



MEDICIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE LA ESTRUCTURA PRODUCTIVA AL DESARROLLO SOSTENIBLE*

Miguel Ángel Tarancón Morán**

Fecha de recepción: 7 de julio de 2004. Fecha de aceptación: 25 de octubre de 2004.

Resumen

El desarrollo sostenible se caracteriza por la integración de objetivos económicos, sociales y ambientales. En este trabajo se propone un método para identificar transacciones productivas clave en el proceso de disociación entre dichos objetivos. Para ello se utiliza como herramienta estadística la tabla insumo-producto o input-output (TIO) del espacio económico analizado. A partir de la definición de las relaciones básicas de la tabla, se especifica un modelo de programación matemática. Ante un cambio propuesto en los niveles globales de las variables económicas, sociales y ambientales tomadas como indicadores de referencia, la solución iterativa del modelo permitirá identificar las transacciones más sensibles a estos cambios. La aplicación se realiza a partir de las transacciones críticas en el caso de la región española de Castilla-La Mancha.

Palabras clave: desarrollo sostenible, estructura productiva, input-output, programación lineal, transacciones productivas.

* Una versión preliminar del modelo matemático aplicado en este trabajo fue presentada en la xxx Reunión de Estudios Regionales de la Asociación Española de Ciencia Regional.

** Investigador del Área de Econometría de la Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales, Universidad de Castilla-La Mancha. Correo electrónico: MiguelAngel.Tarancon@uclm.es. El autor quiere agradecer a los evaluadores anónimos sus amables comentarios y sugerencias que han contribuido a la mejora de este artículo.

Abstract

Sustainable development is characterized by the integration of economic, social and environmental objectives. In this study a method is proposed to identify key productive transactions in the dissociation process between these objectives. The input-output table is used (IO) as a statistical tool for the economic space under analysis. Once the basic relationships in the table are defined, a model of mathematical programming is specified. Faced by a proposed change in the global levels of the economic, social and environmental variables considered, the iterative solution of this model will make it possible to identify transactions that are sensitive to these changes. As an application, the identification of critical transactions in Spain's Castilla-La Mancha region is carried out.

Key terms: sustainable development, productive structure, input-output, linear programming, productive transactions.

Résumé

Le développement durable est caractérisé par l'intégration d'objectifs économiques, sociaux et environnementaux. Dans ce travail on propose une méthode pour identifier les transactions productives clé dans le processus de dissociation entre ces objectifs. On utilise comme outil statistique le tableau facteur de production-produit ou input-output (TIO) de l'espace économique analysé. Une fois les relations de base du tableau définies, on spécifie un modèle de programmation mathématique. Face à un changement proposé dans les niveaux globaux des variables économiques, sociales et environnementales considérées, la solution itérative du modèle permettra d'identifier les transactions sensibles à ces changements. Pour exemplifier, on réalise une identification des transactions critiques dans la région espagnole de Castille - La Manche.

Mots clés: développement durable, structure productive, input-output, programmation linéaire, transactions productives.

Resumo

O desenvolvimento sustentável se caracteriza pela integração de objetivos econômicos, sociais e ambientais. Neste trabalho se propõe um método para identificar transações produtivas, chave no processo de dissociação entre tais objetivos. Utiliza-se como ferramenta estatística a tabela insumo-produto ou input-output (TIO) do espaço econômico analisado. Definidas as relações básicas da tabela, se especifica um modelo de programação matemática. Diante de uma mudança proposta nos níveis globais das variáveis econômicas, sociais e ambientais consideradas, a solução iterativa do modelo permitirá identificar transações sensíveis a essas mudanças. Como aplicação, é realizada a identificação de transações críticas na região espanhola de Castilla-La Mancha.

Palavras-chave: desenvolvimento sustentável, estrutura produtiva, input-output, programação linear, transações produtivas.

Introducción

El concepto *desarrollo sostenible* implica no sólo una dimensión económica, sino también social y medioambiental. En principio, los objetivos económicos y sociales pueden ser compatibles. De hecho, es condición necesaria cierto nivel de crecimiento económico para lograr un grado suficiente de bienestar social.

En cambio, la dimensión económica y la ambiental tienen, *a priori*, objetivos contrapuestos. Un incremento de actividad económica, en términos de producción, lleva consigo mayor presión sobre el medioambiente, en cuanto a las emisiones de residuos y gases contaminantes, y al consumo de recursos no renovables.

Para seguir la senda del desarrollo sostenible existen dos enfoques alternativos. Por un lado, el que defiende una modificación en los patrones de comportamiento de los individuos. Por otro, el basado en la promoción del cambio tecnológico, de manera que se permita la disociación entre objetivos económicos y sociales, y ambientales.

Este artículo se enmarca en el segundo enfoque. Se propone un método para identificar transacciones productivas características de tecnologías sectoriales clave en el solapamiento de objetivos antes mencionados. Para ello se utiliza como herramienta estadística la tabla insumo-producto o *input-output* (π_{IO}) del espacio económico analizado. A partir de la definición de las relaciones básicas de la tabla, se especifica un modelo de programación matemática. Ante un cambio propuesto en los niveles globales de las variables económicas, sociales y ambientales tomadas como indicadores de referencia, la solución iterativa del modelo permitirá medir la sensibilidad de cada transacción productiva a estos cambios. Estas transacciones, desde el lado de las compras, configuran el *mix* productivo que caracteriza la tecnología de cada rama de actividad económica. De esta forma, podrá determinarse qué elementos de cada tecnología sectorial son clave para, mediante los procesos de innovación tecnológica, incidir en su cambio hacia la senda de sustentabilidad.

El trabajo se organiza así. La siguiente sección establece el marco conceptual para analizar la estructura productiva y el desarrollo sostenible. Después, se muestran las relaciones básicas de la π_{IO} . Enseguida se expone el método de identificación mediante el planteamiento del modelo. Posteriormente se propone como aplicación la identificación de coeficientes críticos en el caso de la región española de Castilla-La Mancha, y se sintetizan los principales resultados. Finalmente, se establece las principales conclusiones de la investigación desde el punto de vista de una política de innovación que promueva el cambio estructural.



Estructura productiva y desarrollo sostenible

Existen numerosas definiciones para *desarrollo sostenible*, las cuales pueden sintetizarse en la propuesta por la World Commission on Environment and Development, más conocida como la Brundtland Commission: “El desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer las suyas” (WCED, 1987).

El concepto *sustentabilidad* en el desarrollo incorpora una dimensión económica, social y medioambiental (Hernández *et al.*, 2004; Robinson, 2004). Concretamente, el desarrollo económico viene matizado y limitado por las dimensiones social y ambiental, respectivamente.

La dimensión social implica un incremento de renta y riqueza en condiciones de distribución equitativa. Por tanto, el crecimiento de la producción (dimensión económica) es un requisito necesario (pero no suficiente) para alcanzar objetivos sociales (Spangenberg, 2004:77). Este aumento deberá acompañarse de políticas sociales y redistributivas destinadas a conseguir cotas suficientes de equidad en el reparto de renta y riqueza generadas en el proceso productivo.

En cuanto a la dimensión medioambiental, el crecimiento de la producción que conlleva la dimensión económica viene acompañado de dos efectos adversos. Por un lado, se requerirá mayor cantidad de *inputs* no renovables. Por otro, se generará mayor cantidad de residuos contaminantes, los cuales son vertidos al medio (Spangenberg, 2004: 77-78). En definitiva, el incremento de la producción origina aceleración en el “flujo material” que incide sobre el medio (Femia *et al.*:5).

Por tanto, el desarrollo sostenible integra objetivos económicos y sociales que pueden originar conflictos con los de la preservación ambiental (Giddings *et al.*, 2002:189). Para seguir, pues, la senda de dicho desarrollo, han de establecerse planteamientos que reconcilien estos objetivos. Existen dos métodos para lograrlo (Robinson, 2004:371-373). Por un lado, modificar el comportamiento particular de individuos, incentivar su respeto por la naturaleza y sustituir sus referencias acerca del concepto *bienestar*. Por otro lado, un enfoque más pragmático, de carácter colectivo, fomenta un cambio tecnológico que permita generar crecimiento de producción continuado, con sus consecuentes beneficios económicos y sociales, sin acentuar la presión ambiental.

Centrándonos en el cambio tecnológico, se plantea la necesidad de diseñar estrategias que permitan el tránsito a tecnologías limpias. Para favorecerlo se debe fomentar la investigación y desarrollo (I&D), su implantación progresiva mediante herramientas como el establecimiento de mercados de permisos para la emisión de sustancias contaminantes, y nichos de mercado para su difusión (Kemp *et al.*, 1999).

El *mix* de productos que caracteriza las funciones de producción de tecnologías limpias deben permitir un incremento de eficiencia ambiental (Haake *et al.*, 2001:27), entendida

como disminución drástica del *ratio* entre cantidad de recurso no renovable (o bien sustancia contaminante generada) y unidad de bien producido. Por medio de la mejora de eficiencia ambiental, podrán generarse procesos de disociación entre crecimiento de actividad productiva y aumento de la presión ambiental.

Así pues, la puesta en marcha de este proceso de innovación tecnológica hacia la sustentabilidad requiere del estudio detallado de las tecnologías que caracterizan a cada actividad productiva. Sólo así podrá establecerse qué transacciones económicas son las que deben concentrar las políticas de innovación para lograr el desligamiento entre las dimensiones económico-social y ambiental (Nijkamp *et al.*, 2001; OCDE, 2003; Rammel y van der Bergh, 2003).

En este contexto, el análisis *input-output* puede ser una herramienta que permita la identificación de estos *puntos tecnológicos* clave. Para ello, este artículo propone la generalización del análisis de sensibilidad de la matriz de coeficientes técnicos de la TIO, tradicionalmente centrado en la identificación de los coeficientes más importantes desde el punto de vista productivo. Esta generalización, basada en el planteamiento de un modelo de optimización y su solución iterativa, permitirá identificar coeficientes más sensibles para la sustentabilidad.

Tabla input-output y análisis de sensibilidad

La TIO de un sistema económico se compone de tres matrices de valores interrelacionadas: matriz de transacciones intermedias (X), matriz de demanda final (Y) y matriz de *inputs* primarios (Z).

La matriz de transacciones intermedias X es una matriz ($n \times n$) de flujos (compras y ventas) de mercancías y servicios entre ramas de actividad que componen el sistema económico. El elemento típico de la matriz, x_{ij} , informa de las compras realizadas por la rama j -ésima del bien producido por la rama i -ésima.

La matriz de demanda final Y es la matriz ($n \times m$) que muestra transacciones (ventas) de n ramas de actividad con m componentes de demanda final. El elemento y_{ik} mostrará la producción de la rama i -ésima comprada por la categoría k -ésima de demanda final: consumo privado y público, formación bruta de capital, exportaciones. Si se añade a esta matriz un vector columna con las importaciones (con signo negativo) de cada rama de actividad, esta matriz Y mostrará el producto interno bruto desagregado por ramas de actividad.¹

La matriz de *inputs* primarios Z es la matriz ($p \times n$) de compra de inputs a factores productivos primarios (valor añadido) desagregados en p componentes. El elemento z_{dj} mostrará la compra del d -ésimo tipo de *inputs* primarios por parte de la rama de actividad j -ésima.

¹ La inclusión de este vector de importaciones con signo negativo se asumirá en el resto del desarrollo.



En la TIO se deberá cumplir la identidad básica de producción, referente a la igualdad de ésta desde el punto de vista de oferta y demanda:

$$\sum_{ik} y_{ik} = \sum_{dj} z_{dj} \quad (1)$$

Las relaciones contables obligan a cada rama de actividad a una igualdad entre la suma de sus ventas y compras totales. El valor de las sumas anteriores, tanto por el lado de ventas como por el de compras, será la *producción efectiva* de la rama de actividad w_i (o bien w_j):

$$\sum_j x_{ij} + \sum_k y_{ik} = w_i \quad (2)$$

$$\sum_i x_{ij} + \sum_d z_{dj} = w_j \quad (3)$$

El concepto *producción efectiva* da lugar a la definición de coeficientes técnicos de producción. Un *coeficiente técnico* se define como el cociente entre cada elemento de la matriz de transacciones intermedias y la producción efectiva de la rama de actividad (columna) correspondiente:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{w_j} \quad \text{con } i=(1,2,\dots,n) \text{ y } j=(1,2,\dots,n) \quad (4)$$

donde:

x_{ij} es elemento típico de la matriz de relaciones intersectoriales X , y
 w_j la producción (efectiva) total de la rama j -ésima.

La matriz estructural A recoge la totalidad de coeficientes técnicos:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Por columnas, los coeficientes técnicos muestran la estructura de compras de una rama de actividad, es decir, su función de costes. Si, además, se incorporan hipótesis de *efecto-precio nulo* y de *funciones de producción lineales y homogéneas*, puede concluirse que la columna j -ésima describe la función de producción de la rama j , en tanto la proporción

de insumos necesaria para elaborar una unidad de producto. Por tanto, la matriz A muestra la estructura productiva que subyace al sistema económico descrito para la TIO objeto de análisis.

De la identidad (2) puede establecerse la siguiente expresión matricial:

$$w = Xu_n + Yu_k \quad (6)$$

con: u_n vector unitario ($n \times 1$)
 u_k vector unitario ($k \times 1$)

Expresando la matriz de transacciones X en función de la matriz de coeficientes técnicos:

$$w = Aw + y \quad (7)$$

con: y vector ($n \times 1$) de demanda final definido como el producto Yu .

Esta expresión puede rescribirse llegando al conocido modelo de demanda:

$$w = (I - A)^{-1} y \quad (8)$$

La matriz $(I-A)^{-1}$ es conocida como matriz inversa de Leontief y, por columnas, recoge requerimientos directos e indirectos de producción necesarios para obtener la unidad del bien correspondiente. Esta matriz es básica para identificar los coeficientes técnicos (y, por tanto, los puntos de la estructura productiva del sistema económico) más importantes, ya que el *poder productivo* de dichos coeficientes se transmitirá, mediante dicha matriz, hasta la producción efectiva de distintas ramas de actividad. Un coeficiente cuya mínima variación provoque, por medio del recálculo de la matriz inversa de Leontief, cambios profundos en la producción de ramas de actividad, deberá considerarse importante y su localización constituirá una característica básica de la economía que representa.

Para identificar estos coeficientes, se han desarrollado en la literatura diferentes técnicas englobadas con el *análisis de sensibilidad*. Estas técnicas, en general, tienen su antecedente inmediato en el trabajo de Sherman y Morrison (1950). Estos autores formalizan el cálculo de cambios experimentados por elementos de una matriz inversa ante variaciones de elementos de la matriz de partida, sin necesidad de recalcular la inversa.

Evans (1954) introduce este tipo de cálculo en el ámbito de la matriz de Leontief $(I-A)^{-1}$. A partir de este autor, otros desarrollan propuestas operativas que tratan de identificar los coeficientes técnicos más importantes de la estructura productiva de una TIO. Entre éstos cabe destacar las metodologías de Jílek (1971) y Schintke y Stäglin (1988). Ambas se basan en el cálculo la variación máxima de cada coeficiente, más allá de la cual se origina un cambio



en la producción de al menos una rama productiva mayor que un porcentaje p prefijado para un mismo nivel de demanda final. Un coeficiente será más importante (poseerá una mayor sensibilidad) cuanto menor sea el porcentaje de variación máxima asumible.

Si bien la utilización recurrente de estas técnicas en aplicaciones económicas las afianzan como metodologías muy útiles en la evaluación del cambio estructural, pueden darse casos en los cuales convendría evaluar estos cambios en la estructura tomando como criterio alguna variable distinta a la producción sectorial.

A fin de superar este inconveniente, en este trabajo se propone una metodología alternativa para realizar el análisis de sensibilidad, basada en la especificación y solución iterativa de un modelo de programación matemática (Tarancón, 2003).

Vamos a partir de la definición *variable de referencia* (v_R) para el análisis de sensibilidad, es decir, las variables de interés económico, social o ecológico mediante la cual evaluaremos las variaciones en la cuantía de coeficientes técnicos o estructurales. Si plasamos esta v_R en un vector e ($n \times 1$) de reparto de su cuantía global entre las n distintas ramas de actividad, podremos definir la matriz diagonal C de v_R por unidad de producto. Los elementos de la diagonal principal de esta matriz se calcularán como:

$$c_{jj} = \frac{e_j}{w_j} \quad (9)$$

A partir de aquí, puede incorporarse (9) a la identidad (8) y para obtener la expresión que permite calcular el vector de cuantía de la v_R a partir de la demanda final sectorial:

$$e = C(I - A)^{-1}y \quad (10)$$

Mediante la expresión anterior, pueden descomponerse los cambios en el vector de la v_R de la siguiente forma:

$$e_{(1)} - e_{(0)} = [C_{(1)}(I - A_{(1)})^{-1}y_{(1)}] - [C_{(0)}(I - A_{(0)})^{-1}y_{(0)}] \quad (11)$$

Con la hipótesis de que se mantienen constantes el nivel de demanda final y la matriz de reparto de v_R por unidad de producto C , se tendrá la expresión:

$$e_{(1)} - e_{(0)} = C_{(0)}[(I - A_{(1)})^{-1} - (I - A_{(0)})^{-1}]y_{(0)} \quad (12)$$

Es decir, cambios en la cuantía global de la v_R se deberán a cambios en la matriz de Leontief. Lógicamente, los cambios en esta matriz son resultados del cambio en los coeficientes técnicos estructurales definidos según (4).

Para plantear el modelo de análisis de sensibilidad, vamos a reescribir la expresión (10), sustituyendo los términos deducidos en (8) por su expresión equivalente en (7):

$$e = C(Aw + y) \tag{13}$$

Esta expresión, en términos de ecuaciones individuales para n ramas de actividad, es la siguiente:



$$\begin{aligned} e_1 &= c_{11}a_{11}w_1 + c_{11}a_{12}w_2 + \dots + c_{11}a_{1n}w_n + c_{11}y_1 \\ e_2 &= c_{22}a_{21}w_1 + c_{22}a_{22}w_2 + \dots + c_{22}a_{2n}w_n + c_{22}y_2 \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ e_n &= c_{nn}a_{n1}w_1 + c_{nn}a_{n2}w_2 + \dots + c_{nn}a_{nn}w_n + c_{nn}y_n \end{aligned} \tag{14}$$

Definiendo el nivel de VR total como:

$$e_{tot} = e_1 + e_2 + \dots + e_n \tag{15}$$

se fijará un cambio en el valor de esta variable. El nuevo valor de la VR en el nivel global será:

$$e_{tot(1)} = e_{tot(0)} \cdot \Delta e_{tot(0)} \tag{16}$$

Si suponemos que esta reducción se da ante condiciones planteadas en (12), tendremos que:

$$\begin{aligned} e_{1(1)} &= c_{11(0)}a^*_{11}w_{1(0)} + \dots + c_{11(0)}a^*_{1n}w_{n(0)} + c_{11(0)}y_{1(0)} \\ e_{2(1)} &= c_{22(0)}a^*_{21}w_{1(0)} + \dots + c_{22(0)}a^*_{2n}w_{n(0)} + c_{22(0)}y_{2(0)} \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ e_{n(1)} &= c_{nn(0)}a^*_{n1}w_{1(0)} + \dots + c_{nn(0)}a^*_{nn}w_{n(0)} + c_{nn(0)}y_{n(0)} \end{aligned} \tag{17}$$

donde a^*_{ij} se refiere a coeficientes técnicos ajustados u obtenidos al solucionar el modelo que estamos planteando.

La expresión anterior constituirá el armazón básico del modelo de optimización matemática. Éste se basa en plantear cambios mínimos en los elementos de la matriz de coeficientes técnicos (estructura productiva) necesarios para asumir el cambio previsto en el valor de la VR . Para plantear el modelo deben definirse, para cada coeficiente a_{ij} , las siguientes variables y ecuaciones:

$$poa_{ij}, nea_{ij} \geq 0 \quad (18)$$

$$r_{ij}^a \cdot a_{ij(0)} \geq 0 \quad (19)$$

$$a_{ij(0)} = a_{ij}^* + poa_{ij} - nea_{ij} \quad (20)$$

$$nea_{ij} \leq r_{ij}^a \cdot a_{ij(0)} \quad (21)$$

$$poa_{ij} \leq r_{ij}^a \cdot a_{ij(0)} \quad (22)$$

donde poa_{ij} , nea_{ij} y r_{ij}^a son variables auxiliares que aseguran la minimización de las discrepancias relativas entre $a_{ij}(0)$ y a_{ij}^* , en valores absolutos.

Por otro lado, podemos definir la ecuación para cada coeficiente:

$$a_{ij(0)} \cdot (1 - r_{ij}^a) \leq a_{ij}^* \leq a_{ij(0)} \cdot (1 + r_{ij}^a) \quad (23)$$

que nos dará el porcentaje de cambio experimentado por cada coeficiente para asumir el nuevo nivel de la VR . Si, además, cada coeficiente queda limitado por el original, el cual actúa como límite de variabilidad inferior y superior:

$$a_{ij(0)} \leq a_{ij}^* \leq a_{ij(0)} \quad (24)$$

podría plantearse la minimización de diferencias relativas entre coeficientes ajustados y originales, que cumplan con (23). Para ello, podría establecerse el programa:

$$\text{Min } rmax \quad (25)$$

sujeto a las restricciones (17) a (24) y a restricciones:

$$r_{ij}^a \cdot a_{ij(0)} \leq rmax \quad (26)$$

El modelo anterior no tendrá solución posible, debido a que las restricciones de (24), y la invariabilidad establecida en las producciones y demandas finales, harán que las igualdades de (17) no puedan cumplirse. Por ello pueden definirse, para cada desigualdad de restricciones de (24), las variables suplementarias sv :

$$a_{ij(0)} - sv_{a_{ij(0)} \leq a_{ij}^*} \leq a_{ij}^* \leq a_{ij(0)} + sv_{a_{ij}^* \leq a_{ij(0)}} \quad (27)$$

Las variables suplementarias cumplirán con la condición:

$$sv \geq 0 \quad (28)$$

Estas variables, al solucionar el modelo, tomarán valores necesarios para que sí se cumplan las igualdades de (17).² Cabe ahora plantearse el modelo de optimización sustituyendo el objetivo inicial (25) por el nuevo:



$$\min \sum sv \quad (29)$$

El modelo, constituido ahora por el objetivo (29) y las restricciones (17) a (23), (27) y (28), tendrá solución, lo cual permitirá analizar la sensibilidad de los coeficientes originales. Para ello, de forma iterativa, se modificarán cada una de las restricciones (27), convirtiendo en variable cada límite definido por el coeficiente original $a_{ij(0)}$. De esta manera, podrá establecerse una lista en la cual aparecerán las modificaciones de los coeficientes originales que contribuyen al objetivo de minimización de la suma de variables complementarias.

La información suministrada por este proceso iterativo será la clave para identificar los coeficientes técnicos de la tabla más sensibles a los cambios de la VR planteada en (16). Supongamos una iteración en la cual el límite inferior (o superior) del coeficiente técnico a_{ij} es activado como variable en la restricción (27) correspondiente, a fin de que cambie para contribuir al objetivo de minimización (29). Si tras la solución del modelo se obtiene una pequeña modificación de este límite (y por tanto del coeficiente técnico al que acota) que reduzca el objetivo (29) en un gran porcentaje, ello indicará que es coeficiente muy sensible en términos de la VR , ya que implica recuperar la coherencia del sistema de las ecuaciones (17) asumiendo el nivel de la VR fijado en (16).

En cambio, si al convertir las restricciones impuestas a un coeficiente en variables (límites inferior o superior) y resolver el modelo, se propone una gran modificación del coeficiente para obtener una disminución del objetivo de pequeña magnitud, esto querrá decir que el coeficiente estudiado es poco sensible a la variación de la VR .

Para cuantificar la idea anterior, definiremos las siguientes variables:

obj_{bas} valor del objetivo (29) obtenido al solucionar el modelo, sin transformar en variable ninguno de los límites a la variabilidad (inferior o superior) de coeficientes impuestos en (27).

² Nótese que para objetivos de aumento del nivel de la VR , deberán establecerse variabilidades y variables de holgura para demandas finales sectoriales y_i , a fin de obtener una solución posible del modelo.

obj_{ij} valor del objetivo (29) obtenido al solucionar el modelo, con el límite de variabilidad (inferior o superior) del coeficiente a_{ij} impuesto en (27) transformado en variable.
 $a_{ij(0)}^*$ valor del límite (inferior o superior) propuesto por el modelo en (27) al solucionar el modelo tras transformar dicho límite en variable.

Así, podrá establecerse el siguiente cociente:

$$\delta_{ij} = \frac{\frac{obj_{bas} - obj_{ij}}{obj_{bas}}}{\frac{a_{ij(0)} - a_{ij(0)}^*}{a_{ij(0)}}} \quad (30)$$

Valores mayores de δ_{ij} implicarán un nivel mayor de importancia del coeficiente a_{ij} en relación con su sensibilidad respecto de las variaciones en el nivel de la VR . De esta forma, podrá establecerse la localización de coeficientes importantes o sensibles, cuyos cambios provocan importantes transformaciones en la estructura productiva desde el punto de vista de la variable seleccionada como referencia de evaluación.

Esta metodología ha sido aplicada para identificar los coeficientes críticos de la sustentabilidad en el desarrollo regional de la comunidad de Castilla-La Mancha. Los resultados se exponen a continuación.

Identificación de los coeficientes críticos para la sustentabilidad en el caso de Castilla-La Mancha

Como se acaba de comentar, el análisis de sensibilidad mediante un modelo de programación matemática puede utilizarse para identificar los coeficientes técnicos clave desde un punto de vista diferente al meramente productivo. En este contexto, el análisis suministrará el mapa de elementos críticos de la estructura productiva desde la perspectiva de la sustentabilidad.

Las variables de referencia (VR) empleadas para clasificar coeficientes técnicos desde el punto de vista económico, social y ambiental han sido, respectivamente: producción (a precios básicos), número de empleos equivalentes y nivel de emisiones de CO_2 a la atmósfera. Estos indicadores, desagregados por ramas de actividad, permitirán el cálculo de los coeficientes (9),³ claves para la especificación del modelo.

Como información estadística se ha utilizado la tabla *input-output* de Castilla-La Mancha correspondiente a 1995 y agregada a 27 ramas de actividad. En cuanto al vector de coeficientes c_{ji} de (9), en el caso del análisis de sensibilidad ante emisiones de CO_2 , no se

³ Lógicamente, en el caso de producción, estos coeficientes tomarán valor 1, siempre que la producción de cada rama de actividad sea distinta de 0.

dispone de información, en el caso de Castilla-La Mancha, sobre el volumen de emisiones de 1995 desagregada en actividades de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE-93 Rev.1). Así, se han adoptado los coeficientes calculados a partir de la tabla *input-output* Simétrica de España (TSIO) correspondiente a 1995 del Instituto Nacional de Estadística (INE), y de los datos de emisiones nacionales en miles de toneladas de 1995 por ramas de actividad, publicados asimismo por el Instituto dentro del Sistema de Cuentas Ambientales, lo cual debe considerarse una limitación a la hora de analizar resultados.

Otra cuestión relevante al realizar la aplicación es sobre qué coeficientes técnicos implantar en el modelo. Se ha decidido utilizar los coeficientes interiores, esto es, los que se calculan a partir de transacciones interiores, excluyendo importaciones. De esta forma se refleja de mejor manera la estructura económica del tejido productivo regional.

Para cada vr se ha propuesto una reducción de 1% en su volumen global de 1995. Así se rompe el equilibrio del sistema *input-output* definido por las restricciones (14) que sólo se retoma mediante inclusión de variables suplementarias definidas mediante las expresiones (27) y (28), los cuales recogen los descuadres provocados en el sistema debido al nuevo nivel de la vr . Los coeficientes más importantes serán aquellos cuya modificación mínima provoque mayor reducción del objetivo (30). En concreto, se han considerado coeficientes importantes aquellos cuyo cálculo (31) —el coeficiente δ_{ij} —, alcanza un valor superior a 0.1.

En el Cuadro 1 se muestran los diez coeficientes técnicos más importantes identificados para cada una de las vr seleccionadas. La columna 2 muestra el valor de límites impuestos en las ecuaciones (25), que coincide con el valor de coeficiente técnico analizado $a_{ij(0)}$. En la columna 3 se muestra el valor del límite (inferior) $a_{ij(0)}^*$ propuesto en (28) al solucionar el modelo transformando dicho límite en variable. En la columna 4 se muestra la diferencia porcentual entre valores 2 y 3. En la columna 5 se detalla la reducción del objetivo (30) conseguido al variar los límites inferiores de los coeficientes al valor 3 encontrado al solucionar el modelo. Por último, 6 la muestra el coeficiente δ_{ij} de sensibilidad obtenido según (31).

En cuanto a la vr *Producción* puede apreciarse cómo el coeficiente técnico más importante es el correspondiente al autoconsumo de la rama de actividad 16 *Construcción*. Una disminución en su valor de 50% acabaría con 100% de la suma de variables de holgura, es decir, con los descuadres ocasionados por la disminución de producción global de la economía de 1%. El siguiente coeficiente técnico más sensible y, por tanto, más importante, es el que representa las compras de la rama de actividad 4 *Alimentos, bebidas y tabaco* a la rama 1 *Agricultura, ganadería y pesca*. El tercer coeficiente más importante es el de compras de la rama 16 *Construcción* a la rama 10 *Fabricación de productos cerámicos y no metálicos*.

Respecto de la vr *Empleos totales*, el coeficiente más importante (sensible) es el de las compras de la rama de actividad 4 *Alimentos, bebidas y tabaco* a la rama 1 *Agricultura,*



Cuadro 1
Análisis de sensibilidad de coeficientes más importantes TCLM

<i>Producción efectiva a precios básicos</i>							
<i>Elemento</i>	<i>[1] Límite</i>	<i>[2] Actual</i>	<i>[3] Propuesto</i>	<i>[4] Variación</i>	<i>[5] Reducción infactibilidades</i>	<i>[6] Ratio</i>	
16	16	inferior	0.16277	0.08043	-50.587	100	1.97679
1	4	inferior	0.33259	0.15976	-51.966	100	1.92434
10	16	inferior	0.08836	0.00601	-93.195	100	1.07302
5	5	inferior	0.23101	0	-100	91.0257	0.91026
21	21	inferior	0.09756	0	-100	72.2346	0.72235
21	17	inferior	0.09847	0	-100	71.4045	0.71404
4	1	inferior	0.04791	0	-100	55.8945	0.55895
19	19	inferior	0.09257	0	-100	52.8749	0.52875
11	16	inferior	0.03745	0	-100	45.4829	0.45483
21	16	inferior	0.03645	0	-100	44.2710	0.44271
<i>Empleos Totales</i>							
<i>Elemento</i>	<i>[1] Límite</i>	<i>[2] Actual</i>	<i>[3] Propuesto</i>	<i>[4] Variación</i>	<i>[5] Reducción infactibilidades</i>	<i>[6] Ratio</i>	
1	4	inferior	0.33259	0.17757	-46.611	100	2.14542
16	16	inferior	0.16277	0.07371	-54.713	100	1.82770
5	5	inferior	0.23101	0.01339	-94.202	100	1.06154
17	16	inferior	0.02918	0	-100	70.4552	0.70455
17	1	inferior	0.02663	0	-100	61.7699	0.61770
10	16	inferior	0.08836	0	-100	60.4914	0.60491
17	17	inferior	0.0331	0	-100	47.7123	0.47712
1	1	inferior	0.03635	0	-100	47.2873	0.47287
19	19	inferior	0.09257	0	-100	46.6533	0.46653
17	4	inferior	0.03901	0	-100	44.8674	0.44867
<i>Emisiones de CO₂ a la atmósfera</i>							
<i>Elemento</i>	<i>[1] Límite</i>	<i>[2] Actual</i>	<i>[3] Propuesto</i>	<i>[4] Variación</i>	<i>[5] Reducción infactibilidades</i>	<i>[6] Ratio</i>	
10	16	inferior	0.08836	0.07535	-14.722	100	6.79238
3	1	inferior	0.01996	0.01088	-45.454	100	2.20002
1	4	inferior	0.33259	0.17401	-47.679	100	2.09734
10	10	inferior	0.08281	0.03112	-62.413	100	1.60223
3	2	inferior	0.01637	0.00535	-67.298	100	1.48593
2	19	inferior	0.06412	0.01113	-82.645	100	1.21000
3	18	inferior	0.02878	0.00124	-95.683	100	1.04512
2	1	inferior	0.02386	0	-100	91.9507	0.91951
3	17	inferior	0.01041	0	-100	71.324	0.71324
2	3	inferior	0.10942	0	-100	70.7564	0.70756

Fuente: elaboración propia.

ganadería y pesca. Una disminución de su valor de 46% acabaría con 100% de los descuadres ocasionados por la disminución de producción global de la economía de 1%. El segundo coeficiente más importante es el representado por autoconsumos de la rama de actividad 16 *Construcción*. El tercer coeficiente más importante es, de manera análoga, el de autoconsumos de la rama 5 *Industria textil y de la confección*.

Por último, atendiendo a la *VR Emisiones de CO₂*, puede comprobarse cómo el coeficiente técnico con mayor coeficiente δ_{ij} es el de compras de la rama 16 *Construcción* a la rama 10 *Fabricación de productos cerámicos y no metálicos*. Un decremento de 14.7% en este coeficiente, *ceteris paribus*, contribuye a reducir el objetivo (32) a 0, esto es, logra restablecer a la coherencia del sistema asumiendo el descenso de 1% en el nivel global de emisiones de CO₂. El segundo coeficiente técnico más importante es el de compras de la rama 1 *Agricultura, ganadería y pesca* a la actividad 3 *Energía eléctrica, gas y agua*. En tercer lugar, destaca el de compras de la rama 4 *Alimentos, bebidas y tabaco* a la rama 1 *Agricultura, ganadería y pesca*.

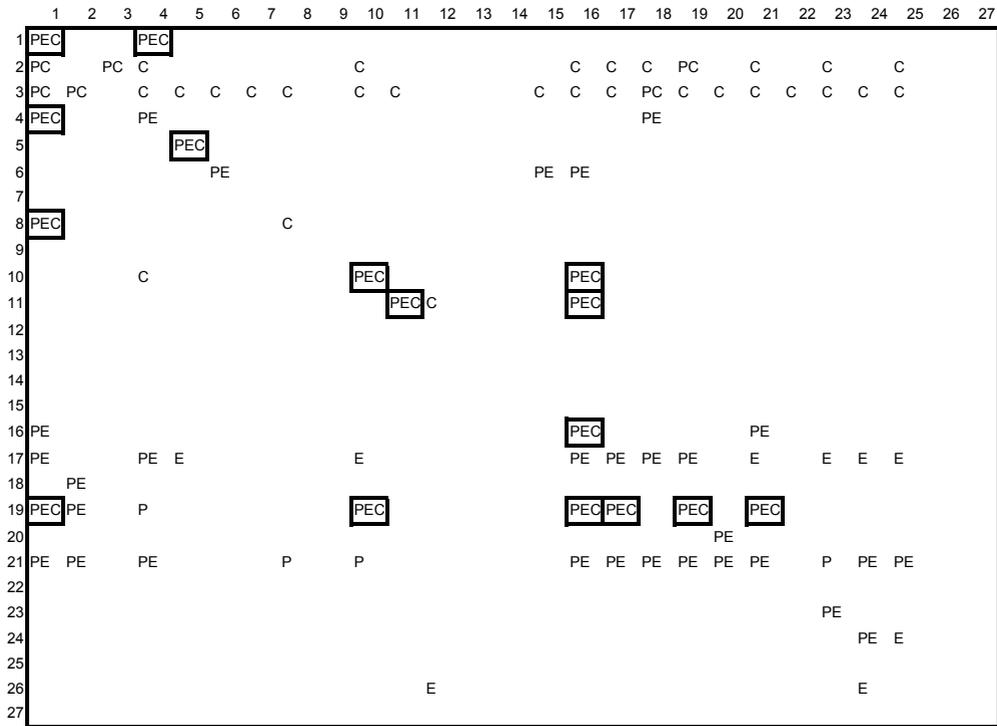
Como síntesis de los resultados, se presenta la Gráfica 1. En ésta se indican los coeficientes importantes para cada variable de referencia, considerados como tales aquellos cuyo indicador de sensibilidad δ_{ij} alcanza un valor superior a 0.1. Por columnas, se muestra el número de rama compradora, por filas se disponen los números de ramas vendedoras. En las celdas, *P* indica coeficientes importantes desde el punto de vista de la producción efectiva; *E* del empleo, y *C* de las emisiones de CO₂.

Las celdas *C* representan coeficientes que inciden de forma relevante en el nivel de emisiones de CO₂ a la atmósfera. Por tanto, las políticas tecnológicas que impliquen disminución de estos coeficientes serán beneficiosas desde el punto de vista medioambiental. Estas celdas se concentran, por filas o ramas vendedoras, en las actividades 2 *Extracción de Productos Energéticos y otros minerales*, 3 *Energía, electricidad y agua* y 19 *Transportes*; por columnas o ramas compradoras, en las ramas 1 *Agricultura, ganadería y pesca*, 4 *Alimentación, bebidas y tabaco* y 16 *Construcción*.

Las celdas *P* y *E* representan coeficientes que inciden de forma importante en los niveles de producción y empleo sectorial, respectivamente. Políticas de innovación tecnológica que incrementen estos coeficientes favorecerán el crecimiento económico y el bienestar social. Estas celdas se concentran, por filas o ramas vendedoras, en las actividades 19 *Transportes*, 6 *Madera y corcho*, 17 *Comercio, venta y reparación de vehículos*, 21 *Actividades inmobiliarias y Servicios Empresariales*; por columnas o compras, en las actividades 1 *Agricultura, ganadería y pesca*, 2 *Extracción de productos energéticos y otros minerales*, 4 *Alimentación, bebidas y tabaco*, 16 *Construcción* y 18 *Hostelería*.

El problema de la compatibilidad de objetivos socioeconómicos y ambientales se centra, fijándonos en la Gráfica 1, en las celdas con la combinación *C* y *P* y/o *E*, ya que en estos coeficientes se concentran objetivos opuestos: disminución de emisiones y aumento





Gráfica 1. Identificación de coeficientes más importantes TCLM.
Fuente elaboración propia.

del bienestar económico y/o social. Estos coeficientes técnicos son críticos para el desarrollo sostenible, y han de promoverse cambios tecnológicos que se plasmen en una desvinculación entre los niveles de importancia de emisiones y producción y el del empleo o, si esto no es posible, que mantengan equilibrio entre nivel de emisiones aceptable y desarrollo económico y social. Estos coeficientes se concentran, por ventas o filas, en las ramas 2 *Extracción de Productos Energéticos y otros minerales*, 3 *Energía, electricidad y agua* y 19 *Transportes*, y en las columnas (compras) de las actividades 1 *Agricultura, ganadería y pesca* y 16 *Construcción*. Especial atención merecen las ventas de la rama 19 *Transporte*, la cual concentra mayor número de coeficientes sensibles para las tres VR, cuya rama de actividad se debe considerar crítica desde el punto de vista estratégico. El Cuadro 2 resume estos resultados.

Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto una metodología para generalizar del análisis de sensibilidad de los coeficientes técnicos de una TIO. De esta forma, es posible identificar los elementos más importantes de la estructura productiva de una economía regional, desde la perspectiva de variables distintas a la producción. La metodología se basa en la especificación de un modelo de programación matemática y de su resolución de forma iterativa.

Cuadro 2
Cambio tecnológico y desarrollo sostenible (Castilla-La Mancha)

<i>Tipo</i>	<i>Política de innovación tecnológica</i>	<i>Principales actividades implicadas (ventas)</i>	<i>Principales actividades implicadas (compras)</i>
PEC PC EC	Coefficiente crítico. Necesidad de mantener un equilibrio en la transacción, por la carga medioambiental, o de promover procesos de disociación.	19 Transportes 02 Extracción de ptos. energéticos y otros minerales. 03 Energía eléctrica, gas y agua.	01 Agricultura, ganadería y pesca. 16 Construcción.
PE PE	Estimular este tipo de transacción por incrementos en la producción y empleo.	06 Madera y corcho. 17 Comercio. Venta y reparación de vehículos. 21 Actividades inmobiliarias y servicios empresariales.	01 Agricultura, ganadería y pesca. 02 Extracción de ptos. energéticos y otros minerales. 04 Alimentación, bebidas y tabaco. 16 Construcción. 18 Hostelería.
C	Estimular la disminución de estas transacciones, para lograr la disminución de emisiones contaminantes a la atmósfera.	02 Extracción de ptos. energéticos y otros minerales. 03 Energía eléctrica, gas y agua.	04 Alimentación, bebidas y tabaco. Fuente: elaboración propia.

Fuente: elaboración propia.

Desde el punto de vista del desarrollo sostenible de una región, es necesario considerar no sólo la vertiente económica del desarrollo, sino también las perspectivas social y ambiental. Así, el análisis de sensibilidad permitirá encontrar coeficientes importantes desde estos tres puntos de vista. El cambio tecnológico que implique variaciones en el valor de dichos coeficientes tendrá profundas repercusiones en la sustentabilidad del desarrollo regional.

A la vista de los resultados del análisis realizado para la región de Castilla-La Mancha, puede apreciarse que la necesidad de fomentar innovaciones que desvinculen producción y empleo de las emisiones contaminantes, se concentra en actividades energéticas, extractivas y del transporte (como suministradoras de *inputs*), y en el sector agroalimentario (como adquirente de recursos). Por tanto, las políticas de innovación tecnológica deberán centrarse tanto en la transición hacia fuentes de energía de bajo o nulo nivel de emisiones de CO₂ (sustitución de la energía derivada de combustibles fósiles), como a la mejora de eficiencia en el consumo de energía de industrias pesadas y, sobre todo, del transporte. 



Bibliografía

- Evans, W. D., "The effect of structural matrix errors on interindustry relation estimates", *Econometrica*, vol. 22, Oxford, Blackwell Publishing, 1954, pp. 461-480.
- Femia, A.; F. Hinterberger y F. Luks, "Ecological economic policy for sustainable development", Sustainable Europe Research Institute (SERI). Working Paper, núm. 1, Viena, 1999.
- Giddings, B.; B. Hopwood y G. O'Brien, "Environment, Economy and Society: Fitting them together into Sustainable Development", *Sustainable Development*, vol. 10, Nueva York, Wiley Interscience, 2002, pp. 187-196.
- Haake, J. y P. Jolivet, "Some reflections on the link between production and consumption for sustainable development", *Int. J. Sustainable Development*, vol. 4, núm. 1, Ginebra, Iderscience Enterprises Limited, 2001, pp. 22-32.
- Hernández, F.; M. A. Gual; P. del Río y A. Caparrós, 'Energy sustainability and global warming in Spain', *Energy Policy*, vol. 32, Amsterdam, Elsevier B. V., 2004, pp. 383-394.
- Jilek, M., "The selection of most important input coefficients", *Economic Bulletin for Europe*, núm. 23, Ginebra, Research and Planning Division, Economic Commission for Europe, 1971, pp. 86-105.
- Kemp, R.; P. Mulder y C.H. Reschke, "Evolutionary Theorising on Technological Change and Sustainable Development", OCFEB Research Memorandum 9912, 'Environmental Policy, Economic Reform and Endogenous Technology', Working Paper Series 2, Rotterdam, Research Centre for Economic Policy, Erasmus School of Economics, 1999.
- Nijkamp, P.; C.A. Rodenburg y E.T. Verhoef, 'The Adoption and diffusion of environmentally friendly technologies among firms', *Int. J. Environmental Technology and Management*, vol. 1, núms. 1-2, Ginebra, Iderscience Enterprises Limited, 2001, pp. 87-103.
- OECD, International Energy Agency, "Technology Innovation, Development and Diffusion", OECD/IEA Information Paper, 2003.
- Rammel, C. y J.C.J.M. van den Bergh, "Evolutionary policies for sustainable development: adaptive flexibility and risk minimising", *Ecological Economics*, vol. 47, Amsterdam, Elsevier B. V., 2003, pp. 121-133.
- Robinson, J., "Squaring the circle? Some thoughts on the idea of sustainable development", *Ecological Economics*, vol. 48, Amsterdam, Elsevier B. V., 2004, pp. 369-384.
- Schintke, J. y R. Stäglin, "Important Input Coefficients in Market Transactions Tables and Production Flow Tables", en M. Ciaschini (editor), *Input-Output Analysis. Current Developments*, Londres, Nueva York, Chapman and Hall, 1988, pp. 45-60.
- Sherman, J. y W. J. Morrison, "Adjustment of an inverse matrix corresponding to a change in one element of a given matrix", *Annals of Mathematical Statistics*, núm. 21, Beachwood (OH), Institute of Mathematical Statistics, 1950.
- Spangenberg, J.H., "Reconciling Sustainability and Growth: Criteria, Indicators, Policies", *Sustainable Development*, vol. 12, Nueva York, Wiley Interscience, 2004, pp. 74-86.
- Tarancón, M.A., "Ajuste y proyección de las tablas input-output en condiciones de coherencia estructural mediante optimización matemática", *Revista de Análisis Económico*, vol. 18, núm. 2, Santiago de Chile, ILADES-Georgetown University, 2003.
- World Commission on Environment and Development (WCED), *Our Common Future*. Oxford University Press, Oxford, 1987.

Anexo

Ramas de actividad r-27

Rama de actividad

- 1 Agricultura, ganadería y pesca
 - 2 Extracción de ptos. energéticos y otros minerales
 - 3 Energía eléctrica, gas y agua
 - 4 Alimentación, bebidas y tabaco
 - 5 Industria textil y de la confección
 - 6 Madera y corcho
 - 7 Papel, edición y artes gráficas
 - 8 Industria química
 - 9 Fabricación de productos de caucho y plástico
 - 10 Fabricación de productos cerámicos y minerales no metálicos
 - 11 Metalurgia y fabricación de ptos. metálicos
 - 12 Maquinaria y equipo mecánico
 - 13 Equipo eléctrico, electrónico y óptico
 - 14 Fabricación de material de transporte
 - 15 Industrias manufactureras diversas
 - 16 Construcción
 - 17 Comercio. Venta reparación de vehículos
 - 18 Hostelería
 - 19 Transportes
 - 20 Intermediación financiera
 - 21 Actividades inmobiliarias y servicios empresariales
 - 22 Educación
 - 23 Sanidad y servicios sociales
 - 24 Otras actividades sociales y otros servicios
 - 25 Administración Pública
 - 26 Hogares que emplean personal doméstico
 - 27 Servicios de intermediación financiera medidos indirectamente (SIFMI)
-

