

## Artículo de Investigación

# Design of a prototype for the qualitative assessment of the biodegradability of agro-industrial polymer wastes: Case study on "totumo" (*Crescentia cujete*)

Diseño de un prototipo para la evaluación cualitativa de la biodegradabilidad de residuos poliméricos agroindustriales: Estudio de caso en "totumo" (*Crescentia cujete*)

**Citación:** Sánchez, R. ; Castillo, Y. ; Muñoz, J. Diseño de un prototipo para la evaluación cualitativa de la biodegradabilidad de residuos poliméricos agroindustriales: Estudio de caso en "totumo" (*Crescentia cujete*). I + T + C Investigación, Tecnología y Ciencia. Vol 1. Num. 17. 2023.

**Raúl Sánchez** <sup>1\*</sup> , **Yineer Castillo** <sup>2</sup> , **Javier Andrés Muñoz** <sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Corporación Universitaria Comfacaucá, [raulsanchez@unicomfacaucá.edu.co](mailto:raulsanchez@unicomfacaucá.edu.co)

<sup>2</sup>Corporación Universitaria Comfacaucá, [yineercastillo@unicomfacaucá.edu.co](mailto:yineercastillo@unicomfacaucá.edu.co)

<sup>3</sup>Corporación Universitaria Comfacaucá, [jmunoz@unicomfacaucá.edu.co](mailto:jmunoz@unicomfacaucá.edu.co)

\*Correspondencia: [raulsanchez@unicomfacaucá.edu.co](mailto:raulsanchez@unicomfacaucá.edu.co)

**Nota del editor:** El sello editorial Unicomfacaucá se mantiene neutral con respecto a los reclamos derivados de los resultados de este trabajo.



**Derechos de autor:** © 2023 por los autores. Presentado para posible publicación en acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY NC SA) ([https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es\\_ES](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es_ES))

**Resumen:** Este artículo aborda la creciente preocupación por la gestión de residuos industriales y la evaluación de la biodegradabilidad de materiales, centrándose en el totumo (*Crescentia cujete*). Se desarrolló un sistema automatizado que monitorea gases (CO y CO<sub>2</sub>) y temperatura para evaluar la biodegradabilidad. Durante un período de 20 días, se registró la emisión de CO<sub>2</sub> y CO, correlacionándose con el crecimiento de hongos en las muestras de totumo. Se observó una emisión pico de CO<sub>2</sub> a las 76 horas, indicando actividad microbiana. Además, se encontró que el tamaño de partícula y los tratamientos térmicos afectan la biodegradabilidad, con tamaños menores y temperaturas más altas siendo beneficiosos. A pesar de su contenido de celulosa semicristalina, que presenta cierta resistencia, se estima que el totumo tiene una velocidad de degradación similar a otros residuos lignocelulósicos no maderables, como maíz, caña de azúcar, banano y café. Esto sugiere que el totumo tiene potencial para producir polímeros biodegradables y biogás, contribuyendo a una gestión más sostenible de los residuos agroindustriales.

**Palabras clave:** Biodegradabilidad, *Crescentia cujete*, Totumo, Residuos agroindustriales.

**Abstract:** This article addresses the growing concern for industrial waste management and the evaluation of biodegradability of materials, focusing on cattail (*Crescentia cujete*). An automated system for monitoring gases (CO and CO<sub>2</sub>) and temperature was developed to assess biodegradability. Over a period of 20 days, CO<sub>2</sub> and CO emissions were recorded and correlated with fungal growth in the totumo samples. Peak CO<sub>2</sub> emission was observed at 76 hours, indicating microbial activity. In addition, particle size and thermal treatments were found to affect biodegradability, with smaller sizes and higher temperatures being beneficial. Despite its semi-crystalline cellulose content, which presents some resistance, totumo is estimated to have a degradation rate similar to other non-timber lignocellulosic residues such as corn, sugarcane, banana, and coffee. This suggests that totumo has the potential to produce biodegradable polymers and biogas, contributing to a more sustainable management of agroindustrial wastes.

**Keywords:** Biodegradability, *Crescentia cujete*, Totumo, Agroindustrial residues.

## 1. Introducción

Actualmente, la gestión eficaz y el aprovechamiento de los residuos industriales se han convertido en retos importantes para la sociedad, una vez que, su producción ha aumentado considerablemente a medida que las industrias siguen creciendo [1].

Así, el sector agroindustrial produce cantidades sustanciales de subproductos de desechos debido a sus numerosos procesos y al uso extensivo de materiales. Si estos residuos no se gestionan adecuadamente, pueden causar contaminación ambiental, riesgos para la salud y agotamiento de los recursos [2]. Además, la eliminación convencional de estos desechos mediante vertederos o procesos de incineración agrava las problemáticas socioambientales. En consecuencia, existe la necesidad de avanzar hacia un enfoque de economía circular en el que los beneficios generados se traten como recursos que pueden utilizarse eficazmente mediante el reciclaje, la reutilización o la transformación en productos con valor agregado [3].

En este sentido, la exploración de materiales biodegradables es un componente crucial de esta transición, ya que no sólo reducen la carga de daños persistentes, sino que también minimizan el impacto ambiental de los productos a lo largo de su ciclo de vida. La capacidad de una sustancia para descomponerse en elementos naturales mediante procesos biológicos, ha adquirido una importancia significativa en los últimos años [4]. Así, existe una necesidad creciente de alternativas respetuosas con el medio ambiente a medida que la sociedad es cada vez más consciente de los efectos negativos de los materiales no biodegradables.

Uno de esos desechos agroindustriales con un potencial uso es la *Crescentia cujete*, comúnmente conocido como "totumo". Este fruto tropical genera una cantidad significativa de desechos en su procesamiento, en particular el epicarpio externo, que generalmente se descarta después de extraer la parte comestible [5]. Adicionalmente estos residuos, ricos en contenido lignocelulósico, ofrecen promesas para aplicaciones alternativas, especialmente en el desarrollo de polímeros biodegradables [6]. La exploración de dichos materiales no solo ayuda en la gestión de desechos, sino que también aprovecha el valor de estos residuos. Los materiales biodegradables aseguran que la fase de fin de vida de un producto se alinee con los procesos naturales de degradación del medio ambiente, reduciendo la contaminación del suelo, el agua y el aire [7].

De este modo, estimar la biodegradabilidad de los materiales es un paso importante para determinar su viabilidad medioambiental. Los métodos tradicionales implican procesos que exigen muchos recursos, uso de laboratorios especializados y a menudo requieren equipos costosos. El desarrollo de sistemas automatizados de bajo coste con casos prácticos para evaluar la biodegradabilidad en esta situación ofrece una solución práctica.

Este estudio propone abordar el análisis de la *Crescentia cujete* como fuente de polímeros amigables con el medio ambiente, a través del desarrollo de un sistema automatizado casero para la evaluación cualitativa de su biodegradabilidad. Así, se espera aportar en la reducción de desechos, el desarrollo de materiales sostenibles y soluciones tecnológicas accesibles, fomentando una relación más armoniosa entre la industria, el medio ambiente y la sociedad.

## 2. Materiales y métodos

El estudio del material base a evaluar se inició con el levantamiento de requerimientos y características de la cosecha, la cual fue realizada en la región del municipio de Patía. Se procedió con la extracción de la pulpa y sus semillas. Una vez extraídos estos componentes se obtuvo el epicarpio totalmente limpio, el cual será el material de partida para el desarrollo de esta investigación.

El epicarpio al presentar una contextura dura y quebradiza fue sometido a un proceso de triturado manual con el fin de disminuir su tamaño, posteriormente se sometió a una

trituration en un molino manual. Con el fin de obtener un material particulado homogéneo y con menores dimensiones se procedió con el tamizaje. Este proceso se realizó con tamices de malla tamaño 850 $\mu$ m, 600 $\mu$ m, 425 $\mu$ m. Después del tamizaje se procedió a trabajar con el polvo de menor tamaño (alrededor de 425 $\mu$ m) y este fue sometido a otro proceso de molienda en un molino de marca U.S STONEWARE - OR 11413 con piedras de zirconio con una frecuencia de 70 Hz durante 24 horas, siendo obtenido un material pasante en el tamiz de 106  $\mu$ m.

Para los estudios de biodegradabilidad se elaboraron pastillas por medio de compactación uniaxial usando una mezcla de Totumo y gel de Linaza, como agente aglutinante.

El proceso de extracción de linaza se llevó a cabo por medio de agitación magnética de las semillas de linaza en agua destilada (proporción 3:1) durante 10min a 60°C. El gel obtenido de mezclo con el material en polvo de totumo (proporción 1:1). A seguir, el material obtenido se llevó a compactación uniaxial en una prensa hidráulica de marca CARVER y un troquel en acero inoxidable de 31mm de diámetro de referencia.

El proceso de elaboración de las pastillas inició con la preparación y mezcla de los materiales que conforman la pasta, como mencionado arriba. Seguidamente, se pesó en una balanza analítica la cantidad de material que se ubicará dentro del troquel para su conformado a diferentes presiones (5 Ton y 8 Ton). La figura 1, muestra el proceso de compactación de las pastillas.

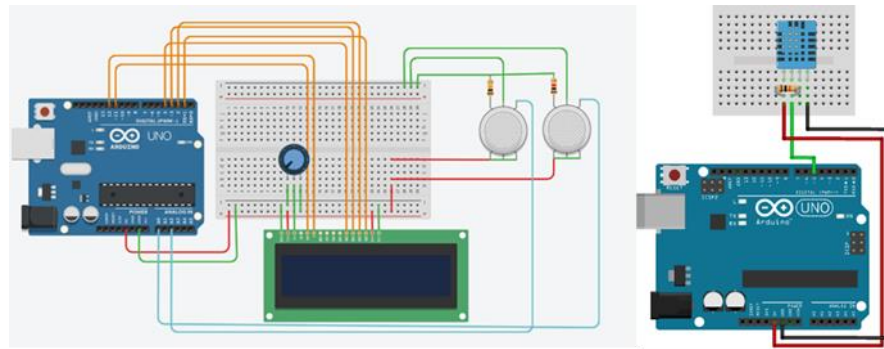


**Figura 1.** Proceso de compactación de las pastillas. Fuente autor.

Las pastillas resultantes del proceso de compactación uniaxial fueron tratadas térmicamente en una mufla E&Q MD 2 .2 usando una velocidad de calentamiento 3°C/min con patamar de 12 h a 50, 100 y 150 °C, con el objetivo de eliminar la humedad del material.

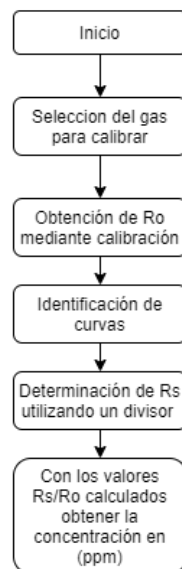
Para la evaluación cualitativa de la biodegradación del material compuesto a base de totumo, es de suma importancia la adquisición de datos, tales como, emisión de gases y temperatura. Por lo cual se eligieron los sensores MQ7, MQ135 que tienen la capacidad de medir CO y CO<sub>2</sub> respectivamente y el sensor DTH11 el cual es el encargado de monitorear la temperatura. Para adquisición de datos se utilizó una tarjeta Arduino UNO en la cual se carga el algoritmo de monitoreo del análisis de biodegradación. en la figura 2 se observa el diagrama de conexión de los sensores MQ y el DTH11.

Vale destacar que el ensayo de biodegradación se realizó por un periodo de 20 días equivalente a 480 horas, estos fueron registrados en una bitácora con un intervalo de adquisición de datos de 4 horas, (8 AM, 12PM, 4PM, 8PM, 12 AM). Para posteriormente graficar el comportamiento de la emisión del CO, CO<sub>2</sub> y la temperatura durante el ensayo de biodegradación.



**Figura 2.** Diagrama de conexión de sensores MQ7, MQ135, DTH11 y LCD16x2. Fuente autor.

Previo al inicio de las pruebas de biodegradabilidad, se procedió con la calibración de los sensores. En la figura 3 se muestra el diagrama del algoritmo de calibración de los sensores MQ.



**Figura 3.** Algoritmo de lectura de los sensores MQ. Fuente autor.

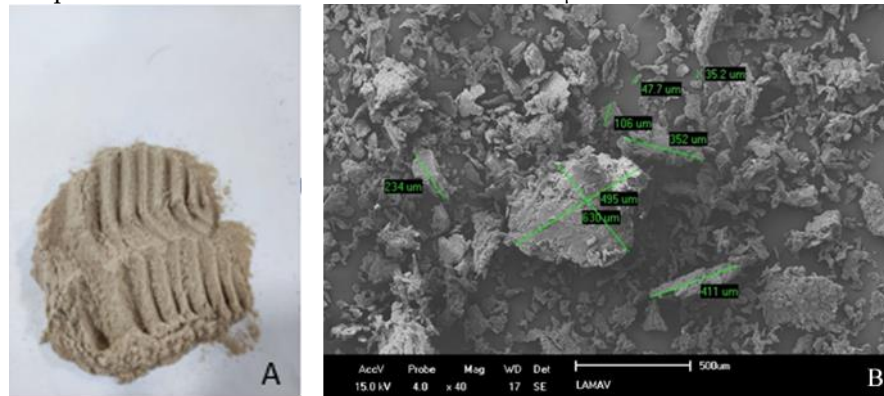
A partir de la calibración de los sensores se procedió a analizar la biodegradación cualitativa del material; Este proceso se realizó en base diferentes normas como ISO14855-1:2012, ASTM-D6400, ISO9439 y la OCDE301E; las cuales miden la biodegradación debido al desprendimiento de carbono del material el cual es convertido en CO<sub>2</sub>, medición del monóxido de carbono y finalmente se midió la temperatura para observar la variación de la misma durante el experimento.

Este experimento fue realizado en el municipio del Bordo Cauca el cual posee una temperatura promedio de 32°C. La medición de biodegradabilidad se realizó con 6 pastillas del material conformado por compactación uniaxial. Las pastillas se ubicaron en una cámara cerrada fabricada en acrílico 3mm con medida largo 194 mm, de ancho 130mm y una altura de 84mm, el peso del compost como material inoculo es de 200 gr de tierra abonada, la cual está compuesta de cascarilla de arroz y material descompuesto de madera. Para el proceso se debe tener en cuenta que el material objeto de estudio no debe tener un contacto previo con el material que sirve como fuente de microorganismos vitales para la degradación.

### 3. Resultados

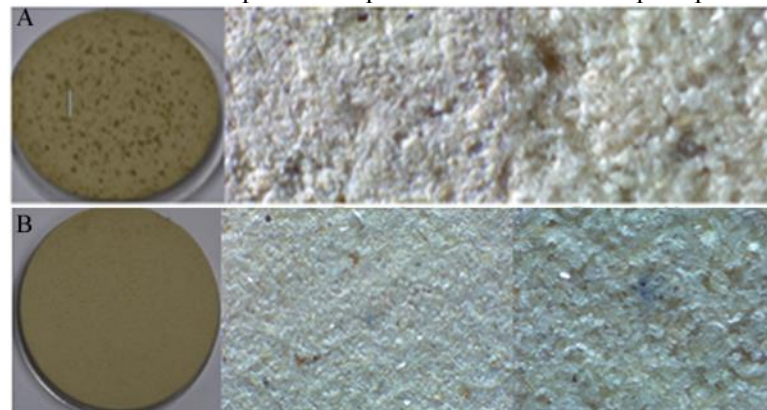
#### 3.1. Procesamiento del material a evaluar

Como mencionado previamente el proceso de adecuación del material incluyó la cosecha del totumo municipio del Bordo Cauca, limpieza, triturado manual y molienda con piedras de zirconia. Al final de este proceso fue obtenido un material con menor tamaño, aproximadamente 106  $\mu\text{m}$ . La figura 4 muestra el material después del proceso de molienda, así como la microestructura del material obtenida por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB). La imagen MEB de las partículas de totumo, muestra superficies ásperas y formas alargadas e irregulares con longitudes de entre 35 y 630  $\mu\text{m}$ . Estos tamaños se relacionan con el proceso de obtención durante la molienda y el hecho de que el menor tamizado utilizado fue de 425  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4.** (A) Imagen del epicarpio del totumo después del proceso de molienda. (B) Detalle de la microestructura obtenida por Microscopía electrónica de barrido (MEB).

La figura 5, muestra el aspecto de algunas de las pastillas obtenidas, así como un detalle de la unión de las partículas por medio de microscopía óptica.



**Figura 5.** Muestras compactadas (A) 5Ton (425 $\mu\text{m}$ ) y (B) 5Ton (106 $\mu\text{m}$ ).

#### 3.2. Calibración del sistema de monitoreo de biodegradabilidad.

Para la calibración de los sensores de gases, MQ7 y MQ135, se realizó un precalentamiento definido por el fabricante de 48 y 24 horas respectivamente para cada sensor sin interrupción, para así obtener una medición óptima en cada uno de ellos.

Una vez precalentado el sensor se da inicio con la caracterización adecuada del sensor MQ7 para la medición del CO. Mediante la ecuación 1 se obtuvo la resistencia superficial media ( $R_s$  media) la cual fue promediada con 50 datos de la lectura obtenida del sensor, con la cual se pudo obtener el valor  $R_o$  mediante la ecuación 2, resistencia fija calculable para poder obtener una variación de la lectura del sensor. Mediante la ecuación 3 se

caracterizó la señal del sensor en voltaje siendo  $R_S$  resistencia superficial,  $V_c$  voltaje de entrada,  $V_{RL}$  voltaje de salida y  $R_L$  resistencia de carga de 10 Kohm.

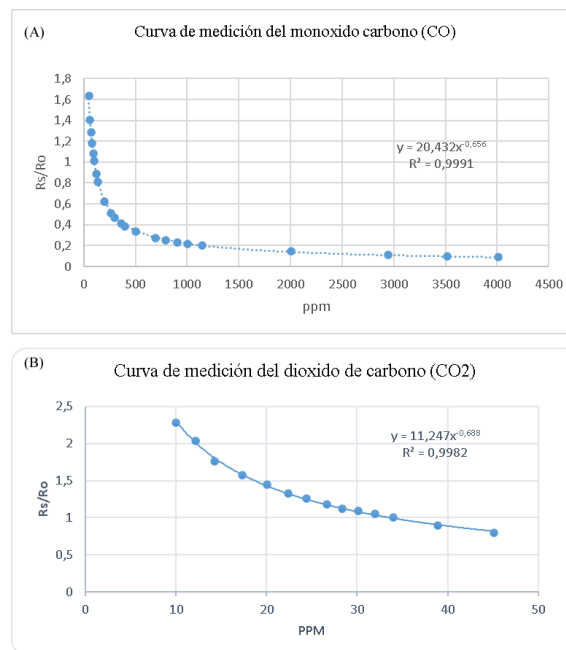
$$R_{s\text{media}} = \frac{\sum_{i=1}^n R_S}{n} \tag{1}$$

$$R_o = \left( \frac{R_S \text{ Media}}{a * PPM^b} \right) \tag{2}$$

$$R_s = \frac{V_c - V_{RL}}{V_{RL}} * R_L \tag{3}$$

Para la calibración de los sensores, se tuvo en cuenta los Datasheets, donde se identificaron las curvas de medición del monóxido y dióxido de carbono. Con la ayuda del software (WebPlotDigitizer 4.3) se logró escalar y obtener los datos para luego ser exportados al software de Excel, posteriormente se graficaron y como se observa en la figura 6 y se ajustó dicha grafica a una función tipo exponencial de la forma  $(y=a * X^b)$  y así obtener los valores correspondientes a y b, dándole paso a la ecuaciones 4 y 5, de la cual se despejó la variable PPM (partes por millón), siendo esta de suma importancia para obtener la lectura de los sensores [8].

Vale destacar que para la calibración del sensor MQ135, es necesario tener un valor de referencia del gas que se desea medir, para este caso  $CO_2$ , con un valor de 423 PPM, valor promedio generado en la tierra el día 13 de octubre de 2022 [9]. Por otro lado, el sensor de temperatura DTH11, no necesita una calibración previa debido a que funciona mediante una librería y para obtener esta lectura se hizo mediante funciones específicas de esta.



**Figura 6.** Grafica de calibración de los sensores (A) MQ7 para CO y (B) MQ135 para CO2. Fuente autor

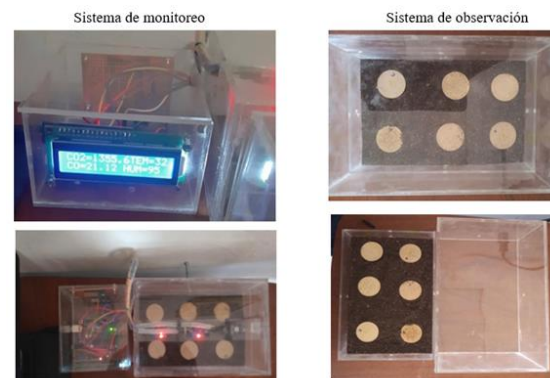
$$\frac{R_s}{R_o} = a * (PPM)^b \tag{4}$$

$$R_o = \left( \frac{R_S \text{ Media}}{a * ppm\_CO2^{now}^b} \right) \tag{5}$$

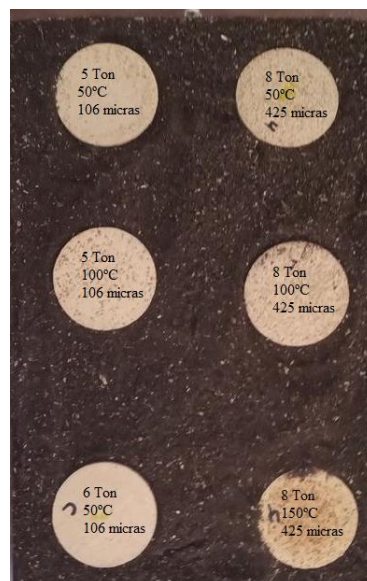
### 3.3. Evaluación cualitativa de la biodegradabilidad del material.

Es conocido, que durante un proceso de descomposición se presenta una conversión de nutrientes orgánicos a inorgánicos disponibles en la vegetación y/u otros materiales orgánicos, esto es un proceso natural de mineralización. Por otro lado, el composteo se define como la transformación biooxidativa de un material orgánico[10].

Para determinar la biodegradabilidad de un material de forma cualitativa, es importante tener en cuenta que el desprendimiento de carbono por parte de material de estudio es convertido en dióxido de carbono por la actividad microbiana del inoculo. La medición de CO<sub>2</sub> y CO en este ensayo se da en partes por millón (PPM). En la figura 7, se evidencia el sistema acondicionado para la medición de los gases y la temperatura. Cabe mencionar que se usaron dos sistemas en paralelo, uno con monitoreo de las variables (gases y temperatura) y otro sin monitoreo, para evidencias fotográficas. Se analizó el comportamiento de 8 muestras con características diferentes; como el tamaño de partícula de 425 y 106µm, presión de conformado de 5 Ton y 8 Ton fuerza y tratamientos térmicos de 50°, 100°, 150°C; el posicionamiento de las pastillas en la cámara de monitoreo se muestra en la figura 8.

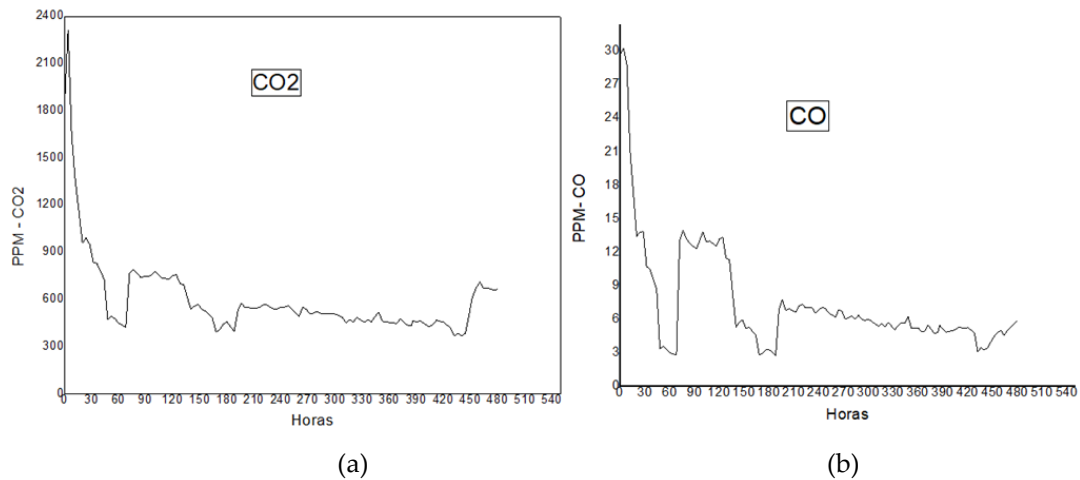


**Figura 7.** Sistemas de monitoreo de PPM CO<sub>2</sub> - CO y sistema de observación de biodegradabilidad. Fuente autor

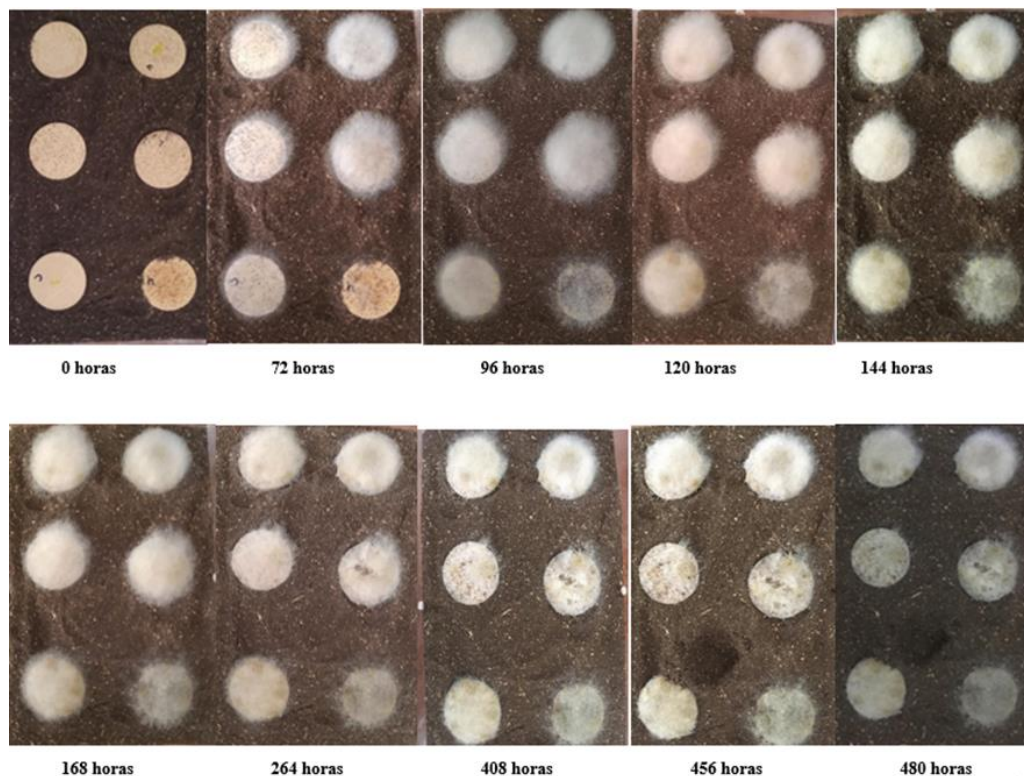


**Figura 8.** Posicionamiento de las pastillas para el inicio del control de biodegradabilidad. Fuente autor.

En la figura 9a se muestra el gráfico de CO<sub>2</sub> con respecto al tiempo de monitoreo, donde representa el desprendimiento del dióxido de carbono CO la figura 9b, parámetro que indica que un proceso de biodegradación está en marcha [11]. Durante el proceso de monitoreo del CO<sub>2</sub> se observó variación en los valores, mostrando que en las primeras 4 horas hay un desprendimiento de 2314.8 PPM de CO<sub>2</sub>, que se le atribuye al material que sirve como inoculo (tierra + abono) y a las 6 pastillas del material conformado. Estos materiales en conjunto aportan gran cantidad de dióxido de carbono en esta primera fase, a esto se le conoce como efecto priming, que como relatado en la literatura es dado por el cambio de la fisiología de la comunidad microbiana a corto plazo en la producción de CO<sub>2</sub> [11].



**Figura 9.** Emisión de PPM de CO<sub>2</sub> (a) y Emisión de CO durante el ensayo de biodegradación(b). Fuente autor



**Figura 8.** Proceso de evolución del hongo en el proceso de biodegradación. Fuente autor

Transcurridas 60 horas del ensayo se presentó un descenso hasta 424,18 PPM de CO<sub>2</sub>; decrecimiento atribuible a que sobre las pastillas se evidenció una mínima aparición del

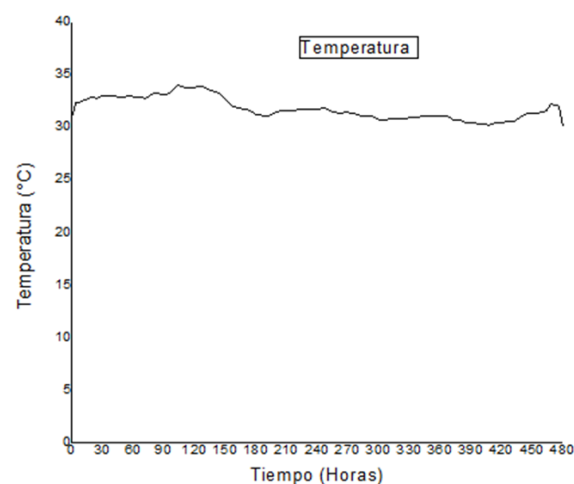


hongo en la parte superior; a las 72 horas como se muestra en la figura 10 todas las pastillas tienen presencia de hongo, con la diferencia que las conformadas con un tamaño de  $425\mu\text{m}$  y una presión de 8Ton presentaron un mayor crecimiento del hongo, lo que se le atribuye a la porosidad y a los tratamientos térmicos  $50^\circ$ ,  $100^\circ\text{C}$  donde las pastillas no eliminaron toda la humedad a diferencia de la pastilla con el tratamiento térmico de  $150^\circ\text{C}$ , pues esta se evidenció un mínimo crecimiento del hongo hasta el momento; permitiendo deducir que a mayor tratamiento de temperatura el ataque de microorganismos es más lenta. Por otra parte, las pastillas de tamaño de particulado de  $106\mu\text{m}$  exhibieron una aparición menor del hongo, atribuida al empaquetamiento de los gránulos.

Pasadas 76 horas las PPM de  $\text{CO}_2$  aumentan hasta llegar al valor de 790,06. Posteriormente en 96 horas el hongo tuvo una tonalidad gris y la emisión de  $\text{CO}_2$  se mantuvo casi estable hasta las 120 horas con un valor que variaron desde 731,01 hasta 752,11 PPM, pero a diferencia que el hongo presentó una tonalidad más clara, a partir de ahí se notó que la intensidad del hongo aumenta visualmente, siendo este más blanco como se observa en la figura 54 (144 horas). Siguiendo el ensayo de monitoreo de emisión de  $\text{CO}_2$  en el proceso de biodegradación se evidenció que en 148 horas hubo una merma de 570,21 PPM de  $\text{CO}_2$ , conservando la tonalidad del hongo. Posteriormente en 188 horas la emanación de PPM fue de 395,48 PPM de  $\text{CO}_2$ , aumentando hasta llegar a 200 horas con un valor de 547,92 PPM. De ahí la emisión de  $\text{CO}_2$  presentó una variación mínima, hasta llegar a las 420 horas con una emisión de  $\text{CO}_2$  de 457,81 PPM.

En la figura 6b se observa que la emisión del monóxido de carbono CO en el ensayo de biodegradación del material compuesto a base de totumo, presentó un comportamiento similar a la del dióxido de carbono; por lo que sus variaciones se atribuyeron al contacto inicial del material y el inóculo, así como al surgimiento del hongo en la superficie de las muestras en las primeras 180 horas de monitoreo. La subsecuente estabilidad podría asociarse al crecimiento del hongo y/o a la composición del material compuesto que sirve como inóculo.

En la figura 11, se observa la variación de la temperatura la cual está en los rangos promedios del lugar donde se realizó el ensayo (El Bordo cabecera municipal del municipio del Patía Cauca,) con un promedio de la temperatura ambiente de  $32^\circ\text{C}$  y la temperatura promedio en la cámara de biodegradación fue de  $31,8$  grados. En este sentido cabe resaltar que el pequeño decrecimiento de temperatura alrededor de 150 – 180 puede estar relacionado con la aparición del hongo sobre la superficie de las muestras.



**Figura 11.** Seguimiento de temperatura en el ensayo de biodegradación. Fuente autor.

Vale destacar que según[12], el epicarpio de la Crescentina cujete (totumo) es rico en celulosa semicristalina. Por otro lado, la celulosa es un material con una velocidad de degradación lenta comparado a otros materiales poliméricos, esto se debe a tener una estructura cristalina y poseer enlaces  $\beta$ -glucosídicos, esto puede hacer menos accesibles a la acción de los microorganismos dificultando su degradación[13]. Además, la cristalinidad es importante en la biodegradación de un material, el cual cuando es sometido a un proceso de biodegradabilidad por medio de enzimas; estas atacan más la parte amorfa "estructura débil" en comparación con la parte cristalina "estructura fuerte" [13]. El material compuesto a base de totumo se cataloga también como un material semicristalino lo que hace que su biodegradación sea más lenta necesitando mayores intervalos de tiempos.

Así, dado el intervalo de tiempo del estudio de biodegradación, se puede considerar que la velocidad de degradación se encuentra dentro de los intervalos iniciales conocidos de otros residuos lignocelulósicos no maderables, tales como, maíz (3-6 meses)[14], caña de azúcar (2-6 meses) [15], banano (1-2 meses)[16], café (6-12 meses)[17].

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado un sistema casero automatizado para la evaluación cualitativa de la biodegradabilidad de residuos poliméricos agroindustriales, utilizando como material de estudio el totumo (*Crescentia cujete*). El sistema consistió de una cámara con monitoreo de gases ( $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$ ) y temperatura. Los sensores fueron calibrados previamente para asegurar la precisión de las mediciones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$ , que son indicadores de la actividad microbiana y la producción de biogás.

Se registró la emisión de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$  durante 20 días, y se relacionó con el crecimiento de hongos en la superficie de las pastillas de totumo. Se determinó que el totumo tiene una razonable biodegradabilidad, con una emisión pico de  $\text{CO}_2$  de 790.06 PPM a las 76 horas. Se notó que el color del hongo cambiaba de gris a blanco a lo largo del tiempo, indicando una mayor actividad microbiana. Se evidenció que el tamaño de partícula y los tratamientos térmicos afectaban la biodegradabilidad del material, siendo más favorable un tamaño menor y una temperatura mayor.

El totumo al tener un alto contenido de celulosa semicristalina, dificulta la degradación por los microorganismos debido a la menor accesibilidad de los enlaces  $\beta$ -glucosídicos y la mayor resistencia de la parte cristalina. Sin embargo, en base a la literatura se estimó que el totumo tiene una velocidad de degradación similar a otros residuos lignocelulósicos no maderables, como el maíz, la caña de azúcar, el banano y el café.

Estos resultados indican que el totumo es un material con potencial para ser degradado por microorganismos, y que podría ser utilizado como una alternativa para la producción de polímeros biodegradables, producción de biogás contribuyendo a la gestión de los residuos agroindustriales

**Contribuciones de autor:** Conceptualización, R. Sánchez, Y. Castillo y J.A. Muñoz; metodología, R. Sánchez, Y. Castillo; software, R. Sánchez, Y. Castillo; validación, R. Sánchez, Y. Castillo; análisis formal, R. Sánchez, Y. Castillo y J.A. Muñoz; investigación, R. Sánchez, Y. Castillo; redacción — preparación del borrador original, R. Sánchez, Y. Castillo; redacción: revisión y edición, J.A. Muñoz; supervisión, J.A. Muñoz;

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito

**Agradecimientos:** El joven investigador Raúl Fernando Sánchez Aguilar y su tutor Javier Andrés Muñoz Chaves de la Corporación Universitaria ComfacaUCA UnicomfacaUCA, agradecen al proyecto de Jóvenes Investigadores e Innovadores en el Departamento del Cauca.

**Conflictos de interés:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## Referencias

- [1] M. L. Segatto, A. M. Stahl, K. Zanotti, and V. G. Zuin, "Green and sustainable extraction of proteins from agro-industrial waste: An overview and a closer look to Latin America," *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 37, p. 100661, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.cogsc.2022.100661.
- [2] S. Bala et al., "Transformation of Agro-Waste into Value-Added Bioproducts and Bioactive Compounds: Micro/Nano Formulations and Application in the Agri-Food-Pharma Sector," *Bioengineering*, vol. 10, no. 2, p. 152, Jan. 2023, doi: 10.3390/bioengineering10020152.
- [3] A. R. G. de Azevedo et al., "Possibilities for the application of agro-industrial wastes in cementitious materials: A brief review of the Brazilian perspective," *Clean. Mater.*, vol. 3, no. October 2021, p. 100040, 2022, doi: 10.1016/j.clema.2021.100040.
- [4] A. Samir, F. H. Ashour, A. A. A. Hakim, and M. Bassyouni, "Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications," *npj Mater. Degrad.*, vol. 6, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41529-022-00277-7.
- [5] O. Utria, P. Meza Castellar, and L. Bossa, "Evaluación de pulpa de totumo (*Crescentia cujete* L), matarratón (*Gliricidia sepium*) y sal (Cloruro de sodio) en la formulación de un ensilaje para el incremento del contenido protéico como alternativa en alimentación bovina," *Rev. Ing-Nova*, vol. 2, no. 1, pp. 34–42, Jan. 2023, doi: 10.32997/rin-2023-4261.
- [6] A. Blasi, A. Verardi, C. G. Lopresto, S. Siciliano, and P. Sangiorgio, "Lignocellulosic Agricultural Waste Valorization to Obtain Valuable Products: An Overview," *Recycling*, vol. 8, no. 4, pp. 1–46, 2023, doi: 10.3390/recycling8040061.
- [7] C. I. Riofrio Álvarez, C. M. Oviedo Navarrete, and D. M. Navarro Cedeño, "Importancia De Productos Biodegradables En Ecuador," *Rev. Obs. la Econ. Latinoam.*, pp. 1–9, 2019, [Online]. Available: <https://www.eumed.net/rev/oel/2019/06/productos-biodegradables-ecuador.html>
- [8] D. . Millán, F. "Diseño e implementación de un sistema de medida de gases con Arduino," *Escuela Universitaria Politécnica de Terue*, 2016. [Online]. Available: <https://zaguan.unizar.es/record/59102/files/TAZ-TFG-2016-2689.pdf>
- [9] N. S. of Climate, "CO2. earth." <https://www.co2.earth/> (accessed Oct. 15, 2022).
- [10] P. L. Guerrero-Ortiz, R. Quintero-Lizaola, V. Espinoza-Hernández, G. S. Benedicto-Valdés, and M. de J. Sánchez-Colín, "Respiración de CO2 como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de *Lupinus*," *Terra Latinoam.*, vol. 30, no. 4, pp. 355–362, 2012.
- [11] M. Peinado, "Estudio de la biodegradabilidad y desintegración de películas a base de almidón y PVA que incorporan diferentes sustancias antimicrobianas," *Univ. Politecnica de Valencia*, 2015.
- [12] J. E. Espitia, H. del R. Duran, J. Fandiño, F. Díaz, and H. A. Gómez, "Química y biología del extracto etanólico del epicarpio de *Crescentia cujete* L. (totumo)," *Rev. Cuba. Plantas Med.*, vol. 16, no. 4, pp. 337–346, 2011.
- [13] H. Portilla, "H. Amilicar, Evaluación de porcentaje de biodegradación aerobia de dos materiales de empaques laborados a partir de almidon y harina de yuca," *UNIVERSIDAD DEL CAUCA*, 2019. [Online]. Available: [http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1464/EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE BIODERADACIÓN AEROBIA DE DOS MATERIALES DE EMPAQUE ELABORADOS A PARTIR DE ALMIDÓN Y HARINA DE YUCA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1464/EVALUACIÓN%20DEL%20PORCENTAJE%20DE%20BIODEGRADACIÓN%20AEROBIA%20DE%20DOS%20MATERIALES%20DE%20EMPAQUE%20ELABORADOS%20A%20PARTIR%20DE%20ALMIDÓN%20Y%20HARINA%20DE%20YUCA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [14] D. Araújo, M. C. R. Castro, A. Figueiredo, M. Vilarinho, and A. Machado, "Green synthesis of cellulose acetate from corncob: Physicochemical properties and assessment of environmental impacts," *J. Clean. Prod.*, vol. 260, p. 120865, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120865.
- [15] R. V. Prabhavathi. N, "Effect of sugar industry solid waste pressmud and bio compost on soil physical and chemical properties at different intervals during finger millet crop," *J. Pharmacogn. Phytochem. Press.*, vol. 8, no. 3, pp. 3038–3042, 2019.
- [16] S. N. Shafawati and S. Siddiquee, "Composting of oil palm fibres and *Trichoderma* spp. As the biological control agent: A review," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 85, pp. 243–253, 2013, doi: 10.1016/j.ibiod.2013.08.005.
- [17] A. S. C. de Bomfim et al., "Spent Coffee Grounds Characterization and Reuse in Composting and Soil Amendment," *Waste*, vol. 1, no. 1, pp. 2–20, 2022, doi: 10.3390/waste1010002.