

<https://doi.org/10.23913/ride.v14i28.1910>

Artículos científicos

Evaluación de propiedades fisicoquímicas de composta como producto de un dispositivo inteligente de degradación biológica
Evaluation of physicochemical properties of compost as a product of an intelligent device for biological degradation
Avaliação das propriedades físico-químicas do composto como produto de um dispositivo inteligente de degradação biológica

García Dávila Jorge

Universidad Politécnica de Tlaxcala. A. Universidad Politécnica, No.1, México

jorge.garcia@uptlax.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-8013-4177>

Santacruz Juárez Ericka

Universidad Politécnica de Tlaxcala. A. Universidad Politécnica, No.1, México

ericka.santacruz@uptlax.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-1090-1879>

Sánchez Minutti Lilia

Universidad Politécnica de Tlaxcala. A. Universidad Politécnica, No.1, México

lilia.sanchez@uptlax.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4739-5196>

Ortega Sánchez Eric

Instituto Tecnológico de Tepic, Division de estudios de posgrado, México

biotecnocios@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9283-0778>

Dinorín Tellez Girón Jabel

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería, México

jabeldtg77@yahoo.com.mx

<https://orcid.org/0000-0001-5805-531X>

Resumen

Uno de los desafíos que debe enfrentar la sociedad actual tiene que ver con la acumulación, gestión, tratamiento y disposición final de desechos orgánicos e inorgánicos. Por eso, en el panorama contemporáneo se requiere de la implementación de técnicas destinadas a mitigar esta problemática con el fin de promover la mejora del entorno ambiental. En cuanto al tratamiento de residuos de origen orgánico, se pueden mencionar estrategias como el proceso de compostaje, un método que propicia la transformación de la materia orgánica mediante la descomposición aeróbica, lo cual genera un producto final estabilizado. Este producto, al ser integrado al suelo, enriquece sus propiedades físicas y químicas, las cuales pueden haberse visto mermadas debido a actividades agrícolas. Explicado lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar la calidad de los productos resultantes del compostaje (composta y lixiviados) obtenidos en el seno de un prototipo de compostero, el cual se nutre de desechos orgánicos provenientes de la cocina, así como de componentes orgánicos ligeros. Además, se vale de un coadyuvante microbiano y procesos mecánicos para reducir el tiempo de compostaje hasta en 600 % en comparación con los métodos convencionales, sin menoscabo de la calidad del producto final, según los parámetros de calidad vigentes. En conclusión, los resultados evidencian que el abono orgánico obtenido mediante este procedimiento presenta una humedad del 73 %, ligeramente superior a la estipulada, y carece de una concentración elevada de metales pesados que supere los límites permitidos. Además, se confirma que la relación C/N alcanza un valor de 6.5, lo cual lo convierte en un aditivo orgánico idóneo para mejorar las condiciones de los suelos agrícolas.

Palabras clave: composta, compostero *smart*, indicadores de calidad, parámetros bioquímicos.

Abstract

One of the problems of human activity is the continuous accumulation of garbage, both inorganic and organic, its management, treatment and final disposal. Currently is possible to implement techniques to reduce them and promote the environment improvement. One of these processes is the treatment of organic waste through the composting process, which is a method that transforms organic matter via aerobic decomposition, to gives a stable product, which adds nutrients to the soil, improving its physical and chemical properties that have been attenuated by agricultural activities.



The present work evaluates the quality of the final composting products (compost and leachates) generated within a prototype composter from organic kitchen waste and organically light components that, supported by a microbial accelerator and mechanical processes, reduce the process time by 600% compared to conventional processes with a similar product quality according to existing quality parameters.

The results show that the organic fertilizer has a humidity of 73% slightly higher than established, does not present a high concentration of toxic heavy metals that are below the permissible limit and a C/N ratio of 6.5 that is adequate to be used as an additive. organic soil improver.

Key words: Compost, *smart* compost bin, quality indicators, biochemical parameters.

Resumo

Um dos desafios que a sociedade atual deve enfrentar tem a ver com a acumulação, gestão, tratamento e eliminação final de resíduos orgânicos e inorgânicos. Portanto, no panorama contemporâneo, é necessária a implementação de técnicas que visem a mitigação deste problema, a fim de promover a melhoria do ambiente ambiental. Em relação ao tratamento de resíduos de origem orgânica, podem ser citadas estratégias como o processo de compostagem, método que promove a transformação da matéria orgânica por meio da decomposição aeróbica, que gera um produto final estabilizado. Este produto, quando integrado ao solo, enriquece suas propriedades físicas e químicas, que podem ter sido diminuídas devido às atividades agrícolas. Posto o exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade dos produtos resultantes da compostagem (composto e chorume) obtidos dentro de um protótipo de composter, que é nutrido por resíduos orgânicos provenientes da cozinha, bem como componentes orgânicos leves. Além disso, utiliza adjuvante microbiano e processos mecânicos para reduzir o tempo de compostagem em até 600% em relação aos métodos convencionais, sem comprometer a qualidade do produto final, de acordo com os parâmetros de qualidade vigentes. Concluindo, os resultados mostram que o fertilizante orgânico obtido através deste procedimento apresenta umidade de 73%, um pouco superior ao estipulado, e carece de alta concentração de metais pesados que ultrapasse os limites permitidos. Além disso, confirma-se que a relação C/N atinge um valor de 6,5, o que o torna um aditivo orgânico ideal para melhorar as condições dos solos agrícolas.

Palabras-chave: composto, compostor inteligente, indicadores de calidad, parâmetros bioquímicos.

Fecha Recepción: Octubre 2023

Fecha Aceptación: Abril 2024

Introducción

El compostaje es un proceso que emplea la degradación microbiana para transformar la materia orgánica en abono orgánico (Riera *et al.*, 2014). Para ello, se necesita que los residuos de origen orgánico se combinen de manera tal que la relación carbono/nitrógeno (C/N) no exceda las 20 unidades, pues de esa manera se puede mantener un nivel de humedad en el producto final que oscile entre el 40 % y el 60 %, lo cual asegura una adecuada oxigenación para sustentar la actividad microbiana. En otras palabras, gracias a la acción de los microorganismos presentes en dichos desechos, surge un producto final conocido como *humus*, el cual está constituido por ácidos fúlvicos, fulvatos, húmicos, humatos y huminas, nutrientes esenciales para enriquecer y promover la fertilidad del suelo (Acosta *et al.*, 2012; Vargas Pineda *et al.*, 2019).

En efecto, la composta, como producto resultante del compostaje, contribuye a mejorar las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo gracias a su contenido de materia orgánica y elementos fertilizantes de liberación lenta, tales como fósforo, nitrógeno, calcio y magnesio, entre otros (Barbaro *et al.*, 2019). Este material puede sustituir a los abonos comerciales y orgánicos siempre y cuando cumpla con los estándares de calidad requeridos por la legislación vigente (Blasco Hedro, 2013). Para ello, es esencial que la composta contenga proteínas, nutrientes y minerales, de manera que al ser incorporada al suelo, contribuya a restablecer sus propiedades fisicoquímicas (Nieto, 2002).

Esta alternativa sustentable no solo reduce la dependencia de agroquímicos y disminuye la exposición a agentes tóxicos, sino que también previene la erosión y la pérdida de actividad biológica en los suelos (Ramírez *et al.*, 2014). Sin embargo, cabe resaltar que los nutrientes presentes en la composta no se conservan de manera inherente, por lo que resulta imperativo ejercer un control adecuado tanto sobre el proceso de compostaje como sobre el producto final para garantizar su calidad (Bueno Márquez *et al.*, 2008).

Para eso, los dispositivos desarrollados actualmente permiten un mayor grado de supervisión y control sobre el proceso de compostaje, lo que conlleva a una mejora significativa en la calidad de la composta obtenida.

No obstante, investigaciones han revelado que la aplicación de composta inmadura puede incidir directamente en el transporte de nitrógeno en el suelo, lo cual puede tener efectos inhibitorios sobre el crecimiento de los cultivos y la aparición de fitotoxicidad.

Aunado a lo anterior, cabe resaltar que la humedad constituye otro parámetro crítico durante el proceso de compostaje. Es decir, valores iniciales inferiores al rango de 35-40 % pueden suprimir la actividad microbiana, obstaculizar etapas posteriores del proceso e incluso comprometerla en su totalidad. Además, una humedad superior al 65 % puede interrumpir el transporte de gases y oxígeno, reducir la actividad microbiana y proporcionar la formación de una atmósfera anaeróbica, lo que trae como consecuencia la generación de olores desagradables y una notable disminución en el rendimiento del proceso (Delgado-Arroyo *et al.*, 2019).

Igualmente, se ha constatado que la utilización de desechos orgánicos con una relación carbono/nitrógeno (C/N) superior a la establecida puede interferir en el transporte de nitrógeno en el suelo al aplicar el producto y provocar una competencia entre los microorganismos y los cultivos por este nutriente, así como propiciar un aumento de la temperatura en el suelo y un bajo desarrollo de los cultivos. En otras palabras, la escasez de nitrógeno disponible en el suelo conlleva al depósito de ácidos orgánicos de bajo peso molecular y otros metabolitos fitotóxicos para los cultivos (Acosta *et al.*, 2012).

Ahora bien, diversos parámetros han sido establecidos para evaluar la calidad del producto resultante del compostaje, los cuales proporcionan información sobre sus propiedades fisicoquímicas, como el pH, la humedad, la conductividad eléctrica, la materia orgánica total, la relación carbono/nitrógeno (C/N) y la concentración de macro y micronutrientes disponibles, destacando entre ellos el nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y azufre (S). Asimismo, otros estudios se centran en la medición de la fitotoxicidad, determinada a través de la presencia de productos como amonio, fenoles y ácidos grasos volátiles (Mazzarino *et al.*, 2012).

Además, investigaciones previas han indicado la presencia de metales pesados y metaloides, como el arsénico y el boro, en el producto final del compostaje (Oviedo Ocaña *et al.*, 2017). Incluso, es posible encontrar en la composta elementos traza potencialmente tóxicos, como los compuestos orgánicos persistentes (POP) (Mazzarino *et al.*, 2012).

Por otra parte, en cuanto a los parámetros de calidad del producto final, estos dependen en gran medida del material de partida empleado en el proceso de compostaje (Bécares, 2014). Por ejemplo, en Alemania se ha implementado un sistema de clasificación

para la composta orgánica obtenida a partir de residuos sólidos urbanos, que incluye categorías como compost fresco, compost terminado y compost para sustrato. Cada una de estas categorías debe cumplir con la normativa ambiental correspondiente, que incluye análisis para detectar la presencia de patógenos y metales pesados.

Sin embargo, se debe mencionar que a pesar de los avances en la evaluación de la calidad de la composta, aún existen limitaciones en cuanto a la aceleración del proceso de compostaje. Estudios anteriores han documentado tiempos de compostaje prolongados, que oscilan entre 84, 170 y 210 días (Cariello *et al.*, 2007). Estas investigaciones han explorado el uso de consorcios microbianos endógenos como estrategia para generar una bioaumentación y reducir el tiempo necesario para la formación y maduración de la composta.

Otros trabajos, en cambio, han dirigido sus esfuerzos hacia el diseño de equipos para el compostaje de desechos orgánicos. Por ejemplo, Pansari *et al.* (2019) desarrollaron un prototipo que incorpora un monitoreo remoto de temperatura, humedad y concentración de gas metano, junto con sensores encargados de supervisar el proceso aeróbico en disposiciones de pilas de compostaje (Sepúlveda Cisneros *et al.*, 2021).

Por otro lado, Wardhany *et al.* (2019) idearon un sistema de compostaje inteligente que integra un triturador de desechos orgánicos en su parte superior, activado por medio de sensores. Este dispositivo se encarga de homogeneizar y depositar los desechos en un contenedor de fermentación mientras registra parámetros como temperatura, humedad y altura de los desechos dentro de él.

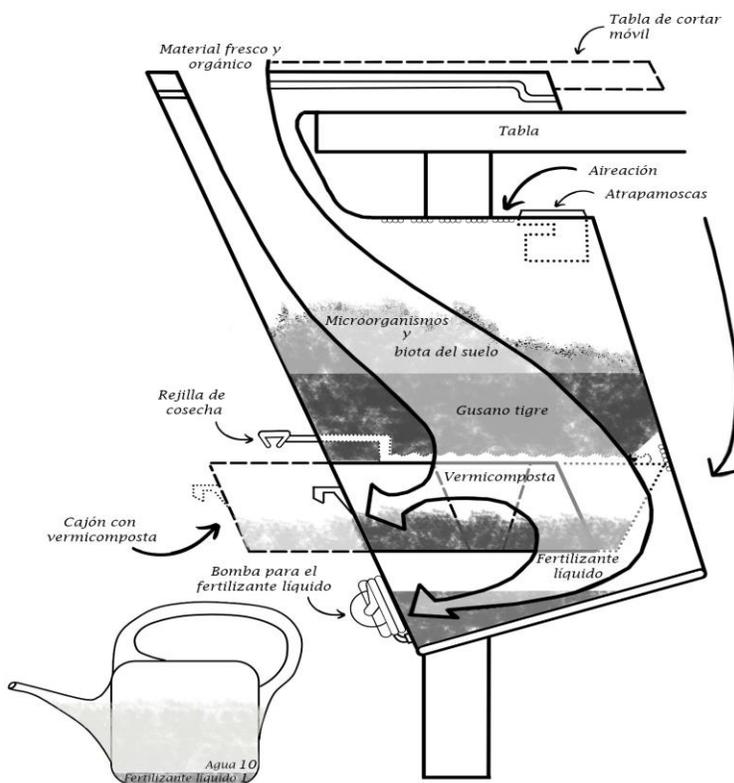
Asimismo, Elalami *et al.* (2019) presentaron un sistema de compostaje rotativo que emplea un sistema de medición y ajuste continuo de parámetros como temperatura, pH, humedad y concentración de amonio. El producto final cumplió con las especificaciones generales, es decir, un aspecto terroso, ausencia de olores desagradables y carencia de microorganismos patógenos. Además, la composta resultante se utilizó como abono orgánico que sustituyó a los fertilizantes agroquímicos comerciales (Gordillo y Chávez, 2010).

Materiales y métodos

Recolección de muestra

Las muestras fueron recolectadas del dispositivo denominado *smart compostero*, el cual constituye un biorreactor de digestión microbiana equipado con una entrada y una salida. En la etapa inicial, se introdujeron desechos orgánicos domésticos a través de la entrada designada. Este dispositivo se caracteriza por disponer de un sistema integral de recolección tanto de lixiviados como de composta resultante del proceso de compostaje. Asimismo, cuenta con dos filtros diseñados para la retención de gases tales como dióxido de carbono (CO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2) y metano (figura 1).

Figura 1. Diseño del prototipo de compostero *smart*



Fuente: Elaboración propia

Los análisis se efectuaron sobre las cosechas de composta en estado sólido y los lixiviados obtenidos del proceso. Para tal fin, se extrajo una muestra aleatoria y representativa de cada uno de estos productos, las cuales fueron recolectadas exactamente 20 días después de haber sido introducidas en el reactor, siguiendo las indicaciones especificadas en el manual de uso del dispositivo. Posteriormente, se almacenaron en frascos estériles y se conservaron a una temperatura no superior a cuatro grados centígrados con el propósito de asegurar su integridad hasta el momento de su posterior análisis.

Pruebas químicas proximales

Determinación de humedad

Se empleó el método de estufa de aire con crisoles para el proceso de secado de las muestras, los cuales fueron sometidos a un peso constante. En cada uno se agregó una cantidad uniforme de muestra para garantizar la consistencia en el análisis.

Para llevar a cabo el secado, se utilizó una estufa de la marca Thermo Scientific Lab Line, la cual fue ajustada a una temperatura específica y operada durante un tiempo determinado. Posteriormente, los crisoles fueron enfriados en un desecador antes de proceder al pesaje. Cabe destacar que cada análisis se realizó por duplicado.

Determinación de proteínas por el método de Microkjeldahl

La técnica empleada se basó en el principio de proporcionalidad. Inicialmente, las muestras sólidas, previamente desprovistas de humedad, fueron sometidas a un proceso de digestión utilizando como catalizador sulfato de potasio y sulfato cúprico. Posteriormente, se añadió ácido sulfúrico concentrado con el propósito de oxidar la materia orgánica presente en las muestras y obtener sulfato de amonio. En una etapa subsiguiente, las muestras fueron sometidas a un proceso de destilación utilizando un equipo de Microkjeldahl. Para la valoración del nitrógeno presente en las muestras, se procedió a la adición de hidróxido de sodio y se utilizó el indicador rojo de metilo como medio de valoración.

Determinación de proteínas en lixiviados

Las muestras líquidas fueron homogeneizadas de manera continua utilizando un agitador vortex. Luego, se aplicó el mismo protocolo empleado para las muestras sólidas en el proceso de determinación del porcentaje de proteína, utilizando el método de Kjeldahl.

Posteriormente, las muestras fueron sometidas a un proceso de precalcificación con el fin de evitar su inflamación. Seguidamente, se introdujeron en una mufla para su incineración, utilizando un equipo FB1315M Thermo Scientific Termolyne. Una vez completado el proceso de incineración, las muestras fueron dejadas enfriar en un desecador antes de proceder a su pesaje.

Lixiviados y sólidos sedimentables

En tubos Eppendorf, se dispuso la muestra de lixiviados y se homogeneizó mediante agitación en un agitador vortex. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a centrifugación utilizando un equipo Hermle Labortechnik Z326K. Luego, se procedió a retirar el sobrenadante de las muestras con el objetivo de determinar los sólidos sedimentables presentes en los lixiviados.

Determinación del potencial de hidrógeno

El análisis se llevó a cabo exclusivamente en las muestras en estado líquido (lixiviados). Para ello, se empleó un equipo pH/ORP HI 2211 de HANNA Instruments. Previamente a la medición, las muestras fueron homogeneizadas utilizando un equipo vortex.

Análisis de metales traza por ICP-MS

Es crucial destacar que ciertos metales pesados encontrados en los lodos residuales no son esenciales para la nutrición vegetal y pueden resultar tóxicos para los seres humanos y animales en concentraciones específicas. Entre estos metales se incluyen el arsénico, cadmio, plomo y mercurio.

Para llevar a cabo el análisis de estas muestras, se utilizó un equipo ICP-MS de la marca Thermo Scientific, específicamente el modelo iCAP Q, junto con el *software* Qtegra para la adquisición de datos.

Cromatografía de gases acoplado a HEADSPACE

El análisis de cromatografía acoplado a masas fue llevado a cabo con el propósito de determinar la concentración de dióxido de carbono (CO₂) y metano, ambos subproductos del proceso de compostaje, como parte integral del control de calidad del *smart* compostero.

Para este fin, se empleó un cromatógrafo de gases de la marca Agilent Technologies, específicamente el modelo 7890, equipado con una columna capilar AGILENT HP-MOLOSIEVE de 30 metros de longitud, con un diámetro interior de 35 micrómetros y un espesor de película de 0.25 µm.

Los parámetros de control del método de análisis comprenden una temperatura del horno inicial de 50 °C mantenida durante cinco minutos, seguida de un incremento de temperatura de 5 °C por minuto hasta alcanzar los 100 °C, temperatura que se mantuvo durante siete minutos.

La curva de calibración se llevó a cabo mediante la inyección de un volumen de 100 microlitros en viales de 20 ml de Headspace a través un proceso de extracción simple. Asimismo, se utilizó un detector FID con una relación de flujo de aire de 400 ml/min y de nitrógeno de 30 ml/min. El gas helio se empleó como gas de arrastre con un flujo total de 4.97 mL/min.

Resultados y discusión

Pruebas químicas proximales

Determinación de humedad

La determinación de la humedad de la composta se centró en la recolección de muestras procedentes de dos lotes del dispositivo de degradación biológica denominado *smart compostero*. Al respecto, cabe destacar que los valores obtenidos fueron promediados para obtener un absoluto, como se muestra en la tabla 1, donde se aprecia una baja variación en los datos recopilados. Esto permite reportar el 73.33 % de humedad de la composta cosechada del dispositivo *smart* compostero.

Tabla 1. Valores obtenidos de la evaluación de humedad en tres muestras de composta cosechada del dispositivo *smart* compostero. En la parte inferior, se encuentra el porcentaje promedio de la presencia de agua en el producto.

Muestra	Peso de charola (g)	Peso de charola con muestra húmeda (g)	Peso de charola con muestra seca (g)	% humedad
M1	1.64	3.71	2.22	72 %
M2	1.63	3.69	2.17	74 %
M3	1.64	3.69	2.17	74 %
Promedio				73 %

Fuente: Elaboración propia

Determinación de proteínas por el método de Microkjeldahl

El análisis de cuantificación de proteína se efectuó en las muestras de materia sólida de composta, lo cual abarcó tres lotes diferentes para este estudio. Por otro lado, en el caso de las muestras líquidas (lixiviados), la prueba solo se realizó en el lote número tres.

Determinación de proteínas en muestras solidas secas

El análisis se llevó a cabo en muestras de composta sólida recolectadas en tres lotes distintos, así como los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2. De acuerdo con los datos recopilados, se observa que los valores del lote número dos muestran un porcentaje de error inferior al 0.06 %. Con base en esta información, se determina que el porcentaje de nitrógeno presente en la materia seca es del 3.623 %.

Tabla 2. Datos obtenidos de la evaluación de porcentaje de nitrógeno y proteína, donde se observa el número de lote y la cantidad gastada de NaOH

Lote	Muestra	Cantidad gastada NaOH (ml)	% N	% P
L1	Blanco	5.3	3.71	23.18
	M1	5.4	3.78	23.62
	M2	4.1	2.87	17.93
L2	Blanco	5.3	3.71	23.18
	M1	5.15	3.60	22.53
	M2	5.2	3.64	22.75
L3	Blanco	5.3	3.71	23.18
	M1	4.25	2.97	18.59
	M2	4.45	3.11	19.46

Fuente: Elaboración propia

Determinación de proteínas en lixiviados

La determinación de los niveles de nitrógeno y proteína fue llevada a cabo exclusivamente en un lote específico, y sus resultados se detallan en la tabla 3. En este caso, se observa que la concentración de nitrógeno en la muestra de composta en estado sólido es de 0.11 %, mientras que la cantidad de proteína alcanza el 0.73 %.

Tabla 3. Porcentaje de nitrógeno y proteína en lixiviados cosechados del dispositivo *smart* compostero; además, se muestra la cantidad de NaOH gastada en la titulación.

Muestra	Cantidad de NaOH (ml)	% N	%P
B	5.3	3.71	23.18
L1	4.2	0.11	0.73
L2	4.1	0.11	0.72
	5		
Promedio		0.11	0.73

Fuente: Elaboración propia

Contenido de cenizas totales

Para la evaluación de materia orgánica, se emplearon dos lotes distintos, mientras que la técnica empleada para determinar las cenizas totales fue la gravimetría. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4 adjunta. En concreto, se registró un promedio de cenizas totales del 39.78 % para el lote uno y del 41.26 % para el lote dos. Con ello, se calculó un porcentaje promedio de 40.52 % de cenizas totales.

Tabla 4. Datos obtenidos de la evaluación de cenizas totales presentes en la composta en estado sólido. Los datos fueron evaluados en dos lotes diferentes (cada uno tiene el promedio obtenido)

	Muestra	Peso crisol (mg)	Peso crisol con muestra (mg)	Peso de crisol con cenizas (mg)	Porcentaje de cenizas (%)	Promedio (%)
lote 1	M1	27.40	27.94	27.57	47.26	39.78
	M2	23.59	24.16	23.78	32.30	
lote 2	M1	27.40	27.90	27.61	41.24	41.26
	M2	26.84	27.34	27.05	41.29	

Fuente: Elaboración propia

Lixiviados y sólidos sedimentables

La determinación de sólidos sedimentables se llevó a cabo en un lote que contenía la cosecha de composta en estado líquido, también conocida como *lixiviados*. El análisis se efectuó mediante el método de diferenciación de peso, y sus resultados se detallan en la tabla 5. De acuerdo con los datos obtenidos, se observa que, en promedio, por cada mililitro de lixiviados se registraron 0.05 mg de sólidos sedimentables.

Tabla 5. Datos obtenidos del análisis de sólidos sedimentables presentes en lixiviados cosechados del dispositivo *smart* compostero

Muestra	Peso eppendorf (mg)	Peso eppendorf con muestra (mg)	Peso eppendorf con sedimento (mg)	Peso residuo (mg)
M1	1.03	1.93	1.09	0.05
M2	0.99	2.00	1.06	0.06
M3	1.03	1.98	1.08	0.05
Promedio				0.05

Fuente: Elaboración propia

Determinación del potencial de hidrógeno (pH)

La evaluación del pH se restringió a muestras en estado líquido, obtenidas de los lixiviados recolectados del dispositivo *smart* compostero. Los resultados de esta evaluación se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Nivel de pH de muestra de lixiviados del dispositivo de degradación biológica (*smart* compostero)

Muestra	pH
M1	8.0
M1R1	8.1
M1R2	8.1
Promedio	8.06

Fuente: Elaboración propia

Análisis por ICP-MS

Los valores del análisis de metales pesados, tales como plomo, cadmio, arsénico y mercurio, se detallan en la tabla 7. Estas evaluaciones fueron realizadas en muestras de composta, las cuales fueron sometidas previamente a un proceso de digestión. Además, se examinaron diez muestras de composta. Al respecto, vale resaltar que en algunas de estas muestras no se detectó la presencia de los mencionados metales. La concentración promedio de plomo (Pb) fue de 0.00084 mg/100 ml, de cadmio (Cd) fue de 0.0002 mg/100 ml, de arsénico (As) fue de 0.0028 mg/100 ml y de mercurio (Hg) fue de 0.0004 mg/ml.

Tabla 7. Cantidad de metales en muestras de composta cosechada del dispositivo *smart* compostero

Muestra	Metal mg/100 mL			
	Pb	Cd	As	Hg
67	0.0000	0.0010	0.0000	0.0000
68	0.0000	0.0010	0.0002	0.0000
69	0.0001	0.0000	0.0002	0.0043
70	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
71	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
72	0.0040	0.0003	0.0000	0.0000
73	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
74	0.0043	0.0000	0.0027	0.0000
75	0.0000	0.0000	0.0230	0.0000
76	0.0000	0.0000	0.0020	0.0000
Promedio	0.00084	0.0002	0.0028	0.0004

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos reflejan que la composta satisface los límites regulatorios establecidos para agentes tóxicos o metales pesados en biosólidos, de acuerdo con las pautas de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, 1996), las cuales establecen concentraciones máximas admisibles para plomo (Pb) de 840 mg/kg, mercurio (Hg) de 57 mg/kg, arsénico (As) de 75 mg/kg y cadmio (Cd) de 85 mg/kg (Mazzarino *et al.*, 2012).

Cromatografía de gases por HEADSPACE

Los datos de la tabla 8 corresponden a la evaluación realizada en muestras de carbón activado presente en las trampas de olores situadas tanto en la parte superior como en la inferior del dispositivo de degradación biológica (*smart* compostero).

Tabla 8. Presencia de gases en muestras de carbón activado

Muestra	CO ₂	Metano
	Carbón granulado libre de humedad	0.225
Carbón activado de parte inferior del compostero	0.151	0.000
Carbón activado de parte superior del compostero	0.102	0.065

Nota: Los resultados son reportados en unidades de partes por millón (ppm).

Fuente: Elaboración propia

La determinación de CO₂ y metano se efectuó mediante el método de HeadSpace, el cual implicó el análisis de muestras de carbón activado. Este material se encarga de capturar los olores generados durante el proceso de compostaje y se encuentra localizado en la parte inferior del dispositivo (tabla 9).

Para el caso del CO₂, se registró una concentración de 0.151 ppm en la trampa de olores ubicada en la parte inferior del dispositivo. Además, no se detectó presencia de metano en esta muestra. En cambio, en la trampa de olores situada en la parte superior del dispositivo, se identificó una concentración de CO₂ de 0.102 ppm y una cantidad de metano de 0.065 ppm.

Tabla 9. Presencia de gases en muestras de lixiviados

Muestra	CO ₂	Metano
	Blanco	0.098
Lixiviado 1	0.128	0.642
Lixiviado 2	0.116	0.094
Lixiviado 3	0.137	0.091
Promedio	0.127	0.276

Nota: Los resultados son reportados en unidades de partes por millón (ppm).

Fuente: Elaboración propia

Con base en los datos anteriores, se puede indicar un incremento en la concentración de CO₂, ya que se registra un promedio de 0.127 ppm. Por otro lado, se determina una concentración de metano de 0.276 ppm en muestras de lixiviados, lo cual completa el análisis de los gases generados. Finalmente, el conjunto de parámetros evaluados se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Valores finales del análisis de productos y subproductos del dispositivo de degradación biológica (*smart* compostero)

Parámetro	Cantidad reportada
Porcentaje de humedad (%)	73
Materia orgánica (%)	40.5
Carbono orgánico (%)	23.6
Nitrógeno (%)	3.6
Relación C/N	6.5:1
Pb (ppm)	0.84
Cd (ppm)	0.2
As (ppm)	2.8
Hg (ppm)	0.4
Aire (ppm)	0.045
Metano (ppm)	0.065
CO ₂ (ppm) trampa superior	0.102
CO ₂ (ppm) trampa inferior	0.151
Aire (ppm) lixiviados	0.065
Metano (ppm) lixiviados	0.276

Fuente: Elaboración propia

Discusión

Los datos obtenidos en este trabajo demuestran que la composta presenta un contenido de humedad del 73 %, lo cual no concuerda con lo reportado por Delgado Arroyo *et al.* (2019), quienes señalan que dicha cifra no debe exceder el 60 %.

Por otro lado, se demuestra que la composta cumple con los límites permitidos de agentes tóxicos o metales pesados en biosólidos, de acuerdo con las reglas de la USEPA (1993), donde se establecen concentraciones máximas para plomo (Pb) de 840 mg/kg, mercurio (Hg) de 57 mg/kg, arsénico (As) de 75 mg/kg, y cadmio (Cd) de 85 mg/kg (Mazzarino *et al.*, 2012).

Asimismo, la relación carbono-nitrógeno (C/N) se encuentra dentro de los límites aceptables, con un valor de 6.5, de modo que cumple con los estándares de valores menores a 20. Además, los niveles de materia orgánica superan el límite inferior del 25 %, es decir, cumple adecuadamente este parámetro de calidad (Delgado Arroyo *et al.*, 2019).

En cuanto al porcentaje de nitrógeno al final del proceso, se sitúa en 3.6 %, lo cual supera el límite permitido del uno por ciento establecido en el RD 506/2013 (Blasco Hedro, 2013). Finalmente, se constata que la presencia de metales tóxicos no sobrepasa los límites permitidos establecidos por la USEPA (1993) para productos biosólidos.

Conclusiones

Los productos resultantes del proceso llevado a cabo mediante el *smart* compostero han sido probados y se ha confirmado que cumplen con la normativa vigente. Por lo tanto, pueden ser utilizados como aditivos mejoradores de suelo para aplicaciones agrícolas o forestales. Asimismo, es importante destacar que mientras que los tratamientos tradicionales suelen requerir tiempos de compostaje de hasta 210 días para alcanzar la calidad adecuada del compost, este proyecto ha logrado conseguir un producto de calidad comparable en tan solo 20 días de tratamiento, lo cual ha sido posible gracias a la aplicación del superacelerador microbiano.

Futuras líneas de investigación

Gracias a la ayuda de un acelerador microbiano, el diseño del compostero *smart* asegura la producción de composta de calidad, equiparable a la de productos comerciales. Este desarrollo promueve la exploración de nuevas perspectivas de estudio relacionadas con la longevidad del acelerador microbiano y la determinación de las dosis apropiadas de acelerador y agua por carga de materia orgánica residual. Estas investigaciones son fundamentales para mantener la calidad constante del producto y, eventualmente, para considerar la comercialización del compostero *Smart*.

Referencias

- Acosta, Y., El Zauahre, M., Rodríguez, L., Reyes, N. y Rojas, D. (2012). Indicadores de calidad bioquímica y estabilidad de la materia orgánica durante el proceso de compostaje de residuos orgánicos. *Multiciencias*, 12(4), 390-399.
- Barbaro, L., Karlanian, M., Rizzo, P. y Riera, N. (2019). Caracterización de diferentes compost para su uso como componente de sustratos *Chilean J. Agric. Anim. Sci., Ex Agro.Ciencia*, 35(2), 126-136.
- Bécares, E. (2014). La biotecnología ambiental, ¿la cenicienta de la biotecnología? *AmbioCiencias*, (12), 81-94.
- Blasco Hedo, E. Real Decreto BOE (506/2013). Sobre productos fertilizantes. *Boletín Oficial del Estado*. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/06/28/506>
- Bueno Márquez, P., Díaz Blanco, M. J. y Cabrera Capitán, F. (2008). *Factores que afectan al proceso de compostaje*. Ediciones Compostaje Mundi-Prensa México.
- Cariello, M. E., Castañeda, L., Riobo, I. y González, J. (2007). Inoculante de microorganismos endógenos para acelerar el proceso compostaje de residuos sólidos urbanos. *J. Soil Sc. Plant Nutr.*, 7(3), 26-37.
- Delgado Arroyo, M. M., Mendoza López, K. L., González, M. I., Lluch, J. L. y Martín Sánchez, J. V. (2019). Evaluación del proceso de compostaje de residuos avícolas empleando diferentes mezclas de sustratos. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 35(4), 965-977.
- Elalami, M., Baskoun, Y., Zahra Beraich, F., Arouch, M., Taouzari, M. and Qanadli, S. D. (2019). *Design and Test of the Smart Composter Controlled by Sensors* (ponencia). 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC).
- Gordillo, F. y Chávez, E. (2010). *Evaluación comparativa de la calidad del compost producido a partir de diferentes combinaciones de desechos agroindustriales azucareros* (trabajo de grado) Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/31487>
- Mazzarino, M. J., Satti, P. y Roselli, L. (2012). *Indicadores de estabilidad, madurez y calidad de compost. Compostaje en la Argentina: experiencias de producción, calidad y uso*. UNRN- Orientación Gráfica Editora.
- Nieto, A. (2002). El uso de compostas como alternativa ecológica para la producción sostenible del chile (*Capsicum annuum L.*) en zonas áridas. *Interciencia*, 27(8), 417-421.

- Oviedo Ocaña, E. R., Marmolejo Rebellon, L. F. y Torres Lozada, P. (2017). Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. *Lecciones desde Colombia. Ingeniería Investigación y Tecnología*, 18(1), 31-42.
- Pansari, N. B., Deosarkar, S. B. and Nandgaonkar, A. B. (2018). *Smart Compost System*. (ponencia). Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Computing and Control Systems. https://www.researchgate.net/publication/331682172_Smart_Compost_System
- Ramírez, F., Fournier, M. L., Ruepert, C. e Hidalgo, C. (2014). Uso de agroquímicos en el cultivo de papa en Pacayas, Cartago, Costa Rica. *Agron. Mesoam.*, 25(2), 337-345.
- Riera, N. I., Della Torre, V., Rizzo, P. F., Butti, M., Bressan, F. M., Zarate, N., Weigandt, C. y Crespo, D. E.C. (2014). Evaluación del proceso de compostaje de dos mezclas de residuos avícolas. *Rev. FCA Uncuyo.*, 46(1), 195-203.
- Sepúlveda Cisneros, O., Acevedo Juárez, B., Saldaña Durán, C. E., Castro, W., De la Torre, M. y Ávila George, H. (2021). Desarrollo de un sistema embebido para un compostero doméstico inteligente. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informacao*, 41, 112-129.
- USEPA (1996) Soil screening guidance: technical background document. EPA/540/ R-95/128. Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, p A-5.
- Vargas Pineda, O. I., Trujillo González, J. M. y Torres Mora, M. A. (2019). El compostaje, una alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos en las centrales de abastecimiento. *Orinoquia*, 23(2), 123-129.
- Wardhany, V. A., Hidayat, A., A., M. D. S., Subono, Afandi, A., Muhammad Doni Sururin, A. and Afandi, A. (2019). *Smart Chopper and Monitoring System for Composting Garbage* (ponencia). 2nd International Conference of Computer and Informatics Engineering (IC₂IE).

Rol de Contribución	Autor (es)
Conceptualización	Garcia-Dávila Jorge «principal»
Metodología	Sánchez-Minutti Lilia «igual» Dinorín Tellez-Girón Jabel
Software	N/A.
Validación	Ortega-Sánchez Eric «que apoya».
Análisis Formal	Garcia-Dávila Jorge «principal»,
Investigación	Dinorín Tellez-Girón Jabel «igual»
Recursos	Santacruz-Juárez Ericka «que apoya».
Curación de datos	Santacruz-Juárez Ericka «que apoya».
Escritura - Preparación del borrador original	Garcia-Dávila Jorge «principal»
Escritura - Revisión y edición	Garcia-Dávila Jorge «principal» Igual Sánchez-Minutti Lilia «que apoya».
Visualización	Garcia-Dávila Jorge «principal»
Supervisión	Ortega-Sánchez Eric «que apoya».
Administración de Proyectos	Dinorín Tellez-Girón Jabel «que apoya».
Adquisición de fondos	Garcia-Dávila Jorge «principal»