

# Transformación de residuos plásticos de un solo uso en madera plástica: un enfoque desde la economía circular en La Pampa, Argentina

**Anabel Saran**Doctora en Bioquímica. CONICET - Agencia de Investigación Científica, La Pampa, Argentina.  **Jorgelina Zaldarriaga Heredia**Doctora en Química. CONICET y Facultad de Bioquímica y Ciencias Biológicas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.  **Diego Much**Licenciado en Química. CONICET - Agencia de Investigación Científica, La Pampa, Argentina.  **Luciano Merini**Doctor en Bioquímica. CONICET - Agencia de Investigación científica, La Pampa, Argentina.  **Mariana Ruiz Espindola**Directora de Ambiente, coordinadora UNLPamBiental e integrante Fundación Karú Mapú. Municipalidad de Toay, La Pampa, Argentina.  <https://dx.doi.org/10.5209/redc.99448>

Recibido: 3 de diciembre de 2024 • Revisado: • Aceptado: 21 de febrero de 2024

**ES Resumen:** El manejo de los residuos sólidos urbanos (RSU) representa un desafío complejo, ya que su disposición inadecuada, especialmente en basurales a cielo abierto, genera impactos negativos en la salud, la biodiversidad y el ambiente. Los residuos plásticos, que pueden tardar hasta 500 años en degradarse, son los principales responsables de esta problemática. En este trabajo se propone una solución basada en un enfoque territorial y sostenible, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los principios de la Economía Circular a esta problemática. A través del proyecto de extensión UNLPambiental, enfocado en la educación ambiental y la participación comunitaria, se recolectaron, en un lapso de 20 meses, más de 72 toneladas de plásticos provenientes de 45 localidades de la provincia de La Pampa, Argentina. Los plásticos recolectados fueron procesados mediante termofusión y transformados en madera plástica. El producto final fue analizado mediante SEM,  $\mu$ XRF y FTIR para determinar su composición elemental, polimérica e identificar aditivos propios de los plásticos reciclados utilizados. Se detectó Titanio (Ti), un aditivo protector de la foto degradación, presente en 4 de las 5 muestras de madera plástica obtenidas, mientras que aditivos químicos peligrosos como Cromo (Cr), Cadmio (Cd) y Plomo (Pb) no fueron detectados en ninguna muestra. Sin embargo, la composición polimérica de las muestras no fue homogénea, debido a la heterogeneidad del material post consumo disponible al momento de la producción. Este trabajo no solo logró reducir significativamente el impacto ambiental que genera el entierro de las 72 toneladas de residuos plásticos, transformándolos en un nuevo producto, sino que también formó a más de 10.000 agentes de cambio, fomentando una cultura de sostenibilidad que puede tener efectos positivos a largo plazo en la salud pública, el entorno natural y las futuras generaciones.

**Palabras clave:** economía circular; residuos plásticos; madera plástica; educación ambiental; basural a cielo abierto; gestión sostenible de residuos; impacto ambiental.

**ENG Transformation of single-use plastic waste into plastic wood: a circular economy approach in La Pampa, Argentina**

**ENG Abstract:** Municipal solid waste (MSW) management is a complex challenge because its inappropriate disposal, especially in open dumps, has negative impacts on health, biodiversity and the environment. Plastic waste, which can take up to 500 years to degrade, is a major contributor to this problem. This work proposes a solution to this problem based on a territorial and sustainable approach, in line with the Sustainable Development Goals (SDGs) and circular economy principles. Through the UNLPambiental outreach project, which focuses on environmental education and community participation, more than 72 tonnes of plastic were collected from 45 localities in the province of La Pampa, Argentina, over a period of 20 months. The collected plastics were processed by thermofusion and converted into plastic wood. The final product was analysed by SEM,  $\mu$ XRF and FTIR to determine its elemental and polymeric composition and to identify additives specific to the recycled plastics used. Titanium (Ti), a photodegradation additive, was detected in 4 of the 5 wood plastic samples obtained, while hazardous chemical additives such as chromium (Cr), cadmium (Cd)

and lead (Pb) were not detected in any sample. However, the polymer composition of the samples was not homogeneous due to the heterogeneity of the post-consumer material available at the time of production. This work not only significantly reduced the environmental impact of burying the 72 tonnes of plastic waste and transforming it into a new product, but also trained more than 10,000 agents of change, fostering a culture of sustainability that can have a long-term positive impact on public health, the natural environment and future generations.

**Keywords:** circular economy; plastic waste; plastic wood; environmental education; open dump; sustainable waste management; environmental impact.

## FR Transformation des déchets plastiques à usage unique en bois plastique: une approche d'économie circulaire à La Pampa, Argentine

**FR Résumé:** La gestion des DSM représente un défi complexe, car leur élimination inappropriée, en particulier dans des décharges à ciel ouvert, entraîne des répercussions négatives sur la santé, la biodiversité et l'environnement. Les déchets plastiques, qui peuvent mettre jusqu'à 500 ans à se dégrader, en sont les principaux responsables. Ce travail propose une solution basée sur une approche territoriale et durable, alignée sur les Objectifs de développement durable (ODD) et les principes de l'économie circulaire. Dans le cadre du projet de sensibilisation UNLPambiental, axé sur l'éducation environnementale et la participation communautaire, plus de 72 tonnes de plastiques provenant de 45 localités de la province de La Pampa, en Argentine, ont été collectées en 20 mois. Les plastiques collectés ont été traités par thermofusion pour être transformés en bois plastique. Le produit final a été analysé par microscopie électronique à balayage (MEB), par spectrométrie de fluorescence des rayons X ( $\mu$ XRF) et par spectroscopie infrarouge (FTIR), afin de déterminer sa composition élémentaire et polymérique et d'identifier les additifs spécifiques aux plastiques recyclés utilisés. Le titane (Ti), un additif de protection contre la photo-dégradation, a été détecté dans 4 des 5 échantillons de bois plastique obtenus, tandis que les additifs chimiques dangereux tels que le chrome (Cr), le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) n'ont été détectés dans aucun échantillon. Toutefois, la composition en polymères des échantillons n'était pas homogène, en raison de l'hétérogénéité des matériaux de post-consommation disponibles au moment de la production. Ce travail a non seulement permis de réduire considérablement l'impact environnemental de l'enfouissement des 72 tonnes de déchets plastiques, en les transformant en un nouveau produit, mais il a également permis de former plus de 10 000 agents du changement, en favorisant une culture de la durabilité qui peut avoir des effets positifs à long terme sur la santé publique, l'environnement naturel et les générations futures.

**Mots-clés:** économie circulaire; déchets plastiques; bois plastique; éducation environnementale; décharge à ciel ouvert; gestion durable des déchets; impact environnemental.

**Sumario:** 1. Introducción. 2. Materiales y métodos. 2.1. Sistema de recolección y acopio de plásticos de un solo uso, proyecto de extensión universitaria UNLPambiental. 2.2. Procesamiento del plástico, Fundación Karu Mapu. 2.3. Análisis químico de la madera plástica a través de Microscopía de Barrido Electrónico (SEM), microfluorescencia de rayos X ( $\mu$ XRF) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). 3. Resultados y discusión. 4. Conclusiones. 5. Fuentes de financiación. 6. Declaración de la contribución por autoría. 7. Referencias bibliográficas.

**Cómo citar:** Saran, A., Zaldarriaga Heredia, J., Much, D., Merini, L. y Ruiz Espindola, M. (2025): "Transformación de residuos plásticos de un solo uso en madera plástica: un enfoque desde la economía circular en La Pampa, Argentina", *Revista Española de Desarrollo y Cooperación (REDC)*, 52(1), pp. 119-128.

### 1. Introducción

Se denomina basurales o vertederos a cielo abierto (BCA) a aquellos sitios donde se disponen residuos sólidos urbanos (RSU) de forma indiscriminada, sin control de operación y con escasas medidas de protección ambiental (Sollazzo y Caparrós, 2023). En Argentina existen unos 5000 BCA, lo que significa, en promedio, más de dos basurales por municipio (Krug et al, 2023). La mayoría de estos sitios son formales, es decir, son el modo oficial en que los gobiernos municipales disponen su basura, enterrándola en fosas sin geomembrana ni sistema de contención. El manejo inadecuado de los RSU genera un significativo impacto ambiental, ya que no solo genera un deterioro estético en las ciudades, sino que provoca la contaminación del agua, el suelo y el aire a corto, mediano y largo plazo (Esparza 2021). La disposición de residuos a cielo abierto afecta las aguas subterráneas por la infiltración de lixiviados y las aguas superficiales por la escorrentía de contaminantes como microorganismos patógenos, metales pesados, sales e hidrocarburos clorados. Asimismo, contribuye a la contaminación del aire debido a la quema sin control y la liberación de humos y gases (SGAyDS, 2018). Este proceso también provoca una considerable pérdida de biodiversidad, resultado de las intensas modificaciones antrópicas que sufren estos ecosistemas (Onen et al., 2017).

En Argentina, se estima que cada habitante genera en promedio 1.15 kg de residuos al día (Informe del estado del ambiente, 2020). La composición de estos residuos se distribuye en un 43.56 % de desechos orgánicos, 14.4 % de papel y cartón, y 12.6 % de plásticos. Dentro del 12.6% de plásticos, la distribución

específica es la siguiente: 1.62 % Polietileno tereftalato (PET), 1.14 % Polietileno de alta densidad (HDPE), 0.46 % Policloruro de vinilo (PVC), 5.23 % Polietileno de baja densidad (LDPE), 2.14 % Polipropileno (PP), 1.61 % Poliestireno (PS) y 0.40 % de otros tipos de plásticos (Saidón *et al.*, 2024). A diferencia de otros materiales, el plástico no se biodegrada. Los artículos plásticos de un solo uso, como las bolsas de plástico, los sachet de leche y los envases de detergente para ropa, tienen una vida media estimada de 5, 10 y 250 años, respectivamente, cuando se encuentran enterrados en el suelo. Sin embargo, se estima que la degradación completa de una botella de HDPE depositada en el suelo requiere entre 116 y 500 años (Chamas *et al.*, 2020). A su vez, cabe destacar que no solo la baja degradabilidad hace de los plásticos un factor causante de la crisis climática. La producción de plástico es uno de los procesos de fabricación más intensivos en energía a nivel mundial. Este material se produce a partir de combustibles fósiles, como el petróleo crudo, que, mediante calor y diversos aditivos, se transforman en polímeros. En 2019, la industria del plástico generó 1.800 millones de toneladas métricas de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que representa el 3.4 % de las emisiones globales totales (Zheng *et al.*, 2019).

A medida que la acumulación de plásticos en BCA y en el ambiente continúa creciendo, se requieren acciones urgentes para mitigar sus efectos. Diversos organismos internacionales como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) han señalado la necesidad de promover políticas públicas más estrictas y estrategias de gestión sostenible que prioricen la reducción, reutilización y reciclaje de plásticos (Kuma, 2022).

En este contexto, el objetivo del presente proyecto es reducir el volumen de plásticos de un solo uso que se disponen de manera inadecuada en los BCA de los municipios de la Provincia de La Pampa, valorizándolos mediante la transformación en madera plástica a través de un proceso que fomente la economía circular. Además de asegurar su inocuidad química mediante el análisis analítico correspondiente (SEM,  $\mu$ XRF y FTIR). Este enfoque contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) número 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles), 12 (Producción y Consumo Responsables) y 13 (Acción por el Clima).

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Sistema de recolección y acopio de plásticos de un solo uso, proyecto de extensión universitaria UNLPambiental

En 2018 se creó en la Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam) el proyecto de extensión universitaria UNLPambiental, impulsado por estudiantes, docentes, no docentes e investigadores, con el objetivo de promover la educación y acción ambiental en la provincia de La Pampa. El proyecto busca fomentar la adopción de buenas prácticas en la disposición y tratamiento de RSU, así como formar agentes de concientización y difusión entre los diversos actores sociales. Dentro de este proyecto, se destaca la iniciativa de la realización de eco-botellas, que consisten en recolectar botellas plásticas y rellenarlas con plásticos de un solo uso, como bolsas, envoltorios y envases, limpios y secos. Esta iniciativa logró la adhesión de 45 localidades de la provincia al proyecto UNLPambiental. Dichas localidades se comprometieron a difundir el proyecto en las distintas entidades educativas y organismos gubernamentales, además de disponer un sitio de acopio donde los ciudadanos pudieran depositar las eco-botellas (Figura 1). Estos municipios firmaron convenios con la UNLPam para afianzar el compromiso y mantenerlo a lo largo del tiempo. Las eco-botellas son transportadas por los municipios hasta la ciudad de Santa Rosa, donde se almacenan en *big bags* (90 x 90 x 100 cm) en un sitio destinado para tal fin, ubicado en el campus de la universidad, hasta su posterior procesamiento.

FIGURA 1. Puntos de acopio de eco-botellas

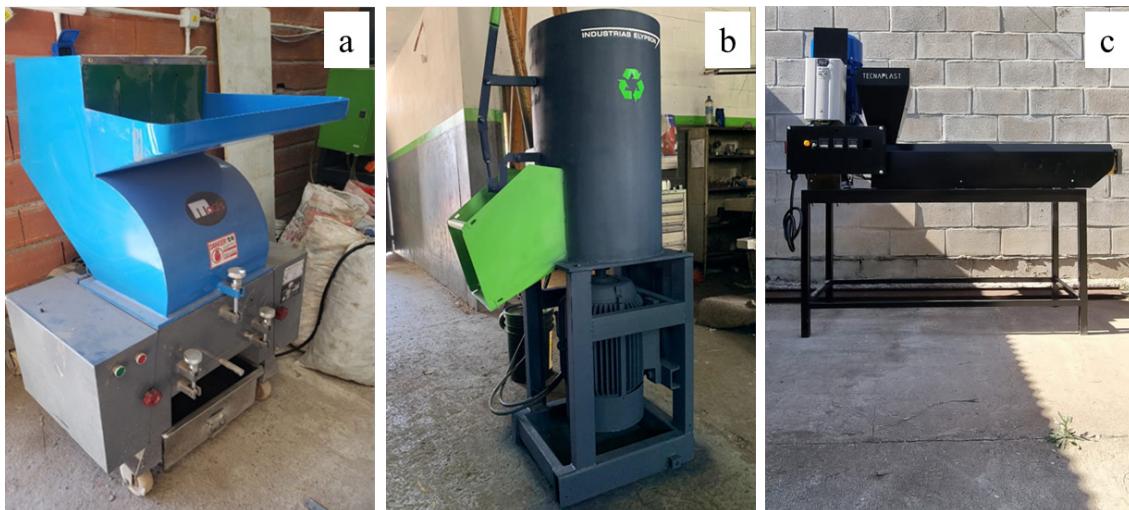


Fuente: elaboración propia. Nota: a) Ingeniero Luiggi, b) Telen, c) Falucho, d) Realico

## 2.2. Procesamiento del plástico, Fundación Karu Mapu

Las eco-botellas recolectadas llegan a la Fundación Karu Mapu para su procesamiento, donde se abren, se separan las tapas y se clasifican los plásticos contenidos en su interior. Durante este proceso, también se descartan los plásticos o materiales que no son aptos para el reciclaje. El PET, por ejemplo, no se utiliza debido a su elevado punto de fusión de 260 °C, por lo que se dona a la cooperativa de recuperadores urbanos Brote Popular. Las tapas, así como los plásticos de tipo HDPE y PP, son triturados, obteniendo fragmentos de entre 0.5 y 1 cm. En la siguiente etapa, el plástico de un solo uso (LDPE) se introduce en una máquina agrumadora que genera pequeños fragmentos llamados pellets. Finalmente, los pellets, junto con las tapas y a los plásticos de tipo HDPE y PP, se colocan en una extrusora que, a través de termofusión a temperaturas entre 180 - 200 °C, convierte el material en listones de madera plástica (Figura 2). Este proceso se lleva a cabo en la Fundación Karu Mapu, una organización sin fines de lucro creada en 2020.

FIGURA 2. Maquinaria específica para el proceso de transformación del plástico de un solo uso en madera plástica llevado a cabo en la Fundación Karu Mapu



Fuente: elaboración propia. Nota: a) trituradora, b) agrumadora y c) extrusora.

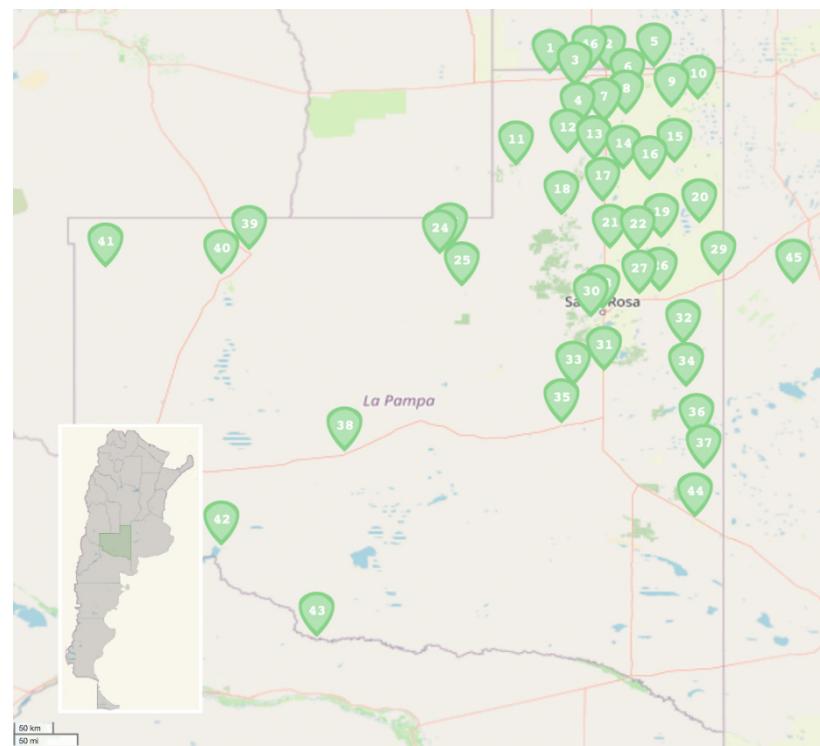
## 2.3. Análisis químico de la madera plástica a través de Microscopía de Barrido Electrónico (SEM), microfluorescencia de rayos X ( $\mu$ XRF) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Cinco muestras de madera plástica, obtenidas de la mezcla termofusionada de HDPE, LDPE y PP, que compone el material reciclado, fueron exhaustivamente analizadas mediante técnicas analíticas instrumentales en los laboratorios de la Universidad de Hasselt, Bélgica y de la Agencia de Investigación Científica, Santa Rosa, Argentina. Inicialmente las muestras fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en un microscopio Phenom™ ProX Desktop, de la firma Thermo Fisher, a fin de visualizar la presencia de posibles grietas, grumos o incrustaciones en la superficie del material. Para esto, las muestras se fijaron en una superficie de carbón, para mejorar la conductividad de estas. El equipo se operó a 15 keV y se logró visualizar fracciones de hasta 200  $\mu$ m. Posteriormente, mediante microfluorescencia de rayos X ( $\mu$ XRF) (M4 Tornado, Bruker) se analizó la composición elemental de la madera plástica, para identificar la posible presencia de metales pesados provenientes de distintos aditivos utilizados como colorantes y estabilizadores UV en la fabricación de los plásticos. El equipo se operó a 300 mA, 50 kV y 20 mbar de vacío. Por último, se utilizó un espectrómetro Vertex 70 (FTIR, Bruker) con una unidad de reflectancia total atenuada (ATR) equipada con un cristal de diamante para analizar los correspondientes espectros infrarrojos del material. La resolución fue de 4  $\text{cm}^{-1}$ , realizando 10 escaneos para la adquisición de fondo y 5 escaneos para el espectro de la muestra. Las muestras se analizaron directamente sobre el cristal. Las superficies analizadas se limpian con etanol y se dejaron secar. Los espectros se adquirieron de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$  y se analizaron utilizando el software OPUS provisto con el espectrómetro.

## 3. Resultados y discusión

A través del proyecto de extensión UNLPambiental se logró la adhesión de 45 localidades a la iniciativa eco-botellas. Este proyecto comenzó en 2018 gracias a la financiación por parte de la Secretaría de Políticas Universitarias (SPU). Fue mediante la territorialización de la educación ambiental realizada por los miembros del proyecto, a través de charlas, colectas de material reciclable, *plogging* y del Foro de Educación y Gestión Ambiental de la red UAGAIS, que se logró, para el año 2023, la adhesión del 80% de las localidades pertenecientes al territorio pampeano (Figura 3). Además, se capacitó a más de 10.000 ciudadanos, lo que refleja un impacto significativo en la concientización y el involucramiento de la comunidad en la gestión responsable de residuos.

FIGURA 3. Ubicación geográfica de las localidades adheridas al Proyecto UNLPambiental



Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 1, se encuentra el registro de las entregas de eco-botellas correspondientes al periodo 2023-2024, así como las cantidades y el número de entregas realizadas por cada localidad. General Pico, General Acha y Santa Rosa son las localidades que más toneladas aportan al proyecto. Considerando la densidad poblacional de cada localidad (Censo 2022, INDEC), se puede observar que el número de eco-botellas entregadas no guarda una relación proporcional con la población, sino que el factor determinante ha sido la disposición y la promoción del proyecto por parte de los representantes municipales en ese período específico. En un periodo de 20 meses se logró colectar 72 toneladas de plástico que fueron revalorizadas, evitando su entierro en BCA. El proyecto contribuyó significativamente al logro de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En primer lugar, apoya el ODS 11, Ciudades y Comunidades Sostenibles, al reducir el volumen final de residuos destinados a BCA, promoviendo un modelo más sostenible de gestión de residuos. Además, contribuye al ODS 12, Producción y Consumo Responsables, mediante la sensibilización y educación comunitaria a través de charlas, colectas y actividades que fomentan prácticas responsables en el manejo de materiales reciclables. Finalmente, el proyecto respalda el ODS 13, Acción por el Clima, al evitar la generación de 72 toneladas de plástico provenientes de combustibles fósiles, lo que ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción de plásticos convencionales.

TABLA 1. Registro entregas de eco-botellas, periodo 2023-2024

Localidad	Densidad poblacional	Entregas período 2023-2024	Número de big bags	Cantidad (kg)
Algarrobo del Águila	525	0	0	0
Alta Italia	1564	3	3	600
Anguil	2315	1	10	1000
Arata	1199	2	4	400
Ataliva Roca	983	1	10	1000
Caleufú	2322	1	2	200
Ceballos	393	6	6	600
Carro Quemado	716	0	0	0
Casa de Piedra	185	0	0	0
Catrilo	4840	1	10	1000
Colonia Barón	2756	4	24	2400
Conhelo	649	0	0	0
Coronel Hilario Lagos	662	1	1	100
Eduardo Castex	10501	6	12	1200
Embajador Martini	1447	6	12	1200
Falucho	328	1	10	1000
General Acha	15386	4	100	10000
General Campos	1262	0	0	0
General Pico	67138	2	200	20000
General San Martín	2899	6	12	1200
Gobernador Duval	566	0	0	0
Guatrache	5396	10	10	1000
Ingeniero Luiggi	4980	4	25	2500
Intendente Alvear	8471	1	10	1000
La Humada	936	0	0	0
La Reforma	251	0	0	0
Lonquimay	1954	1	10	1000
Macachín	5686	5	15	1500
Mauricio Mayer	437	0	0	0
Metileo	592	1	2	200
Miguel Riglos	2467	2	10	1000
Parera	2533	10	20	2000
Quehue	569	0	0	0
Quemú Quemú	4176	24	24	2400
Rancul	3968	1	5	500
Realicó	8312	1	20	2000
Santa Isabel	2864	3	12	1200
Santa Rosa	116083	-	60	6000
Telén	1582	1	20	2000
Toay	17629	10	10	1000
Trenel	3796	5	25	2500
Uriburu	1341	1	4	400
Victorica	6284	4	12	1200
Winifreda	2675	1	10	1000

Fuente: elaboración propia.

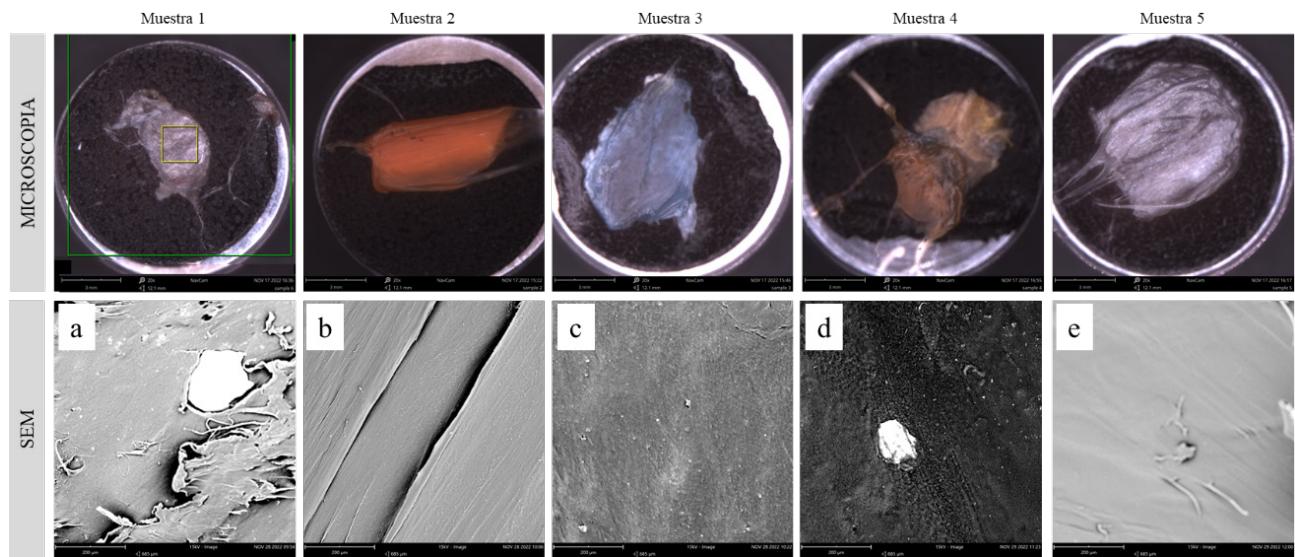
La Fundación Botellas de Amor, creada en 2016 en Colombia, fue pionera en proponer un proceso innovador de reciclaje para abordar el manejo sostenible de los residuos plásticos de un solo uso. Este modelo de eco-botellas ha sido adoptado posteriormente por diversos países como una solución efectiva para la gestión ambiental y el reciclaje de plásticos, promoviendo la economía circular y reduciendo el impacto de estos materiales en el ambiente. En el territorio argentino, Botellas de Amor, con sede en Buenos Aires, es la organización con mayor alcance, habiendo logrado expandirse a varias provincias. Actualmente, cuenta con aproximadamente 60 puntos de acopio en todo el país, ubicados en provincias como Chubut, Neuquén, Misiones y Chaco. La creación de eco-botellas experimentó un notable auge durante los primeros meses de la pandemia, cuando los argentinos se volcaron masivamente a esta actividad debido al confinamiento por COVID-19. Sin embargo, al finalizar la pandemia, se observó una disminución en la cantidad de eco-botellas entregadas (Botellas de amor: A cuatro años de su creación, ARGENTINA + SUSTENTABLE). Observamos una tendencia similar en el territorio abarcado por el proyecto UNLPambiental, sin embargo, a través de los convenios realizados entre las localidades y la UNLPam se logró afianzar y mantener a lo largo del tiempo el compromiso de los municipios.

Una de las principales dificultades en la producción de madera plástica a partir de plásticos post-consumo es la heterogeneidad de los residuos plásticos (Turku *et al.*, 2017). En el flujo de residuos plásticos, LDPE es el componente más importante, seguido por el HDPE, PP, PS, PVC, PET, así como otros tipos de plásticos (Selke y Wichman, 2004). En algunas aplicaciones, la heterogeneidad de los residuos plásticos no es significativa, por ejemplo, como en el relleno en la construcción de carreteras (Rebeiz y Craft, 1995). Sin embargo, la incompatibilidad de los plásticos puede ser la causa del deterioro de las propiedades de los materiales compuestos por los mismos (Adhikary *et al.*, 2008).

Las mezclas poliméricas realizadas para obtener las cinco muestras, posteriormente analizadas en el laboratorio, estaban constituidas por HDPE, LDPE y PP, sin embargo, la proporción de estos depende únicamente de la disponibilidad del material al momento de la producción. Parámetros físicos como la temperatura o el tiempo de prensado fueron establecidos en función de las recomendaciones de los proveedores de las maquinas utilizadas. Los productos obtenidos se compararon con un listón de madera plástica de referencia producido a partir de HDPE, LDPE, PET por Industrias ELYPSON. Turku y colaboradores (2017), reportaron que la resistencia de la madera plástica producida con plástico reciclado era menor que la de la madera plástica generada a partir de polietileno virgen de baja densidad; sin embargo, la dureza era comparable y la rigidez era mayor para la madera generada con plástico reciclado.

En la Figura 4, puede observarse el grado de homogeneidad de cada muestra. Las muestras 1 y 4 (Fig. 4. a y d) mostraron visibles incrustaciones y el menor grado de homogeneidad. Mientras que en la muestra 2 (Fig. 4. b), se pudo visualizar la superposición de capas, evidenciando una incorrecta fusión del material. En cuanto a las muestras 3 y 5 (Fig. 4. c y e), estas fueron las más homogéneas, aunque rugosidades puntuales fueron observadas a lo largo de la superficie, principalmente en la muestra 3.

**FIGURA 4. Micrografías de la superficie de cinco muestras de madera plástica obtenidas a partir de la termofusión de plásticos de un solo uso reciclados (SEM (Phenom™ ProX Desktop, ThermoFisher)**

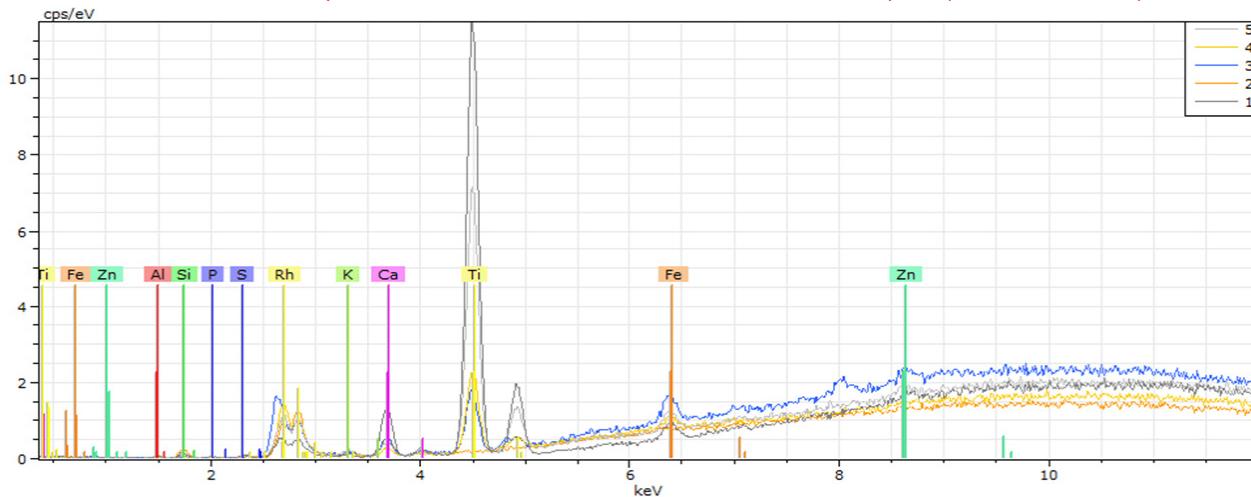


Fuente: elaboración propia.

Aunque las imágenes obtenidas difieren significativamente según la composición de la madera plástica, varios trabajos han utilizado la microscopía SEM para analizar la microestructura y rugosidad de la superficie de madera plástica obtenida a partir de plástico reciclado (Lazrak *et al.*, 2019; Vedrtnam *et al.*, 2019; Turku *et al.*, 2017; Platnieks *et al.*, 2020). Lazrak y colaboradores (2019) reportaron que las muestras con mayor porcentaje de polietileno (PE) fueron las más homogéneas. Mientras que Turku y colaboradores (2017), reportaron que aquellas mezclas cuyas micrografías SEM mostraban huecos, fracturas y superposición de capas tenían una resistencia o capacidad de carga menor.

La Figura 5, muestra la composición elemental de las muestras de madera plástica obtenidas.

FIGURA 5. Detalle de los elementos químicos presentes en las muestras de madera plástica obtenidas a partir de la termo fusión de plásticos de un solo uso reciclados, analizados mediante  $\mu$ XRF (M4 Tornado Bruker)



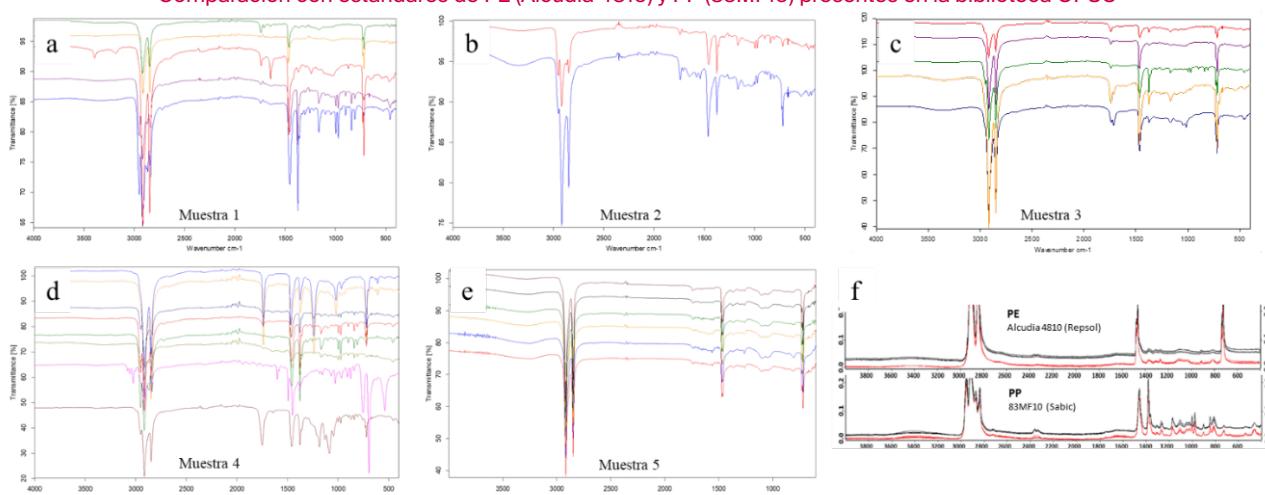
Fuente: elaboración propia.

Se observa la presencia de titanio (Ti), con una mayor proporción en las muestras 1 > 5 > 4 > 3, respectivamente, y no se detecta en la muestra 2. El dióxido de titanio ( $TiO_2$ ), un pigmento/colorante ampliamente utilizado en la industria plástica se produce en más de 1.1 millones de toneladas anuales (Mapleson, 2009). Este compuesto tiene un índice de refracción superior al de otros colorantes, lo que resulta en una mayor opacidad y blancura. Además, es más estable, lo que reduce la probabilidad de catalizar la fotodegradación. También mejora la dispensabilidad del plástico, disminuye la formación de polvo durante su procesamiento, incrementa la resistencia a la intemperie y previene el amarilleo causado por la interacción con antioxidantes fenólicos o estabilizadores de luz (DuPont, 2004). La presencia de este aditivo luego del proceso de termofusión sugiere que la madera plástica obtenida conserva las propiedades del material virgen original. Además, se detectaron elementos como hierro (Fe) y zinc (Zn) en concentraciones menores, los cuales son típicos componentes de los pigmentos utilizados en la industria plástica (Klöckner *et al.*, 2021).

Por último, es importante remarcar que varios aditivos metálicos tóxicos, como cromo (Cr), plomo (Pb) y cadmio (Cd), que se emplean en plásticos como biocidas, agentes antimicrobianos, lubricantes y retardantes de llama (Turner *et al.*, 2021), no fueron detectados en la madera plástica producida por la Fundación Karu Mapu, lo que nos permite asegurar la inocuidad química del producto obtenido, garantizando que no representa un riesgo para la salud ni el ambiente.

Al comparar los espectros de estándares de PE y PP presentes en la biblioteca OPUS (Fig 6. f) con los espectros FTIR obtenidos de las muestras, se pudo identificar que las muestras 1, 2 y 5 (Fig. 6 a, b y e) estaban compuestas en mayor proporción por PE. Mientras que en las muestras 2 y 4 (Fig. 6 b y d) predominaba el PP. No fue posible distinguir entre el LDPE y el HDPE utilizando los espectros provistos por esta biblioteca. Resultados similares fueron reportados por Signoret *et al.* (2020), quienes analizaron la composición polimérica de 112 muestras de residuos plásticos provenientes de depósitos municipales. Destacando que la resolución y la relación señal-ruido de este equipo son limitadas y pueden afectar considerablemente la identificación.

FIGURA 6. Espectros FTIR de 5 muestras de madera plástica obtenidas a partir de plásticos de un solo. f) Comparación con estándares de PE (Alcidia 4810) y PP (83MF10) presentes en la biblioteca OPUS



Fuente: elaboración propia.

Cada vez son más los productos desarrollados a partir de residuos plásticos reciclados, lo que no solo ofrece una alternativa ecológica, sino que también fomenta la economía circular. Entre estos productos se encuentran alfombras, floreros, papeleras, bancos de parque, mesas de picnic y madera plástica. Este tipo de productos representa una forma efectiva de darle un nuevo valor a los plásticos que, de otro modo, terminarían en vertederos o en el medio ambiente. Un ejemplo destacado de esta tendencia es Trex, el mayor proveedor mundial de madera compuesta de madera y plástico, que ha logrado consolidarse como un líder en la industria al transformar residuos plásticos en productos duraderos y de alta calidad. Trex compra un promedio de más de 227.000 kg de desechos plásticos cada día, lo que equivale a aproximadamente 82 millones de kg anuales. Este volumen no solo contribuye a la reducción de residuos, sino que también ayuda a disminuir la dependencia de los recursos naturales, al sustituir materiales vírgenes con plásticos reciclados (Najafi *et al.*, 2013).

#### 4. Conclusiones

El proyecto presentado demuestra ser una estrategia efectiva para mitigar la acumulación de plásticos de un solo uso en los basurales a cielo abierto (BCA) y contribuir a la reducción de la contaminación ambiental. A través de la iniciativa de eco-botellas llevada adelante por el proyecto UNLPambiental, que involucra a 45 localidades de la provincia de La Pampa, y más de 10.000 ciudadanos, se ha logrado recolectar y transformar una cantidad significativa de plásticos en productos de valor, como la madera plástica, promoviendo la sostenibilidad en la región. Los análisis químicos realizados aseguran la inocuidad del material obtenido, confirmado que no contiene aditivos metálicos peligrosos como cromo, plomo o cadmio. Además, la madera plástica obtenida conserva las propiedades de los plásticos originales, lo que incrementa su utilidad en diversas aplicaciones. Este trabajo, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 11, 12 y 13, es una valiosa contribución a la economía circular y a la lucha contra la crisis climática.

#### 5. Fuentes de financiación

El presente trabajo fue financiado por la Secretaría de Políticas Universitarias (SPU) mediante la convocatoria Universidad, Cultura y Territorio, RESOL-2018-100-APN-SECPU#MECCYT, RESOL-2019-105-APN-SECPU#MECCYT; RESOL-2022-32-APN-SECPU#ME y RESOL-2023-419-APN. Además, se recibió el financiamiento por parte de Proyectos Federales de Innovación (PFI) del Ministerio de Ciencia y Tecnología RESOL- EX-2021-21093122-APN-DDYGD-MCT; RESOL-LP-9-PFI-2022-MCT y RESOL-2023-332-APN-MCT.

#### 6. Declaración de la contribución por autoría

Anabel Saran: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Jorgelina Zaldarriaga Heredia: Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Diego Much: Software, Visualización, Redacción – borrador original.

Luciano Merini: Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Mariana Ruiz Espindola: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Recursos, Supervisión, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

#### 7. Referencias bibliográficas

- Adhikary, K. B., Pang, S. y Staiger, M. P. (2008): "Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE)", *Part B*, 39, pp. 807-15. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.10.005>
- Botellas de amor: A cuatro años de su creación, ARGENTINA + SUSTENTABLE. Disponible en: <https://argentinamassustainable.com.ar/?p=6168#:~:text=La%20Fundaci%C3%B3n%20Botellas%20de%20Amor,pl%C3%A1sticos%20de%20un%20solo%20uso>. (Accessed: 11 November 2024).
- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H. y Suh, S. (2020): "Degradation rates of plastics in the environment", *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), pp. 3494-3511. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
- DuPont (2004): "DuPont Ti-Pure Titanium Dioxide e Polymers, Light and Science of TiO2". *USA Du Pont de Nemours and Company*, 1-15. Disponible en: [https://www.chemours.com/Titanium\\_Technologies/en\\_US/tech\\_info/literature/Plastics/TiPure\\_datasheet\\_H\\_88382\\_7.pdf](https://www.chemours.com/Titanium_Technologies/en_US/tech_info/literature/Plastics/TiPure_datasheet_H_88382_7.pdf).
- Esparza, J. (2021): "Clasificación y afectación por residuos sólidos urbanos en la ciudad de La Plata, Buenos Aires, Argentina", *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37. Disponible en: <https://doi.org/10.20937/RICA.53758>
- Informe del estado del ambiente (2020): *Dirección Nacional de Sustancias y Productos Químicos*. MAyDS.
- Krug, P. C., Nanni, A. S., Escala, A., Rodríguez, M., Gschaider, C. y Mignaqui, V. (2023): "Indicadores biológicos de restauración ambiental en un ex basural a cielo abierto (Cuenca Matanza-Riachuelo, Municipio de Marcos Paz, Buenos Aires, Argentina)", *Ecosistemas*, 32(3), pp. 2440-2440. Disponible en: <https://doi.org/10.7818/ECOS.2440>

- Kumar, S. (2022): "Status of Sustainable Procurement Implementation. In: Understanding Sustainable Public Procurement", *Public Administration, Governance and Globalization Springer*, 21. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-08258-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-08258-0_3)
- Lazrak, C., Kabouchi, B., Hammi, M., Famiri, A. y Ziani, M. (2019): "Structural study of maritime pine wood and recycled high-density polyethylene (HDPE) plastic composite using Infrared-ATR spectroscopy, X-ray diffraction, SEM and contact angle measurements", *Case Studies in Construction Materials*, 10, pp. 00227. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00227>
- Mapleson, P., (2009): "Fine Tuning Titanium Dioxide", *Compounding World*. Disponible en: [www.compoungworld.com](http://www.compoungworld.com).
- Najafi, S. K. (2013): "Use of recycled plastics in wood plastic composites-A review", *Waste management*, 33(9), pp. 1898-1905. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.017>
- Onen, O. P. y Bassey, B. J. (2017): "Biodiversity of City Dumpsites: What Future for the Environment?", *IOSR Journal of Humanities and Social Science*, 22(2), pp. 0837-220201113119. Disponible en: <https://doi.org/10.9790/0837-220201113119>
- Platnieks, O., Barkane, A., Ijudina, N., Gaidukova, G., Thakur, V. K. y Gaidukovs, S. (2020): "Sustainable tetra pak recycled cellulose/Poly (Butylene succinate) based woody-like composites for a circular economy", *Journal of Cleaner Production*, 270, pp. 122321. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122321>
- Rebeiz, K. S. y Craft, A. P. (1995): "Plastic waste management in construction: Technological and institutional issues", *Resour Conserv Recy*, 15, pp. 245-57.
- Saidón, M. y Sorroche, S. (2024): "¿Qué hacer con los residuos?", *Buenos Aires Ciudad*. Disponible en: <https://www.teseopress.com/quehacerconlosresiduos>
- Selke, S. E. y Wichman, I. (2004): "Wood fiber/polyolefin composites", *Composites: Part A*, 35(3), pp. 321-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.010>
- SGAyDS (2018): "Informe del estado del Ambiente 2018", *Informe Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Ciudad de Buenos Aires, Argentina*.
- Signoret, C., Caro-Bretelle, A. S., Lopez-Cuesta, J. M., Ileny P. y Perrin, D. (2020): "Alterations of plastics spectra in MIR and the potential impacts on identification towards recycling", *Resources, Conservation and Recycling*, 161, pp. 104980. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104980>
- Sollazzo, M. y Caparrós, S. (2023): *Diseño y proyección de un relleno sanitario para el partido de Lobería, provincia de Buenos Aires*. Disponible en: <http://redi.ufasta.edu.ar:8082/jspui/handle/123456789/1886>
- Turku, I., Kesksaari, A., Kärki, T., Puurtinen, A. y Marttila, P. (2017): "Characterization of wood plastic composites manufactured from recycled plastic blends", *Composite Structures*, 161, pp. 469-476. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.11.073>
- Turner, A. y Filella, M. (2021): "Hazardous metal additives in plastics and their environmental impacts", *Environment International*, 156, pp. 106622. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106622>
- Vedrtnam, A., Kumar, S. y Chaturvedi, S. (2019): "Experimental study on mechanical behavior, biodegradability, and resistance to natural weathering and ultraviolet radiation of wood-plastic composites", *Composites Part B: Engineering*, 176, pp. 107282. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107282>
- Zheng, J. y Suh, S. (2019): "Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics", *Nature climate change*, 9(5), pp. 374-378. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0459-z>