



Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Tucumán Escuela de Posgrado

MAESTRÍA EN INGENIERÍA BIOENERGÉTICA

Título del proyecto

**CARACTERIZACIÓN DE BIOMASAS LIGNOCELULÓSICAS DE
TUCUMÁN- ARGENTINA POR MEDIO DE LOS ÍNDICES DE
HIDRÓGENO Y OXÍGENO ELEMENTAL**

Trabajo de posgrado para optar el título de Máster en Ingeniería Bioenergética

Autor: Esp. Ing. Gimena del Huerto Zamora Rueda

Director: Dra. Dora Paz

Co-director: Dr. Daniel Machado

San Miguel de Tucumán, 22 de Diciembre del 2020

RESUMEN

Existe una tendencia creciente al uso de energías renovables para la producción de energía limpia, con el fin de mitigar los efectos del cambio climático. Este estudio tiene por objetivo caracterizar físico-química y energéticamente al bagazo de caña de azúcar y sus residuos de cosecha de caña (RAC) y sorgo fibroso. Se utilizó el diagrama de Van Krevelen para caracterizar estas biomásas y además se estimó la disminución de los gases de efecto invernadero, con el objetivo de reemplazar el gas natural en las calderas de vapor. También, se estimó el potencial disponible energéticamente para las mencionadas biomásas. Se analizaron 20 muestras por cada uno de estos biocombustibles. El bagazo mostró menor porcentaje de cenizas, un mayor contenido de sólidos volátiles y mayor poder calorífico superior, desde este punto de vista resultó la biomasa más eficiente. Se identificaron las relaciones molares H/C (hidrógeno/carbono) y O/C (oxígeno/carbono) para las biomásas analizadas de Tucumán, Argentina, que resultaron en el siguiente orden de valores promedios: sorgo fibroso con mayor relación H/C (2,01) vs O/C (0,99); bagazo con valores de H/C (1,83) vs O/C (0,89) y RAC con valores de H/C (1,58) vs O/C (0,86). Se recomienda estudiar la cinética de estas biomásas en los procesos de pirólisis y gasificación.

Palabras Claves: biomásas lignocelulósicas, energía, medio ambiente, diagrama de Van Krevelen

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

DEDICATORIA

Esta tesis esta dedica a:

A mis padres Mirta Rueda y José Zamora que siempre me alentaron a seguir mis sueños y estar en continuo aprendizaje. A mis hermanos Mirta, Daniel, Sara y Josefina, a mis sobrinos, a mis tíos, que me apoyaron incondicionalmente en todo momento. A mi pilar y mi eje, que está en cada paso y momento de mi vida, a mi amor, Agustín, que con su cariño, amor y paciencia me apoya en cada paso. Y finalmente, agradecer a mis amigas de la infancia, de la facultad y de la vida, a mis compañeros de trabajo y a cada persona que de una u otra manera me apoyaron en este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios y la Virgen, por haberme permitido llegar hoy aquí, por haberme iluminado en este proceso. A mis padres, a mis hermanos, a mis sobrinos y tíos.

Agradecer también a una parte fundamental de este resultado quienes fueron mis directores Dra. Dora Paz y Dr. Daniel Machado, y por supuesto Ing. Marcos Golato, ya que gracias a su guía, dedicación y apoyo constante pude concretar este objetivo. Mi profundo agradecimiento a todos los docentes de la carrera de posgrado que con amor y paciencia nos transmitieron los conocimientos, a las autoridades de la carrera de posgrado, especialmente al Ing. Cárdenas, que siempre me impulsó a seguir en los estudios y me apoyó a seguir adelante, a Dra. Pesa, a los secretarios académicos, especialmente a Dr. Carlos Gusils que me alentó en cada paso, a las autoridades de la escuela de Posgrado, a las autoridades de la Facultad Regional Tucumán y de la Universidad Tecnológica Nacional. Y finalmente, quiero agradecer a mi segunda casa, la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, a sus autoridades, especialmente al Director Técnico Dr. Daniel Plopper, a nuestro director de área Ing. Marcelo Ruiz, a nuestra jefa de sección y al responsable del Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales, que permitieron desarrollar mi tesis.

ÍNDICE DE TEMÁTICO

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 Matriz energética.....	15
1.2 Biomasa: definición y clasificación.....	16
1.3 Biomosas regionales: estimación de la cantidad de biomasa aprovechable.....	19
1.4 Cultivo de caña de azúcar: bagazo y residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar.....	21
1.5 Cultivos cítricos: residuo de poda de limón.....	23
1.6 Cultivos energéticos.....	24
1.7 Biomasa forestal.....	26
1.8 Caracterización de la biomasa: parámetros físicos, químicos y energéticos.....	28
1.8.1 Parámetros físicos:.....	30
1.8.2 Parámetros químicos:.....	31
1.8.3 Parámetros energéticos:.....	33
1.9 Diagrama de Van Krevelen: índices de hidrógeno y oxígeno elemental... ..	35
1.10 Gases de efecto invernadero.....	42
1.11 Objetivo General.....	43
1.12 Objetivos Específicos.....	43
2. MATERIALES Y MÉTODOS	45
2.1 Preparación de las muestras.....	46
2.2 Análisis inmediato.....	48
2.3 Análisis de componentes inorgánicos: determinación de cloro.....	48
2.4 Análisis energético.....	49
2.5 Fusibilidad de cenizas.....	51
2.6 Análisis de composición elemental.....	51
2.7 Construcción del Diagrama de Van Krevelen.....	52
2.8 Estimación de gases de efecto invernadero.....	53
2.9 Análisis estadístico.....	54
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
3.1 Resultados del análisis inmediato o termogravimétrico.....	55
3.2 Resultados del análisis energético.....	58
3.2.1 Resultados de PCS y PCI.....	58
3.2.2 Resultados de PCS calculado.....	61
3.3 Resultado del contenido de cloro total.....	63

3.4	Resultados de fusibilidad de cenizas.....	63
3.5	Resultados del análisis de composición elemental	66
3.6	Diagrama de Van Krevelen	69
3.7	Análisis estadístico.....	72
3.8	Estimación de gases de efecto invernadero y cálculo de CO ₂ equ.....	76
4.	CONCLUSIONES	79
5.	BIBLIOGRAFÍA CITADA	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Matriz energética Mundial, año 2018.	15
Figura 2: Matriz energética de Argentina, año 2018	16
Figura 3: Distribución porcentual del área cañera de Tucumán, zafra 2019.....	22
Figura 4: Distribución departamental del área con cítricos de dos o más años implantados en Tucumán en el año 2018.	24
Figura 5: Áreas potenciales de expansión de sorgo de Tucumán.....	26
Figura 6: Cambios experimentados por la muestra en el análisis de fusibilidad de cenizas.	31
Figura 7: Curva termogravimétrica para el análisis de combustibles.....	32
Figura 8: Representación de los combustibles según Van Krevelen.....	38
Figura 9: Representación de los combustibles según Van Krevelen.....	38
Figura 10: Diagrama de Van Krevelen a) diferentes variedades de materia prima; b) aserrín de madera, estiércol de porcino, lodo de papelera y productos de bio-aceites.	39
Figura 11: Diagrama de Van Krevelen para bagazo y carbonos obtenidos a partir de bagazo. Fuente Guachi Cabrera, 2019.....	41
Figura 12: Diagrama de Van Krevelen para biomasas lignocelulósicas comparadas con carbón.....	42
Figura 13: Muestra de bagazo a granel en un depósito cerrado típico de un ingenio.	45
Figura 14: Muestra de RAC dejado en campo y troceado	45
Figura 15: Cultivo energético, sorgo	45
Figura 16: Estufa marca ORL, con circulación forzada de aire y con controlador automático de temperatura.....	47
Figura 17: Molino de corte para la preparación de muestras, marca Fritsch, modelo Pulverisette 19.....	47
Figura 18: Equipo Analizador termogravimétrico, TGA 701	48
Figura 19: Bomba calorimétrica, marca IKA, modelo C5000	49
Figura 20: Equipo de fusibilidad de cenizas, marca LECO, modelo AF700.....	51
Figura 21: Equipo de composición elemental CHONS 628.....	52
Figura 22: Resultados de PCS y PCI de las biomasa en estudio.	61
Figura 23: Resultados de PCS calculados por fórmula comparados con PCS medidos para las biomasas de estudio con sus errores relativos.....	62
Figura 24: Diagrama de Van Krevelen para las biomasas de estudio.....	70
Figura 25: Diagrama de Van Krevelen para las biomasas de estudio comparadas con otros combustibles	71
Figura 26: Gráfico biplot del análisis multivariable para bagazo, RAC y sorgo fibroso.....	74
Figura 27: Matriz de dispersión para bagazo, RAC y sorgo	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Superficie neta cosechable para zafra 2019 en Tucumán.....	21
Tabla 2: Distribución departamental de biomasa forestal en Tucumán.....	27
Tabla 3: Cantidad biomasa disponible aprovechables en Tucumán, expresadas en toneladas/año	28
Tabla 4: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis termogravimétrico para bagazo de caña de azúcar de Tucumán. Estos valores se encuentran expresados en porcentaje p/p referidos a base seca (b.s.). Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y valores mínimos y la cantidad de valores analizados (n).	55
Tabla 5: Valores del análisis termogravimétrico para bagazo de caña de azúcar comparado con los publicados por otros autores. Estos valores se encuentran expresados en p/p y referidos a base seca (b.s.).....	55
Tabla 6: Resultados estadísticos del análisis termogravimétrico para RAC de Tucumán. Estos valores se encuentran referidos en base seca (b.s.) y expresados en porcentaje. Además, se indica los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados (n).	56
Tabla 7: Valores del análisis termogravimétrico de RAC comparado con los publicados por otros autores. Estos valores se encuentran expresados en p/p y referidos a base seca (b.s.).	56
Tabla 8: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis termogravimétrico para sorgo fibroso de Tucumán. Estos valores se encuentran referidos en base seca (b.s.) y expresados en porcentaje y, además, se indica los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados (n).	57
Tabla 9: Valores del análisis termogravimétrico de sorgo fibroso comparado con publicados por otros autores. Estos valores se encuentran expresados en p/p y referidos a base seca (b.s.).	57
Tabla 10: Valores medios del análisis termogravimétrico de muestras de bagazo, RAC y sorgo fibroso. Estos valores se encuentran expresados en p/p y referidos a base seca (b.s.).	58
Tabla 11: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis energético para bagazo de caña de azúcar de Tucumán. Estos valores se encuentran referidos en base seca (b.s.) y expresados en porcentaje y, además, se indica los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados (n).	58
Tabla 12: Valores de PCS de bagazo de caña de azúcar comparado los obtenidos por otros autores. Los valores se encuentran referidos a base seca (b.s.).....	59
Tabla 14: Valores de PCS de RAC de caña de azúcar comparado con los obtenidos por otros autores. Los valores están expresados en base seca (b.s.)	59
Tabla 13: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis energético para bagazo de caña de azúcar de Tucumán. Estos valores se encuentran referidos en base seca (b.s.) y expresados en porcentaje y, además, se indica los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados (n). Los valores de PCS se encuentran	

expresados en base seca (b.s.) y los valores de PCI se encuentran expresados en base húmeda (b.h.)	59
Tabla 15: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis energético para sorgo fibroso de Tucumán. Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n). Los valores de PCS están expresados en base seca (b.s.), y los valores de PCI están expresados en base húmeda (b.h.)	60
Tabla 16: Valores de PCS de sorgo fibroso comparado con los obtenidos por otros autores. Los valores están expresados en base seca (b.s.)	60
Tabla 17: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis de cloro para las muestras de bagazo de caña de azúcar, RAC y sorgo fibroso de Tucumán. Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n). Los valores están expresados en % p/p, en b.s.	63
Tabla 18: Valores de Cl (% p/p, b.s.) para las biomásas de estudio comparada con otros autores.	63
Tabla 19: Parámetros estadísticos de los resultados de la determinación de fusibilidad de cenizas para las muestras de bagazo de caña de azúcar de Tucumán. Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n).	64
Tabla 20: Parámetros estadísticos de los resultados de la determinación de fusibilidad de cenizas para las muestras de RAC de caña de azúcar de Tucumán. Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n).	64
Tabla 21: Parámetros estadísticos de los resultados de la determinación de fusibilidad de cenizas para las muestras de sorgo fibroso de Tucumán. Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n).	65
Tabla 22: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis de composición elemental para bagazo de caña de azúcar de Tucumán. Los valores de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O) y azufre (S) se encuentran expresados en % p/p y referidos en base seca (b.s.). Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n).	66
Tabla 23: Valores de composición elemental de bagazo comparado con otros autores.....	67
Tabla 24: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis de composición elemental para RAC de caña de azúcar de Tucumán. Los valores de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O) y azufre (S) se encuentran expresados en % p/p y referidos en base seca (b.s.). Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n).	67
Tabla 25: Resultados de composición elemental para las muestras de RAC comparado con otros autores.	68

Tabla 26: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis de composición elemental para sorgo fibroso de Tucumán. Los valores de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O) y azufre (S) se encuentran expresados en % p/p y referidos en base seca (b.s.). Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n).	68
Tabla 27: Resultados de composición elemental para muestras de sorgo fibroso comparada con otros autores.....	69
Tabla 28: Valores de cantidad de biomasa disponible y PCI para las muestras de bagazo, RAC y sorgo fibroso.....	77
Tabla 29: Resultados de la cantidad de gas natural equivalentes en [m ³] quemados para las biomásas de estudio.....	77
Tabla 30: Resultados de la cantidad de CO ₂ [kg] para las biomásas de estudio.	78

GLOSARIO DE ABREVIATURAS Y UNIDADES

- %**
porcentaje, 19, 21, 47, 54, 55, 56, 57, 58, 65, 66, 67, 78, 79, 80, 81
- AIE**
Agencia Internacional de Energía, 14, 83
- ASTM**
American Society of Testing Materials, 45, 47, 48, 50
- b.h.**
base húmda, 49, 57, 58, 59
- b.s.**
base seca, 47, 49, 50, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 65, 66, 67
- C**
carbono, 31, 32, 33, 35, 39, 40, 42, 47, 49, 50, 52, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 65, 66, 67, 68, 72, 79, 80, 83, 84, 85, 86, 87, 88
- CF**
carbono fijo, 31, 42, 47, 54, 55, 56, 57, 71, 72
- Cl**
cloro, 31, 42, 47, 48
- CO₂eq**
dióxido de carbono equivalente, 41
- CV**
coeficiente de variación, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 62
- CZ**
cenizas, 30, 42, 47, 49, 53, 54, 55, 56, 57, 71, 81
- DE**
desviación estándar, 1, 5, 7, 8, 11, 53, 55, 57, 58, 62
- DT**
temperatura de inicio de deformación, 29, 50
- EEAOC**
Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes, 20, 22, 44, 83, 84
- FE**
factor de emisión, 53
- FT**
temperatura de fluidización, 30, 50
- g/mol**
gramos/mol, 52
- GEI**
gases de efecto invernadero, 15, 41, 84
- GN**
gas natural, 53, 75, 76
- H**
hidrogeno, 13, 31, 32, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 42, 49, 50, 51, 52, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 80, 81, 84, 85, 86, 88
- H/C**
hidrogeno/carbono, 13, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 42, 51, 52, 68, 69, 70, 80, 81
- ha**
hectárea, 22, 24, 25, 29, 30, 33, 34, 42, 78, 79
- HT**
temperatura de hemiesfera, 30
- kg CO₂/ Nm³**
kilogramos de CO₂/ normal metros cúbicos, 53, 76
- kJ/kg**
kilojoule/kilogramos, 49, 57, 58, 59, 79, 80
- LEEB**
Laboratorio de Ensayos Energéticos de Biomasa, 44
- LEMI**
Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales, 44
- m³**
metros cúbicos, 53, 75, 79
- Máx**
Máximo, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 65, 66, 67
- Mín**
Mínimo, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 62, 65, 66, 67
- MINEM**
Ministerio de Minería y Energía de la Nación, 14
- MJ/kg**
Megajoule/ kilogramos, 34, 49, 53, 61, 75, 76
- n**
cantidad, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 62, 65, 66, 67

N

nitrógeno, 31, 39, 42, 49, 50, 65, 66, 67, 83, 84, 86, 87

O

oxígeno, 13, 31, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 42, 49, 51, 52, 65, 66, 67, 68, 69, 80, 81, 85, 87

O/C

oxígeno/carbono, 13, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 42, 51, 52, 68, 69, 80, 81

PCI

poder calorífico inferior, 32, 35, 42, 49, 53, 56, 57, 58, 59, 60, 71, 75, 76, 79, 80, 81

PCS

poder calorífico superior, 13, 32, 34, 42, 48, 49, 53, 57, 58, 59, 60, 61, 71, 72, 79, 80, 81, 82

RAC

residuo agrícola de cosecha de caña, 13, 20, 22, 27, 33, 34, 42, 52, 55, 56, 57, 58, 61, 62, 64, 66, 68, 69, 72, 73, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 86, 88

S

azufre, 31, 42, 49, 51, 65, 66, 67, 83, 84, 85, 86, 87, 88

ST

temperatura de ablandamiento, 29, 50

SV

sólidos volátiles, 31, 34, 42, 47, 53, 54, 55, 56, 57, 71, 81, 82

t

tonelada, 22, 23, 25, 26, 27, 78, 79

tep

toneladas equivalentes de petróleo, 19

W

Humedad, 29, 42, 45, 49, 53, 54, 55, 56, 57, 71, 81, 83, 86, 88

WISDOM

Woodfuels Integrated
Supply/Demand Overview
Mapping, 18, 19, 22, 25, 26, 88

 η

rendimiento, 53, 75

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Matriz energética

En la actualidad, los combustibles fósiles tienen un peso significativo en la matriz energética mundial. El 31,49 % de la energía generada proviene del petróleo, el 26,88 % del carbón, el 22,84 % del gas natural, el 4,95 % de energía nuclear y el 13,84 % restante a fuentes de energías renovables, según la Agencia Internacional de Energía (AIE, 2018). En la Figura 1, se observa la matriz energética mundial del 2018, según la AIE.

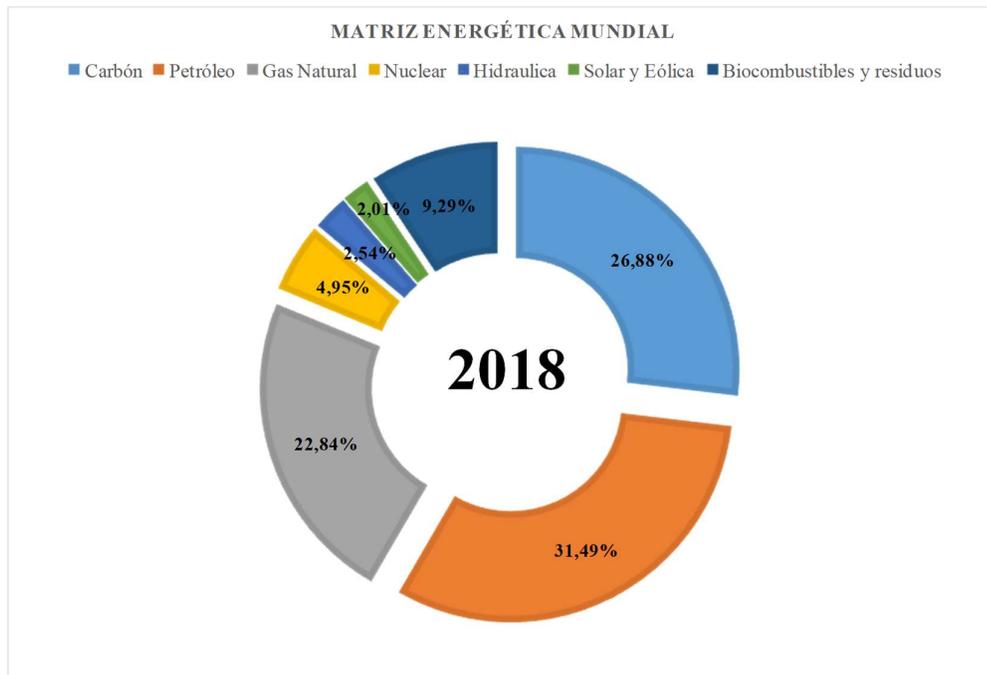


Figura 1: Matriz energética Mundial, año 2018.

Fuente: Elaboración propia según datos de la Agencia Internacional de Energía, 2018

En la República Argentina, la matriz energética depende fuertemente de fuentes de energías no renovables, según datos obtenidos de la Secretaría de Energía de la Nación (MINEM, 2018). Los combustibles fósiles representan el 88,29 % del total, de los cuales el 31,04 % es petróleo, 53,24 % gas natural, 1,56 % carbón, 2,45 % corresponde a energía nuclear; y el aporte de las fuentes renovables, fue del 11,71 % para el año estudiado, (ver Figura 2). Por este motivo, resulta necesario realizar grandes esfuerzos para contrarrestar la enorme dependencia de las fuentes de energías no renovables, que son grandes generadoras de Gases de Efecto

Invernadero (GEI); y que deberán ser reemplazadas paulatinamente por fuentes de energías limpias y sustentables, con el objetivo de equilibrar la matriz energética actual. (Cárdenas, 2011).



Figura 2: Matriz energética de Argentina, año 2018

Fuente: Elaboración propia según datos de la Secretaria de Energía de Argentina, 2018

Una alternativa que resultaría sería el reemplazo de combustibles fósiles por fuentes de energías renovables, entre las cuales se destacan las biomásas, ya sea de origen residual o industrial. La utilización, desarrollo y aprovechamiento energético de las mismas, deben ser planteados de manera estratégica que apunten a una solución integral, tratando de disminuir el consumo intensivo de combustibles fósiles.

1.2 Biomasa: definición y clasificación

Se considera biomasa a toda la materia orgánica de origen vegetal o animal, no fósil, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial. También puede definirse como: “las sustancias orgánicas que tiene su origen en los compuestos de carbono formados en la fotosíntesis” (Nogués *et al.*, 2010). Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, la biomasa se caracteriza por tener un bajo contenido de carbono, un elevado contenido de oxígeno y compuestos volátiles. Estos compuestos volátiles (formados por cadenas largas del tipo C_nH_m ; y

presencia de CO_2 , CO e H_2 , son los que concentran una gran parte del poder calorífico de la biomasa. El poder calorífico de la biomasa depende mucho del tipo de biomasa considerada, de su composición o estructura elemental, o sea, de sus contenidos de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre, principalmente, ya que intervienen en las características de oxidación, velocidad de reacción y generación de energía. Además, el poder calorífico superior de un material es el calor generado por combustión que tiene en cuenta el calor de condensación del agua contenida en la misma de una biomasa, también depende del contenido de cenizas y de su humedad. Este parámetro también depende del contenido de humedad y de cenizas. El material inorgánico de las cenizas, limita la energía que puede desarrollar la biomasa por unidad de materia. Con respecto al contenido de humedad, la misma afecta al poder calorífico inferior de los combustibles, que es el calor desprendido durante la combustión de la biomasa, sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua generado en la combustión (Energía de la biomasa, 2008).

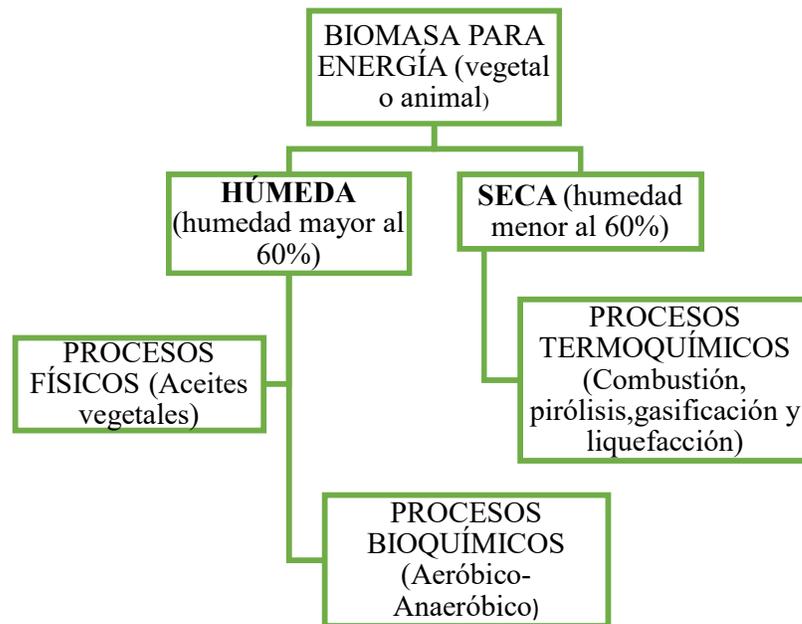
La biomasa lignocelulósica es la que en su composición tiene celulosa, hemicelulosa y lignina. Se emplean para biocombustibles de segunda generación o compuestos químicos renovables o intermediarios de síntesis. La celulosa es uno de los biopolímeros más abundantes en la naturaleza y su biosíntesis, química y su estructura aún permanecen activos como campo de investigación. Las capas de celulosa se juntan y forman las llamadas fibrillas de celulosas o paquetes de celulosas, estas fibrillas están unidas débilmente a través de un enlace hidrógeno. La hemicelulosa es una estructura de carbohidratos que consiste en polímeros de diferentes azúcares como xilosa y arabinosa, manosa, glucosa y galactosa y ácidos de azúcar. La hemicelulosa sirve como una conexión entre la lignina y las fibras de la celulosa y le da al conjunto celulosa- hemicelulosa- lignina rigidez. La lignina es la segunda fuente renovable más abundante que existe en la naturaleza y está presente en la pared celular, es por esta razón que se han desarrollado usos alternativos para aprovechar este subproducto agroindustrial, tal como la generación de fibras de carbón para la industria de los materiales compuestos. Los materiales lignocelulósicos tienen la ventaja de ser más biodegradables y renovables, siendo el resultado del proceso de fotosíntesis de los vegetales mediante la energía solar. Bajo este enfoque, su empleo como combustibles representa una forma sostenible y

amigable con el medio ambiente de aprovechamiento de la energía solar. (Abril y Navarro, 2012 y Zossi, 2016).

Cabe destacar que, desde el punto de vista ambiental, el aprovechamiento energético de la biomasa no contribuye al aumento de los gases de efecto invernadero, dado que el balance de emisiones de CO₂ a la atmósfera es neutro. En efecto, el CO₂ generado en la combustión de la biomasa es reabsorbido mediante la fotosíntesis en el crecimiento de las plantas necesarias para su producción. Al contrario, en el caso de los combustibles fósiles, el carbono que se libera a la atmósfera es el que está fijo a la tierra desde hace millones de años (Energía de la biomasa, 2008).

Desde el punto de vista energético resulta conveniente dividir la biomasa en dos grandes grupos como muestra el Cuadro 1.

Cuadro 1: Clasificación de biomasa para energía



Fuente: Energía de la biomasa, 2008 y Nogués *et al*, 2010.

Como se muestra en el Cuadro 2, se describe el origen y tipos de residuos generados en las actividades forestales y agrícolas, así como en las principales actividades industriales que generan como subproducto biomasa sólida. En este trabajo nos centraremos en los residuos derivados de la actividad agrícola o agropecuaria.

Cuadro 2: Origen y tipo de residuos generados en las distintas actividades

Categoría	Actividad origen del recurso	Tipos	Residuos que genera
Residuos forestales	Tratamiento selvícola: cortas de mejora y cortas parciales. Clareos. Podas	Principalmente en montes repoblados o en aquellos naturales con un cierto interés económico.	Árboles de pequeño tamaño (pies menores) sin valor comercial. Ramas de poda. Biomasa del estrato arbustivo
	Tratamientos selvícolas: cortas de regeneración.	Objeto de extracción de madera del monte, tanto en masas naturales como artificiales.	Copas, ramas, rabeones. Pies secos sin interés.
	Incendios forestales.	En pinares por lo general.	Árboles quemados de escaso interés comercial.
	Apertura de caminos.	En todo tipo de monte.	Copas, ramas. Árboles de pequeño tamaño sin interés comercial.
Residuos agrícolas	Cultivos de especies herbáceas.	Cereales, oleaginosas, algodón, etc.	Paza, zorro, bagazo, residuos dejado a campo, etc.
	Podas de especies leñosas	Olivo, vid, frutales	Ramas, troncos.
Industrias agroalimenticias	Industrias extractivas. Industrias preparadoras	Extractivas de café, aceite, vinagre. Preparación de arroz, algodón, frutos secos.	Alpechines, orujo de oliva, marro de café, cascarilla de arroz, desmontado de algodón.
Industrias forestales	Primera transformación	Aserrado. Fabricación de tableros. Desenrollo y chapas. Celulosa. Industrias de corcho.	Cortezas, aserrines, virutas. Cortezas y polvo de lijado. Recortes de chapas. Restos de corchos y finos.
	Segunda y posteriores transformaciones	Carpintería, muebles. Embalajes de madera, pales. Papel. Derivados del corcho.	Recortes, tacos, aserrín, virutas, polvo de lijado. Papel. Recortes de corcho, polvo de lijado, etc.

Fuente: Nogués *et al.*, 2010

1.3 Biomásas regionales: estimación de la cantidad de biomasa aprovechable

Según el estudio publicado en el año 2009, por WISDOM para Argentina, más de un 95 % de la biomasa disponible correspondía a residuos de explotación forestal de plantaciones y formaciones de bosque nativo (excluyendo áreas protegidas). Así, se sugiere que la enorme disponibilidad de los recursos energéticos en biomasa se contraponen con su exigua utilización. De acuerdo con las cifras estimadas por este estudio, alrededor del 83 % estaría disponible comercialmente. Se puede enumerar

en el siguiente orden, de acuerdo a las posibilidades de oferta en el sector de producción primaria y secundaria:

- Foresto-industrial y forestal (residuos de procesamiento de madera y de cosecha);
- Azucarero industrial (bagazo) y de producción primaria;
- Cerealero industrial (arroz, girasol, maní) y de producción primaria (maíz, arroz);
- Pecuario (tambos, feedlots, granjas porcinas y avícolas);
- Frutícola (olivo, cítrico y vid; producción primaria e industrial). (WISDOM, 2009)

Del mismo modo, para la Provincia de Tucumán en el año 2016, se publicó un estudio de estimación de la oferta y la demanda de biomasa, como así también su geo-localización y cuantificaron (WISDOM Tucumán, 2016). Las biomásas se clasificaron en función de su origen de la siguiente manera:

- Oferta directa: caña de azúcar (74,9 %), bosque nativo (16,6 %), cítricos (5,3 %), arbustos y pastizal (2,8 %), forestaciones (0,3 %) y tabaco (0,02 %).
- Oferta indirecta: ingenios (99,88 %), secaderos de tabaco, acopiadores de tabaco y bodegas (0,22 %).

Con respecto al consumo de biomasa con fines energéticos, los sectores demandantes considerados fueron la industria azucarera (98,18 %), las ladrilleras (0,90 %), el sector residencial (0,85 %) y las escuelas rurales (0,05 %). Además, este estudio estimó el potencial de energía a partir de fuentes de biomasa húmeda provenientes de actividades ganaderas intensivas (feedlots, tambos, cría de porcinos) y de la vinaza (subproducto de la industria azucarera). La oferta potencial provincial es de 44.267 toneladas equivalentes de petróleo (tep) por año, que se constituye por los aportes de feedlots bovinos (2.953 tep/año), porcinos (675 tep/año), tambos bovinos (152 tep/año) y vinaza (40.487 tep/año). En conclusión, se confirma que la Provincia de Tucumán posee un gran potencial bioenergético debido al volumen y a la amplia variedad de fuentes de biomasa seca y húmeda existente, susceptible de ser aprovechada para producir energía renovable (WISDOM Tucumán, 2016).

Por lo antes mencionado, el objetivo para esta sección es estimar la cantidad de biomasa más relevante aprovechable energéticamente, que se encuentra presente en Tucumán, como son los cultivos de caña de azúcar, cítricos, cultivos energéticos y leñosos. Entre estos últimos se pueden aprovechar los residuos de poda y árboles de renovación de limoneros, sorgo y residuos forestales. Estas biomásas se detallan a continuación:

1.4 Cultivo de caña de azúcar: bagazo y residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar

La caña de azúcar es una especie perenne –vive más de dos años– de crecimiento erecto y macolladora. Pertenece a la familia de las Gramíneas o Poáceas. Si bien el principal producto de la caña es el azúcar (sacarosa), también puede obtenerse de ésta alcohol etílico, fibra y otros residuos derivados de la actividad agrícola de importancia económica y energética. La caña de azúcar es el cultivo más extendido en la provincia, y la que genera una fuente de biomasa con gran potencial energético. Entre ellos podemos mencionar el bagazo de caña de azúcar y el residuo agrícola de la cosecha de caña de azúcar (RAC) (Digonzelli *et al.*, 2015)

Más del 90 % de la caña de azúcar en Tucumán se cultiva en las regiones del Pedemonte, la Llanura Central o Deprimida y la Llanura Chaco-pampeana. Estas regiones, aunque se encuentran a corta distancia unas de otras, poseen características de suelo, clima y relieve muy contrastantes. (Digonzelli *et al.*, 2015).

Según informe de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) para la zafra 2019, la superficie neta cosechable de caña de azúcar fue de 275.290 ha, del cual se obtuvo un total de 15.150.000 t de caña de azúcar. (EEAOCa, 2019).

La Tabla 1 muestra la superficie plantada con caña de azúcar en Tucumán para los distintos departamentos de la provincia. La Figura 3, presenta los porcentajes correspondientes respecto al total del área cosechada.

Tabla 1: Superficie neta cosechable para zafra 2019 en Tucumán

Caña de azúcar – Zafra 2019	
Departamento	Superficie neta cosechable (ha)
Leales	52.490
Cruz Alta	49.980
Simoca	40.300
Burrucacú	33.340
Monteros	22.430
Chicligasta	17.380
Río Chico	13.600
Famaillá	10.880
La Cocha	10.860
Lules	8.600
Graneros	7.610
J. B. Alberdi	7.220
Tafi Viejo	400
Yerba Buena	110
Capital	90
TUCUMÁN	275.290

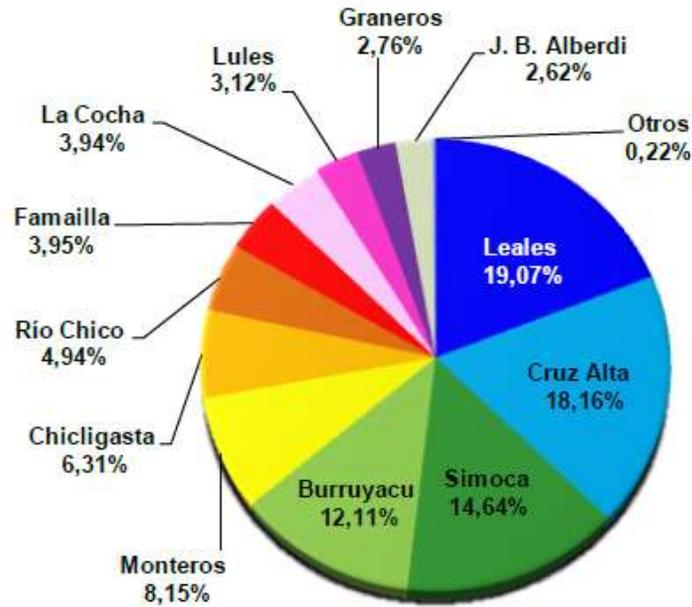


Figura 3: Distribución porcentual del área cañera de Tucumán, zafra 2019. Fuente:(EEAOCa, 2019).

Desde la zafra 2013-2014, la variedad de caña de azúcar LCP85-384, viene imponiéndose en Tucumán. En ese período ocupó el 76,79% de la superficie plantada. En la actualidad sigue siendo la variedad más elegida por el cañero tucumano (Ostengo *et al.*, 2018). La misma presenta un elevado rendimiento cultural, con una excelente capacidad de macollaje y buena longevidad de la cepa. Además, exhibe un excelente comportamiento de acumulación de sacarosa y una buena resistencia de su jugo al deterioro por heladas. Tiene un porcentaje de fibra que oscila entre un 11 % a 12 % (Cuenya *et al.*, 2013).

El bagazo de la caña de azúcar (residuo producido durante la molienda de la caña en los trapiches de los ingenios azucareros), es una biomasa lignocelulósica constituida por fibra, sólidos insolubles, sólidos solubles y agua. El bagazo es el principal combustible de la industria azucarera y se aprovecha energéticamente para producir vapor y/o cogenerar energía. El mismo representa el 30 % de los tallos verdes molidos de la caña de azúcar.

De los 15 ingenios tucumanos, cinco de ellos separan la fibra de la médula por medio de una operación denominada “desmedulado del bagazo”. La fibra obtenida es utilizada para la fabricación de papel y la médula retorna a la fábrica azucarera como combustible para las calderas de vapor. En este caso sólo el 2 % del bagazo

generado es destinado al desmedulado, el resto se utiliza para la generación de energía (WISDOM Tucumán, 2016). Durante la zafra 2018/2019 se obtuvieron 4.235.162,61 t de bagazo disponibles energéticamente (EEAOCa, 2019).

La cosecha de la caña en la Provincia de Tucumán se realiza de mayo a noviembre. El tipo de cosecha es mecanizada en verde (93,2 %), mediante el uso de cosechadoras integrales (Digonzelli *et al.*, 2015). Este tipo de cosecha tiene las siguientes ventajas: conservación de la humedad del suelo, mayor control sobre las malezas, ahorro de herbicidas, menor compactación del suelo en condiciones de alta humedad, menor ataques de gusanos, menor erosión del suelo y mayor aporte de materia orgánica al suelo. Posterior a la cosecha, queda en campo el residuo agrícola de cosecha, es una cantidad entre 7 y 15 t/ha de RAC seco. Como característica física del RAC se puede mencionar que tiene 11,04 % de hojas y 11,25 % de despunte. (Romero, 2016). Este material puede ser aprovechado energéticamente, pero su uso depende de la zona agroecológica donde se encuentre, ya que parte del mismo sirve de cobertura protectora del suelo. (Casen *et al.*, 2015)

Para determinar el RAC seco factible de ser recolectado, se utilizó como base el coeficiente de biomasa residual promedio entre variedades de 151 kg RAC/ t caña, determinado por Romero *et al.*, 2008. El RAC seco hace referencia a la cantidad de residuo expresada en peso de materia seca por unidad de superficie que queda en campo. Si el valor de RAC factible de recolectar se corrige por el 15 % de humedad, y luego a ese total se lo afecta por el 55 %, que es el porcentaje factible de recolectar por la máquina, se puede estimar obtiene un valor del RAC disponible (Casen *et al.*, 2015). Utilizando estos valores, podemos estimar que la cantidad de RAC disponible durante la zafra 2019 fue de 1,27 millones de toneladas.

1.5 Cultivos cítricos: residuo de poda de limón

Otro cultivo relevante en Tucumán son los cítricos, que generan biomasa aprovechable energéticamente, proveniente de la poda y renovación de los árboles de limón. En base al informe presentado por la EEAOC, para la campaña 2018, la superficie neta total fue de 43.800 ha, lo que representa un aumento del 7 % en relación a 2016, con un volumen de fruta de 219.303 t. (Fandos *et al.*, 2018). En la Figura 4 se puede observar la cantidad de superficie implantada de citrus por departamento, siendo Burruyacú el que presenta el mayor porcentaje del cultivo, con el 32,6 %, que corresponde a 14.280 ha. Las variedades de cítricos más difundidas

en la provincia son: Eureka, Lisboa, Génova y Lisboa Limonera, según se informa en el censo citrícola provincial del 2006. (Fandos *et al.*, 2018).

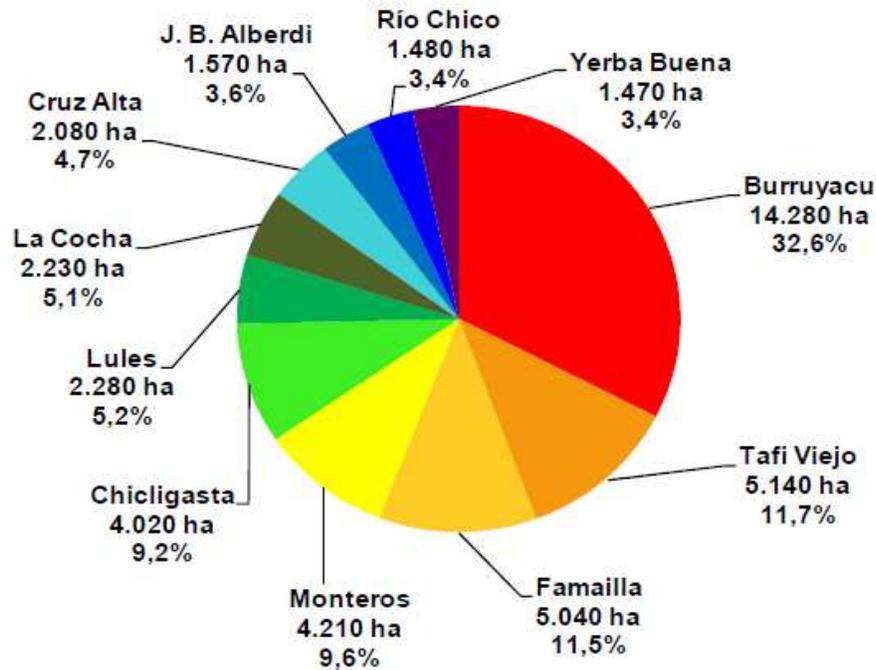


Figura 4: Distribución departamental del área con cítricos de dos o más años implantados en Tucumán en el año 2018.
Fuente: Fandos *et al.*, 2018

Por lo consiguiente, para realizar la estimación de la cantidad de biomasa utilizable seca proveniente de los residuos de poda de limón se tomaron como referencia los cálculos presentados por Díaz y Paz, 2017. De este análisis, resultó que la cantidad de biomasa seca aprovechable es de 270.567 t, dato determinado para la campaña 2018.

1.6 Cultivos energéticos

Un cultivo energético es aquel cultivo agrícola, forestal o acuático, cuya producción parcial o total se utiliza como materia prima para generar energía aprovechable. Se pueden resumir los requisitos que debe cumplir un cultivo energético en los siguientes ítems según Nogués *et al.*, 2010:

- Tener altos niveles de productividad con bajos costes de producción para que pueda ser viable económicamente.
- Posibilidad de desarrollarse en tierras no utilizadas para producción de alimentos.

- Tener un balance energético positivo, de tal forma que la energía contenida en el biocombustible sea superior a la gastada para producirlo.
- Impacto ambiental durante el cultivo mejor a la situación anterior y fácil recuperación del suelo utilizado.
- Posibilidad de utilizar maquinaria agrícola convencional de uso normal en las explotaciones de la zona.

El sorgo es un cultivo óptimo para integrar un sistema sustentable de producción, como alternativa de rotación, por la cantidad de rastrojo residual, por su extendido sistema radicular y por su sanidad diferencial. (Romero, 2017).

El sorgo es una gramínea de origen tropical que ha sido adaptada, a través del mejoramiento genético, a una gran diversidad de ambientes, siendo considerado uno de los cultivos mundiales de seguridad alimentaria. También, es un cultivo agrónomicamente perfecto ya que genera una alta producción con un consumo mucho menor de agua que los otros cereales de verano. Si bien el destino local, ha sido la alimentación animal, en el mundo alrededor del 40 % de la producción del sorgo granífero es destinado a la alimentación humana como participante en la producción de alimentos y bebidas para el ser humano. El grano de sorgo posee la ventaja de carecer de prolaminas (proteína que forma el gluten), que sí están presentes en otros cereales como trigo, avena, cebada y centeno, haciéndolo apto para el consumo por parte de personas celíacas (Zossi, 2016). Del mismo modo, se puede clasificar al sorgo en base a su producto principal como: sorgo granífero, que es un grano panoja y puede ser utilizado para producir biogás; sorgo azucarado, se puede obtener jugo azucarado para producir bioetanol y el sorgo fibroso, es del tipo lignocelulósico y puede producir biocombustibles (Romero, 2017). En la Figura 5 se muestra el área potencial de cultivo de sorgo para Tucumán. Hasta el 2017 se sembraron 1.015 ha, con un área potencial de expansión de 22.000 ha de sorgo (Romero, 2017).

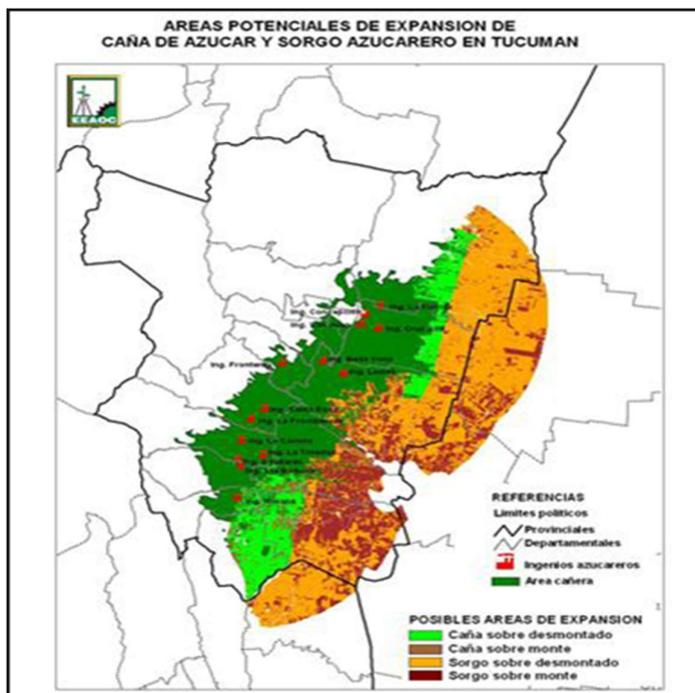


Figura 5: Áreas potenciales de expansión de sorgo de Tucumán.
Fuente: Romero, 2017.

Según datos obtenidos durante la campaña 2018, el rango de rendimiento de biomasa total para el sorgo fibroso estuvo entre 32 y 35 t/ha, con una humedad del 40 % y un porcentaje de fibra total que va desde 21,9 % a 26,3 %. Con los datos antes mencionados podemos tener una cantidad de sorgo fibroso potencialmente disponible de 32.480 t (EEAOCb, 2019).

1.7 Biomasa forestal

En la Provincia de Tucumán, se contabilizaron 12 especies forestales pertenecientes a cinco géneros, en un total de 3.606 ha plantadas, en el año 2014. (WISDOM Tucumán, 2016).

El pino (*Pinus*spp.) constituye el 75% (2.804,4ha) del total de la superficie forestada de Tucumán, el resto de la superficie está compuesta por Eucalyptus, Prosopis, Populus y Araucaria.

Las actividades de poda y raleo y los residuos de cosecha de las plantaciones forestales representan una oferta importante de biomasa potencialmente utilizable con fines energéticos.

En la Tabla 2 se puede ver la distribución departamental de la biomasa de origen leñosa en la Provincia de Tucumán

Tabla 2: Distribución departamental de biomasa forestal en Tucumán.

Fuente: (WISDOM Tucumán; 2016).

Departamentos	Forestación (t)
Burruyacú	1.157,7
Cruz Alta	36,4
Chicligasta	221,7
Famaillá	1.298,6
Graneros	101,4
Juan B. Alberdi	75,1
La Cocha	31,2
Leales	70,5
Lules	818,8
Monteros	200,8
Río Chico	27,4
Capital	0,0
Simoca	11,1
Tafí del Valle	0,0
Tafí Viejo	591,3
Trancas	0,0
Yerba Buena	66,8
Total	4.709,0

Los resultados obtenidos por WISDOM para el sector forestal de Tucumán aportarían 4.709 t/año de recursos biomásicos con fines energéticos. Las plantaciones forestales se distribuyen en toda la provincia con predominancia en el departamento de Famaillá (1.298,6 t/año) y Burruyacú (1.157,7 t/ año).

En conclusión, en base a lo investigado para cada una de las biomásas relevantes, en la Tabla 3 se muestra un resumen de la estimación de la cantidad de biomasa

aprovechable energéticamente en Tucumán, discriminada por residuo. En este trabajo nos enfocaremos en las biomásas de bagazo, RAC y sorgo fibroso.

Tabla 3: Cantidad biomasa disponible aprovechables en Tucumán, expresadas en toneladas/año

Residuo biomásico	Bagazo	RAC	Residuo poda citrus	Sorgo Fibroso	Residuos leñosos
Unidad (t/año)	4,23x 10 ⁶	1,27x 10 ⁶	270.567	32.480	4.709

1.8 Caracterización de la biomasa: parámetros físicos, químicos y energéticos

Ahora bien, una vez que estimamos la biomasa disponible, es importante conocer los parámetros físicos, químicos y energéticos de la misma. Los parámetros químicos se dividen en análisis elemental, para determinar los contenidos elementales de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre; y en análisis inmediato, para determinar el contenido de humedad, cenizas, sólidos volátiles y carbono fijo. Cada uno de estos parámetros influye de manera diferente, tal cual como se contempla en la descripción del Cuadro 3 informados por Nogués *et al.*, 2010.

Cuadro 3: Clasificación de los parámetros físicos, químicos y energéticos que se realizan en biomasa. Fuente Nogués *et al.*, 2010.

PROPIEDADES DE LA BIOMASA		
<i>Parámetros físicos</i>	Densidad real y aparente	Influyen en la selección y el diseño de los equipos de manejo del material y la necesidad de pretratamiento.
	Humedad	
	Fusibilidad de cenizas	
<p><i>Parámetros químicos</i></p> <p>(Determinan el comportamiento de la biomasa durante los procesos de transformación química y termoquímica).</p>	Análisis elemental	Establece el porcentaje en peso de los principales elementos con mayor frecuencia en la estructura molecular de la materia orgánica: carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O), y azufre (S).
	Análisis inmediato	Proporciona los contenidos de humedad (w), cenizas (CZ), materia volátil (V) y carbono fijo (CF) expresados como porcentajes en peso. Este análisis sirve para identificar la fracción de la biomasa en la que se encuentra almacenada su energía química (compuestos volátiles y carbono fijo) y la fracción inerte (humedad y cenizas)
	Componentes estructurales	<p>-<u>Biomasa lignocelulósica</u>: predominan la celulosa, hemicelulosa y la lignina como principales componentes.</p> <p>-<u>Biomasa amilácela</u>: predominan el almidón y la inulina.</p> <p>-<u>Biomasa azucarada</u>: predominan los monosacáridos (glucosa o fructosa) o disacáridos (sacarosa).</p> <p>-<u>Biomasa oleaginosa</u>: predominan los lípidos (aceites o gomas).</p>
	Composición de cenizas	Determinación de los elementos inorgánicos: calcio, sodio, hierro, potasio, silicio, etc.
<i>Parámetro energético</i>	Poder calorífico	<p>Es la energía química del combustible que puede ser transformada directamente en energía térmica mediante un proceso termoquímico de oxidación (combustión). Se expresa en unidades de energía por unidad de masa (kJ/kg)</p>

1.8.1 Parámetros físicos

Humedad (W): en el concepto de humedad se suelen diferenciar dos tipos, la denominada libre y la de equilibrio. En la primera, el agua se encuentra presente en la biomasa de manera externa, normalmente agregada por imbibición; y que se desprende fácilmente por secado al aire ambiente hasta alcanzar la humedad en equilibrio con las condiciones ambientales dadas (humedad y temperatura). Por otro lado, la humedad de equilibrio con el ambiente se logra modificar disminuyendo la humedad ambiente o aumentando la temperatura de la atmósfera que la rodea. La humedad es un factor muy variable en los biocombustibles sólidos ya que depende de la especie, de la zona geográfica, del tiempo que haya transcurrido desde su recolección y de las condiciones ambientales existentes. (Nogués *et al*, 2010).

Fusibilidad de cenizas: el análisis para determinar la temperatura de fusibilidad de cenizas se realiza por ser un dato significativo a la hora de predecir posibles fenómenos de ensuciamiento y escorificación relacionados con la fusión de los depósitos provocados por la transformación termoquímica del combustible. Sometidas a temperaturas altas, las cenizas pueden fundirse produciéndose depósitos de escoria en los equipos de combustión. Es por ello que, es importante determinar el punto de fusión de las mismas, debiéndose asegurar una temperatura del hogar menor a la de fusión para contenidos de cenizas superiores al 10 %. (Nogués *et al*, 2010).

La Figura 6, muestra las diferentes fases por las que transcurre una muestra sometida a un análisis de fusibilidad de cenizas. Para ello, se preparan conos de cenizas del combustible y ésta se va deformando con el calentamiento progresivo de la temperatura. Estos cambios de deformación se ven reflejados en las diferentes temperaturas de fusibilidad de cenizas que se detalla a continuación:

- Temperatura de deformación Inicial (IT ó DT): Temperatura a la que el vértice superior de los conos comienza a redondearse. El encogimiento o deformación del cono no tiene en cuenta si la punta se mantiene aguda.
- Temperatura de ablandamiento (ST): Temperatura a la que el cono se ha fundido a una casi forma esférica en la que la altura es igual al ancho de la base. "Alto = Ancho".

- Temperatura semiesférica (HT): Temperatura a la que el cono se ha fundido hasta alcanzar una forma semiesférica donde la altura es la mitad del ancho en la base. “Alto= 0,5 Ancho”.
- Temperatura de fluidización o temperatura de fusión (FT): Temperatura a la que la masa se funde hasta alcanzar una capa casi plana, con una altura máxima de 1/16 de su altura inicial o menor a 1/3 de la altura de la HT más comúnmente usada.

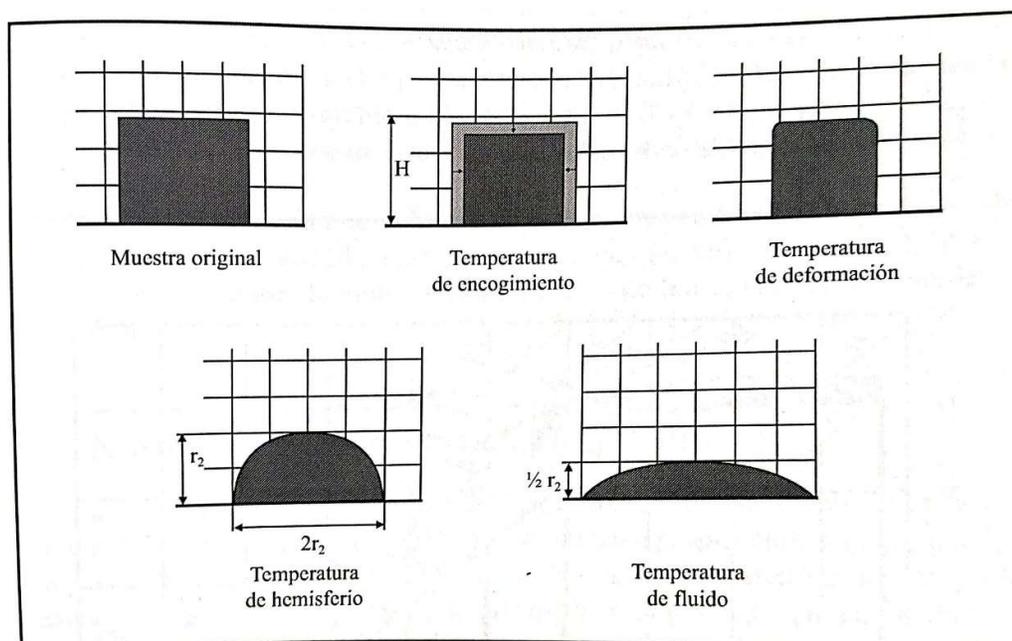


Figura 6: Cambios experimentados por la muestra en el análisis de fusibilidad de cenizas.

Fuente: Nogués et al, 2010

1.8.2 Parámetros químicos:

Análisis termogravimétrico: cuando se produce un calentamiento progresivo de una partícula de biomasa, el material va desprendiendo en primer lugar la humedad de la misma, en segundo lugar, las sustancias volátiles y posteriormente el carbono fijo, y finalmente queda el residuo sólido que corresponde a las cenizas. Cada una de estas fracciones se obtiene a una temperatura distinta y supone una pérdida de peso concreta de la materia. La Figura 7 muestra la rampa de temperatura de un ensayo termogravimétrico y una curva típica de la evolución del peso de la muestra.

Cenizas (CZ): las cenizas de una muestra de biomasa son el residuo inorgánico remanente después de la ignición del combustible, la misma representa el contenido

mineral, es decir, el conjunto de fracciones elementales presentes en cada biomasa. Las mismas varían en su composición y porcentajes de participación según el tipo y variedad de biomasa y fundamentalmente debido a los métodos de recolección (Nogués *et al.*, 2010).

Sólidos Volátiles (SV): esta fracción representa la materia volátil que se desprende de la biomasa en calentamiento progresivo y está formada por mezcla de gases y vapores orgánicos diversos, que se liberan en forma de gases y vapores al descomponerse térmicamente la materia orgánica. La biomasa, por lo general, posee alto contenido de volátiles lo que la hace de fácil ignición, aún a relativamente bajas temperaturas en comparación con otros combustibles como el carbón (Nogués *et al.*, 2010).

Carbón fijo (CF): es la materia orgánica sólida del combustible, luego del desprendimiento de sólido volátil, en el proceso de combustión sigue quemándose lentamente (Nogués *et al.*, 2010).

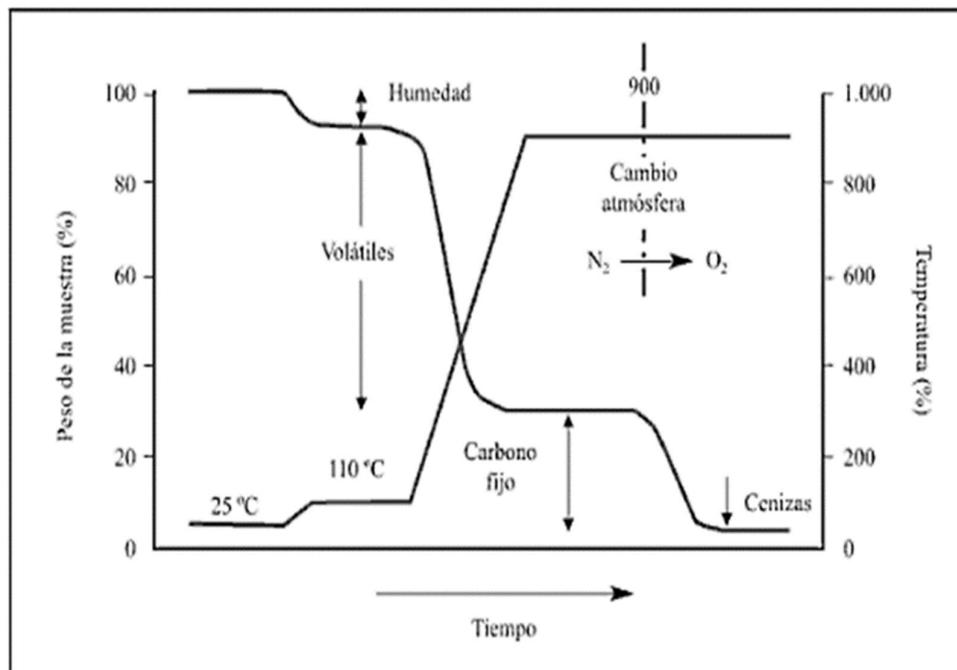


Figura 7: Curva termogravimétrica para el análisis de combustibles.
Fuente: Nogués *et al.*, 2010

Análisis elemental: la biomasa está formada por compuestos como carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), azufre (S) y cloro (Cl), principalmente. El análisis elemental de la biomasa permite estimar a partir de un balance de materia

la cantidad de productos que se generaran en su combustión o gasificación y la cantidad de comburente necesarios en cada caso. También se puede estimar su poder calorífico, como se verá más adelante. El contenido de cloro en combustibles debe ser bajo, ya que causa problemas relacionados a emisiones por la formación de cloruro de hidrógeno gaseoso (HCl), formación de depósitos y corrosión. Además, la presencia de cloruros influye en la formación de dioxinas y furanos. El interés de la evaluación del contenido de nitrógeno de la biomasa por las posibles emisiones de óxido nitroso. La determinación de azufre se realiza para las emisiones de dióxido de azufre o ácido sulfhídrico y también para evaluar la posibilidad de corrosión en los equipos. El carbono y el hidrógeno son importantes ya que estos se descomponen en CO₂ y H₂O. Un mayor contenido de C se traduce en un mayor contenido de CO₂, lo que implicará también un mayor poder calorífico. Y la presencia de H influenciará en el menor contenido de poder calorífico inferior (Nogués *et al.*, 2010).

1.8.3 Parámetros energéticos

El **poder calorífico superior (PCS)** representa la cantidad de calor liberada por la combustión completa de 1 kg de combustible (materia seca) a 25°C y 760 mm de Hg de presión; en consecuencia, el agua presente en el combustible (como humedad) así como la formada por la combustión del hidrógeno en la materia seca, se condensan (Hugot, 1986).

La determinación del PCS se basa en la medición del incremento de temperatura que sufre el agua que se encuentra en la cavidad interior de la cámara de medición de la bomba calorimétrica, una vez que la muestra sufre una combustión completa.

El **poder calorífico inferior (PCI)**, se calcula a partir del poder calorífico superior y se define como la energía desprendida en la combustión suponiendo que toda el agua proveniente del combustible o formada durante la combustión, se encuentra como vapor en los productos de combustión, por lo que no se incorpora el calor de condensación del agua y por ello su magnitud es menor que la del PCS. (Nogués *et al.*, 2010).

Cabe destacar que existen estudios sobre características físico-químicas y energéticas, para las mismas biomásas que se analizaron en este trabajo (Rojas-González y Barraza-Burgos, 2012; Silva Lora *et al.*, 2012; Barbosa Cortez *et al.*, 2008; Woytiuk, 2006 y Jenkins *et al.*, 1998), pero no se detallan características específicas sobre el índice de oxígeno y el índice de hidrógeno y de las posibles

emisiones relativas de CO₂ durante la combustión. Por otro lado, corresponden a trabajos realizados en regiones agroecológicas muy diferentes a los considerados en este trabajo, por lo que la información que aportará el presente estudio es de relevancia para la región del NOA.

Por ejemplo, Barbosa Cortez *et al.*, 2008, presentaron resultados del análisis elemental, energético y termogravimétrico para biomásas procedentes de Brasil, como el bagazo de caña de azúcar, residuos de cáscara de arroz, aserrín y chip de madera. Asimismo, mencionan la metodología de fusibilidad de cenizas, pero no indican resultados; además, destacan que estas biomásas tienen elevados poder calorífico, en especial el chip de madera, y que los mismos pueden ser utilizados como pellets para ser gasificados o quemados en las calderas. Por otro lado, Woytiuk, 2006, ha estudiado el residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar para diferentes variedades de la Isla de Hawái, con el objetivo de eliminar la quema en el campo del RAC y ser aprovechado energéticamente. El autor informa los datos de análisis inmediato, análisis elemental, análisis químico para RAC. Del mismo modo, determinó datos de fusibilidad de cenizas de RAC con una temperatura inicial de deformación de 1.201°C en atmósfera reductora. Asimismo, la empresa DP Clean Tech, 2014, líder a nivel mundial sobre energía de la biomasa, publicó valores de diferentes biomásas para ser aprovechadas energéticamente como combustible, entre ellos el sorgo y RAC.

También podemos mencionar, los estudios que se encuentra realizando la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres sobre las biomásas regionales. En primera instancia, Mistretta *et al.*, 2014 publicaron datos para bagazo y RAC sobre las metodologías termogravimétricas. Además, Peralta *et al.*, 2014, presentaron datos sobre el punto de fusión de cenizas para muestras de bagazo y RAC. Siguiendo con los estudios sobre estas biomásas, Zamora *et al.*, 2016 presentaron un estudio de la caracterización energética del RAC, donde se muestran los resultados del análisis inmediato, poder calorífico superior, contenido de cloro, azufre y silicio. De igual modo, Cruz *et al.*, 2016, publicaron una comparación entre las biomásas regionales de Argentina y Brasil, donde se observó datos de análisis inmediato, poder calorífico superior y análisis de composición elemental para muestras de bagazo de caña de azúcar, RAC, sorgo fibroso, maíz, eucaliptus, miscanthus, cascarilla de arroz y maíz. Asimismo, Cruz *et al.*, 2019, publicaron resultados sobre

análisis termogravimétrico, fusibilidad de cenizas y poder calorífico superior de sorgo fibroso. Por último, Zamora *et al.*, 2019, informaron los resultados del estudio de caracterización energética para bagazo, donde se mostraron valores de análisis inmediato, contenido de cloro, poder calorífico superior e inferior, análisis de composición elemental.

En cuanto al estudio de la relación de contenido de sólidos volátiles en relación con el PCS, Díaz, 2008, observó que el bagazo de caña de azúcar de Ecuador, tiene un valor promedio de SV de 47,32 % y que este parámetro produce un aumento en el PCS hasta alcanzar valores de 17,20 MJ/kg, por lo que influye de manera negativa en la energía que entrega la biomasa. También, Balvorín, 2019, ha estudiado el comportamiento de los SV de muestras de RAC de Tucumán en función del PCS y ha encontrado un incremento del PCS en función de los SV, que ha alcanzado valores de 17,96 MJ/kg.

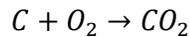
1.9 Diagrama de Van Krevelen: índices de hidrógeno y oxígeno elemental

Van Krevelen, 1950, propuso un diagrama de uso frecuente en geoquímica e investigación del carbón, que clasifica los principales combustibles minerales como lignina, turba, antracita, celulosa y carbón, en función de la relación atómica H/C (hidrógeno/carbono), denominado índice de hidrógeno de una materia prima química; y de la relación atómica O/C (oxígeno/carbono), denominado índice de oxígeno. El diagrama de Van Krevelen se ha utilizado para evaluar el origen y la madurez de la materia orgánica sólida e insoluble en rocas sedimentarias, llamada kerógeno. Existen diferentes tipos de kerógenos, ya que poseen diferentes potenciales para producir aceites durante el periodo de transformación, también llamado maduración. Estos compuestos son insolubles en solventes orgánicos normales y no tienen una fórmula química específica. Al calentar, el kerógeno se convierte en hidrocarburos líquidos y gaseosos. El petróleo y el gas natural se forman a partir del mismo, de ahí su importancia.

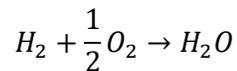
Este diagrama es útil para definir la calidad de un material orgánico como combustible, siempre y cuando se puedan definir los contenidos de oxígeno e hidrógeno antes mencionados.

Cabe destacar que la relación H/C, que contiene un combustible es muy importante para la reducción de las emisiones de CO₂. Cada combustible posee una relación

H/C diferente, ya que la composición en hidrógeno y carbono varía de uno a otro. Una mayor cantidad de C dará lugar a una mayor cantidad de CO₂, ya que:



También, una mayor cantidad de C implicará un mayor PCI. Por otra parte, la presencia de H en la combustión implica la formación de agua, ya que:



La misma provocará una disminución en el PCI, ya que absorberá parte del calor generado.

La relación H/C ayuda a elegir correctamente un combustible y la relación O/C define el grado de reactividad que tendrá la biomasa durante su combustión. (Paz, 2017 y Rojas González y Barrara Burgo, 2012).

El diagrama de Van Krevelen, es una herramienta para la visualización de las características de composición de diversos combustibles y mezclas complejas de los mismos. Este gráfico muestra los productos obtenidos por reacciones tales como deshidratación y desmetanización a lo largo de líneas rectas. Se define como deshidratación al proceso donde se elimina el agua de la matriz de biomasa, causando la eliminación de los grupos hidroxilo, mientras que la descarboxilación, se encarga de la eliminación de CO₂ de la biomasa, eliminando grupos carboxilo en el proceso. En los procesos de deshidratación y descarboxilación los grupos funcionales con doble enlace como C = O y C = C reemplazan grupos hidroxilo y carboxilo enlazados en la matriz de biomasa. Los compuestos furfural generados por estos dos mecanismos, se someten luego a hidrólisis, lo que los rompe aún más, transformándose en ácidos, aldehídos y fenoles. Los ácidos que son generados luego catalizan la liberación de elementos inorgánicos de la matriz de biomasa. Con el diagrama de Van Krevelen se puede evaluar mezclas orgánicas complejas como el petróleo crudo y sus productos de refinería o el amplio campo de materia orgánica natural, que representa la mayor proporción de biomasa en la tierra. (Guachi Cabrera ,2019).

En la Figura 8, se puede observar la representación de los combustibles en base al diagrama de Van Krevelen, donde se muestra una clasificación de carbones comenzando por antracita con valores promedios de H/C-O/C de 0,4 y 0,08, para

antracita, 0,8 y 1,2 para huella, 1,2 y 0,4 paralignitos, 1,3 y 0,45 para maderas fósiles, 1,5 y 07 para turba y finalmente, 1,7 y 0,75 para la madera (Cortés, 2006). Asimismo, Jenkins *et al.*, 1998, muestran una clasificación similar, pero indica, además, la región para la biomasa con valores máximo de H/C 1,8 y O/C 0,9, (Figura 9) lo cual esperamos obtener para nuestras biomásas en estudio. También, en este gráfico se indica que a medida que disminuye la relación O/C y aumenta la relación H/C, se incrementa el poder calorífico del combustible.

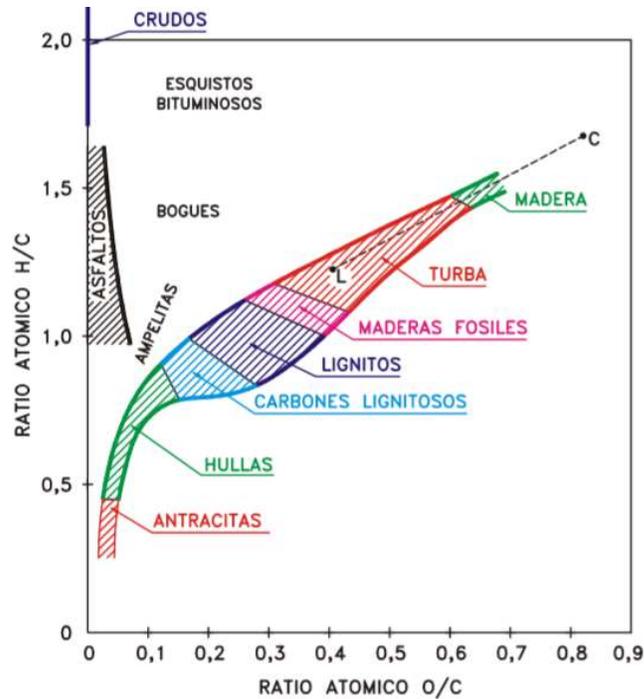


Figura 8: Representación de los combustibles según Van Krevelen
Fuente: Cortés, 2006

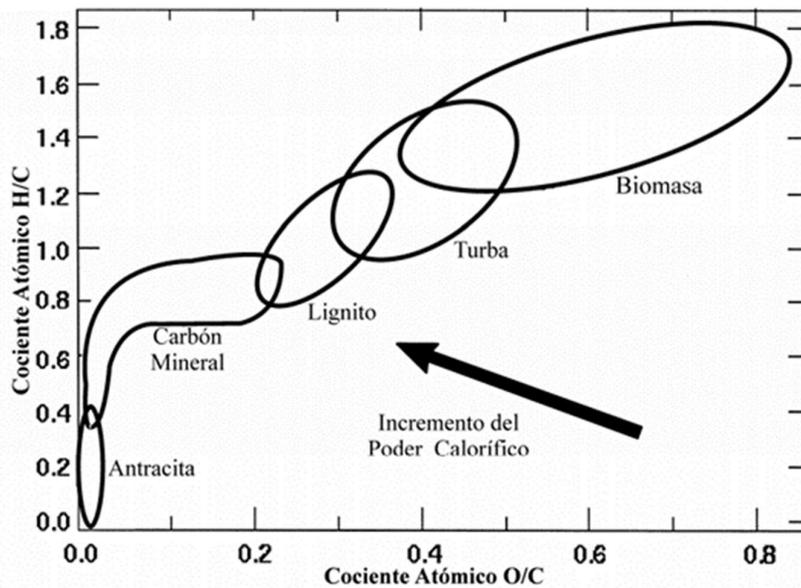


Figura 9: Representación de los combustibles según Van Krevelen
Fuente: Jenkins *et al.*, 1998

Además, RuiGalhano dos Santos *et al.*, 2016, han estudiado la evaluación de residuos industriales como: aserrín de madera, estiércol de porcino y lodo de papelera para producir bio-aceites combustibles. La Figura 10 muestra los resultados

del estudio. En el diagrama de la izquierda (A) se puede observar que las muestras que presentan mayores valores de H/C y menores valores de O/C (puntos con color celeste) son para hidrocarburos (con H/C de 0,8 a 1,9), y materiales de combustibles con menores relaciones de H/C y O/C, son para el carbono producto de la pirólisis y carbones minerales (puntos de color marrón). Para biomasa lignocelulósica promedio (con de H/C 1,0 a 1,5 y O/C de 0,5 a 1,25). En el diagrama de la derecha (B), se indican valores correspondientes de H/C y de O/C para madera de pino (1,95 y 0,95, respectivamente); para la pasta de papel (1,50 y 1,95, respectivamente), para de estiércol de porcino (1,60 y 1,75, respectivamente), estos puntos se destacan en color celeste. Además, se observa el incremento de poder calorífico superior (HHV en inglés), luego de realizarse un tratamiento de licuefacción de estas biomazas. Estas biomazas tratadas poseen características similares a los hidrocarburos, carbón y coque en base al diagrama de Van Krevelen, mostrado en la Figura 8.

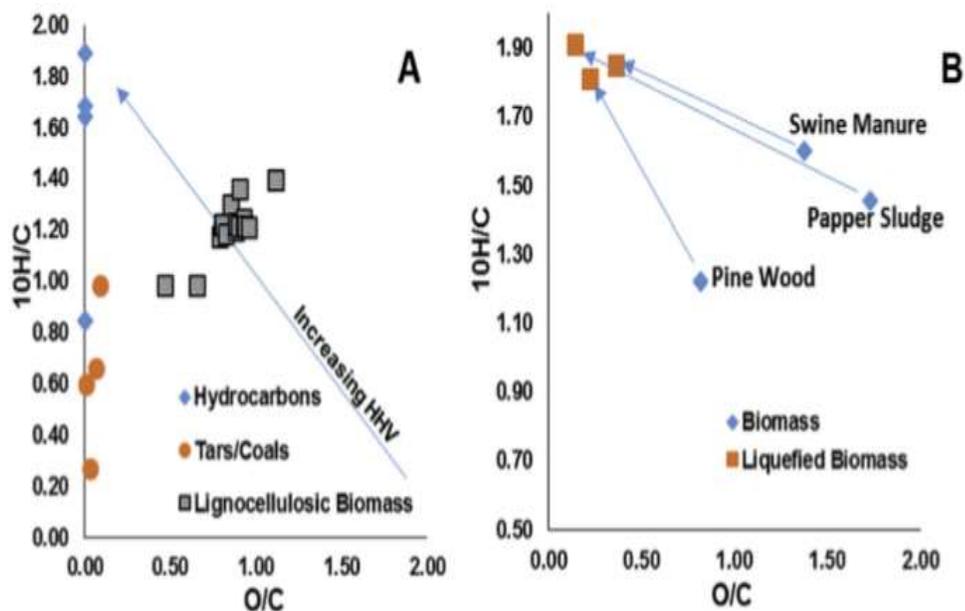


Figura 10: Diagrama de Van Krevelen a) diferentes variedades de materia prima; b) aserrín de madera, estiércol de porcino, lodo de papelera y productos de bio-aceites. Fuente: RuiGalhano dos Santos et al., 2016

También, Singh *et al.*, 2017, mostraron las características de cinco biomazas lignocelulósicas (*Imperataylindrica*, *Eragrostis Airoides*, *Typha Angustifolia L.*, *Arundinella khasiana*, y *Echinochloa Stagnina*), del noreste de India basadas en un análisis inmediato y composición elemental de las mismas. Los autores encontraron

que el contenido de humedad era más alto en *T. Angustifolia* (13,951%) y más bajo en *E. Airoides* (8,275%). El pico termogravimétrico observado en un análisis termogravimétrico diferencial (DTG) fue por debajo de 120°C, lo que indica una pérdida de moléculas de agua de la biomasa. El contenido máximo de carbono fue visible en *T. Angustifolia* (52,89%) y mínimo en *E. Airoides* (41,02%), por lo que demostraron que la biomasa lignocelulósica podría ser candidata potencial para la producción de bioetanol. Asimismo, Monir *et al.*, 2018, estudiaron la cáscara de coco con carbón vegetal, por medio del diagrama de Van Krevelen. Este diagrama indicó mayores contenidos de H y O en la muestra de cáscara de coco que en la muestra de carbón vegetal. Por lo tanto, se pueden observar una tendencia general del aumento del valor calorífico de las materias primas seleccionadas, cuando aumentan los contenidos de H y C.

Además, Guachi Cabrera, 2019, estudió la obtención de carbón mediante carbonización hidrotermal, utilizando bagazo de caña de azúcar. La carbonización hidrotermal es un proceso termoquímico de conversión de la materia prima orgánica en un producto sólido rico en carbono, llevado a cabo en un rango de temperaturas de 180 a 260 °C durante el cual la biomasa es sumergida en agua y calentada por un sistema a una presión autogenerada. Por medio del diagrama de Van Krevelen, demostró la influencia de la descarboxilación, desmetanización y deshidratación para muestras de bagazo, resultados que se presentan en la Figura 11. El trabajo concluye que la reacción que predomina en la carbonización hidrotermal de bagazo de caña es la reacción de deshidratación. En las muestras que tienen menor relación de radios atómicos H/C y O/C se apreció un cambio significativo en las propiedades del carbón a diferencia de las otras cuyos porcentajes de C, N, H y relaciones de H/C y O/C, son parecidos a la muestra inicial que es el bagazo de caña. En la Figura 9 se puede observar un punto rojo, correspondiente a bagazo original que presenta valores de H/C 1,8 y O/C 0,95, los puntos verdes corresponden a muestras de carbonización de bagazo con malla 35mm (A); y puntos amarillos son las muestras de carbonización de bagazo con malla 60mm (B). También, en esta figura se puede observar cómo son las reacciones de descarboxilación ($--\rightarrow$), desmetanización(\rightarrow) y deshidratación ($\dots\rightarrow$) a lo largo de las líneas rectas. Además, se puede observar que la reacción que predomina en la carbonización hidrotermal del bagazo de caña es la

reacción de deshidratación ya que las muestras tienen menor relación de radios atómicos H/C y O/C.

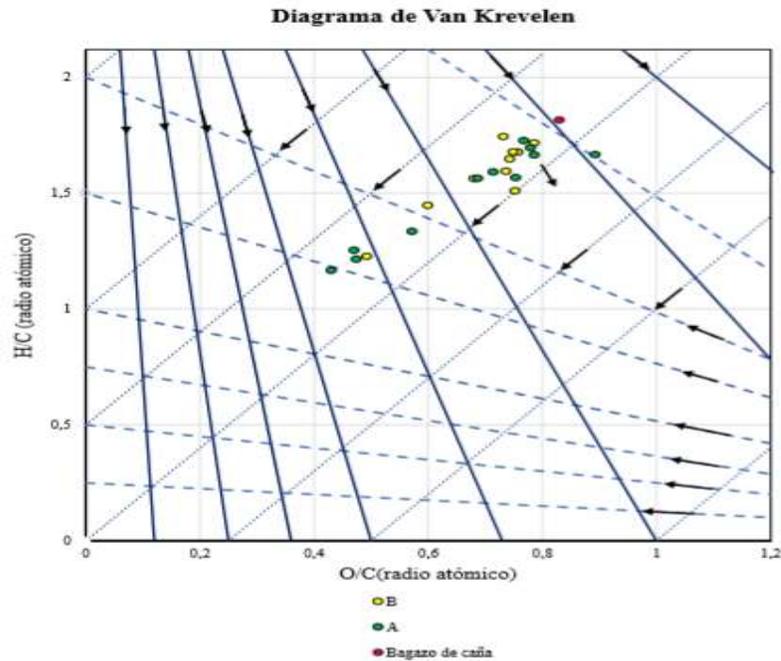


Figura 11: Diagrama de Van Krevelen para bagazo y carbonos obtenidos a partir de bagazo. Fuente Guachi Cabrera, 2019

Por último, Kumar *et al.*, 2019, realizaron un estudio comparativo de las características termoquímicas y energéticas de algunas biomásas lignocelulósicas, como cáscara de arroz, paja de trigo, bagazo de caña de azúcar, tronco de plátano, paja de arroz y tallo de Arhar. En la Figura 12, se pueden observar los resultados obtenidos por los autores, quienes analizan las citadas biomásas y concluyen que la relación más alta es la H/C, que refleja un mayor contenido de energía y corresponde al bagazo de caña de azúcar (H/C de 1,6). Por otro lado, la relación O/C indica un menor contenido de energía de la biomasa debido al menor contenido de energía del enlace C-O en comparación con el enlace C-H, que corresponde a la muestra antracita, con un valor de 0,42. También observaron que las antracitas y los carbonos bituminosos tienen valores más bajos de H/C y O/C; 0,4 y 0,0 para antracita, respectivamente; 0,7 y 0,2 para carbonos bituminosos, respectivamente. Las siete biomásas incluidas en este gráfico exhiben una variación más amplia debido al mayor contenido de oxígeno en los compuestos lignocelulósicos. Los

autores expresan que la paja de arroz y la paja de trigo no son favorables para la gasificación y la producción de combustibles gaseosos y líquidos a través de la pirólisis. Esto es válido para las biomazas en las condiciones analizadas para el estudio que realizaron estos autores.

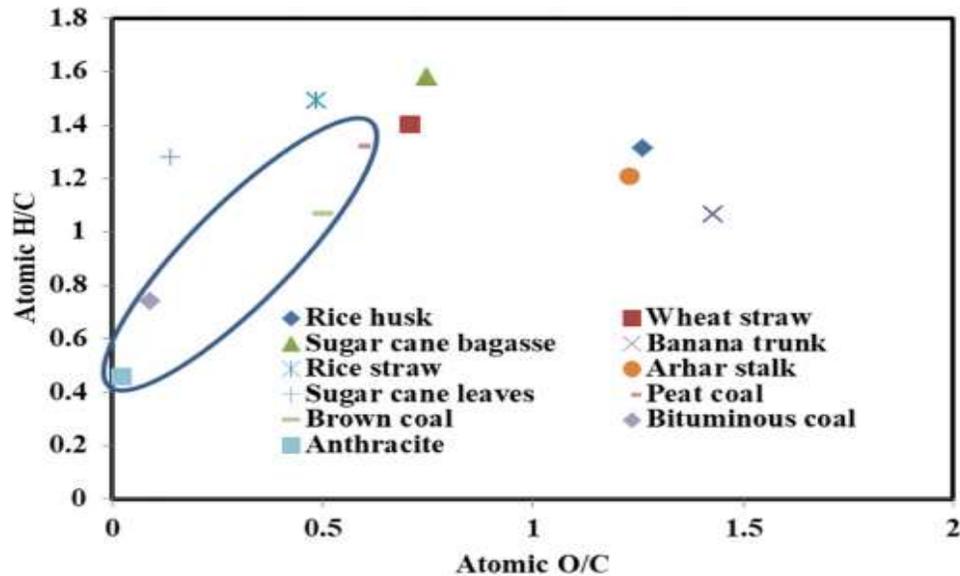


Figura 12: Diagrama de Van Krevelen para biomazas lignocelulósicas comparadas con carbón.

Fuente: Kumar *et al.*, 2019.

1.10 Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) hacen referencia al dióxido de carbono equivalente (CO₂eq.), que incluye a los seis gases de efecto invernadero considerados en el Protocolo de Kioto: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido de nitrógeno (N₂O), hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

Las emisiones de GEI asociadas a una actividad se pueden clasificar según se trate de emisiones directas o emisiones indirectas:

- Las emisiones directas son emisiones de fuentes que posee o controla el sujeto que genera la actividad.
- Las emisiones indirectas son consecuencia de las actividades que realiza el sujeto, pero que tienen lugar en fuentes que posee o controla otro sujeto.

Para calcular las emisiones asociadas, debe aplicarse el factor de emisión correspondiente.

La biomasa, al ser fuente de energía renovable, contribuye a la conservación del medio ambiente, debido a que sus emisiones a la atmósfera son inferiores a las que producen los combustibles sólidos por su bajo contenido de azufre, nitrógeno y cloro. Una de las principales ventajas es el balance neutro de CO₂, al cerrarse el ciclo de carbono en las plantaciones (Energía de la biomasa, 2008).

1.11 Objetivo General

El principal objetivo del presente estudio, es mostrar las características físico-químicas y energéticas de biomásas lignocelulósicas de Tucumán, con mayor potencial de aprovechamiento energético, como son el bagazo de caña de azúcar y el RAC. Asimismo, se ha incluido al sorgo fibroso por tratarse de un cultivo energético con gran potencial para la producción de energía y gran adaptabilidad a los diferentes suelos agrícolas de la región (Romero, 2017). Para ello, se utilizará como herramienta el diagrama de Van Krevelen, con la idea de analizar las características de su composición elemental y su influencia en los procesos termoquímicos factibles de realizar.

1.12 Objetivos Específicos

- Caracterizar físicoquímica y energéticamente al bagazo de la caña de azúcar, RAC para las actuales variedades en cultivo, y a una variedad comercial de sorgo fibroso, por medio del análisis inmediato y termogravimétrico, determinando contenidos de humedad (W), cenizas (CZ), sólidos volátiles (SV) y carbono fijo (CF); y determinación de cloro (Cl) y azufre (S). También sus propiedades energéticas: poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI); fusibilidad de cenizas y análisis elemental: carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno (C, H, N, O).
- Estudiar la relación del contenido de sólidos volátiles en función del poder calorífico superior (PCS) de las biomásas.
- Determinar los valores de PCS empíricamente en función de componentes elementales analizados y comparar los mismos con los valores ensayados en bomba calorimétrica.
- Confeccionar el diagrama de Van Krevelen a partir de las relaciones H/C y O/C para las biomásas ensayadas; y definir la zona correspondiente en el

diagrama para combustibles lignocelulósicos. Realizar la comparación con otros combustibles de origen fósil.

- Evaluar la disminución de gases de efecto invernadero si reemplazamos la quema en caldera del gas natural por estos combustibles.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las biomasas en estudio fueron bagazo de caña de azúcar proveniente de diferentes ingenios tucumanos; residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar, recolectados en campo en las diferentes zonas agroecológicas de Tucumán (llanura deprimida, llanura chaco- pampeana y pedemonte). El sorgo fue proveniente también de la llanura Chaco pampeana de la provincia de Tucumán. Las Figuras 13, 14 y 15, muestran imágenes de la biomasa en estudio.

Se recolectaron 20 muestras por cada una de las biomasas antes mencionadas y se analizaron en el Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI), que posee un Laboratorio de Ensayos Energéticos de Biomasa (LEEB), pertenecientes a la Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). Se realizaron todas las determinaciones por duplicado.



Figura 13: Muestra de bagazo a granel en un depósito cerrado típico de un ingenio.



Figura 14: Muestra de RAC dejado en campo y troceado



Figura 15: Cultivo energético, sorgo

- **Caracterización de biomasas:**

Para la caracterización de la biomasa se llevó a cabo en primera instancia una preparación y adecuación de las mismas, se realizó un secado inicial para la eliminación de la humedad, posteriormente se realizó una adecuación de su tamaño por medio de una molienda. Luego se realizaron los análisis de caracterización (análisis inmediato, determinación de cloro, composición elemental y análisis de fusibilidad de cenizas). Cabe destacar que las normas utilizadas en el laboratorio son normas de carbón y coque, adaptadas para nuestras biomasas, en base a la bibliográfica y la experimentación realizada. Se detalla a continuación cada técnica.

2.1 Preparación de las muestras

- **Secado y determinación del contenido de humedad:** se procedió al secado de las biomasas a una temperatura de 105°C, hasta peso constante, en una estufa marca ORL, con circulación forzada de aire y con controlador automático de temperatura (el equipo se muestra en la Figura 16). Para las determinaciones gravimétricas se empleó una balanza granataria marca Shimatzu, modelo TX3202L, con sensibilidad de 0,01 g. La metodología empleada se basa en las normas ASTM D 3173 – 03 adaptada (Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke). El porcentaje de humedad (W), se determinó de acuerdo con la Ecuación 1:

$$\%W = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \text{ Ec. (1)}$$

Referencias:

M_i: gramos de la muestra húmeda inicial

M_s: gramos de la muestra seca final



Figura 16: Estufa marca ORL, con circulación forzada de aire y con controlador automático de temperatura

- **Molienda:** Una vez realizado el secado de las muestras, se procedió a la molienda de las mismas, por medio de un molino, marca Fritsch (ver Figura 17). Para ello se utilizó una malla de retención de 1mm de abertura de la misma.



Figura 17: Molino de corte para la preparación de muestras, marca Fritsch, modelo Pulverisette 19.

2.2 Análisis inmediato

Las biomásas se caracterizaron por medio de un analizador termogravimétrico (TGA), registran la pérdida de peso que experimenta una muestra mientras es calentada en condiciones controladas de temperatura, velocidad de calentamiento y atmósfera. Las técnicas de evaluación fueron realizadas siguiendo el procedimiento indicado en la Norma ASTM D 5142-02 modificada. Para ello se utilizó un equipo TGA, marca LECO, modelo TGA701, que trabaja con atmósfera controlada (ver Figura 18). El tiempo de ensayo fue de 4 horas. Cabe destacar que las muestras utilizadas en el TGA ingresaron secas y molidas, los resultados de esta caracterización se expresaron en porcentaje en base seca (b.s.). A continuación, se indican los parámetros analizados:

Contenido de cenizas (%CZ) en base seca: se realizó un calentamiento de la muestra a 550°C hasta peso constante, en atmósfera de oxígeno.

Contenido de sólidos volátiles (%SV) en base seca: se determinan como el porcentaje de pérdida de peso que experimenta una biomasa calentada durante 7 minutos a 900 °C, en atmósfera de nitrógeno.

Carbono Fijo (%CF) en base seca: se calculó restando del 100% los contenidos porcentuales de CZ% y SV%, como se muestra en la Ecuación 2

$$\%CF = 100 - \%SV - \%CZ \text{ Ec. (2)}$$

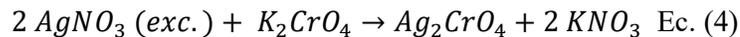


Figura 18: Equipo Analizador termogravimétrico, TGA 701

2.3 Análisis de componentes inorgánicos: determinación de cloro

La determinación de cloruros se realizó mediante el método de Mohr, método volumétrico indicado para determinar contenidos de cloruros entre 0,15 y 10 mg Cl⁻ (Norma ASTM E 776-87 modificada). Para ello, se realizó la combustión de una

muestra de biomasa en un recipiente cerrado con oxígeno (bomba calorimétrica). El condensado de los gases se recogió en un recipiente y se llevó la solución a un pH alcalino (pH 7–10), se añadió una disolución de AgNO_3 con solución indicadora de K_2CrO_4 . Los iones Cl^- precipitan con el ión Ag^+ formando un compuesto muy insoluble, de color blanco (Ecuación 3). Cuando el producto resultante precipita, se forma cromato de plata, de color rojo ladrillo, que es menos insoluble que el anterior, lo que indica el fin de la valoración (Ecuación 4).



2.4 Análisis energético

- Poder calorífico superior (PCS):

La metodología que se empleó en la determinación de PCS fue la indicada en la ASTM D240. Las muestras fueron molidas y tamizadas hasta un tamaño de 1 mm, luego fueron prensadas formando pequeñas pastillas de menos de 1 gramo cada una. De esta manera se evitaron salpicaduras en el interior del recipiente, lo que permitió obtener una combustión completa.

El equipo empleado en los ensayos de PCS fue una bomba calorimétrica IKA, modelo C5000 (Figura 19), que realiza el cálculo de PCS teniendo en cuenta el peso de la muestra combustible y la capacidad calorífica del sistema calorimétrico.



Figura 19: Bomba calorimétrica, marca IKA, modelo C5000

- **Estimación del poder calorífico superior:** para este estudio se utilizó la ecuación informada por Nogués *et al.*, 2010, ecuación genérica para las biomásas (Ec. 5):

$$PCS_{bs} \left(\frac{MJ}{kg} \right) = 0,314 * C + 1,322 * H - 0,12 * O - 0,12 * N + 0,0686 * S - 0,0153 * CZ \text{ Ec. (5)}$$

Donde:

PCS_{bs}: poder calorífico superior en base seca [MJ/kg]

C: contenido de carbono, fracción másica, en base seca

H: contenido de hidrógeno, fracción másica, en base seca

O: contenido de oxígeno, fracción másica, en base seca

N: contenido de nitrógeno, fracción másica, en base seca.

S: contenido de azufre, fracción másica, en base seca.

CZ: contenido de ceniza, fracción másica, en base seca.

- **Poder calorífico inferior:** el cálculo del PCI, se realizó mediante la siguiente ecuación propuesta por Feijóo *et al.*, 2015, ecuación genérica para las biomásas :

$$PCI_{bh} \left(\frac{kJ}{kg} \right) = PCS_{bs} * (1 - w) - 2442 * [9 * H * (1 - CZ) * (1 - w) + w] \text{ Ec. (6)}$$

Donde:

PCI_{bh}: poder calorífico inferior en base húmeda [kJ/kg]

PCS_{bs}: poder calorífico superior en base seca [kJ/kg]

H: contenido de hidrógeno, en composición centesimal.

w: contenido de humedad, en composición centesimal.

CZ: contenido de cenizas, en composición centesimal.

b.h.: base húmeda

b.s.: base seca

2.5 Fusibilidad de cenizas

- Temperatura de fusión de cenizas

El método empleado en este estudio fue basado en la norma ASTM D1857-03. Para ello, se utilizó el equipo AF700 (ver Figura 20), en atmósferas controladas. El equipo controla automáticamente la temperatura de deformación de un cono de ceniza elaborado con el material a analizar, haciendo uso de un software con reconocimiento de imágenes (IRF), el cual determinó automáticamente las diferentes temperaturas de transición indicadas en la mencionada norma de fusibilidad de cenizas. Se registraron las temperaturas de inicio de deformación (DT), temperatura de ablandamiento (ST), temperatura de hemiesfera (ST) y temperatura de fluidización (FT). El ensayo duró 4 horas ya sea en atmósfera oxidante o reductora.



Figura 20: Equipo de fusibilidad de cenizas, marca LECO, modelo AF700

2.6 Análisis de composición elemental

La metodología que se empleó en el presente estudio estuvo basado en la norma ASTM D 5373-08, estipulada para carbón mineral y adaptada para biomasa (ver ecuación 7). Las muestras inicialmente fueron secadas y molidas, según el procedimiento indicado en la sección 2.1. Los resultados se expresaron en porcentaje en peso en base seca (b.s.).

$$\%C + \%H + \%O + \%N + \%S = 100\% \text{ Ec. (7)}$$

Para este análisis se utilizó un equipo de composición elemental, marca LECO, modelo CHN628, que determina hidrógeno (%H), carbono (%C) y nitrógeno (%N) elemental en matrices orgánicas. En el ensayo se colocó una muestra previamente

pesada y encapsulada en el cargador del instrumento, donde posteriormente se transferirá a la cámara de purga del equipo, directamente sobre el horno, eliminando los gases atmosféricos del proceso de transferencia. El instrumento utiliza una técnica de combustión en horno eléctrico en atmósfera de helio y oxígeno, a una temperatura de 950 °C. El tiempo del ensayo fue de 3 minutos.

Para la determinación del contenido de %S, se utilizó el equipo de composición elemental arriba mencionado, con la adición de un módulo anexo que realiza análisis de azufre, la muestra se coloca en un crisol de cuarzo y se introduce en el interior del horno correspondiente al módulo de azufre. La atmósfera utilizada fue oxígeno puro, a una temperatura regulada a 1.350 °C. El tiempo de ensayo fue de 3 minutos.

Para la determinación de oxígeno se utilizó el mismo equipo mencionado anteriormente (CHN628), pero con un módulo adicional “Micro Oxygen Add on Module”, que proporciona análisis de oxígeno en atmósfera controlada. Para ello el instrumento utiliza un horno de pirólisis a una temperatura de 1.300°C, con tiempo de análisis de 80 segundos a 2 minutos.

La Figura 21 se muestra una imagen del equipo de composición elemental. Con estos datos luego, se calcularán las relaciones molares de O/C e H/C para realizar el diagrama de Van Krevelen.



Figura 21: Equipo de composición elemental CHONS 628

2.7 Construcción del Diagrama de Van Krevelen

Para la construcción del diagrama de Van Krevelen para el grupo de biomásas analizadas en este estudio, se determinaron las relaciones molares H/C y O/C, para cada una de las biomásas en estudio. Se siguió la metodología propuesta por Cortes, 2006 y Jenkins *et al.*, 1998.

Para este cálculo se tomaron las fracciones másicas de C, H, y O, obtenidos en el análisis de composición elemental; y se lo dividió por el correspondiente peso molecular del elemento analizado (Ec. 8, 9 y 10), para obtener fracciones molares. A continuación, se determinaron las relaciones molares H/C y O/C, según las Ecuaciones 11 y 12:

$$C = \frac{masaC}{PM_C} \text{ Ec. 8}$$

$$O = \frac{masaO}{PM_O} \text{ Ec. 9}$$

$$H = \frac{masaH}{PM_H} \text{ Ec. 10}$$

Donde:

PM hidrógeno =1 g/mol

PM carbono=12 g/mol

PM oxígeno =16g/mol

Las relaciones molares (RM) quedan representadas en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{H}{C} (RM) = \frac{masaHg/1g/mol}{masaC g/12g/mol} \text{ Ec. 11}$$

$$\frac{O}{C} (RM) = \frac{masaOg/16g/mol}{masaCg /12g/mol} \text{ Ec. 12}$$

2.8 Estimación de gases de efecto invernadero

En este estudio, se consideró la generación de energía a partir de las biomásas analizadas (bagazo, RAC de la caña de azúcar y sorgo fibroso), y su equivalencia en gas natural, ya que este último es el principal combustible adicional utilizado en la región. Asimismo, se determinó la cantidad de CO₂ que se dejaría de emitir a la atmósfera sustituyendo el gas natural por la quema de estas biomásas.

Para el cálculo de la cantidad de m³ quemados de gas natural se utilizó la Ecuación 13, correspondiente a una conversión isocalórica, propuesta por Golato *et al.*, 2005 y Paz, 2016:

$$B * PCI_B * \eta_B = GN * PCI_{GN} * \eta_{GN} \text{ Ec. (13)}$$

Donde:

B: cantidad de biomasa, en kg.

PCI_B: poder calorífico inferior biomasa, en MJ/kg.

η_B: rendimiento de combustión de biomasa.

GN: cantidad de gas natural equivalente, en m³.

PCI_{GN}: poder calorífico inferior del gas natural, en MJ/kg.

η_{GN}: rendimiento de combustión del gas natural.

La cantidad de CO₂ emitida por gas natural se calculó en función de la Ecuación 14. Se adoptó para el gas natural un factor de emisión de 2,15 [kg CO₂/ Nm³], según CICC, 2011.

$$CO_2[kg] = GN[m^3] \times FE \left[kg \frac{CO_2}{Nm^3} \right] \text{ Ec. (14)}$$

Donde:

GN: cantidad de gas natural equivalente, expresado en[m³]

FE: factor de emisión, expresado en [kg CO₂/(Nm³)]

2.9 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó el software Infostat (InfoStat, 2008); se determinaron los parámetros de medida de resumen; media o promedio, n (cantidad de muestras), DE (desviación estándar), CV (coeficiente de variación porcentual) y los valores máximos (Máx) y mínimos (Mín). Además, para las variables termogravimétricas y energéticas, se realizó un análisis de multivariable biplot a partir de componentes principales.

Por otro lado, se realizó una matriz de diagrama de dispersión para las variables: PCS; CZ; PCS; SV; PCI y W.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados del análisis inmediato o termogravimétrico

Para la presentación de los resultados del análisis termogravimétrico las biomásas de estudio, se utilizó el programa estadístico Infostat. En la Tabla 4 se muestran los parámetros estadísticos de los resultados obtenidos para las muestras de bagazo de caña de azúcar. Estos valores se encuentran referidos en base seca (b.s.) y expresados en porcentaje. Se puede observar que los valores de humedad en promedio fueron de $51,79 \pm 1,09$ %, con un CV de 2,11 %, mientras que para el contenido de cenizas el valor medio fue de $4,93 \pm 0,27$ %, con un CV de 5,39 %, para SV el promedio fue de $77,93 \pm 0,42$ % con un CV de 0,53 % y para el CF, el promedio fue de $17,14 \pm 0,50$ %, con un CV de 2,92 %. Estos resultados muestran una mayor variabilidad en el contenido de cenizas. La Tabla 5 presenta una comparación para bagazo de los parámetros obtenidos, en el presente trabajo, respecto a los encontrados por otros autores. Se observa que los mismos son comparables a los informados por Jenkins *et al.*, 1998; Bizzo *et al.*, 2013; Quinteros Vaca, 2020; Cruz *et al.*, 2016 y Zamora *et al.*, 2019.

Tabla 4: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis termogravimétrico para bagazo de caña de azúcar de Tucumán. Estos valores se encuentran expresados en porcentaje p/p referidos a base seca (b.s.). Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y valores mínimos y la cantidad de valores analizados (n).

Variables	n	Media	D.E.	C.V.	Mín	Máx
W%	20	51,79	1,09	2,11	50,23	53,59
CZ%(b.s.)	20	4,93	0,27	5,39	4,5	5,35
SV%(b.s.)	20	77,93	0,42	0,53	77,35	78,6
CF %(b.s.)	20	17,14	0,5	2,92	16,27	17,87

Tabla 5: Valores del análisis termogravimétrico para bagazo de caña de azúcar comparado con los publicados por otros autores. Estos valores se encuentran expresados en p/p y referidos a base seca (b.s.).

Bagazo	Este trabajo	Jenkins <i>et al.</i> , 1998	Bizzo <i>et al.</i> , 2013	Quinteros Vaca, 2020	Cruz <i>et al.</i> , 2016	Zamora <i>et al.</i> , 2019
W%	51,79				50,13	52,54
CZ% b.s.	4,93	2,44	5,13	5,65	2,49	5,77
SV% b.s.	77,93	85,61	80,81	82,28	79,56	77,21
CF % b.s.	17,14	11,95	19,18	11,75	17,95	16,65

La Tabla 6, muestra los parámetros estadísticos de los resultados obtenidos para las muestras de RAC. Los valores del contenido de humedad en promedio fueron de $15,78 \pm 0,98$ %, con un CV de 6,24 %, mientras que para el contenido de cenizas el valor medio fue de $12,36 \pm 0,80$ %, con un CV de 6,48 %, para SV el promedio fue de $70,64 \pm 0,79$ % con un CV de 1,12 % y para el CF, en promedio fue de $17,00 \pm 0,35$ %, con un CV de 2,07 %. Estos resultados muestran una mayor variabilidad en el contenido de humedad. La Tabla 7 presenta los parámetros obtenidos para RAC comparados con los de otros autores. Se observa una relativa coincidencia con los autores Gómez *et al.*, 1999; Bizzo *et al.*, 2013; Hassuani *et al.*, 2005; Cruz *et al.*, 2016 y Zamora *et al.*, 2016.

Tabla 6: Resultados estadísticos del análisis termogravimétrico para RAC de Tucumán. Estos valores se encuentran referidos en base seca (b.s.) y expresados en porcentaje. Además, se indica los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados (n).

Variables	n	Media	D.E.	C.V.	Mín	Máx
W%	20	15,78	0,98	6,24	14,08	17,05
CZ % (b.s.)	20	12,36	0,8	6,48	11,08	13,78
SV % (b.s.)	20	70,64	0,79	1,12	69,65	72,21
CF % (b.s.)	20	17	0,35	2,07	16,1	17,5

Tabla 7: Valores del análisis termogravimétrico de RAC comparado con los publicados por otros autores. Estos valores se encuentran expresados en p/p y referidos a base seca (b.s.).

RAC	Este trabajo	Gomez <i>et al.</i> , 1999	Hassuani <i>et al.</i> , 2005	Bizzo <i>et al.</i> , 2013	Cruz <i>et al.</i> , 2016	Zamora <i>et al.</i> , 2016
W%	15,78	9,72	10,15		16,2	18,64
CZ % b.s.	12,36	7,66	8,15	7,5	12,51	14,04
SV % b.s.	70,64	71,34	76,23	82,25	70,81	69,2
CF % b.s.	17,00	20,99	15,62	10,1	16,69	16,75

En la Tabla 8 se puede observar los parámetros estadísticos de los resultados obtenidos para las muestras de sorgo fibroso. Se puede observar que los valores de humedad en promedio fueron de $70,86 \pm 0,86$ %, con un CV de 1,21 %, mientras que para el contenido de cenizas el valor medio fue de $9,07 \pm 0,42$ %, con un CV de

4,60 %, para SV el promedio fue de $71,92 \pm 0,47$ % con un CV de 0,66 % y para el CF, en promedio fue de $19,01 \pm 0,62$ %, con un CV de 3,26 %. Estos resultados muestran una mayor variabilidad en el contenido de cenizas. La Tabla 9 compara los resultados obtenidos para sorgo fibroso por diferentes autores. Los resultados obtenidos en este trabajo son consistentes con los de Clean Tech., 2014; Carvalho *et al.*, 2014; Cruz *et al.*, 2016 y Cruz *et al.*, 2019.

Tabla 8: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis termogravimétrico para sorgo fibroso de Tucumán. Estos valores se encuentran referidos en base seca (b.s.) y expresados en porcentaje y, además, se indica los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados (n).

Variables	n	Media	D.E.	C.V.	Mín	Máx
W %	20	70,86	0,86	1,21	69,1	71,8
CZ % b.s.	20	9,07	0,42	4,6	8,34	9,71
SV % b.s.	20	71,92	0,47	0,66	70,96	72,75
CF % b.s.	20	19,01	0,62	3,26	18,2	20,01

Tabla 9: Valores del análisis termogravimétrico de sorgo fibroso comparado con publicados por otros autores. Estos valores se encuentran expresados en p/p y referidos a base seca (b.s.).

Sorgo fibroso	Este trabajo	Clean Tech, 2014	Carvalho <i>et al.</i> , 2014	Cruz <i>et al.</i> , 2016	Cruz <i>et al.</i> , 2019
W %	70,86				72,25
CZ % b.s.	9,07	7,36	7,16	8,86	9,29
SV % b.s.	71,92	70,41	74,66	72,75	72,23
CF % b.s.	19,01	20,02	18,18	18,39	18,33

En Tabla 10 se presenta un resumen de los valores obtenidos para el análisis termogravimétrico de las biomásas en estudio. En base a estos resultados, se puede concluir que la muestra que contiene mayor contenido de humedad es la muestra de sorgo fibroso (70,86 %), seguida de bagazo (51,79 %) y por último RAC (15,78 %). Este parámetro luego influirá en el cálculo del PCI. En cuanto a los valores de cenizas, la biomasa que presentó fue el bagazo (4,93 %), seguido de la muestra de

sorgo (9,07 %) y por último el RAC (12,36 %), este parámetro influenciará en el valor del PCS, con el análisis estadístico de multi-variable como se mostrará más adelante. Los sólidos volátiles al igual que las cenizas influenciarán en el PCS y la facilidad de ignición de las muestras, por lo que se puede mencionar que bagazo al tener mayor SV, será el de más fácil ignición.

Tabla 10: Valores medios del análisis termogravimétrico de muestras de bagazo, RAC y sorgo fibroso. Estos valores se encuentran expresados en p/p y referidos a base seca (b.s.).

Bagazo	Media	RAC	Media	Sorgo fibroso	Media
W%	51,79	W%	15,78	W %	70,86
CZ% b.s.	4,93	CZ % b.s.	12,36	CZ % b.s.	9,07
SV% b.s.	77,93	SV % b.s.	70,64	SV % b.s.	71,92
CF % b.s.	17,14	CF % b.s.	17,00	CF % b.s.	19,01

3.2 Resultados del análisis energético

3.2.1 Resultados de PCS y PCI

La Tabla 11 sintetiza los resultados de PCS y los valores calculados de PCI para la muestra de bagazo, con sus respectivos parámetros estadísticos: media, DE, CV y valores máximos, mínimos y cantidad de muestra. Se pueden observar valores obtenidos de PCS de 17.893 [kJ/kg], con CV de 0,50 % y para PCI 6.705,95 [kJ/kg], con CV de 3,06 %. Estos resultados coinciden con las investigaciones de Jenkins *et al.*, 1998; Bizzo *et al.*, 2013; Quinteros Vaca, 2020; Cruz *et al.*, 2016 y Zamora *et al.*, 2019, (ver Tabla 12).

Tabla 11: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis energético para bagazo de caña de azúcar de Tucumán. Estos valores se encuentran referidos en base seca (b.s.) y expresados en porcentaje y, además, se indica los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados (n).

Variables	n	Media	D.E.	C.V.	Mín	Máx
PCS [kJ/kg] b.s.	20	17.893	88,59	0,5	17.736	17.995
PCI [kJ/kg] b.h.	20	6.706	204,98	3,06	6.369	7.010

Tabla 12: Valores de PCS de bagazo de caña de azúcar comparado los obtenidos por otros autores. Los valores se encuentran referidos a base seca (b.s.).

Bagazo	Este trabajo	Jenkins <i>et al.</i> , 1998	Bizzo <i>et al.</i> , 2013	Quinteros Vaca, 2020	Cruz <i>et al.</i> , 2016	Zamora <i>et al.</i> , 2019
PCS [kJ/kg] b.s.	17.893	18.990	1.772	17.370	17.552	17.584

La Tabla 13 expone los resultados de PCS y los valores calculados de PCI para la muestra de RAC. A partir de esta tabla se evidencia valores obtenidos de PCS de 16.668 [kJ/kg], con un valor de CV% 2,70 y para PCI 12.726,35 [kJ/kg], con CV% de 3,88 %. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Bizzo *et al.*, 2014; Hassuani *et al.*, 2005; Cruz *et al.*, 2016 y Zamora *et al.*, 2016, (ver Tabla 14).

Tabla 13: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis energético para bagazo de caña de azúcar de Tucumán. Estos valores se encuentran referidos en base seca (b.s.) y expresados en porcentaje y, además, se indica los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados (n). Los valores de PCS se encuentran expresados en base seca (b.s.) y los valores de PCI se encuentran expresados en base húmeda (b.h.)

Variables	n	Media	D.E.	C.V.	Mín	Máx
PCS [kJ/kg] b.s.	20	16.668	449,35	2,7	15.817	17.418
PCI [kJ/kg] b.h.	20	12.726	493,87	3,88	11.693	13.638

Tabla 14: Valores de PCS de RAC de caña de azúcar comparado con los obtenidos por otros autores. Los valores están expresados en base seca (b.s.)

RAC	Este trabajo	Hassuani <i>et al.</i> , 2005	Bizzo <i>et al.</i> , 2013	Cruz <i>et al.</i> , 2016	Zamora <i>et al.</i> , 2016
PCS [kJ/kg] b.s.	16.668	1.698	17.100	16.419	16.313

Los resultados de PCS, expresados en base seca y los valores calculados de PCI en base húmeda para la muestra de sorgo fibroso, con sus respectivos resultados estadísticos: media, DE, CV y valores máximos, mínimos y cantidad de muestra, son mostrados en la Tabla 15. Los resultados obtenidos fueron para PCS 16.668 [kJ/kg], con valor de CV 2,70 % y para PCI 12.726,35 [kJ/kg], con CV de 3,88 %. Estos

resultados son similares a los publicados por Clean Tech., 2014; Cruz *et al.*, 2016 y Cruz *et al.*, 2019, ver Tabla 16.

Tabla 15: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis energético para sorgo fibroso de Tucumán. Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n). Los valores de PCS están expresados en base seca (b.s.), y los valores de PCI están expresados en base húmeda (b.h.).

Variables	n	Media	D.E.	C.V.	Mín	Máx
PCS [kJ/kg] b.s.	20	16.939	178,07	1,05	16.672	17.259
PCI [kJ/kg] b.h.	20	2.815	161,28	5,73	2.571	3.169

Tabla 16: Valores de PCS de sorgo fibroso comparado con los obtenidos por otros autores. Los valores están expresados en base seca (b.s.)

Sorgo fibroso	Este trabajo	Clean Tech, 2014	Cruz <i>et al.</i> , 2016	Cruz <i>et al.</i> , 2019
PCS [kJ/kg] b.s.	16.939	17.550	16.847	16.930

En la Figura 22 se muestran los valores obtenidos para el análisis energético de diferentes muestras de biomásas en estudio. Se observó muy baja variabilidad en los valores de PCS para el bagazo de caña de azúcar, se determinó un valor promedio 17.893 [kJ/kg], seguido por el sorgo fibroso (16.939 [kJ/kg]), y finalmente, para el RAC (16.668 [kJ/kg]). Este último presentó una tendencia más variable respecto al resto de las biomásas en estudio. Esta tendencia en la variabilidad de las mediciones también se puede observar si se analizan los valores de CV obtenidos para las determinaciones de PCS de cada biomasa.

En cuanto a los valores de PCI, el menor valor obtenido fue para el sorgo fibroso con 2.815,05 [kJ/kg], cuyo valor de humedad del 70,86 % fue superior que, para las demás biomásas, por lo que estos resultados han reforzado lo predicho.

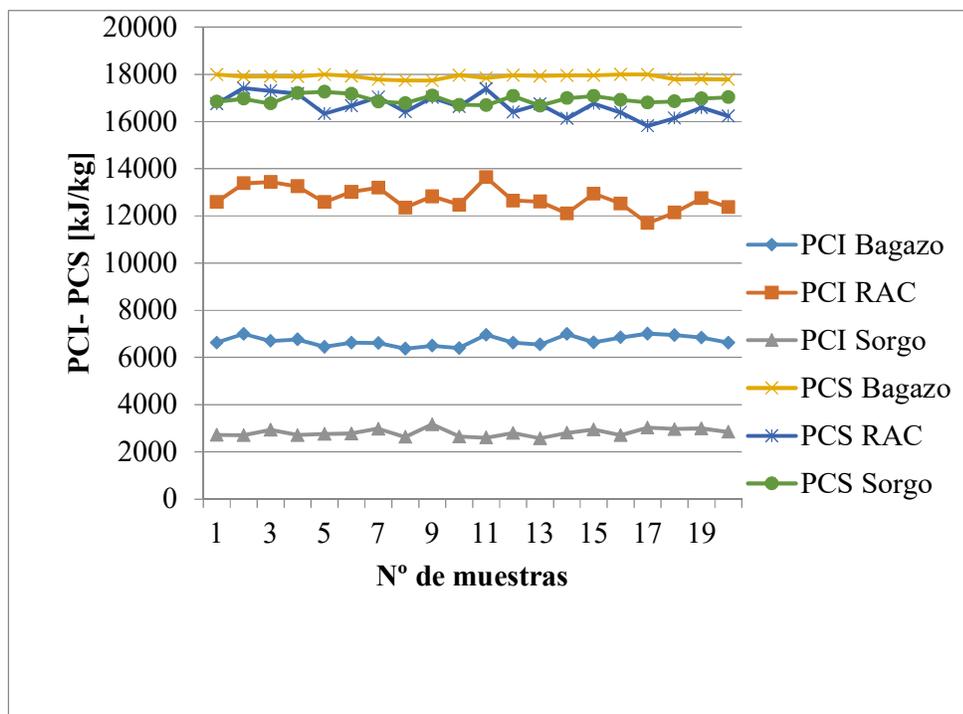


Figura 22: Resultados de PCS y PCI de las biomasa en estudio.

3.2.2 Resultados de PCS calculado

Como se mencionó en la sección 2.4 de metodología, se procedió a realizar el cálculo de PCS en función de los valores de composición elemental y cenizas. En la Figura 23 se pueden observar valores de PCS calculados, los cuales siguen la misma tendencia que los valores determinados en bomba calorimétrica, siendo el valor mayor para la muestra de bagazo, seguido de la muestra de sorgo energético y por último el RAC, lo que confirma lo mencionado anteriormente. Al comparar el valor de PCS obtenido por bomba calorimétrica, con el valor de PCS aproximado (calculado por fórmula), se puede decir que estas presentaron un error relativo del 11,30 % para bagazo, 10,62 % para RAC y 11,70 % para sorgo fibroso.

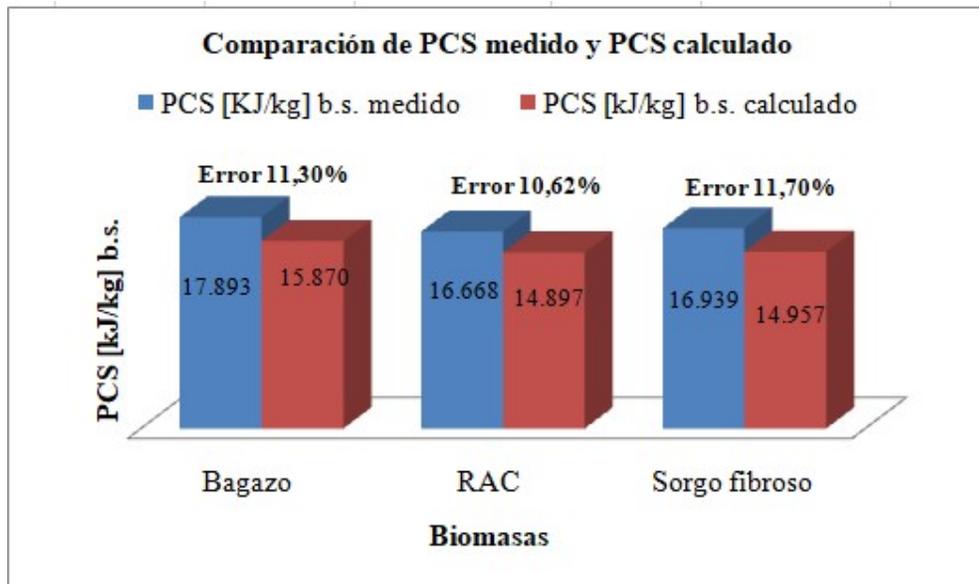


Figura 23: Resultados de PCS calculados por fórmula comparados con PCS medidos para las biomásas de estudio con sus errores relativos.

Los valores de PCS obtenidos para las muestras de bagazo, RAC y sorgo demuestran que aportan una cantidad de energía necesaria para poder utilizarla como combustible, si lo comparamos con el PCS de madera que tiene valores de 19,59 MJ/kg, se puede decir que los valores de las biomásas de estudio se encuentran semejantes a este último valor. (Jenkins *et al.*, 1998).

3.3 Resultado del contenido de cloro total

La Tabla 17 muestra los resultados de cloro para las biomásas de estudio, con sus parámetros estadísticos. Los valores medios fueron para bagazo de $0,09 \pm 0,01$ %, con un valor CV de 0,09 %, para RAC $0,18 \pm 0,02$ % con un valor de CV de 0,09 % y para sorgo fibroso $0,19 \pm 0,01$ %, con un valor de CV de 0,07 %. El bagazo presenta el menor valor del contenido de cloro, por lo que sería el que menores emisiones en forma de HCl produciría. Asimismo, estos valores se encuentran en igual orden de magnitud según los informado por Jenkins *et al.*, 1998; Zamora *et al.*, 2019; Zamora *et al.*, 2016 y Clean Tech., 2014 (ver Tabla 18).

Tabla 17: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis de cloro para las muestras de bagazo de caña de azúcar, RAC y sorgo fibroso de Tucumán. Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n). Los valores están expresados en % p/p, en b.s.

Variables	Bagazo	RAC	Sorgo fibroso
n	20	20	20
Media	0,09	0,18	0,19
DE	0,01	0,02	0,01
CV	0,09	0,09	0,07
Mín	0,08	0,16	0,17
Max	0,10	0,22	0,20

Tabla 18: Valores de Cl (% p/p, b.s.) para las biomásas de estudio comparada con otros autores.

Bagazo		RAC		Sorgo fibroso	
Cl (%)b.s.	Referencias	Cl (%)b.s.	Referencias	Cl (%)b.s.	Referencias
0,09	Este trabajo	0,18	Este trabajo	0,19	Este trabajo
0,03	Jenkins <i>et al.</i> , 1998	0,14	Zamora <i>et al.</i> , 2016	0,2	Clean Tech, 2014
0,14	Zamora <i>et al.</i> , 2019				

3.4 Resultados de fusibilidad de cenizas

La Tabla 19 expone los resultados de temperatura fusibilidad de cenizas, expresados en °C, con los valores de temperatura de inicio de deformación (DT), temperatura de

ablandamiento (ST), temperatura de hemiesfera (HT) y temperatura de fluidización (FT), en atmósfera oxidante y reductora. Además, se indican los parámetros estadísticos de las mediciones. Para las muestras de bagazo, los resultados obtenidos fueron para DT (°C) $1.120,48 \pm 41,40$ °C, con un valor de CV 3,60 % y DT (°C) $1.155,83 \pm 38,67$ °C, con un valor de CV 3,35 %, en atmósfera reductora y oxidante, respectivamente. Los valores de temperatura de fluidización en ambas atmósferas resultaron cercanos a 1.500 °C, que es la capacidad máxima de medición del equipo. Estos parámetros son consistentes con los obtenidos para bagazo por Peralta et al., 2014, con un valor de DT 1.081,1 °C y 1.110°C, en atmósfera reductora y oxidante, respectivamente. Zamora *et al.*, 2019, informa valores de DT 1.062°C y 1.066°C, en atmósfera reductora y oxidante, respectivamente.

Tabla 19: Parámetros estadísticos de los resultados de la determinación de fusibilidad de cenizas para las muestras de bagazo de caña de azúcar de Tucumán. Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n).

Bagazo Variables	Atmósfera reductora				Atmósfera oxidante			
	DT (°C)	ST (°C)	HT (°C)	FT (°C)	DT (°C)	ST (°C)	HT (°C)	FT (°C)
Media	1.120,48	1.286,45	1.395,35	>1500	1.155,83	1.287,18	1.386,52	>1500
DE	41,40	43,92	38,79		38,67	38,02	42,37	
CV	3,69%	3,41%	2,78%		3,35%	2,95%	3,06%	
Mín	1.012,50	1.207,50	1.310,00		1.065,50	1.206,50	1.323,50	
Máx	1.187,00	1.396,50	1.445,00		1.198,00	1.361,50	1.450,00	

La Tabla 20 presenta los resultados de la temperatura de fusibilidad de cenizas, en atmósfera oxidante y reductora, obtenidos para las muestras de RAC, expresados en °C. Además, se indican los respectivos parámetros estadísticos de las mediciones. Se puede observar que los valores de inicio de deformación DT (°C) $1.096,20 \pm 41,40$ °C, con un valor de CV 3,55 % y DT (°C) $1.069,55 \pm 46,77$ °C, con un valor de CV 4,37%, en atmósfera reductora y oxidante, respectivamente. Los valores de temperatura de fluidización en ambas atmósferas resultaron cercanos a 1.500 °C, que es la capacidad máxima de medición del equipo. Estos parámetros concuerdan con los obtenidos por Peralta et al., 2014, con un valor de DT 1.054,4 °C y 1.195,6 °C, en atmósfera reductora y oxidante, respectivamente. Zamora et al., 2016, reportaron valores de DT de 1.119 °C y 1.085°C, en atmósfera reductora y oxidante, respectivamente.

Tabla 20: Parámetros estadísticos de los resultados de la determinación de fusibilidad de cenizas para las muestras de RAC de caña de azúcar de Tucumán. Se

indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n).

RAC	Atmósfera reductora				Atmósfera oxidante			
Variables	DT (°C)	ST (°C)	HT (°C)	FT (°C)	DT (°C)	ST (°C)	HT (°C)	FT (°C)
Media	1.096,20	1.224,55	1.361,20	>1500	1.069,55	1.203,90	1.309,75	>1500
DE	38,91	48,41	49,31		46,77	55,53	39,15	
CV%	3,55%	3,95%	3,62%		4,37%	4,61%	2,99%	
Min	1.024,00	1.131,00	1.218,00		1.029,00	1.121,00	1.210,00	
Máx	1.152,00	1.332,00	1.449,00		1.168,00	1.296,00	1.380,00	

La Tabla 21 muestra los resultados estadísticos de la temperatura de fusibilidad de cenizas, en atmósfera oxidante y reductora obtenidos para las muestras de sorgo fibroso, estos valores se encuentran expresados en °C. Además, se indican los respectivos parámetros estadísticos de las mediciones. Se puede observar que los valores de inicio de deformación DT (°C) $869,90 \pm 38,09$ °C, con un valor de CV 4,38 % y DT (°C) $851,40 \pm 22,90$ °C, con un valor de CV 2,69 %, en atmósfera reductora y oxidante, respectivamente. Los valores de temperatura de fluidización en atmósfera reductora fueron FT (°C) $1.269,75 \pm 26,15$ °C, con valor de CV 4,38% y para atmósfera oxidante el valor de FT (°C) fue de $1217,30 \pm 51,21$ °C, con un valor de CV de 4,21 %. Estos valores coinciden con los informados por Cruz *et al.*, 2019, con un valor de DT de 857,33 °C y 837,00 °C, en atmósfera reductora y oxidante, respectivamente.

Tabla 21: Parámetros estadísticos de los resultados de la determinación de fusibilidad de cenizas para las muestras de sorgo fibroso de Tucumán. Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n).

Sorgo fibroso	Atmósfera reductora				Atmósfera oxidante			
Variables	DT (°C)	ST (°C)	HT (°C)	FT (°C)	DT (°C)	ST (°C)	HT (°C)	FT (°C)
Media	869,90	984,65	1.113,65	1.269,75	851,40	942,20	1.061,20	1.217,30
DE	38,09	32,85	33,51	26,15	22,90	33,61	20,20	51,21
CV	4,38%	3,34%	3,01%	2,06%	2,69%	3,57%	1,90%	4,21%
Min	795,00	905,00	1.040,00	1.205,00	810,00	890,00	1.005,00	1.120,00
Máx	915,00	1.065,00	1.175,00	1.300,00	895,00	998,00	1.096,00	1.285,00

Se puede mencionar que los valores de fusibilidad de cenizas que pertenecen a las muestras bagazo y RAC presentan características óptimas para su uso como combustible en la caldera bagaceras, no así el sorgo fibroso ya que se obtienen valores muy bajos. Por lo que Cruz *et al.*, 2019 propone su uso como combustible en la caldera de mezcla de 70 % bagazo + 30 % sorgo fibroso y así mejorar los valores de inicio de fusibilidad de cenizas.

A la hora de evaluar a que temperatura operar para evitar los problemas asociados a la fusión de los depósitos formados en las distintas superficies se elige como límite la temperatura de ablandamiento, a partir de la cual se produce estos fenómenos (Nogués et al., 2010).

3.5 Resultados del análisis de composición elemental

La Tabla 22 resume los resultados de composición elemental obtenidos para las muestras de bagazo y se indican los parámetros estadísticos de las mediciones realizadas. Estos valores se encuentran referidos en base seca (b.s.) y expresados en % (p/p). Los valores de C en promedio fueron de $42,74 \pm 0,38$ %, con un CV de 0,89 %, mientras que para el H el valor medio fue de $6,51 \pm 0,17$ %, con un CV de 2,59 %, para N el promedio fue de $0,19 \pm 0,01$ % con un CV de 3,68 %, para O fue de $50,49 \pm 0,40$ %, con un CV de 0,79 % y para S fue de $0,07 \pm 0,00$ %, con un valor de CV 4,50 %. La Tabla 23 compara los resultados obtenidos para bagazos con otras investigaciones. Los mismos indican que se encuentran en igual orden de magnitud que los informados por Jenkins *et al.*, 1998; Bizzo *et al.*, 2013 y Cruz *et al.*, 2016.

Tabla 22: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis de composición elemental para bagazo de caña de azúcar de Tucumán. Los valores de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O) y azufre (S) se encuentran expresados en % p/p y referidos en base seca (b.s.). Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n).

Variables	n	Media	D.E.	C.V.	Mín	Máx
C% b.s.	20	42,74	0,38	0,89	42,17	43,68
H% b.s.	20	6,51	0,17	2,59	6,14	6,76
N% b.s.	20	0,19	0,01	3,68	0,18	0,2
O% b.s.	20	50,49	0,4	0,79	50,01	51,26
S% b.s.	20	0,07	0	4,5	0,06	0,07

Tabla 23: Valores de composición elemental de bagazo comparado con otros autores.

Bagazo	Este trabajo	Jenkins <i>et al.</i> , 1998	Bizzo <i>et al.</i> , 2013	Cruz <i>et al.</i> , 2016
C% b.s.	42,74	46,68	42,61	43,89
H% b.s.	6,51	5,87	5,92	5,31
N% b.s.	0,19	0,16	0,63	0,48
O% b.s.	50,49	42,82	50,9	49,42
S% b.s.	0,07	0,04	0,1	0,9

En la Tabla 24 se pueden observar los resultados de composición elemental obtenidos para las muestras de RAC, y se indican los parámetros estadísticos de las mediciones realizadas. Para estas muestras, los valores de C en promedio fueron de $43,46 \pm 0,22$ %, con un CV de 0,51 %, mientras que para el H el valor medio fue de $5,72 \pm 0,35$ %, con un CV de 6,18 %, para N el promedio fue de $0,69 \pm 0,04$ % con un CV de 5,23 %, para O fue de $49,92 \pm 0,41$ %, con un CV de 0,82 % y para S fue de $0,21 \pm 0,02$ %, con un valor de CV 7,68 %. La Tabla 25 presenta una comparación de los parámetros obtenidos para RAC comparados con otros autores, estos resultados coinciden con los informados por Bizzo *et al.*, 2013 y Cruz *et al.*, 2016.

Tabla 24: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis de composición elemental para RAC de caña de azúcar de Tucumán. Los valores de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O) y azufre (S) se encuentran expresados en % p/p y referidos en base seca (b.s.). Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n).

VARIABLES	n	Media	D.E.	C.V.	Mín	Máx
N% b.s.	20	0,69	0,04	5,23	0,61	0,73
C% b.s.	20	43,46	0,22	0,51	43,04	43,95
H% b.s.	20	5,72	0,35	6,18	5	6,53
O% b.s.	20	49,92	0,41	0,82	49,01	50,82
S% b.s.	20	0,21	0,02	7,68	0,19	0,24

Tabla 25: Resultados de composición elemental para las muestras de RAC comparado con otros autores.

RAC	Este trabajo	Bizzo <i>et al.</i> , 2013	Cruz <i>et al.</i> , 2016
N% b.s.	0,69	0,60	0,10
C% b.s.	43,46	42,50	43,96
H% b.s.	5,72	6,02	5,41
O% b.s.	49,92	50,20	50,46
S% b.s.	0,21	0,24	0,07

La Tabla 26 informa los resultados estadísticos obtenidos para las muestras de sorgo fibroso, cuyos valores se encuentran referidos en base seca (b.s.) y expresados en porcentaje. Además, se indican los respectivos parámetros estadísticos de las mediciones realizadas. Se puede observar que los valores de C en promedio fueron de $39,94 \pm 0,46$ %, con un CV% de 1,16, mientras que para el H el valor medio fue de $6,70 \pm 0,25$ %, con un CV% de 3,77, para N el promedio fue de $0,27 \pm 0,02$ % con un CV% de 7,13, para O fue de $52,90 \pm 0,44$ %, con un CV% de 0,84 y para S fue de $0,18 \pm 0,01$ %, con un valor de CV% 2,82. La Tabla 27 presenta una comparación de los parámetros obtenidos para sorgo fibroso comparados con otros autores, los mismos concuerdan con lo publicado por Clean Tech, 2014 y Cruz *et al.*, 2016.

Tabla 26: Parámetros estadísticos de los resultados del análisis de composición elemental para sorgo fibroso de Tucumán. Los valores de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O) y azufre (S) se encuentran expresados en % p/p y referidos en base seca (b.s.). Se indican los respectivos valores de desviación estándar (DE), coeficiente de variación (CV), valores máximos y mínimos y la cantidad de valores analizados(n).

Variables	n	Media	D.E.	C.V.	Mín	Máx
N% b.s.	20	0,27	0,02	7,13	0,21	0,29
C% b.s.	20	39,94	0,46	1,16	39,1	40,97
H% b.s.	20	6,7	0,25	3,77	6,03	6,95
O% b.s.	20	52,9	0,44	0,84	52,03	53,65
S% b.s.	20	0,18	0,01	2,82	0,17	0,19

Tabla 27: Resultados de composición elemental para muestras de sorgo fibroso comparada con otros autores

Sorgo fibroso	Este trabajo	Cruz <i>et al.</i> , 2016	Clean Tech, 2014
N% b.s.	0,27	1,34	1,2
C% b.s.	39,94	39,49	40,22
H% b.s.	6,7	5,2	5,9
O% b.s.	52,9	53,78	52,57
S% b.s.	0,18	0,18	0,11

En general, estos resultados mostraron que los valores de nitrógeno son valores menores a 0,70 % para todas las biomásas, para la muestra de bagazo el contenido de azufre presenta un menor valor de 0,07 %, para sorgo fibroso 0,18 % y para RAC 0,21 %. El que presentó mayor contenido de O fue la muestra de sorgo con un valor de 52,9 %, y con un menor valor de C de 39,94 %. Este último parámetro se ve reflejado en las emisiones de CO₂, ya que un menor valor de C, dará una menor cantidad de CO₂ emitidos a la atmósfera.

3.6 Diagrama de Van Krevelen

En la Figura 24 se muestra el diagrama de Van Krevelen construido con las relaciones molares promedios de H/C vs O/C para las biomásas de bagazo de caña de azúcar, sorgo fibroso y RAC. En la misma se puede observar que tiene mayor relación H/C(2,01) vs O/C (0,99) la muestra de sorgo fibroso en valor promedio. A continuación, se encuentra la muestra de bagazo con valores de H/C (1,83) vs O/C (0,89) en promedio y por último se encuentra la muestra de RAC con valores de H/C (1,58) vs O/C (0,86). La cantidad de volátiles influye en la degradación térmica del combustible y en el desempeño de la combustión. El tipo y cantidad de gases generados, así como las otras fracciones obtenidas en la pirólisis (gases condensables y carbono fijo), dependen de la temperatura y velocidad de calentamiento durante la pirólisis y del tamaño de partícula. Por el elevado contenido de volátiles presente en las biomásas, la ignición de estas resulta ser sencilla en comparación con otros combustibles sólidos de menor contenido de volátiles, como el carbón mineral, por ejemplo. La cantidad de materia desvolatilizada durante la pirólisis está relacionada con el contenido elemental de C, H y O. Cuanto mayor sea la razón entre H y C, mayor es el contenido de volátiles, y éste último disminuye cuanto mayor sea la razón entre O y C. (Van Loo y

Kooppejan, 2008; Khan *et al.*, 2009). Para las biomazas estudiadas en este trabajo, la cantidad de sólidos volátiles superó el 70 %, por lo que se puede decir que estas biomazas son aptas para pirólisis, y los tratamientos energéticos. Asimismo, las relaciones obtenidas de H/C y O/C resultan elevadas como las mencionamos anteriormente, por lo que estamos en presencia de biomazas óptimas para su utilización en fines energéticos.

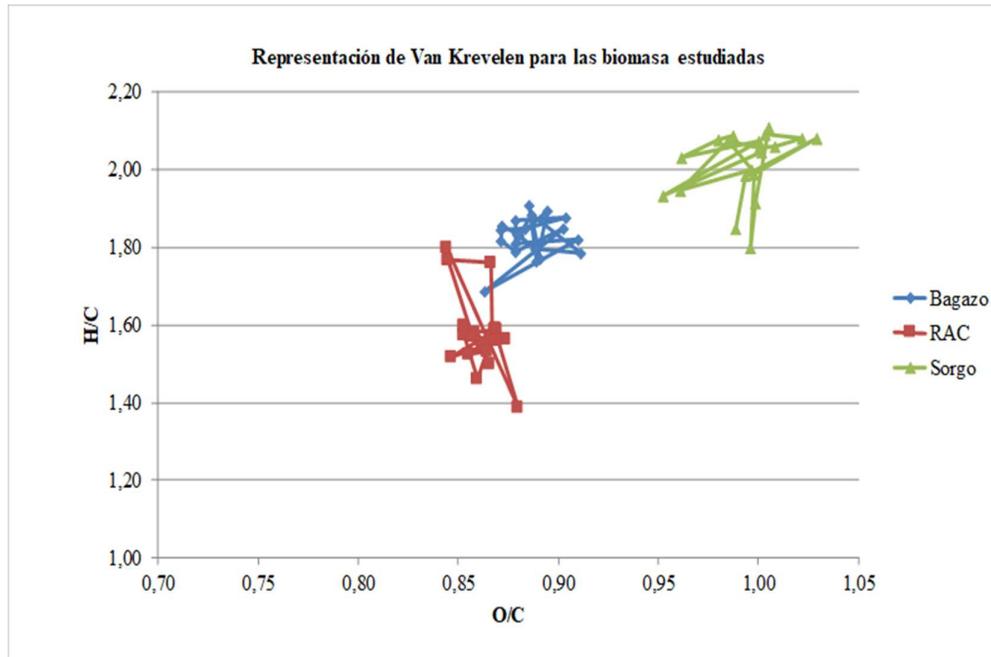


Figura 24: Diagrama de Van Krevelen para las biomazas de estudio
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 25 refleja el diagrama de Van Krevelen informado por Cortes, 2006 con las muestras de biomazas de estudio. Muestra la clasificación de combustibles sólidos y las biomazas en estudio, a partir de los coeficientes molares de H/C vs O/C. En este gráfico se puede observar que la primera región que aparece es para la antracita, seguida de hulla, carbones lignitos, maderas fósiles, turba, madera y por último la biomasa. Esta clasificación también respalda lo que publicó Jenkins *et al.*, 1998. Además, Guachi Cabrera, 2019, presentó valores de bagazo con valores de H/C (1,90) vs O/C (0,90). También, Kumar *et al.*, 2019, informó valores de bagazo con valores de H/C (1,60) vs O/C (0,75). No se encontraron valores para RAC y para sorgo para poder realizar una comparación. De igual modo, podemos decir que los valores de bagazo se encuentran en igual orden de magnitud que los informados

por estos dos autores y que las biomazas de estudio se encuentran en la región esperada. Estos resultados son de gran aporte ya que podemos inferir que las mismas pueden ser utilizadas con fines energéticos como ser la pirólisis, como lo informaron Xia *et al.*, 2018, en dónde estudiaron la relación H/C para diferentes biomazas incluidas el bagazo en relación con cierta temperatura de pirolisis, en las cuales concluye que el bagazo de caña de azúcar, se encuentra en una zona óptima para la pirolización al tener valores de H/C elevados y una estructura lignocelulósica.

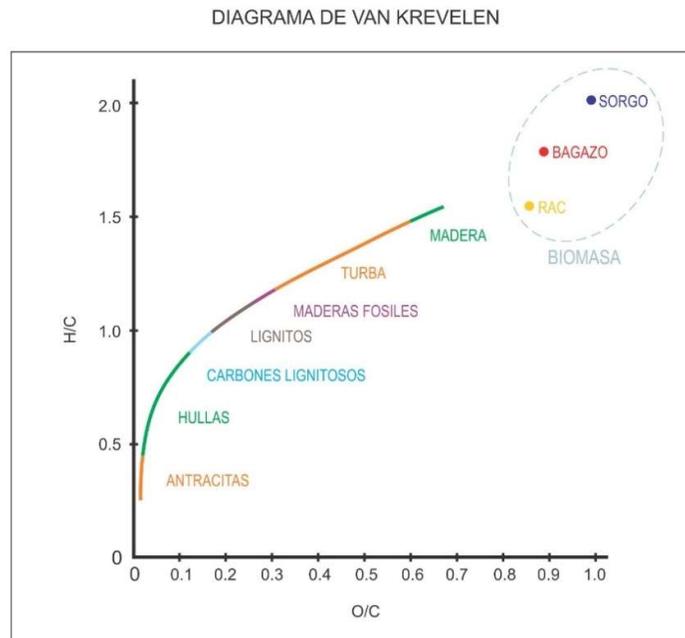


Figura 25: Diagrama de Van Krevelen para las biomazas de estudio comparadas con otros combustibles
Fuente: Elaboración propia.

En resumen, estos resultados muestran que, de las biomazas analizadas, el sorgo presentó la mayor relación H/C, aproximadamente un 9 % mayor al bagazo de caña de azúcar y un 21,4 % con respecto al RAC. Esto indicaría que, en un proceso de combustión de sorgo, se obtendría menores emisiones de CO₂ respecto al bagazo y al RAC, en relación a las del H₂O, ya que se tendría menor cantidad de carbono que de hidrógeno.

Con respecto a O/C, se encontró que la mayor relación fue para el sorgo (0,99), seguida por el bagazo (0,89) y finalmente el RAC (0,86). El menor índice de oxígeno indica mayor PCI, esto se vio reflejado para la muestra de RAC. Esta

relación muestra, que el sorgo fibroso posee una mayor reactividad, aproximadamente un 10 % mayor al bagazo de caña de azúcar y un 13 % con respecto al RAC. Esto indicaría que, a mayor reactividad, la biomasa es apta para ser utilizada en procesos de conversión termoquímica. Desde el punto de vista de la reactividad O/C, Nogués *et al.*, 2010 afirman que las biomásas lignocelulósicas son más reactivas que los carbones, debido a su elevado contenido de sólidos volátiles, por lo que estas biomasa se desvolatilizan mas rápidamente, con menor tiempo de residencia. Para el caso de las biomásas estudiadas, las tres presentan elevadas reactividades comparadas con muestras de carbón, como ser antracita, por lo que se concluye que estas son adecuadas para pirólisis y gasificación.

3.7 Análisis estadístico

En cuanto al análisis estadístico, en la Figura 26 ilustra los resultados del análisis multivariable biplot en el Infostat, que se realizó para cada una de biomásas estudiadas. En la misma se puede observar que los puntos amarillos son las variables analizadas W, CZ, SV, CF, PCS y PCI y los puntos azules son las determinaciones que se realizaron (observaciones). Los valores de CP1 Y CP2, se los denomina componentes principales 1 y 2, respectivamente. En base al algoritmo insertado en el Infostat los valores de % que acompañan a CP1 es mayor que el valor de % que acompaña a CP2. Por otro lado, los ángulos entre los vectores que representan las variables, fueron interpretados en términos de las correlaciones entre variables. Asimismo, se tuvo en cuenta que ángulos de 90° entre dos vectores (variables), indican que ambas variables no se encuentran correlacionadas. Los alejamientos de los valores, tanto sea en valores menores como mayores a 90°, implican una correlación (positiva o negativa). Es decir, se consideró que un ángulo cercano a cero implica que ambas variables están fuertemente correlacionadas en forma positiva; y un ángulo cercano al ángulo llano entre dos variables, indica que ambas muestran fuerte correlación negativa. (InfoStat, 2008). En todos los gráficos biplot se puede ver que la variable de PCI tiene un opuesto con respecto a la humedad, es decir, forman un ángulo llano (180°), lo que indica que hay una correlación fuertemente negativa, es decir que a medida que aumenta el contenido de W disminuye el valor de PCI, lo cual se observó cuando se obtuvieron los valores de PCI en las biomásas. Para el caso de PCS vs CZ y PCS vs SV, se vio que los

ángulos son mayores a 90° por lo que indica que existe una correlación ya sea positiva o negativa. Para el caso de PCS vs CF se observó que para el caso de bagazo presenta ángulo mayor a 90° , para el caso de RAC, presenta ángulo cercano y para el caso de sorgo fibroso, el ángulo es menor a 90° , esto quiere decir que para ángulos mayores o menores a 90° hay una dependencia entre las variables.

Gráfico biplot para bagazo

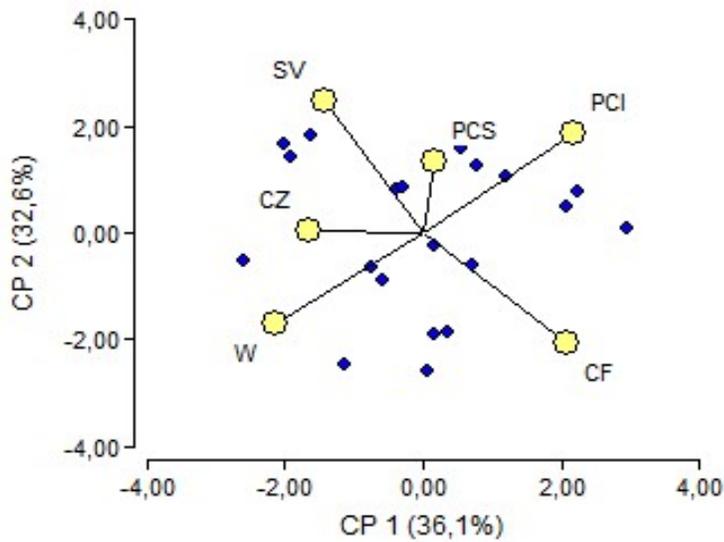
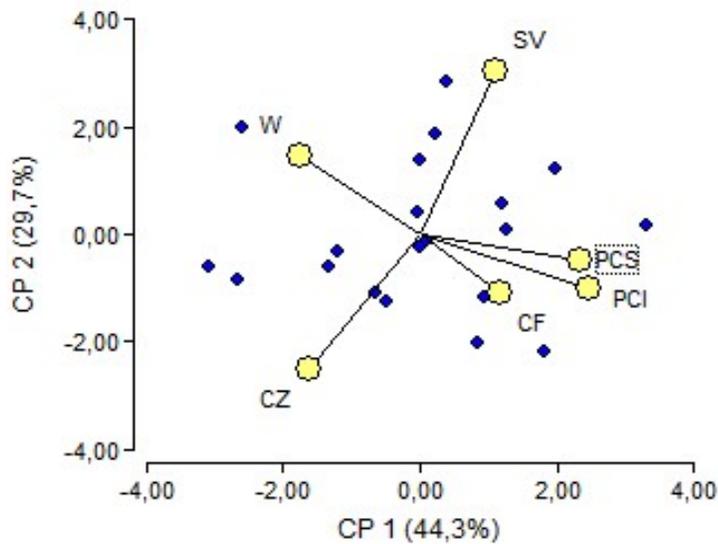


Gráfico biplot para RAC



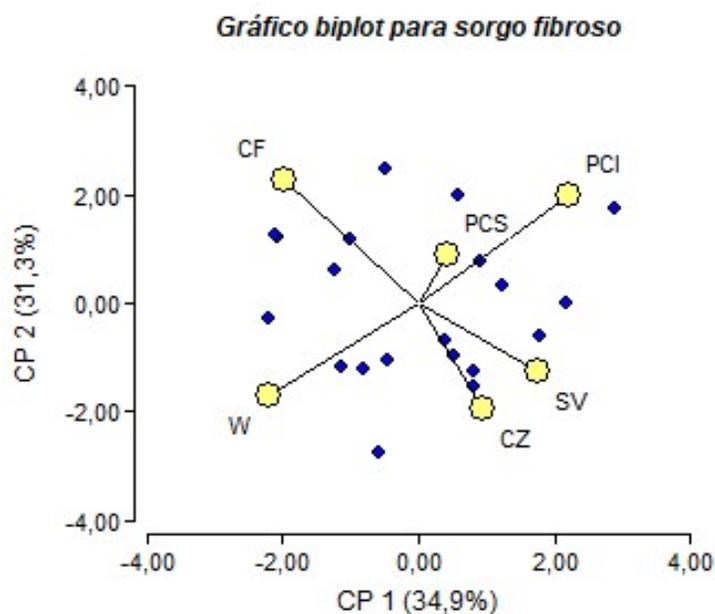
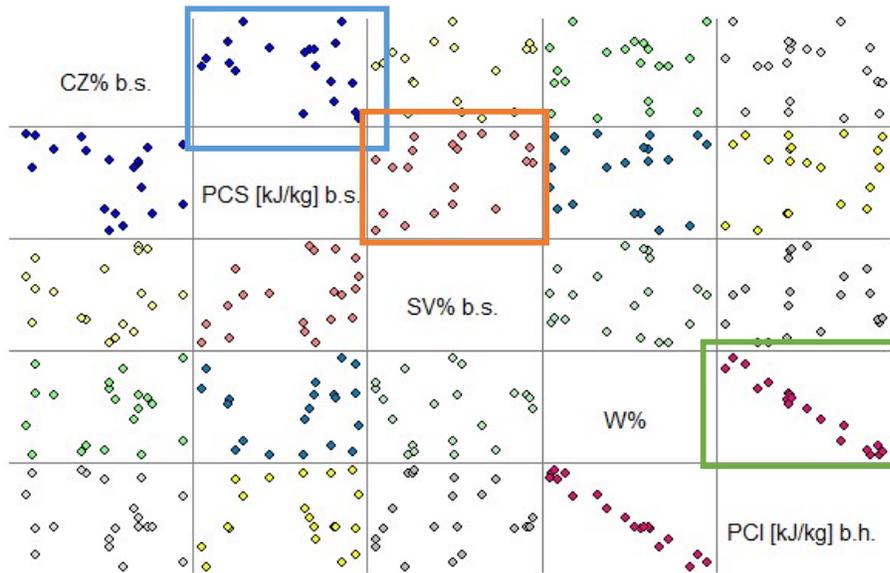


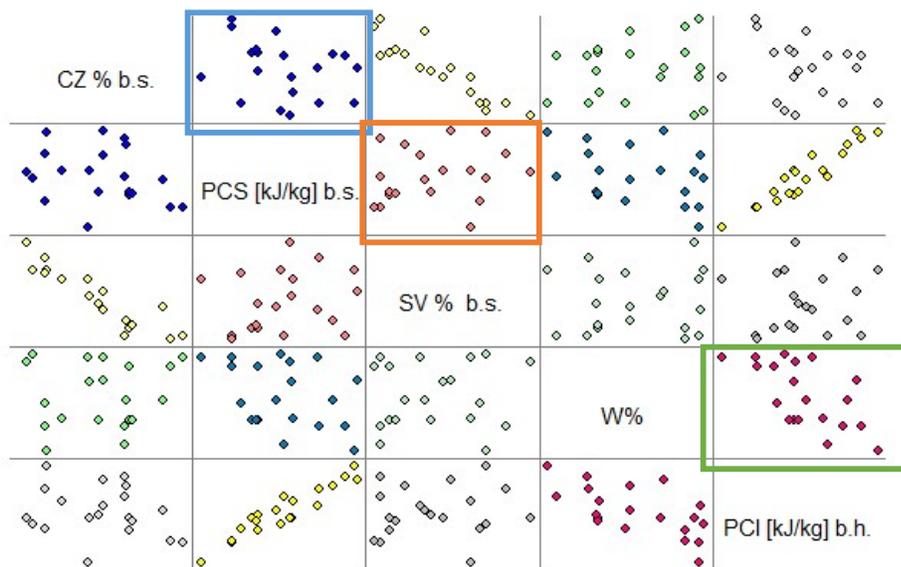
Figura 26: Gráfico biplot del análisis multivariable para bagazo, RAC y sorgo fibroso

La Figura 27 expone las matrices de diagrama de dispersión para bagazo de caña, RAC y sorgo fibroso, teniendo en cuenta la correlación que existe entre las variables informadas anteriormente. En esta figura se puede observar que todas las biomásas en estudio, el cuadrante de líneas de color verde, existe una relación negativa entre las variables PCI vs W. En cuanto a los cuadrantes de línea de color azul, que relaciona PCS vs CZ, hay mucha variabilidad. En base a lo informado por Balvorin, 2019, para muestras de RAC en función de PCS vs SV, presenta una relación positiva y para PCS vs CZ, una relación negativa. Al mismo tiempo, Diaz, 2008, mostró que para bagazo la relación de PCS vs CZ tiene una relación negativa y PCS vs SV una tendencia positiva.

Matriz diagrama de dispersión para bagazo



Matriz diagrama de dispersión para RAC



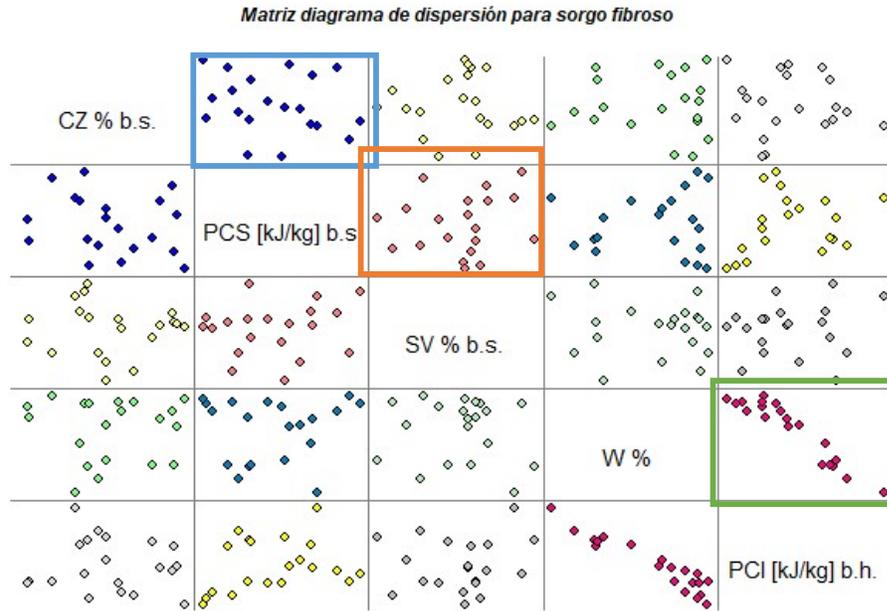


Figura 27: Matriz de dispersión para bagazo, RAC y sorgo

3.8 Estimación de gases de efecto invernadero y cálculo de CO₂equ.

Para el cálculo del caudal volumétrico de gas natural quemados se utilizará la conversión isocalórica:

$$B * PCI_B * \eta_B = GN * PCI_{GN} * \eta_{GN}$$

Donde:

B: cantidad de biomasa, en kg.

PCI_B: poder calorífico inferior biomasa, en MJ/kg.

η_B: rendimiento de combustión de biomasa.

GN: cantidad de gas natural, en m³.

PCI_{GN}: poder calorífico inferior del gas natural, en MJ/kg.

η_{GN}: rendimiento de combustión del gas natural.

El valor del PCI_{GN} es 39,9 MJ/kg y la densidad es 0,714 kg/Nm³ (Mele, 2016).

Los valores de rendimiento son: $\eta_B=0,65$ y $\eta_{GN}=0,85$ (Paz, 2017).

En la Tabla 28 se muestran los valores de cantidad de biomasa y PCI para bagazo, RAC y sorgo fibroso, necesarios para poder realizar el cálculo.

Tabla 28: Valores de cantidad de biomasa disponible y PCI para las muestras de bagazo, RAC y sorgo fibroso.

Biomasa	Bagazo de caña de azúcar	RAC	Sorgo fibroso
Cantidad de biomasa [kg/año]	4,23x10 ⁹	1,27x10 ⁹	3,24x10 ⁷
PCI [MJ/kg]	6,70	12,72	2,81

Se aplicará entonces la ecuación despejada para saber la cantidad de gas natural

$$GN[m^3] = \frac{B * PCI_B * \eta_B}{PCI_{GN} * \eta_{GN}}$$

En la Tabla 29 se muestran los resultados obtenidos de gas natural quemados para bagazo, RAC y sorgo, y se puede observar que presenta un mayor valor de conversión isocalórica la muestra de bagazo.

Tabla 29: Resultados de la cantidad de gas natural equivalentes en [m³] quemados para las biomásas de estudio.

Biomasa	Bagazo de caña de azúcar	RAC	Sorgo fibroso
GN [m ³]	5,43x10 ⁸	3,09x10 ⁸	1,74x10 ⁶

Una vez que tenemos los resultados de la cantidad de gas natural quemados para las biomásas se procedió al cálculo de la cantidad de CO₂ emitida por gas natural que se calculará en función de la ecuación presentada en el capítulo de metodología. En la Tabla 30 se muestran los resultados de la cantidad de CO₂ que dejaran de emitir si reemplazamos estas biomásas por gas natural. El gas natural tiene un factor de emisión de 2,15 [kg CO₂/ Nm³ de gas natural] según la Comisión Interdepartamental del Cambio Climático (CICC, 2011).

$$CO_2[kg] = Cantidad\ de\ gas\ natural\ [m^3] \times factor\ de\ emisión \left[kg \frac{CO_2}{Nm^3} \right]$$

Tabla 30: Resultados de la cantidad de CO₂ [kg] para las biomásas de estudio.

Biomasa	Bagazo de caña de azúcar	RAC	Sorgo fibroso
CO₂ [kg]	1,16x10 ⁹	6,6x10 ⁸	3,74x10 ⁶

El cálculo realizado nos muestra que reemplazando el gas natural por la quema de estas biomásas se dejarían de emitir 1,16x10⁶ toneladas por año de gases de efecto invernadero para la muestra de bagazo de caña de azúcar, 6,6x10⁵ toneladas por año de gases de efecto invernadero para la muestra de RAC y 3.740 toneladas por año de gases de efecto invernadero para la muestra de sorgo fibroso.

4. CONCLUSIONES

- Según los resultados expuestos en esta tesis, se puede mencionar que se cumplieron con los objetivos propuestos. Este trabajo ha contribuido con una caracterización de los principales parámetros del perfil de combustible, para muestras de bagazo de caña de azúcar, RAC y sorgo fibroso. Al mismo tiempo, aportó a la clasificación, cuantificación y confección del diagrama de Van Krevelen para las biomásas en estudio. Este estudio resultará de gran interés para los técnicos de la industria que se encuentran en las tareas de diseño y rediseño de unidades generadores de vapor y en la provisión de biomásas combustibles para la generación de energía, ya que permitirá evaluar la calidad de estas biomásas en relación con otros combustibles de origen renovable y no renovable.
- La estimación de la cantidad de bagazo para la zafra 2018/2019, en la Provincia resultó en $4,23 \times 10^6$ t de bagazo, disponibles energéticamente, con una humedad del 51,79 %. Las mismas fueron recolectadas de los diferentes ingenios tucumanos, con variedad de caña de azúcar LCP85-384, de mayor presencia en Tucumán, con mayor superficie plantada del 76,79 %.
- La cantidad de RAC disponible para la zafra 2019, fue de $1,27 \times 10^6$ t de RAC en base seca. Este residuo es el que queda en campo después de la cosecha de la caña de azúcar, este material puede ser aprovechado energéticamente. En Tucumán perdura aún la cultura de la quema de este rastrojo en los cañaverales, generando múltiples problemas del tipo agronómico, ambiental y socioeconómico. La creciente concientización ambiental de los factores involucrados en la actividad cañera, así como el interés de los residuos agrícolas de la cosecha con finalidad energética, pretende instalar un sistema sin el uso de quema. Es por esto, que este trabajo apunta a concientizar sobre el potencial energético del RAC para Tucumán, dando a conocer su perfil como combustible.
- La cantidad de sorgo disponible fue de 32.480 t de sorgo fibroso, con humedad del 70,86 %. El sorgo fibroso o de alta fibra, es un cultivo agrícola energético, que se encuentra dentro de los sorgos energéticos, cuya producción se puede utilizar como materia prima para generar energía aprovechable. El rango de rendimiento de la biomasa total para el sorgo

fibroso estuvo entre de 32 y 35 t/ha. El cultivo es ideal para integrar un sistema sustentable de producción, como alternativa de rotación.

- Dentro del análisis expuesto para parámetros físicos, el que aporta mayor contenido de humedad fue la muestra de sorgo con un valor de 70,86 %, el cual influye de manera negativa en el PCI, obteniéndose un valor de 2.815,05 [kJ/kg], seguido de la muestra de bagazo con un valor de 51,79 % y por último el RAC con un valor de 15,78 %. Por lo tanto, el RAC es la biomasa que presenta las mejores condiciones en cuanto a humedad. Estos valores se semejan a los informados en la bibliografía propuesta. Se propone mejorar el acondicionamiento de la biomasa para lograr disminuir el contenido de humedad hasta valores del 10% para formar pellets, y así poder emplearlos como materia prima en pirolizadores o gasificadores. De esta forma, producir pellets disminuye los costos de logística ya que se pueden transportar mayor cantidad de biomasa por m³.
- Para las biomosas analizadas las temperaturas de inicio de deformación, tanto para atmósfera reductora como oxidante, fue superior para bagazo, seguida por RAC y por último sorgo, arrojando estos últimos valores inferiores a 900 °C. En cuanto a la temperatura de ablandamiento en atmósfera reductora para las biomosas fueron de 1.396 °C para bagazo, 1.332 °C para RAC, y por último 1.065 °C para sorgo fibroso. Por lo tanto, temperatura de inicio de deformación indica cuan factible puede ser la ignición, siendo la muestra de bagazo, la de mejor ignición, además, este parámetro influye en la temperatura de diseño del equipo a utilizar. Mientras que la temperatura de ablandamiento muestra que, es el valor límite para operar en los equipos para evitar que se formen incrustaciones y escorias.
- El análisis de la composición termogravimétrica de las biomosas en estudio, mostró que las muestras de bagazo de caña de azúcar obtuvieron un menor porcentaje de cenizas, con un valor de 4,93 %, un mayor contenido de sólidos volátiles de 77,93%, por lo que tuvo un mayor valor de PCS 17.893 [kJ/kg], esto indica que es la biomasa más eficiente en la producción de energía térmica. En cuanto RAC presentó un mayor valor de contenido de cenizas de 12,32 % que luego se vio reflejado en la disminución del valor de PCS de 16.668 [kJ/kg]. El sorgo energético mostró un menor valor de

cenizas que el RAC de 9,07 %, que también se reflejó en el contenido de PCS de 16.939 [kJ/kg].

- De igual modo, el análisis energético de las biomásas en estudio mostró que la biomasa que entrega más energía (PCS), en términos de poder calorífico superior, fue la muestra de bagazo de caña de azúcar, seguido por el sorgo fibroso y por último el RAC. De modo tal, al comparar el valor de PCS obtenido por bomba calorimétrica, con el valor de PCS aproximado (calculado por fórmula), se puede decir que estas presentaron un error relativo del 11,30 % para bagazo, 10,62 % para RAC y 11,70 % para sorgo fibroso. Asimismo, el valor de PCI se vio influenciado por la humedad, teniendo como mejor valor a la muestra de RAC con un PCI 12.736,25 [kJ/kg], a una humedad de 15,78 %. Este parámetro resulta indispensable para conocer la cantidad de energía entregada por unidad para masa en un proceso de conversión térmica.
- Cabe destacar que, según lo expuesto en los resultados del análisis de composición elemental se observó que los valores de contenido de hidrógeno son semejantes entre las biomásas de estudios, que los valores de nitrógeno son valores menores a 0,70 % para todas las biomásas, por lo que desde el punto de vista ambiental, se emitirán menores emisiones de óxido nitroso. Para la muestra de bagazo el contenido de azufre presenta un menor valor de 0,07 %, para sorgo fibroso 0,18 % y para RAC 0,21 %, eso indica que esta muestra emitirá menores emisiones de ácido sulfhídrico. El que presentó mayor contenido de O fue la muestra de sorgo con un valor de 52,9 %, y con un menor valor de C de 39,94 %. Este último parámetro se ve reflejado en las emisiones de CO₂, ya que un menor valor de C, dará una menor cantidad de CO₂ emitidos a la atmósfera. Por otra parte, un mayor valor de C dará un mayor valor de PCI, esto se pudo reflejar para la muestra de RAC. Estos valores están en concordancia con la bibliografía mencionada. Para el RAC se obtuvo un valor de C de 43,46 % y un valor de PCI 12.736,25 [kJ/kg]. Estos valores resultan en concordancia con la bibliografía mencionada.
- El aporte más relevante de este trabajo fue la confección del diagrama de Van Krevelen, en el cual se representan las relaciones molares de H/C y O/C. Se realizó la clasificación de las biomásas estudiadas, que coincidía con la

región propuesta por autores que estudiaron este diagrama. Cabe destacar que, la cuantificación de estas relaciones para las biomásas regionales en estudio, resultaron en el siguiente orden de valores promedios: sorgo fibroso con mayor relación H/C (2,01) vs O/C (0,99); bagazo con valores de H/C (1,83) vs O/C (0,89) y RAC con valores de H/C (1,58) vs O/C (0,86). Además, este diagrama permitió concluir que las biomásas son aptas para ser aprovechadas energéticamente en conversión térmica como ser en pirólisis, ya que, a mayor contenido de sólidos volátiles, la materia se volatiliza más rápidamente en el proceso de pirólisis, lo que favorece un mayor encendido de la misma. Esto se ve reflejado en las relaciones elevadas de H/C y O/C, que estas biomásas están cumpliendo ampliamente.

- De las biomásas analizadas, el sorgo presentó la mayor relación H/C, aproximadamente un 9 % mayor al bagazo de caña de azúcar y 21,4 % respecto al RAC. Desde el punto de vista ambiental, esto indicaría que, en un proceso de combustión de sorgo, se obtendría menores emisiones de CO₂ respecto al bagazo y al RAC. Pero, desde el punto de vista energético, se recomienda una menor relación H/C para disminuir la formación de agua y aumentar el PCI.
- Con respecto a O/C, se encontró que la mayor relación fue para el sorgo (0,99), seguida por el bagazo (0,89) y finalmente el RAC (0,86). Esta relación muestra, que el sorgo fibroso posee una mayor reactividad, aproximadamente un 10 % mayor al bagazo de caña de azúcar y 13 % respecto del RAC. Esto indicaría que, a mayor reactividad, la biomasa es apta para ser utilizada en procesos de conversión termoquímica. Para el caso de las biomásas estudiadas, las tres presentan elevadas reactividades comparadas con muestras de carbón, por su mayor contenido de sólidos volátiles, por lo que las biomásas se producirá una desvolatilización más rápida y con menor tiempo de residencia. Por lo que se concluye que estas son adecuadas para pirólisis y gasificación.
- Para el estudio realizado en base a las variables PCS vs SV, PCS vs CZ y PCI vs W, se realizó un análisis multivariable con gráfico biplot para cada una de estas biomásas. Se concluyó que las variables PCI vs W, tiene una correlación fuertemente negativa, que los valores de PCS vs CZ, tienen una

correlación negativa, y que PCS vs SV tiene una correlación levemente positiva. Esto fue respaldado con la matriz de diagrama de dispersión para estas variables y para todas las biomásas en estudio.

- Por último, se puede destacar para la generación de energía, que se dejarían de emitir $1,16 \times 10^6$ t_{CO2}/año para bagazo, $6,6 \times 10^5$ t_{CO2}/año para RAC y 3.740 t_{CO2}/año para la muestra de sorgo fibroso, si se reemplazara el uso de gas natural para estos residuos lignocelulósicos. Todas las biomásas de estudio son una fuente de energía renovable y abundante que no contribuye a incrementar los gases de efecto invernadero, ya que el balance neto de Carbono puede considerarse despreciable.
- Se recomienda estudiar la cinética de cada una de estas biomásas para su uso en la pirólisis y gasificación, como así también en la torrefacción u carbonización hidrotermal. Como así también, se sugiere analizar los índices de reactividad de cada una de las biomásas.
- Como así también, se sugiere analizar los índices de reactividad de cada una de las biomásas. Englobando los índices de ácido/base, índice de ensuciamiento, índice de sinterización e índice de escorificación.

5. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Agencia Internacional de Energía (AIE). Informe balance energético- Estadísticas.**
(2018). Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD>
- Abril, A. y Navarro, E.A. (2012). **Etanol a partir de lignocelulosa.** Aleta Ediciones (2012). ISBN: 978-84-15225-50-8. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Enrique_Navarro/publication/241216642_Etanol_a_partir_de_biomasa_lignocelulosica/links/0c96051c8409028b93000000/Etanol-a-partir-de-biomasa-lignocelulosica.pdf
- Balvorin, A. (2019). **Estudio del aporte energético de sólidos volátiles y carbono fijo de la biomasa residual de la cosecha en verde de caña de azúcar (RAC).** Práctica de fábrica EEAOC-UNT.
- Barboza Cortez, L.A., Silva Lora, E.E. y Olivares Gómez, E. (2008). **Biomasa para la Energía.** Ed. Unicamp. Brasil.
- Bizzo, W. A., Lenço, P.C., Carvalho, D.J. and Soto Veiga, J. P. (2013). **The generation of residual biomass during the production of bioethanol from sugarcane, its characterization and its use in energy production.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29: 589–603.
- Cárdenas, G. J. (2011). **Matriz energética argentina. Situación actual y posibilidades de diversificación.** *Revista de la Bolsa de Comercio de Rosario* N° 1514: 32-36.
Disponible en: <http://www.bcr.com.ar/Secretaria%20de%20Cultura/Revista%20Institucional/2011/Agosto/Energ%C3%ADa.pdf>
- Casen, S., Romero E., Leggio, F., Torres Bugeau, A., Perez, D., Paredes, V. y Feijóo, E. (2015). **Manejo de los residuos agrícolas de la cosecha de caña de azúcar: disponibilidad potencial y alternativa de enfardado.** *Avance Agroindustrial* 36 (4):20-26.
- Censo Citrícola Provincial.** (2006). Disponible en: <http://estadistica.tucuman.gov.ar/archivos/Informe%20del%20Censo%20Ctricola.pdf>
- Cortés, V. (2006). **Carbón.** Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI) Universidad de Sevilla. España- Sevilla. Disponible en: <http://www.factoria3.com/documentos/CARBON.pdf>

Comisión Interdepartamental del Cambio Climático. (2011). **Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)**. España. Catalonia. Disponible en:

<http://www.caib.es/sacmicrofront/archivopub.do?ctrl=MCRST234ZI97531&id=97531>

Cuenya, M. I., Chavanne, E. R., Ahmed, M. A., Díaz Romero, C., García M., Modesto, B., Espinosa, A., Ostengo S. y Costilla D. (2013). **Manual del Cañero. Variedades para el área cañera de Tucumán**. Capítulo 3. Disponible en:

<http://www.eeaoc.org.ar/upload/publicaciones/archivos/54/20120305133216000000.pdf>

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

Cruz, C., De Boeck, G. y Paz, D. (2019). **Fibrous sorghum as an alternative fuel during the off harvest sugarcane season in Tucuman, Argentina**. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists, volume 30, 983–989, 2019.

Díaz, R. (2008). **Caracterización Energética del Bagazo de Caña de Azúcar del Ingenio Valdez**. Ecuador. Disponible en: <http://www.lippel.com.br/dados/download/16-07-2014-15-41caracterizacion-del-bagazo-de-cana-de-azucar.pdf>

Díaz, G. F. y Paz, D. (2017). **Evaluación técnico-económica de una planta de gasificación de biomasa residual del cultivo del limón para el abastecimiento energético de una citrícola de Tucumán. Parte I**. *RIAT* 94 (2): 33-45.

Digonzelli, P. A., Romero, E.R. y Scandaliaris, J. (2015). **Guía técnica del cañero. 1ª. ed. – Tucumán, Argentina: Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes, 2015**. ISBN 978-987-26238-1-4

DP Clean Tech. (2014). **Fuel analysis**. Disponible en: <https://www.dpcleantech.com/>

EEAOC a. (2019). **Informe estimación para la zafra 2019. Sensores y Remotos y SIG. Estimación de superficie cosechable y producción de materia prima y azúcar para la zafra 2019**. Disponible

en: <http://www.eeaoc.org.ar/upload/publicaciones/archivos/964/2019052217114800000.pdf>

EEAOC b. (2019). **Informe anual 2018 N°20**. Programa bioenergía. Proyecto cultivos energéticos pp. 98. ISSN 15127261. Publicado Julio 2019.

- Energía de la biomasa. Secretaria de Energía. (2008).** Disponible en:
http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf
- Fandos, C., Scandalariis, P., Carreras Baldrés, J.I, Soria, F.J., Figueroa, D. y Salas, H. (2018). **Estimación del área implantada de cítricos en Tucumán en 2018 y comparación con años precedentes.** *Reporte Agroindustrial N°158.* Disponible en:
<http://www.eeaoc.org.ar/upload/publicaciones/archivos/886/2018110111264500000.pdf>
- Feijóo, E. A., Golato, M. A., Franck Colombres, F. J., Paz, D. y Cárdenas, G. J. (2015). **Características energéticas de los residuos agrícolas de la cosecha en verde de caña de azúcar de Tucumán.** *RIAT* 92 (2): 23-32.
- Golato, M. A., Aso, G, Paz, Dy Cárdenas, J. (2005). **Inyección de aire secundario caliente en calderas de vapor bagaceras y su influencia en el rendimiento térmico.** *RIAT* 82 (1-2): 17-25.
- Gómez, E. O.; Cortez, L. A. B., Lora, E. S., Sanchez, C. G. y Bauen, A. (1999). **Preliminary tests with a sugarcane bagasse fueled fluidized-bed air gasifier.** *Energy Conversion & Management* 40, 1999, pp. 205-214.
- Guachi Cabrera, P. E. (2019). **Obtención de carbón mediante carbonización hidrotermal utilizando bagazo de caña.** Universidad Central de Ecuador. Facultad de Ingeniería Química. Disponible en: <http://200.12.169.19/bitstream/25000/17962/1/T-UCE-0017-IQU-031.pdf>
- Jenkins, B. M., Baxter, L.L, Miles, Jr. T. R. y Miles, T. R. (1998). **Combustion properties of biomass.** *Fuel Processing Technology* 54:17-46. Disponible en:
<http://gekgasifier.pbworks.com/f/biomass%2520fuel%2520properties%2520Miles.pdf>
- Hassauani, S. J., Verde Leal, M. R. L. and Carvalho Macedo, I (2005). **Biomass power generation Sugar cane bagasse and trash.** 1º Edición- Piracicaba, Brasil. Editorial PNUD (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento).
- Hugot, E. (1986). **Manual para Ingenieros Azucareros.** Compañía Editorial Continental, S. A. México D. F.
- InfoStat (2008). **Software estadístico.** Manual del usuario. Disponible en:
<https://www.infostat.com.ar/>

- Khan, A. A.; De Jong, W., Jansens, P. J. and Spliethoff, H. (2009). **Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies.** *Fuel Processing Technology* 90:21–50.
- Kumar, M., Upadhyay, S.N. y Mishra, P.K. (2019). **A comparative study of thermochemical characteristics of lignocellulosic biomasses.** *Bioresource Technology Reports* (8): 100186.
- Mele, F. (2016). Apuntes de clases de la asignatura “**Análisis de Ciclo de Vida**” (Especialización/Maestría en Ingeniería Bioenergética – FRT – UTN).
- Mistretta, M. G, Zamora Rueda, G. del H., Peralta, F., Gutierrez, C.E., Bravo, M. V.; Zalazar, H., Feijoo, E., Golato, M., D. Paz y Cárdenas, G. (2014). **Metodologías termogravimétricas para la determinación del contenido de cenizas en bagazo y en residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán.** XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES)” y la “VI Conferencia Regional Latinoamericana de la ISES”. Oberá- Misiones. Vol. 2, pp. 08.71-08.77. Impreso en Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5
- Monir, U. M., Aziza, A. A., Kristantia, R. A. y Yousuf, A. (2018). **Gasification of lignocellulosic biomass to produce syngas in a 50 kW downdraft reactor.** *Biomass and Bioenergy* 119 :335–345 0961-9534. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953418302721>
- Nogués, F. S., García Galindo, D. y Rezeau, A. (2010). **Energías Renovables. Energía de la biomasa (Vol. 1).** Prensa Universitaria de Zaragoza, 1ra Ed., Zaragoza. España. ISBN 978-84-92774-91-3.
- Ostengo S., Espinosa, M.A., Díaz, J.V., Chavanne, E.R., Costilla, D.D. y Cuenya, M.I. (2018). **Relevamiento de la distribución de variedades y de otras tecnologías aplicadas en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán: campaña 2016/2017.** *AVANCE* 39 (4):22- 27.
- Paz, D. (2017). Apuntes de clase la materia “**Usos térmicos de la biomasa**”. (Especialización /Maestría en Ingeniería Bioenergética – FRT – UTN).
- Peralta, L. F; Zamora Rueda, G. del H.; Mistretta, G.; Zalazar, H.; Bravo, M. V.; Feijoo, E.; Golato, M.; Paz, D. y Cárdenas, G. (2014). **Determinación del punto de fusión de cenizas de bagazo y RAC de Tucumán.** XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES)” y la “VI

- Conferencia Regional Latinoamericana de la ISES”. Oberá- Misiones. Vol. 2, pp. 08.63-08.69, 2014. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5
- Quinteros Vaca, O. N. (2020). **Caracterización del bagazo de caña de azúcar de variedades del ingenio azucarero Tababuela para bioenergía**. Universidad Técnica Del Norte Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales Carrera de Ingeniería en Energías Renovables. Ibarra- Ecuador. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10478/2/03%20IER%20006%20T RABAJO%20GRADO.pdf>
- Rojas-González, A. F. y Barraza-Burgos, J.M. (2012). **Efecto de la relación atómica oxígeno/ carbono del carbón sobre la reactividad en la combustión de carbonizados**. *Revista Ingeniería y Universidad* 17 (1):41-57. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47728625003>
- Romero, E. R, Scandaliaris,J., Digonzelli, P., Alonso, L., Leggio Neme,F., Giardina, J., Casen, S., Tonatto J. y Fernández de Ullivarri, J.(2008). **Effect of yielding and variety on sugarcane potential trash**. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán (RIAT)* 85 (1). ISSN 0370-5404
- Romero, E. (2016).Apuntes de clase de Maestría Ingeniería Bioenergética. Materia **“Producción de materias primas agrícolas”**. (Especialización/Maestría en Ingeniería Bioenergética – FRT – UTN).
- Romero, E. (2017).**Los sorgos bioenergéticos**. Disponible en: <http://www.fao.org/3/ca3344es/ca3344es.pdf>
- RuiGalhano dos Santos, J. C., Bordado, M. y Mateus, M. (2016).**Potential biofuels from liquefied industrial wastes e Preliminary evaluation of heats of combustion and van Krevelen correlations**. *Journal of Cleaner Production* 137,195-199.Disponible en: <https://kundoc.com/pdf-potential-biofuels-from-liquefied-industrial-wastes-preliminary-evaluation-of-he.html>
- Secretaría de energía**. Datos de energía. - balance energético. (2018). Disponible en: <http://datos.minem.gob.ar/dataset/balances-energeticos>
- Silva Lora, E.E. y Venturini,O.J. (2012). **Biocombustibles**. 1º Edición. Volumen 1, Rio de Janeiro, Brasil. Editorial InterciênciaLta.
- Singh, Y. D., Mahanta, P., Bora, U. (2017). **Comprehensive characterization of lignocellulosic biomass through proximate, ultimate and compositional analysis**

- for bioenergy production.** *Renewable Energy* 103: 490-500. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116310084>
- Van Krevelen, D. W. (1950). **Graphical-statistical method for the study of structure and reaction processes of coal.** *Fuel* (29), 269-84.
- Van Loo, S. and Koppejan, J. (2008). **The Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing.** Earthscan.Londres.
- WISDOM Tucumán (2009). **Análisis del balance de energía derivada de la biomasa en Argentina. WISDOM Argentina.** Disponible en: http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/Balance_de_Energia.pdf
- WISDOM Tucumán (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).** Disponible en: http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/WISDOM
- 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: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1027772/FULLTEXT01.pdf>
- Xia, S., Xiao, H., Liu, M., Chen, Y., Yang, H. and Chen H. (2018). **Pyrolysis behavior and economics analysis of the biomass pyrolytic polygeneration of forest farming waste.** *Bioresource Technology* 270: 189-197.
- Zamora Rueda, G. del H., Mistretta, G., Gutierrez, C., Peralta, F., Golato, M., Ruiz, M., Paz, D. y Cárdenas, G. (2016). **Características energéticas del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán y su análisis como combustible adicional de calderas bagaceras.** *AVANCE* 37(3): 14-18.
- Zamora Rueda, G. del H., Mistretta, M.G., Gutierrez, C.E., Golato, M.A., Paz, D. and Cárdenas, G.J. (2019). **Physicochemical and Energy Characterization of Sugarcane Vinasse in Tucumán, Argentina**". Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT) (30): 978–982.
- Zossi, S. (2016). Apuntes de clase de la asignatura **“Técnicas analíticas para la producción y uso de biocombustibles”**.(Especialización/Maestría en Ingeniería Bioenergética – FRT – UTN).