

# NUEVOS METODOS DE MODELIZACION ECONOMICA PARA MEDIR LA INTERACCION ENTRE AGRICULTURA Y MEDIO AMBIENTE

Por  
RICHARD E. HOWITT (\*)

## I. INTRODUCCION

La modelización de la interacción entre agricultura y medio ambiente requiere un conjunto de características distinto al de los modelos dedicados exclusivamente a la producción agraria. Ciertamente, el motivo económico productivo y su repercusión en el uso de los recursos y los efectos externos son la fuerza impulsora de la mayoría de los cambios medioambientales ligados a la agricultura, pero el rasgo esencial de un modelo medioambiental es la vinculación entre modelos económicos de producción agraria y modelos físicos de resultados medioambientales. Los modelos económicos de producción agraria han de poseer ciertas características para interactuar empíricamente con modelos medioambientales.

El primer requisito es que la demanda de consumos intermedios y los niveles de producción han de expresarse como variables primales (físicas). Aún cuando teóricamente siempre es posible recuperar la tecnología primal a partir de especificaciones duales (costes) del

---

(\*) Profesor del Departamento de Economía Agraria, Universidad de California, Davis, California, EEUU.

- Revista de Estudios Agro-Sociales. Núm. 168 (abril-junio 1994).

modelo, en la práctica suele resultar difícil cuando se trata de recursos asignables. Esta dificultad libra realmente a los modelos duales de producción de una numerosa clase de problemas agrarios medioambientales, con la notable excepción García y cols. (1986), que estimaron los efectos agrarios de la contaminación del aire utilizando una base detallada, no singular, de datos.

El segundo requisito es que el modelo de producción económica posea un detalle geográfico suficiente para diferenciar entre distintas regiones productivas. Las regiones tienen a menudo diferentes características en lo que concierne a los recursos físicos o a los derechos de propiedad, lo cual modifica el coste o la repercusión de los resultados medioambientales. Es raro que aun el modelo económico más desagregado ofrezca tanto detalle como desearían los usuarios de modelos físicos, por lo cual invariablemente se necesitan compromisos sobre el nivel de agregación de ambos modelos.

En tercer lugar, para representar con precisión recursos finitos y capacidades medioambientales finitas, el modelo económico ha de tener restricciones de desigualdad en relación con la base de recursos. Además, como la política medioambiental se expresa en forma de normas con mayor frecuencia que en forma de precios, el modelo ha de ser capaz de definir políticas en forma de restricciones de desigualdad.

En cuarto lugar, suelen plantearse problemas medioambientales debido a la omisión de la repercusión dinámica de las decisiones económicas. Se dan ejemplos destacados de esto en la contaminación del agua y en la erosión del suelo. Es frecuente que las decisiones económicas puedan aproximarse adecuadamente mediante modelos estáticos, pero raras veces es posible hacer lo mismo con modelos medioambientales basados en los recursos. Aunque el modelo de producción se especifique como modelo económico estático, ha de ser capaz de interactuar con modelos físicos dinámicos y resolverse conjuntamente como un problema dinámico.

En quinto lugar, la esencia de la política medioambiental es la sustitución de consumos intermedios en el proceso de producción. El modelo económico de producción se enfrenta con la restricción añadida de que el conjunto de datos disponibles es normalmente muy limitado en comparación con las exigencias del modelo. Las realidades y compromisos requeridos para hacer frente a la especificación

preferida del modelo con datos subóptimos determinan normalmente la metodología de modelización económica utilizada.

En su reseña de tres decenios de modelización económica medioambiental, Hafkamp (1991) concluye:

«Los principios de las funciones de producción KLEM son los siguientes: son no lineales; pueden ser funciones de producción de tipo Cobb-Douglas o CES o adoptar cualquier especificación apropiada; proporcionan un buen instrumento para describir procesos de cambio tecnológico y sustitución de factores. Por este motivo, a veces son preferidas a los modelos de base input-output. Pero hay dificultades considerables al estimar y utilizar funciones de producción KLEM a la escala espacial y sectorial de una economía nacional o regional».

En este artículo se presentan algunos resultados recientes en relación con los métodos que permiten calibrar funciones no lineales de producción en modelos agrarios-medioambientales que utilizan conjuntos mínimos de datos. En la primera sección reseñamos brevemente los métodos más usados para la modelización de la política agraria-medioambiental y llamamos la atención sobre algunas deficiencias en este aspecto, tanto del enfoque econométrico como del de programación. En la sección siguiente se esboza un nuevo método que utiliza un método de calibración para la especificación del modelo. El método de calibración presenta algunas de las características de los modelos econométricos y de programación, en el sentido de que tiene una especificación de la producción más flexible que los modelos de programación lineal o cuadrática (PL, PC), pero se basa en el comportamiento observado de los agricultores dentro de las restricciones de recursos y política.

El artículo concluye con una visión general de las propiedades de los modelos calibrados de equilibrio de la producción (CEP), examinándose algunas aplicaciones recientes a problemas de política agraria y medioambiental.

## II. MODELIZACION MICROECONOMICA DE LA PRODUCCION AGRARIA

En su perspicaz reseña y análisis de los métodos de modelización microeconómica, Just (1993) define los cuatro métodos empíri-

cos tradicionales utilizados en la economía agraria de la manera siguiente: (i) modelización econométrica miópica, (ii) métodos de programación, (iii) modelización econométrica directa estructurada (modelos primales), y (iv) modelización econométrica indirecta estructurada (modelos duales). Las cuestiones que plantea Just son particularmente pertinentes para los modelos medioambientales-económicos. Durante los últimos quince años, los estudiosos de la economía agraria han recurrido a modelos econométricos cada vez más complejos y flexibles que han de utilizar los mismos conjuntos limitados de datos. De ahí la posibilidad de que el contraste de los modelos plenamente flexibles en supuestos inadecuados conduzca al rechazo incorrecto de las especificaciones de los modelos más simples. Esto no quiere decir que los modelos de producción no deban ser teóricamente sólidos, sino más bien que la modelización empírica de la producción puede mejorarse de dos maneras.

En primer lugar, existen valiosos datos y estructuras adicionales que han de añadirse a los modelos de producción utilizando la información procedente de observaciones sobre las asignaciones y la heterogeneidad de la tierra y de otros factores fijos. En segundo lugar, en muchas zonas agrarias la estructura de precios y la tecnología cambian tan rápidamente que las series temporales prolongadas necesarias para estimar sistemas plenamente flexibles de producción pueden sesgar las predicciones de política a causa de la influencia de estructuras obsoletas. En este caso, cabe obtener previsiones más precisas a corto plazo utilizando estimaciones anteriores de parámetros de comportamiento, junto con modelos más sencillos del sistema productivo calibrados con un conjunto mucho menor de observaciones recientes. En tal caso, el modelista está sacrificando el rigor estadístico en beneficio de un mayor peso de una estructura más reciente.

Volviendo a la tipología de modelos de Just, podemos prescindir de dos de los grupos por lo que se refiere a su uso para el análisis medioambiental agrario. Los modelos econométricos miópicos que consideran cultivos o productos aislados simplemente están mal especificados para la medición de los recursos asignables de tierra, agua y productos fitosanitarios. En su especificación ignoran una gran vía de ajuste utilizada por el agricultor, a saber, los cambios de

actividad en materia de cultivos y ganadería. El cuarto grupo de modelos econométricos indirectos (duales) puede considerarse teóricamente correcto, pero con frecuencia es inaplicable en la práctica para la estimación de decisiones sobre recursos asignables. Esto nos deja con dos grupos: los modelos de programación y los modelos econométricos primales.

Los modelos de programación tienen una tradición prolongada y bien establecida en el análisis regional de los sistemas de producción agraria. Presentan ventajas importantes, en el sentido de que pueden generarse utilizando conjuntos mínimos de datos y mostrar explícitamente cómo se utilizan los recursos y el efecto de las restricciones medioambientales. Sin embargo, la especificación de los modelos de programación plantea varios problemas. La raíz de los mismos es que la tecnología de producción en todos los problemas de programación es localmente lineal para todos los factores, incluida la tierra. Las especificaciones cuadráticas (PC) que incluyen precios endógenos y términos de riesgo añaden algunas no linealidades, pero no modifican la especificación lineal gradual de la producción regional (Howitt, 1993). Los modelos empíricos de programación de la producción agraria y uso de recursos presentan las siguientes características empíricas poco recomendables.

- (i) La calibración de los modelos de programación para reproducir las asignaciones a cultivos en el año base es específica. Se han propuesto varios métodos para restringir las pautas de cultivos, desde la rotación tija hasta las restricciones impropriadamente denominadas de «flexibilidad». Todos estos métodos restringen artificialmente la capacidad del modelo para responder a las variaciones de los costes o de la disponibilidad de recursos a causa de las políticas medioambientales o agrarias. El problema fundamental consiste en que los modelos de programación, por su misma linealidad, han de utilizar un conjunto completo de restricciones en un proceso que con frecuencia no es restringido ni lineal. Estas críticas pueden evitarse aplicando especificaciones lineales que son gradualmente no lineales y contienen numerosas actividades de producción para cada producto. Sin embargo, dadas las bases de datos de las que normalmente disponen los modelistas regio-

nales, esa linealidad gradual no es una solución empírica práctica.

- (ii) En los modelos de programación, la respuesta de la política a ligeras variaciones de los costes y precios de los factores y del producto es insatisfactoria. Dada la linealidad inherente del lado de la oferta del modelo, las demandas derivadas de factores o la oferta de producto son insensibles hasta que se produce un cambio de base en el modelo. Esto lleva a las conocidas funciones graduales obtenidas parametrizando modelos de programación. Los problemas de política se plantean cuando el modelo ha de reflejar cambios relativamente sutiles de los impuestos sobre los factores o restricciones a los recursos. Es muy frecuente que niveles realistas de cambios de la política no den lugar a un cambio de base del modelo y, por tanto, tampoco a respuestas concretas en términos de variaciones del coste de los factores o del precio de oferta.
- (iii) Los modelos de programación pueden mostrar dos tipos de sustitución. En primer lugar, cambiando la combinación de recursos totales utilizados, y en segundo lugar, modificando la combinación de productos obtenidos de los mismos. Sin embargo, una fuente de sustitución importante para el análisis de la política medioambiental es la sustitución entre factores utilizados para un cultivo concreto o en una región concreta. Por ejemplo, la especificación de la producción de Leontieff inherente a los modelos de programación no tiene en cuenta la sustitución de herbicidas y cultivos.

Los modelos econométricos primales de sistemas de producción plantean un conjunto diferente de problemas empíricos a los modelistas de la política regional. A diferencia de lo que ocurre en los modelos de programación, estos problemas no residen en su especificación teórica, que normalmente no es discutible, sino en los compromisos empíricos que han de aceptarse para acoger los conjuntos limitados de datos disponibles. Los principales problemas empíricos son los siguientes:

- (i) Muchos modelos econométricos de uso de recursos agrarios regionales están sujetos a un nivel de agregación explicable

por la escasez de datos disponibles. Esta agregación puede enmascarar importantes diferencias transversales entre regiones. Algunos modelistas de economía agraria opinan que la construcción de modelos debe restringirse a especificaciones para las cuales pueda estimarse toda la estructura. Aún siendo éste un objetivo admirable, a menudo poco realista, la mayoría de las disciplinas empíricas aplicadas establecen una distinción entre estimación y construcción de modelos. Evidentemente, la estimación forma parte de la construcción de modelos. Pero si se limitan las especificaciones del modelo a aquéllas para las cuales se cuenta con datos suficientes para llegar a estimaciones estadísticamente robustas de todos sus parámetros, fácilmente se llega a un modelo demasiado desagregado a efectos políticos.

- (ii) Los recursos agrarios ligados a problemas medioambientales suelen clasificarse como factores fijos, pero asignables. La tierra y el agua son los ejemplos más comunes, pero los pastizales, las zonas de bosque y la capacidad natural de absorción de residuos también son importantes. Una característica común a estos factores es que raras veces tienen precios de oferta de mercado que reflejen plenamente su valor de escasez para el productor agrario. En la mayoría de los casos, los pagos por arrendamiento que se reflejan en el mercado se hallan distorsionados por la estrechez de este último, como sucede con la mayoría de los arrendamientos de tierras, o por las restricciones a los derechos de propiedad en materia de pastos, de tierras públicas o de riegos subvencionados. La importancia de incluir los valores ficticios correctos de los factores fijos junto con los correspondientes pagos nominales por arrendamiento ha sido reconocida por Just y cols. (1983). Ahora bien, esta clase de estimación de sistemas completos requiere un gran conjunto de datos, y con frecuencia es inviable. El método habitual en la econometría empírica consiste en suponer que los precios registrados del arrendamiento de los recursos asignables son los valores de equilibrio del mercado.
- (iii) En la modelización econométrica de la producción se tiende actualmente a especificar modelos con formas funcionales

cada vez más flexibles y a recurrir a los datos para definir las relaciones significativas. En relación con la modelización empírica práctica, la aceptación sin discusión de este método tiene dos inconvenientes. En primer lugar, el aumento de la flexibilidad implica un aumento de los parámetros de la función de producción (o de costes), lo que presiona para que el modelista agregue todavía más el modelo. A veces se obtiene una predicción regional más precisa con un modelo menos agregado y una especificación más sencilla. En segundo lugar, muchos modelos econométricos omiten datos estructurales conocidos acerca de la base de recursos agrarios. El ejemplo más destacado es el de la especificación de la tierra como un factor homogéneo. El potencial productivo de diferentes tipos de suelos es bien conocido por los edafólogos y los agrónomos y constituye un rasgo importante y constante del potencial productivo regional. Por desgracia, esta información raras veces se incorpora a los modelos econométricos de producción.

El tercer método de modelización de la repercusión medioambiental de la agricultura utiliza modelos de equilibrio general calculable (EGC); son ejemplos recientes los de Abler y Shortle (1991) y Despotakis y Fisher (1988). Generalmente, los modelos EGC incluyen varias actividades agregadas de cultivo o ganadería en los subsectores agrarios. Además, el método para calibrar las funciones de oferta de la tierra exige para definir los parámetros pagos de arrendamiento específicos por cultivos. Invariablemente, los pagos de arrendamiento específicos por cultivos son inaccesibles o se basan en acuerdos de cultivo compartido que se confunden con el coste de los riesgos compartidos.

Durante los últimos quince años, el método de EGC ha sido generalmente adoptado para modelizar economías en desarrollo y ha aportado más flexibilidad y generalidad que los modelos lineales. Sorprendentemente, sin embargo, no se ha impuesto en la modelización de la producción agraria a nivel regional. La resistencia a extender el método EGC a los modelos agrarios sectoriales se debe probablemente a la dificultad de modelizar las asignaciones regionales de superficie cultivable a los diferentes cultivos. En la sección siguiente

veremos cómo la clase KLEM de modelos de producción puede ampliarse a modelos agrarios regionales.

### III. MODELOS CALIBRADOS DE EQUILIBRIO DE LA PRODUCCION

A esta reseña pesimista de los problemas empíricos de la modelización de la política agraria-medioambiental con las técnicas convencionales deben seguir propuestas más alentadoras de un método alternativo. En esta sección se esbozan las propiedades y el proceso de construcción de modelos calibrados de producción agraria y uso de recursos. Estos modelos pueden basarse en un conjunto mínimo de datos, pero presentan las mismas propiedades técnicas que las especificaciones econométricas más sencillas y pueden incorporar las restricciones de recursos y política que contribuyen al realismo de los modelos de programación.

Los modelos calibrados de equilibrio de la producción (CEP) utilizan los conceptos básicos de calibración tomados de los modelos EGC para calcular los coeficientes de la función de equilibrio de la producción con factores variables. El uso de recursos asignables, como la tierra, se calibra utilizando los datos de precios básicos, los valores duales de asignaciones de cultivos y los costes implícitos de producción generados con el método de programación matemática positiva (PMP) (Howitt, 1993).

Utilizando relaciones basadas en las condiciones de primer orden, los modelos CEP pueden calibrar funciones de producción específicas para cultivos regionales de tipo CES o Cobb-Douglas sin imponer restricciones arbitrarias. Los modelos resultantes tienen capacidad para simular variaciones regionales detalladas del uso de recursos económicos y medioambientales. Además, por usar la misma tecnología que modelos más agregados, pueden agregarse a nivel de funciones de producción de nivel sectorial en modelos EGC o econométricos. Los modelos CEP están destinados a anidar en un sector de un modelo EGC o econométrico más general.

La capacidad para desagregar sistemáticamente a partir del nivel nacional tiene dos ventajas. En primer lugar, permite expresar el

efecto de grandes variaciones de la política medioambiental sobre una base agraria regional. Análogamente, pueden calcularse los efectos nacionales de la política agraria en variables medioambientales regionales. A menudo son notables las diferencias regionales, y también lo es la repercusión política de la diversidad regional. Aunque la agricultura no es un gran componente de muchas economías industriales, tiene un efecto desproporcionado en el medio ambiente, y con frecuencia representa un importante papel político. En las economías menos desarrolladas, el sector agrario es normalmente dominante en lo que respecta a los recursos utilizados y a la mano de obra empleada.

La segunda ventaja de la desagregación del sector agrario consiste en que permite a la economía agraria vincularse directamente con su base regional de recursos y con los modelos medioambientales asociados. Por tanto, las políticas económicas de cualquier nivel puede vincularse a efectos medioambientales específicos. Por ejemplo, una variación del tipo de cambio puede vincularse a las variaciones de la demanda de exportaciones de un cultivo agrario dado en un modelo nacional, y el cambio de la demanda de un producto debido a las exportaciones puede trasladarse a las variaciones de los niveles de utilización regional de herbicidas mediante el modelo CEP.

La aplicación directa del método EGC a los problemas agrarios regionales introduce dos complicaciones. En primer lugar las restricciones a los recursos agrarios causan los mismos problemas de calibración de funciones regionales de producción con rendimiento a escala constante que las especificaciones más simples de Leontieff. Con frecuencia, los datos agrarios muestran que el número de actividades de cultivo en una región supera considerablemente el número de restricciones vinculantes que pueden justificarse. En esta situación corriente, el modelo especificado con una tecnología de rendimientos constantes a escala y una función limitada pero perfectamente elástica de oferta de tierra se especializará en exceso en las actividades productivas más rentables. La especificación de una tecnología de producción con rendimientos decrecientes a escala calibrará el modelo (Howitt, 1991), pero es difícil justificar empíricamente el supuesto y se introducen problemas numéricos de funciones CES.

Una segunda fuente de problemas en la desagregación de los modelos EGC puede haber sido el número de no linealidades implicadas por contar con funciones regionales de producción en un modelo desagregado. Sin embargo, con los modernos algoritmos y estaciones de trabajo, el problema de optimización no lineal con los centenares de variables necesarias para resolver la especificación de funciones desagregadas CES o de Cobb-Douglas puede resolverse fácilmente aprovechando la capacidad de los algoritmos convencionales y utilizando máquinas de uso personal.

Con los años, se han propuesto varios métodos para definir el conjunto de restricciones de los modelos lineales. Los modelos CEP utilizan las asignaciones regionales de tierra a los cultivos para deducir las condiciones de primer orden. A continuación, se combinan los valores empíricos con una función de costes (o de rendimiento) no lineal en la asignación regional de tierra cultivable. La diferencia de costes de producción se debe al efecto económico de las distintas calidades del suelo de cada región y al carácter fijo del tiempo de trabajo y de la capacitación disponible en la mayoría de las explotaciones agrarias. En resumen, el método de modelización «positiva» permite que el beneficio por hectárea descienda al aumentar la superficie cultivada. Utilizando los datos sobre asignación de la superficie cultivada en condiciones de precios y costes dados esperados, el modelista puede deducir las condiciones de primer orden de la asignación de tierra.

Para la calibración empírica se utiliza una optimización restringida en la primera fase. A partir de este modelo lineal, pueden deducirse los parámetros regionales específicos de cultivos que calibran el modelo no lineal con arreglo a los datos del año base. Por supuesto, las restricciones de recursos y política que se justifican empíricamente también se incluyen en el proceso de calibración y en el modelo final.

En el desarrollo inicial de la programación matemática positiva (PMP) se utilizaron funciones no lineales de costes y tecnología de Leontieff para calibrar una gama de modelos. Durante los últimos diez años, el método PMP de calibración se ha aplicado a modelos nacionales de las economías agrarias norteamericana, canadiense y turca y a varios modelos regionales.

A efectos de política medioambiental, es preciso introducir las funciones de producción más flexibles propuestas por Hafkamp. Los métodos PMP y EGC de calibración pueden combinarse para calibrar de manera congruente y sencilla modelos agrario-medioambientales de producción. En este ejemplo utilizaremos el conjunto de datos más sencillo posible. El conjunto de datos, que puede denominarse conjunto mínimo de datos LP, es una sola observación transversal de la producción regional. En este caso utilizaremos ejemplos de cultivos, aún cuando este método puede aplicarse fácilmente a la producción ganadera mixta o pura. El conjunto de datos para «i» cultivos incluye los precios  $p(i)$ , la superficie cultivada asignada  $x(i)$ , y el uso de factores para el cultivo  $x(ij)$ , a partir de los cuales se calculan los coeficientes  $a(ij)$ , el coste por unidad de factor  $w_j$ , y los rendimientos medios  $y(i)$ . El valor total de cualquier recurso o política asignable es el valor del segundo miembro de las restricciones de desigualdad en la producción  $b(j)$ . Se han omitido los subíndices regionales por motivos de simplicidad.

$$\begin{array}{ll}
 \text{Max} & \text{(i) } \sum_i p_i y_i \bar{x}_i - \sum_j w_j a_{ij} x_i \\
 \text{st} & \text{(ii) } Ax \leq b \\
 & \text{(iii) } Ix \leq \bar{x} + \epsilon
 \end{array} \quad [1]$$

La fase inicial LP del modelo se representa en las ecuaciones 1(i)-(iii). El modelo difiere del formato usual LP en el conjunto de restricciones de calibración que figura en (1, iii). La perturbación  $\epsilon$  de las restricciones de calibración desvincula las verdaderas restricciones de los recursos (1, iii) de las restricciones de calibración y garantiza que los valores duales de los recursos asignables representan los valores marginales de las restricciones de los recursos. Los dos conjuntos de restricciones dan dos conjuntos de valores duales.  $\lambda_1$  representa los valores duales del recurso ficticio asociados con 1 (ii). Los elementos del vector  $\lambda_2$  son los valores duales PMP obtenidos del conjunto de restricciones 1(iii), que muestran los costes marginales implícitos congruentes con las condiciones equimarginales de la asignación de tierra a los distintos cultivos. Estos dos conjuntos de valores duales se utilizan para calcular los costes

de equilibrio de la tierra y otros factores asignables en la obtención de los coeficientes de la función de producción.

Los modelos EGC se basan por definición y convenio en la ley de Walras de asignación de los factores, que define el conjunto de precios que iguala la oferta y demanda excedentes (Dervis, de Melo y Robinson, 1982). Para el modelo local de equilibrio parcial, la dotación de recursos fijos y los costes locales de ajuste dan lugar a que los recursos tengan unos costes de escasez no plenamente reflejados en los precios nominales de los mismos. Si bien los métodos EGC de calibración utilizan precios y cantidades de mercado para definir las ecuaciones relativas y los parámetros de la función de producción, los modelos agrarios de equilibrio parcial han de elevar los precios nominales por importe de los recursos y los valores ficticios específicos de los cultivos generados en la primera fase LP de calibración.

La función CES de producción se representa para tres factores en la ecuación 2:

$$y_i = \alpha (\beta_1 x_{i1}^\gamma + \beta_2 x_{i2}^\gamma + (1 - \beta_1 - \beta_2) x_{i3}^\gamma)^{\frac{1}{\gamma}} \tag{2}$$

donde  $\gamma = \frac{\sigma - 1}{\sigma}$

$\sigma$  = elasticidad de sustitución

El valor empírico de la elasticidad de sustitución se obtiene de estudios econométricos anteriores. La función de producción se especifica como de rendimientos constantes a escala para una cantidad dada de tierra, ya que el uso de dos conjuntos de valores duales y de precios nominales de los factores asigna exactamente el valor total de la producción a los diferentes factores. Si el modelista necesita especificar grupos de factores con diferentes elasticidades de sustitución, quizá nulas para algunos factores, puede incorporarse con facilidad el método anidado propuesto por Sato (1967). Pueden utilizarse en lugar de CES la función de producción de Cobb-Douglas o las especificaciones cuadráticas restringidas.

Dado que las elasticidades de sustitución se obtienen de estimaciones econométricas anteriores, la ecuación [2] con J factores

tiene  $J$  parámetros desconocidos que calibrar,  $J-1$  parámetros relativos y un parámetro de escala,  $\alpha$ . Siguiendo la práctica usual en las especificaciones econométricas y calibraciones EGC, los parámetros relativos  $J-1$  desconocidos pueden expresarse en términos del coste de los factores y de las proporciones de factores. Las condiciones de primer orden de la asignación de factores igualan el valor del producto marginal al coste nominal de los factores más cualesquiera costes ficticios de los recursos restringidos. La manipulación algebraica de las condiciones de primer orden da el conjunto recursivo de ecuaciones contenidas en 3(i)-(iii) que se resuelven para coeficientes relativos específicos de cultivos y regionales.

$$\begin{aligned}
 \text{(i)} \quad \beta_1 &= 1 + \left( \frac{\bar{\omega}_1 x_3}{\bar{\omega}_3 x_1} \right)^{\left(\frac{1}{\sigma}\right)} \\
 \text{(ii)} \quad \beta_2 &= \beta_1 \left( \frac{\bar{\omega}_2 x_1}{\bar{\omega}_1 x_2} \right)^{\left(\frac{1}{\sigma}\right)} \\
 \text{(iii)} \quad \beta_3 &= 1 - \beta_1 - \beta_2
 \end{aligned} \tag{3}$$

donde  $\omega_j$  = coste ajustado de los factores  
 $\sigma$  = elasticidad de sustitución

Las ecuaciones relativas de factores variables cuyas funciones de oferta se suponen perfectamente elásticas son las mismas que en las funciones del modelo EGC de producción. Hay una diferencia importante entre los modelos CEP y EGC en la especificación de las ecuaciones relativas de recursos. Las ecuaciones relativas de recursos asignables distintos de la tierra tienen el coste ficticio del recurso, medido por el valor dual del grupo I del modelo (1), sumado al coste nominal del factor. La tierra lleva añadidos el coste nominal, el valor ficticio y el coste marginal implícito para calibrar los coeficientes relativos.

El coeficiente  $\alpha$  de escala específico de cultivos y regional de la ecuación 2 se calibra sustituyendo los valores de  $\beta$ ,  $\sigma$ ,  $\gamma$  y  $x$  en la ecuación 2.

Como el coste implícito se incluye en las ecuaciones relativas, ha de representarse también explícitamente en la función objetivo.

$$\begin{aligned}
 \text{(i) Coste implícito} &= \psi_i x_{ii}^2 \\
 \text{(ii) } \lambda_{i2} &= 2 \psi_i x_{ii} \\
 \text{(iii) } \therefore \psi_i &= \frac{\lambda_{i2}}{2x_{ii}}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Al definir la función cuadrática de costes en la ecuación 4(i) como el coste implícito del aumento de la superficie cultivada regional, el coste marginal implícito se calcula utilizando el valor dual PMP específico del producto. En la ecuación 4(ii) se muestra cómo se utiliza  $\lambda_2$  del problema [1] para calibrar el coeficiente y  $\psi$  de la función implícita de costes en la ecuación 4(iii).

Utilizando los coeficientes antes calibrados, en la ecuación [5] se representa una CES general del problema de producción del recurso agrario. El modelo de la ecuación [5] difiere del de la primera fase, la ecuación [1], en tres aspectos importantes.

En primer lugar, la tecnología de producción es más general y lleva incorporada la elasticidad empírica de sustitución. Esto significa que el modelo [5] resuelve las proporciones óptimas de factores junto con la asignación de la tierra, pero no en proporciones fijas a la misma, como sucedía en la especificación de Leontieff en el modelo [1].

En segundo lugar, la función objetivo tiene especificada para cada asignación de tierra la función adicional de costes implícitos. La base de este coste se halla en la heterogeneidad de la tierra, de otros factores y de la fijeza de algunos consumos intermedios agrarios, como mano de obra familiar y las grandes unidades de maquinaria.

$$\begin{aligned}
 \text{(i) Max } &\sum_i p_i y_i - \sum_j \omega_j x_j - \sum_i \psi_i x_{ii}^2 \\
 \text{(ii) st } &y_i = \alpha_i \left( \sum_j \beta_j x_j^\gamma \right)^{\left(\frac{1}{\gamma}\right)} \\
 \text{(iii) } &Ax \leq b
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

En tercer lugar, el conjunto de restricciones de calibración (1, iii) se omiten en el modelo CEP en [5]. El modelo CEP todavía calcula sobre los factores y productos del año base, ya que los valores duales del modelo [1] se incorporan a las condiciones de primer orden utilizadas para calcular los coeficientes de producción y costes. Por tanto, el modelo CEP calcula exactamente sobre datos del año base sin restricción alguna arbitraria e insostenible.

Resumiendo, en esta sección hemos mostrado cómo puede utilizarse un conjunto mínimo de datos en un modelo restringido LP para generar un modelo más general CES autocalibrante. El proceso de cálculo puede parecer complejo, pero con los modernos algoritmos, como GAMS/MINOS (Brook y cols., 1992), todo el proceso puede codificarse de forma que funcione rápida y automáticamente en máquinas de uso personal. El código GAMS/MINOS puede proporcionarlo el autor por correo electrónico E-Mail (rehowitteucdavis.edu).

#### IV. PROPIEDADES MICROECONOMICAS DE LOS MODELOS CALIBRADOS DE PRODUCCION

Al generalizar la especificación de producción para las funciones KLEM, los modelos CEP muestran propiedades congruentes con la teoría microeconómica que no poseen los modelos LP o input-output. La capacidad de calibración sin restricciones ha sido abordada en la sección anterior.

Con la especificación de una función no lineal de beneficio de la tierra y todos los demás factores en el modelo CEP (5, i), pueden obtenerse las propiedades microeconómicas estándar de Hicks. Al especificar la formulación del modelo primal-dual y hacer el supuesto usual de que la matriz de los coeficientes de costes implícitos  $\psi$  es positiva y definida, puede demostrarse (París, 1993) que las pendientes de las funciones de oferta y demanda obtenidas del modelo CEP son, respectivamente, positivas y negativa, lo mismo que en las ecuaciones 6(i) y 6(ii).

$$\begin{aligned}
 \text{(i)} \quad \frac{\delta_y}{\delta_p} &= \text{PSD} \\
 \text{(ii)} \quad \frac{\delta_x}{\delta_\omega} &= \text{NSD} \\
 \text{(iii)} \quad \frac{\delta_y}{\delta_\omega} &= -\frac{\delta_x}{\delta_p}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Las condiciones de simetría de Hicks que muestra la ecuación 6(iii) también se cumplen en el modelo CEP.

El problema de la respuesta gradual a los cambios de política en los modelos de programación lineal se resuelve mediante la especificación no lineal en los modelos CEP. La respuesta del producto a las variaciones del precio o del uso de los factores al cambio de los costes es una función continua aun cuando no varíe la base. Cuando varía la base de las restricciones lineales, la función de respuesta paramétrica cambia de pendiente, pero sigue siendo continua dentro de la próxima base. La importancia de esta propiedad consiste en que medidas medioambientales políticamente aceptables dan lugar usualmente a cambios relativamente pequeños de los costes o restricciones. Las funciones continuas de los modelos CEP pueden reflejar pequeñas variaciones de la política y simular su repercusión económica o medioambiental.

El método CEP se ha aplicado a varios modelos durante los últimos cinco años. Un modelo nacional usando tecnología de Cobb-Douglas se utilizó para estimar la interacción entre la política agraria norteamericana y el uso del agua para regadíos (Howitt, 1991). Una especificación CES anidada con siete factores se definió sobre base regional y se simuló el efecto de variaciones de los precios de la energía eléctrica en los ingresos agrarios en los estados centrales de Estados Unidos (Edwards, 1993). Se han desarrollado otros dos modelos CES anidados, pero todavía no se han publicado. R. Macgregor (Agriculture Canada) ha desarrollado una versión CES del modelo nacional canadiense sectorial para analizar los resultados económicos de las acciones de control de la erosión en las regiones productivas de la Pradera. F. Farnum (Departamento de Recursos Hidráulicos de

California) ha utilizado también un método análogo para medir la tasa de cambio técnico en los métodos de regadío de California.

Astorquiza y Howitt (1993) han desarrollado un modelo dinámico que acopla un modelo lineal cuadrático PMP de producción agraria a un modelo dinámico de salinidad y uso de la tierra para medir estrategias alternativas de desarrollo para el proyecto de regadíos Monegros II.

Si bien no deben ignorarse de plano las dificultades potenciales de la solución no lineal de las muchas especificaciones no lineales dimensionales de CEP, las propiedades de los modelos parecen justificar la complejidad adicional. Se han resuelto grandes modelos con quinientas variables no lineales en estaciones convencionales de trabajo.

## V. CONCLUSIONES

En este artículo se han reseñado los requisitos de los modelos para el análisis de problemas agrarios-medioambientales y se ha observado que los dos métodos empíricos convencionales disponibles para esta tarea son insuficientes. Los modelos de programación no son suficientemente flexibles, mientras que los modelos económicos son restringidos con frecuencia por los datos disponibles.

Se presenta un método alternativo que calcula funciones de producción más flexibles utilizando una base mínima de datos a modo de compromiso entre los extremos de la programación lineal y la estimación econométrica. Se exponen brevemente las propiedades de los modelos de producción calibrada de equilibrio y algunas aplicaciones iniciales, y se pone de manifiesto que cumplen muchos de los requisitos de la modelización de los problemas agrarios-medioambientales utilizando los conjuntos mínimos de datos de los que normalmente se dispone.

## BIBLIOGRAFIA

ABLER, D. G. y SHORTLE, J. S. (1991). *Innovation and Environmental Quality: The Case of EC and US Agriculture*. En *Environmental Policy and the Economy*.

DIETZ, F.; VAN DER PLOEG, F. y VAN DER STRATEEN, J. (eds.). Elsevier North Holland, Amsterdam.

ASTORQUIZA, I. y HOWITT, R. E. (1993). *Irrigation Development Under Limiting Environmental Conditions: Policy Analysis for Non-Point Source Control* presentado en la cuarta Conferencia anual de la Asociación Europea de Economistas sobre Medio Ambiente y Recursos, INSEAD Fontainebleau.

BROOKE, A.; KENDRICK, D. y MEERAUS, A. (1992). *GAMS: a Users Guide*. The Scientific Press, San Francisco.

DERVIS, K.; DE MELO, J. y ROBINSON, S. (1982). *General Equilibrium Models for Development Policy*. Cambridge University Press, Cambridge.

DESPOTAKIS, K. A. y FISHER, A. C. (1988). *Energy in a Regional Economy: A Computable General Equilibrium for California*. *Journal of Environmental Economics and Management* 15, pp. 313-330.

EDWARDS, B. y FLAIM, S. (1993). *The Impact of Changes in Electricity Costs on Irrigated Agriculture*. Argonne Technical Report. Argonne National Laboratory, Chicago.

GARCÍA, P.; DIXON, B. L.; MJELDE, J. W. y ADAMS, R. M. (1986). *Measuring the Benefits of Environmental Change Using a Duality Approach: The Case of Ozone and Illinois Cash Grain Farms*. *Journal of Economics and Environmental Economics* 13, pp. 69-80.

HAFKAMP, W. (1991). *Three decades of Environmental-Economics Modelling: Economic Models of Pollutant Emissions*. En *Environmental Policy and the Economy*. DIETZ, F.; VAN DER PLOEG, F. y VAN DER STRATEEN, J. (eds.). Elsevier. North Holland, Amsterdam.

HOWITT, R. E. (1993). *Positive Mathematical Programming*. Working Paper Department of Agriculture Economics, University of California. Davis, California, USA.

HOWITT, R. E. (1991). *Water Policy Effects on Crop Production and Vice Versa: An Empirical Approach*. En *Commodity and Resource Policies in Agricultural Systems*. JUST, R. E. y BOCKSTAEEL, N. (eds.). Springer-Verlag, Berlín, pp. 234-253.

JUST, R. E. (1993). *Discovering Production and Supply Relationships: Present Status and Future Opportunities*. *Review of Marketing and Agricultural Economics* 16 (1), pp. 11-40.

JUST, R. E.; ZILBERMAN, D. y HOCHMAN, E. (1983). *Estimation of Multicrop Production Functions*. *American Journal of Agricultural Economics* 65, pp. 770-780.

París, Q. (1993). *Lecture Notes in Mathematical Programming* cap. 11. Department of Agricultural Economics, University of California, Davis, California, USA.

SATO, K. (1967). *A Two-Level Constant Elasticity of Substitution Production Function*. *Review of Economic Studies* 34, pp. 201-218.

## RESUMEN

Se reseñan los requisitos de los modelos para el análisis de problemas agrarios-medioambientales observándose que los dos métodos empírico convencionales disponibles para esta tarea son insuficientes.

Se presenta un método alternativo que calcula funciones de producción más flexibles utilizando una base mínima de datos a modo de compromiso entre los sistemas de la programación lineal y la estimación econométrica. Igualmente se exponen las propiedades de los modelos de producción calibrada de equilibrio y algunas aplicaciones iniciales.

## RESUME

L'auteur passe en revue les impératifs que doivent respecter les grilles d'analyse appliquées aux problèmes agraires et environnementaux, et constate l'insuffisance des deux méthodes empiriques conventionnelles disponibles actuellement.

Il présente une méthode alternative qui permet de calculer des fonctions de production plus flexibles en utilisant une base minimum de données comme moyen terme entre les systèmes de programmation linéaire et d'estimation économétrique. Il expose également les propriétés des modèles de production d'équilibre calibrée, ainsi que quelques applications élémentaires.

## SUMMARY

A description is given of the requirements of models used to analyse agricultural and environmental problems, and it is observed that the two conventional empirical methods employed in this task are insufficient.

An alternative method is presented that calculates more flexible production functions using a minimum data base and represents a compromise between linear programming and econometric forecasting systems. The properties of balance gauged production models and some preliminary applications are also discussed.