

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<https://dx.doi.org/10.14482/inde.43.02.245.125>

Caracterización de residuos de espuma rígida de poliuretano como herramienta para la evaluación de su aprovechamiento

Characterization of rigid polyurethane foam waste as a tool to evaluate its use

ISABELLA F. LÓPEZ-RODRÍGUEZ *

JANNETH TORRES-AGREDO **

JHERSON E. DÍAZ-ROSERO ***

* Estudiante de Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Administración, Valle del Cauca (Colombia). Ingeniera ambiental. Orcid-ID: <https://orcid.org/0009-0006-5667-978X>. iflopezr@unal.edu.co

** Profesora titular, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Administración, Valle del Cauca (Colombia). Doctora en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de Materiales. Orcid-ID: <https://orcid.org/0000-0002-4094-8387>. jtorresa@unal.edu.co

*** Asesor, Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria, Laboratorio de Biotecnología & Nanotecnología, Valle del Cauca (Colombia). Doctor en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de Materiales. Orcid-ID: <https://orcid.org/0000-0002-2885-9365>. jhdiazr@sena.edu.co

Correspondencia: Janneth Torres Agredo. Carrera 32 n.º 12-00. Edificio 25. Piso 3, oficina 3180, Valle del Cauca (Colombia).

Subvenciones: Proyecto financiado por la Universidad Nacional de Colombia, mediante la convocatoria nacional para el fortalecimiento de la formación: Proyectos de investigación, creación artística e innovación de la Universidad Nacional de Colombia 2022-2024, modalidad única.



Resumen

Este trabajo expone la caracterización física, química, estructural y ambiental de residuos de espuma rígida de poliuretano (PUR), obtenidos de diferentes industrias de la región. Se seleccionaron 4 muestras para el estudio, a las cuales se les determinó la densidad, absorción de agua y composición química a través de análisis elemental y espectroscopia de rayos X (EDX). Además, se analizó su composición estructural a través de las técnicas de espectroscopía de Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), análisis por termogravimetría diferencial (DTG), microscopía confocal y microscopía electrónica de barrido (SEM). También se aplicaron ensayos de carácter ambiental, tales como Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) y toxicidad aguda en *Daphnia pulex*. Los resultados mostraron la presencia de los grupos funcionales usuales en la composición de una espuma de poliuretano rígida; sin embargo, se encontraron compuestos como Cl, Ti y anillos de benceno, que corresponden a la presencia de aditivos. Adicionalmente, a través de los ensayos ambientales aplicados se encontró la no toxicidad en las muestras. Se recomiendan estudios posteriores de emisión de gases de estos residuos cuando son sometidos a procesos térmicos.

Palabras clave: aprovechamiento de residuos, residuo de espuma rígida de poliuretano, residuos industriales, técnicas de caracterización.

Abstract

This work presents the physical, chemical, structural and, environmental characterization of rigid polyurethane foam (PUR) waste, from different industries in the region. Four samples were selected for the study, which included density, water absorption, and chemical composition through elemental analysis and X-ray spectroscopy (EDX). In addition, its structural composition was analyzed through the techniques of Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR), Differential Thermogravimetry Analysis (DTG), Confocal microscopy, and Scanning Electron Microscopy (SEM). Environmental tests such as Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) and acute toxicity in *Daphnia Pulex* were also applied. The results showed the presence of the usual functional groups in the composition of a rigid polyurethane foam; however, Cl, Ti, and benzene rings were found, which correspond to the presence of additives. Furthermore, through the applied environmental tests, non-toxicity was found in the samples. Subsequent studies of gas emissions from these wastes are recommended when they are subjected to thermal processes.

Keywords: characterization techniques, industrial waste, rigid polyurethane foam waste, waste reuse.

INTRODUCCIÓN

El poliuretano (PU) es un material utilizado en un amplio margen de aplicaciones en la industria, tales como en cojines de muebles o colchones, asientos de automóviles, adhesivos o aislamiento para refrigeradores, congeladores y construcción, entre otros. Los productos de PU se presentan en forma de espuma y se dividen en espuma flexible (PUF) y espuma rígida (PUR) [1]. La PUR es resultado de una reacción exotérmica entre el polioli e isocianato, en la que el primero se caracteriza por tener grupos hidroxilos (OH) mezclados con agentes espumantes, expansivos u otros aditivos, que condicionan la reacción y dan lugar a una estructura con más de 90 % de celdas cerradas. El componente de isocianato está compuesto por grupos funcionales (NCO) y formulado como Diisocianato de difenilmetano (MDI) [2]. La reacción entre los diferentes grupos funcionales de estas materias primas le dan a la espuma características especiales de apariencia, color, estabilidad térmica, resistencia a la combustión, además propiedades tanto de reactividad como de adherencia [3].

Es precisamente debido a sus buenas propiedades que el aumento de producción de PU es directamente proporcional al aumento de la población [4]. Por ejemplo, en América Latina se tienen informes empresariales en los que se menciona una producción de 1,22 millones de toneladas en 2023; además se menciona un crecimiento del 4,5 % entre 2024 y 2032, alcanzando un valor de 1,82 millones de toneladas al año [1]. Esto, a su vez, se ve reflejado en una generación alta de residuos de PU; por ejemplo, en el caso del Valle del Cauca (Colombia), las empresas almacenaron alrededor de 100 kg al mes de residuos de PUR en 2020. Así mismo, una empresa gestora reportó 1,2 toneladas de residuos de PUR en el primer semestre de 2021, y 1,5 toneladas en la ciudad de Cali y Yumbo (Colombia), respectivamente [5].

Debido a esta constante generación de residuos, actualmente se han llevado a cabo estudios sobre diferentes alternativas de disposición para residuos de PUR, los cuales van desde procesos de reciclaje tanto mecánicos como químicos, además de recuperación de energía [6]-[8]. Teniendo esto en cuenta, resulta importante analizar las características del material residual de estas espumas, con el fin de poder entender su naturaleza y buscar alternativas de aprovechamiento acordes, a la protección de la integridad tanto del ambiente como de la sociedad. Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo la caracterización integral de residuos de PUR, como paso inicial para lograr un aprovechamiento que apunte hacia la reincorporación del material a la industria.

METODOLOGÍA

Para este estudio se caracterizaron 4 residuos de espuma rígida de poliuretano (PUR) recolectados directamente de manera puntual en una empresa gestora de residuos peligrosos y especiales del Valle del Cauca. Se recolectó aproximadamente 1 metro cúbico de cada espuma.

Los residuos de PUR fueron molidos mediante un molino de cuchillas marca IKA MF10 Basic, de tal manera que quedaran de un tamaño idóneo para la aplicación de los análisis de caracterización física, química, estructural y ambiental. En este caso, el equipo tenía acoplado un tamiz de 1.5 mm, lo que permitió obtener una muestra homogénea.

Para el análisis físico de las muestras de espuma se realizó el ensayo de densidad aparente, de acuerdo con la norma ASTM D-1622. Para dicho ensayo se prepararon especímenes con proporciones medibles y mediante un calibrador se determinó su ancho, alto y profundidad, con el fin de calcular su volumen. Posteriormente, se tomó su peso y se aplicó la ecuación indicada en la norma mencionada. También se aplicó el ensayo de absorción de agua para las muestras de PUR de acuerdo con la norma ASTM D-2842 (procedimiento B).

Para el análisis químico de las muestras se realizaron ensayos de análisis elemental mediante un analizador elemental Determinador CHN628 Marca Leco de acuerdo con las siguientes condiciones: temperatura área de preparación de 24,7 °C, temperatura del área de ensayos de 20,5 °C y una presión atmosférica de 0,9 bares. Adicionalmente, para el análisis químico general se aplicó el ensayo de espectroscopia de rayos X (EDX), mediante el equipo EDX 7000 con una atmósfera de aire y un colimador, herramienta encargada de concentrar la radicación medida por el equipo, de 10 mm de diámetro.

Con respecto a la caracterización estructural de los residuos PUR, se aplicaron los ensayos de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) mediante un espectrómetro infrarrojo marca PerkinElmer. De igual forma, se realizó un análisis de termogravimetría mediante un analizador simultáneo TGA/DSC (SDT)- Q600 desde temperatura ambiente hasta 800 °C. En este caso se aplicó una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, tanto en una atmósfera de oxígeno como de nitrógeno.

Así mismo, con el fin de evaluar la estructura de las celdas de las muestras, se realizaron ensayos de microscopía confocal y microscopía electrónica de barrido (SEM). Para el caso de la primera se utilizó el equipo Leica Stellaris 5, mientras que para el ensayo SEM se utilizó el equipo NeoScope JCM 5000. Para el ensayo de SEM fue

necesario recubrir el material con una capa de oro, mediante el equipo Cressington Sputter Coater.

Para la caracterización ambiental se aplicaron los ensayos de corrosividad mediante la norma EPA SW 846-9040C, toxicidad en *Daphnia pulex* basado en la parte 3 de la Resolución 062 de 2007 del IDEAM, en conjunto con la norma OEDC-C2 Acute Toxicity for *Daphnia* de la Comunidad Europea y Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) mediante la norma EPA SW 846-1311.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización física

La tabla 1 presenta los resultados obtenidos para la densidad y la absorción de agua de las muestras de PUR.

TABLA 1. ABSORCIÓN Y DENSIDAD APARENTE PARA LAS MUESTRAS DE PUR DEL ESTUDIO

	Espuma PUR1	Espuma PUR2	Espuma PUR3	Espuma PUR4
Densidad aparente (kg/m ³)	35,68	37,07	35,35	78,64
Absorción de agua (%)	1,75	2,03	2,79	2,85

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 1 se observa que, para los resultados de densidad, las espumas PUR1, 2 y 3 obtuvieron valores muy similares entre 35,35 a 37,01 kg/m³; mientras que para la espuma PUR4, el valor obtenido para densidad aparente aumentó hasta 78,64 kg/m³. Comportamiento similar se evidenció en los resultados de absorción de agua, donde la espuma con menor valor obtenido fue la PUR1, mientras que la PUR4 obtuvo el mayor valor de absorción de agua.

En la literatura revisada, algunos autores obtuvieron valores de densidad como 37,6 kg/m³, 33,1 kg/m³ y 33,8 kg/m³ para muestras de PUR tanto de industrias refrigerantes como de industria de automóviles [6]; siendo valores similares a las espumas PUR 1, 2 y 3 de este estudio. Mientras que en otros estudios se reportan valores mayores de hasta 92,5 kg/m³ con muestras de residuos de techos de vehículos [7]. En este sentido, vale la pena mencionar que la PUR es un material bastante comprimible, en el que el valor de densidad puede presentar variaciones considerables según la presión utilizada en la fabricación del material [8].

Por otro lado, para el caso de la absorción de agua, los valores variaron en gran medida entre la literatura revisada, reportándose desde el 2 hasta 49 % en diferentes

muestras de residuos provenientes de la industria refrigerante; para el caso de la muestra con un 2 % de absorción de agua, corresponde a una espuma sometida a compresión en su proceso de fabricación, a diferencia de las otras [6]. Teniendo esto en cuenta, además de que las muestras recolectadas para este estudio fueron suministradas por una empresa de residuos que no tenía detalles sobre su fabricación, podría deducirse que en dichos procesos de elaboración de las diferentes muestras de PUR se incluyó de igual forma un proceso de compresión especial, explicando así los valores obtenidos entre 1,75 y 2,85 % para las 4 muestras. Dichos resultados son similares a otros estudios revisados en la literatura [9].

Caracterización química

Los resultados de análisis elemental se muestran en la tabla 2.

TABLA 2. RESULTADOS DE ANÁLISIS ELEMENTAL PARA LOS RESIDUOS PUR DEL ESTUDIO

Parámetro	PUR1	PUR2	PUR3	PUR4
Carbono (% en peso)	62,58	57,59	58,59	61,34
Hidrógeno (% en peso)	6,84	6,29	6,74	6,72
Nitrógeno (% en peso)	9,03	7,76	7,46	6,74

Fuente: elaboración propia.

De los resultados reportados en la tabla 1 se debe destacar el alto porcentaje de carbono, el cual se debe a la presencia de los grupos (-N=C=O) en el isocianato utilizado para su fabricación. Dicho isocianato reacciona con grupos hidroxilos del polioliol (-OH), formando los enlaces de uretano, lo que resulta en la cadena polimérica de la PUR, donde se incorporan los elementos de C, H y N. Teniendo en cuenta lo anterior, la cantidad de estos elementos varía según las proporciones utilizadas en la materia prima (isocianato y polioliol), lo cual está bajo el control del fabricante y sus necesidades específicas para el material en cuestión. No obstante, aunque el diisocianato es la porción reactiva de la composición y representa un papel importante para las propiedades finales del material, es el tipo de polioliol y su peso molecular el que influye más en las propiedades finales de la espuma, definiendo si esta será flexible o rígida. Los polioliolos de cadena corta (<1000 g/mol) son menos flexibles y contienen más grupos hidroxilo por mol, lo que genera, en consecuencia, una densidad de reticulación mayor con el diisocianato, proporcionando estabilidad y rigidez. Mientras que los polioliolos de cadena más larga (>3000 g/mol) contienen menos grupo hidroxilos e imparten propiedades flexibles a la matriz polimérica resultante [10].

En ese sentido, los resultados de análisis elemental pueden variar en medidas considerables dependiendo de la naturaleza del material utilizado en el estudio, pues en la literatura se reportan valores de 53,94 % de carbono [11] o 54 % [12]; así como valores más cercanos a los presentados en este estudio. Por ejemplo, materiales de PUR con 61,38 y 68,49 % de carbono, 5,51 y 5,76% para hidrógeno y 6,82 % para nitrógeno ó 61,4 % para carbono, 12,4 % para hidrógeno y 6,8 % para nitrógeno [13].

De esta forma, considerando los resultados expuestos en este estudio y en contraste con la literatura revisada, se puede deducir que para la fabricación de las muestras de PUR analizadas, la relación entre los grupos isocianato y grupos hidroxilos fue alta en comparación las otras muestras mencionadas en la literatura.

Por otro lado, resultados de análisis inorgánico de las muestras se presentan en la tabla 3, obtenidos a través del ensayo de fluorescencia de rayos X.

TABLA 3. RESULTADOS ENSAYO EDX PARA MUESTRAS DE PUR

Parámetro (% en peso)	Compuesto	PUR1	PUR2	PUR3	PUR4
Cloro	Cl	0,40	11,13	6,91	0,29
Silicio	SiO ₂	0,37	0,48	0,22	0,58
Hierro	Fe ₂ O ₃	0,12	N/A	N/A	0,30
Calcio	CaO	0,06	2,67	0,28	N/A
Fósforo	P ₂ O ₅	N/A	1,55	1,25	N/A
Titanio	TiO ₂	N/A	N/A	N/A	4,82

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la tabla 3, las muestras PUR2 y PUR3 contienen cloro como elemento predominante; mientras que para las muestras PUR1 y PUR4 se puede considerar poco significativo. En contraste con estos resultados, es importante resaltar que la PUR1 fue la que obtuvo mayores contenidos de C, H y N, por lo que puede deducirse que no se utilizaron aditivos especiales para darle características específicas, tales como la resistencia al calor, resistencia química, entre otras, ya que en su composición predominaron los elementos básicos de sus materias primas.

No obstante, retomando la composición alta de cloro en la PUR2 y PUR3, esta puede presentarse debido a la utilización de materias primas cloradas para el mejoramiento de propiedades como la resistencia térmica, mejorar propiedades mecánicas, así como la cantidad de celdas cerradas, tal como algunos autores lo reportan en sus estudios [14]. De manera similar, en la muestra PUR4 aparece un contenido significativo de titanio del 4,82 %, que podría deberse a la presencia de dióxido de titanio, el cual es utilizado para mejorar la formación de celdas cerradas [15], obtener una me-

mientras que las señales de número de onda entre $2873,17\text{ cm}^{-1}$ y $2870,61\text{ cm}^{-1}$, para PUR4 y PUR1, respectivamente, corresponden a los estiramientos asimétricos de los enlaces (C-H) del grupo metilo ($-\text{CH}_3$). Es importante aclarar que cuando se presenta un estiramiento asimétrico significa que las moléculas de H se están estirando hacia direcciones contrarias con respecto a la molécula de C, lo que requiere más energía e indica que los enlaces tienen mayor fuerza [19].

Por otro lado, se identificaron señales a $1268,11\text{ cm}^{-1}$, presentada para PUR2, que se asigna a la vibración de tensión de un enlace (C-N), posiblemente de una amina aromática, así como las señales observadas entre $1223,37\text{ cm}^{-1}$ y $1221,65\text{ cm}^{-1}$, para PUR1 y PUR4, respectivamente, que corresponden a una vibración de tensión del enlace (C-O), características de un éter aromático. Por otro lado, las señales observadas entre los números de onda $1307,48\text{ cm}^{-1}$ y $1306,51\text{ cm}^{-1}$, de PUR3 y PUR1, respectivamente, aunque también sugieren una vibración de tensión en un enlace (C-O), indican la presencia de grupos éster aromático. De manera similar, las señales entre los números de onda $1041,3\text{ cm}^{-1}$ y $1016,55\text{ cm}^{-1}$ para la muestra PUR3 se asignan al estiramiento simétrico del grupo éter aromático o vinílico (C=C-O-R). Dichos resultados van de la mano con lo expuesto por otros autores, quienes detectan la presencia de una amina aromática [20].

De igual forma, se detectaron señales correspondientes a la vibración de flexión de un anillo aromático, entre los números de onda $1597,54\text{ cm}^{-1}$ y $1593,45\text{ cm}^{-1}$, para PUR2 y PUR1, respectivamente, así como otras señales entre $1514,45\text{ cm}^{-1}$ y $1505,48\text{ cm}^{-1}$, para PUR3, PUR4 y PUR1, lo cual respalda la presencia de un anillo bencénico en las muestras. Existen resultados previos acordes con los picos detectados, tales como la lectura de 1600 cm^{-1} , la cual se atribuyó a la presencia de anillos bencénicos en los análisis a la muestra de PUR comercial realizados por otros autores [21]. Es importante resaltar que en la bibliografía se expresa que los aromáticos fortalecen las propiedades retardantes de llama de la espuma, por lo que ciertos autores proponen polioles formulados con elementos retardantes de llama (P, N y Si) para mejorar dicha propiedad [22]. De igual forma, resulta importante aclarar que también se reporta el incremento de otras características, tales como las propiedades mecánicas de la espuma, un mejor comportamiento auto extingüible posterior al incendio, así como reducción de la producción de CO_2 ; por lo que la presencia de anillos bencenos representa una mejora en el rendimiento de las espumas de poliuretano. No obstante, al mismo tiempo, la presencia de los anillos benceno representan un riesgo en caso de su liberación durante un tratamiento térmico del residuo, ya que tanto para las personas como para animales la exposición al benceno implica un aumento en alteraciones cromosómicas, lo que a largo plazo se ve reflejado en el desarrollo de cánceres como leucemias y linfomas [23].

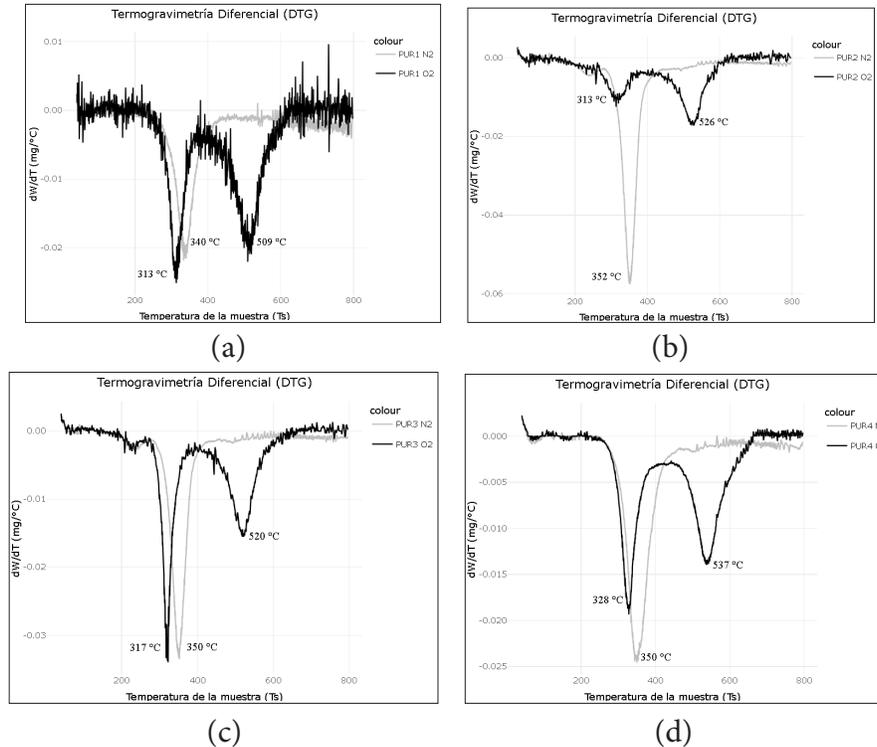
Por otro lado, con respecto a vibraciones específicas de la PUR3, se detectaron lecturas de onda inusuales en la composición regular de la PUR, tales como una banda a $2278,63 \text{ cm}^{-1}$, lo cual sugiere la presencia de una vibración de estiramiento en un enlace triple (característicos en números de onda entre 2000 cm^{-1} y 2500 cm^{-1}), indicando la existencia de un grupo alquino ($-\text{C}\equiv\text{C}-$), o posiblemente un grupo nitrilo alifático ($-\text{C}\equiv\text{N}-$), ya que ambas vibraciones pueden ocurrir en esta longitud de onda. Otra vibración importante se observa a $2168,28 \text{ cm}^{-1}$, la cual se atribuye al estiramiento de enlace ($-\text{C}\equiv\text{N}-$) del grupo nitrilo mencionado anteriormente. Asimismo, se observó una señal a $2109,06 \text{ cm}^{-1}$, la cual puede ser asignada al estiramiento de enlace ($-\text{C}\equiv\text{C}-$) del grupo alquino mencionado previamente.

Los resultados presentados en el párrafo anterior obtuvieron un porcentaje de absorción del 92, al 95,40 %, por lo que podría no resultar relevante la presencia de los enlaces del grupo alquino y nitrilo alifático comparados con los enlaces discutidos en párrafos anteriores que presentaban % de absorción de hasta 66,22 %. No obstante, resulta importante analizar la presencia de dichos grupos alquinos y nitrilos alifáticos debido a lo inusual de su detección en los ensayos cuando se trata de muestras de PUR. Por lo tanto, se puede citar a ciertos autores que mediante un proceso de cicloadición de azida-alquino obtuvieron una espuma con grupos alquinos y con mejor densidad de reticulación, la cual se define como la cantidad de enlaces cruzados por unidad de volumen o masa del polímero, por lo que su aumento puede verse reflejado en la mejoría de propiedades como el aislamiento térmico, resistencia y rigidez [24] y [25]. Por otro lado, otros autores utilizaron polioles que contenían grupos alquino terminales junto con la síntesis de un monofosfato de ácido alquilo, y obtuvieron una espuma con enlaces alquinos que presentó mejorías notables en la resistencia a la llama [26].

Considerando lo expuesto en el párrafo anterior, durante el proceso de síntesis de las espumas que presentaron estos enlaces se pudo haber utilizado aditivos con enlaces alquinos con el fin de mejorar las propiedades del producto. Sin embargo, ya que no se tiene acceso a la información de las muestras, debido a que son residuos obtenidos de una empresa gestora, también debe tenerse en cuenta la posibilidad de que sean impurezas obtenidas en el centro de acopio donde se tenían almacenadas.

Así mismo, las muestras de PUR fueron analizadas a través de la técnica de termogravimetría. En las figuras 2 (a-d) se presentan las gráficas obtenidas a partir del ensayo de termogravimetría diferencial (DTG), aplicados tanto en atmósfera de O_2 como de N_2 . En las gráficas se observa que para la atmósfera de O_2 se presentaron dos zonas importantes de degradación: el primero entre $300-328^\circ\text{C}$ y el segundo entre $509-537^\circ\text{C}$. Mientras que para la atmósfera de N_2 solo se presentó una zona importante de cambio de masa, el cual osciló en todos los ensayos entre 337 a 359°C . Estos

resultados coinciden con otros autores que obtuvieron, de igual forma, picos de velocidad de cambio de masa en 350°C para un ambiente de N₂ (25) y (18). Es importante resaltar que el pico presentado para PUR2 tan marcado en atmósfera de N₂ se debe a que fue el punto en el que la tasa de cambio de masa presentó mayor variación con respecto al aumento de temperatura; es decir, en un pequeño rango de temperatura, la masa disminuyó más en comparación con el resto del proceso de descomposición.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 2. GRÁFICAS DE DTG DE LOS RESIDUOS PARA ATMÓSFERAS DE N₂ Y O₂ (A) PUR1 (B) PUR2 (C) PUR3 (D) PUR4

En la tabla 4 se presentan los valores encontrados de la pérdida total de masa, a través del ensayo de DTG para las dos atmósferas aplicadas en cada uno de los residuos evaluados de PUR. De manera general, se observa mayor pérdida de masa para la atmósfera de O₂ donde se presenta una degradación completa de la muestra PUR2. Para el caso de la muestra PUR3, se presentó un comportamiento atípico, donde en la atmósfera de O₂ se presentó mayor degradación; sin embargo, en la atmósfera de N₂ se obtuvo un total de degradación muy bajo (48,97 %). Este comportamiento representa una mayor resistencia térmica en un ambiente anaeróbico, en comparación con las demás muestras del estudio.

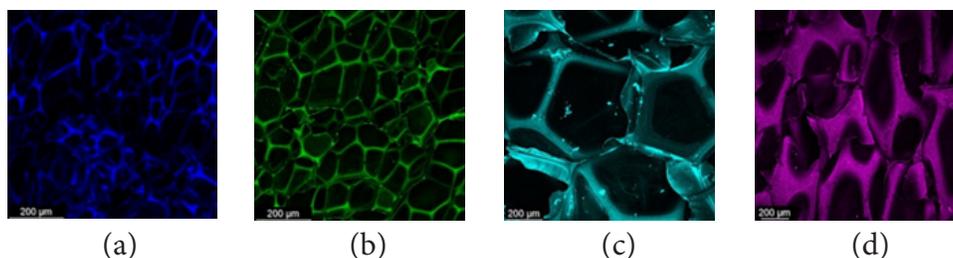
TABLA 4. PÉRDIDA TOTAL DE MASA A TRAVÉS DEL ENSAYO DE DTG PARA LAS MUESTRAS DE PUR

Pérdida total de masa (%w/w)	Atmósfera N ₂	Atmósfera O ₂
PUR1	74,56	89,52
PUR2	70,60	100,00
PUR3	48,97	86,11
PUR4	88,88	70,92

Fuente: elaboración propia.

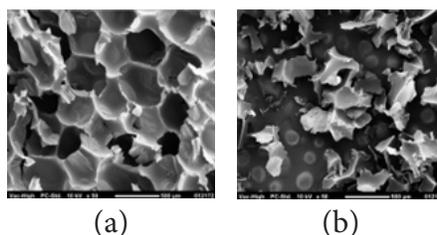
Los resultados presentados en la tabla 4 son similares a los reportados por otros autores, donde el proceso en atmósfera de N₂ también se caracteriza por una zona de degradación significativa y un total de pérdida de masa de entre 70 y 75% [27], [28] y [29]. Al igual que otros estudios en los que se evidencian dos zonas de degradación significativas para un ambiente de O₂, junto con una pérdida de masa que oscila entre 80 y 90 % [30] y [31], e incluso pérdidas de masa de más del 90 % [32].

Adicionalmente, se aplicó la técnica de confocal y SEM con el fin de observar la morfología de las muestras de PUR. Las imágenes se presentan en las figuras 3 y 4, respectivamente.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 3. IMÁGENES CONFOCAL PARA LAS MUESTRAS A) PUR1, B) PUR2, C) PUR3, D) PUR4



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 4. (A) SEM DE LA PUR4 CORTADA TRANSVERSALMENTE. (B) SEM DE LA PUR4 TRITURADA

En la figura 3 se puede destacar que PUR1 y PUR2 presentan un tamaño de celda más pequeño, comparadas con PUR3 y PUR4, siendo la PUR3 la que obtuvo mayor tamaño de celda. No obstante, la muestra PUR4 fue la que presentó mayor grosor de las paredes de las celdas, además de ser la única que obtuvo una silueta ovalada; dichas características resultan de gran importancia a la hora de utilizar el residuo en matrices de materiales, ya que puede aportar a la estabilidad y resistencia a impactos [33]. Por otro lado, en la figura 4 se pueden apreciar celdas cerradas y estimar que su diámetro más angosto es aproximadamente 420 - 440 μm , mientras que el más ancho alcanzó un poco más de 500 μm . Resultados cercanos a los obtenidos por ciertos autores, que reportaron un valor de 378,4 μm [34]. Incluso se tiene registro de valores menores, 200 μm , por otros autores [8] y [35].

La aplicación de estos ensayos de carácter estructural resulta de gran importancia para el análisis del comportamiento de la espuma en aprovechamiento de sus residuos, tales como su adición en matrices de cemento o en la síntesis de nueva espuma rígida de poliuretano en base a materiales reciclados. Para este último caso se tienen reportes sobre el uso de PUR a material virgen, donde se disminuyó el tamaño de celda, provocando cambios en sus propiedades mecánicas [33]. En la figura 4b se muestra una imagen de la PUR4 después de un proceso de molienda. Este proceso ha sido reportado en la literatura, en la que se mencionan buenos comportamientos mecánicos en concretos adicionados con el residuo, debido a la adherencia de este a la matriz cementicia [36], [35].

Caracterización ambiental

En las tablas 5 y 6 se presentan los resultados de los ensayos de toxicidad aguda en *Daphnia pulex* y el ensayo de TCLP, respectivamente. En este caso, estos ensayos solamente fueron aplicados a las muestras PUR1 y PUR4, esto con el fin de compararlas en términos de toxicidad ambiental, ya que ambas muestras presentaron diferencias en los resultados de absorción de agua, densidad aparente y EDX.

TABLA 5. RESULTADOS TOXICIDAD AGUDA DAPHNIA PULEX

Parámetros	Muestras PUR	
	PUR1	PUR4
Toxicidad aguda 24 h	$\leq 10,0$	15,0
Toxicidad aguda 48 h	$\leq 10,0$	18,3

Fuente: elaboración propia.

Para el caso del análisis de toxicidad aguda para *Daphnia pulex*, ensayo que consiste en la evaluación de la potencia tóxica de una sustancia contaminante (en este caso PUR) sobre una pulga de agua, se evaluó la toxicidad inicial a 24 h y una final a 48 h. Para el caso de la muestra PUR1, esta obtuvo un porcentaje de muerte tanto inicial como final igual o menor al 10 %, mientras que la muestra de PUR4 obtuvo resultados superiores, siendo entonces más tóxica que la PUR1. Sin embargo, teniendo en cuenta lo estipulado en la Resolución 0062 del IDEAM de 2005, en su sección 6.3, la cual se adapta a lo estipulado en la OECD C2 Acute Toxicity for *Daphnia*, al no obtener un valor mayor a 50 % de mortandad, ninguna de las dos muestras se puede considerar tóxica para *Daphnia pulex*.

TABLA 6. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE CORROSIVIDAD Y TCLP PUR1 Y PUR4

Análisis	Corrosividad		TCLP							
Parámetro	Corrosividad electrométrica (pH)	Corrosividad Reserva ácido-álcali	Arsénico total (TCLP)	Cadmio total (TCLP)	Cromo total (TCLP)	Mercurio total (TCLP)	Bario total (TCLP)	Plomo total (TCLP)	Selenio total (TCLP)	Plata total (TCLP)
Unidad	Unidades	Corr / No-Corr	mg As/L	mg Cd/L	mg Cr/L	mg Hg/L	mg Ni/L	mg Pb/L	mg Zn/L	mg Ag/L
PUR1	8,36	NoCorr	<0,0025	<0,01	<0,1	<0,001	<0,5	<0,1	<0,0025	<0,05
PUR4	9,09	NoCorr	<0,0025	<0,01	<0,1	<0,001	<0,5	<0,1	<0,0025	<0,05

Fuente: elaboración propia.

Con base en la tabla 6, ninguno de los parámetros analizados presentó un resultado relevante de peligrosidad. No obstante que este análisis se realizó con base en la Resolución 4741 de 2005, tabla 3 (“Concentraciones máximas de contaminantes para la prueba TCLP”), la cual, a su vez, fue adaptada con lo regulado por la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (US EPA, 2015) [36], es importante aclarar que se deben realizar análisis complementarios de toxicidad en suelo y demás organismos que refuercen los resultados obtenidos en este estudio, ya que en la literatura revisada no se evidenciaron análisis de este tipo para la caracterización de PUR. Sin embargo, es importante aclarar que el riesgo de liberación de sustancias tóxicas por parte de la PUR se presenta durante su descomposición térmica, ya que es durante la combustión en la que se tienen registros de liberación de gases como monóxido de carbono (CO), cianuro de hidrógeno (HCN) y óxidos de nitrógeno [37].

CONCLUSIONES

Se evidenció que entre las muestras de PUR analizadas se pueden presentar diferencias notorias en cuanto a caracterización química o física, ya que dichos parámetros

se definen en gran instancia por los aditivos usados en la fabricación del material. Para el caso de la PUR4, con mayor densidad en comparación con las otras espumas, dentro de su composición se detectó titanio y obtuvo el tamaño de celdas más pequeño según los resultados de la técnica de confocal. Sería interesante evaluar su comportamiento como adición a matrices de diferentes materiales, ya que puede otorgar aligeramiento del material y mejorar la capacidad de absorción al impacto.

En cuanto a la caracterización ambiental, ninguna de las muestras obtuvo resultados con características tóxicas para lixiviados o en la exposición del material a organismos acuáticos como *Daphnia pulex*, por lo que por sí solos los residuos de PUR no demostraron toxicidad según el alcance de la investigación. Sin embargo, será importante realizar análisis de liberación de compuestos tóxicos, cuando este residuo es sometido a diversas temperaturas.

Con el fin de poder evaluar una alternativa de aprovechamiento íntegra para residuos de PUR, estos ensayos son de alta importancia, ya que permiten determinar cuáles alternativas pueden ser las más eficientes. Es así como en el marco de la economía circular y los objetivos de desarrollo sostenible, es importante seguir caracterizando materiales de alto impacto para los rellenos sanitarios y demás metodologías tradicionales de disposición de residuos; de manera que se puedan evaluar alternativas innovadoras que los reincorporen a los procesos productivos.

REFERENCIAS

- [1] “Mercado de Poliuretano en América Latina, Tamaño, Cuota, 2024-2032”, EMR ACLIGHT Enterprise. [En línea]. Disponible en: <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-poliuretano-en-america-latina>. [Accedido: 13 febrero 2024].
- [2] M. G. Acevedo y M. L. R. Vázquez, “Caracterización de la espuma rígida de poliuretano expandido como impermeabilizante de cubiertas”, *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, vol. 10, n.º. 2, pp. 1-12, 2016.
- [3] N. Gama, A. Ferreira y A. Barros-Timmons, “Polyurethane Foams: Past, Present, and Future”, *Materials*, vol. 11, no. 10, p. 1841, sep. 2018. doi: 10.3390/ma11101841.
- [4] M. Kazemi, S. Faisal Kabir y E. H. Fini, “State of the art in recycling waste thermoplastics and thermosets and their applications in construction”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 174, p. 105776, nov. 2021. doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105776.
- [5] D. F. Victoria Castillo, “Recolección de residuos de PUR por parte de la empresa R.H”, 10 de junio de 2022.

- [6] R. Gómez-Rojo, L. Alameda, Á. Rodríguez, V. Calderón y S. Gutiérrez-González, “Characterization of Polyurethane Foam Waste for Reuse in Eco-Efficient Building Materials”, *Polymers*, vol. 11, no. 2, p. 359, feb. 2019. doi: 10.3390/polym11020359.
- [7] L. A. Cuenca-Romero, R. Arroyo, Á. Alonso, S. Gutiérrez-González y V. Calderón, “Characterization properties and fire behaviour of cement blocks with recycled polyurethane roof wastes”, *Journal of Building Engineering*, vol. 50, p. 104075, junio 2022. doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104075.
- [8] M. Kismi, P. Poullain y P. Mounanga, “Transient Thermal Response of Lightweight Cementitious Composites Made with Polyurethane Foam Waste”, *Int J Thermophys*, vol. 33, no. 7, pp. 1239-1258, julio 2012. doi: 10.1007/s10765-012-1244-7.
- [9] VACLAVIK, V., et al. “Recycling Polyurethane Foam and its Use as Filler in Renovation Mortar with Thermal Insulating Effect”, *Industrial and Technological Applications of Transport in Porous Materials*, 2013, pp. 141-170.
- [10] J. Sternberg, O. Sequerth y S. Pilla, “Structure-property relationships in flexible and rigid lignin-derived polyurethane foams: A review”, *Materials Today Sustainability*, p. 100643, dic. 2023. doi: 10.1016/j.mtsust.2023.100643.
- [11] I. Santamaría Vicario, L. Alameda Cuenca-Romero, S. Gutiérrez González, V. Calderón Carpintero y Á. Rodríguez Saiz, “Design and Characterization of Gypsum Mortars Dosed with Polyurethane Foam Waste PFW”, *Materials*, vol. 13, no. 7, p. 1497, marzo 2020. doi: 10.3390/ma13071497.
- [12] R. Briones-Llorente, R. Barbosa, M. Almeida, E. A. Montero García y Á. Rodríguez Saiz, “Ecological Design of New Efficient Energy-Performance Construction Materials with Rigid Polyurethane Foam Waste”, *Polymers*, vol. 12, no. 5, p. 1048, mayo 2020. doi: 10.3390/polym12051048.
- [13] C. Junco Petrement, “Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano: obtención, caracterización y puesta en obra”, Universidad de Burgos, 2012. doi: 10.36443/10259/209.
- [14] B. Czupryński, J. Paciorek-Sadowska y J. Liszkowska, “Modifications of the rigid polyurethane–polyisocyanurate foams”, *J of Applied Polymer Sci*, vol. 100, no. 3, pp. 2020-2029, mayo 2006. doi: 10.1002/app.22604.
- [15] M. Modesti, A. Lorenzetti y S. Besco, “Influence of nanofillers on thermal insulating properties of polyurethane nanocomposites foams”, *Polymer Engineering & Sci*, vol. 47, no. 9, pp. 1351-1358, sep. 2007. doi: 10.1002/pen.20819.
- [16] W. Fan, Q. Gao, J. Xiang, J. Yan, Y. Chen y H. Fan, “Synergistic effect of silica aerogel and titanium dioxide in porous polyurethane composite coating with enhanced passive radiative cooling performance”, *Progress in Organic Coatings*, vol. 183, p. 107763, oct. 2023. doi: 10.1016/j.porgcoat.2023.107763.

- [17] P. Bartczak et al., “Closed-cell polyurethane spray foam obtained with novel TiO₂-ZnO hybrid fillers -mechanical, insulating properties and microbial purity”, *Journal of Building Engineering*, vol. 65, p. 105760, abril 2023. doi: 10.1016/j.jobe.2022.105760.
- [18] C. Sun et al., “In-situ construction of particle-accumulated hydrophobic packing layer from rigid polyurethane wastes for gas pre-dehydration”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 643, p. 128694, junio 2022. doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.128694.
- [19] P. Mondragón Cortez, *Principios y aplicaciones de la espectroscopia de infrarrojo en el analisis de alimentos y bebidas*. Jalisco, Mexico, 2020 [En línea]. Disponible en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5f89fd7801268.pdf
- [20] L. Jiao, H. Xiao, Q. Wang y J. Sun, “Thermal degradation characteristics of rigid polyurethane foam and the volatile products analysis with TG-FTIR-MS”, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 98, no. 12, pp. 2687-2696, dic. 2013. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.032.
- [21] J. Li, H. Zhu, D. Fang, X. Huang, C. Zhang y Y. Luo, “Mechanochemistry recycling of polyurethane foam using urethane exchange reaction”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 11, no. 3, p. 110269, junio 2023. doi: 10.1016/j.jece.2023.110269.
- [22] Q. Gong, L. Qin y N. Wang, “Combining hyperbranched polyol containing three flame retardant elements, P, N and Si, with expanded graphite to improve the flame retardancy of bio-based rigid polyurethane foam”, *European Polymer Journal*, vol. 196, p. 112307, sep. 2023. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2023.112307.
- [23] A. Zubizarreta Solá et al., “Revisión de la literatura sobre efectos nocivos de la exposición laboral a hidrocarburos en trabajadores en ambiente externo”, *Medicina y Seguridad del Trabajo*, vol. 64, no. 252, pp. 271-294, sep. 2018.
- [24] R. H. Cooke et al., “Polyurethane polymers cured via azide-alkyne cycloaddition”, *Progress in Organic Coatings*, vol. 151, p. 106047, feb. 2021. doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.106047.
- [25] A. A. Alzahrani et al., “Fully recoverable rigid shape memory foam based on copper-catalyzed azide-alkyne cycloaddition (CuAAC) using a salt leaching technique”, *Polym. Chem.*, vol. 9, no. 1, pp. 121-130, dic. 2017. doi: 10.1039/C7PY01121K.
- [26] A. M. Borreguero et al., “A novel click-chemistry approach to flame retardant polyurethanes”, *Reactive and Functional Polymers*, vol. 73, no. 9, pp. 1207-1212, sep. 2013. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2013.06.003.
- [27] Y. Ding et al., “Characterization of pyrolysis behavior for rigid polyurethane foam wastes with different densities through TGA-FTIR-DSC-MCC and Hill Climbing Optimization methods”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 177, p. 106326, enero 2024. doi: 10.1016/j.jaap.2023.106326.

- [28] S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, C. Junco y V. Calderón, “Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes”, *Construction and Building Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 653-658, marzo 2012. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.055.
- [29] H. Stančin et al., “Thermogravimetric and kinetic analysis of biomass and polyurethane foam mixtures Co-Pyrolysis”, *Energy*, vol. 237, p. 121592, dic. 2021. doi: 10.1016/j.energy.2021.121592.
- [30] Z. Yao et al., “Probing the combustion and pyrolysis behaviors of polyurethane foam from waste refrigerators”, *J Therm Anal Calorim*, vol. 141, no. 3, pp. 1137-1148, agosto 2020. doi: 10.1007/s10973-019-09086-8.
- [31] K. Pielichowski, K. Kulesza y E. M. Pearce, “Thermal degradation studies on rigid polyurethane foams blown with pentane”, *J of Applied Polymer Sci*, vol. 88, no. 9, pp. 2319-2330, mayo 2003. doi: 10.1002/app.11982.
- [32] P.-H. Lin, C.-H. Ko, F.-C. Chang, S.-H. Tu y C.-J. Lin, “Oxidation behavior and decomposition kinetics of mixed-waste biomass material”, *BioRes*, vol. 18, no. 1, pp. 778-791, nov. 2022. doi: 10.15376/biores.18.1.778-791.
- [33] D.-A. Șerban y E. Linul, “Fatigue behaviour of closed-cell polyurethane rigid foams”, *Engineering Failure Analysis*, vol. 154, p. 107728, dic. 2023. doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107728.
- [34] C. Yang, Z.-H. Zhuang y Z.-G. Yang, «Pulverized polyurethane foam particles reinforced rigid polyurethane foam and phenolic foam», *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 131, n.o 1, p. n/a-n/a, enero 2014. doi: 10.1002/app.39734.
- [35] P. Mounanga, W. Gbongbon, P. Poullain y P. Turcry, “Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, no. 9, pp. 806-814, oct. 2008. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.06.007.
- [36] O. US EPA, “SW-846 Test Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure” [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-1311-toxicity-characteristic-leaching-procedure>. [Accedido: 6 junio, 2022].
- [37] Z. Xu, J. Zhan, Z. Xu y X. Mu, “Analysis of the pyrolysis process of ionic liquid-based flame retardant rigid polyurethane foam”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, nov. 2023. doi: 10.1016/j.jiec.2023.11.018.