,4	0,00318	3,18
Subbituminoso	23,8	36,9	29,5	9,8	8.683	11,3	0,00486	4,86
Lignito	45,9	22,7	21,8	9,6	4.469	21,5	0,00925	9,25

Tabla 7.5. Análisis químico de cenizas de biomasa (% óxidos) en función de la temperatura de combustión. Adaptado de Vamvuka y Zografos, 2004.

Tipo de muestra	Temperatura (°C)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	SO ₃	Pérdidas por ignición
Orujo de olivo	600 (l)	21.4	4.4	7.9	3.7	33.0	0.6	2.7	0.3	2.3	0.2	0.4	4.4	18.7
	600 (u)	10.7	2.7	1.7	3.0	22.0	3.4	24.7	0.2	14.7	0.1	0.0	3.5	13.3
	780	15.0	3.1	2.3	4.2	28.7	4.1	19.9	0.2	11.6	0.1	0.0	2.5	8.3
	900	20.4	4.4	2.6	4.8	32.9	4.3	12.7	0.3	11.1	0.1	0.1	4.8	1.5
Madera de olivo	600 (l)	2.7	1.4	2.1	2.7	52.3	0.1	1.5	0.1	1.5	0.1	0.3	2.6	32.6
	600 (u)	8.1	1.6	0.7	2.4	32.8	2.9	19.9	0.0	8.5	0.1	0.0	2.1	20.9
	780	9.2	1.5	1.9	2.8	43.4	2.7	12.7	0.0	12.7	0.1	0.1	1.7	11.2
	900	10.0	1.2	1.0	3.5	44.2	2.6	7.2	0.0	17.0	0.1	0.0	6.8	6.4
Madera de citrus	600 (l)	2.5	1.5	0.8	1.7	52.9	0.3	1.3	0.1	2.6	0.1	0.1	1.8	34.3
	600 (u)	2.1	0.8	0.4	2.8	38.2	2.3	11.5	0.0	10.4	0.0	0.0	2.6	28.9
	780	6.0	1.7	1.3	4.8	53.2	2.2	5.1	0.2	6.8	0.0	0.1	2.4	16.2
	900	8.6	2.7	1.6	5.0	54.0	2.2	6.2	0.2	5.8	0.0	0.2	5.0	8.5
Brotos de vid	600	2.2	0.8	0.6	6.5	25.9	5.4	22.3	0.0	17.6	0.2	0.0	4.0	14.5
	780	4.0	0.9	0.7	12.2	33.6	3.7	15.1	0.0	18.9	0.3	0.0	3.5	7.1
	900	4.2	0.9	0.7	12.6	41.1	3.1	6.6	0.0	21.2	0.4	0.0	3.8	5.4

l, Muestra lixiviada ; u, Muestra sin lixiviar

Tabla 7.6. Contenidos generales de óxidos mayoritarios de cenizas de bagazos de caña de azúcar para diferentes regiones. Elaboración propia.

Lugar	Kaptanganj, India	Maui, Hawaii	Villa Clara, Cuba	Villa Clara, Cuba	Kensington, Australia	Kaptanganj, India	Florida, EEUU	Rajshahi, Bangladés	Adís Abeba, Etiopía	Paraíba, Brasil	San Pablo, Brasil	Durban, South Africa.	Kwazulu-Natal, South Africa	Tucumán, Argentina
Autor	Díaz Troyano, 2015	Miles, et al., 1995	García Figueredo, 2017	Martirena Hernández, et al., 1998	Massazza, 1998	Singh, et al., 2000	Hiltunen et al., 2008	Serker, et al., 2021	Hailu Tekle, 2011	Cavalcanti, et al., 2020.	Bragato, et al., 2012	Magasiner and De Kock, 1987	Chambon, et al., 2018	Fogliata, 1995
%SiO ₂	46,61	46,61	79,90	72,70	75,00	63,20	73,00	51,66	65,58	73,00	46,60	62,60	54,60	50,70
%Al ₂ O ₃	17,69	17,69	1,49	5,30	6,70	9,70	5,00	9,92	5,87	5,00	17,70	3,30	0,50	1,60 (*)
%TiO ₂	2,63	2,63	0,12	0,30	-	-	-	0,74	0,25	-	2,60	-	0,09	-
%Fe ₂ O ₃	14,14	14,14	2,11	3,90	6,30	5,40	2,50	2,32	4,32	2,50	14,10	2,40	0,70	-
%CaO	4,47	4,47	3,41	8,00	2,80	3,10	6,20	2,59	1,78	6,20	4,50	4,50	11,20	2,80
%MgO	3,33	3,33	2,03	2,90	1,10	2,90	2,10	1,44	1,23	2,10	3,30	-	10,20	1,20
%Na ₂ O	0,79	0,79	0,25	0,80	1,10	-	0,30	1,23	1,02	0,30	0,80	2,80	4,40	2,10
%K ₂ O	4,15	4,15	5,14	3,50	2,40	-	3,90	2,10	6,41	3,90	4,20	2,90	9,60	18,30
%SO ₃	2,08	2,08	0,38	0,10	-	2,90	-	-	0,18	-	2,10	-	2,20	6,50
%P ₂ O ₅	2,72	2,72	4,04	1,60	4,00	-	1,00	0,90	1,35	1,00	2,70	-	6,00	2,80
%TOTAL	98,61	98,61	98,87	99,10	99,40	87,20	94,00	72,90	87,99	94,00	98,6	78,50	99,49	86,0
% indet.	1,39	1,39	1,13	0,90	0,60	12,80	6,00	27,10	12,01	6,00	1,40	21,50	0,51	14,0

(*) Fogliata (1995), considera la suma de %Al₂O₃ + %Fe₂O₃.

Tabla 7.7. Contenidos generales de óxidos mayoritarios de cenizas de RAC de caña de azúcar para diferentes regiones. Elaboración propia.

AUTOR	Carvajal y Briseño, 2005	Junqueira Franco, et al., 2012	Da Silva Reis y Fungaro, 2010	Bizzo, et al., 2014	Jacome, 2014	Peláez Samaniego, 2007	Woytiuk, 2006	Moraes, et al., 2017	Martirena Hernández, et al., 2000	Nakashima, et al., 2017	Fogliata, 2008.
LUGAR	Cali, Colombia	Piracicaba, São Paulo, Brasil	Butantã, São Paulo, SP	São Paulo, SP	Serrana, São Paulo, Brasil.	Promissão, São Paulo, Brasil.	Island of Maui, Hawaii, EEUU.	Ilha Solteira, São Paulo, Brasil	Villa Clara, Cuba	Ibaté, São Paulo, Brasil	Tucumán, Argentina
%SiO ₂	-	-	54,55	40,81	45,49	52,62	67,12	36,50	59,06	52,37	57,40
%Al ₂ O ₃	-	-	3,36	9,64	10,59	15,8	2,05	2,80	4,75	6,76	-
%TiO ₂	-	-	0,17	1,17	0,66	-	0,29	-	0,34	1,15	-
%Fe ₂ O ₃	-	-	2,29	4,47	3,95	3,93	1,83	3,40	3,18	7,49	-
%CaO	0,71	8,46	6,77	21,15	8,02	5,76	6,50	16,40	19,59	10,82	2,10
%MgO	0,81	3,48	2,26	4,49	4,71	5,27	2,91	7,30	2,25	3,75	0,48
%Na ₂ O	4,90	-	-	0,54	1,00	0,12	0,50	0,20	0,73	0,94	0,49
%K ₂ O	1,08	8,50	6,83	8,03	14,66	7,8	9,48	7,90	4,75	10,01	0,42
%SO ₃	-	3,75	3,33	4,62	4,96	2,73	2,11	4,40	1,37	3,60	3,50
%P ₂ O ₅	-	1,18	0,80	1,77	5,52	-	1,91	4,00	1,67	2,14	0,09
%TOTAL	7,50	25,37	80,36	96,69	99,56	94,03	94,70	82,90	97,69	99,03	64,48
%indet.	92,50	74,63	19,64	3,31	0,44	5,97	5,30	17,10	2,31	0,97	35,52

Tabla 7.8. Características productivas de los principales cultivos de Argentina. Fuente: adaptado de Montico y Di Leo, 2009.

Cultivo	Superficie cosechada (ha)	%	Rendimiento promedio (t . ha ⁻¹)	Producción (t)	%
Arroz (<i>Oryza sativa</i> L.)	164.635	0,57	6,56	1.080.070	0,96
Avena (<i>Avena sativa</i>)	26.430	0,09	1,76	46.520	0,04
Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	335.815	1,16	3,77	1.266.620	1,13
Centeno (<i>Secale cereale</i>)	14.750	0,05	1,12	16.523	0,01
Maíz (<i>Zea mays</i>)	2.838.072	9,84	7,66	21.755.364	19,43
Mijo (<i>Panicum mileaceum</i>)	10.230	0,04	1,41	14.484	0,01
Sorgo granífero (<i>Sorghum bicolor</i> L.)	594.410	2,06	4,69	2.791.927	2,49
Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	5.589.230	19,38	2,60	14.547.960	13,00
Colza (<i>Brassica napus</i>)	8.986	0,03	1,23	11.040	0,01
Girasol (<i>Helianthus annuus</i>)	2.351.348	8,15	1,29	3.041.682	2,72
Lino (<i>Linum usitatissimum</i> L.)	28.400	0,10	1,19	34.065	0,03
Maní (<i>Arachis hypogaea</i>)	215.060	0,75	2,78	599.135	0,54
Soja (<i>Glycine max</i> L.)	15.981.264	55,42	2,97	47.482.786	42,42
Algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>)	393.005	1,36	1,38	543.382	0,49
Caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	284.639	0,99	65,75	18.715.140	16,72
Total	28.836.274	100,0		111.946.698	100,0

Tabla 7.9. Potencial de energía térmica que podría producirse con los **principales** residuos agrícolas de Tucumán, según Golato, 2018.

	Bagazo	RAC	Vinaza (65°Bx)	Poda citrus	Trigo	Maíz
R [t/zafra]	3.630.143	1.245.283	53.706	252.516	426.125	461.176
FR [t_{residuo}/t_{biomasa}]	0,23	0,22	3,46x10 ⁻³	0,20	4,54	1,14
W [%]	50	15	35	9	10	10
PCI [MJ/t]	6.850	11.160	7.500	14.730	17.300	17.540
E_{prod.} [MJ] x 10¹⁰	2,48	1,39	0,04	0,37	0,74	0,81
Uep [t_{biomasa}/t_{petróleo}]	6,11	3,75	5,58	2,84	2,42	2,38
Mtep	0,59	0,33	0,01	0,09	0,18	0,19
Tepha [Tep/ha]	2,16	1,25	0,04	2,17	1,44	2,96

Tabla 7.10. Potencial de EE que podría producirse con los principales residuos agrícolas de Tucumán, según Golato, 2018.

	Bagazo	RAC	Vinaza	Poda citrus	Trigo	Maíz
CE [t/MWh]	1,663	1,021	1,518	0,773	0,658	0,649
EE_{Bruta} [MWh]	2.182.888	1.219.700	35.379	326.670	924.421	1.015.136
EE_{net} [MWh]	2.117.401	1.183.080	34.318	316.870	896.688	984.682

Tabla 7.11. Índices globales del comportamiento de la fusibilidad de cenizas de bagazo de caña de azúcar, para diferentes autores consultados. Elaboración propia.

LUGAR	Kaptanganj, India	Maui, Hawái	Villa Clara, Cuba	Villa Clara, Cuba	Kensington, Australia	Kaptanganj, India	Florida, EEUU	Rajshahi, Bangladés	Adís Abeba, Etiopía	Paraíba, Brasil	San Pablo, Brasil	Durban, South Africa.	Kwazulu-Natal, South Africa	Tucumán, Argentina
AUTOR	Díaz Troyano, 2015	Miles, et al., 1995	García Figueredo, 2017	Martirena Hernández, et al., 1998	Massazza, 1998	Singh, et al., 2000	Hiltunen et al., 2008	Serker, et al., 2021	Hailu Tekle, 2011	Cavalcanti, et al., 2020.	Bragato, et al., 2012	Magasiner and De Kock, 1987	Chambon, et al., 2018	Fogliata, 1995
CA [%]	66,93	66,93	81,51	78,30	81,70	72,90	78,00	62,32	71,70	78,00	66,90	65,90	54,70	52,20
CB [%]	31,68	31,68	17,36	20,80	17,70	14,30	16,00	10,58	16,29	16,00	31,70	12,60	33,10	27,30
%CA	67,87	67,87	82,44	79,01	82,19	83,60	82,97	85,48	81,48	82,97	67,84	83,94	62,30	65,66
%CB	32,12	32,12	17,55	20,98	17,80	16,39	17,02	14,51	18,51	17,02	32,15	16,05	37,69	34,33
PCS [kJ/kg]	18.989,00	18.993,79	-	-	-	-	-	-	-	17.696,26	17.000,00	18.950,00	-	18.100,00
PCS [GJ/kg]	0,018989	0,018994	-	-	-	-	-	-	-	0,017696	0,017000	0,018950	-	0,018100
S [%]	0,08	0,08	0,02	0,00	-	0,12	-	-	0,01	-	0,08	-	0,05	0,11
S [g/kg]	8,33	8,33	1,52	0,40	-	11,61	-	-	0,72	-	8,41	-	5,21	0,12
S [mol/kg]	0,26	0,26	0,05	0,01	-	0,36	-	-	0,02	-	0,26	-	0,16	0,03
K [%]	0,34	0,34	0,43	0,29	0,20	-	0,32	0,17	0,53	0,32	0,35	0,24	0,13	15,19
K [mol/kg]	0,21	0,21	0,04	0,01	-	0,30	-	-	0,02	-	0,22	-	0,13	0,04
Si [g/kg]	217,85	217,85	373,44	339,79	350,54	295,39	341,19	241,45	306,51	341,19	217,80	292,58	255,19	236,96
Si [mol/kg]	7,76	7,76	13,30	12,10	12,48	10,52	12,15	8,60	10,92	12,15	7,76	10,42	9,09	8,44
Ca [g/kg]	31,95	31,95	24,37	57,18	20,01	22,16	44,31	18,51	12,72	44,31	32,16	32,16	63,61	20,02
Ca [mol/kg]	0,80	0,80	0,61	1,43	0,50	0,55	1,11	0,46	0,32	1,11	0,80	0,80	1,59	0,50
Cl [g/kg]	-	0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-	-	0,87
Cl [mol/kg]	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,00
CB/CA	0,47	0,47	0,21	0,27	0,22	0,20	0,21	0,17	0,23	0,21	0,47	0,19	0,61	0,52
IS	1,58	1,58	1,01	2,53	1,11	-	1,98	1,21	0,41	1,98	1,56	0,79	1,51	0,20
AI	2,60	2,60	-	-	-	-	-	-	-	2,37	2,94	3,01	-	11,27
Rs	0,04	0,04	-	-	-	0,02	-	-	-	-	0,04	-	0,03	0,06
Fu	2,34	2,34	1,15	1,14	-	-	-	-	1,69	-	2,37	-	5,39	10,67
I _{K-Si}	0,03	0,03	0,003	0,001	-	0,03	-	-	0,002	-	0,03	-	0,02	0,005
I _{Sulf.}	0,03	0,03	0,003	0,001	-	0,03	-	-	0,002	-	0,03	-	0,02	0,005
I _{S/Cl}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04
I _{Ca/Si}	0,10	0,10	0,05	0,12	0,04	0,05	0,09	0,05	0,03	0,09	0,10	0,08	0,19	0,59
I _{Erosión}	0,11	0,11	0,07	0,06	0,05	-	0,06	0,06	0,11	0,06	0,11	0,09	0,26	0,40
S _R	67,99	67,99	91,37	83,09	88,03	84,72	87,11	89,05	89,95	87,11	68,03	-	71,19	92,52

Tabla 7.12. Índices globales del comportamiento de la fusibilidad de cenizas de RAC de caña de azúcar, para diferentes autores consultados. Elaboración propia.

AUTOR	Carvajal y Briseño	Junqueira Franco, et al., 2012	Da SilDEPva Reis y Fungaro, 2010	Bizzo, et al., 2014	Jacome, 2014	Peláez Samaniego, 2007	Woytiuk, 2006	Moraes, et al., 2017	Martirena Hernández, et al., 2000	Nakashima, et al., 2017	Fogliata, 2008.
LUGAR	Cali, Colombia	Piracicaba, São Paulo, Brasil	Butantã, São Paulo, SP	São Paulo, SP	Serrana, São Paulo, Brasil.	Promissão, São Paulo, Brasil.	Island of Maui, Hawaii, EEUU.	Ilha Solteira, São Paulo, Brasil	Villa Clara, Cuba	Ibaté, São Paulo, Brasil	Tucumán, Argentina
CA [%]	-	-	58,08	51,62	56,74	68,42	69,46	39,30	64,15	60,28	57,40
CB [%]	7,50	25,37	22,28	45,07	42,82	25,61	25,24	43,60	33,54	38,75	7,08
%CA	0,00%	0,00%	72,27%	53,39%	56,99%	72,76%	73,35%	47,41%	65,67%	60,87%	89,02%
%CB	-	-	27,73%	46,61%	43,01%	27,24%	26,65%	52,59%	34,33%	39,13%	10,98%
PCS [kJ/kg]	4.740,47	-	-	17.100,00	17.100,00	17.740,00	17.150,00	-	-	18.100,00	14.310,00
PCS [GJ/kg]	0,0047	-	-	0,02	0,02	0,02	0,02	-	-	0,02	0,0143
S%	-	1,50	1,33	1,85	1,98	1,09	0,84	1,76	0,55	1,44	1,40
S [g/kg]	-	15,00	13,32	18,48	19,84	10,92	8,44	17,60	5,48	14,40	14,00
S [mol/kg]	-	0,47	0,42	0,58	0,62	0,34	0,26	0,55	0,17	0,45	0,44
K [%]	0,90	7,05	5,67	6,66	12,17	6,47	7,87	6,56	3,94	8,31	0,35
K [mol/kg]	0,002	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,0009
Si [g/kg]	-	0,00	254,91	190,70	212,57	245,89	313,64	170,56	275,98	244,72	268,22
Si [mol/kg]	-	0,00	9,08	6,79	7,57	8,75	11,17	6,07	9,83	8,71	9,55
Ca [g/kg]	5,08	60,47	48,39	151,18	57,33	41,17	46,46	117,23	140,03	77,34	15,01
Ca [mol/kg]	0,13	1,51	1,21	3,77	1,43	1,03	1,16	2,92	3,49	1,93	0,37
Cl [g/kg]	-	-	1,22	4,40	2,70	-	26,60	4,00	-	4,70	-
Cl [mol/kg]	-	-	0,03	0,12	0,08	-	0,75	0,11	-	0,13	-
CB/CA	-	-	0,38	0,87	0,75	0,37	0,36	1,11	0,52	0,64	0,12
IS	0,25	1,40	1,32	2,99	0,81	1,39	0,94	2,93	3,99	1,33	2,84
Al	12,61	-	-	5,01	9,16	4,46	5,82	-	-	6,05	0,64
Rs	-	-	0,51	1,61	1,50	0,41	0,31	1,95	0,29	0,93	0,17
Fu	-	-	2,62	7,48	11,82	2,96	3,63	8,99	2,87	7,04	0,11
I _{K-Si}	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I _{Sulf.}	-	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I _{S/Cl}	-	-	12,07	4,64	8,12	-	0,35	4,86	-	3,39	-
I _{Ca/Si}	-	-	0,13	0,56	0,19	0,12	0,10	0,48	0,36	0,22	0,04
I _{Erosión}	-	-	0,13	0,21	0,34	0,15	0,15	0,22	0,09	0,21	0,02
S _R	-	-	82,81	57,54	73,17	77,86	85,66	57,39	70,24	70,36	95,70

Tabla 7.13. Índices de comportamiento para carbón mineral bituminoso de alto y bajo volátiles. Elaboración propia.

	Carbón Mineral bituminoso de bajo volátiles.	Carbón Mineral bituminoso de altos volátiles.
CA [%]	91,60	71,30
CB [%]	8,40	28,70
%CA	91,60	71,30
%CB	8,40	28,70
PCS [kJ/kg]	29.689	29.689
PCS [GJ/kg]	0,03	0,03
S [%]	0,70	3,30
S [g/kg]	7,00	33,00
S [mol/kg]	0,22	1,03
K [%]	1,25	1,66
K [mol/kg]	0,32	0,42
Si [g/kg]	280,43	221,07
Si [mol/kg]	9,99	7,87
Ca [g/kg]	4,29	9,34
Ca [mol/kg]	0,11	0,23
Na [g/kg]	5,000	3,000
Na [mol/kg]	0,22	0,13
Cl [g/kg]	-	-
Cl [mol/kg]	-	-
CB/CA	0,09	0,40
IS	0,60	0,96
AI	0,67	0,77
Rs	0,06	1,33
Fu	0,18	0,93
I _{K-si}	0,03	0,05
I _{Sulf.}	0,03	0,05
I _{S/Cl}	-	-
I _{Ca/Si}	0,01	0,03
I _{Erosión}	0,03	0,05
S _R	92,02	65,42

Tabla 7.14. Resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica y energética de las muestras de “bagazo” analizadas. Elaboración propia.

ID Muestra	Fecha muestreo	W [%]	Ceniza [%]	CF [%]	SV [%]	S [%]	Cl [%]	PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]
M1-BZO	26/07/2019	54,01	6,06	77,97	15,98	0,28	0,05	17209	6045
M2-BZO	07/08/2019	50,24	4,53	77,61	17,87	0,18	0,04	17904	7077
M3-BZO	08/08/2019	49,24	3,70	79,21	17,10	0,18	0,11	17856	7239
M4-BZO	14/08/2019	51,45	5,58	77,42	17,02	0,15	0,06	17406	6609
M5-BZO	15/08/2019	44,52	5,72	77,35	16,94	0,20	0,06	17782	8112
M6-BZO	28/08/2019	50,08	9,41	73,66	16,93	0,14	0,08	16580	6477
M7-BZO	29/08/2019	55,51	3,49	78,43	18,09	0,20	0,08	18003	6106
M8-BZO	29/08/2019	57,16	4,60	77,41	17,99	0,20	0,08	17685	5660
M9-BZO	11/06/2018	53,37	4,06	78,54	17,41	0,31	0,15	17992	6516
M10-BZO	22/06/2018	49,31	4,80	77,66	14,54	0,20	0,08	18113	7362
M11-BZO	11/07/2018	58,05	3,58	80,00	16,38	0,21	0,09	17789	5529
M12-BZO	24/07/2018	50,40	8,13	76,69	14,10	0,71	0,13	17781	7008
M13-BZO	02/08/2018	50,75	13,07	71,27	15,66	0,18	0,06	16070	6129
M14-BZO	07/08/2018	48,72	5,37	77,27	17,26	0,20	0,11	17805	7322
M15-BZO	01/06/2018	59,58	8,32	75,44	16,25	0,10	0,07	17343	5083
M16-BZO	24/07/2017	50,18	6,57	76,63	16,80	0,65	0,29	17558	6929
M17-BZO	25/07/2017	53,71	3,93	78,42	17,66	0,51	0,23	18094	6497
M18-BZO	07/08/2017	50,22	5,16	78,57	16,27	0,23	0,12	17657	6961
M19-BZO	09/08/2017	53,51	14,88	70,03	15,09	0,31	0,15	17655	6397
M20-BZO	22/08/2017	49,02	5,48	77,87	16,65	0,16	0,16	17481	7101
M21-BZO	30/08/2017	57,59	14,62	70,57	14,81	0,04	0,12	15911	4880
M22-BZO	04/09/2017	53,34	5,24	78,15	16,61	0,08	0,10	17671	6379
M23-BZO	02/10/2017	52,50	10,82	72,74	16,44	0,08	0,20	17612	6544
M24-BZO	13/10/2017	56,36	7,40	75,07	17,53	0,15	0,14	17499	5745
M25-BZO	13/10/2017	55,77	9,52	74,84	15,64	0,19	0,09	17090	5687
M26-BZO	18/10/2017	51,01	6,20	76,87	16,93	0,09	0,12	17583	6782
M27-BZO	03/10/2017	51,08	14,02	70,25	15,72	0,05	0,18	17106	6585
M28-BZO	19/10/2017	52,68	6,02	76,74	17,24	0,23	0,10	17869	6602
M29-BZO	18/10/2017	53,37	5,77	76,91	17,31	0,15	0,10	17683	6382
M30-BZO	27/10/2016	52,05	7,65	76,06	16,32	0,12	0,14	17183	6404
Promedio	-	52,49	7,12	76,19	16,55	0,22	0,12	17.499	6.472
Rango	-	44,52 a 59,58	3,49 a 14,88	70,03 a 80,00	14,10 a 18,09	0,04 a 0,71	0,04 a 0,29	15.911 a 18.113	4.880 a 8.112
DE	-	3,30	3,35	2,74	1,01	0,16	0,06	529	696

Tabla 7.15. Resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica y energética de las muestras de RAC analizadas. Elaboración propia

ID Muestra	Fecha cosecha	Fecha muestreo	Días secado	W [%]	Ceniza [%]	CF [%]	SV [%]	S [%]	CI [%]	PCS [kJ/kg]	PCI [kJ/kg]
M1-RAC	03/06/2019	17/06/2019	14	10,82	23,13	14,83	62,04	0,48	0,22	14.957	12.156
M2-RAC	08/06/2019	12/06/2019	4	40,42	23,13	14,83	62,04	0,64	0,12	15.052	7.366
M3-RAC	17/07/2019	19/07/2019	3	59,87	16,42	16,21	67,37	0,51	0,15	15.003	4.108
M4-RAC	08/08/2019	20/08/2019	12	11,70	20,89	15,29	63,82	0,67	0,23	16.408	13.267
M5-RAC	12/08/2019	22/08/2019	10	16,58	14,61	16,95	68,44	0,79	0,16	15.649	11.695
M6-RAC	19/08/2019	22/08/2019	3	56,57	20,89	15,29	63,82	0,59	0,16	15..895	5.061
M7-RAC	18/08/2019	17/09/2019	30	9,04	7,72	18,31	73,97	0,64	0,17	16.354	13.530
M8-RAC	01/10/2019	06/10/2019	5	49,85	11,48	16,67	71,90	0,17	0,52	16.578	6.501
M9-RAC	01/09/2019	07/09/2019	6	28,57	15,57	16,83	68,31	0,40	0,37	15.374	9.475
M10-RAC	07/07/2019	23/08/2019	47	9,05	10,22	17,29	72,50	0,54	0,23	16.384	13.586
M11-RAC	15/08/2019	03/10/2019	49	4,84	11,39	16,79	71,92	0,56	0,17	16.211	14.178
M12-RAC	21/08/2019	25/08/2019	4	38,36	9,50	18,52	71,89	0,55	0,36	17.353	9.012
M13-RAC	07/07/2018	11/07/2018	4	28,50	18,78	16,20	65,01	0,24	0,16	16.652	10.432
M14-RAC	07/07/2018	08/07/2018	1	71,90	12,96	17,10	69,88	0,27	0,13	16.096	2.439
M15-RAC	08/07/2018	12/07/2018	4	27,21	14,29	16,55	69,19	0,20	0,13	17.539	11.266
M16-RAC	07/07/2018	16/07/2018	9	18,67	10,96	16,99	72,05	0,36	0,20	16.924	12.338
M17-RAC	22/07/2018	30/07/2018	8	22,90	10,69	17,53	71,78	0,33	0,23	16.787	11.460
M18-RAC	02/08/2018	07/08/2018	5	27,19	14,75	16,27	68,98	0,51	0,08	16.406	10.449
M19-RAC	06/06/2018	11/06/2018	5	41,31	11,19	17,33	71,48	0,09	0,23	17.327	8.462
M20-RAC	06/06/2018	11/06/2018	5	38,96	10,40	17,24	72,36	0,10	0,29	17.437	8.958
M21-RAC	12/06/2018	13/07/2018	31	4,46	8,79	19,06	72,15	0,29	0,28	17.512	15.454
M22-RAC	13/06/2018	22/06/2018	9	14,57	12,80	16,71	70,48	0,15	0,18	17.318	13.440
M23-RAC	14/06/2018	22/06/2018	8	11,49	12,16	17,06	70,78	0,22	0,30	17.428	14.103
M24-RAC	15/06/2018	20/06/2018	5	47,32	10,30	17,53	72,16	0,14	0,33	17.298	7.324
M25-RAC	01/06/2018	21/06/2018	20	9,98	8,00	18,91	73,08	0,27	0,21	16.578	13.569
M26-RAC	15/06/2018	22/06/2018	7	25,24	8,08	19,34	72,58	0,27	0,23	16.756	10.989
M27-RAC	17/06/2018	22/06/2018	5	36,76	8,54	17,98	73,49	0,20	0,24	16.219	8.584
M28-RAC	10/07/2018	24/08/2018	45	5,22	9,87	16,62	73,50	0,55	0,18	16.596	14.457
M29-RAC	25/07/2018	04/09/2018	41	5,22	9,45	18,17	72,39	0,22	0,08	16.462	14.325
M30-RAC	18/07/2018	30/08/2018	43	5,53	11,39	16,79	71,82	0,26	0,09	16.696	14.515
Promedio	-	-	15	25,94	12,95	17,04	70,04	0,37	0,21	16.508	10.750
Rango	-	-	1 a	4,46 a	7,72 a	14,83 a	62,04 a	0,09 a	0,08 a	14..957 a	2.439 a
	-	-	49	71,90	23,13	19,34	73,97	0,79	0,52	17.539	15.454
DE	-	-	-	18,63	4,48	1,15	3,47	0,20	0,10	753	3.394

Tabla 7.16. Resultados de la composición de las cenizas de bagazo de caña de azúcar analizadas en este estudio. Elaboración propia.

ELEMENTO [UNIDAD]	RESULTADOS DE ANÁLISIS EN MUESTRAS DE BAGAZO (b.s. sobre ceniza)										
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	Prom. [g/kg]	Prom. [%]
Si [g/kg]	220,0	260,0	210,0	233,0	257,0	228,0	197,0	287,0	278,00	241,1	68,9%
Al [g/kg]	54,0	35,0	39,0	55,0	34,0	22,0	36,0	28,0	39,00	38,0	10,9%
Ti [g/kg]	2,3	2,5	1,7	1,9	2,1	2,5	1,5	1,2	2,60	2,0	0,3%
Fe [g/kg]	10,0	15,0	16,0	5,5	2,1	6,1	4,8	4,1	7,00	7,8	2,2%
Ca [g/kg]	6,9	5,3	2,5	3,2	5,3	45,0	6,5	12,0	12,00	11,0	3,1%
Mg [g/kg]	2,5	6,3	0,9	1,2	1,1	11,0	3,4	4,1	2,50	3,7	1,0%
Na [g/Kg]	2,4	2,7	1,0	1,5	1,1	5,9	2,6	4,1	1,90	2,6	0,7%
K [g/kg]	14,0	24,0	10,0	7,6	11,0	187,0	38,0	71,0	15,00	42,2	12,0%
S [g/kg]	1,7	1,7	2,3	1,1	1,3	1,9	1,9	2,3	1,86	1,8	0,5%
P [g/kg]	0,05	0,048	0,051	0,047	0,045	0,051	0,052	0,046	0,0440	0,1	0,0%
TOTAL [g]	313,8	352,6	283,4	310,1	315,0	509,4	291,8	413,9	359,91	350,0	100,0%

Tabla 7.17. Resultados de la composición de las cenizas de RAC analizadas en este estudio. Elaboración propia.

ELEMENTO [UNIDAD]	RESULTADOS DE ANÁLISIS EN MUESTRAS DE RAC (b.s. sobre ceniza)										
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	Prom. [g/kg]	Prom. [%]
Si [g/kg]	225,9	249,1	236,9	169,3	265,6	281,0	316,8	316,0	256,7	257,5	55,44
Al [g/kg]	4,4	4,2	4,1	4,5	5,1	5,7	4,3	4,2	4,1	4,5	0,97
Ti [g/kg]	1,3	1,0	1,1	1,2	1,0	0,8	0,9	1,4	1,4	1,1	0,12
Fe [g/kg]	5,7	2,9	3,5	4,2	4,1	3,7	3,0	3,9	5,1	4,0	0,87
Ca [g/kg]	47,9	39,3	69,9	57,0	53,8	54,7	34,2	63,0	60,1	53,3	11,48
Mg [g/kg]	13,9	19,6	11,4	8,6	19,5	18,3	21,9	7,8	12,9	14,9	3,20
Na [g/Kg]	5,8	7,7	5,8	5,7	5,9	3,1	8,5	4,3	4,8	5,7	1,23
K [g/kg]	183,2	160,3	116,6	58,3	151,1	89,5	106,1	91,1	115,4	119,1	25,63
S [g/kg]	1,2	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,6	0,8	1,0	0,8	0,18
P [g/kg]	5,0	2,6	3,1	3,7	3,6	3,2	2,6	3,4	4,5	3,5	0,76
TOTAL [g]	494,2	487,2	453,1	313,4	510,5	460,8	498,9	495,9	466,1	464,5	100,00

Tabla 7.18. Contenidos de óxidos mayoritarios en muestras seleccionadas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

Óxidos	MUESTRAS SELECCIONADAS – BAGAZO (b.s. sobre ceniza)													
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	Promedio	Valor Máx	Valor Mín	DE	Promedio corregido
%SiO ₂	47,75	68,00	45,23	51,11	55,89	50,33	44,03	64,04	61,91	54,25	68,00	44,03	8,66	75,38
%Al ₂ O ₃	10,35	8,08	10,35	10,65	6,53	4,29	7,10	5,52	7,67	7,84	10,65	4,29	2,26	10,89
%TiO ₂	0,38	0,42	0,28	0,32	0,35	0,41	0,25	0,21	0,43	0,34	0,43	0,21	0,08	0,47
%Fe ₂ O ₃	1,45	2,62	2,30	0,81	0,31	0,90	0,72	0,54	1,04	1,19	2,62	0,31	0,79	1,65
%CaO	0,98	0,91	0,35	0,46	0,75	6,50	0,95	1,75	1,75	1,60	6,50	0,35	1,90	2,22
%MgO	0,42	1,28	0,15	0,20	0,19	1,88	0,59	0,71	0,43	0,65	1,88	0,15	0,58	0,90
%Na ₂ O	0,33	0,44	0,14	0,21	0,15	0,82	0,37	0,58	0,27	0,37	0,82	0,14	0,22	0,51
%K ₂ O	1,71	3,53	1,21	0,94	1,35	23,24	4,78	8,92	1,88	5,29	23,24	0,94	7,20	7,34
%SO ₃	0,42	0,43	0,58	0,28	0,32	0,47	0,48	0,58	0,47	0,45	0,58	0,28	0,10	0,62
%P ₂ O ₅	0,011	0,011	0,012	0,011	0,010	0,012	0,012	0,011	0,010	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02
%TOTAL	63,80	85,72	60,60	64,99	65,84	88,85	59,28	82,84	75,86	71,97	88,85	59,28	11,46	100,00
%Ind.	36,20	14,28	39,40	35,01	34,16	11,15	40,72	17,16	24,14	28,03	40,72	11,15	11,46	

Tabla 7.19. Contenidos de óxidos mayoritarios en muestras seleccionadas de RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Elaboración propia.

Óxidos	MUESTRAS SELECCIONADAS – RAC (b.s. sobre ceniza)													
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	Promedio	Valor Máx.	Valor Mín.	DE	Promedio Corregido
%SiO ₂	48,35	53,29	50,68	36,23	56,82	60,13	67,79	67,61	54,92	55,09	67,79	36,23	9,81	66,57%
%Al ₂ O ₃	0,83	0,78	0,77	0,85	0,95	1,08	0,81	0,80	0,77	0,85	1,08	0,77	0,10	1,03%
%TiO ₂	0,22	0,16	0,18	0,19	0,16	0,14	0,15	0,23	0,24	0,18	0,24	0,14	0,04	0,22%
%Fe ₂ O ₃	0,81	0,42	0,50	0,60	0,59	0,53	0,43	0,56	0,73	0,58	0,81	0,42	0,13	0,70%
%CaO	6,70	5,49	9,79	7,98	7,53	7,66	4,78	8,82	8,41	7,46	9,79	4,78	1,59	9,02%
%MgO	2,30	3,26	1,88	1,42	3,23	3,03	3,63	1,30	2,14	2,47	3,63	1,30	0,85	2,98%
%Na ₂ O	0,78	1,03	0,78	0,76	0,79	0,42	1,15	0,58	0,65	0,77	1,15	0,42	0,22	0,93%
%K ₂ O	22,06	19,31	14,05	7,02	18,20	10,78	12,78	10,97	13,90	14,34	22,06	7,02	4,74	17,33%
%SO ₃	0,29	0,15	0,18	0,21	0,21	0,19	0,15	0,20	0,26	0,20	0,29	0,15	0,05	0,25%
%P ₂ O ₅	1,15	0,59	0,70	0,85	0,83	0,74	0,60	0,78	1,03	0,81	1,15	0,59	0,18	0,98%
TOTAL %	83,49	84,49	79,53	56,13	89,33	84,68	92,27	91,84	83,05	82,76	92,27	56,13	10,86	100,00%
%Ind.	16,51	15,51	20,47	43,87	10,67	15,32	7,73	8,16	16,95	17,24	43,87	7,13	89,14	-

Tabla 7.20. Índices de comportamiento de la fusibilidad de cenizas de bagazo seleccionadas para este estudio. Elaboración propia.

Índices	MUESTRAS DE CENIZAS DE BAGAZO SELECCIONADAS												
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	Promedio	Valor Mín.	Valor Máx.	DE
CA [%]	58,48	76,50	55,85	62,08	62,77	55,03	51,38	69,76	70,01	62,43	51,38	76,50	8,25
CB [%]	5,32	9,23	4,74	2,91	3,07	33,82	7,90	13,08	5,84	9,55	2,91	33,82	9,65
%CA	91,66	89,24	92,17	95,53	95,33	61,94	86,68	84,21	92,30	87,67	0,62	0,96	10,34
%CB	8,34	10,76	7,83	4,47	4,67	38,06	13,32	15,79	7,70	12,33	0,04	0,38	10,34
CB/CA	0,09	0,12	0,08	0,05	0,05	0,61	0,15	0,19	0,08	0,159	0,05	0,61	0,18
IS	0,687	0,549	0,373	0,579	0,627	0,348	0,299	0,259	1,015	0,526	0,26	1,01	0,24
AI	1,136	2,194	0,798	0,650	0,886	14,035	3,076	5,440	1,183	3,266	0,65	14,03	4,32
R _s	0,016	0,026	0,020	0,005	0,006	0,119	0,030	0,045	0,016	0,031	0,01	0,12	0,03
F _u	0,186	0,480	0,114	0,054	0,073	14,789	0,791	1,781	0,179	0,917	0,05	14,79	4,81
I _{K-Si}	0,046	0,066	0,034	0,023	0,031	0,589	0,139	0,178	0,039	0,127	0,02	0,59	0,18
I _{sulf.}	0,045	0,066	0,034	0,023	0,031	0,585	0,137	0,176	0,039	0,126	0,02	0,58	0,18
I _{S/Cl}	1,331	2,131	2,327	1,107	1,357	3,182	1,138	2,086	1,515	1,797	1,11	3,18	0,69
I _{Ca/Si}	0,022	0,014	0,008	0,010	0,014	0,138	0,023	0,029	0,030	0,032	0,01	0,14	0,04
I _{erosión}	0,059	0,079	0,040	0,031	0,036	0,621	0,155	0,195	0,047	0,140	0,03	0,62	0,19
S _R	94,37	93,40	94,16	97,21	97,82	84,43	95,13	95,53	95,05	94,12	84,43	97,82	3,90

Tabla 7.21. Parámetros adicionales utilizados en las determinaciones de los índices de comportamiento de las cenizas de bagazo de caña de azúcar. Elaboración propia.

Índices	MUESTRAS DE CENIZAS DE BAGAZO SELECCIONADAS												
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	Promedio	Valor Mín.	Valor Máx.	DE
PCS [kJ/kg]	17.941	18.135	16.894	17.641	16.896	17.145	16.735	17.455	18.149	17.443	16.735	18.149	554
PCS [GJ/kg]	0,018	0,018	0,017	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,018	0,017	0,02	0,02	0,00
S%	0,171	0,21	0,23	0,12	0,13	0,19	0,19	0,24	0,19	0,19	0,12	0,24	0,04
S [g/kg]	1,69	1,73	2,31	1,12	1,29	1,87	1,92	2,32	1,86	1,79	1,12	2,32	0,40
S [mol/kg]	0,053	0,054	0,072	0,035	0,040	0,058	0,060	0,072	0,058	0,06	0,03	0,07	0,01
K [%]	1,42	2,93	1,01	0,78	1,12	19,29	3,97	7,40	1,56	4,39	0,78	19,29	5,97
K [mol/kg]	0,36	0,61	0,26	0,19	0,28	4,78	0,97	1,82	0,38	1,07	0,19	4,78	1,48
Si [g/kg]	223,17	317,81	211,40	238,90	261,21	235,25	205,79	299,30	289,37	253,58	205,79	317,81	40,46
Si [mol/kg]	7,83	9,26	7,48	8,30	9,15	8,12	7,02	10,22	9,90	8,59	7,02	10,22	1,10
Ca [g/kg]	6,90	5,30	2,50	3,20	5,30	45,00	6,50	12,00	12,00	10,97	2,50	45,00	13,20
Ca [mol/kg]	0,172	0,132	0,062	0,080	0,132	1,123	0,162	0,299	0,299	0,274	0,06	1,12	0,33
Na [g/kg]	2,400	2,700	1,000	1,500	1,100	5,900	2,600	4,100	1,900	2,578	1,00	5,90	1,57
Na [mol/kg]	0,104	0,117	0,043	0,065	0,048	0,257	0,113	0,178	0,083	0,11	0,04	0,26	0,07
Cl [g/kg]	1,400	0,900	1,100	1,120	1,050	0,650	1,870	1,230	1,360	1,19	0,65	1,87	0,34
Cl [mol/kg]	0,039	0,025	0,031	0,032	0,030	0,018	0,053	0,035	0,038	0,03	0,02	0,05	0,01

Tabla 7.22. Índices de comportamiento de la fusibilidad de cenizas de RAC seleccionadas para este estudio. Elaboración propia.

Índices	MUESTRAS DE CENIZAS DE RAC SELECCIONADAS												
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	Promedio	Valor Mín.	Valor Máx.	DE
CA [%]	49,39	54,24	51,64	37,27	57,93	61,34	68,75	68,64	55,93	56,13	37,27	68,75	9,82
CB [%]	34,09	30,26	27,88	18,86	31,40	23,34	23,52	23,20	27,12	26,63	18,86	34,09	4,82
%CA	59,16	64,19	64,94	66,40	64,85	72,44	74,51	74,74	67,35	67,62	59,16	74,74	5,26
%CB	40,84	35,81	35,06	33,60	35,15	27,56	25,49	25,26	32,65	32,38	25,26	40,84	5,26
CB/CA	0,69	0,56	0,54	0,51	0,54	0,38	0,34	0,34	0,48	0,49	0,34	0,69	0,12
IS	0,39	0,43	0,79	1,21	0,57	0,95	0,60	0,88	0,72	0,73	0,39	1,21	0,26
AI	16,34	14,28	10,16	5,66	14,38	7,57	10,61	8,25	10,34	10,81	5,66	16,34	3,53
Rs	0,16	0,07	0,08	0,09	0,09	0,06	0,04	0,05	0,10	0,08	0,04	0,16	0,03
Fu	68,54	95,36	56,63	23,05	61,40	28,49	39,30	24,76	34,25	47,98	23,05	95,36	24,31
I _{K-Si}	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01
I _{Sulf.}	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
I _{S/Cl}	1,34	0,63	0,60	1,57	0,48	0,72	0,74	1,09	0,56	0,86	0,48	1,57	0,39
I _{Ca/Si}	0,15	0,11	0,34	0,15	0,25	0,06	0,08	0,35	0,06	0,17	0,06	0,35	0,11
I _{Erosión}	0,47	0,38	0,29	0,21	0,33	0,19	0,21	0,17	0,26	0,28	0,17	0,47	0,10
S _R	83,12	85,32	80,64	78,36	83,33	84,28	88,47	86,37	82,96	83,65	78,36	88,47	2,99

Tabla 7.23. Parámetros adicionales utilizados en las determinaciones de los índices de comportamiento de las cenizas de RAC de caña de azúcar.
Elaboración propia.

MUESTRAS	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	Promedio	Valor Mín.	Valor Máx.	DE
PCS [kJ/kg]	13.980	14.250	14.600	13.753	13.213	14.786	13.122	13.990	14.079	13.975	13.122	14.786	558
PCS [GJ/kg]	0,014	0,014	0,015	0,014	0,013	0,015	0,013	0,014	0,014	0,014	0,013	0,015	0,001
S [%]	0,23	0,12	0,14	0,17	0,17	0,15	0,12	0,16	0,21	0,16	0,12	0,23	0,04
S [g/kg]	2,30	1,19	1,41	1,71	1,68	1,50	1,21	1,58	2,06	1,63	1,19	2,30	0,37
S [mol/kg]	0,07	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,05	0,04	0,07	0,01
K [%]	0,79	0,69	0,50	0,25	0,65	0,39	0,46	0,39	0,50	0,51	0,25	0,79	0,17
K [mol/kg]	0,20	0,18	0,13	0,06	0,17	0,10	0,12	0,10	0,13	0,13	0,06	0,20	0,04
Si [g/kg]	225,92	249,03	236,85	169,30	265,51	280,97	316,78	315,94	256,64	257,44	169,30	316,78	45,85
Si [mol/kg]	8,04	8,87	8,43	6,03	9,45	10,00	11,28	11,25	9,14	9,17	6,03	11,28	1,63
Ca [g/kg]	47,92	39,25	69,95	57,03	53,86	54,73	34,18	63,04	60,14	53,34	34,18	69,95	11,33
Ca [mol/kg]	1,20	0,97	2,88	0,92	2,34	0,58	0,87	3,94	0,59	1,59	0,58	3,94	1,19
Na [g/kg]	0,58	0,77	0,58	0,57	0,59	0,31	0,85	0,43	0,48	0,57	0,31	0,85	0,16
Na [mol/kg]	0,03	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01
Cl [g/kg]	1,90	2,10	2,60	1,20	3,90	2,30	1,80	1,60	4,10	2,39	1,20	4,10	1,00
Cl [mol/kg]	0,05	0,06	0,07	0,03	0,11	0,06	0,05	0,05	0,12	0,07	0,03	0,12	0,03

Tabla 7.24. Composición real de las muestras de cenizas sintéticas para el estudio de sensibilidad de los componentes. Elaboración propia.

MUESTRA	COMPONENTES ÁCIDOS (PUROS)						COMPONENTES BÁSICOS (PUROS)																TOTAL MEZCLA			
	Al ₂ O ₃		SiO ₂		TiO ₂		Fe ₂ O ₃		CaO		MgO		Na ₂ O		K ₂ O				P ₂ O ₅			SO ₃				
	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	KNO ₃ [μl]	KNO ₃ [g]	K ₂ O [g]	K ₂ O [%]	KH ₂ PO ₄ [g]	P ₂ O ₅ [g]	P ₂ O ₅ [%]	H ₂ SO ₄ [μl]		H ₂ SO ₄ [g]	SO ₃ [g]	SO ₃ [%]
M1	0,2538	12,26	0,2540	12,27	0,2500	12,08	0,2528	12,21	0,2536	12,25	0,2557	12,35	0,2554	12,34	0,0	0,0000	0,0732	3,54	0,2555	0,0582	2,81	26,0	0,0476	0,039	1,88	2,07
M2	0,3760	17,14	0,2542	11,59	0,2506	11,42	0,2543	11,59	0,2520	11,49	0,2556	11,65	0,2560	11,67	0,0	0,0000	0,0734	3,35	0,2562	0,0584	2,66	26,0	0,0476	0,039	1,77	2,19
M3	0,5025	21,68	0,2532	10,92	0,2530	10,92	0,2523	10,89	0,2533	10,93	0,2532	10,92	0,2588	11,17	0,0	0,0000	0,0724	3,12	0,2525	0,0575	2,48	26,0	0,0476	0,039	1,68	2,32
M4	0,2563	11,01	0,5075	21,79	0,2541	10,91	0,2505	10,76	0,2569	11,03	0,2550	10,95	0,2517	10,81	0,0	0,0000	0,0739	3,18	0,2580	0,0588	2,52	26,0	0,0476	0,039	1,67	2,33
M5	0,2563	8,34	1,2560	40,87	0,2555	8,31	0,2502	8,14	0,2548	8,29	0,2538	8,26	0,2510	8,17	0,0	0,0000	0,0737	2,40	0,2570	0,0585	1,90	26,0	0,0476	0,039	1,26	3,07
M6	0,2568	6,71	2,0023	52,33	0,2533	6,62	0,2559	6,69	0,2538	6,63	0,2535	6,62	0,2553	6,67	0,0	0,0000	0,0736	1,92	0,2568	0,0585	1,53	26,0	0,0476	0,039	1,02	3,83
M7	0,2517	13,69	0,2549	13,87	0,0251	1,37	0,2508	13,64	0,2539	13,81	0,2538	13,81	0,2551	13,88	0,0	0,0000	0,0728	3,96	0,2539	0,0578	3,15	26,0	0,0476	0,039	2,11	1,84
M8	0,2534	13,08	0,2512	12,97	0,1001	5,17	0,2545	13,14	0,2532	13,07	0,2818	14,55	0,2535	13,08	0,0	0,0000	0,0719	3,71	0,2508	0,0571	2,95	26,0	0,0476	0,039	2,00	1,94
M9	0,2539	13,62	0,2558	13,73	0,0560	3,00	0,2502	13,42	0,2520	13,52	0,2503	13,43	0,2550	13,68	0,0	0,0000	0,0721	3,87	0,2517	0,0573	3,08	26,0	0,0476	0,039	2,08	1,86
M10	0,2560	13,74	0,2538	13,63	0,2550	13,69	0,0520	2,79	0,2512	13,49	0,2511	13,48	0,2528	13,57	0,0	0,0000	0,0722	3,88	0,2520	0,0574	3,08	26,0	0,0476	0,039	2,09	1,86
M11	0,2530	13,23	0,2550	13,33	0,2540	13,28	0,1008	5,27	0,2507	13,11	0,2560	13,38	0,2527	13,21	0,0	0,0000	0,0722	3,77	0,2519	0,0574	3,00	26,0	0,0476	0,039	2,03	1,91
M12	0,2539	12,80	0,2533	12,77	0,2510	12,65	0,1752	8,83	0,2529	12,75	0,2530	12,75	0,2501	12,60	0,0	0,0000	0,0733	3,70	0,2559	0,0583	2,94	26,0	0,0476	0,039	1,96	1,98
M13	0,2559	13,65	0,2545	13,58	0,2558	13,65	0,2523	13,46	0,0541	2,89	0,2550	13,61	0,2508	13,38	0,0	0,0000	0,0736	3,93	0,2568	0,0585	3,12	26,0	0,0476	0,039	2,07	1,87
M14	0,2549	13,11	0,2579	13,27	0,2519	12,96	0,2521	12,97	0,1252	6,44	0,2534	13,03	0,2517	12,95	0,0	0,0000	0,0740	3,81	0,2582	0,0588	3,03	26,0	0,0476	0,039	2,00	1,94
M15	0,2550	12,49	0,2520	12,34	0,2555	12,52	0,2529	12,39	0,2248	11,01	0,2561	12,55	0,2523	12,36	0,0	0,0000	0,0728	3,56	0,2539	0,0578	2,83	26,0	0,0476	0,039	1,90	2,04
M16	0,2540	13,78	0,2509	13,62	0,2534	13,75	0,2501	13,57	0,2544	13,81	0,0271	1,47	0,2504	13,59	0,0	0,0000	0,0755	4,10	0,2636	0,0601	3,26	26,0	0,0476	0,039	2,11	1,84
M17	0,2515	13,42	0,2570	13,71	0,2507	13,37	0,2567	13,69	0,2568	13,70	0,0542	2,89	0,2548	13,59	0,0	0,0000	0,0728	3,88	0,2539	0,0578	3,09	26,0	0,0476	0,039	2,07	1,87
M18	0,2501	12,94	0,2530	13,09	0,2510	12,98	0,2505	12,96	0,2544	13,16	0,1255	6,49	0,2560	13,24	0,0	0,0000	0,0728	3,77	0,2540	0,0579	2,99	26,0	0,0476	0,039	2,01	1,93
M19	0,2533	13,90	0,2508	13,76	0,2507	13,76	0,2563	14,06	0,2545	13,96	0,2516	13,81	0,0085	0,47	0,0	0,0000	0,0739	4,06	0,2579	0,0588	3,22	26,0	0,0476	0,039	2,13	1,82
M20	0,2554	13,94	0,2599	14,18	0,2518	13,74	0,2574	14,05	0,2552	13,93	0,2504	13,67	0,0131	0,71	0,0	0,0000	0,0717	3,91	0,2502	0,0570	3,11	26,0	0,0476	0,039	2,12	1,83
M21	0,2529	13,82	0,2555	13,97	0,2566	14,03	0,2500	13,67	0,2530	13,83	0,2537	13,87	0,0179	0,98	0,0	0,0000	0,0719	3,93	0,2510	0,0572	3,13	26,0	0,0476	0,039	2,12	1,83
M22	0,2504	11,99	0,2532	12,13	0,2515	12,05	0,2577	12,34	0,2526	12,10	0,2540	12,16	0,2545	12,19	20,0	0,0203	0,0919	4,40	0,2550	0,0574	2,75	26,0	0,0476	0,039	1,86	2,09
M23	0,2516	8,17	0,2523	8,19	0,2550	8,28	0,2520	8,18	0,2550	8,28	0,2543	8,26	0,2557	8,30	1000,0	1,0130	1,0598	34,41	0,2518	0,0577	1,88	26,0	0,0476	0,039	1,26	3,08
M24	0,2505	7,51	0,2554	7,66	0,2531	7,59	0,2541	7,62	0,2517	7,55	0,2529	7,59	0,2578	7,73	1250,0	1,2663	1,2709	38,12	0,2535	0,0293	0,88	26,0	0,0476	0,039	1,16	3,33
M25	0,2504	12,93	0,2527	13,05	0,2516	12,99	0,2535	13,09	0,2527	13,05	0,2532	13,07	0,2549	13,16	0,0	0,0000	0,1452	7,50	0,1288	0,1155	5,96	26,0	0,0476	0,039	2,01	1,94
M26	0,2550	10,98	0,2582	11,11	0,2507	10,79	0,2527	10,88	0,2516	10,83%	0,2575	11,08	0,2518	10,84	0,0	0,0000	0,2172	9,35	0,5068	0,1727	7,43	26,0	0,0476	0,039	1,67	2,32
M27	0,2543	9,92	0,2557	9,98	0,2501	9,76	0,2523	9,84	0,2502	9,76%	0,2504	9,77	0,2535	9,89	0,0	0,0000	0,0723	2,82	0,7580	0,0575	2,24	26,0	0,0476	0,039	1,52	2,56
M28	0,2505	12,29	0,2536	12,44	0,2510	12,32	0,2575	12,63	0,2531	12,42%	0,2505	12,29	0,2516	12,34	0,0	0,0000	0,0727	3,57	0,2524	0,0578	2,83	12,0	0,0220	0,018	0,88	2,04
M29	0,2560	12,30	0,2514	12,07	0,2526	12,13	0,2517	12,09	0,2548	12,24%	0,2546	12,23	0,2506	12,04	0,0	0,0000	0,0743	3,57	0,2536	0,0591	2,84	38,0	0,0695	0,057	2,73	2,08
M30	0,2526	11,95	0,2501	11,84	0,2554	12,09	0,2597	12,29	0,2558	12,11%	0,2521	11,93	0,2533	11,99	0,0	0,0000	0,0743	3,52	0,2593	0,0591	2,80	50,0	0,0915	0,075	3,53	2,11

Tabla 7.25. Fusibilidad de cenizas sintéticas para estudio de sensibilidad de los óxidos mayoritarios trabajando en AO. Elaboración propia.

Atmósfera oxidante				
Muestras	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]
M1	1020	1195	1260	1405
M2	1060	1245	1300	1475
M3	1065	1305	1365	1500
M4	1065	1125	1170	1405
M5	1005	1105	1130	1295
M6	1020	1100	1110	1465
M7	1120	1335	1390	1435
M8	1105	1310	1335	1500
M9	1090	1315	1365	1475
M10	1155	1205	1230	1495
M11	1120	1205	1235	1470
M12	1160	1245	1320	1495
M13	1070	1215	1265	1475
M14	1055	1185	1240	1500
M15	1090	1210	1240	1500
M16	1095	1210	1250	1475
M17	1085	1210	1260	1470
M18	1105	1265	1290	1490
M19	1105	1235	1325	1500
M20	1105	1245	1270	1500
M21	1105	1245	1255	1500
M22	1120	1205	1295	1500
M23	1135	1210	1295	1500
M24	1100	1220	1280	1500
M25	1085	1215	1260	1500
M26	1085	1220	1290	1500
M27	1100	1235	1280	1500
M28	1135	1240	1290	1500
M29	1135	1240	1290	1500
M30	1140	1235	1285	1500
Promedio	1095	1224	1272	1478
Máx.	1160	1335	1390	1500
Mín.	1005	1100	1110	1295

Tabla 7.26. Fusibilidad de cenizas sintéticas para estudio de sensibilidad de los óxidos mayoritarios trabajando en AR. Elaboración propia.

Atmósfera reductora				
Muestras	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]
M1	905	1215	1355	1450
M2	990	1180	1200	1240
M3	970	1210	1270	1350
M4	990	1135	1275	1325
M5	970	1010	1075	1200
M6	945	995	1005	1070
M7	1030	1290	1320	1390
M8	935	1215	1280	1365
M9	960	1200	1250	1390
M10	955	1150	1195	1320
M11	960	1085	1140	1215
M12	1050	1135	1165	1230
M13	970	1110	1125	1195
M14	994	1095	1110	1195
M15	995	1105	1130	1195
M16	935	1070	1135	1195
M17	940	1105	1130	1195
M18	920	1110	1155	1195
M19	975	1175	1190	1245
M20	990	1145	1185	1305
M21	985	1160	1235	1375
M22	995	1145	1195	1300
M23	930	1125	1160	1205
M24	990	1125	1155	1365
M25	975	1110	1130	1255
M26	985	1120	1165	1300
M27	980	1100	1150	1255
M28	1050	1130	1170	1280
M29	975	1145	1190	1310
M30	980	1135	1215	1370
Promedio	974	1134	1182	1276
Máx.	1050	1290	1355	1450
Mín.	905	995	1005	1070

Tabla 7.27. Formulación de las cenizas sintéticas de bagazo de caña de azúcar de Tucumán - Argentina. Elaboración propia.

MUESTRA	gAl ₂ O ₃	gSiO ₂	gTiO ₂	gFe ₂ O ₃	gCaO	gMgO	gNa ₂ O	gK ₂ O	gP ₂ O ₅	gSO ₃	CA	CB	M total	CB/CA	%CB	%CA
M1 (1,0 CA)	0,105	0,756	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,866	0,000	0,866	0,000	0,0%	100,0%
M2 (0,9CA+0,1CB)	0,0947	0,6805	0,0045	0,0016	0,0022	0,0009	0,0005	0,0074	0,00002	0,0007	0,780	0,013	0,793	0,017	1,7%	98,3%
M3 (0,8CA+0,2CB)	0,0842	0,6049	0,0040	0,0033	0,0045	0,0018	0,0010	0,0148	0,00003	0,0013	0,693	0,027	0,720	0,039	3,7%	96,3%
M4 (0,7CA+0,3CB)	0,0736	0,5293	0,0035	0,0049	0,0067	0,0027	0,0015	0,0222	0,00005	0,0020	0,606	0,040	0,647	0,066	6,2%	93,8%
M5 (0,6CA+0,4CB)	0,0631	0,4537	0,0030	0,0066	0,0090	0,0036	0,0020	0,0296	0,00006	0,0026	0,520	0,053	0,573	0,103	9,3%	90,7%
M6 (0,5CA+0,5CB)	0,0526	0,3781	0,0025	0,0082	0,0112	0,0045	0,0025	0,0370	0,00008	0,0033	0,433	0,067	0,500	0,154	13,4%	86,6%
M7 (0,4CA+0,6CB)	0,0421	0,3024	0,0020	0,0099	0,0135	0,0053	0,0031	0,0444	0,00010	0,0039	0,347	0,080	0,427	0,232	18,8%	81,2%
M8 (0,3CA+0,7CB)	0,0316	0,2268	0,0015	0,0115	0,0157	0,0062	0,0036	0,0519	0,00011	0,0046	0,260	0,094	0,353	0,360	26,5%	73,5%
M9 (0,2CA+0,8CB)	0,0210	0,1512	0,0010	0,0132	0,0180	0,0071	0,0041	0,0593	0,00011	0,0052	0,173	0,107	0,280	0,617	38,2%	61,8%
M10(0,1CA+0,9CB)	0,0105	0,0756	0,0005	0,0148	0,0202	0,0080	0,0046	0,0667	0,00013	0,0059	0,087	0,120	0,207	1,389	58,1%	41,9%
M11 (1,0 CB)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0164	0,0225	0,0089	0,0051	0,0741	0,00015	0,0066	0,000	0,134	0,134	-	100,0%	0,0%
TOTAL	0,5786	4,1586	0,0273	0,0904	0,1237	0,0490	0,0280	0,4074	0,00084	0,0361	4,7645	0,7355	5,5000	-	-	-

Tabla 7.28. Formulación de las cenizas sintéticas de RAC de caña de azúcar de Tucumán - Argentina. Elaboración propia.

MUESTRA	gAl ₂ O ₃	gSiO ₂	gTiO ₂	gFe ₂ O ₃	gCaO	gMgO	gNa ₂ O	gK ₂ O	gP ₂ O ₅	gSO ₃	gCA	gCB	M total	CB/CA	CB%	CA%
M1 (1,0 CA)	0,010	0,666	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,678	0,000	0,678	0,000	0,0%	100,0%
M2 (0,9CA+0,1CB)	0,0093	0,5991	0,0020	0,0007	0,0090	0,0030	0,0009	0,0173	0,0010	0,0002	0,610	0,032	0,643	0,053	5,0%	95,0%
M3 (0,8CA+0,2CB)	0,0082	0,5326	0,0018	0,0014	0,0180	0,0060	0,0019	0,0347	0,0020	0,0005	0,543	0,064	0,607	0,119	10,6%	89,4%
M4 (0,7CA+0,3CB)	0,0072	0,4660	0,0016	0,0021	0,0271	0,0089	0,0028	0,0520	0,0029	0,0007	0,475	0,097	0,571	0,203	16,9%	83,1%
M5 (0,6CA+0,4CB)	0,0062	0,3994	0,0013	0,0028	0,0361	0,0119	0,0037	0,0693	0,0039	0,0010	0,407	0,129	0,536	0,316	24,0%	76,0%
M6 (0,5CA+0,5CB)	0,0051	0,3329	0,0011	0,0035	0,0451	0,0149	0,0047	0,0867	0,0049	0,0012	0,339	0,161	0,500	0,474	32,2%	67,8%
M7 (0,4CA+0,6CB)	0,0041	0,2663	0,0009	0,0042	0,0541	0,0179	0,0056	0,1040	0,0059	0,0015	0,271	0,193	0,464	0,712	41,6%	58,4%
M8 (0,3CA+0,7CB)	0,0031	0,1997	0,0007	0,0049	0,0631	0,0209	0,0065	0,1213	0,0068	0,0017	0,203	0,225	0,429	1,107	52,5%	47,5%
M9 (0,2CA+0,8CB)	0,0021	0,1331	0,0004	0,0056	0,0721	0,0238	0,0075	0,1386	0,0078	0,0020	0,136	0,257	0,393	1,898	65,5%	34,5%
M10 (0,1CA+0,9CB)	0,0010	0,0666	0,0002	0,0063	0,0812	0,0268	0,0084	0,1560	0,0088	0,0022	0,068	0,290	0,357	4,270	81,0%	19,0%
M11 (1,0 CB)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0070	0,0902	0,0298	0,0093	0,1733	0,0098	0,0025	0,000	0,322	0,322	-	100,0%	0,0%
TOTAL	0,0566	3,6614	0,0123	0,0383	0,4960	0,1638	0,0512	0,9532	0,0538	0,0135	3,7302	1,7698	5,5000	-	-	-