

ANÁLISIS ECONÓMICO DE ALTERNATIVAS DE LOGÍSTICA INVERSA Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS

ALEJANDRINO, Clarisa
MERCANTE, Irma

1. Introducción

Uno de los elementos más usados para embalajes de productos y materiales son los flejes o sunchos. Los flejes son tiras de acero o plástico que permiten embalar y asegurar materiales o productos para su transporte y distribución. Existen tres tipos de materiales en flejes de acero, de polipropileno (PP) y de tereftalato de polietileno (PET). Los primeros son los más resistentes por lo que se utilizan para cargas pesadas, resisten altas temperaturas y los golpes, su principal desventaja es que son difíciles de manipular. Los segundos son de color negro, son los más económicos y utilizados, son flexibles, pero tienen baja resistencia. Los últimos (**Figura 1 a**), de color verde, son muy resistentes y fáciles de manipular y resisten la humedad y altas temperaturas. Los flejes de PET son cada vez más usados por sus ventajas. Entre otros usos, son utilizados para embalar pallets de botellas de vidrio, por lo cual las bodegas de Mendoza cuentan con grandes cantidades de estos residuos (**Figura 1 b**).



Figura 1: (a) Pallet con fleje PET (b) Residuo de fleje proveniente de bodega

La mayoría de los plásticos que son reciclados pasan por un proceso de trituración y extrusión que permite obtener pequeñas lentejas de material (pellets) que puede ser utilizado como materia prima para fabricar nuevos productos. El PET posee características particulares por lo que no puede ser fundido junto a otros plásticos como el polipropileno (PP) o polietileno (PE). Para obtener pellets de PET se requieren diferentes equipos y líneas de producción separada. Es por ello, por lo que se requiere buscar otras alternativas de valorización para los flejes de PET.

Existe en nuestra provincia una empresa con equipos para realizar la primera etapa del proceso y obtener un triturado del fleje PET, como el que se presenta en la **Figura 2**. Esta empresa se ha acercado a la Universidad Nacional de Cuyo para buscar, en conjunto, un uso para este material y de esta forma volver a insertarlo en el mercado para lograr una economía circular (The Ellen MacArthur Foundation, 2012). En 2021 la empresa postuló su reto socio-productivo a la convocatoria del Área de Innovación de la Universidad Nacional de Cuyo para el estudio técnico de alternativas de reutilización de este residuo. El proyecto ganador de este reto está siendo llevado a cabo por un equipo de trabajo de investigadores de distintas unidades académicas entre los cuales se encuentran los integrantes del presente proyecto.



Figura 2: (a) Flejes PET triturado (b) Tamaño del triturado

Para la presente investigación se han considerado tres de las cuatro alternativas del proyecto en cuestión. Se ha excluido la alternativa que contempla el reuso del fleje mediante un reacondicionamiento, ya que no se ha comenzado a estudiar técnicamente y, por lo tanto se carece de datos de cómo se implementaría. La primera alternativa en estudio es la incorporación del fleje triturado a una mezcla cementicia para su aplicación en elementos constructivos. Existen numerosos antecedentes que avalan la incorporación de plásticos reciclados en mezclas cementicias (Mercante et al. 2018). Específicamente se propone en la presente investigación utilizar el fleje PET triturado para fabricar adoquines. Existen antecedentes que demuestran que la mezcla obtenida presenta buenas propiedades mecánicas para bajas concentraciones de flejes PET triturados (Prahallada et al., 2018). Para esta alternativa se están llevando a cabo ensayos de resistencia de distintas proporciones de mezclas, y ya se cuenta con una dosificación preliminar. Como segunda alternativa se ha estudiado la incorporación del residuo plástico en una matriz polimérica (resina poliéster) para conformar una placa de material compuesto. Los materiales compuestos son muy utilizados en la industria y en la construcción debido a la variedad de propiedades y características que se pueden lograr (Gun and Asaro, 2009). Como tercera alternativa se considera la valorización mediante la extrusión del PET, luego de su trituración. Esta alternativa es la que posee más antecedentes, se realiza a nivel industrial en otras partes del mundo ya que no limita la posibilidad de ciclos de reciclaje posteriores. A nivel nacional, en Buenos Aires existen empresas que utilizan PET triturado como parte de sus materias primas para la fabricación de nuevos flejes. Técnicamente es una opción posible dado que el PET en los flejes se encuentra puro y sin mezclar con otros tipos de polímeros. El desafío de esta alternativa radica en la logística inversa dado que en Mendoza no existen plantas con los equipos necesarios.

La presente investigación tuvo por objetivo un estudio de la variable económica para las tres alternativas de valorización de residuos de flejes de PET presentadas.

2. Metodología

Para alcanzar el objetivo definido previamente se utilizará el análisis económico del ciclo de vida (metodología de cuantificación de Costos del Ciclo de Vida o CCV) (Hunkeler et al., 2008, Swarr et al., 2011a y b). Esta metodología permite realizar una evaluación de todos los costos asociados con el ciclo de vida de un producto, proceso o sistema que están directamente cubiertos por uno o más de los actores en dicho ciclo de vida. Para eso se realizaron las actividades detalladas a continuación:

2.1. Definición de objetivo y alcance del análisis

Se definieron el objetivo del estudio y la unidad funcional a utilizar como base. El objetivo del estudio fue comparar los costos de las tres alternativas de valorización del residuo previamente descritas. En estas alternativas se consideraron los procesos técnicos de valorización y los trasportes asociados, ya que en la logística inversa el transporte tiene gran influencia. La unidad funcional utilizada para la investigación fue “1 tonelada de residuos de flejes PET reciclado”.

En la **Figura 3** se presentan los límites del sistema. El proceso de trituración en principio no fue incluido ya que es igual para todas las alternativas, sin embargo, luego se incorporó para ampliar el alcance del estudio y considerar los costos evitados (ver apartado 2.3 Agregación de costos y ratios obtenidos). Para la alternativa 1 se consideró el transporte desde la planta de trituración hasta la planta de fabricación de adoquines. Luego se incluyó el mezclado mediante una mezcladora eléctrica automatizada, el moldeo de los adoquines en una línea de moldeo eléctrica y el proceso de curado de los mismos donde se consume combustible para mantener estable la temperatura. Para la alternativa 2 se consideró el transporte hasta la planta de fabricación de placas y los materiales (resina y aditivos) para el proceso de armado de la placa. El desarrollo de estas placas se encuentra en etapa de laboratorio por lo que no tienen datos de consumos eléctricos para el mezclado. El secado de la placa se realiza a temperatura ambiente y no se requieren otros procesos. Para la alternativa 3 se consideró el transporte hasta la planta de extrusión ubicada en Buenos Aires y el consumo eléctrico del proceso de extrusión que permite obtener los pellets. No se considerará el costo de los aditivos a incorporar en el proceso de extrusión por falta de datos. Se consideró una eficiencia del 95% ya que parte del material se pierde o requiere volver a ser procesado, este valor se obtuvo a partir de comunicaciones con empresas del sector.

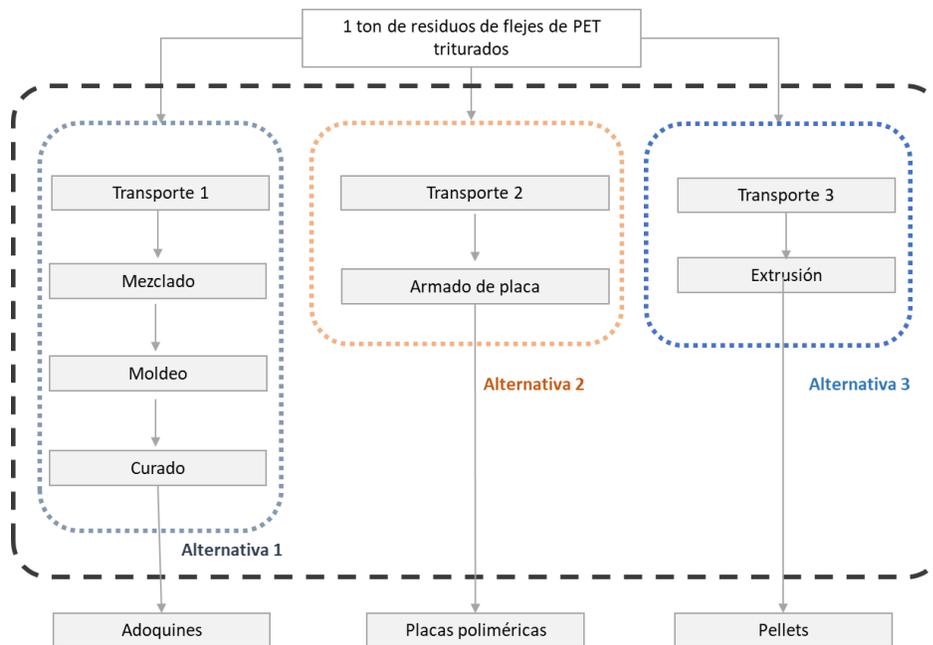


Figura 3: Límites del sistema. Fuente: Elaboración propia.

2.2. Recolección de datos

La recolección de información se realizó para cada alternativa respetando la estructura de costos y los procesos incluidos en la **Figura 3**. Como resultado de este paso se identificaron todos los elementos de costo del modelo y se calculó cada elemento de costo i -ésimo según la siguiente fórmula (**Ecuación 1**):

$$ec_i = cantidad_i \times costo\ unitario_i \quad (1)$$

Como todas las actividades de las alternativas analizadas se ubican en un periodo corto de tiempo no fue necesario aplicar un enfoque de descuento (Hunkeler et al., 2008).

Para la presente investigación se emplearon datos primarios y secundarios. Los datos primarios provienen de mediciones, entrevistas y documentos de los actores involucrados mientras que los datos secundarios pueden ser de bases de datos o de otros estudios con características similares. La cuantificación de entradas y salidas materiales de los procesos fue obtenida a partir de datos primarios de los ensayos técnicos de las alternativas y de estimaciones a partir de entrevistas y mediciones en la planta que produce el triturado. Para completar el inventario de costos se utilizaron costos unitarios de cada entrada y salida que se obtuvieron a partir de datos de proveedores. Los valores de mercado de los productos se estimaron a partir de datos secundarios, para ello se utilizaron los precios de productos similares presentes en el mercado.

Para evaluar la calidad de los datos se utilizó la matriz de calidad de datos de costos (**Tabla 2**) la cual fue desarrollada a partir de las matrices de calidad de datos de De Barba et al. (2014) y Weidema et al. (2013). Esta matriz contiene cinco indicadores de calidad de los datos: confiabilidad (Co), representatividad (Re), correlación temporal (CTem), correlación geográfica (CG) y correlación tecnológica (CTec) cada uno con una puntuación de 1 a 5. Una puntuación de 1 significa que los datos son de alta calidad con respecto a ese indicador en particular y una puntuación de 5 significa que la calidad de los datos para ese indicador es baja. Una vez evaluados todos los datos del inventario se calculó la calificación de calidad (CC) de cada elemento del inventario mediante la **Ecuación 2**. La calificación de calidad general (CCG) del inventario se obtuvo por promedio de la calificación de calidad (CC) de todos los elementos del inventario.

$$CC = \frac{Co + Re + CTem + CG + CTec}{5} \quad (2)$$

Según la tabla de calidad de datos propuesta por Manfredi et al. (2012) (**Tabla 1**) se determinó el nivel general de calidad (NGC) del inventario. Si el nivel general de calidad del inventario resulta excelente o muy bueno no es necesario mayores acciones, pero si el nivel resulta menor quiere decir que el inventario cuenta con un nivel de incertidumbre importante y deberían mejorarse los datos utilizados.

Tabla 1. Calificación general de calidad de datos. Fuente: Manfredi et al. (2012)

Calificación general de calidad de datos	Nivel general de calidad de datos
<1.6	Excelente
1.6 a 2.0	Muy bueno
2.1 a 3.0	Bueno
3.1 a 4.0	Regular
>4.1	Deficiente

Tabla 2: Matriz de calidad de datos. Fuente: Elaboración propia

Puntaje	1	2	3	4	5
Confiabilidad	Datos verificados basados en mediciones	Datos verificados en parte basados en suposiciones o datos no verificados basados en mediciones	Datos no verificados basados en parte en estimaciones calificadas	Estimación calificada (por ejemplo, experto industrial); datos derivados de información teórica.	Estimación no calificada
Representatividad	Datos representativos de todos los sitios relevantes durante un período adecuado para igualar las fluctuaciones normales	Datos representativos de > 50% de los sitios relevantes durante un período adecuado para igualar las fluctuaciones normales	Datos representativos de solo algunos sitios (< 50%) relevantes o > 50% de sitios pero de períodos más cortos	Datos representativos de un solo sitio relevante o algunos sitios pero de períodos más cortos	Representatividad desconocida o datos de un pequeño número de sitios y de períodos más cortos
Correlación temporal	Menos de 0.5 años de diferencia con el año de referencia	Menos de 2 años de diferencia con el año de referencia	Menos de 4 años de diferencia con el año de referencia	Menos de 8 años de diferencia con el año de referencia	Edad de los datos desconocidos o más de 8 años de diferencia con el año de referencia
Correlación geográfica	Datos del área en estudio y misma moneda	Datos promedio de un área más grande en la que se incluye el área en estudio y misma moneda	Datos de un área con condiciones de costo ligeramente similares, misma moneda o condiciones de costo similares y moneda similar.	Datos de un área con condiciones de costo ligeramente similares y diferente moneda	Datos de un área desconocida o con condiciones de costo diferentes
Correlación tecnológica	Datos de empresas, procesos y materiales en estudio (es decir, tecnología idéntica)	Datos de procesos y materiales en estudio (es decir, tecnología idéntica) pero de diferentes empresas con sistema de costeo similar	Datos sobre procesos o materiales relacionados pero la misma tecnología, o datos de procesos y materiales bajo estudio pero de tecnología diferente y/o sistema de costeo diferente	Datos sobre procesos o materiales relacionados pero tecnología diferente, O datos sobre procesos a escala de laboratorio y la misma tecnología	Datos sobre procesos o materiales relacionados pero a escala de laboratorio de tecnología diferente

2.3. Agregación de costos y ratios obtenidos

Para obtener los resultados se realizaron dos agregaciones de costos y se calculó un ratio.

En la primera se consideraron los costos necesarios para el reciclaje de 1 ton de flejes PET una vez triturado según las alternativas en estudio. En esta agregación se consideraron los materiales e insumos necesarios para volver a insertar a 1 ton de flejes PET en el mercado según los procesos incluidos en la **Figura 1**.

Luego se realizó una segunda agregación de costos con foco en los productos obtenidos por cada alternativa. Para esto se incluyeron los costos netos necesarios para lograr los productos finales y se restaron los costos evitados para cada alternativa. En el caso de la alternativa 1, donde se obtiene un adoquín como producto, al utilizar flejes PET triturados como agregados se evita consumir áridos y cemento (Ojeda et al., 2020a). Los costos de estos últimos son los costos evitados para esa alternativa. En el caso de las alternativas 2 los costos evitados se deben al PET virgen que se evita consumir al utilizar reciclado, suponiendo que se fabrica la misma placa con material virgen. En la alternativa 3 los costos evitados también se deben al material virgen que se evita consumir. En la agregación anterior los costos de la trituración del fleje PET fueron excluidos por ser común para todas las alternativas, pero en este enfoque se consideraron para completar todos los costos de obtener el triturado de fleje PET.

Finalmente, se realizó un análisis a través de un ratio de costos netos sobre el valor de mercado del producto obtenido. La razón de este análisis es que los productos obtenidos por cada alternativa son diferentes y tienen diferente precio de mercado, por lo que un análisis solo de costos no refleja la situación real. Como solución se calculó este ratio para identificar el impacto de los costos (o ahorros) que implicaría usar los flejes PET reciclados sobre el precio final del producto para cada alternativa.

3. Resultados y discusión

3.1. Inventario y análisis de calidad de datos

La **Tabla 3** presenta el análisis de calidad del inventario de costos. Los datos de costos de los materiales utilizados recibieron muy buena puntuación, ya que se obtuvieron a partir de datos de proveedores. Los datos de los valores de mercado de los productos obtuvieron peor valoración, debido a que no se encuentran disponibles en el mercado por lo tanto se estimaron en base a productos con características similares. A pesar de lo anterior la calificación de calidad general obtenida para el inventario es de 1.4 que corresponde a un nivel general de calidad (NGC) de datos excelente según la **Tabla 1**. Se concluye que no se requiere mejorar la calidad de los datos obtenidos.

Tabla 3: Calidad del inventario de costos. Fuente: Elaboración propia

Elemento	Fuente de dato	Análisis de calidad de datos				
		Co	Re	CTem	CG	CTec
Árido fino	Medición directa de proveedores	1	1	1	1	1
Cemento	Medición directa de proveedores	1	1	1	1	1
Combustible	Medición directa de proveedores	1	1	1	1	1
Energía eléctrica	Estimación en base a datos de proveedores	2	1	1	1	1
Resina	Medición directa de proveedores	1	1	1	1	1
PET virgen triturado	Estimación en base a datos de proveedores	2	1	3	1	1
Adoquín	Estimación en base de producto similar	3	1	1	1	4
Placa polimérica	Estimación en base de producto similar	3	1	1	1	4
Pellet	Estimación en base de producto similar	2	1	1	3	2

3.2. Agregación de costos

3.2.1. Costos por alternativa

En la **Figura 4** se presentan los costos de reciclaje de 1 ton de flejes PET según las alternativas presentadas. Se aprecia que la alternativa 3 es la que menos costos presenta ya que solo requiere el transporte hasta la planta de extrusión y el proceso de extrusión. Las otras dos alternativas incluyen el uso de otros materiales, como áridos y cemento para la alternativa 1 y resina polimérica para la alternativa 2. En ambos casos se requieren grandes cantidades de materiales por lo que se incrementan los costos.

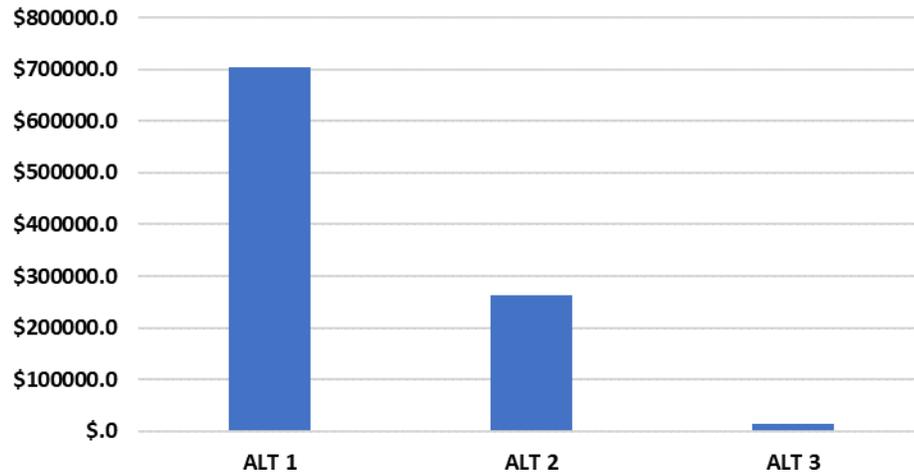


Figura 4: Costos totales por alternativa. Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Costos netos por alternativa

La **Figura 5** presenta los costos netos de cada alternativa. Se consideraron los costos de trituración y los costos evitados para obtener los productos para cada alternativa. Se observa que la alternativa 3 en esta figura presenta costos negativos, esto quiere decir que esta alternativa produce ahorros en lugar de costos ya que al usar el material triturado de PET de flejes se evita comprar material PET virgen. Esta alternativa sigue siendo la más conveniente. La alternativa 1 prácticamente no presenta cambios respecto a la **Figura 4** ya que los costos evitados, costos debidos a pequeñas reducciones en el consumo de áridos y cemento, son de baja magnitud en comparación con los costos incurridos para obtener los adoquines con agregado de flejes PET reciclado. La alternativa 2 presenta una reducción de aproximadamente el 20% de los costos presentados en la **Figura 4** lo que quiere decir que los costos evitados, costos de PET triturado virgen en escamas, son importantes en comparación con los costos de obtener el triturado a partir de flejes PET posconsumo.

Se concluye que este análisis permitió expandir el alcance presentado en la **Figura 3** ya que se realiza un análisis enfocado en los productos a obtener por cada alternativa. Este análisis complementa el anterior, pero no debe entenderse como un análisis de costos completo de esos productos (adoquín, placa polimérica y pellet). Es recomendable realizar futuras investigaciones donde se comparen mediante CCV los productos obtenidos por estas alternativas con los productos competidores existentes en el mercado.

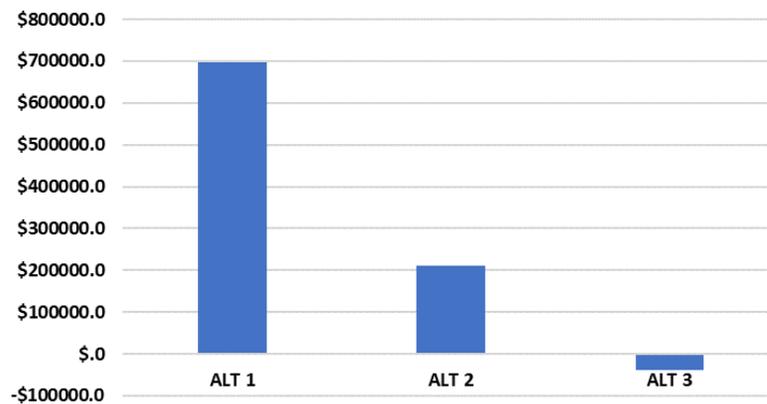


Figura 5: Costos netos por alternativa. Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Ratio costos netos/precio de venta

El uso de ratios para complementar los análisis de CCV es muy común en la bibliografía (Alejandrino et al., 2021). En este caso se calculó el ratio de costos netos sobre precio de venta de los productos obtenidos a partir de cada alternativa estudiada (Figura 6). Este ratio permite comprender la magnitud del impacto de cada alternativa respecto al valor de mercado del producto final.

Los costos calculados para la alternativa 1 rondan el 20% del valor de mercado de los adoquines. El inventario de esta alternativa es el más completo de las tres e incluye todos los materiales y procesos para obtener un adoquín. Esta es una de las razones por las que el valor de los costos netos sea tan alto en comparación con el valor de mercado de los adoquines. Por otro lado, los materiales evitados (áridos principalmente y un poco de cemento) tienen pocos procesos y bajo valor agregado por lo que su precio es menor que la misma cantidad de plástico. En resumen, desde el punto de vista económico parece difícil que el adoquín con plástico reciclado compita con un adoquín convencional. A pesar de lo anterior, existen antecedentes que demuestran que los primeros podrían tener mejores propiedades (Ojeda et al., 2020b) y por lo tanto, nuevos mercados. Se concluye que se requieren más investigaciones de las propiedades y usos de los adoquines con PET triturado y de su valor de mercado. Actualmente se están desarrollando estudios de resistencia de los adoquines con flejes PET triturado como parte de un proyecto asociado.

Para la alternativa 2 el costo de reciclaje ronda el 1% del precio de venta de las placas. Este valor tan bajo se puede explicar por dos razones. Por un lado, como las placas en estudio son nuevas y no existen actualmente en el mercado se utilizó el precio de venta de otras placas obtenidas a partir de otros polímeros. El valor de mercado de las placas consideradas es alto ya que tienen propiedades mecánicas muy buenas y pueden ser utilizadas para gran variedad de aplicaciones. Por otro lado, y debido a la falta de datos de las placas, el inventario de costos de esta alternativa es limitado y no incluye algunos costos como el consumo eléctrico para el mezclado de la resina. Se recomiendan nuevos estudios para corroborar los usos y características de la placa de resina con triturado de flejes PET, su valor de mercado y para mejorar el inventario de costos desarrollado en la presente investigación. Actualmente se están desarrollando estudios de resistencia de las placas de resina de poliéster con flejes PET triturados como parte de un proyecto asociado.

La alternativa 3 presenta ahorros (costos netos negativos) que rondan el 50% del precio de venta del producto final (pellet). Se concluye que el uso de flejes triturados para obtener pellets es una alternativa de gran interés. Este producto podría generar reducciones de costos si se mezclara con material virgen o generar un pellet de origen reciclado con menor precio que el virgen para competir en el mercado. Es necesario considerar que el reciclaje puede afectar las propiedades mecánicas del material (Yin et al., 2015) por lo que estos pellets pueden no servir para todas las aplicaciones que tienen los obtenidos a partir de material virgen. A pesar de esto, existen numerosos antecedentes y experiencias que avalan diferentes aplicaciones para los pellets obtenidos a partir de material reciclado (Huysman et al., 2017).

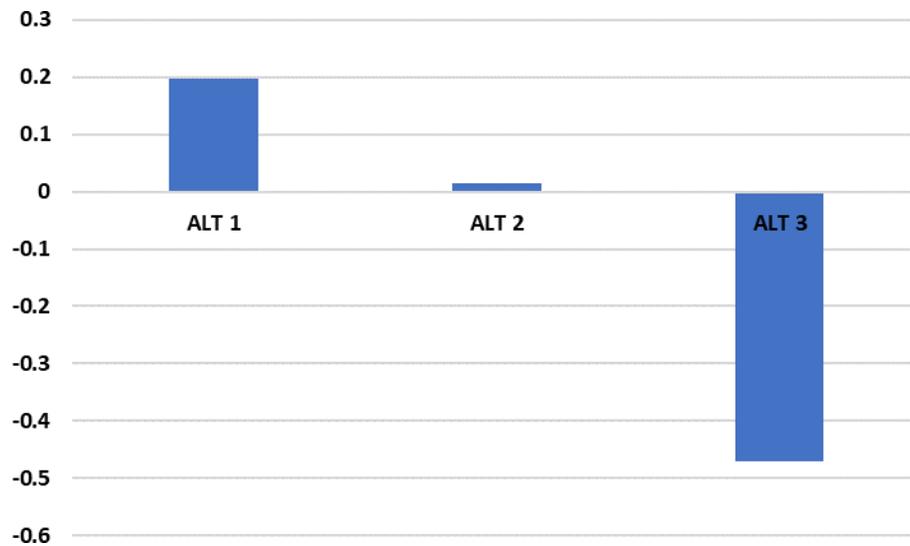


Figura 5: Ratio costos netos por precio de venta. Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones

La presente investigación permitió la comparación de tres alternativas de logística inversa y valorización de residuos de flejes PET posconsumo industrial. La alternativa de triturar y extruir el residuo para obtener pellets resultó ser la mejor desde el punto de vista económico. A pesar de lo anterior, las alternativas de utilizar el residuo triturado para fabricar adoquines y placas poliméricas parecen viables económicamente. Se concluyó que en ambos casos se requieren más estudios de las características técnicas de los adoquines y placas ya que se generarían nuevos productos y se podrían ubicar en nuevos mercados.

La metodología de CCV resultó de utilidad para cumplir el objetivo planteado. Además de los costos de cada alternativa se consideraron los costos evitados por los materiales no consumidos para obtener los productos y se calculó un ratio que permitió analizar el impacto de los costos (o ahorros) de cada alternativa respecto al valor de mercado de los productos de cada alternativa. También se propuso un nuevo procedimiento de evaluación de datos de inventario para CCV basado en procesos similares utilizados para análisis ambientales. En este procedimiento se evaluaron los datos a partir de una matriz de calidad de datos y se calculó el nivel general de calidad de datos de todo el inventario. Los datos del caso de estudio resultaron excelentes. A futuro se podrían estudiar procesos de gestión de la incertidumbre para los casos donde los datos no sean de calidad y no sea posible mejorarlos.

Finalmente se concluye que es fundamental estudiar los costos y valores de mercado cuando se analizan alternativas de valorización de residuos en conjunto con los estudios técnicos y ambientales. Solo considerando todas estas variables se pueden tomar decisiones informadas para lograr una economía circular que nos permita alcanzar el desarrollo sostenible.

5. Referencias

- Alejandrino, C., Mercante, I., Bovea, M.D., 2021. Life cycle sustainability assessment: lessons learned from case studies. *Environ. Impact Assess. Rev.* 87, 106517. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106517>
- De Barba, D.J., De Oliveira Gomes, J., Bork, C.A.S., 2014. Reliability of the sustainability assessment, in: *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., pp. 361–366. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.034>
- Gu, P., Asaro, R.J. (2009) Designing sandwich polymer matrix composite panels for structural integrity in fire. *Compos. Struct.* 88. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.05.006>
- Hunkeler, D., Lichtenvort, K., Rebitzer, G., 2008. *Environmental life cycle costing*, 1st. ed. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420054736>
- Huysman, S., De Schaepe-meester, J., Ragaert, K., Dewulf, J., De Meester, S., 2017. Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. *Resour. Conserv. Recycl.* 120, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.013>
- Manfredi, S., Allacker, K., Chomkham-sri, K., Pelletier, N., Souza, D.M. de, 2012. *Product Environmental Footprint (PEF) Guide*, European Commission (EC) Joint Research Centre (JRC) Institute for Environment and Sustainability (IES).
- Mercante, I., Alejandrino, C., Ojeda, J.P., Chini, J., Maroto, C., Fajardo, N., 2018. Mortar and concrete composites with recycled plastic: a review. *Sci. Technol. Mater.* 30, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.stmat.2018.11.003>
- Ojeda, J.P., Mercante, I.T., Fajardo, N.H., 2020a. Design and test of recycled plastic fibers for mortar reinforcement. *Rev. Int. Contam. Ambient.* <https://doi.org/10.20937/RICA.2020.36.53423>
- Ojeda, J.P., Mercante, I.T., Horacio Fajardo, N., 2020b. Ensayos mecánicos sobre morteros con agregados de plástico reciclado dosificados según modelo de conductividad térmica. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 36, 465–474. <https://doi.org/10.20937/rica.53452>
- Prahallada, M.C.; Naveen Kumar, D. T.; Chandrashekhar, S. Y. (2018) Evaluation of strength characteristics of polyethylene terephthalate (PET) strap fibre reinforced concrete by direct and in-direct method of testing. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. Volume 120 N. 6. 6799-6819. ISSN: 1314-3395 (on-line version) url: <http://www.acadpubl.eu/hub/>
- Swarr, T., Hunkeler D., Klöpffer, W., Pesonen H.-L, Ciroth, A., Brent, A.C. and Pagan, R. (2011a). *Environmental life cycle costing: a Code of Practice*. *International Journal of Life Cycle Assessment* 16:389–395. DOI 10.1007/s11367-011-0287-5
- Swarr, T., Hunkeler, D., Klöpffer, W., Pesonen, H.-L., Ciroth, A., Brent, A.C. and Pagan, R. (2011b). *Environmental Life Cycle Costing: A Code of Practice*. SETAC Press, Pensacola.
- The Ellen MacArthur Foundation (2012) *Towards a Circular Economy - Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. *Greener Manag. Int.* <https://doi.org/2012-04-03>
- Weidema, B.P., Bauer, C., Hischer, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., Vadenbo, C.O., Wernet, G., 2013. Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3., *Ecoinvent Report 1 (v3)*.
- Yin, S., Tuladhar, R., Shanks, R.A., Collister, T., Combe, M., Jacob, M., Tian, M., Sivakugan, N., 2015. Fiber preparation and mechanical properties of recycled polypropylene for reinforcing concrete. *J. Appl. Polym. Sci.* 132. <https://doi.org/10.1002/app.41866>