

Desmaterialización y crisis económica ¿Caminos paralelos? Valoraciones a partir del estudio del caso de la UE-15

Dematerialization and the economic crisis – are they parallel paths?
Assessments based on the EU-15 case study

Pablo Alonso Fernández^{1,a} , Rosa María Regueiro Ferreira^{2,b} , Xoán Ramón Doldán García^{2,c} 

¹ Grupo de investigación de Economía Ecológica y de los Recursos Naturales, Departamento de Economía Cuantitativa. Universidade de Santiago de Compostela, Avenida do Burgo das Nacións, s/n, 15782, Santiago de Compostela, España

² Grupo de Investigación de Economía Ecológica y de los Recursos Naturales, Departamento de Economía Aplicada. Universidade de Santiago de Compostela, Avenida do Burgo das Nacións, s/n, 15782, Santiago de Compostela, España

 ap.alonso.fernandez@usc.es

 rosamaria.regueiro@usc.es

 xoan.doldan@usc.es

Recibido: 28/06/2023; Aceptado: 24/01/2024

Resumen

En este trabajo se investiga la evolución del consumo de recursos materiales en los países de la Unión Europea-15 (UE-15) en los últimos 20 años, con el objetivo de analizar si en ellos existe desmaterialización y que sectores la lideran. Como indicador de consumo material se utiliza la huella material, ya que indica todos los recursos que requiere una economía. Utilizando los datos de la huella material y el PIB se propone un modelo que permite estudiar la existencia de desmaterialización en la UE-15. Los principales resultados muestran que la desmaterialización solo ocurre de forma coyuntural tras la crisis de 2008, recuperándose posteriormente el acoplamiento entre el PIB y la huella material.

Palabras clave: Desmaterialización; Consumo material; Crecimiento económico; Crisis; Huella material.

Abstract

This paper investigates how the consumption of material resources has evolved over the last 20 years in the member states that make up the European Union-15, with the aim of analyzing whether there is dematerialization in these countries and which sectors are leading the way. The material footprint is used as an indicator of material consumption, since it indicates all the resources required by an economy. Using data from the material footprint and GDP, a model has been proposed to allow dematerialization in the EU-15 to be studied. The main results show that dematerialization has only occurred conjuncturally since the 2008 crisis, with the GDP-material-footprint coupling subsequently being restored.

Keywords: Dematerialization; Material consumption; Economic growth; Crisis; Material footprint.

JEL: Q32; Q56



1. INTRODUCCIÓN

La relación entre el crecimiento económico y el consumo de recursos ha recibido cada vez más atención en los últimos años. La eficiencia en la utilización de los recursos y la reducción de los residuos y las emisiones se han convertido en una constante entre los objetivos de las políticas de la mayoría de los gobiernos e instituciones. Para establecer y cuantificar estos objetivos se utilizan múltiples indicadores, de los que muchos se basan en la comparación del crecimiento del PIB y con indicadores ambientales o ecológicos. Esto ocurre a pesar de que el PIB es un indicador económico cuya capacidad para representar la evolución de una economía ha sido ampliamente discutida (Fitoussi et al., 2011; Giannetti et al., 2015; Kubiszewski et al., 2013), y de que los indicadores económicos no son capaces de reflejar adecuadamente la evolución del estado del medioambiente (Martínez-Alier et al., 2010). La comparación entre el crecimiento del PIB y de algún indicador de impacto ambiental lleva al análisis del desacoplamiento entre ambas series. Si las series se desligan, existe desacoplamiento, lo que implica una mejora en la eficiencia en la utilización de los recursos, siempre que crezca el PIB en mayor medida. En el mejor escenario, el desacoplamiento se produce porque se reduce el impacto ambiental, dando lugar a lo que se conocería como desmaterialización en el ámbito del consumo material. Además de la caída del consumo material y el crecimiento del PIB, la desmaterialización también requiere del mantenimiento o la mejora de las condiciones de vida de la población.

Algunos países desarrollados se han aproximado a la desmaterialización en los últimos años, lo que suele atribuirse a la evolución de la estructura económica hacia actividades de menor intensidad material (Schandl et al., 2018; Wiedmann et al., 2015). En este proceso juega un papel clave la aplicación de los principios de la economía circular, favoreciendo una disminución tanto de la extracción de recursos como de la expulsión de deshechos y rompiendo con la concepción lineal del proceso económico (Korhonen et al., 2018; Scheel et al., 2020). Sin embargo, el impacto de la crisis de 2008 genera dudas acerca de las causas de esta potencial desmaterialización (Gutiérrez-Barbarrusa, 2016; Halkos & Gkampoura, 2021; Oliveras et al., 2021; Schaffartzik & Duro, 2022). Al mismo tiempo, las deslocalizaciones productivas de las últimas décadas favorecen un consumo material menor en estos países (Wiedmann et al., 2015). En un contexto en el que el comercio internacional tiene cada vez mayor importancia, aumenta la importancia del enfoque utilizado para medir el consumo material de cada país. En este sentido, un cálculo centrado en el ámbito territorial o de la producción puede llevar a conclusiones erróneas respecto a la evolución de los requerimientos materiales de un país, ya este enfoque no refleja adecuadamente el consumo de recursos relacionado con los flujos comerciales. Por tanto, resulta de gran importancia aplicar un enfoque capaz de incorporar los efectos del comercio, permitiendo identificar los verdaderos requerimientos materiales de cada país.

En este trabajo se analiza la evolución del consumo de recursos materiales de los países de la Unión Europea 15 (UE-15)¹ entre 2000 y 2019, con el objetivo de determinar si existe desmaterialización. La UE-15 es un conjunto de países desarrollados con una estructura económica relativamente similar, en la que predomina claramente el sector servicios y que cuenta con un elevado nivel de vida. Al mismo tiempo, son un conjunto de países que presenta una importante dependencia física del resto del mundo. Estas características hacen preferible

¹ La UE-15 se compone de: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Países Bajos, Portugal, Reino Unido y Suecia.

esta agrupación de países frente a otras, como la UE-27, en la que existe una mayor heterogeneidad tanto en la estructura económica como en los flujos materiales. Por otra parte, en la selección de los países analizados se han considerado también las políticas y estrategias desarrolladas por la Unión Europea con un enfoque ecológico, especialmente en el ámbito de la economía circular (Comisión Europea, 2014, 2018).

Como indicador del consumo material se emplea la huella material, que cuenta con la ventaja de contabilizar tanto el consumo que ocurre dentro de cada país, como los materiales que requiere la producción de las mercancías que importan, aunque no formen parte de los bienes finales (Eurostat, 2018; Schandl et al., 2018; Wiedmann et al., 2015). Para realizar un análisis más completo, se analiza la huella material de las cuatro categorías principales en las que se encuentra desagregada en la base de datos del United Nations Environment Programme (UNEP, 2022): biomasa, minerales metálicos, minerales no metálicos y combustibles fósiles.

El artículo se estructura de la siguiente manera: primero, un apartado metodológico en el que se describe la metodología empleada para obtener los flujos materiales, se presentan las cuestiones más relevantes acerca del desacoplamiento y la desmaterialización y se especifica el modelo. Posteriormente, se muestran los principales resultados y se realiza una discusión de estos considerando la literatura previamente existente. Por último, se presentan las principales conclusiones y se exponen las limitaciones de esta investigación.

2. METODOLOGÍA

2.1. Análisis de Flujos materiales

Para medir el consumo de recursos materiales que un territorio necesita para mantener su actividad se emplean indicadores basados en el Análisis de Flujos materiales (AFM). Esta metodología se basa en la teoría del metabolismo socioeconómico y permite calcular los flujos de recursos materiales que ocurren entre las sociedades y la naturaleza (Ayres & Ayres, 1998; Fischer-Kowalski & Weisz, 1999). Los flujos utilizados en este trabajo se definen siguiendo las indicaciones de Eurostat (2018) y del (UNEP, 2022). Es conveniente precisar que el consumo material no indica directamente el impacto ambiental, sino más bien la presión sobre los recursos naturales, en tanto que el impacto depende del tipo de material considerado (Matthews et al., 2000; Roca, 2002).

El flujo básico del AFM es la Extracción Doméstica (ED), que representa todos los materiales extraídos de la naturaleza por un territorio. Añadiendo a la ED las importaciones de recursos materiales y descontando las exportaciones, se obtiene el consumo material de un territorio. La interpretación del consumo material es diferente en función del enfoque utilizado para determinar los flujos comerciales físicos:

- Perspectiva territorial o de la producción: mediante este enfoque, los flujos comerciales físicos representan el peso de los bienes finales comerciados, por lo que el consumo material indica los recursos que se utilizan dentro del territorio del país analizado. El indicador obtenido suele denominarse consumo material doméstico (CMD).
- Perspectiva del consumo: en este caso, los flujos comerciales físicos consideran, además del peso de los bienes finales, todos aquellos materiales que han sido utilizados en el proceso de producción de estos, independientemente del país en que el que se consumen efectivamente (Eurostat, 2018; UNEP, 2022; Wiedmann et al., 2015). Los materiales utilizados en el proceso de producción que no forman parte de los bienes finales comerciados se conoce como flujos ocultos. Cuando se incorporan estos flujos al consumo material, se obtiene un indicador de

consumo material conocido como huella material, que permite aproximar los verdaderos requerimientos materiales de un país (Carpintero, 2015; Krausmann et al., 2017; Schandl et al., 2018; Wiedmann et al., 2015).

La perspectiva territorial se utiliza con mayor frecuencia que la perspectiva del consumo. Esto se debe a que el cálculo del CMD resulta más sencillo, ya que no requiere de estimaciones y los flujos se corresponden con los del balance monetario. Este indicador es útil para conocer la cantidad de recursos que se consumen en los procesos de producción de un país, proporcionando una medida de la presión ecológica de su sistema productivo. Sin embargo, el consumo material calculado mediante este enfoque presenta importantes limitaciones a la hora de representar los efectos del comercio internacional. Esto es especialmente destacado en el caso de las deslocalizaciones productivas, ya que favorecen una reducción del consumo material en el país que externaliza la actividad a costa de aumentar el consumo material en otro lugar del mundo. El resultado es una aparente mejora ecológica en el país que externaliza, cuando realmente solo se ha producido un desplazamiento del lugar de consumo (Krausmann et al., 2017; Schandl et al., 2018).

En este contexto, la huella material resulta más adecuada para medir los verdaderos requerimientos materiales de una economía, pues permite imputar al consumo material del país importador los materiales utilizados en la producción de las importaciones. Como resultado, se obtiene una medida del consumo material independiente del lugar de producción y de los efectos del comercio internacional que permite aproximar el tamaño del metabolismo de un país. Esto permite definir de forma más adecuada la responsabilidad sobre el consumo de recursos y diseñar políticas más eficientes para la reducción del consumo material. Las desventajas de la huella material se encuentran en la necesidad de recurrir a la estimación de los flujos ocultos. Esto implica un cierto grado de imprecisión que varía en función del país y la categoría material considerada, pero que en cualquier caso debe ser considerado a la hora de interpretar los resultados.

Los datos utilizados sobre consumo material proceden de la Global Material Flows Database de la UNEP (2022). Se utiliza tanto la huella material total como desglosada en 4 categorías materiales:

- Biomasa (B): hace referencia a todos los materiales bióticos, incluyendo cultivos, madera o producción ganadera, entre otras cosas.
- Minerales metálicos (MM): materiales que cuentan con brillo propio y son conductores de la electricidad, como el oro, la plata o el zinc.
- Minerales no metálicos (MNM): materiales sin brillo propio y que no conducen la electricidad. Esta categoría es muy amplia, pues incluye desde las denominadas tierras raras, fundamentales para aplicaciones tecnológicas, hasta materiales relacionados con la construcción.
- Combustibles fósiles (CF): fundamentalmente petróleo, gas y carbón.

Debido al protagonismo del sector de la construcción en la crisis de 2008 y a la elevada intensidad material de este sector, se considera especialmente interesante disponer de datos desagregados para el consumo material en el sector de la construcción. Sin embargo, en la Global Material Flows Database no hay disponibles datos con un nivel de desagregación mayor que las categorías presentadas para la huella material. Como alternativa, se utiliza la categoría de minerales no metálicos destinados a la construcción, disponible para el CMD. Utilizar el CMD presenta el inconveniente de que se omiten los recursos materiales consumidos para producir los bienes importados, así como los correspondientes a las exportaciones. Los minerales no

metálicos destinados a la construcción no se incluyen en las estimaciones, debido a que no se muestran desagregados para la huella material.

2.2 Crecimiento económico, impacto ambiental y desmaterialización

La relación entre el crecimiento económico y el deterioro ambiental es una cuestión ampliamente discutida en el ámbito académico. Desde hace décadas, existen posiciones contrarias respecto al sentido de esta relación, dando lugar a múltiples estudios que divergen notablemente en sus resultados (Allard et al., 2018; Ansari et al., 2020; Bithas & Kalimeris, 2018; Carpintero, 2003; Dong et al., 2021; Frodyma et al., 2022; Grossman & Krueger, 1991; Gyamfi et al., 2021; Li et al., 2022; Panayotou, 1993; Sarkodie & Ozturk, 2020). Una de las teorías más estudiadas respecto a la evolución del crecimiento económico y el impacto ambiental es la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA). Esta hipótesis, desarrollada por Shafik y Bandyopadhyay (1992) y Panayotou (1995), se basa en la curva de Kuznets (1955) para proponer que la relación entre el crecimiento económico y el impacto ambiental sigue una forma de U invertida, de la misma forma que la relación entre el crecimiento del ingreso per cápita y la desigualdad en la curva original. La forma de la curva distribuye la relación en dos fases: en la primera, el país o territorio analizado desarrolla su estructura económica, lo que requiere un elevado consumo de materiales; en la segunda las mejoras tecnológicas y el cambio de la estructura económica a largo plazo permiten alcanzar un nivel mayor de eficiencia, lo que conduce a una reducción del consumo de recursos y del impacto ambiental (Ansari et al., 2020; Dietz & Rosa, 1994; Panayotou, 1993).

La hipótesis de una relación no lineal entre ambas variables condujo a la investigación de una posible relación cúbica, que fue investigada por primera vez por Grossman y Krueger (1995). Así, la CKA seguiría una forma de N invertida principalmente en países desarrollados. Esta se explica porque el elevado nivel de desarrollo conduce a la introducción de nuevos materiales y contaminantes en la economía, lo que vuelve la relación positiva de forma transitoria (Grossman & Krueger, 1995). Esta hipótesis es objeto de un gran número de investigaciones (Allard et al., 2018; Frodyma et al., 2022; Gyamfi et al., 2021; Özokcu & Özdemir, 2017; Saqib & Benhmad, 2021), que en ocasiones encuentran evidencias en un sentido opuesto al que se propone originalmente la curva. En este caso, la hipótesis más probable es que la relación negativa sea una etapa transitoria, como resultado de la deslocalización de la producción, que se produzca un efecto rebote² o que exista un período recesivo que impacte en mayor medida en el consumo material que en el PIB (Schaffartzik & Duro, 2022; Shao et al., 2017; Wiedmann et al., 2015). Es importante señalar que, aunque las hipótesis originales de la CKA hacen referencia a cambios estructurales en el medio o largo plazo, existen análisis que se basan en períodos más reducidos, especialmente en el ámbito de las relaciones de grado mayor a 2 (Allard et al., 2018; Ansari et al., 2020; Maneejuk et al., 2020). En este sentido, el contraste de relaciones polinomiales entre el crecimiento económico y el consumo de recursos materiales resulta de interés incluso aunque no se satisfagan totalmente los supuestos originales de la CKA, ya que es posible que la relación entre estas variables no siga una estructura lineal (York et al., 2003).

² El efecto rebote ocurre cuando una mejora técnica aumenta la eficiencia en la utilización de un recurso determinado y el consumo de este recurso aumenta, en lugar de disminuir. Esto ocurre porque la mejora tecnológica tiende a reducir los costes, de forma que esta tecnología se vuelve más asequible y se generaliza su utilización (Carpintero, 2003).

Las hipótesis de la CKA son extensibles al ámbito de los recursos materiales, dando lugar la teoría o hipótesis de la desmaterialización. Según esta, en la fase decreciente de la curva, el crecimiento económico conduce a una reducción del consumo material gracias a las mejoras de eficiencia proporcionadas por la tecnología (Bithas & Kalimeris, 2018; Kemp-Benedict, 2018; Schaffartzik & Duro, 2022) y al cambio estructural hacia sectores de menor intensidad material (Carpintero, 2003; Fix, 2019). En este sentido, la economía circular está muy vinculada a la desmaterialización, ya que implica la ruptura con la visión lineal del proceso económico, favoreciendo la minimización tanto de los flujos materiales de entrada como de salida (Korhonen et al., 2018). Por tanto, resulta evidente que una perspectiva de economía circular sería de gran importancia para alcanzar una hipotética situación de desmaterialización.

El rechazo de la hipótesis de la desmaterialización implica la incompatibilidad del crecimiento económico con la reducción del consumo de recursos materiales. Este escenario obligaría a desplazar al crecimiento del centro del paradigma económico, reforzando perspectivas con un enfoque de economía ecológica, como el decrecimiento, en la que el bienestar de la población es independiente del crecimiento económico (Fischer-Kowalski & Haberl, 2015; Kallis, 2017). En este sentido, se puede considerar que la economía circular constituye la aportación eointegradora que mejor se ha introducido en el debate económico convencional, formando parte de las estrategias de la Unión Europea y hasta siendo considerada como un cambio sistémico por la propia Comisión Europea (Comisión Europea, 2014; Vence, 2023).

Generalmente, el término desmaterialización es utilizado de forma un tanto ambigua en muchas investigaciones para referirse a situaciones de desacoplamiento entre el PIB y el consumo material. Puede diferenciarse dos formas de desacoplamiento:

- Desacoplamiento relativo o débil: se produce cuando el consumo material crece, pero en menor medida que el PIB.
- Desacoplamiento absoluto o fuerte: ocurre cuando el consumo material decrece, manteniéndose el crecimiento del PIB.

Aunque en ambas formas de desacoplamiento se da una reducción de la intensidad material, es decir, de la cantidad de recursos utilizada por cada unidad de PIB, solo en el caso del desacoplamiento absoluto se produce una verdadera mejora en términos ecológicos (Martínez-Alier, 2004). Por ello, se considera más adecuado reservar el término desmaterialización para el caso del desacoplamiento absoluto.

En el análisis del desacoplamiento y la desmaterialización tiene una gran importancia la perspectiva considerada. En los países desarrollados en general y en los países que conforman la EU-15 en particular se encuentran diferencias muy importantes entre el consumo material calculado en términos de producción y consumo (Dittrich, Bringezu, et al., 2012; Dittrich, Giljum, et al., 2012; Schandl et al., 2018). De esta forma, las investigaciones que se basan en un enfoque territorial o de la producción son más proclives a encontrar evidencias de desmaterialización, mientras que, mediante un enfoque de consumo, no es frecuente que se encuentren signos de desmaterialización (Kemp-Benedict, 2018; Steinberger et al., 2010, 2013; Wiedmann et al., 2015).

Por otra parte, conviene señalar que la utilización del PIB como indicador para contextualizar la evolución del consumo material no está exenta de limitaciones. El PIB se emplea considerando que, en términos per cápita, es una buena aproximación del nivel de bienestar de la población de un territorio. Sin embargo, es un indicador ampliamente criticado por sus limitaciones como medida de las condiciones de vida. Esta limitación es especialmente a partir de cierto nivel, cuando el bienestar difícilmente estará vinculada a la posibilidad de

acceder a nuevos bienes y servicios (Mishan, 1980). Al mismo tiempo, el crecimiento económico se ha mostrado ineficaz a la hora de reducir la desigualdad, ya que apenas presenta efectos sobre la distribución del ingreso o sobre la pobreza extrema (Fitoussi et al., 2011).

2.3 Especificación del modelo

Existen múltiples indicadores para analizar el desacoplamiento y la desmaterialización. Uno de los indicadores más útiles es la elasticidad del consumo material respecto del PIB, llamada elasticidad ecológica (York et al., 2003). La gran ventaja de este indicador es que permite formular modelos en los que no solo se contraste la elasticidad en términos lineales, sino también introducir los términos cuadrático y cúbico para contrastar las hipótesis de la CKA (Allard et al., 2018; Ansari et al., 2020; Saqib & Benhmad, 2021; Wu et al., 2021). Para la investigación desarrollada en este trabajo, se utiliza un modelo basado en la elasticidad ecológica desarrollado en la Ecuación 1:

$$\log HM = a + b(\log PIBpc) + c((\log PIBpc)^2) + d((\log PIBpc)^3) + e \quad (1)$$

Donde HM es la huella material en toneladas, a es el intercepto, b , c y d son los coeficientes del PIB per cápita y e , es la perturbación o término de error. Este modelo permite estimar el efecto del PIB per cápita sobre la huella material de los países de la UE-15. La interpretación de los posibles resultados de los coeficientes se resume en la Tabla 1:

Tabla 1. Interpretación del signo de los coeficientes del modelo 1

Signo del coeficiente	Interpretación
PIB > 0, PIB ² = 0, PIB ³ = 0	Relación lineal positiva.
PIB < 0, PIB ² = 0, PIB ³ = 0	Relación lineal negativa.
PIB > 0, PIB ² < 0, PIB ³ = 0	Relación cuadrática en forma de U.
PIB < 0, PIB ² > 0, PIB ³ = 0	Relación cuadrática en forma de U invertida (CKA).
PIB > 0, PIB ² < 0, PIB ³ > 0	Relación cúbica en forma de N.
PIB < 0, PIB ² > 0, PIB ³ < 0	Relación cúbica en forma de N invertida (CKA).

Fuente: elaboración propia.

El modelo presentado en la Ecuación 1 se replica utilizando como variable independiente cada una de las categorías materiales que componen la huella material, con el objetivo de analizar la desmaterialización en todas ellas.

En la investigación de las hipótesis de la CKA se emplea habitualmente tanto el PIB como el PIB per cápita. En este caso se emplea el PIB per cápita considerando de mayor interés una aproximación al bienestar que únicamente a la evolución económica. La huella material se expresa en toneladas totales, por lo que el efecto de la población se introduce en el modelo de forma indirecta a través del PIB per cápita. No se considera el consumo material por habitante porque el objetivo de la desmaterialización debe ser una reducción del consumo material en términos absolutos. Además, es conveniente señalar que, en las sociedades industriales, la población tiene una influencia muy reducida sobre el consumo material, siendo la actividad económica el factor más relevante (Agboola & Bekun, 2019; Fischer-Kowalski & Amann, 2001; Gyamfi et al., 2021).

Para mejorar la representación gráfica, se considera de interés utilizar el índice de desacoplamiento, un indicador propuesto por Tapio (2005) que relaciona el crecimiento del PIB y el crecimiento del consumo material de la siguiente forma³ :

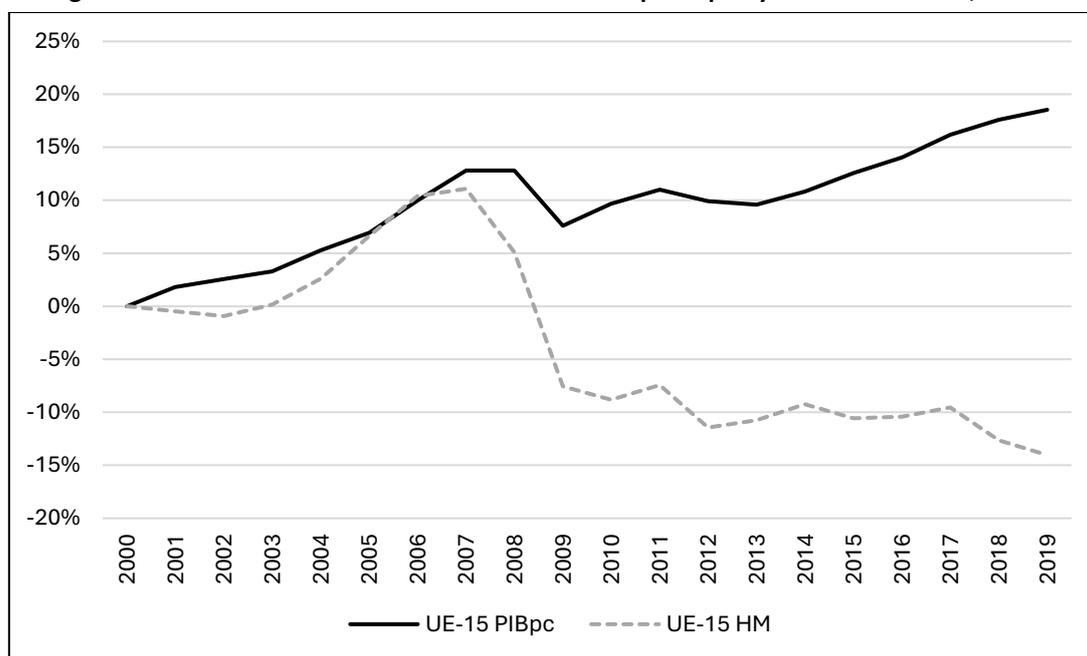
$$ID = \frac{\% \Delta CM}{\% \Delta PIB} = \frac{(CM_t - CM_{t_0})}{CM_{t_0}} \bigg/ \frac{(PIB_t - PIB_{t_0})}{PIB_{t_0}} \quad (2)$$

La interpretación índice de desacoplamiento sencilla: existe desacoplamiento absoluto o desmaterialización cuando su valor es negativo y se produce desacoplamiento relativo cuando su valor se encuentra entre 0 y 1. Los valores superiores a 1 indican que el crecimiento del consumo material es superior al del PIB, por lo que se daría una “rematerialización”. Este indicador es especialmente útil para analizar la evolución interanual del desacoplamiento y la desmaterialización.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se representan el crecimiento de la huella material y del PIB per cápita de la UE-15 con base en el año 2000. Las series mantienen una tendencia similar hasta 2008, a partir de cuando el efecto de la crisis es fácilmente observable. La caída de la huella material es mucho más pronunciada que la caída del PIB per cápita. Posteriormente, se alternan períodos de acoplamiento y desacoplamiento que dificultan la interpretación, aunque en los últimos dos años parece que se alcanza la desmaterialización. En cualquier caso, el nivel de la huella material cae notablemente respecto al año 2000.

Figura 1. Tasa de variación desde el año 2000 del PIB per cápita y la huella material, 0-2019



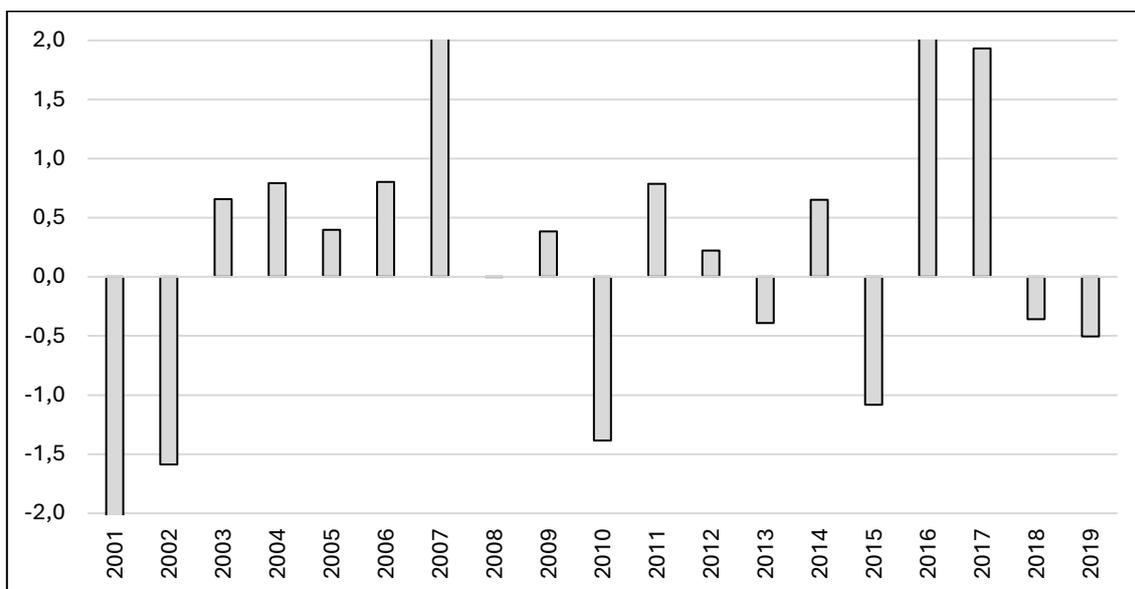
Fuente: elaboración propia a partir de UNEP (2022).

Nota: HM es la abreviación de huella material.

³ CM indica Consumo Material.

En la **Figura 2** se representa el índice de desacoplamiento. Se puede apreciar como la mayor parte de los períodos en los que se alcanza desacoplamiento absoluto o desmaterialización se concentran en los años posteriores a la crisis. En 2001 y 2002 se alcanza la desmaterialización, coincidiendo con años de inestabilidad económica en los países de la UE-15. El resto de los años en los que se observa desmaterialización se concentran después de 2008, intercalados con años en los que solo se alcanza desacoplamiento relativo o incluso se da una situación de rematerialización.

Figura 2. Índice de desacoplamiento para el conjunto de países de la EU-15



Fuente: elaboración propia a partir de [UNEP \(2022\)](#).

Nota: los resultados se representan limitados entre 2 y -2 para mejorar la representación, ya que valores por encima de 1 y por debajo de 0 no proporcionan información adicional.

En la **Tabla 2** se recoge el índice desacoplamiento entre el año 2000 y el 2019 para cada país de la UE-15.

Tabla 2. Índice de desacoplamiento para cada país de la EU-15 (2000-2019)

País	Índice de desacoplamiento
Alemania	-0,76
Austria	0,14
Bélgica	0,41
Dinamarca	-0,47
España	-0,40
Finlandia	0,32
Francia	0,40
Grecia	-32,46
Irlanda	-0,03
Italia	-11,04
Luxemburgo	0,31
Países Bajos	0,08
Portugal	-4,39

País	Índice de desacoplamiento
Reino Unido	-0,23
Suecia	0,56

Fuente: elaboración propia con datos de [UNEP \(2022\)](#)

Se puede observar que existen grandes diferencias entre países, alcanzando 7 de ellos la desmaterialización y los 8 restantes el desacoplamiento relativo.

Para complementar el análisis gráfico y estudiar con mayor profundidad la relación entre la huella material y el PIB, se realiza la estimación del modelo descrito previamente.

Tabla 3. Resultados estimación desmaterialización, modelo cúbico

Variable	Coefficiente	Error	R ²
PIB	62,430	20,740**	0,9453
PIB ²	-2,231	0,769**	
PIB ³	0,027	0,009**	

Fuente: elaboración propia con datos de [UNEP \(2022\)](#).
 Nota: “*” , “**” y “***” indican significatividad al 10%, 5% y 1% respectivamente

Los resultados de la estimación del modelo, recogidos en la [Tabla 3](#), muestran que todos los coeficientes son significativos al 5%. La comparación con el modelo cuadrático y lineal mediante la comparación de la varianza (ANOVA en R) indica que es preferible el modelo cúbico. En la [Tabla 4](#) se muestran los intervalos de confianza al 95% para cada uno de los estimadores del modelo.

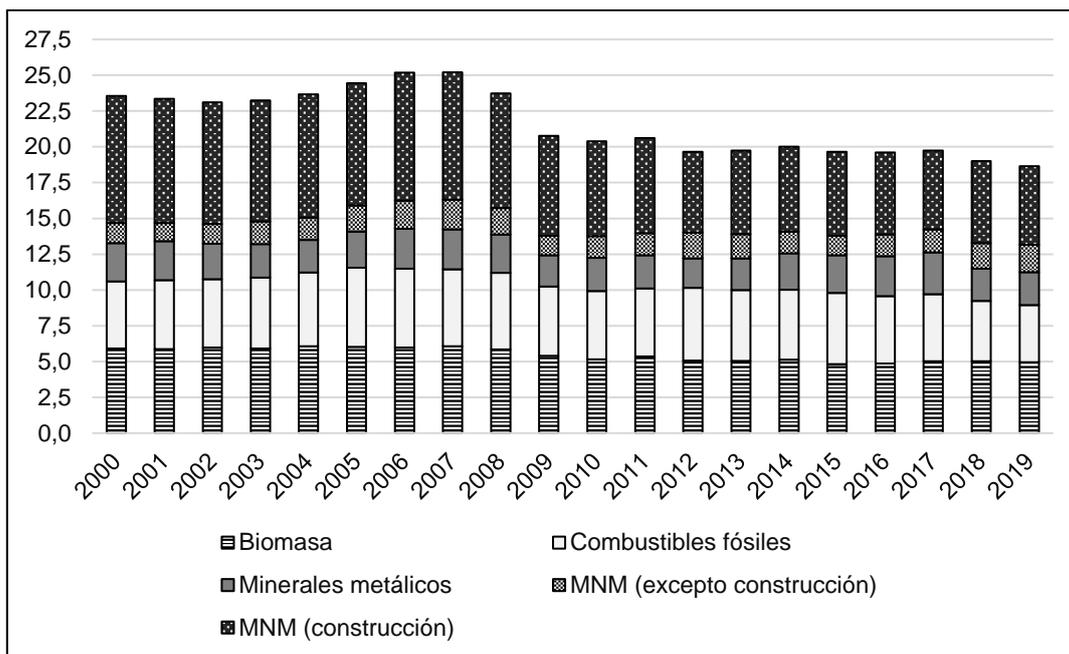
Tabla 4. Intervalos de confianza

Variable	Coefficientes 95%	Coefficientes 99%
PIB	22,137 / 102,729	9,343 / 115,524
PIB ²	-3,746 / -0,717	-4,227 / -0,236
PIB ³	0,008 / 0,046	0,002 / 0,052

Fuente: elaboración propia con datos de [UNEP \(2022\)](#).

El signo de los coeficientes no varía independientemente del nivel de confianza utilizado. En ambos casos, el coeficiente lineal es positivo, el cuadrático negativo y el cúbico positivo. Es cierto que el coeficiente cúbico toma valores muy reducidos, lo que puede relacionarse con la evolución de las variables en los últimos períodos. En cualquier caso, la relación entre la huella material y el PIB sigue una forma de N. Esto implica que la relación entre el PIB per cápita y el consumo material no sigue una forma lineal, sino que atraviesa diferentes fases.

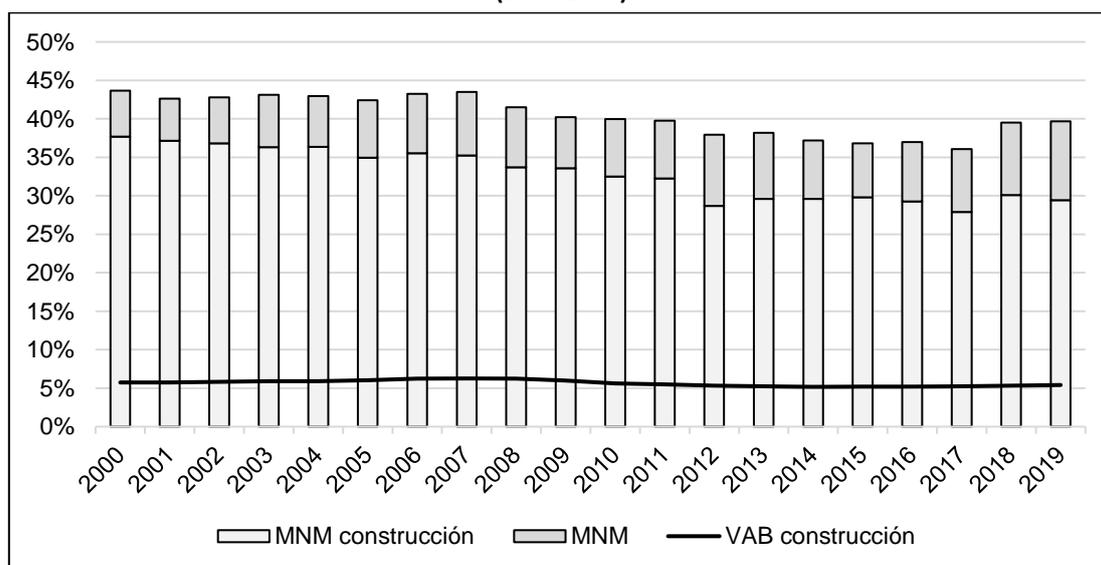
Mediante el análisis gráfico, se puede intuir que la desmaterialización coincide con la crisis de 2008. En este contexto, resulta de interés estudiar la evolución de las diferentes categorías materiales que componen la huella material. En la [Figura 3](#) se representa la huella material de la UE-15 por categorías materiales entre 1990 y 2019.

Figura 3. Evolución de la huella material por categorías, UE-15, toneladas per cápita (2000-2019)

Fuente: elaboración propia con datos de [UNEP \(2022\)](#).

MNM: Minerales No Metálicos.

La caída de la huella material a raíz de la crisis de 2008 no se distribuye de forma igualitaria entre las diferentes categorías materiales. Se puede apreciar que la categoría más afectada es la de los minerales no metálicos, especialmente los destinados a la construcción. Teniendo en cuenta las características de la crisis de 2008, en la que el sector inmobiliario jugó un papel muy destacado, este resultado no es sorprendente. Sin embargo, permite relacionar la importante reducción de la huella material con la evolución de este sector. La caída de la construcción no se refleja de una forma tan marcada en el PIB, debido a que su Valor Agregado Bruto es notablemente menor a su peso sobre la huella material, como se puede observar en la [Figura 4](#).

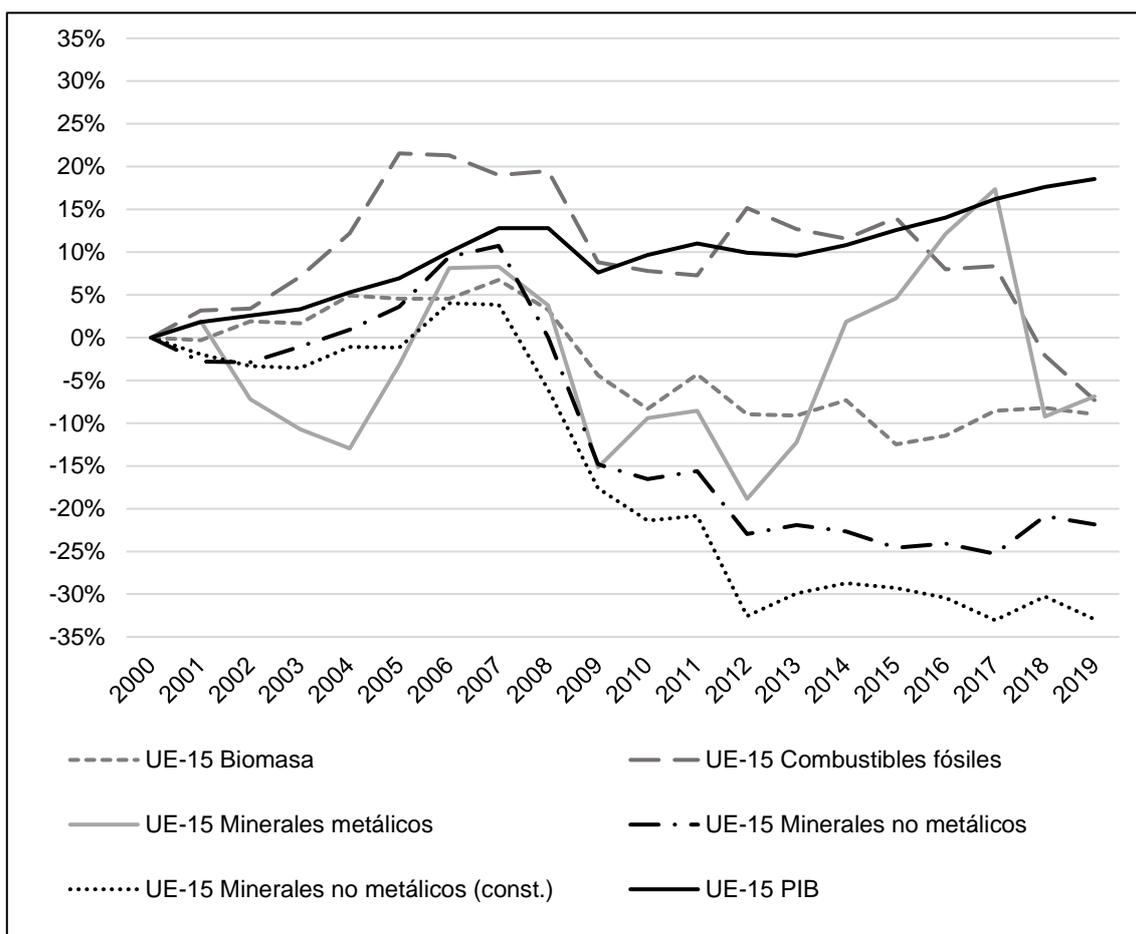
Figura 4. Porcentaje de la construcción sobre el VAB total y de los minerales no metálicos sobre la huella material (2000-2019)

Fuente: elaboración propia con datos de [UNEP \(2022\)](#).

Los recursos materiales consumidos en actividades de construcción representan más de un 35% del total de la huella material antes de la crisis y el total de los minerales no metálicos supera el 40%. En cambio, el VAB de la construcción apenas sobrepasa el 6% en el mismo momento. En términos de PIB, la construcción resulta mucho menos importante, por lo que el efecto de la caída del sector no se extiende demasiado en el tiempo. En cambio, la huella material se resiente de forma mucho más profunda, especialmente porque nunca se recupera el consumo de recursos.

En la **Figura 5** se puede apreciar la gran reducción de los minerales no metálicos. En esta categoría tienen un gran peso los minerales no metálicos destinados a la construcción, que decrecen en proporciones todavía mayores. Es evidente que la evolución de la huella material está marcada por lo que ocurre con los minerales no metálicos. Por otra parte, la biomasa también parece aproximarse a la desmaterialización en algunos períodos, mientras que los MM mantienen una trayectoria variable. A pesar de que su consumo cae bastante con la crisis de 2008, posteriormente recuperan el crecimiento, para volver a caer en los últimos períodos. Los combustibles fósiles son la categoría que sufre en menor medida los efectos de la crisis. Es un resultado esperable, teniendo en cuenta la elevada dependencia que tienen de estos materiales los sistemas energéticos de la mayor parte de los países de la UE-15. Solo en los dos últimos años se registra una caída importante que pueda aproximarse a la desmaterialización.

Figura 5. Tasa de variación desde el año 2000 del PIB y la huella material per cápita por categorías (2000-2019)



Fuente: elaboración propia con datos de [UNEP \(2022\)](#).

La huella material evoluciona de forma muy diferente en función de la categoría que se analice. Estas diferencias hacen de especial interés replicar el modelo estimado para la huella

material total en cada una de las categorías materiales consideradas. En la [Tabla 5](#) se presentan los resultados de la estimación del modelo para la biomasa, los minerales metálicos, los minerales no metálicos y los combustibles fósiles.

Tabla 5. Resultados estimación desmaterialización, modelo para cada la huella material de cada categoría material

Variable	Coefficiente (B)	Coefficiente (MM)	Coefficiente (MNM)	Coefficiente (CF)
Intercepto	-52,382 (6,662)***	-60,247 (8,132)***	-73,779 (11,108)***	-950,406 (266,239)***
PIB	4,306 (0,494)***	4,282 (0,604)***	6,013 (0,825)***	105,618 (30,066)***
PIB ²	-0,062 (0,009)***	-0,072 (0,011)***	-0,096 (0,015)***	-3,867 (1,130)***
PIB ³	No significativo	No significativo	No significativo	0,0476 (0,014)***
R ²	0,9558	0,9367	0,869	0,8982

Fuente: elaboración propia con datos de [UNEP \(2022\)](#).

Nota: “*”, “**” y “***” indican significatividad al 10%, 5% y 1% respectivamente. El error en la estimación de los coeficientes se muestra entre paréntesis

Se ha estimado el modelo completo para todas las categorías, obteniéndose resultados peores para el modelo que incluye el coeficiente cúbico en el caso de la biomasa, los minerales metálicos y los minerales no metálicos. Por tanto, para estas categorías, se selecciona el modelo que no cuenta con el coeficiente cúbico. En los tres casos, el resultado indica que se alcanza la desmaterialización, verificando la CKA en forma de U invertida. La desmaterialización se alcanza con mayor profundidad en el caso de los minerales no metálicos, mientras que es menos intensa en la biomasa. Para estas dos variables, los resultados se corresponden con lo que se podía deducir de forma gráfica. En el caso de los minerales metálicos, gráficamente se podía apreciar que su trayectoria es más irregular, pero alcanzan igualmente la desmaterialización. El resultado del modelo estimado para estas variables muestra que la crisis de 2008 supone un punto de inflexión en la evolución del consumo de determinados materiales. En el ámbito de los minerales no metálicos, es evidente que el factor determinante es el desplome de la construcción. Sin embargo, el efecto de la crisis no se limita a este sector, afectando también en gran medida al sector industrial, principal consumidor de minerales metálicos. Relacionada con este sector está también la biomasa, que incluye elementos como la madera, el papel, el cartón o los alimentos. La caída generalizada de la actividad económica y del consumo final como consecuencia de la recesión se transmite de forma directa a la huella material a través de estos sectores.

Por otra parte, los resultados del modelo estimado para los combustibles fósiles muestran un coeficiente cúbico significativo. La distribución de los signos indica que la relación entre la huella material de los combustibles fósiles y el PIB sigue una forma de N, por lo que no se alcanza la desmaterialización en esta categoría. Como se podía apreciar en la [figura 4](#), los combustibles fósiles son la categoría material menos afectada por la crisis de 2008. Estos recursos condicionan la evolución de la huella material total hasta el punto de que son la categoría responsable de que no exista desmaterialización. Debe señalarse que el consumo de combustibles fósiles no es independiente del ciclo económico, está estrechamente vinculado con el nivel de actividad económica y suele ser un factor determinante para el crecimiento económico ([Kan et al., 2019](#); [Pirlogea & Cicea, 2012](#)). Como en la mayor parte de países del mundo, el sector energético de la UE-15 es altamente dependiente del consumo de combustibles fósiles ([Kan et al., 2019](#)), imposibilitando la desmaterialización de este tipo de recursos.

La forma de N que se deduce de la interpretación de los coeficientes del modelo estimado para la huella material total indica que hay una fase de la curva en la que la relación entre el PIB

per cápita y la huella material se vuelve negativa. Esta fase puede corresponderse con las irregularidades surgidas de la crisis de 2008, cuando existen períodos en los que aumenta la huella material y disminuye el PIB per cápita y viceversa. Por otra parte, es importante tener en cuenta que una proporción importante de la reducción de la huella material se produce por el descenso en el consumo de minerales no metálicos. Puesto que el motivo principal de la reducción del consumo de estos materiales es el descenso de la actividad en el sector de la construcción, puede establecerse una conexión bastante importante entre la recesión y la desmaterialización. El gran deterioro de este sector en algunos países favorece una gran reducción del consumo material, considerando la importancia que tienen los materiales relacionados con este sector sobre la huella material total. De hecho, la caída del consumo material es notablemente más aguda en países como España, Irlanda, Italia, Grecia, Portugal o Reino Unido. En cambio, en los países centroeuropeos, con excepciones como Alemania o Dinamarca, la evolución del consumo material es mucho más estable, a pesar de que también tiende a cierto decrecimiento. En términos generales, parece que los países más afectados por la crisis y con un sector de la construcción más relevante están más cercanos a la desmaterialización.

Una condición que suele requerirse a los procesos de desmaterialización es que estos ocurran por un cambio estructural de la economía hacia actividades de menores requerimientos materiales, sin afectar negativamente a las condiciones de vida de la población. La crisis de 2008 implicó cambios sustanciales en la estructura económica de los países de la UE-15. Sin embargo, parece que estos cambios no se producen por una mejora en la gestión de los recursos, sino por una abrupta caída de la actividad económica. Por una parte, no se produce el cambio estructural necesario, siendo una prueba de ello la ausencia de desmaterialización en los combustibles fósiles. Resulta difícil plantear un proceso de desmaterialización independiente de una transición energética (Kemp-Benedict, 2018), y es evidente que esta no se produce, manteniéndose la dependencia de los recursos fósiles, a pesar de la caída de los dos últimos años analizados. Por otra parte, aunque el PIB se recupera rápidamente tras la crisis, las condiciones de vida de la población se recuperan de una forma mucho más lenta (Gutiérrez-Barbarrusa, 2016; Halkos & Gkampoura, 2021; Oliveras et al., 2021), por lo que en los años en los que ocurre la desmaterialización la calidad de vida todavía no se ha recuperado a niveles previos a la crisis. Las limitaciones del PIB per cápita como medida del bienestar de la población implican que lo más adecuado sea buscar otras variables para contextualizar la evolución del consumo material. Considerando tanto estas limitaciones como la relación positiva que existe entre el PIB per cápita y el consumo de recursos materiales, deben ganar importancia alternativa como el decrecimiento, capaces de integrar el bienestar social con la gestión de la naturaleza, desechando las medidas económicas más limitadas.

4. CONCLUSIONES

La desmaterialización es un proceso en el que se reduce la cantidad de recursos materiales que consume una economía, manteniendo el crecimiento económico y las condiciones de vida de la población. En este trabajo, se ha estudiado el conjunto de países de la UE-15 entre el año 2000 y 2019 con el objetivo de comprobar si se produce desmaterialización en este período. Para ello, se ha utilizado la huella material como indicador de consumo material, ya que presenta la ventaja de recoger todos los materiales que necesita una economía, independientemente del lugar en el que se consuman.

Los resultados para la huella material total indican que su relación con el PIB per cápita sigue una forma de N. Esta forma indica que no existe desmaterialización en términos

generales, aunque se atraviesa una fase en la que la relación entre el PIB per cápita y la huella material es inversa, lo que puede relacionarse con los efectos de la crisis de 2008. En el contexto de la crisis, la relación puede volverse negativa debido a que existan caídas del PIB que coincidan con aumentos de la huella material, lo que implicaría que no se produzca desmaterialización. En cualquier caso, la desmaterialización solo sería una fase transitoria para el conjunto de la huella material.

La estimación del modelo utilizando la huella material de la biomasa, los minerales metálicos, los minerales no metálicos y los combustibles fósiles aporta matices a los resultados generales. Se encuentra una relación en forma de U invertida para las tres primeras categorías materiales, lo que indica que existe desmaterialización en todas ellas. Sin embargo, la categoría que más se reduce es la de los minerales no metálicos, estrechamente vinculada al sector de la construcción. Además, esta categoría cuenta con un gran peso sobre la huella material total, por lo que es el principal factor que impulsa su decrecimiento. Al mismo tiempo, la construcción no tiene una relevancia tan destacada sobre el PIB. Por ello, la importante caída de este sector tiene efectos asimétricos entre el PIB y la huella material, facilitando la desmaterialización. Respecto a los combustibles fósiles, son la única categoría en la que no se alcanza desmaterialización. El sistema energético de la mayoría de los países de la UE-15 mantiene una dependencia muy elevada de los recursos fósiles, hasta el punto de que la evolución del consumo de estos recursos marca la evolución general de la huella material, incluso con el contrapeso de la caída de los minerales no metálicos. Paradójicamente, esta categoría de recursos materiales es la que genera mayores problemas tanto en el ámbito de la escasez de recursos como del impacto ambiental.

Por tanto, la relación entre el PIB per cápita y la huella material sigue una estructura incompatible con la desmaterialización en la Unión Europea 15. La caída de la huella material en los años posteriores a la crisis puede considerarse una fase de ajuste del nivel de producción, especialmente acusada en el ámbito de la construcción, de gran intensidad material. Sin embargo, la relación con el PIB per cápita se mantiene positiva, por lo que no se puede considerar que se haya producido todavía un cambio estructural que permita alcanzar la desmaterialización. La introducción de principios como la economía circular en la gestión de los recursos puede favorecer los procesos de desmaterialización, pero los efectos son todavía moderados, condicionados por la recesión y por lo reciente de su aplicación en los países analizados. En este sentido, es necesario esperar para determinar si los cambios que se aprecian desde 2008 se deben a la coyuntura económica o se mantienen en el tiempo y modifican la estructura económica lo suficiente como para que la economía se desmaterialice.

La principal limitación de este trabajo es la disponibilidad de un nivel de desagregación de datos mayor para la huella material. Al mismo tiempo, es importante considerar que la huella material es el resultado de una estimación a través de datos procedente de múltiples fuentes estadísticas, por lo su nivel de precisión no siempre es homogéneo entre países y categorías materiales (Eurostat, 2018; UNEP, 2022).

Por otra parte, sería de interés disponer de datos hasta 2022, en los que se pudiese analizar los efectos de la pandemia de Covid-19 sobre la desmaterialización. Además, debe considerarse que las estrategias de corte ecológico desarrolladas por la Unión Europea son demasiado recientes como para que sus efectos puedan recogerse adecuadamente en el período analizado. En los próximos años podrán realizarse análisis más precisos de la eficacia de estas políticas.

Autoría del trabajo

Conceptualización, P.A.F., R.M.R.F., X.R.D.G.; Metodología, P.A.F., X.R.D.G.; Software, P.A.F.; Adquisición de datos, P.A.F.; Análisis e interpretación, P.A.F., R.M.R.F., X.R.D.G.; Supervisión, R.M.R.F., X.R.D.G.; Redacción-Preparación del borrador, P.A.F.; Redacción-Revisión & Edición, P.A.F., R.M.R.F., X.R.D.G. Todos los autores han leído y están de acuerdo con la versión publicada del manuscrito.

Referencias

- Agboola, M. O., & Bekun, F. V. (2019). Does agricultural value added induce environmental degradation? Empirical evidence from an agrarian country. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(27), 27660-27676. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05943-z>
- Allard, A., Takman, J., Uddin, G. S., & Ahmed, A. (2018). The N-shaped environmental Kuznets curve: An empirical evaluation using a panel quantile regression approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(6), 5848-5861. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0907-0>
- Ansari, M. A., Haider, S., & Khan, N. A. (2020). Environmental Kuznets curve revisited: An analysis using ecological and material footprint. *Ecological Indicators*, 115, 106416. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106416>
- Ayres, R. U., & Ayres, L. (1998). *Accounting for Resources: Economy-wide applications of mass-balance principles to materials and waste*. Edward Elgar.
- Bithas, K., & Kalimeris, P. (2018). Unmasking decoupling: Redefining the Resource Intensity of the Economy. *Science of The Total Environment*, 619-620, 338-351. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.061>
- Carpintero, Ó. (2003). Los costes ambientales del sector servicios y la nueva economía: Entre la desmaterialización y el efecto rebote. *Economía Industrial*, 352(IV), 59-76.
- Carpintero, Ó. (2015). *El metabolismo económico regional español: Glosario de términos*. FUHEM Ecosocial.
- Comisión Europea. (2014). *Hacia una economía circular: Un programa de cero residuos para Europa* [Comunicación de la Comisión].
- Comisión Europea. (2018). *Un planeta limpio para todos. La visión estratégica europea a largo plazo de una economía próspera, moderna, competitiva y climáticamente neutra* [Comunicado de la Comisión].
- Dietz, T., & Rosa, E. A. (1994). Rethinking the Environmental Impacts of Population, Affluence and Technology'. *Human Ecology Review*, 1, 277-300. <https://www.jstor.org/stable/24706840>
- Dittrich, M., Bringezu, S., & Schütz, H. (2012). The physical dimension of international trade, part 2: Indirect global resource flows between 1962 and 2005. *Ecological Economics*, 79, 32-43. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.04.014>
- Dittrich, M., Giljum, S., Lutter, S., & Polzin, C. (2012). *Green economies around the world? Implications of resource use for development and the environment*. Sustainable Europe Research Inst. (SERI).

- Dong, F., Li, J., Zhang, X., & Zhu, J. (2021). Decoupling relationship between haze pollution and economic growth: A new decoupling index. *Ecological Indicators*, 129, 107859. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107859>
- Eurostat. (2018). *Economy-wide material flow accounts handbook: 2018 edition*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2785/158567>
- Fischer-Kowalski, M., & Amann, C. (2001). Beyond IPAT and Kuznets Curves: Globalization as a Vital Factor in Analysing the Environmental Impact of Socio-Economic Metabolism. *Population and Environment*, 23(1), 7-47. <https://doi.org/10.1023/A:1017560208742>
- Fischer-Kowalski, M., & Haberl, H. (2015). Social metabolism: A metric for biophysical growth and degrowth. En J. Martínez-Alier y R. Muradian (Eds.), *Handbook of Ecological Economics* (pp. 100-138). Edward Elgard. <https://doi.org/10.4337/9781783471416>
- Fischer-Kowalski, M., & Weisz, H. (1999). Society as hybrid between material and symbolic realms: Toward a theoretical framework of society-nature interaction. *Advances in Human Ecology*, 8, 215-251.
- Fitoussi, J.-P., Sen, A. K., & Stiglitz, J. E. (2011). *Mismeasuring Our Lives: Why GDP Doesn't Add Up*. ReadHowYouWant.
- Fix, B. (2019). Dematerialization Through Services: Evaluating the Evidence. *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 4(2), 6. <https://doi.org/10.1007/s41247-019-0054-y>
- Frodyma, K., Papież, M., & Śmiech, S. (2022). Revisiting the Environmental Kuznets Curve in the European Union countries. *Energy*, 241, 122899. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122899>
- Giannetti, B. F., Agostinho, F., Almeida, C. M. V. B., & Huisingh, D. (2015). A review of limitations of GDP and alternative indices to monitor human wellbeing and to manage eco-system functionality. *Journal of Cleaner Production*, 87, 11-25. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.051>
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement* (Working Paper 3914). National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w3914>
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic Growth and the Environment*. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377. <https://doi.org/10.2307/2118443>
- Gutiérrez-Barbarrusa, T. (2016). The growth of precarious employment in Europe: Concepts, indicators and the effects of the global economic crisis. *International Labour Review*, 155(4), 477-508. <https://doi.org/10.1111/ilr.12049>
- Gyamfi, B. A., Adedoyin, F. F., Bein, M. A., & Bekun, F. V. (2021). Environmental implications of N-shaped environmental Kuznets curve for E7 countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(25), 33072-33082. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12967-x>
- Halkos, G. E., & Gkampoura, E.-C. (2021). Evaluating the effect of economic crisis on energy poverty in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110981. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110981>
- Kallis, G. (2017). Radical dematerialization and degrowth. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 375(2095), 20160383. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0383>

- Kan, S., Chen, B., & Chen, G. (2019). Worldwide energy use across global supply chains: Decoupled from economic growth? *Applied Energy*, 250, 1235-1245. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.104>
- Kemp-Benedict, E. (2018). Dematerialization, Decoupling, and Productivity Change. *Ecological Economics*, 150, 204-216. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.020>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Krausmann, F., Schandl, H., Eisenmenger, N., Giljum, S., & Jackson, T. (2017). Material Flow Accounting: Measuring Global Material Use for Sustainable Development. *Annual Review of Environment and Resources*, 42(1), 647-675. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060726>
- Kubiszewski, I., Costanza, R., Franco, C., Lawn, P., Talberth, J., Jackson, T., & Aylmer, C. (2013). Beyond GDP: Measuring and achieving global genuine progress. *Ecological Economics*, 93, 57-68. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.04.019>
- Kuznets, S. (1955). Economic Growth and Income Inequality. En M. A. Seligson (Ed.), *The Gap between Rich and Poor* (pp. 25-37). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429311208-4>
- Li, W., Qiao, Y., Li, X., & Wang, Y. (2022). Energy consumption, pollution haven hypothesis, and Environmental Kuznets Curve: Examining the environment–economy link in belt and road initiative countries. *Energy*, 239, 122559. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122559>
- Maneejuk, N., Ratchakom, S., Maneejuk, P., & Yamaka, W. (2020). Does the Environmental Kuznets Curve Exist? An International Study. *Sustainability*, 12(21). <https://doi.org/10.3390/su12219117>
- Martínez-Alier, J. (2004). Los conflictos ecológico-distributivos y los indicadores de sustentabilidad. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 1, 21-30.
- Martínez-Alier, J., Pascual, U., Vivien, F.-D., & Zaccai, E. (2010). Sustainable de-growth: Mapping the context, criticisms and future prospects of an emergent paradigm. *Ecological Economics*, 69(9), 1741-1747. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.04.017>
- Matthews, E., Amann, C., Bringezu, S., Fischer-Kowalski, M., Hüttler, W., Kleijn, R., Moriguchi, Y., Ottke, C., Rodenburg, E., Rogich, D., Schandl, H., Schütz, H., van der Voet, E., & Weisz, H. (2000). *The weight of nations. Material outflows from industrial economies*. <https://www.wri.org/research/weight-nations>
- Mishan, E. J. (1980). El crecimiento de la abundancia y la disminución del bienestar. En H. Daly (Ed.), *Economía, ecología, ética. Ensayos hacia una economía en estado estacionario*. (1ª ed.). Fondo de Cultura Económica.
- Oliveras, L., Peralta, A., Palència, L., Gotsens, M., López, M. J., Artazcoz, L., Borrell, C., & Marí-Dell'Olmo, M. (2021). Energy poverty and health: Trends in the European Union before and during the economic crisis, 2007–2016. *Health & Place*, 67, 102294. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2020.102294>
- Özokcu, S., & Özdemir, Ö. (2017). Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 639-647. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.059>

- Panayotou T. 1993. *Empirical Tests and Policy Analysis of Environmental Degradation at Different Stages of Economic Development*. Geneva: ILO.
- Pirlogea, C., & Cicea, C. (2012). Econometric perspective of the energy consumption and economic growth relation in European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5718-5726. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.010>
- Roca, J. (2002). The IPAT formula and its limitations. *Ecological Economics*, 42(1), 1-2. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00110-6](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00110-6)
- Saqib, M., & Benhmad, F. (2021). Does ecological footprint matter for the shape of the environmental Kuznets curve? Evidence from European countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(11), 13634-13648. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11517-1>
- Sarkodie, S. A., & Ozturk, I. (2020). Investigating the Environmental Kuznets Curve hypothesis in Kenya: A multivariate analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109481>
- Schaffartzik, A., & Duro, J. A. (2022). 'Dematerialization' in times of economic crisis: A regional analysis of the Spanish economy in material and monetary terms. *Resources Policy*, 78, 102793. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102793>
- Schandl, H., Fischer-Kowalski, M., West, J., Giljum, S., Dittrich, M., Eisenmenger, N., Geschke, A., Lieber, M., Wieland, H., Schaffartzik, A., Krausmann, F., Gierlinger, S., Hosking, K., Lenzen, M., Tanikawa, H., Miatto, A., & Fishman, T. (2018). Global Material Flows and Resource Productivity: Forty Years of Evidence: Global Material Flows and Resource Productivity. *Journal of Industrial Ecology*, 22(4), 827-838. <https://doi.org/10.1111/jiec.12626>
- Scheel, C., Aguiñaga, E., & Bello, B. (2020). Decoupling Economic Development from the Consumption of Finite Resources Using Circular Economy. A Model for Developing Countries. *Sustainability*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/su12041291>
- Shafik, N., & Bandyopadhyay, S. (1992). *Economic growth and environmental quality, time series and cross-country evidence* [Working Papers]. World Development Report.
- Shao, Q., Schaffartzik, A., Mayer, A., & Krausmann, F. (2017). The high 'price' of dematerialization: A dynamic panel data analysis of material use and economic recession. *Journal of Cleaner Production*, 167, 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.158>
- Steinberger, J. K., Krausmann, F., & Eisenmenger, N. (2010). Global patterns of materials use: A socioeconomic and geophysical analysis. *Ecological Economics*, 69(5), 1148-1158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.12.009>
- Steinberger, J. K., Krausmann, F., Getzner, M., Schandl, H., & West, J. (2013). Development and Dematerialization: An International Study. *PLOS ONE*, 8(10), 1-11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070385>
- Tapio, P. (2005). Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001. *Transport Policy*, 12(2), 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.01.001>
- UNEP. (2022). *Global Material Flows Database*. <https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database>

- Vence, X. (2023). Bases conceptuales para una economía circular transformadora. En X. Vence (Ed.), *Economía circular transformadora y cambio sistémico. Retos, modelos y políticas* (1ª ed., pp. 54-108). Fondo de Cultura Económica.
- Wiedmann, T. O., Schandl, H., Lenzen, M., Moran, D., Suh, S., West, J., & Kanemoto, K. (2015). The material footprint of nations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(20), 6271-6276. <https://doi.org/10.1073/pnas.1220362110>
- Wu, R., Wang, J., Wang, S., & Feng, K. (2021). The drivers of declining CO2 emissions trends in developed nations using an extended STIRPAT model: A historical and prospective analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *149*, 111328. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111328>
- York, R., Rosa, E. A., & Dietz, T. (2003). STIRPAT, IPAT and IMPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, *46*(3), 351-365. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00188-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00188-5)