



COMPOSICIÓN ELEMENTAL Y DE METALES PESADOS EN LOS RESIDUOS DE PALMA EN LA AMAZONIA PERUANA †

[ELEMENTAL COMPOSITION AND HEAVY METAL IN PALM RESIDUES IN THE PERUVIAN AMAZON]

Angel Kelsen Arbaiza-Peña¹, Grober Panduro-Pisco^{1,2},
Edgar Juan Díaz-Zúñiga¹, Noé Klever Guadalupe-Baylon¹,
Norberto Angulo-García³ and José Iannacone^{4,5,6*}

¹ Universidad Nacional de Ucayali, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Carretera Federico Basadre km. 6.200-Pucallpa-Perú, Email: arbaipe27@gmail.com, grober_panduro@unu.edu.pe, edgar_diaz@unu.edu.pe, iagubanok@gmail.com

² Negocios Amazónicos Sustentables EIRL, Av. Pachacútec Mz. 06, Lote 17, Manantay, Pucallpa-Perú. Email: ecologrober2012@hotmail.com

³ INDOLMASA Industrias Oleaginosas Monte Alegre S.A Pucallpa-Perú. Email: gerencia@indolmasa.com.pe

⁴ Universidad Científica del Sur, Laboratorio de Ingeniería Ambiental, Lima, Perú.

⁵ Laboratorio de Ecología y Biodiversidad Animal (LEBA), Facultad de Ciencias Naturales y Matemática (FCNNM), Grupo de Investigación en Sostenibilidad Ambiental (GISA), Escuela Universitaria de Posgrado (EUPG), Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV), Lima, Perú.

⁶ Laboratorio de Parasitología, Facultad de Ciencias Biológicas. Grupo de Investigación "One Health". Escuela de Posgrado (EPG), Universidad Ricardo Palma (URP), Lima, Perú. Email: joseiannacone@gmail.com

*Corresponding author

SUMMARY

Background. The Peruvian Amazon has an area of 74,739 ha oil palm in 2019, which during the palm oil extraction process generates large amounts of solid agro-industrial waste (Empty Fruit Bunch [EFB] and Oil palm fiber [OPF]) which, due to not having proper management and being exposed to open sky is the cause of atmospheric, hydrological and terrestrial pollution. This problem could be seen as an opportunity to exploit agricultural soils. **Objective.** Determine the elemental composition and heavy metal content of the EFB and OPF in palm residues of the Peruvian Amazon. **Methodology.** The population was made up of 19.39 t day⁻¹ of EFB and 12.48 t day⁻¹ of OPF from the fruit extracted from the INDOLMA SA industry, district of Neshuya, Peru. The analyzes were carried out by UV-VIS spectrophotometry for P and K; Kjeldahl method for N; for humidity, the humidity balance - PCE Iberian was used and the potentiometer for the measurement of pH and the Atomic Adsorption Spectrophotometry (AAS) for heavy metals Cd, Pb, Cr, Ni, As and Hg. **Results.** The concentrations of the elemental content (NPK) did not present statistically significant differences between the variables, while the heavy metals in Cd, Ni, Cr and Pb in EFB were higher than that found for the OPF. However, it was the opposite with As, showing significant differences, while the presence of Hg was below the detection limits. **Implications.** Knowing the nutritional and heavy metal characteristics has the function that new sustainable technologies can be proposed using this raw material of organic origin that are adapted to the quality of its properties. **Conclusions.** The values indicate the good performance of the elemental content in the EFB and OPF, but the presence of heavy metals, especially Cd and Ni, is high in the studied residues. **Keywords:** agro-industrial solid waste; elemental content; heavy metal; oil palm; pollution.

RESUMEN

Antecedentes. La Amazonía peruana presenta una superficie de 74.739 ha de palma aceitera en el año 2019, que durante el proceso de extracción de aceite de palma genera grandes cantidades de residuos sólidos agroindustriales (racimo de frutas vacía [EFB] y fibra del fruto de palma aceitera [OPF]) que al no tener un adecuado manejo y al estar expuesto a cielo abierto es causante de contaminación atmosférica, hidrológica y terrestre. Este problema podría tomarse como una oportunidad de aprovechamiento para los suelos agrícolas. **Objetivo.** Determinar la composición

† Submitted September 8, 2021 – Accepted April 1, 2022. <http://doi.org/10.56369/tsaes.3967>



elemental y contenido de metales pesados del racimo vacío (RV) y fibra en los residuos de palma de la Amazonía peruana. **Metodología.** La población la conformó 19.39 t día⁻¹ de RV y 12.48 t día⁻¹ de fibra del fruto extraídas de la industria INDOLMA S.A, distrito de Neshuya - Perú. Los análisis se realizaron mediante Espectrofotometría UV-VIS para el P y K; método de Kjeldahl para el N; para la humedad se utilizó la balanza de humedad – PCE Ibérica, el potenciómetro para la medición de pH y la Espectrofotometría de Adsorción atómica (EAA) para los metales pesados Cd, Pb, Cr, Ni, As y Hg. **Resultados.** Las concentraciones del contenido elemental (NPK) no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las variables, mientras que los metales pesados en Cd, Ni, Cr y Pb en el racimo de frutas vacía (EFB) fueron mayores que con lo encontrado para la fibra del fruto de palma aceitera (OPF); sin embargo, hubo diferencias significativas con el As, mientras que la presencia de Hg estuvo por debajo de los límites de detección. **Implicaciones.** Conocer las características nutricionales y de metales pesados tiene la función de que se puedan proponer nuevas tecnologías sostenibles utilizando esta materia prima de origen orgánico que se adecuen a la calidad de sus propiedades. **Conclusiones.** Los valores indican un buen rendimiento del contenido elemental en la OPF y en el EFB de palma aceitera, pero la presencia de metales pesados en especial el Cd y Ni es alta en los residuos estudiados.

Palabras clave: composición elemental; contaminación; metales pesados; residuos sólidos agroindustriales.

INTRODUCCIÓN

La industria agrícola genera grandes cantidades de desechos (Green, 2019), que son fuente de contaminación atmosférica, hidrológica y terrestre (Adegbeye *et al.*, 2020); así mismo, la contaminación al suelo ocasionada por metales pesados (MP) presentes en la biomasa expuesta, genera graves riesgos a la salud humana (Zhang *et al.*, 2021) a través de la cadena de alimentación (Hattab *et al.*, 2019) debido a su persistencia, bioacumulación y toxicidad (Chen *et al.*, 2019).

Algunos MP son esenciales a nivel de macronutrientes para diversas actividades biológicas; sin embargo, en concentraciones elevadas pueden presentar efectos tóxicos (Daneshfozoun *et al.*, 2017). El arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb) y mercurio (Hg) se consideran altamente deletéreos (Bhargavi *et al.*, 2015); aun cuando se encuentren en concentraciones bajas causan un grave peligro por su capacidad de ocasionar toxicidad y bioacumulación en el ser humano y en la biota (Bagal-Kestwal *et al.*, 2008). Estos MP se caracterizan por presentar una densidad superior a 5 g·cm⁻³ (Zaib *et al.*, 2015).

Las plantas acumulan los metales en distintas partes, con mayor significancia en los frutos, los cuales ingresan desde el suelo, y cuya fuente de contaminación es principalmente antropogénica (Olafisoye *et al.*, 2020). La identificación de algunos MP está directamente relacionada con fuentes específicas como: fertilizantes (Cd, cromo (Cr), molibdeno (Mo), Pb y zinc (Zn)), plaguicidas (cobre (Cu), As, Hg, Pb, manganeso (Mn), Zn), y compost derivados de residuos sólidos convencionales (Cd, Cu, níquel (Ni), Pb, Zn) y del estiércol (Cu, As, Zn) (Alloway, 2013).

La palma aceitera (*Elaeis guineensis*) originaria de África occidental, actualmente cultivada en América del sur, representa un desafío en la eliminación de sus

residuos debido a su demanda y producción de aceite de palma, el cual se podría convertir en una oportunidad de valorización y de su ingreso en la economía circular (Anyaoha *et al.*, 2018, Sistema Integrado de Estadística Agraria, 2019, Fedepalma, 2020).

Durante el proceso de extracción de aceite de palma se producen subproductos de la biomasa como el racimo de frutas vacío (EFB), resultado de la remoción de frutos del racimo de fruta fresca esterilizado, y la fibra del fruto de la palma aceitera (OPF) resultado de la extracción del aceite de palma (García *et al.*, 2016, Babinszki *et al.*, 2021); sin embargo, la utilización adecuada de estos residuos representa un desafío tanto para las empresas procesadoras de palma como para las mismas autoridades locales (Anyaoha *et al.*, 2018).

El EFB es un material rico en potasio (K) y en menor proporción, en nitrógeno (N), fósforo (P) y magnesio (Mg). Sus principales componentes son polisacáridos, como la celulosa, glucanos y xilanos, en aproximadamente 66% y otros polímeros como la lignina (12%) (CENIPALMA-ICA, 2002, Rahman *et al.*, 2007, García *et al.*, 2008). El EFB es una fuente lignocelulósica que está disponible como sustrato en la producción de celulosa. El EFB también se puede utilizar como fertilizante local. La ceniza producida por el EFB se rocía sobre los cultivos para evitar que los insectos destruyan los cultivos, y también se usa para lavar platos y ollas (Udoetok, 2012). El OPF se ha usado en la fabricación de bloques de hormigón o como mortero de revestimiento de paredes internas (Fokam *et al.*, 2021), en la fabricación de biocompuestos plásticos derivados del petróleo no biodegradables (Gutiérrez-Estupiñán *et al.*, 2020), en calderas para generación de vapor en la mayoría de las plantas extractoras de aceite de palma (Yahayu *et al.*, 2018) y se puede utilizar como sustrato para vermicompostaje (Hernández *et al.*, 2002).

La descomposición a cielo abierto de los residuos de la palma aceitera es capaz de generar condiciones anaeróbicas con emisiones de gases de efecto invernadero como el metano (Krishnan *et al.*, 2017), en consecuencia, es importante conocer sus posibles usos y su potencial, tanto como fertilizantes y en compostaje para beneficio del suelo agrícola, pero que presenten niveles aceptables de trazas de MP (Anyaocha *et al.*, 2018, Gong *et al.*, 2019). Al ser potencialmente usados el EFB y el OPF como fertilizantes orgánicos, también pueden ser una fuente potencial de contaminación ambiental por la presencia de MP. Es importante para prevenir la contaminación del suelo, el agua, ganado y del hombre, al ser la deposición atmosférica y el estiércol del ganado las fuentes predominantes de MP que ingresan a los suelos agrícolas, por lo que se debe desarrollar estrategias de gestión sostenible de los suelos agrícolas (Gong *et al.*, 2019). Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue determinar la composición elemental y de metales pesados del EFB y OPF de la palma aceitera en la Amazonía peruana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras de EFB y OPF

El EFB y el OPF de la palma aceitera (Figura 1) se obtuvieron de la Empresa Agroindustrial INDOLMASA (Industrias Oleaginosas Monte Alegre S.A) ubicada en el km 62 de la carretera Federico Basadre (542792 E, 9043838 S), distrito de Neshuya, Ucayali, Perú. Luego fueron trasladados a los laboratorios de la Universidad Nacional de Ucayali

(UNU), Pucallpa, Perú donde se prepararon las muestras para los respectivos análisis en las distintas etapas.

Para estimar la cantidad muestral se procedió a trabajar de acuerdo al protocolo indicado (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2002), lo que consistió tomar 60 kg del residuo de la palma aceitera, y apilarlos en un espacio libre para luego proceder al método del cuarteado, tomando las muestras de los extremos y formando nuevamente un montículo y repitiendo el proceso hasta obtener cinco kg de una muestra homogénea. Posteriormente, las muestras se secaron para determinar el porcentaje de humedad (H°), se trituraron y al mismo tiempo se eliminaron las impurezas. Finalmente, se realizaron los análisis de composición elemental y de contenido de MP.

Caracterización de la muestra

Para el análisis de composición elemental se tomaron un kg de OPF y un kg de EFB, cada uno se dividió en bolsas herméticamente selladas y rotuladas con una masa de 100 g, haciendo un total de 10 muestras por cada parámetro. Los parámetros evaluados fueron N, P, K, materia orgánica (MO), pH y humedad (H°). Los análisis se realizaron mediante Espectrofotometría UV-VIS para el P y K (Waterlot, 2018, Passos y Saraiva, 2019), se utilizó el método de análisis Kjeldhal para la determinación de N (Bai *et al.*, 2019), para la H° se utilizó la balanza de humedad – PCE Ibérica y el potenciómetro para la medición del pH.



Figura 1. (Izq.) Hebras extraídas manualmente de EFB de la palma aceitera; (Der.) Fibra de OPF, procedente de la industria oleaginosa INDOLMA SA, Neshuya, Ucayali, Perú.

Para el análisis de MP, se tomaron un kg de EFB y un kg de OPF, que fueron divididos en bolsas herméticamente selladas y rotuladas con una masa de 100 g, haciendo un total de 10 muestras por cada parámetro. Los parámetros evaluados fueron Pb, Cd, Hg, As, Cr y Ni. Los análisis de las muestras se realizaron mediante Espectrofotometría de Adsorción atómica (EAA) (Chi *et al.*, 2017, Behbahani *et al.*, 2014, Mallah y Amin, 2018). Los valores de los MP ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) fueron comparados con las concentraciones aceptables máximas para productos fertilizantes elaborados con residuos orgánicos señalados por normativas de Estados Unidos, Unión Europea “EU”, Holanda, España, Australia y Japón (Gong *et al.*, 2019) (Tabla 1).

Tabla 1. Concentraciones aceptables máximas para productos fertilizantes orgánicos en normativas de diferentes regions y países ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Tomado de Gong *et al.* (2019).

Región /País	Cr	Ni	As	Cd	Pb
Estados Unidos (Washington)	-	210	20	10	150
UE enmienda en suelo	100	50	-	1	100
Holanda	50	20	-	1	100
España A	70	25	-	0,7	45
España B	250	90	-	2	150
España C	300	100	-	3	200
Australia	400	60	20	3	200
Japón	500	300	50	5	100

Análisis estadístico

Para todos los ensayos se tomaron 10 muestras por cada parámetro y por cada tipo de residuo, para el EFB y para la OPF. Los resultados de los ensayos con respecto al contenido elemental (N, K, P, pH, H° y MO) y MP (Cd, Pb, Hg, As, Ni y Cr) entre el EFB y OPF de palma aceitera fueron sometidos, a una evaluación de distribución normal y, se analizaron mediante la prueba de Shapiro-Wilk, debido a que el número de ensayos utilizados por cada parámetro no fueron mayor a 50 muestras. La Prueba de Levene de igualdad de varianzas fue realizada para determinar la homocedasticidad de las varianzas. Los datos de EFB y OPF que presentaron normalidad y homogeneidad de varianza, se compararon mediante la prueba de t de Student para muestras independientes con un nivel de probabilidad del 95% y nivel de significancia de $p < 0.05$. Cuando no presentaron normalidad u homogeneidad, se utilizó la prueba de U de Mann-Whitney. Se utilizó el paquete estadístico SPSS

versión 24.0 para el cálculo de los estadígrafos descriptivos e inferenciales.

RESULTADOS

La Tabla 2 muestra los valores de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y de homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene. Se observó que los valores de EFB fueron mayores que OPF para H°, N, P, K, MO, Cd, Ni, Cr y Pb. En cambio, OPF presentó valores más altos para, H° y para As, en comparación a EFB.

DISCUSIÓN

El contenido de H° presente en la OPF fue significativamente mayor (20.23 %) comparado con lo proveniente del EFB (16.36 %). De manera similar, Castells *et al.* (2021) obtuvieron porcentajes mayores de H° en OPF (8.79 %) que en EFB (6.46 %). Por el contrario, Ordoñez *et al.* (2020) obtuvieron que EFB tuvo 7.42 % y OPF el 6.12 % de H°. Nuestros resultados muestran valores superiores en cuanto a los parámetros OPF y EFB; esto se explica por las temperaturas superiores a las que Castells *et al.* (2021) y Ordoñez *et al.* (2020) sometieron sus muestras en estudio, siendo éstas de 250 °C y 950 °C, respectivamente; mientras que, en nuestro estudio, las muestras fueron sometidas a una temperatura de 105 °C. Al respecto, Kheang (2017) menciona que las biomásas de los residuos de EFB y OPF de la palma aceitera presentan un alto contenido de H°, por lo que recomienda monitorear su almacenamiento, ya que puede dar origen a la presencia de hongos y a otras actividades biológicas, caso que no ocurrió en esta investigación debido a que las muestras fueron en corto tiempo utilizadas en los procesos, sin necesidad de ser almacenadas por períodos extensos.

Los valores obtenidos del contenido elemental (NPK), fueron mayores para el EFB en comparación al OPF. La cantidad de N ($1.39 \pm 0.03\%$ para EFB y $1.19 \pm 0.03\%$ para OPF), coincide con lo informado en otros trabajos para EFB, Idris *et al.* (2015) obtuvieron para N (1.65 %), mientras que, en la OPF, Kabir *et al.* (2017) registran para N (1.32%). El contenido de P ($3.55 \pm 0.03\%$ para EFB y $3.30 \pm 0.03\%$ para OPF), difiere con lo informado por Anyaoha *et al.* (2018), para el EFB (P: 0.26 %) y por Kheang (2017) para la OPF (P: 0.06 %), quienes además obtuvieron valores muy inferiores (0.50 %) respecto al N. Mientras que para el Potasio (K) ($4.45 \pm 0.03\%$ para EFB y $3.12 \pm 0.03\%$ para OPF), Kheang (2017) (2.26% para EFB y 0.96% para OPF) y Babinszki *et al.* (2021) (2.03% para EFB y 0.78% para OPF), registraron valores por debajo de lo informado en este estudio, tanto para el OPF y EFB.

Tabla 2. Valores comparativos del contenido elemental y de metales pesados de EFB y OPF en la Amazonía peruana.

Variables /Tipo de Residuos	Media+ DE	Shapiro-Wilk	Sig.	Levene	Sig.	t de Student	Sig.	
H° (%)	EFB	16.36 ±0.09	0.61	0.00	2.27	0.14	0**	0.00
	OPF	20.23 ±0.05	0.95	0.75				
N (%)	EFB	1.39 ±0.03	0.92	0.41	0.09	0.76	13.44	0.00
	OPF	1.19 ±0.03	0.91	0.30				
P (%)	EFB	3.55 ±0.03	0.89	0.20	0.16	0.69	18.41	0.00
	OPF	3.30 ±0.03	0.92	0.41				
K (%)	EFB	4.45 ±0.03	0.95	0.66	0.007	0.93	101.49**	0.00
	OPF	3.12 ±0.03	0.94	0.55				
pH	EFB	7.82 ±0.03	0.94	0.58	1.33	0.26	24.94	0.00
	OPF	7.49 ±0.03	0.94	0.60				
MO (%)	EFB	26.88 ±0.03	0.93	0.49	1.45	0.24	195.71	0.00
	OPF	23.87 ±0.04	0.92	0.38				
Cd (mg·kg ⁻¹)	EFB	601 ±31.07	0.91	0.28	0.20	0.65	11.82	0.00
	OPF	454 ±24.13	0.89	0.18				
Ni (mg·kg ⁻¹)	EFB	34.60 ±3.44	0.88	0.14	0.42	0.52	9.14	0.00
	OPF	21.50 ±2.95	0.87	0.12				
Cr (mg·kg ⁻¹)	EFB	5.80 ±0.92	0.75	0.004	1.80	0.19	2.50**	0.00
	OPF	3.60 ±0.70	0.78	0.009				
Pb (mg·kg ⁻¹)	EFB	14.80 ±1.62	0.86	0.09	0.56	0.46	4.34	0.00
	OPF	11.86 ±0.90	0.81	0.06				
As (mg·kg ⁻¹)	EFB	11.86 ±1.21	0.77	0.02	0.15	0.70	5.00**	0.00
	OPF	14.60 ±1.43	0.90	0.24				
Hg (mg·kg ⁻¹)	EFB	1*	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	OPF	1*	ND	ND	ND	ND	ND	ND

DE = Desviación estándar. Sig= significancia. n= 10 para todos los casos. *<LD= por debajo del límite de detección del laboratorio (LD=0.001). **Valores de U de Mann-Whitney. EFB = Racimos de fruta vacío. OPF = Fibras de frutos. ND= No Detectado.

Nuestros resultados sugieren que las variaciones en las propiedades de los residuos de palma aceitera son consecuencia de su ubicación geográfica, y de las características del suelo como propone Anyaoha *et al.* (2018). El N de los residuos de palma aceitera en el presente trabajo está estrechamente relacionado con la productividad y pueden ser absorbido por las plantas para su crecimiento (Uke *et al.*, 2021). Los aniones N y P, son requeridos por las plantas para su crecimiento. La alta concentración de K en las muestras de EFB y OPF justifican su uso como fertilizante orgánico, ya que las plantas necesitan K en grandes cantidades (Udoetok, 2012). El K cumple la función de catalizador de la fotosíntesis. De esta manera, la presencia de NPK en cualquier producto fertilizante es requerido para el desarrollo general de las plantas (Kheang *et al.*, 2013), donde cada nutriente (NPK)

debe estar presente en menos de un 1 %, lo cual se cumple para el N, P y K (Real Decreto, 2020).

Aunque el pH tuvo diferencias significativas entre EFB y OPF, el valor no es un factor clave para el compostaje debido a que el pH del EFB y OPF se encuentra entre los niveles óptimos de 5.5 y 8.0, comparado con los informes de Bernal *et al.*, (2009) y Mari *et al.*, (2013).

El EFB presentó una mayor concentración en los niveles de MP (Cd, Ni, Cr y Pb) y difirió en el contenido de As con respecto a OPF que presentó un valor superior (por encima de 14 mg·Kg⁻¹). Kheang (2017) obtuvo que los valores en Ni fueron de 7.2 y 8.3 mg·Kg⁻¹, para EFB y OPF, respectivamente, lo que contrasta con los resultados obtenidos en este estudio

de 34.60 y 21.50 mg·Kg⁻¹, para EFB y OPF, respectivamente. Además, Kheang (2017), señala que en el caso del Cr, se observaron valores superiores de 16 a 21 mg·Kg⁻¹, lo que difiere con el presente estudio, ya que se obtuvieron concentraciones de 5.80 y 3.60 mg·Kg⁻¹. El contenido de Pb que informa Kheang (2017) fue mayor de 100 mg·Kg⁻¹ en EFB y OPF, lo que contrasta, con lo que se obtuvo en esta investigación.

Debido a que en Perú no existe normas para fertilizantes orgánicos, las comparaciones se realizaron con las concentraciones aceptables máximas para MP de fertilizantes elaborados con residuos bajo la normativas de Estados Unidos, Unión Europea "EU", Holanda, España, Australia y Japón (Gong *et al.*, 2019), los valores encontrados para Cd en este estudio sobrepasaron todas las normativas internacionales, los valores de Ni sobrepasaron los límites de Clase A de España; en el caso de Cr, Pb y As, los valores fueron inferiores al límite máximo permisible de todas las normativas internacionales. Los MP no se pueden eliminar mediante el compostaje, pero su movilidad puede verse reducida (Lin *et al.*, 2019, Weng *et al.*, 2020), al añadir enmiendas como fertilizantes (Kupper *et al.*, 2014); sin embargo, es importante realizar pruebas previas para evitar que se bioacumulen en el suelo (Rodríguez *et al.*, 2012, Enyaoaha *et al.*, 2018).

Los MP en los residuos de la palma aceitera en el presente estudio, podrían deberse a varios factores como el tipo de suelo, específicamente a la dinámica de los MP en base a la motilidad y biodisponibilidad con relación al pH al afectar la capacidad amortiguadora del suelo, seguido por los óxidos de Fe y Mn; así como al potencial redox, a la MO y a las arcillas (Yadav, 2010, Alloway, 2013, Kicińska *et al.*, 2022). El Cd en su forma iónica (Cd²⁺) es fácilmente absorbido desde el suelo por las raíces de las plantas a través del sistema vascular de las mismas, y se distribuye en toda su estructura afectando su capacidad fotosintética, el contenido de clorofila y carotenoides e implicando problemas de crecimiento y desarrollo al provocar clorosis principalmente en hojas jóvenes. También, interfiere en la entrada y transporte de nutrientes y ocasiona estrés oxidativo y afectaciones en las actividades enzimáticas. El Cd es uno de los MP más tóxicos, sumando a ello su alta movilidad y poder bioacumulativo que podrían alojarse de manera significativa en los productos agrícolas, hortícolas o agroindustriales de consumo humano (Singh *et al.*, 2010, Hernández-Baranda *et al.*, 2019).

Los MP no son degradables y tienden a bioacumularse en los organismos vivos (Basheer *et al.*, 2021); por lo tanto, es necesario identificar y conocer sus concentraciones y, a través de ello se podrá garantizar

que la acción de economía circular en un cultivo está libre de contaminantes y así evitar su reintroducción en el suelo (Truckell *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

Los EFB y OPF, presentan concentraciones óptimas de contenido elemental (NPK), permitiendo que sea una materia prima potencial para la producción de abonos orgánicos (compost y humus), permitiendo así contribuir a la economía circular del cultivo de palma aceitera en el Perú. Sin embargo, se debe tener en consideración las concentraciones de Cadmio registradas en ambos residuos, porque su presencia en altas concentraciones afecta a las plantas reduciendo su crecimiento, la actividad fotosintética, el contenido de clorofilas y provoca clorosis principalmente en hojas jóvenes. Por lo tanto, es necesario evaluar su concentración en los productos (compost y humus) generados a partir de los residuos estudiados, con la finalidad de garantizar un producto totalmente orgánico. Por otra parte, el nivel de humedad registrado en ambos residuos permite que sea considerado como una materia prima potencial para ser utilizado como biocombustible sólido; la mayoría de los procesos de conversión energética requieren valores de humedad menores al 30%, valores superiores implica utilizar procesos de secado previo para deshidratar y así obtener mayor rendimiento en la conversión energética.

Agradecimiento

Al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONCYTEC) como parte del Proyecto Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e innovación Tecnológica – SINACYT, a la casa de estudios de la Universidad Nacional de Ucayali-UNU. Igualmente, para las empresas Industrias Oleaginosas Monte Alegre-INDOLMASA y Negocios Amazónicos Sustentables E.I.R.L-NEGASUS, colaboradoras de la UNU.

Funding. The project that, through Contract No. 99-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU, for the award of funds for applied research and technological development subprojects, a multidisciplinary research project, has financed the project "Use of solid waste from industry of palm oil for the manufacture of biodegradable containers for ornamental and agroforestry use" of which this research is part.

Conflict of interests. The authors declare that they do not have conflicts of interest.

Compliance with ethical standards. The authors declare that all the procedures that contribute to the realization of this research comply with the scientific

ethical standards of the National University of Ucayali and Peru.

Data availability. Data are available with the corresponding author (joseiannacone@gmail.com), upon reasonable request.

Author contribution statement (CRediT). **A.K. Arbaiza-Peña:** Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Software, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing. **G. Panduro-Pisco:** Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Funding acquisition, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Software, Supervision, Writing – original draft, Writing – review & editing. **E.J. Díaz-Zúñiga:** Data curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing. **N.K. Guadalupe-Baylon:** Data curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing. **N. Angulo-García:** Data curation, Formal Analysis, Investigation, Methodology, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing. **J. Iannacone:** Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Funding acquisition, Investigation, Project administration, Resources, Software, Supervision, Writing – original draft, Writing – review & editing.

REFERENCIAS

- Adegbeye, M., Kanth, P., Obaisi, A., Elghandour, M., Oyebamiji, K., Salem, A., Morakinyo, O., Cipriano, M. and Camacho, L., 2020. Sustainable agriculture options for production, greenhouse gasses and pollution alleviation, and nutrient recycling in emerging and transitional nations - An overview. *Journal of Cleaner Production*, 242, pp. 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118319>
- Alloway, B., 2013. *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. 3th ed. USA: Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Anyaoha, K., Sakrabani, R., Patchigolla, K. and Mouazen, A., 2018. Critical evaluation of oil palm fresh fruit bunch solid wastes as soil amendments: Prospects and challenges. *Resources Conservation and Recycling*, 136, pp. 399-409. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.022>
- Babinszki, B., Jakab, E., Terjék, V., Sebestyén, Z., Várhegyi, G., May, Z., Mahakhan, A., Attanatho, L., Suemanotham, A., Thanmongkhon, Y. and Czégény, Z., 2021. Thermal decomposition of biomass wastes derived from palm oil production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105069>
- Bagal-Kestwal, Karve, M., Kakade, B. and Pillai, V., 2008. Invertase inhibition based electrochemical sensor for the detection of heavy metal ions in aqueous system: Application of ultra-microelectrode to enhance sucrose biosensor's sensitivity. *Biosensors and Bioelectronics*, 24, pp. 657-664. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2008.06.027>
- Bai, X., Wang, B., An, S., Zeng, Q. and Zhang, H., 2019. Response of forest species to C:N:P in the plant-litter-soil system and stoichiometric homeostasis of plant tissues during afforestation on the Loess Plateau, China. *CATENA*, 183, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104186>
- Basheer, A., Hanafiah, M., Abdulhakim, M., Al-Douri, Y. and Al-Raad, A., 2021. Synthesis and optimization of high surface area mesoporous date palm fiber-based nanostructured powder activated carbon for aluminum removal. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 32, pp. 472-484. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.09.071>
- Behbahani, M., Bide, Y., Salaria, M., Niknezhad, M., Bagheri, S., Bagheri, A. and Reza, M., 2014. The use of tetragonal star-like polyaniline nanostructures for efficient solid phase extraction and trace detection of Pb(II) and Cu(II) in agricultural products, sea foods, and water samples. *Food Chemistry*, 158, pp. 14-19. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.110>
- Bernal, M., Albuquerque, J. and Moral, R., 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, 100, 5444-5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
- Bhargavi, M., Sethuraman, S., Maheswari, U., and Balaguru, J., 2015. A review on detection of heavy metal ions in water – An electrochemical approach. *Sensors and Actuators B Chemical*, 213, pp. 515-533. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.02.122>
- Castells, B., Amez, I., Medic, L. and García-Torrent, J., 2021. Torrefaction influence on combustion kinetics of Malaysian oil palm

- wastes. *Fuel Processing Technology*, 218, pp. 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106843>
- CENIPALMA-ICA, 2002. *Plan de manejo de la mosac de los establos Stomoxis calcitrans en los lanos orientales de colombia*, s.l.: s.n.
<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/2160?show=full>
- Chen, Y., Chen, Y., Li, Y., Wu, Y., Zeng, Z., Xu, R., Wang, S., Li, H. and Zhang, J., 2019. Changes of heavy metal fractions during co-composting of agricultural waste and river sediment with inoculation of *Phanerochaete chrysosporium*. *Journal of Hazardous Materials*, 378, pp. 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120757>
- Chi, S., Xu, W., Liu, J., Wang, W. and Xiong, Z., 2017. Effect of exogenous Selenium on activities of antioxidant enzymes, cadmium accumulation and chemical forms of cadmium in tomatoes. *International Journal of Agriculture & Biology*, 19, pp. 1615-1622.
<https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0478>
- Daneshfozoun, S., Abdullah, M. and Abdullah, B., 2017. Preparation and characterization of magnetic biosorbent based on oil palm empty fruit bunch fibers, cellulose and *Ceiba pentandra* for heavy metal ions removal. *Industrial Crops and Products*, 105, pp. 93-103.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.05.011>
- Enyaoha, K., Sakrabani, R., Patchigolla, K. and Mouazen, A., 2018. Critical evaluation of oil palm fresh fruit bunch solid wastes as soil amendments: Prospects and challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, pp. 399-409.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.022>
- Fedepalma, 2020. *Anuario estadístico: Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en el mundo*, s.l.: s.n.
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/anuario>
- Fokam, C.B., Toumi, E., Kenmeugne, B., Wiryikfu, B.C. and Mevaa, L., 2021. Experimental study of the addition of oil palm mesocarp fiber on the physical and mechanical properties of fiber cement mortar composites. *SN Applied Sciences*, 3, 85.
<https://doi.org/10.1007/s42452-020-04037-7>
- Garcia, J., Garcia-Nuñez, M. and Das, C., 2008. Determinación de parámetros cinéticos de degradación térmica de subproductos de la planta de beneficio mediante análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial. *Palma*, 29, pp. 31-46.
<http://dx.doi.org/10.13031/2013.21519>
- García, J., Ramirez, N., Rodriguez, D., Silva, E., Frear, C., Stockle, C. and Garcia, M., 2016. Evolution of palm oil mills into bio-refineries: Literature review on current and potential uses of residual biomass and effluents. *Resources, Conservation and Recycling*, 110, pp. 99-114.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.022>
- Gong, Q., Chen, P., Shi, R., Gao, Y., Zheng, A.A., Xu, Y., Shao, C. and Zheng, X., 2019. Health assessment of trace metal concentrations in organic fertilizer in Northern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 1031.
<https://doi.org/10.3390/ijerph16061031>
- Green, A., 2019. Agricultural Waste and Pollution. En: T.M. Letcher, Vallero, D.A. (eds): *Waste: A Handbook for Management*. 2nd edn, Academic Press, London, pp. 531-551.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815060-3.00028-1>
- Gutiérrez-Estupiñán, C., Gutiérrez-Gallego, J. and Sánchez, S.M., 2020. Preparation of a composite Material from palm oil fiber and an ecological emulsion of expanded polystyrene post-consumption. *Revista Facultad de Ingeniería*, 29, e10489.
<https://doi.org/10.19053/01211129>
- Hattab, S., Bougattas, I., Hassine, R. and Dridi, B., 2019. Metals and micronutrients in some edible crops and their cultivation soils in eastern-central region of Tunisia: A comparison between organic and conventional farming. *Food Chemistry*, 270, pp. 293-298.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.029>
- Hernández-Baranda, Y., Rodríguez-Hernández, P., Peña-Icart, M., Meriño-Hernández, Y. and Cartaya-Rubio, O., 2019. Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultivos Tropicales*, 40, e10.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_artt ext&pid=S0258-59362019000300010&lng=es&tlng=es
- Hernández, J.A., Contreras, C., Palma, R., Sarria, J. and Pietrosevoli, S., 2002. Efecto de los restos de la palma aceitera sobre el desarrollo y reproducción de la lombriz roja (*Eisenia* spp). *Revista de la Facultad de Agronomía*, 19, 304-311.

- http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-78182002000400006&script=sci_abstract&tlng=en
- Idris, J., Shirai, Y., Anduo, Y., Mohd, A., Ridzuan, M., Ibrahim, I., Husen, R. and Ali, M., 2015. Improved yield and higher heating value of biochar from oil palm biomass at low retention time under self-sustained carbonization. *Journal of Cleaner Production*, 104, pp. 475-479. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.023>
- Kabir, G., Din, M. and Hameed, B., 2017. Pyrolysis of oil palm mesocarp fiber and palm frond in a slow-heating fixed-bed reactor: A comparative study. *Technology Bioresource*, 241, pp. 563-572. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.180>
- Kheang, S., 2017. The potential of the Malaysian oil palm biomass as a renewable energy source. *Energy Conversion and Management*, 141, pp. 285-298. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.081>
- Kheang, S., James, S., Ngatiman, M., Yein, K., May, Y. and Soon, W., 2013. Enhancement of palm oil refinery waste – Spent bleaching earth (SBE) into bio organic fertilizer and their effects on crop biomass growth. *Industrial Crops and Products*, 49, pp. 775-781. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.06.016>
- Kicińska, A., Pomykała, R. and Izquierdo-Diaz, M., 2022. Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 73, e13203. <https://doi.org/10.1111/ejss.13203>
- Krishnan, Y., Chien, C., Farhana, N., Zakaria, Z., Othman, N., Abdullah, N., Siong, C., Tin, C., Balle, S. and Hara, H. 2017. Co-composting of palm empty fruit bunch and palm oil mill effluent: Microbial diversity and potential mitigation of greenhouse gas emission. *Journal of Cleaner Production*, 146, pp. 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.118>
- Kupper, T., Burge, D., Jorg, H., Gusewell, S. and Mayer, J., 2014. Heavy metals in source-separated compost and digestates. *Waste Management*, 34, pp. 867-874. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.007>
- Lin, L., Xu, F., Ge, X. and Li, Y., 2019. Chapter Four - Biological treatment of organic materials for energy and nutrients production—Anaerobic digestion and composting. *Advances in Bioenergy*, 4, pp. 121-181. <https://doi.org/10.1016/bs.aibe.2019.04.002>
- Mallah, Z. and Amin, A., 2018. Utility of solid phase extraction for colorimetric determination of lead in waters, vegetables, biological and soil samples. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 67, pp. 461-168. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.07.020>
- Mari, I., Ehaliotis, C., Kotsou, M., Chatzipavlidis, I. and Georgakakis, D., 2013. Use of sulfur to control pH in composts derived from olive processing by-products. *Compost Science & Utilization*, 13, pp. 281-287. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2005.10702252>
- Olafisoye, O., Fatoki, O., Oguntibeju, O. and Osibote, O., 2020. Accumulation and risk assessment of metals in palm oil cultivated on contaminated oil palm plantation soils. *Toxicology Reports*, 7, pp. 324-334. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.01.016>
- Ordoñez, E., Azamar, J., Mata, E., Silván, O. and Pampillón, L., 2020. Bioenergy potential and technical feasibility assessment of residues from oil palm processing: A case study of Jalapa, Tabasco, Mexico. *Biomass and Bioenergy*, 142, 105668. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105668>
- Passos, M. and Saraiva, L., 2019. Detection in UV-visible spectrophotometry: Detectors, detection systems, and detection strategies. *Measurement*, 135, pp. 896-904. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.045>
- Rahman, S., Choudhury, J., Ahmad, A. and Kamaruddin, A. 2007. Optimization studies on acid hydrolysis of oil palm empty fruit bunch fiber for production of xylose. *Bioresource Technology*, 98, pp. 554-559. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.02.016>
- Real Decreto, 2020. *Real Decreto 506/2013, de 28 de Junio sobre productos fertilizantes*, s.l.: s.n. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/06/28/506/con>
- Rodriguez, M., Muñoz, O., Calero, B., Martínez, F., Montero, A., Limeres, T., Orphee, M. and de Aguilar, A., 2012. Heavy metals content in organic manures, substrates and plants cultivated in organoponics. *Cultivos tropicales*, 33, pp. 5-12. <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193223812001.pdf>
- Sistema Integrado de Estadística Agraria, 2019. *Anuario estadístico de producción agrícola 2019*. [En línea] Available at: <https://siea.midagri.gob.pe/portal/publicacion>

- es/datos-estadisticas/anuarios/category/26-produccion-agricola
- Singh, R., Hakimi, M., Esa, N. and Iliyana, M., 2010. Composting of waste from palm oil mill: a sustainable waste management practice. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 9, pp. 331-334. <http://dx.doi.org/10.1007/s11157-010-9199-2>
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2002. *Reducing a Gross Sample of Granular or Aggregate Material to Testing Size, Test Method T 605 w-00*. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. <https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/01/T/0104T605.aspx>
- Truckell, I., Shah, S., Baillie, I., Hallett, S. and Sakrabani, R., 2019. Soil and transport factors in potential distribution systems for biofertilisers derived from palm oil mill residues in Malaysia. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105005>
- Udoetok, I.A., 2012. Characterization of ash made from oil palm empty fruit bunches (oefb). *International Journal of Environmental Sciences*, 3, pp. 518-524. <https://doi.org/10.6088/ijes.2012030131033>
- Uke, A., Nakazono-Nagaoka, E., Chuah, J., Ahmad, N., Amir, H., Sudesh, K., Zainal, N., Hashim, Z. and Kosugi, A., 2021. Effect of decomposing oil palm trunk fibers on plant growth and soil microbial community composition. *Journal of Environmental Management*, 295, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113050>
- Waterlot, C., 2018. Alternative approach to the standard, measurements and testing programme used to establish phosphorus fractionation in soils. *Analytica Chimica Acta*, 1003, pp. 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.11.059>
- Weng, Z., Kanchanatip, E., Hantoko, D., Yan, M., Su, H., Zhang, S. and Wang, G., 2020. Improving supercritical water gasification of sludge by oil palm empty fruit bunch addition: Promotion of syngas production and heavy metal stabilization. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28, pp. 293-298. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.08.004>
- Yadav, S., 2010. Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany*, 76, pp. 167-179. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2009.10.007>
- Yahayu, M., Abas, F.Z., Zulkifli, S.E. and Ani, F.N., 2018. *Utilization of oil palm fiber and palm kernel shell in various applications*. In: Zakaria, Z.A. (Ed.). *Sustainable Technologies for the Management of Agricultural Wastes*. Springer Singapore. <https://www.springerprofessional.de/en/utilization-of-oil-palm-fiber-and-palm-kernel-shell-in-various-a/15326084>
- Zaib, M., Makshoof, M., Saeed, A. and Farooq, U., 2015. Electrochemical determination of inorganic mercury and arsenic—A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 74, pp. 895-908. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.07.058>
- Zhang, Q., Zou, D., Zeng, X., Li, L., Wang, A., Liu, F., Wang, H., Zeng, Q. and Xiao, Z., 2021. Effect of the direct use of biomass in agricultural soil on heavy metals — activation or immobilization?. *Environmental Pollution*, 272, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115989>