

CARACTERIZACIÓN Y PIRÓLISIS DE RESIDUOS DE LA PLANTA DE TOMATE (*Solanum lycopersicum*) DE LOS INVERNADEROS AGRUPAR

CHARACTERIZATION AND PYROLYSIS OF TOMATO PLANT (*Solanum lycopersicum*) RESIDUES FROM THE AGRUPAR GREENHOUSES

 **Sergio Homero Medina Romo, Ph. D.**

Universidad Central Del Ecuador

smedina@uce.edu.ec

Quito, Ecuador

 **Gonzalo Chiriboga Gavidia, Ph. D.**

Universidad Central del Ecuador

wgchiriboga@uce.edu.ec

Guayaquil, Ecuador

 **Washington Polivio Ruiz López, Mgtr.**

Universidad Central del Ecuador

wruiz@uce.edu.ec

Quito, Ecuador

 **Alejandro Javier Delgado Araujo, Mgtr.**

Universidad Central del Ecuador

adelgado@uce.edu.ec

Quito, Ecuador

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Recibido: 05/09/2025

Aceptado: 10/12/2025

Publicado: 30/12/2025

RESUMEN

La generación de desechos vegetales es elevada a nivel mundial. La pirólisis lenta es una forma de valorizar estos residuos. El análisis termogravimétrico (TGA) se emplea para caracterizar la biomasa, estudiar su comportamiento con la temperatura y evaluar el potencial de los residuos como fuente de energía y productos de valor añadido. El presente estudio caracteriza los residuos (tallos y hojas) de la planta de tomate (*Solanum lycopersicum*) de los invernaderos del proyecto AGRUPAR-Quito, con el objetivo de analizar su estructura química y su comportamiento con la temperatura. Se realiza el análisis elemental de los residuos, su composición química por deconvolución, el poder calorífico por la fórmula de Dulong, el pH y la conductividad eléctrica. El análisis proximal se obtiene con la técnica TGA. Para observar su comportamiento con la temperatura, se realiza el TGA en atmósfera inerte (N₂) y oxidante (aire). Los resultados principales muestran que los residuos de la planta de tomate tienen un poder calorífico de 12,4 MJ kg⁻¹, pH neutro. Su principal constituyente químico es la hemicelulosa (66,5%). Al tener un porcentaje de carbono fijo de 14,1% y relaciones molares de H/C y O/C de 0,9 y 0,52, respectivamente, estos residuos son propicios para producir biocarbón y este, como enmienda

de suelos agrícolas. La fracción volátil (58,4%) puede ser empleada para elaborar combustibles gaseosos y líquidos, así como fuente de productos para la industria. Su comportamiento con la temperatura es similar al de los materiales lignocelulósicos, formando picos característicos en cada proceso de descomposición tanto en atmósfera inerte como en oxidante.

Palabras Clave: residuos vegetales, pirólisis, biocarbón, análisis termogravimétrico, caracterización biomásica

ABSTRACT

The generation of vegetable waste is significant. One effective way to valorize this waste is through slow pyrolysis. Thermogravimetric analysis (TGA) is employed to characterize the samples and examine their thermal behavior. This technique provides insights into the potential of vegetable waste as a source of energy and value-added products. This study focuses on characterizing tomato vegetable waste sourced from the AGRUPAR-Quito project's greenhouses. The objective is to analyze its chemical structure and thermal behavior. The research involves conducting elemental analysis, determining chemical composition through deconvolution, calculating calorific value using the Dulong formula, and measuring pH and electrical conductivity. Proximate analysis is carried out using the TGA technique. To investigate the thermal behavior, TGA is performed in both inert (N₂) and oxidizing (air) atmospheres. Key results and conclusions indicate that tomato waste has a calorific value of 12.4 MJ/kg at neutral pH. The primary chemical component identified is hemicellulose, constituting 66.5% of the waste. The fixed carbon content is 14.1%, with hydrogen-to-carbon (H/C) and oxygen-to-carbon (O/C) molar ratios of 0.9 and 0.52, respectively. These characteristics suggest that the waste is suitable for biochar production, which can then be utilized as a soil amendment for agricultural purposes. The volatile fraction, comprising 58.4%, has potential applications in generating gaseous and liquid fuels, as well as producing various industrial products. The thermal behavior of waste resembles that of lignocellulosic materials, displaying characteristic peaks during each decomposition process in both inert and oxidizing atmospheres.

Keywords: plant residues, pyrolysis, biochar, thermogravimetric analysis, biomass characterization

INTRODUCCIÓN

Los desechos de alimentos generados a nivel mundial constituyen el 44% de los 2010 millones de toneladas de desechos municipales sólidos (Banco Mundial, 2018). La ciudad de Quito

(Ecuador) genera aproximadamente 1200 t/día de basura orgánica, que al no ser adecuadamente gestionados contribuyen a la contaminación ambiental (Center for Clean Air Policy, 2017). Desde 2002, la Municipalidad del Distrito Metropolitano de Quito (MDMQ) viene implementando por intermedio de CONQUITO (Agencia de promoción económica popular de Quito) el proyecto AGRUPAR, una iniciativa de Agricultura Urbana Participativa, cuyo objetivo es promover la producción agroecológica (AGRUPAR, 2021, p. 1). Se crearon 4400 invernaderos urbanos que abarcan 63 hectáreas de la ciudad. En estos huertos urbanos se cultivan principalmente tomate riñón, zucchini, brócoli, pepinillo, pimiento y otros. Se generan alrededor de 240 kg de residuos por invernadero y por ciclo de cultivo, teniendo un ciclo de cultivo al año. Estos residuos vegetales se producen principalmente por la poda de las plantas y en el período de cosecha, una parte de éstos son aprovechados para producir bioabono (AGRUPAR, 2021, p. 2).

Para un mejor aprovechamiento de estos residuos es importante investigar técnicas que permitan lograr este objetivo. La pirólisis es un proceso termoquímico ampliamente utilizado en la valorización de este tipo de residuos que permite descomponer la biomasa en tres fracciones, fracción gaseosa, volátiles condensables y residuo carbonoso; cada una de las cuales puede ser utilizada con distintos fines (Rueda-Ordóñez, Y., y Tannous, K., 2017, p. 120; Wang et al., 2019, p. 486-487). El empleo de esta técnica permite evaluar el potencial de los residuos como fuente de energía y de productos de valor añadido, así como profundizar en la cinética del proceso de descomposición y en su mecanismo.

Dependiendo de la temperatura y la velocidad de calentamiento, existen tres tipos diferentes de pirólisis: lenta, rápida e instantánea. La pirólisis lenta o convencional es la más apropiada si el objetivo es una fase sólida, es decir, carbón vegetal. Las condiciones adecuadas de pirólisis lenta son: temperatura entre 400 °C y 600 °C, tiempos de residencia entre 5 y 30 min, y velocidades de calentamiento entre 7-10 °C/min (Goyal et al., 2008, p. 508-510). Además de obtener productos gaseosos y líquidos que se aplican como combustibles, el principal producto obtenido de la pirólisis lenta es el biocarbón, el cual se puede aplicar como combustible, como carbón activado en la industria y para enmienda de los suelos agrícolas (Arauzo et al., 2014, p. 4).

Las principales aplicaciones del carbón vegetal son como combustible doméstico, agente reductor y materia prima para la producción de carbón activado. También se producen gases y líquidos con un poder calorífico bajo-medio-alto. Estos productos se utilizan para producir energía y ciertos productos químicos. Los otros dos tipos de pirólisis generan mayores cantidades de

gases, especialmente cuando la temperatura y el tiempo de residencia son muy altos (Encinar et al., 2008, p. 1194; Ronsse et al., 2013a, p. 12-16). La pirólisis rápida produce un 60% de combustible líquido, 20% de combustible gaseosos y 20% de sólidos (Tursi, 2019, p. 972).

La pirólisis de residuos herbáceos ha sido poco estudiada, no así la de residuos leñosos que han sido ampliamente estudiados (Chen et al., 2019; Shen et al., 2013). En la bibliografía se encuentran estudios de Font et al. (2009), sobre la cinética de descomposición de residuos de tomate. Así también, Encinar et al. (2008) realizaron un estudio de la pirólisis convencional de residuos de tomate, con el objetivo de caracterizar las fases sólida, líquida y gaseosa obtenidas en el proceso para su posible utilización en la generación de energía. Rueda-Ordóñez, Y., y Tannous, K. (2017) realizaron el análisis cinético de la descomposición térmica de cuatro biomásas lignocelulósicas procedentes de Brasil. Llorach-Massana et al. (2017) obtuvieron biocarbón de residuos de vegetales para su aplicación en la enmienda de suelos agrícolas. Sánchez-Hervas et al. (2023) realizaron la pirólisis de diferentes tipos de residuos con el objetivo de ver las fracciones obtenidas y su mejor utilidad. Rojas y Flores (2019) realizaron la valorización de 49 residuos de frutas como posible materia prima en los procesos de combustión y pirólisis.

Joseph et al. (2021, p. 3) hicieron una revisión de 20 años de investigación sobre la utilidad que ofrece el biocarbón a los suelos agrícolas, y concluyen principalmente que las propiedades del biocarbón y sus efectos dentro de los ecosistemas agrícolas dependen en gran medida de las condiciones de la materia prima y la pirólisis. Agnol et al. (2021) obtuvieron nanopartículas de carbón con tamaño inferior a 10 nm los denominados 'carbon quantum dots (CQD)', a partir del biocarbón formado por pirólisis a 300 °C de la microalga espirulina. Estas nanopartículas emiten fluorescencia y poseen propiedades únicas. Tienen aplicación en áreas como dispositivos optoelectrónicos, materiales biomédicos, sensores, fotocatalisis, y últimamente existe un gran interés para su aplicación en la agricultura para mejorar la productividad y crecimiento de las plantas, progresando considerablemente en esta área.

Sun et al. (2022), realizaron una revisión sobre la pirólisis de algas para la producción de energía y biocarbón. Las algas constituyen la tercera generación de materia prima que puede ser convertida en bioenergía y biocarbón por medio de la descomposición térmica. El biocarbón producido tiene muchas aplicaciones como enmienda de suelos agrícolas, tratamiento de aguas residuales y como super capacitor.

Luo et al. (2017, p. 1) realizaron una investigación sobre la aplicación de la mezcla biocarbón-compostaje, producida a base de biocarbón de residuos vegetales, polvo de cáscara de mariscos, polvo de cáscara de maní y nutrientes inorgánicos, para mejorar la productividad y

propiedades de los suelos costeros degradados del río Amarillo en China. Los resultados indicaron que la aplicación de la mezcla biocarbón-compostaje al 1,5% mejoraba el crecimiento de la Malva marina e incrementaba su masa en un 70,8%, con respecto a la prueba de control, por lo que concluyeron que la mezcla estudiada podría ser una alternativa factible para remediar el suelo costero degradado en el delta del río Amarillo.

Brassard et al. (2019, p. 110) realizan una amplia revisión sobre el uso del biocarbón como enmienda del suelo. Además de incrementar la salud de los suelos y el rendimiento de los cultivos, puede contribuir a mitigar el cambio climático por el secuestro de carbono por cientos de años y disminuir las emisiones de NO₂. Debido a su alta porosidad y área superficial, puede ser usado como herramienta de remediación para suelos agrícolas contaminados. Finalmente, la producción de biocarbón a partir de biomasa agrícola residual, puede ser una solución para los agricultores con el fin de gestionar de mejor manera sus residuos.

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar los residuos de plantas de tomate de los invernaderos del proyecto AGRUPAR-Quito, cuantificar por TGA de estos residuos, sus fracciones obtenidas, así como ver su comportamiento de descomposición con la temperatura. Este estudio sirve de base para futuras investigaciones que nos permitan estudiar la cinética de descomposición de estos residuos, así como también los compuestos volátiles generados en la pirólisis analítica (EGA).

EXPERIMENTAL

Se utilizaron los residuos vegetales, tallos y hojas de tomate, generados en los invernaderos urbanos de AGRUPAR. Previo a la pirólisis, la biomasa fue sometida a un proceso de secado y molienda.

El proceso de secado de los residuos se efectuó en una estufa a 105 °C durante 14h, logrando disminuir su porcentaje de humedad desde un valor de 80-90% en base húmeda, valor de humedad cuando llegan los residuos del invernadero, hasta la humedad de equilibrio.

La molienda de la biomasa seca se realizó utilizando un molino de corte marca Retsch SM300, dotado de un tamiz con luz de malla de 1,5 mm. a 700 rpm, obteniendo un tamaño promedio de partícula de 0,814 mm.

Métodos

Análisis Elemental. Se determina la composición porcentual de C, N, H y S mediante el *Analizador Elemental CHSN TM FlashSmart*. El porcentaje de oxígeno se obtiene por diferencia, teniendo en cuenta el valor de las cenizas y el valor de humedad de equilibrio de las muestras.

Análisis Proximal. Se realiza en una *balanza termogravimétrica Mettler-Toledo TGA-1*. La muestra se calienta a una velocidad de calefacción de $20\text{ }^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$, desde temperatura ambiente hasta $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un flujo de N_2 de 80 mLmin^{-1} . Se mantiene a esa temperatura durante 15 min y, por diferencia en peso en ese punto respecto al inicial, se determina el porcentaje de humedad de la muestra. Manteniendo la misma velocidad de calefacción y flujo de N_2 , se calienta la muestra hasta $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, determinando a esa temperatura el contenido de volátiles de la muestra. Se sustituye el nitrógeno por una atmósfera de aire (80 mLmin^{-1}), manteniendo la temperatura constante durante 20 min, determinando finalmente el porcentaje de carbono fijo y cenizas.

Análisis termogravimétrico (TGA). Se realizó, tanto en atmósfera inerte (N_2) como oxidante (aire), a una velocidad de calefacción de $20\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$, con flujo de 80 mL min^{-1} , desde temperatura ambiente hasta $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se realizaron dos réplicas para cada análisis. La termobalanza utilizada fue Mettler-Toledo TGA-1. En cada experimento se pesó alrededor de 6 mg de muestra iniciales en una balanza analítica XS205 Dual Range, Mettler Toledo.

Análisis Químico. Se determinan los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina. A partir de los datos del TGA se obtienen los datos para el gráfico DTG (variación de masa en el tiempo). De los datos obtenidos del DTG se eliminan los correspondientes al hombro de humedad y a la pérdida de peso por encima de los $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, con el propósito que quede sólo el área correspondiente a la degradación de la hemicelulosa, celulosa y lignina, para por deconvolución de los mismos mediante el programa ORIGIN, obtener los resultados de los porcentajes aproximados de estas fracciones.

Medida de pH y conductividad eléctrica. Se añade 20 ml de agua destilada a 1 g de muestra, se agita con un agitador magnético durante 90 minutos y se mide el pH y la EC (Rajkovich et al., 2012).

Densidad. Se determina la densidad aparente. Para determinar esta densidad se mide el volumen que ocupa una cantidad conocida de muestra, mediante una probeta.

Poder calorífico. El poder calorífico superior (PCS) de la biomasa se ha estimado utilizando la fórmula de Dulong.

$$PCS = 337,3C + 1418,9 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 93,1S + 23,3N \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad \text{Ec. 1}$$

Donde, C, H, O, N, S, constituyen sus respectivos porcentajes en la composición de la biomasa. Se toman los resultados del análisis elemental de los porcentajes de cada elemento, y se sustituyen en la ecuación de Dulong. Se tienen 2 réplicas de los resultados del análisis elemental para cada elemento. Se obtiene el promedio de los PCSs calculados, y este valor se presenta en la Tabla 1.

En todos los análisis se realizaron 2 réplicas, y los resultados mostrados en la Tabla 1, constituyen el promedio. No se realiza un diseño experimental, ya que la investigación no es del tipo correlacional.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la Biomasa

La Tabla 1 muestra los resultados de la caracterización de la biomasa. Se observa que el porcentaje de carbono es de 37,7%. Es importante este porcentaje de carbono, ya que de éste depende el rendimiento del biocarbón final. Tripathi et al. (2016, p. 470), obtuvieron un 48,5% en promedio de carbono del análisis de 10 biomásas de madera y un 46,82% en promedio de carbono del análisis de 15 biomásas de agricultura. Font et al. (2009, p. 269), determinaron la composición elemental en base seca de la planta de tomate, siendo: C, 38,3%; H, 5,2%; N, 2,7%; S, 1,1%; O, 41,1%, coincidiendo en mayor medida con los datos del presente estudio. El porcentaje de S es relativamente bajo, no así el porcentaje de N es un poco más alto. Sin embargo, se considera no habrá emisiones importantes de NOx durante el proceso de pirólisis al no existir presencia de oxígeno en la atmósfera.

Según Rojas y Flores. (2019, p. 50-51) y Hidayat et al. (2018, p. 10) relaciones O/C y H/C bajas indican un mayor contenido de energía de la biomasa al tener un mayor contenido de carbono y ubican la biomasa más cercana al carbón, que se utiliza como combustible sólido de referencia, mientras que valores altos de las relaciones H/C y O/C favorecen la producción de volátiles y líquidos durante el proceso de pirólisis. En el estudio de Apaydin-Varol y Pütün (2012, p. 30) , se tiene un promedio de 1,41 y 0,52 para las relaciones de H/C y O/C respectivamente, en los análisis de madera de pino, cáscara de arroz, cáscara de soya y cáscara de maní. En el presente estudio se tiene valores de 0,9 y 0,52 para las relaciones H/C y O/C respectivamente, que se considera son bajas y esta biomasa tendrá un mayor rendimiento de biocarbón.

En la Figura 1 se presenta la curva TGA de la biomasa, a partir de la cual se obtuvieron los datos del análisis proximal. Se observa que, hasta los 100 °C aproximadamente, se desprende la humedad de equilibrio, 6,6%, que es un porcentaje adecuado para el proceso de pirólisis. A partir de los 100 °C empiezan las reacciones de pirólisis hasta los 700 °C. En este rango se volatilizan los compuestos resultantes de la degradación de la hemicelulosa, celulosa y lignina en ese orden, constituyendo la fracción volátil de la biomasa. Llegado a los 700 °C se sustituye el N₂ por un flujo de aire (50 ml/min) en la termobalanza durante 30 min, quemándose así el carbono fijo que quedó como resultado de las reacciones de pirólisis. Finalmente, queda como residuo las cenizas, que básicamente son compuestos inorgánicos (Medina 2023).

Tabla 1

Caracterización de la biomasa de tomate (base seca)

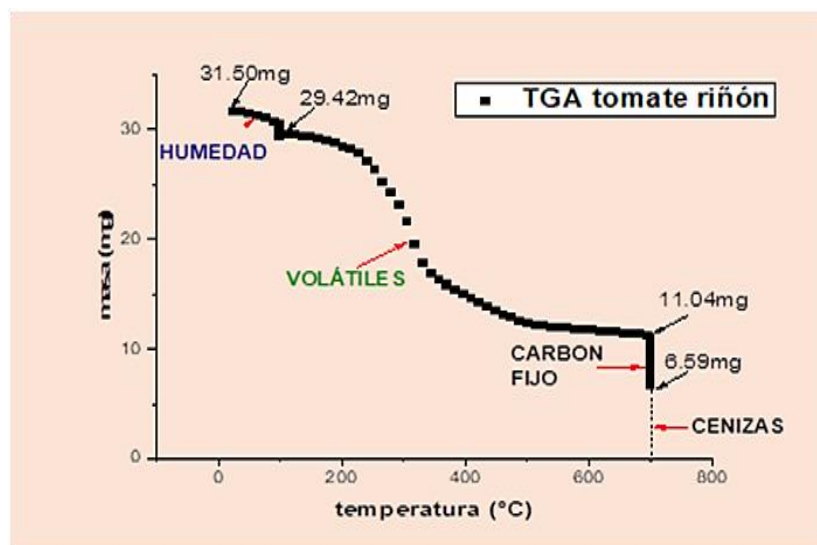
PARÁMETRO	Valor	unidad
ANÁLISIS ELEMENTAL		
		%w/w
Carbono (C)	37,7	%
Nitrógeno (N)	3,9	%
Hidrógeno (H)	2,9	%
Oxígeno*(O)	26,3	%
Azufre (S)	1,7	%
H/C molar	0,9	
O/C molar	0,52	
ANÁLISIS PROXIMAL(TGA)		
		%w/w
Humedad de equilibrio	6,6	%
Volátiles	58,4	%
Carbono fijo	14,1	%
Cenizas	20,9	%
ANÁLISIS QUÍMICO		
Celulosa	17,9	%
Hemicelulosa	66,5	%
Lignina	15,6	%
PROPIEDADES		
Densidad aparente	0,385	g mL ⁻¹
pH	7,02	
Conductividad Eléctrica (CE)	7,09	mS cm ⁻¹
Poder calorífico Superior (PCS)**	12,4	MJ kg ⁻¹
Tamaño de partícula (promedio)	0,814	mm

Nota. *Obtenido restando los porcentajes de C,H,N,S, cenizas y humedad de equilibrio del 100%.

**Obtenido a partir de la ecuación de Dulong.

Figura 1

TGA de los residuos de la planta de tomate y su análisis proximal



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Font et al. (2009, p. 269) en su estudio sobre la cinética de pirólisis y combustión de la planta de tomate, obtuvieron 11,6% de cenizas. Llorach-Massana et al. (2017, p. 125), encontraron entre el 8 y 15% el porcentaje de cenizas de tallos de tomate y entre el 18 y 23% el porcentaje de cenizas en hojas de tomate, valores similares a los presentados en este trabajo. Rojas (2019, p. 46) determinó en el tallo de la planta de tomate un 12,8% de cenizas, 77,48% de volátiles y 9,72% de carbono fijo, valores que siguen la tendencia de los valores encontrados en el presente estudio. Apaydin-Varol y Pütün (2012, p. 30) en su estudio sobre la caracterización de biocarbonos producidos de diferentes biomásas, determinan que los tallos de maíz (biomasa relativamente similar a la del presente estudio) tiene humedad del 8,1%, cenizas 10,8%, volátiles 67,4%, carbón fijo (por diferencia) 13,8%, valores similares a los del presente estudio.

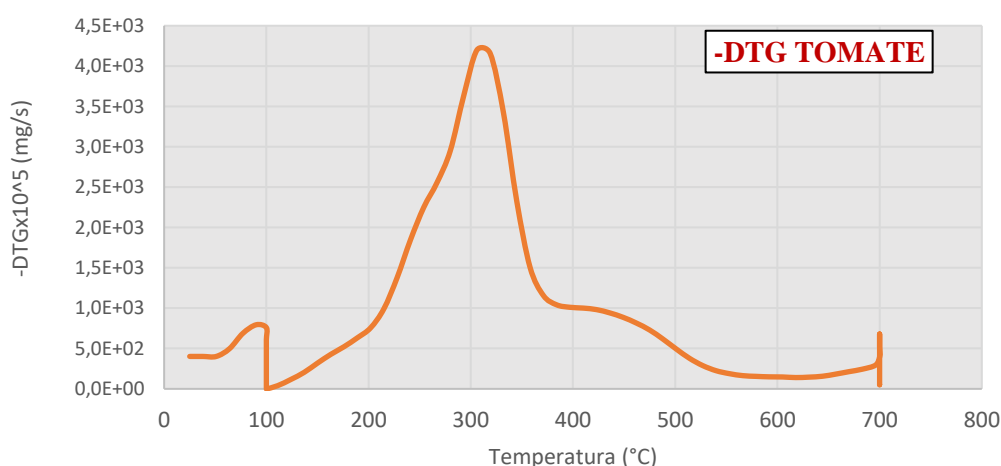
A partir de los datos del TGA se obtiene el gráfico DTG que se muestra en la Figura 2. En este gráfico se observa que, existen cuatro zonas correspondientes a procesos diferentes. La primera corresponde a la pérdida de humedad, esta zona está comprendida entre los 25 °C, hasta los 100 °C aproximadamente y corresponde al primer pico DTG. La segunda zona, comprendida entre 200 y 270 °C, se relaciona con la descomposición de la hemicelulosa, aunque también ya comienza la degradación de la celulosa y lignina. La tercera zona, comprendida entre 270 y 380 °C, se asocia con la descomposición de la celulosa, pero también se descompone un poco la

lignina más lábil y el resto de hemicelulosa. La última zona, comprendida entre 380 °C hasta alrededor de 600 °C, se relaciona con la degradación de la lignina más resistente (Medina, 2023).

De los datos obtenidos del DTG se eliminan los correspondientes al hombro de humedad y a la pérdida de peso por encima de los 550 °C, con el propósito que quede sólo el área correspondiente a la degradación de la hemicelulosa, celulosa y lignina, para por deconvolución de los mismos mediante el programa ORIGIN, obtener los resultados de los porcentajes aproximados de estas fracciones como se observa en la Figura 3.

Figura 2

DTG de los residuos de la planta de tomate

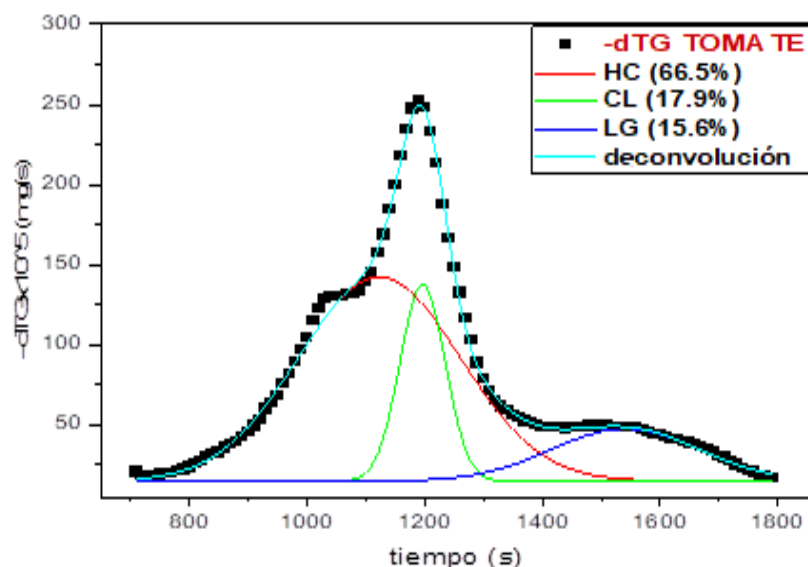


Nota. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la hemicelulosa es la fracción mayoritaria. En la bibliografía existe disparidad de resultados para los porcentajes de estos componentes obtenidos por distintos métodos. Por ejemplo, Font et al. (2009, p. 269), en su estudio sobre la planta de tomate, determinaron los siguientes valores para la hemicelulosa, celulosa y lignina: 28,8; 39,1 y 12,1% respectivamente; mientras que, Llorach-Massana et al. (2017, p. 124), determinaron los valores de 8,20; 28,8 y 19,7% para los tallos de planta de tomate y 3,2; 13,7 y 6,1% para las hojas de la misma planta. Como se puede observar, los resultados de estos autores difieren de los obtenidos por deconvolución de la curva DTG utilizando el programa ORIGIN y se alejan mucho de una suma de los porcentajes igual al 100% (Medina, 2023).

Figura 3

Porcentajes de hemicelulosa, celulosa y lignina de los residuos de la planta de tomate por el método de deconvolución



Nota. Fuente: Elaboración propia.

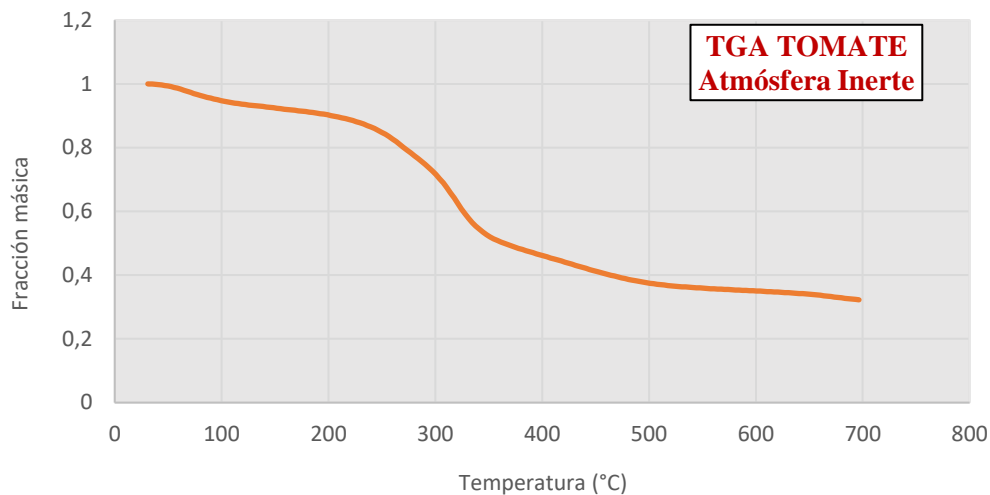
Se observa que la planta de tomate tiene un pH prácticamente neutro. Rojas y Flores (2019, p. 46), en su estudio sobre Valorización de residuos de frutas para combustión y pirólisis, determinan los poderes caloríficos de más de 50 residuos de frutas, donde destacan los PC de la cáscara de naranja, cáscara de coco y cáscara de piña, con valores de 19,34; 19,89 y 18,48 MJ/kg respectivamente; estos valores son relativamente superiores a los determinados para la biomasa del presente estudio.

Análisis Termogravimétrico (TGA)

Se realizó, tanto en atmósfera inerte (N₂) como oxidante (aire), a una velocidad de calefacción de 20 °C min⁻¹. Los resultados del TGA se presentan en las Figuras 4 y 5 respectivamente.

Figura 4

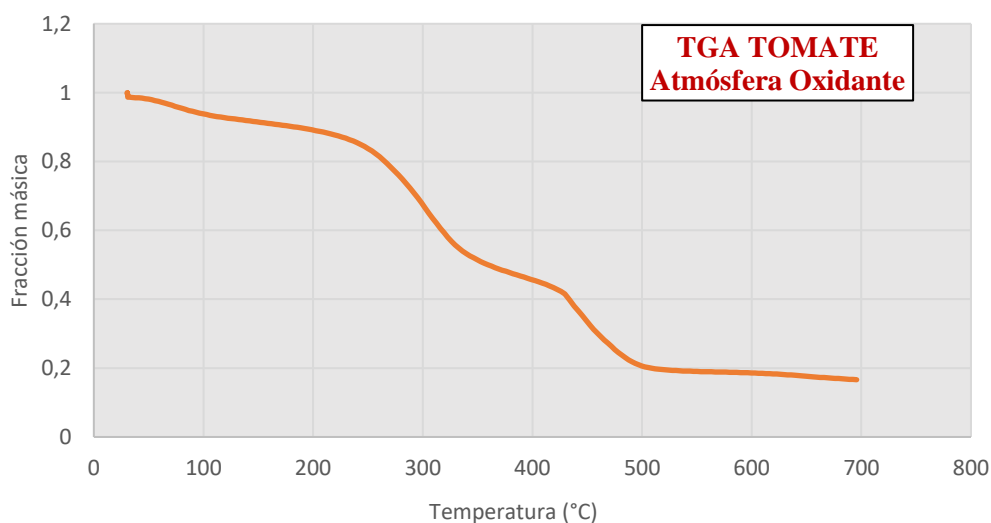
TGA de residuos de la planta de tomate en atmósfera inerte (N_2) a 20 °C/min de velocidad de calefacción



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 5

TGA de residuos de la planta de tomate en atmósfera oxidante (aire) a 20 °C/min de velocidad de calefacción



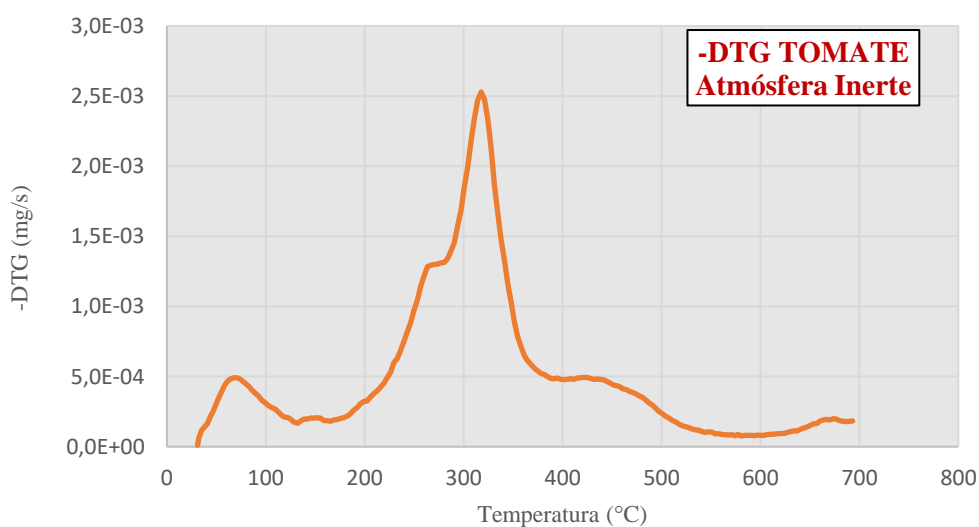
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Al comparar el gráfico de TGA en atmósfera inerte con el de atmósfera oxidante, se observa que, como era de esperar, el peso final en atmósfera inerte es siempre mayor que en atmósfera oxidante, debido a que en atmósfera oxidante se combustiona el carbono fijo, quedando como residuo solo las cenizas. Se observa también, que ambas curvas coinciden hasta la temperatura de 400 °C aproximadamente. A partir de este valor las dos curvas se diferencian muy significativamente, ya que en atmósfera oxidante se da la combustión del carbono fijo. Por tanto, hasta los 400 °C aparentemente el proceso de descomposición del sólido es independiente de la atmósfera de reacción.

A partir de los datos del TGA, se obtuvieron las curvas DTG en las dos atmósferas de descomposición. Los resultados se presentan en las Figuras 6 y 7 respectivamente.

Figura 6

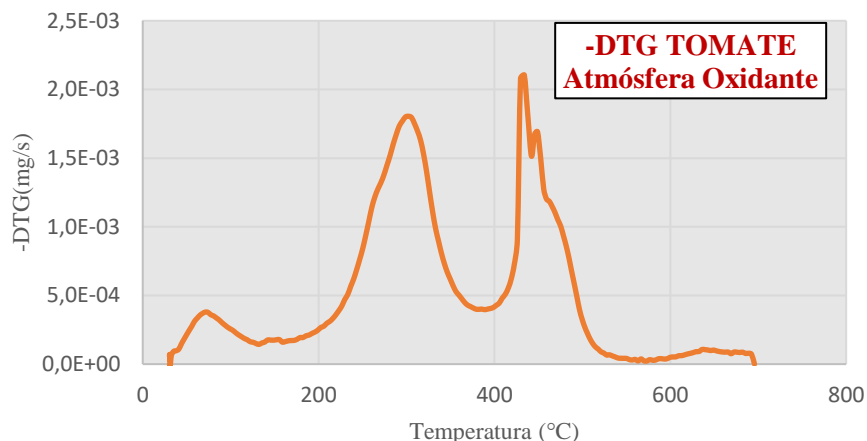
DTG de residuos de la planta de tomate en atmósfera inerte (N₂) a 20 °C/min de velocidad de calefacción



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 7

DTG de residuos de la planta de tomate en atmósfera oxidante (aire) a 20 °C/min de velocidad de calefacción



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos DTG permiten apreciar mejor que en las curvas TG las semejanzas y diferencias entre los procesos de descomposición en atmósfera inerte y oxidante.

En estas curvas se puede observar que, aunque los procesos en ambas atmósferas difieren notablemente a partir de los 400 °C, ya existen diferencias apreciables antes de los 300 °C. Así por ejemplo durante el proceso de oxidación, el hombro que corresponde a la descomposición de la hemicelulosa casi desaparece, lo que puede deberse a que, bajo la presencia de oxígeno, la degradación de la hemicelulosa y descomposición del biocarbón formado se dan casi simultáneamente, haciendo que el proceso se solape con la descomposición de la celulosa y se suavice mucho el hombro que se aprecia en atmósfera inerte (Medina, 2023).

A partir de los 400 °C, los dos procesos se diferencian notablemente. En el proceso de pirólisis como se analizó anteriormente, se produce la degradación de la lignina, generando un pico DTG centrado alrededor de 450 °C; en cambio, en atmósfera oxidante, a partir de 400 °C tienen lugar reacciones exotérmicas debido a la combustión del biocarbón formado por la degradación de las diferentes fracciones de la biomasa, dando lugar a la formación de distintos picos en las curvas de DTG.

Es importante observar el significativo pico que se forma en atmósfera oxidante a 450°C aproximadamente. Se considera que este pico se corresponde con la combustión de la fracción de biocarbón más superficial y que reacciona más violentamente con el aire.

CONCLUSIONES

De la caracterización de los residuos (tallos y hojas) de la planta de tomate cultivada en los invernaderos de la asociación AGRUPAR, se desprenden las siguientes conclusiones.

El principal constituyente en su composición química es la hemicelulosa, seguido de la celulosa, y por último la lignina. De análisis elemental se concluye que el carbono tiene el mayor porcentaje, así como también, al tener las relaciones molares de H/C y de O/C relativamente bajas, hacen que esta biomasa sea adecuada para la formación de biocarbón, y éste como enmienda de suelos agrícolas. El análisis proximal por TGA, nos muestra altos porcentajes de carbono fijo y volátiles, que corrobora su buena capacidad en la formación de biocarbón, y como fuente para la producción de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. El poder calorífico, sin ser muy alto en comparación con otras biomásas, nos presenta una alternativa energética interesante. El comportamiento con la temperatura en el proceso de pirólisis, tanto en atmósfera inerte como oxidante, es similar a la mayoría de residuos lignocelulósicos.

De todo lo anterior, se concluye que, los residuos (tallos y hojas) de la planta de tomate, cultivada en los invernaderos de la asociación AGRUPAR, constituyen una biomasa adecuada para la producción de biocarbón para enmienda de suelos agrícolas, así como también para la elaboración de combustibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agnol, L. D., Neves, R. M., Maraschin, M., Moura, S., Ornaghi, H. L., Dias, F. T. G., & Bianchi, O. (2021). Green synthesis of Spirulina-based carbon dots for stimulating agricultural plant growth. *Sustainable Materials and Technologies*, 30, pp. 347-358. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00347>
- AGRUPAR. (2021). Invernaderos urbanos y suburbanos Quito. [Documento informativo]. <https://interlace-hub.com/es/quito-y-su-agricultura-urbana-agrupar>
- Apaydin-Varol, E., & Pütün, A. E. (2012). Preparation and characterization of pyrolytic chars from different biomass samples. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 98, pp. 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.07.001>
- Arauzo, J., Bimbela, F., Ábrego, J., Sánchez, J.L., y Gonzalo, A. (2014). Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa. *Boletín del Grupo Español del Carbón*, 33, pp. 2-6. http://www.gecarbon.org/boletines/articulos/BoletinGEC_033-A01.pdf

- Banco Mundial, 2018. Desechos 2.0: Un panorama mundial de la gestión de desechos sólidos hasta 2050. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Brassard, P., Godbout, S., Lévesque, V., Palacios, J., Raghavan, V., Ahmed, A., Hogue, R., Jeanne, T., & Verma, M. (2019). Biochar for soil amendment. *Char and Carbon Materials Derived from Biomass*. 4, pp. 110-145. Elsevier inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814893-8.00004-3>
- Center for Clean Air Policy. (2017). Estudio de basura en Quito. [Reporte Informativo Municipio de Quito]. <file:///C:/Users/User/Downloads/Dialnet-CaracterizacionDeLosResiduosSolidosUrbanosYDesperd-9016356.pdf>
- Chen, W. H., Wang, C. W., Ong, H. C., Show, P. L., & Hsieh, T. H. (2019). Torrefaction, pyrolysis and two-stage thermodegradation of hemicellulose, cellulose and lignin. *Fuel*, 258, pp. 116168-116181. Springer. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116168>
- Encinar, J. M., González, J. F., & Martínez, G. (2008). Energetic use of the tomato plant waste. *Fuel Processing Technology*, 89(11), pp. 1193–1200. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.05.011>
- Font, R., Moltó, J., Gálvez, A., & Rey, M. D. (2009). Kinetic study of the pyrolysis and combustion of tomato plant. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85(1–2), pp. 268–275. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.026>
- Goyal, H. B., Seal, D., & Saxena, R. C. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, pp. 504–517. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.014>
- Hidayat, S., Abu Bakar, M. S., Yang, Y., Phusunti, N., & Bridgwater, A. V. (2018). Characterisation and Py-GC/MS analysis of Imperata Cylindrica as potential biomass for bio-oil production in Brunei Darussalam. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 134, pp. 510–519. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.07.018>
- Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z., & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13(11), pp. 1731–1764. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>

- Llorach-Massana, P., Lopez-Capel, E., Peña, J., Rieradevall, J., Montero, J. I., & Puy, N. (2017). Technical feasibility and carbon footprint of biochar co-production with tomato plant residue. *Waste Management*, 67, pp. 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.021>
- Luo, X., Liu, G., Xia, Y., Chen, L., Jiang, Z., Zheng, H., & Wang, Z. (2017). Use of biochar-compost to improve properties and productivity of the degraded coastal soil in the Yellow River Delta, China. *Journal of Soils and Sediments*, 17(3), pp. 780–789. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1361-1>
- Medina Romo, S. H., 2023. *Producción de biocarbón por pirólisis lenta a partir de biomasa residual de invernaderos urbanos y su aplicación en la mejora de la productividad de los mismos*. Ph.D. tesis inédita. Universidad de Alicante.
- Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A. R., & Lehmann, J. (2012). Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*, 48(3), pp. 271–284. <https://doi.org/10.1007/s00374-011-0624-7>
- Rojas González, A. y Flores Montes, C. (2019). Valorización de residuos de frutas para combustión y pirólisis. *Revista Politecnica*, 15, pp. 42–53. <https://doi.org/https://doi.org/10.33571/rpolitec.v15n28a4>. file:///C:/Users/User/Downloads/Valorizacion_de_residuos_de_frutas_para_combustion.pdf
- Ronsse, F., Dickinson, D., Nachenius, R., & Prins, W. (2013a). Biomass pyrolysis and biochar characterization. *Forebiom Workshop 2013*, [Department Of Biosystems Engineering, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent University (Belgium)], pp. 1–24. https://www.oeaw.ac.at/forebiom/WS1lectures/SessionII_Ronsse.pdf
- Rueda-Ordóñez, Y., & Tannous, K. (2017). Análisis cinético de la descomposición térmica de biomásas aplicando un esquema de reacciones paralelas independientes. *UIS Ingenierías* 16(2), pp. 119–127. <https://doi.org/10.18273/revuin.v16n2-2017011>
- Sanchez-Hervas, J.M, Ortiz, I., Márquez, A., Fernández-Fernández, A.M., Canivell, M., y Ruiz, E. (2023). Pirólisis de biomasa y residuos como estrategia de producción sostenible y simbio-sis industrial en la comunidad de Madrid (España). *Tecnología en Marcha*. 36, número especial. Encuentro Iberoamericano en Biomasa y Bioenergía, pp. 45-54. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i10.7010>

- Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, pp. 467–481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>
- Tursi, A. (2019). A review on biomass: Importance, chemistry, classification, and conversion. *Biofuel Research Journal*, 6, pp. 962–979. <https://doi.org/10.18331/BRJ2019.6.2.3>
- Shen, D., Xiao, R., Gu, S., & Zhang, H. (2013). The Overview of Thermal Decomposition of Cellulose in Lignocellulosic Biomass. *Cellulose - Biomass Conversion*. <https://doi.org/10.5772/51883>
- Sun, J., Norouzi, O., & Mašek, O. (2022). A state-of-the-art review on algae pyrolysis for bioenergy and biochar production. *Bioresource Technology*, 346, pp. 126258-126272. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126258>
- Wang, B., Xu, F., Zong, P., Zhang, J., Tian, Y., & Qiao, Y. (2019). Effects of heating rate on fast pyrolysis behavior and product distribution of Jerusalem artichoke stalk by using TG-FTIR and Py-GC/MS. *Renewable Energy*, 132, pp. 486–496. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.021>

Agradecimientos

Los autores agradecen a todos los actores involucrados y que contribuyeron al desarrollo de la presente investigación.

Financiamiento

No aplica.

Conflicto de intereses

No existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

SM, GC, WR, AD: Conceptualización, análisis formal, investigación, redacción-borrador original y redacción-revisión y edición.

Declaraciones éticas

No aplica.