

Grupo de investigación de Economía, Energía y Medioambiente (GEAR), Universidad de Castilla-La Mancha. Modelo *input-output* multirregional ampliado

Luis Antonio López, Jorge Zafrilla y María Ángeles Cadarso*

1. OBJETIVO DE LA HERRAMIENTA Y APLICACIONES PREFERENTES

El siglo XXI es un siglo de grandes desafíos que, además, tienen una escala global y que no pueden ser abordados sin ella. Conseguir sociedades y estilos de vida más justos y sostenibles está en el centro de estos desafíos y a ello contribuyen los objetivos de desarrollo sostenible o el Acuerdo de París, en el ámbito del cambio climático. Para todo ello, es necesario acometer un proceso de transición energética.

Los modelos *input-output* y en especial los modelos *input-output* multirregionales (*multiregional input-output models*, MRIO) son una herramienta muy útil para analizar la sostenibilidad en sentido amplio de las actividades productivas, incluyendo la energía, teniendo en cuenta dimensiones de las tres esferas de la sostenibilidad: económica, social y medioambiental, en lo que se ha venido a llamar los modelos *input-output* extendidos. El análisis *input-output* (AIO) cuantifica las interrelaciones que se producen entre los sectores de una economía y las relaciones de estos con la demanda final y con la generación de valor añadido, internamente, pero también con el exterior a través de importaciones y exportaciones intermedias y finales. Estas, además, en los modelos multiregionales están desagregadas por país y sector de origen y destino. Esto hace que el AIO sea una herramienta única para representar de forma completa los flujos e interrelacio-

* Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de Castilla-La Mancha.

nes de sectores y países que forman la compleja red de las cadenas globales de la producción a nivel mundial. Por este motivo, el AIO es considerado como el más apropiado para el cálculo de emisiones basadas en el consumo (*consumption-based accounting*) o huellas de carbono, ámbito este en el que los modelos MRIO se han convertido en la norma de cálculo [1].

El potencial del AIO se desarrolla plenamente en los modelos MRIO, cuyo uso ha crecido de la mano del desarrollo de diversas bases de datos *input-output* multirregionales (como WIOD, EORA, EXIOBASE, GTAP) [2] [3]. Entre las fortalezas del AIO se encuentran su visión sistémica, su capacidad de trazar los impactos a través de las cadenas globales de la producción y de identificar los nexos entre los impactos económicos y medioambientales. La visión sistémica es fundamental en relación con el cambio climático para evaluar estrategias de mitigación de carácter intersectorial frente a otras más centradas en sectores específicos o tecnologías individuales, junto con la identificación de los cobeneficios o efectos colaterales adversos, sinergias y *trade-offs*, que puedan producirse. Además, el carácter flexible del AIO permite combinarlo con otros modelos, como el análisis de ciclo de vida o modelos de equilibrio general computable, en la priorización de actuaciones, identificación de puntos clave o drivers o para el desarrollo de escenarios en relación con cambios tecnológicos, de consumo o de políticas.

2. DESCRIPCIÓN BREVE: INTRODUCCIÓN CUALITATIVA, FORMULACIÓN MATEMÁTICA ESQUEMÁTICA, TIPOS DE DATOS NECESARIOS, Y ENLACES A LA DOCUMENTACIÓN RELEVANTE

El modelo *input-output* multiregional parte de considerar las relaciones intersectoriales que tienen lugar entre un sector y el resto de los sectores de la economía del propio país y del resto de países que utiliza *inputs* de estos para producir y abastecer las demandas de *inputs* que otros sectores ejercen sobre él a su vez y la demanda final. Estas relaciones intersectoriales proporcionan la forma de producir (su tecnología) de cada sector y se recogen en términos unitarios (por millón de euros de producción, por ejemplo) en la matriz A de coeficientes técnicos. La demanda final (*y*) que incluye el consumo final de las familias, el del sector

público, la inversión y las exportaciones. A partir de aquí la producción (x) puede expresarse como la suma de producción para uso intermedio (Ax) más la producción para uso final (y).

$$x = Ax + y \quad [1]$$

Si despejamos el nivel de producción necesario para atender la demanda final que es considerada exógena, tenemos la expresión:

$$x = (I - A)^{-1} y \quad [2]$$

Donde $(I - A)^{-1}$ es la matriz Inversa de Leontief que actúa como un multiplicador que proporciona la producción total, directa e indirectamente necesaria en todos los sectores de todo el mundo para que una unidad de cualquier producto pueda ir destinada a abastecer la demanda final. La demanda final por tanto actúa como el nivel de activación de la producción de la economía. En el modelo extendido se incorporan factores de impacto (valor añadido, empleo, emisiones), uso de recursos (tierra, agua) de forma que obtenemos la expresión:

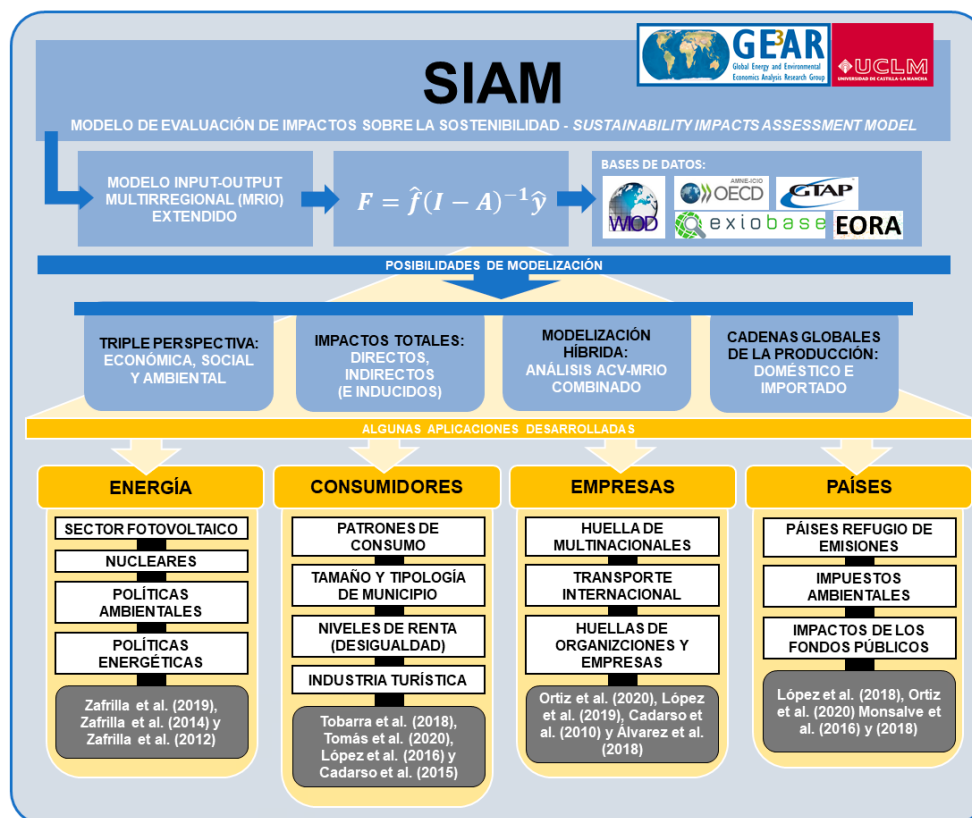
$$F = \hat{f} (I - A)^{-1} \hat{y} \quad [3]$$

Donde el producto entre esos factores de impacto y la inversa de Leontief mide el impacto total (social, económico o medioambiental, según sea el objeto de estudio) en cada sector en cada región/país por unidad de producción realizada que pueda ir destinada a satisfacer la demanda final (donde ambos, demanda final y factor de impacto, están diagonalizados, indicado con $\hat{}$, para poder obtener los multiplicadores y los resultados en forma matricial). Esta última circunstancia proporciona más riqueza de resultados y permite más profundidad en el análisis sin necesidad de incorporar información estadística adicional (Cadarso *et al.*, 2012).

Esta es la base de nuestros modelos donde en función de los objetivos perseguidos se modifican no solo los factores de impacto, sino también la tecnología o los elementos de la demanda final, así como se pueden plantear modelizaciones de carácter híbrido junto con modelos de análisis ciclo de vida (ACV). Este tipo

Figura 1

Esquema resumen del modelo SIAM



de modelizaciones permite cubrir un amplio espectro de aplicaciones, a las que denominaremos bajo el acrónimo SIAM (figura 1), dependiendo de las casuísticas y necesidades que se nos presenten.

3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

La herramienta desarrollada ha sido utilizada para llevar a cabo numerosos trabajos científicos que nos han permitido evaluar la sostenibilidad ambiental y energética, económica y social de diferentes agentes económicos. Si nos centramos en las decisiones que toman los distintos agentes económicos, los estudios realizados se han ocupado de analizar las decisiones de personas, hogares, distintos tipos de

empresas, instituciones como las universidades o los distintos fondos europeos. Si prestamos atención al tipo de territorio donde se produce la actuación, los impactos se analizan para ciudades, regiones, países o grupos de países. Si fijamos nuestra mirada en la actividad económica realizada, los trabajos se han centrado en analizar el consumo de los hogares, las decisiones de consumo e inversión en el sector turístico, las decisiones de inversión en el sector eléctrico o el impacto del comercio internacional de bienes y servicios. Algunos de estos ejemplos se describen a continuación.

3.1. Energía

¿Por qué es beneficiosa la inversión en plantas fotovoltaicas, aunque se importen la mayor parte de los paneles solares? El cumplimiento de los objetivos de París en la lucha contra el cambio climático y la consecución de una economía sostenible reclama la descarbonización del sector energético y, en esta, la energía fotovoltaica está llamada a tener un papel clave. En el trabajo (Zafrilla *et al.*, 2019) se analiza desde la triple perspectiva de la sostenibilidad el impacto del sector fotovoltaico en España. Los beneficios que genera el sector fotovoltaico van más allá de permitir un *mix* más renovable y con menos emisiones que, además, ayudan a la descarbonización de otros sectores y se difunde por toda la economía. También evita emisiones que se habría producido con fuentes fósiles, genera valor añadido y empleo de calidad. Las importaciones del sector suponen que parte del impacto tenga lugar fuera de las fronteras, pero, aun así, las fugas de generación de renta son menores que la renta generada dentro de España.

Otras preguntas relativas al sector energético a las que hemos respondido con nuestros modelos son: ¿Por qué no son nulas las emisiones de carbono de la energía nuclear? (Zafrilla *et al.*, 2014). ¿Por qué la política ambiental sólo explica en parte el cumplimiento de España de los objetivos del Protocolo de Kioto? (Zafrilla *et al.*, 2012).

3.2. Consumidores

¿Por qué consumir frutas y verduras locales y de temporada puede ser en ocasiones perjudicial para el medioambiente? Las decisiones de consumo de los hogares se

toman principalmente en función de las preferencias, las costumbres, los precios de los bienes y la renta que estos disponen. El eslogan *consume productos locales y de temporada* se ha convertido en un criterio que trata de facilitar la toma de decisiones de los hogares medioambientalmente sostenibles. Sin embargo, cuando analizamos los impactos asociados a esas decisiones consumo pueden surgir diferentes *trade-offs* y sinergias cuando consideramos al mismo tiempo varios tipos de impactos ambientales. En el trabajo de (Tobarra *et al.*, 2018) comprobamos cómo cuando los hogares españoles consumen frutas y verduras producidas por la agricultura nacional dicho eslogan era cierto en términos de huella de carbono para la mayoría de los meses. El consumo local supone un ahorro en términos de huella de carbono para prácticamente todas las frutas y verduras consumidas, estén o no en temporada en la economía española, con relación a las importaciones. Sin embargo, el consumo de frutas y verduras locales que no están en temporada en la economía española supone, en muchos meses del año, una mayor huella de agua respecto al consumo de esos mismos bienes importados. La escasez de agua de la economía española y la abundancia en otras regiones del planeta está detrás de estos resultados. La solución hay que buscarla en mecanismos de transmisión de información a los consumidores sencillos, pero ajustados a la evidencia científica. En este caso, la propuesta sería el diseño por parte de los supermercados y fruterías de un plato de productos de bajo huella de carbono y agua para cada mes, lo que facilitaría la toma de decisiones sostenible por parte de los consumidores y permitiría el consumo de productos locales e importados cuando ambos sean más beneficiosos en términos ambientales.

Otras preguntas centradas en la actuación de los consumidores a las que hemos respondido con nuestros modelos son: ¿Por qué los hogares rurales disponen de una huella de carbono mayor que los urbanos y, sin embargo, disponen de una menor renta? (Tomás, López y Monsalve, 2020) ¿Por qué el aumento de la desigualdad en la distribución de la renta reduce la huella de carbono de la economía, si los hogares de mayor renta consumen más? (López *et al.*, 2016) ¿Por qué el turismo es una actividad intensiva en emisiones aun siendo fundamentalmente un servicio? (Cadarso *et al.*, 2015).

3.3. Empresas

¿Por qué las multinacionales que operan en Europa generan más emisiones de carbono que valor añadido? Las multinacionales que operan fuera de su país de origen tienen numerosos impactos positivos sobre el país al que deslocalizan parte de su producción, al generar empleos, salarios, difundir tecnología, ayudar a crear infraestructuras, etc. Sin embargo, también tienen impactos negativos asociados al uso de recursos y a los desechos que generan. En el artículo de (Ortiz, Cadarso y López, 2020) comprobamos que las filiales de las multinacionales que operan en Europa generaban el 12 % del valor añadido de la Unión Europea, pero, al mismo tiempo, el 17 % de las emisiones de carbono. Esta mayor responsabilidad en términos de emisiones se explica porque dichas multinacionales operan en sectores que directa e indirectamente son más contaminantes que el resto de las empresas de capital nacional del país. Además, la responsabilidad de dichas filiales es mayor cuanto menor es la renta per cápita del país y, por ello, los países más pobres ven comprometidos sus planes de mitigación del cambio climático por la actuación de las multinacionales. Los resultados encontrados nos llevan a recomendar el establecimiento de mecanismos que permiten cuantificar adecuadamente la responsabilidad de las empresas multinacionales, de tal forma que puedan monitorizar sus impactos ambientales y establecer una reducción progresiva de ellos.

Otras preguntas relativas a la actuación de las empresas a las que hemos respondido con nuestros modelos son: ¿Por qué la transferencia de tecnología entre las multinacionales y sus empresas filiales tendría poco efecto sobre su huella de carbono? (López *et al.*, 2019) ¿Por qué es más contaminante el transporte de los componentes necesarios para fabricar un coche que la propia fabricación del vehículo? (Cadarso *et al.*, 2010) ¿A cuánto asciende la huella de carbono de una empresa? ¿Dónde se genera y en qué proceso puede actuar con mayor intensidad para reducirla? (Álvarez, Tobarra y Zafrilla, 2018).

3.4. Países

¿Por qué el comercio internacional puede reducir las emisiones de carbono si la producción se deslocaliza a países en desarrollo cuya producción es más intensiva en carbono?

La fragmentación internacional de la producción ha llevado a que las empresas deslocalicen las distintas fases de la producción en aquellos países donde dispongan unos menores costes, principalmente salariales, pero también energéticos. Sin embargo, evaluar si el desplazamiento de la producción hacia países en desarrollo reduce o aumenta la huella de carbono requiere tener en consideración las intensidades de contaminación de todos los países que actúan en la cadena global de la producción. En el trabajo de (López *et al.*, 2018) comprobamos cómo el desplazamiento de la producción a países como China supone un aumento de emisiones de CO₂ mundial. Sin embargo, el hecho de que China importe recursos naturales de países que son más eficientes en su extracción y tratamiento compensa dichos aumentos. No se puede evaluar adecuadamente el impacto del comercio internacional sobre el medioambiente si no se mapean adecuadamente los impactos a lo largo de la cadena global de la producción. Alcanzar una senda de desarrollo sostenible requiere que los países más contaminantes aborden políticas de sustitución de energías fósiles por energías renovables, pero también que los países consumidores de alta renta se hagan en parte responsables de unos impactos ambientales que se producen a miles de kilómetros de donde son consumidos los bienes y servicios.

Otras preguntas centradas en el papel del comercio internacional de los diferentes países a las que hemos respondido con nuestros modelos son: ¿por qué los países más pobres de Europa serían los más afectados por la introducción de un impuesto de carbono? (Ortiz, Cadarso y López, 2020) ¿por qué los países más ricos de la Unión Europea deberían ser solidarios a la hora de financiar las políticas contra la COVID-19 si van a recibir una menor cantidad de fondos? (Monsalve *et al.*, 2018; Monsalve, Zafrilla y Cadarso, 2016)

4. BREVE DESCRIPCIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN Y ENLACES RELEVANTES

El grupo GEAR de la UCLM (Global Energy and Environmental Economics Analysis Research Group, <https://blog.uclm.es/grupogear/>) está formado por ocho investigadores doctores a tiempo completo y profesores de la Universidad de Castilla-La Mancha, tres becarios de investigación (FPI, FPU y plan propio UCLM) y una investigadora de la Universidad Complutense de Madrid. En los

últimos años, la actividad del grupo ha estado enfocada principalmente al estudio del impacto de la actividad económica y del comercio internacional en la huella de carbono y a evaluar la importancia que los cambios en los patrones de consumo de los hogares tienen sobre la huella de carbono, utilizando como herramienta principal el análisis *input-output*. El grupo GEAR tiene amplia experiencia investigadora, reconocida con doce sexenios de investigación, ha publicado 52 JCR, 33 de ellos situados en revistas del primer cuartil en sus especialidades, desde 2007 hasta la actualidad, y ha colaborado en algunas de sus publicaciones con más de diez investigadores nacionales e internacionales de reconocido prestigio. Ha participado en diversos proyectos entre los que destacan los dos proyectos concedidos por el MINECO en las convocatorias de 2012-2015 y 2016-2019, el proyecto de Red de excelencia de Modelización energética para una transición energética sostenible (Red Mentas link) del que somos coordinadores, el concedido por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID-INTAL) y dos proyectos en convocatorias competitivas de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, centrados en la construcción de modelos aplicados al análisis de distintos aspectos de la sostenibilidad. El grupo tiene también experiencia en el desarrollo de convenios de colaboración con instituciones públicas y privadas para evaluar la sostenibilidad en sentido amplio. Los últimos ejemplos en este sentido han sido con la Unión Española Fotovoltaica (UNEF), la Junta de Extremadura, en la elaboración del PEIEC, o una empresa vitivinícola de Castilla-La Mancha.

REFERENCIAS

ÁLVAREZ, S., TOBARRA, M. A. y ZAFRILLA, J. E. (2018). Corporate and Product Carbon Footprint under Compound Hybrid Analysis: Application to a Spanish Timber Company. *Journal of Industrial Ecology*, 23, pp. 496-507.

CADARSO, M-Á., LÓPEZ, L-A., GÓMEZ, N. y TOBARRA, M-Á. (2010). CO₂ emissions of international freight transport and offshoring: Measurement and allocation. *Ecological Economics*, In Press, Corrected Proof.

— (2012). International trade and shared environmental responsibility by sector. An application to the Spanish economy. *Ecological Economics*, 83, pp. 221-235.

CADARSO, M. A., GÓMEZ, N., LÓPEZ, L. A., TOBARRA, M. A. y ZAFRILLA, J. E. (2015). Quantifying Spanish tourism's carbon footprint: the contributions of residents and visitors. A longitudinal study. *Journal of Sustainable Tourism*, 23, pp. 922-946.

LÓPEZ, L. A., ARCE, G., KRONENBERG, T. y RODRIGUES, J. F. D. (2018). Trade from resource-rich countries avoids the existence of a global pollution haven hypothesis. *Journal of Cleaner Production*, 175, pp. 599-611.

LÓPEZ, L. A., ARCE, G., MORENATE, M. y MONSALVE, F. (2016). Assessing the Inequality of Spanish Households through the Carbon Footprint: The 21st Century Great Recession Effect. *Journal of Industrial Ecology*, 20, pp. 571-581.

LÓPEZ, L-A., CADARSO, M-Á., ZAFRILLA, J. y ARCE, G. (2019). The carbon footprint of the U.S. multinationals' foreign affiliates. *Nature Communications*, 10, p. 1672.

MONSALVE, F., ZAFRILLA, J. E. y CADARSO, M. A. (2016). Where have all the funds gone? Multiregional input-output analysis of the European Agricultural Fund for Rural Development. *Ecological Economics*, 129, pp. 62-71.

MONSALVE, F., ZAFRILLA, J., CADARSO, M-Á. y GARCÍA-ALAMINOS, A. (2018). Is the emperor wearing new clothes? A social assessment of the European Union 2007–2013 financial framework. *Economic Systems Research*, 31, pp. 285-304.

ORTIZ, M., CADARSO, M-Á., LÓPEZ, L-A. (2020). The carbon footprint of foreign multinationals within the European Union. *Journal of Industrial Ecology*, n/a.

TOBARRA, M. A., LÓPEZ, L. A., CADARSO, M. A., GÓMEZ, N. y CAZCARRO, I. (2018). Is Seasonal Households' Consumption Good for the Nexus Carbon/Water Footprint? The Spanish Fruits and Vegetables Case. *Environmental Science & Technology*, 52, pp. 12066-12077.

TOMÁS, M., LÓPEZ, L. A. y MONSALVE, F. (2020). Carbon footprint, municipality size and rurality in Spain: Inequality and carbon taxation. *Journal of Cleaner Production*, 266, pp. 121798.

ZAFRILLA, J-E., ARCE, G., CADARSO, M-Á., CÓRCOLES, C., GÓMEZ, N., LÓPEZ, L-A., MONSALVE, F. y TOBARRA, M-Á. (2019). Triple bottom line analysis of the Spanish solar photovoltaic sector: A footprint assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, p. 109311.

ZAFRILLA, J. E., CADARSO, M. A., MONSALVE, F. y DE LA RUA, C. (2014). How Carbon-Friendly Is Nuclear Energy? A Hybrid MRIO-LCA Model of a Spanish Facility. *Environmental Science & Technology*, 48, pp. 14103-14111.

ZAFRILLA, J. E., LÓPEZ, L. A., CADARSO, M. Á. y DEJUÁN, Ó. F(2012). Fulfilling the Kyoto protocol in Spain: A matter of economic crisis or environmental policies? *Energy Policy*, 51, pp. 708-719.