



# BOLETÍN TÉCNICO

PITRA-LanammeUCR

Volumen 13, N.º 8, Diciembre 2022

Recuperación de residuos valorizables en el diseño de nuevos materiales sostenibles para infraestructura vial como estrategia para incidir en la economía circular de nuestro país

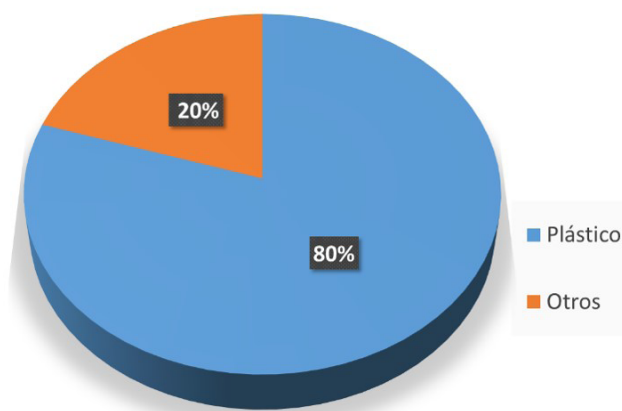
Ing. Rafael Ernesto Villegas Villegas. M. Eng

✉ [rafael.villegas@ucr.ac.cr](mailto:rafael.villegas@ucr.ac.cr)

---

## Introducción

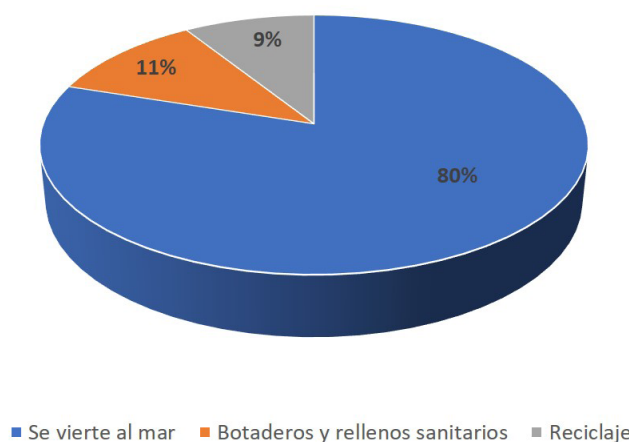
El exceso de consumo de productos de un solo uso ha resultado en un impacto considerable en el medio ambiente. En este sentido, los desechos plásticos representan un costo social extremadamente alto. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), tal como se muestra en la Figura 1, estima que 6,4 millones de toneladas de basura acaban en los océanos, a un ritmo alarmante de 200 kg por segundo: los plásticos representan el 80% de estos desechos (UNEP, 2009).



**Figura 1. Distribución de desechos sólidos depositados en los océanos a nivel mundial.**

**Fuente: Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2009).**

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), citado por Grajales tal como se describe en la Figura 2, Costa Rica desecha por día cerca de 550 toneladas de plástico, las cuales se distribuyen de la siguiente manera: 80 % (440 toneladas) se lanza al mar; 11 % (60,5 toneladas) queda en botaderos y el ambiente; y sólo el 9 % (49,5 toneladas) es reciclado (Grajales, 2020).



**Figura 2. Destino de los desechos sólidos en Costa Rica.**

**Fuente: (Grajales, 2020).**

Ante el panorama anterior el problema actual radica en: ¿cómo aprovechar los residuos valorizables en el diseño de nuevos materiales sostenibles para infraestructura vial con el fin de reducir la cantidad que se vierte al medio ambiente?

Esto conlleva a analizar la importancia de la utilización de residuos como modificante en el diseño de nuevos materiales sostenibles para infraestructura, con el fin de dar una solución a un problema país; no obstante, la dificultad radica en el manejo de los desechos sólidos, como el plástico, y su empleo como un producto con utilidades económicas, sociales y ambientales. Para esto son necesarias nuevas técnicas de diseño, control de calidad y manufactura que contribuyan al desarrollo sostenible, en los tres ejes (económico, social y ambiental) y al buen desempeño de los proyectos.

Ante este contexto, es necesario enmarcar la infraestructura en el marco de la economía circular, a fin de que responda al cambio de pensamiento científico, empresarial y político que se ha visto enfrentado ante la necesidad de desarrollar estrategias que permitan hacer posible la sostenibilidad ambiental, sin dejar de lado los retos sociales y económicos del mundo actual (Sandoval et al., 2017).

## El papel de la gestión de proyectos sostenibles en el diseño de nuevos materiales para infraestructura

La sostenibilidad es uno de los principales retos actuales porque considera que el nivel de consumo no comprometa los recursos naturales para las próximas generaciones. La integración de los elementos de sostenibilidad en los proyectos viales aún no es frecuentemente utilizada, por tanto, es importante dotar a la construcción de obras de infraestructura de elementos sostenibles en su gestión. Según Shen et al. 2010, la construcción sostenible promueve el equilibrio entre la protección del medio ambiente, desarrollo económico y desarrollo social.

Pearce (2008) propone el concepto de gestión integral de costos que consiste en considerar tres aspectos desde el inicio del proyecto: (1) el impacto de decisiones del diseño o la construcción sobre costos a lo largo de todo el ciclo de vida; (2) las oportunidades para mejorar el diseño, minimizando el costo inicial y; (3) externalizarlo para que represente una mejor decisión en términos de costos. Concluye que el desafío para los gerentes de proyecto, diseñadores y otros es identificar y justificar el uso de elementos de sostenibilidad que no influyan en el costo o que ahorren costos.

Marcelino-Sabadá et al. (2015) presenta el modelo conceptual de las cuatro dimensiones de proyectos sostenibles. El primero se centra en productos de proyectos sostenibles; el segundo sobre los procesos que ayudan a incluir la sostenibilidad en el proyecto; el tercero, en organizaciones comprometidas con la sostenibilidad y el cuarto, en personal capacitado y comprometido con la sostenibilidad, tal como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3. Relación entre la gestión de proyectos y la sostenibilidad.**

**Fuente: Marcelino-Sabadá (2015).**

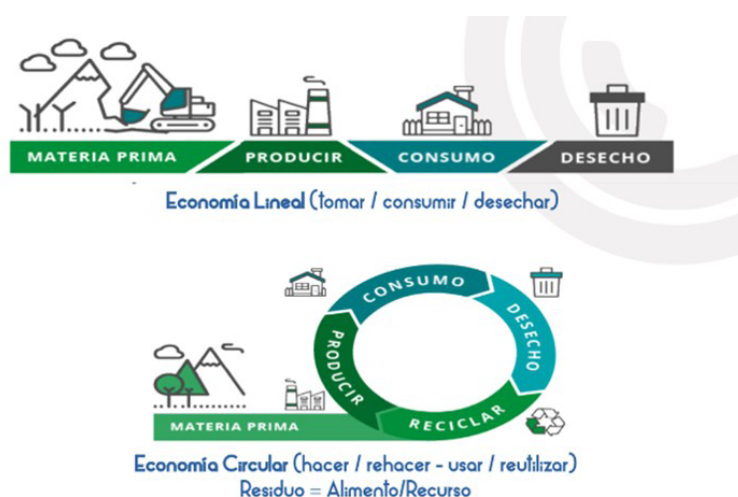
Por otro lado, el equipo directivo, que son los gestores de proyecto, trabaja lo relacionado con los tres aspectos principales de la sostenibilidad: social, económico y ambiental. La participación de las partes interesadas es fundamental para acotar el alcance del proceso o producto sostenible en un proyecto específico (Achterkamp y Vos, 2006).

Para consolidación de la gestión de proyectos, es muy importante tener claros y bien establecidos los índices utilizados para evaluar la sostenibilidad de ese proyecto. Una de las primeras dificultades en la gestión sostenible de un proyecto es especificar la estrategia de sostenibilidad, la gestión debe considerar las partes interesadas para conectar la estrategia con asuntos empresariales, sociales y éticos (Singh et al., 2007).

## El papel de la economía circular en el diseño de nuevos materiales sostenibles para infraestructura

El modelo económico lineal, vigente hoy día, consistente en producir, consumir y desechar, ha estado en el corazón del desarrollo industrial y ha generado un nivel de crecimiento sin precedentes; no obstante, está alcanzando sus límites físicos, como se muestra en la Figura 4, donde tal modelo no es sostenible (Lacy et al., 2016).

Una economía circular es reconstituyente y regenerativa por diseño, y se propone mantener siempre los productos, componentes y materiales en sus niveles de uso más altos (Cerdá et al., 2016), tiene como objetivo mantener los productos, componentes y materiales en su mayor utilidad y valor en todo momento (BSI, 2017), es decir, apoya la recirculación de materiales y energía dentro de los mismos sistemas de productos o alternativos y, por lo tanto, la eliminación de desechos evitables (Swagemakers et al., 2018).



**Figura 4. Modelos de Economía Lineal y Economía Circular.**

**Fuente: Cardozo, (2018).**

De acuerdo a Mantalovas y Di Mino (2019) la economía circular abarca los principios de múltiples escuelas de pensamiento, como ecología industrial y simbiosis, economía del rendimiento, biomimética, cuna a cuna, economía azul, diseño regenerativo, producción más limpia y natural.

Mantalovas y Di Mino (2019) en un estudio realizado aseveraban que se pueden identificar dos tipos diferentes de productos; productos que después de su ciclo de vida pueden volver al ciclo técnico (duraderos) o al ciclo biológico (consumibles). Esta definición se basa en tres principios:

- Diseñar residuos y contaminación

Esto incluye la detección y exclusión de lo negativo, las externalidades de las actividades económicas, que pueden causar daños a la salud humana y los ecosistemas, minimizando la emisión de sustancias tóxicas, gases de efecto invernadero y eliminando agua, aire y contaminación del suelo.

- Mantener los productos, componentes y materiales en su valor más alto y en uso

Adaptando el proceso de diseño para apoyar la reutilización, la remanufactura y el reciclaje de componentes y materiales, biológicos o técnicos, para mantenerlos en circulación dentro del mismo u otro sistema de producto. En sistemas circulares, es posible maximizar el uso y el valor de varios componentes que han sido diseñados de tal manera al conectarlos en cascada a diferentes aplicaciones o sistemas de productos.

- Regenerar los sistemas naturales

La economía circular es capaz de soportar el flujo de nutrientes o materiales técnicos dentro del mismo sistema, generando condiciones ideales para la regeneración y por lo tanto, la mejora del capital natural.

La economía circular se refiere a una economía industrial que es restaurativa por intención; pretende confiar en las energías renovables; minimiza, rastrea y elimina el uso de productos químicos tóxicos y erradica los desechos a través de un diseño cuidadoso. El término va más allá de mecánica de producción y consumo de bienes y servicios en las áreas que busca para redefinir. El concepto de la economía circular se basa en el estudio de sistemas no lineales, particularmente los vivos (MacArthur, 2013).

## Relación entre la ciencia e ingeniería de materiales con la economía circular en el diseño de nuevos materiales sostenibles

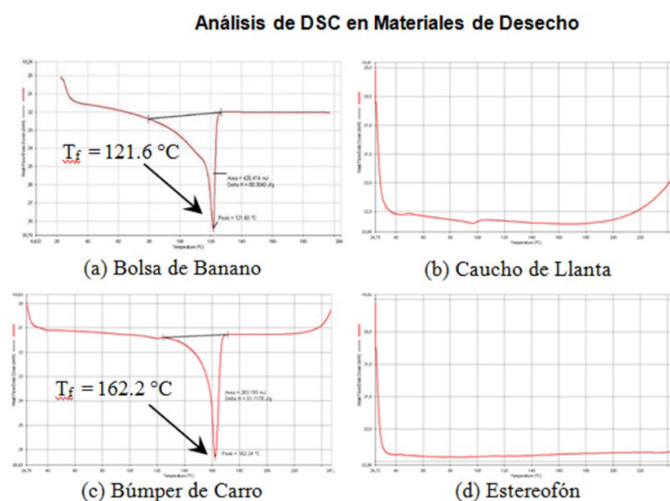
Uno de los principios de una economía circular es el diseño de residuos, sin embargo, en muchos procesos de reciclaje cuando el material de desecho se incorpora como materia prima, se incurre en una reducción de la calidad del producto final, es ahí donde es fundamental el estudio de la composición química y la respuesta mecánica del material con el fin de buscar un buen desempeño (MacArthur, 2013).

El alto consumo de modificadores comerciales de materiales, tales como polímeros, son utilizados cada vez con mayor frecuencia para mejorar las propiedades del material y su desempeño a lo largo de la vida útil del mismo. De acuerdo a lo anterior, existe una gran oportunidad de utilización de materiales de desecho en el mejoramiento de las propiedades de los materiales de construcción y, en consecuencia, un gran aporte a la conservación del medio ambiente.

Los materiales convencionales como los de desecho deben ser caracterizado tanto para su control de calidad en general, como para estudiar la posible contabilidad entre ambos y su resistencia a las condiciones a la cuales se va a desempeñar el material. En ese sentido, se presentan algunas técnicas de análisis necesarias para el diseño de materiales a partir de desechos:

#### a. Análisis de Barrido Calorimétrico de Barrido Diferencial (DSC)

Se utiliza comúnmente en la determinación de las transiciones térmicas de primer orden (fusión y cristalización) y de segundo orden (transición vítrea), las cuales son de especial interés en el caso de que sea necesario determinar la consistencia de un material a una determinada temperatura (sólido, viscoelástico, líquido) (Elseifi et al., 2010), tal como se muestra en la Figura 5, que es un análisis para utilizar en mezclas asfálticas.



**Figura 5. Análisis DSC de materiales de desecho.**

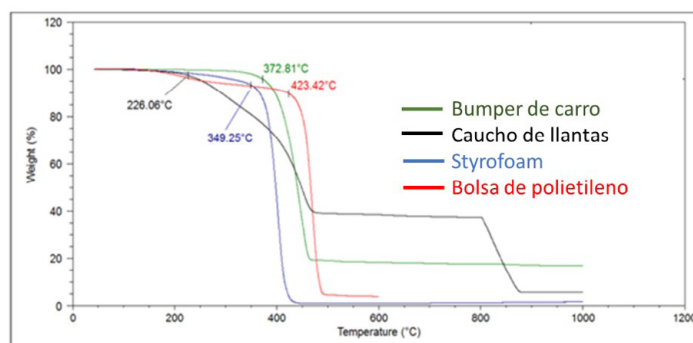
**Fuente: Villegas et al., (2013).**

En la Figura 5 se muestra un análisis DSC de materiales de desecho en el que tanto la bolsa de polietileno como el material de Búmper de carro o parachoques (TPO) exhiben estructuras cristalinas, en consecuencia, ambos materiales exhiben una  $T_f$  (temperatura de fusión) bien definida. En el caso de la bolsa de polietileno la  $T_f$  es de 162°C. En el caso del caucho de llanta y el Estereofón, debido a su naturaleza amorfa, no presentan una  $T_f$  bien definida.

Muchos de estos materiales de desecho tienen una composición química homogénea, pero muchos son una mezcla heterogénea de compuestos químicos, por lo tanto, su comportamiento termomecánico puede diferir del comportamiento de un material con alto grado de pureza, ya que en estos pueden tener una estructura amorfa. Estos materiales con un número finito de monómeros son difíciles de modular cuando se analiza su Capacidad Calorífica (CP), con Calorimetría Diferencial de Barrido Modulada (MDSC) en relación a la movilidad atómica, oxidación y descomposición. (Daly et al., 1996).

#### b. Análisis Termogravimétrico (TGA)

La técnica es utilizada para determinar el comportamiento de un material cuando es sometido a cambios térmicos, controlando cambios en su masa, como se muestra en la Figura 6. De esta forma se puede obtener información de la descomposición del material y analizar su estabilidad térmica. En el caso de los modificantes es importante conocer si su temperatura de degradación es mayor que la temperatura de modificación del material o de producción del mismo. Adicionalmente, en el caso de los modificantes provenientes de desechos industriales pone en evidencia posible contaminación por volatilización con otros productos (Baumgardner et al., 2014).



**Figura 6. Análisis TGA de materiales de desecho.**

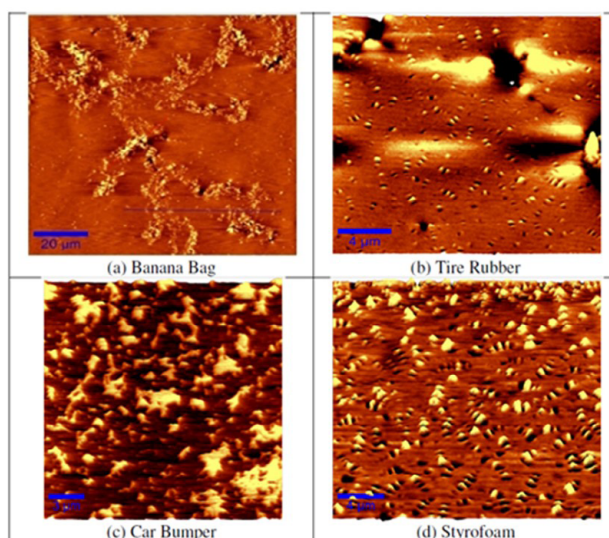
**Fuente: Villegas et al., (2013).**

El Análisis Termogravimétrico (TGA) mostrado en la Figura 6, se utiliza para determinar la degradación de temperatura de los materiales de desecho. Un material que comienza a degradarse a una temperatura por debajo de la temperatura de producción no es el adecuado ya que habrá perdido sus propiedades iniciales y dependiendo de su grado de degradación, puede generar gases aún más contaminantes que el propio material. En el caso de los residuos analizados, todos se degradan a temperaturas superiores a 200 °C, por lo que pueden ser utilizados de acuerdo con su comportamiento térmico en muchos procesos.

Esta dificultad en el estudio de cierto tipo de materiales es manifiesto en los anisotrópicos (las propiedades mecánicas de los materiales anisotrópicos dependen de la orientación del cuerpo del material), puesto que estos presentan comportamientos variados en cuanto a sus propiedades mecánicas, principalmente en cuanto a fracturas, especialmente en materiales que se encuentra por encima de su temperatura de transición vítrea (Rycroft et al., 2012; Branthaver et al., 1993).

### c. Microscopía de Fuerza Atómica (AFM)

En algunos materiales como el asfalto, la forma en que se distribuye el modificador es de suma importancia en su comportamiento mecánico. Para analizar la distribución del modificador en el asfalto se utiliza la técnica de Microscopía de Fuerza Atómica (AFM). Este análisis muestra información sobre la topografía y el entorno tridimensional de la muestra, y también en la rugosidad del material. Las imágenes de AFM de la distribución de modificadores dentro de la matriz de asfalto se muestran en la Figura 7.



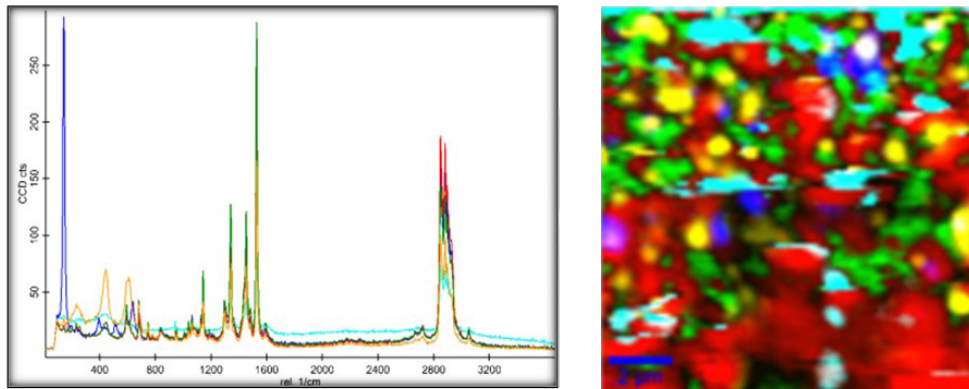
**Figura 7. Topografía AFM para asfaltos modificados.**

**Fuente: Villegas et al., (2013).**

#### d. Análisis químico

En la industria es clave caracterizar la composición química para asegurar que los materiales de construcción cumplan ciertas propiedades específicas, las cuales pueden ser análogas a otros en relación a su respuesta en función de la temperatura y la composición química, pueden producir cambios en los parámetros mecánicos, mismos que pueden ser significativos en varios órdenes de magnitud (Polacco et al., 2006; Hrma., 2008).

En el caso de los materiales de desecho y materiales desconocidos es importante garantizar su naturaleza. En ambos casos, es conveniente conocer la composición química no sólo por su accionar en el desempeño del asfalto modificado, sino para corroborar que no sea tóxico ni contaminante. Como se muestra en la Figura 8, se debe tener en cuenta que los lotes de estos tipos de materiales sean homogéneos, el tipo de análisis químico depende no sólo del material a analizar, sino también de las posibilidades del analista (Villegas et al., 2013).



**Figura 8. Espectro Raman de polietileno de bolsas plásticas.**

**Fuente: Villegas et al., (2013).**

En la Figura 8 (a), el análisis muestra la composición química del material; en este caso se observa la presencia de polietileno. Por su parte, la Figura 8(b) representa la variación del espectro en la muestra que, por su diversidad de colores, indica que el material analizado es heterogéneo.

## Nuevas tendencias de la ciencia e ingeniería en el diseño de nuevos materiales sostenibles

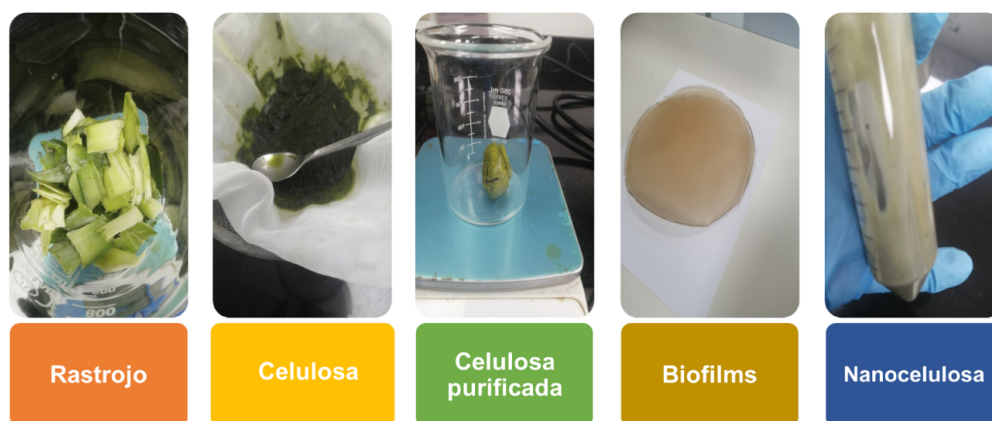
A nivel mundial, existen grandes esfuerzos para la gestión de residuos sólidos que van desde desechos biomásicos hasta biopolímeros, los cuales deben ser clasificados de acuerdo con sus propiedades fisicoquímicas, toxicidad, vectores y mecanismos de dispersión y posible utilización en los materiales de construcción. Las actividades agroindustriales han provocado una serie de problemas asociados con el medio ambiente y a la salud humana y animal. En los últimos 30 años el planeta se ha convertido en un depósito de basura, situación que urge la atención prioritaria de todo el mundo en buscar soluciones de fondo, oportunas y estructurales para prevenir, corregir y mitigar el daño ambiental a los ecosistemas, el calentamiento global y la vida de todos los seres. (Meneses et al., 2020)



Bioeconomía en el ámbito científico, surge de trabajos realizados entre la biología y la biotecnología y la forma en la cual estas investigaciones repercuten en la industria (Area y Vallejos, 2016). La Comisión Europea propuso su aplicación en la conversión de la biomasa en productos nuevos, sostenibles, ecoeficientes y competitivos en donde propone su necesidad para alcanzar un crecimiento económico sostenible, empleo, suministro de energía y mantener el nivel de vida (Birner, 2018).

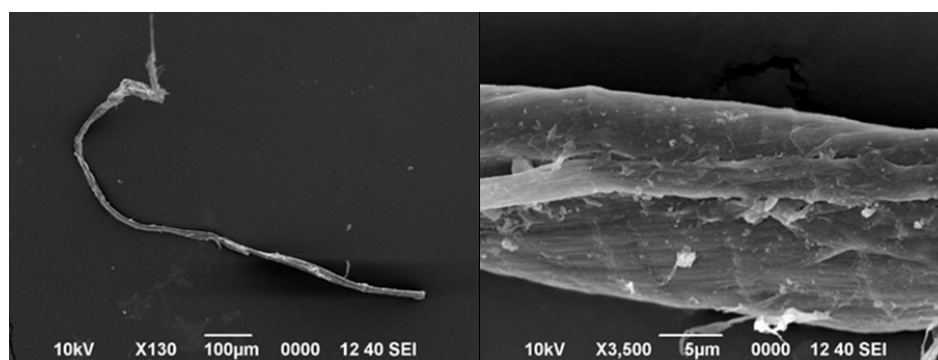
El objetivo principal de la bioeconomía es que se pueda producir de manera sostenible. Para ello se necesitan acciones modelos que combinen sostenibilidad con la rentabilidad del proceso, de modo tal, que puedan ser tan eficientes como los existentes (Area y Vallejos, 2016). Durante las próximas décadas, este será el desafío de la humanidad, en donde la ciencia y la tecnología tendrán un rol fundamental en la sostenibilidad mundial, pues la idea central es el aprovechamiento y la gestión sustentable de recursos renovables para la producción de alimentos, biomateriales, bioproductos y energía (Bugge et al., 2016).

Así, por ejemplo, es posible mezclar la nanocelulosa con otros materiales de construcción que, en determinadas condiciones, resulte ventajoso, estableciendo un proceso de preparación integrado del material compuesto y evaluando las propiedades de este según nuevos estándares (Wang et al., 2020). En la Figura 9 se muestran diferentes etapas del proceso extracción de celulosa.



**Figura 9. Proceso de extracción de celulosa.**

Por último, la utilización de este tipo de biomateriales puede ser amplia pues se puede obtener productos como microfibras, observadas en la Figura 10, las cuales pueden utilizarse como reforzamiento de la estructura en materiales comerciales.



**Figura 10. Proceso de extracción de celulosa.**

# Conclusiones

La Gestión Integral de Residuos minimiza los materiales destinados a disposición final, mediante la implementación de la valoración con el fin de minimizar la eliminación principalmente: reduciendo, reutilizando y reciclando.

Con el fin de buscar la circularidad en los procesos productivos en Costa Rica, la producción de materiales comprende no solo el tratamiento e incorporación, si no también, un proceso de producción que garantice los mejores estándares de calidad.

Es importante a nivel país, ampliar las investigaciones en diseño ecológico de materiales, con criterios de eficiencia de los materiales como la durabilidad, la separabilidad, la reciclabilidad y el contenido de material reciclado.

Es necesario el impulso a nivel nacional, de productos y servicios que generen mercados circulares e inversiones en productos limpios y sostenibles.

Las técnicas instrumentales proveen una herramienta muy poderosa para la caracterización físico-química de los materiales, identificando las propiedades de partida de los mismos a toda escala de tamaños. De igual manera permiten evidenciar los cambios ocurridos en el material modificado, cuya interpretación ayuda a clarificar si existe una mejora significativa en las propiedades requeridas del mismo.

Los biomateriales están produciendo un gran avance en muchos campos de la ecología, este aporte es análogo en la ingeniería puesto que es capaz de sustituir materiales de alto costo por su escasez e impacto ambiental.

Al existir una gran variedad de biomateriales dan la posibilidad de ser utilizados en aplicaciones muy variadas.

# Bibliografía

Achterkamp, M. C., & Vos, J. F. (2006). A framework for making sense of sustainable innovation through stakeholder involvement. *International journal of environmental technology and management*, 6(6), 525-538.

Area, M. C., & Vallejos, M. E. (2016). Bio-productos y bio-materiales a partir de la biorrefinería de residuos agro y forestoindustriales. *Panorama de la industria de celulosa y papel y materiales lignocelulósicos*, 120-151.

Arguedas, D.; Baldares, E. y Mora, G. (29 de octubre de 2014). Guía Nacional de Manejo de Residuos. Mesa de Revistas y Suplementos de Grupo Nación. [http://www.visitcostarica.com/ict/pdf/GUIA\\_NACIONAL\\_DE\\_MANEJO\\_DE\\_RESIDUOS\\_2014.pdf](http://www.visitcostarica.com/ict/pdf/GUIA_NACIONAL_DE_MANEJO_DE_RESIDUOS_2014.pdf)

Baumgardner, G., Hardee, J., Negulescu, I., Williams, E., Howard, I., & St John, R. (2014). Quantitative analysis of functional polymer in recycled tyre rubber used in modified asphalt binders. USA: Road Materials and Pavement Desing.

Birner R. Bioeconomy Concepts. *Bioeconomy* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2018. p. 17–38. Available from: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-68152-8\\_3](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-68152-8_3).

Branthaver, J. F, Petersen, J. C., Robertson, R.E., Duvall, J.J., Kim, S.S., Harnsberger, P. M., Mill, T., Ensley, E. K., Barbour, F.A. & Schabron, J. F. "Binder Characterization and Evaluation, SHRP-A-368: Chemistry". Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 1993.

BSI. Framework for Implementing the Principles of the Circular Economy in Organizations—Guide; BSI Standards Publication; BSI: London, UK, 2017.

Bugge M, Hansen T, Klitkou A. What Is the Bioeconomy? A Review of the Literature. Sustainability [Internet]. 2016 Jul 19;8(7):691. Available from: <http://www.mdpi.com/2071-1050/8/7/691>.

Cardozo, (2018). <https://www.bbva.com/es/que-es-la-economia-circular-y-por-que-es-importante/amp/>.

Cerdá, E. M. I. L. O., & Khalilova, A. (2016). Economía circular. Empresa, medio ambiente y competición, 401, 11-20.

Daly, W. H., Qiu, Z., & Negulescu, I. (1996). Differential scanning calorimetry study of asphalt crystallinity. Transportation research record, 1535(1), 54-60. (2) Es la segunda referencia

Ellen MacArthur Foundation. (Mayo de 2015). Circularity Indicators. Obtenido de Ellen MacArthur Foundation: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/apply/circularity-indicators>

Ellen MacArthur Foundation. Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition. Greener Manag. Int. 2015, 20, 13–34.

Elseifi, M., Mohammad, L., Glover, I., Negulescu, I., Daly, W., & Abadie, C. (2010). Relationship between Molecular Compositions and Rheological Properties of Neat Asphalt Binder at Low and Intermediate Temperatures. USA: Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 22, No. 12, pp. 1288-1294.

García, V., Acuña-González, J., Vargas-Zamora, J. A., & García-Céspedes, J. (2006). Calidad bacteriológica y desechos sólidos en cinco ambientes costeros de Costa Rica. Revista de Biología Tropical, 54(1), 35-48.

Greenpeace (2016). Plásticos en los océanos. Datos, comparativa e impactos. [http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/2016/report/plasticos/plasticos\\_en\\_los\\_oceanos\\_LR.pdf](http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/2016/report/plasticos/plasticos_en_los_oceanos_LR.pdf).

Hrma, P. (2008). Glass viscosity as a function of temperature and composition: A model based on Adam–Gibbs equation. Journal of Non-Crystalline Solids, 354(29), 3389-3399.

Jaén, M., Esteve, P., & Banos-González, I. (2019). Los futuros maestros ante el problema de la contaminación de los mares por plásticos y el consumo. Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, 1501-1501.

Lacy, P., & Rutqvist, J. (2016). Waste to wealth: The circular economy advantage. Springer.

Mantalovas, K., & Di Mino, G. (2019). The sustainability of reclaimed asphalt as a resource for road pavement management through a circular economic model. Sustainability, 11(8), 2234.

Marcelino-Sádaba, S., González-Jaen, L. F., & Pérez-Ezcurdia, A. (2015). Using project management as a way to sustainability. From a comprehensive review to a framework definition. Journal of cleaner production, 99, 1-16.

Meneses Jacobo, C. A., Calderón, S. M., & Sotelo, T. (2020). Efectividad de la aplicación de las políticas públicas para el reciclaje de residuos de plástico en la localidad de Chapinero Central de la ciudad de Bogotá.

Grajales, I. (Febrero 2020). Costa Rica lanza al mar 440 toneladas de plástico por día. *Investiga. TEC*, (37), 15-17, Recuperado de: [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga\\_tec/article/view/5002](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga_tec/article/view/5002).

Noticias ONU Mirada global (2021), Historias humanas El plástico, que ya ha atragantado nuestros océanos, terminará por asfixiarnos a todos si no actuamos rápidamente. <https://news.un.org/es/story/2021/10/1498752>

Pearce, A. R. (2008). Sustainable capital projects: leapfrogging the first cost barrier. Civil Engineering and Environmental Systems, 25(4), 291-300.

Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D. & Zanzotto, L. "Relation between polymer architecture and nonlinear viscoelastic behavior of modified asphalts", *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, Vol. 11, 230–245. 2006.

Rycroft, C. H., & Bouchbinder, E. (2012). Fracture toughness of metallic glasses: Annealing-induced embrittlement. *Physical review letters*, 109(19), 194301

Sandoval, V. P., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2017). Economía circular. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, (15), 85-95.

Shen, L. Y., Tam, V. W., Tam, L., & Ji, Y. B. (2010). Project feasibility study: the key to successful implementation of sustainable and socially responsible construction management practice. *Journal of cleaner production*, 18(3), 254-259.

Singh, R.K., Murty H.R., Gupta, S.K., Dikshit, A.K. (2007). Development of composite sustainability performance index for steel industry. *Ecological Indicators*. 7, 565-588.

Swagemakers, P.; Dolores, M.; Garcia, D.; Wiskerke, J.S.C. Socially-Inclusive Development and Value Creation: How a Composting Project in Galicia (Spain) 'Hit the Rocks'. *Sustainability* 2018, 10, 2040.

UNEP (2009). *Marine Litter: A global Challenge*. Nairobi: UNEP.[www.unep.org/pdf/unep\\_marine\\_litter-a\\_global\\_challenge.pdf](http://www.unep.org/pdf/unep_marine_litter-a_global_challenge.pdf)

Villegas, R., Aguiar, J., Loria, L. G., & Navas, A. (2013). Metodología integral de incorporación eficaz de modificantes en matrices asfálticas. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/542>.

Wang, H., Ma, Z., Chen, X., & Hasan, M. R. M. (2020). Preparation process of bio-oil and bio-asphalt, their performance, and the application of bio-asphalt: a comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(2), 137-151.



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

**PITRA**

Programa de  
**Infraestructura del Transporte**

*Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.*

*Coordinadora General - Programa de Infraestructura del Transporte*

### **Unidad de Seguridad Vial y Transporte (USVT)**

Ing. Javier Zamora Rojas, M.Sc.

*Coordinador USVT*

### **Unidad de Normativa y Actualización Técnica (UNAT)**

Ing. Raquel Arriola Guzmán, M.Sc.

*Coordinadora UNAT*

### **Unidad de Investigación en Infraestructura del Transporte (UIIT)**

Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA.

*Coordinador UIIT*

### **Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN)**

Ing. Roy Barrantes Jiménez, M.Sc.

*Coordinador UGERVN*

### **Unidad de Gestión Municipal (UGM)**

Ing. Erick Acosta Hernández

*Coordinador UGM*

### **Comité Editorial 2022:**

- Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc., Coordinadora General PITRA
- Ing. Raquel Arriola Guzmán, M.Sc., Unidad de Normativa y Actualización Técnica, PITRA
- Rosa Isella Cordero Solano, Unidad de Normativa y Actualización Técnica, PITRA

## **CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA**

**Diagramación:** Licda. Daniela Martínez Ortiz

**Control de calidad:** Óscar Rodríguez Quintana

*Recuperación de residuos valorizables en el diseño de nuevos materiales sostenibles para infraestructura vial como estrategia para incidir en la economía circular de nuestro país*

**Palabras clave:** sostenibilidad, materiales, economía circular, valorización

(506) 2511-2500

✉ [direccion.lanamme@ucr.ac.cr](mailto:direccion.lanamme@ucr.ac.cr) • [www.lanamme.ucr.ac.cr](http://www.lanamme.ucr.ac.cr)