

CAMBIO DE USO DEL SUELO ENTRE LOS SECTORES FORESTAL, AGRÍCOLA Y PECUARIO

Ramiro Flores Xolocotzi¹ y Juan Manuel Torres Rojo²

RESUMEN

El problema de la reducción de la cubierta forestal en México por cambios en el uso del suelo hacia la agricultura y la ganadería, es abordado por medio de un modelo de control óptimo. El modelo se basa en el ajuste de funciones de producción agrícola y ganadera a partir de las cuales se estima la cubierta forestal potencial en el estado estacionario. Las funciones empleadas corresponden a cambios en la cubierta forestal potencial por estado (excepto el Distrito Federal) con dos medidas de deforestación provenientes de los tres inventarios nacionales realizados a la fecha. Para el sector agrícola se utilizaron los datos de producción de arroz, cebada, frijol, maíz, papa, sorgo, trigo y la superficie se consideró como una aproximación de los insumos agrícolas, ponderada con la producción de maíz. La producción ganadera incluyó la carne en pie de ganado bovino, ovino y caprino, además de la precipitación anual. En ambos sectores se consideraron las tasas de interés y el nivel tecnológico. La cubierta forestal disminuye ante incrementos en el nivel tecnológico y la tasa de interés, siendo muy sensible (elástica) a cambios en esta última, sobre todo en el sector ganadero. El análisis de resultados de los inventarios forestales, agropecuarios y de las simulaciones de la cubierta forestal potencial en el estado estacionario, ponen en evidencia que el factor principal de cambio del uso del suelo es la ganadería extensiva que se practica, en especial en algunos estados del sureste de México.

Palabras clave: Agricultura, cambio del uso del suelo, control óptimo, cubierta forestal potencial, deforestación, ganadería.

ABSTRACT

An optimal control model was used to analyze the problem of the deforestation and reduction of forest cover in Mexico, and the use of those areas for agriculture

Fecha de recepción: 2 de junio de 1999

Fecha de aceptación: 25 de noviembre de 2002

¹ Proyecto de Conservación y Manejo Sustentable de Recursos Forestales en México (PROCYMAF), CONAFOR. Av. Progreso No. 5 Viveros de Coyoacán. México D. F. C. P. 04110. Correo-e: escorpion302@prodigy.net.mx.

² Centro de Investigación y Docencia Económicas (CIDE). Lomas Altas de Santa Fé, México, D. F.

and pasture lands. The model is based upon functions of agriculture and production from which the forest cover potential was estimated at a steady state. These functions refer the changes in forest cover potential for every state of the country, excepting Distrito Federal. Two measurements of deforestation were used based upon data obtained from the three national forest inventories done up to the present. Production data of rice, barley, bean, maize, potatoes, sorghum and wheat were used for the agriculture sector, and the area was considered as an approach to agricultural incomes, pondered by maize production. Livestock production included cattle, sheep and goat as well as annual precipitation. Interest rates and technological level were taken into account for both sectors. Forest cover decreases when the technological level increases and interest rates change, and it is specially sensitive to the latter and particularly to the livestock production. Results analysis from the forest, agricultural and livestock inventories as well as the forest cover potential simulation at a steady state level, showed that the main factor of land use change is the extensive cattle grazing system practiced in Mexico, especially in some southeastern states of the country.

Key words: Agriculture, land use change, optimal control, potential forest cover, deforestation, cattle grassing.

INTRODUCCIÓN

La reducción de la cubierta forestal de los países en desarrollo debida al cambio en el uso del suelo para actividades agrícolas y ganaderas es uno de los problemas más preocupantes, entre otras cosas, por su relación con el calentamiento global del planeta (Barbier *et al.*, 1991; Centeno, 1997a; Centeno, 1997b; Freeman, 1997; Karl *et al.*, 1997; Kuhn, 1997; Schneider, 1997 y López *et al.*, 1998).

La conciencia sobre este problema tiene ya bastantes años. Sánchez (1987) resumía en tres puntos la problemática en el medio rural de México:

- 1) La deforestación por actividades agropecuarias expansivas y mal planificadas.
- 2) La consecuente erosión hídrica y desertificación.
- 3) La pérdida del patrimonio biológico.

Así, el avance de la frontera agrícola y ganadera, entre otras acciones humanas, ponen en peligro la existencia de muchas especies silvestres tanto vegetales como animales (Toledo, 1988; SEMARNAP, 1997); por ello es necesario determinar en qué medida esas acciones contribuyen a mantener o acrecentar este problema con el propósito de proponer soluciones integrales. Es decir, evaluar el fenómeno de la

deforestación en función de las actividades agropecuarias, ayudaría a conocer el impacto y el comportamiento futuro del fenómeno.

El objetivo fundamental del presente trabajo fue determinar el efecto de las actividades agrícolas y pecuarias sobre la cubierta forestal. El análisis se realizó con un modelo originalmente desarrollado por S. Ehui y T. Hertel (1989) mismo que ha sido modificado para incluir datos e información procedente de los sectores agrícola y ganadero, mediante el uso de datos de series de corte transversal.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo propuesto asume un planificador que maximiza la utilidad actual derivada de una serie de beneficios agregados en un horizonte infinito de planeación, sujetos a cambios en la cubierta forestal en el tiempo. Los beneficios agregados se derivan de las producciones agrícola, pecuaria y forestal; además, se consideran las tierras forestales y deforestadas como fuentes de futuros beneficios. La función objetivo se expresa como:

$$\max_{D_A, D_G, X_A, X_G} W = \int_0^{\infty} e^{-\delta t} \{U[\pi(D_A, D_G, X_A, X_G, F)]\} dt \dots\dots\dots(1)$$

Sujeto a:

$$\Pi = P_F(t) * F(t) + [L_A - F_A(t)] [P_A(t) * Z\{D_A(t), F_A(0) - F_A(t), X_A(t)\} - P_{XA} X_A(t)] + [L_G - F_G(t)] * P_G(t) Y\{D_G(t), F_G(0) - F_G(t), X_G(t), PP(t)\} - P_{XG} X_G(t) \dots\dots\dots(2)$$

$$F_A = -D_A(t) \dots\dots\dots(3)$$

$$F_G = -D_G(t)$$

$$F_A(t), F_G(t), D_A(t), D_G(t), X_A(t), X_G(t) \geq 0 \dots\dots\dots(4)$$

$$F_A(0) + F_G(0) = F(0) \dots\dots\dots(5)$$

$$L_A = L_G = \bar{L} \dots\dots\dots(6)$$

$$D_A(t) + D_G(t) = D(t) \dots\dots\dots(7)$$

En donde: W (en 1) es una medida del valor presente de los beneficios; δ es la tasa social de descuento; U es una función de beneficios doblemente diferenciable y que depende de los beneficios agregados π de la ecuación 2. Los beneficios de la ecuación 2 son la suma de ingresos netos obtenidos por actividades

forestales, agrícolas y ganaderas (para producción de carne). L_A representa el área arable total y L_G es el área total disponible para actividades ganaderas. $F(t)$ corresponde a la cubierta forestal potencial total al tiempo t ; mientras que $F_A(t)$ es el área de bosque que puede ser usada con fines agrícolas (superficie forestal potencial agrícola). Por lo que $[L_A - F_A(t)]$ es la superficie dedicada a la agricultura al tiempo t .

Para el caso de la ganadería $F_G(t)$ representa el área forestal susceptible de ser utilizada en actividades de ganadería, y $[L_G - F_G(t)]$ el área dedicada a la ganadería al tiempo t .

$Z(\cdot)$ es una función de producción cóncava para el sector agrícola; en tanto que $Y(\cdot)$ es la correspondiente para el sector ganadero. Cada una de las funciones de producción depende de insumos ($X_A(t)$ en agricultura y $X_G(t)$ en ganadería). $D(t)$ es la tasa total de deforestación, la cual puede ser por motivos agrícolas $D_A(t)$ o por ganadería $D_G(t)$. La diferencia $[F_i(0) - F_i(t)]$ es la superficie deforestada que se va incorporando a cada uno de los sectores, mientras que $PP(t)$ representa la precipitación anual en el tiempo t . Las variables P_A, P_G representan precios por unidad (kg, Ton) de la producción agrícola y ganadera en el tiempo t respectivamente. $P_F(t)$ es el ingreso por hectárea en tiempo t .

En la ecuación 2 también se considera el costo de los insumos expresado como P_{XA} en agricultura y P_{XG} en ganadería.

Funciones de producción

Se asumieron formas cuadráticas para representar la producción en los sectores agrícola y pecuario.

Sector agrícola:

$$Z(t) = \alpha_0 + \alpha_1[X_A(t)] + \alpha_2[D_A(t)] + \alpha_3[F_A(0) - F_A(t)] + \alpha_4[AT] + 1/2\alpha_{11}[X_A(t)]^2 + 1/2\alpha_{22}[D_A(t)]^2 + \alpha_{12}[D_A(t)X_A(t)] \dots \dots \dots (8)$$

Sector ganadero:

$$Y(t) = \beta_0 + \beta_1[X_G(t)] + \beta_2[D_G(t)] + \beta_3[F_G(0) - F_G(t)] + \beta_4[LT] + \beta_5[PP(t)] + \beta_6[D(y)] + 1/2\beta_{11}[X_G(t)]^2 + 1/2\beta_{22}[D_G(t)]^2 + \beta_{12}[D_G(t)X_G(t)] \dots \dots \dots (9)$$

Z y Y son dos funciones de producción para las actividades agrícolas y ganaderas respectivamente. Cada una de las funciones depende de los insumos representados por $X_A(t)$ (agricultura) y $X_G(t)$ (ganadería); los insumos para el sector agrícola se calcularon con base en la superficie dedicada a la agricultura ponderada con la producción de maíz en diferentes condiciones de riego, mientras que para el sector ganadero, los insumos necesarios para la producción de carne se integraron con la cantidad de alimento en kilogramos de materia seca aprovechable por cabeza de ganado. Ambas ecuaciones (8 y 9) incluyen el efecto diferencial de la deforestación debida a cada sector sobre la producción agrícola y ganadera; $D(t)$ representa la tasa total de deforestación tanto por la agricultura (D_A), como por la ganadería (D_G).

Las diferencias $[F_A(0)-F_A(t)]$ y $[F_G(0)-F_G(t)]$ en cada una de las funciones de producción indican la cantidad de tierra deforestada que se ha incorporado a las actividades agrícola y ganadera respectivamente, desde el punto inicial hasta el presente.

En $Y(t)$ aparece la variable PP que representa la precipitación en el tiempo t y $D(y)$ que es una variable dicotómica que permite diferenciar las observaciones en el primero y segundo período de deforestación.

El avance tecnológico es considerado al incluir en la función agrícola la variable AT , definida como el número de tractores por ha. Para el sector ganadero la variable correspondiente es LT , que representa la producción de leche en millones de metros cúbicos. Se espera que al aumentar el nivel tecnológico, la producción se incremente. Los signos de los parámetros de la variable interacción insumos-deforestación, tienen que ver con que el proceso de deforestación es análogo a la fertilización y al suministro de forraje.

Los signos esperados de los parámetros son:

α_0 y $\beta_0 \geq 0$ constituyen la asíntota.

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4, \beta_1, \beta_2, \beta_4, \beta_5 \geq 0$ indican que incrementos en estas variables (insumos, superficie deforestada y nivel tecnológico) conllevan a una mayor producción.

Las siguientes condiciones representan los rendimientos decrecientes de la producción, esto es:

$\alpha_3, \alpha_{11}, \alpha_{22}, \alpha_{12}$ y $\beta_3, \beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{12} \leq 0$

Teóricamente estos signos se justifican ya que cada función de producción debe de cumplir con varias condiciones. Así, tanto la producción agrícola, como

la ganadera muestran un incremento a medida que los insumos aumentan, bajo una disminución de la producción marginal que cualquier sistema de producción presenta. Las condiciones para estos supuestos son:

$$\frac{\partial Z}{\partial X_A(t)} > 0 \dots\dots\dots(10)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial X_A^2(t)} < 0$$

$$\frac{\partial Y}{\partial X_P(t)} > 0 \dots\dots\dots(11)$$

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial X_P^2(t)} < 0$$

Las siguientes condiciones indican que a medida que se substituyen las tierras forestales por la producción agrícola se obtienen menos rendimientos; esto se debe a que dichas adiciones son cada vez más marginales por su baja calidad ambiental para la producción agrícola y por su difícil acceso.

Sector agrícola:

$$\frac{\partial Z}{\partial D_A(t)} > 0 \dots\dots\dots(12)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial D_A^2(t)} < 0 \dots\dots\dots(13)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial [F_A(0) - F_A(t)]} < 0 \dots\dots\dots(14)$$

El modelo supone pastoreo de ganado ovino, caprino y bovino para la producción de carne. Al considerar un pastoreo desordenado y una mala administración de los pastos, se favorece que tierras de aptitud forestal lejanas y sin la infraestructura necesaria de accesibilidad sean destinadas al pastoreo, por lo que los rendimientos decrecen a medida que tierras cada vez más marginales se incorporan al sector. Estos efectos generan las siguientes condiciones en la producción ganadera:

$$\frac{\partial Y}{\partial D_G(t)} > 0 \dots\dots\dots(15)$$

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial D_G^2(t)} < 0 \dots\dots\dots(16)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial [F_G(0) - F_G(t)]} < 0 \dots\dots\dots(17)$$

Las funciones para los sectores agrícola y ganadero no son aproximaciones completas de segundo orden, debido a la falta de información suficiente y a la

necesidad de mantener una estructura sencilla en los modelos. Por lo tanto, para facilitar algunos resultados, las siguientes condiciones se asumen igual a cero:

$$\begin{aligned}
 \partial^2 Y / \partial F_G^2(t) &= 0 \\
 \partial^2 X / \partial F_A^2(t) &= 0 \\
 \partial^2 Y / \partial F_G(t) \partial X_G(t) &= 0 \\
 \partial^2 Z / \partial F_A(t) \partial X_A(t) &= 0
 \end{aligned} \dots\dots\dots(18)$$

De lo anterior se desprende que se excluyen de las funciones de producción, el termino cuadrático de la deforestación acumulada por cada sector (F_A^2 y F_G^2) y la interacción de la deforestación acumulada con los insumos.

Solución en el estado estacionario

El valor actual del hamiltoniano asociado al modelo tiene la siguiente forma:

$$\tilde{H} = W[\Pi(D_A, D_G, X_A, X_G, F)] - \lambda D_A(t) - \mu D_G(t) \dots\dots\dots(19)$$

Siendo λ y μ variables de coestado (equivalentes dinámicos de los multiplicadores de Lagrange), variables que representan el valor de las variables asociadas con el par de ecuaciones en (3).

Sí se asume la existencia de una solución interior y se considera el principio del máximo, las condiciones de optimización son:

$$\Pi_{XA} = W_{\Pi}[(L_A - F_A(t))(P_A Z_{XA} - P_{XA})] = 0 \dots\dots\dots(20)$$

$$\Pi_{XG} = W_{\Pi}[(L_G - F_G(t))(P_G Y_{XG} - P_{XG})] = 0 \dots\dots\dots(21)$$

En cuanto a la tasa de deforestación producida por la colonización agrícola y pecuaria, esta puede ser establecida de modo que la utilidad marginal de la deforestación sea igual al costo de oportunidad de los recursos forestales existentes en ese momento.

$$\Pi_{DA} = W_{\Pi}[(L_A - F_A(t))(P_A Z_{DA} - P_{XA})] = \lambda \text{ (agricultura)} \dots\dots\dots(22)$$

$$\Pi_{DG} = W_{\Pi}[(L_G - F_G(t))(P_G Y_{DG} - P_{XG})] = \mu \text{ (ganadería)} \dots\dots\dots(23)$$

De igual forma, los recursos forestales podrán ser empleados en el momento en que la utilidad marginal del capital forestal sea igual al costo social del capital. Así, las ecuaciones para las variables de coestado tanto para agricultura, como para ganadería son:

Sector agrícola:

$$-\dot{\Pi}_{FA} = \lambda - \delta\lambda = W_{\Pi} [P_{FA} + (L_A - F_A(t))(P_A Z_{FA}) - (P_A Z) + (P_A X_A)] \dots\dots\dots(24)$$

Sector ganadero (restringida solo a producción de carne):

$$-\dot{\Pi}_{FG} = \mu - \delta\mu = W_{\Pi} [P_{FG} + (L_G - F_G(t))(P_G Y_{FG}) - (P_G Y) + (P_G X_G)] \dots\dots\dots(25)$$

Donde δ es la tasa de interés con las siguientes condiciones de transversalidad:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \lambda(t) F_A(t) = 0 \dots\dots\dots(26)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\delta t} \mu(t) F_G(t) = 0 \dots\dots\dots(27)$$

La tasa neta de deforestación en el estado estacionario, es necesariamente igual a cero, $D(t)=0$ por lo tanto $D_A(t)$ y $D_G(t)$ son iguales a cero.

Así, al usar las ecuaciones anteriores, la cubierta forestal potencial en el estado estacionario se puede definir a partir de condiciones de primer orden.

Sector agrícola:

$$\frac{1}{\delta} W_{FA}(D_A, F_A, X_G, X_A) = W_{DA}(D_A, F_A, X_G X_A) \dots\dots\dots(28)$$

Sector ganadero:

$$\frac{1}{\delta} W_{FG}(D_G, F_G, X_G, X_A) = W_{DG}(D_G, F_G, X_G X_A) \dots\dots\dots(29)$$

Donde W_{FA} y W_{FG} representan los motivos de conservación y W_{DA} W_{DG} son la preferencia para deforestar proveniente de los sectores agrícola y ganadero respectivamente.

El lado izquierdo de las ecuaciones 28 y 29 son el valor presente del flujo de utilidades marginales de rentas económicamente sustentables provenientes de cada

sector, mientras que, en el lado derecho, aparece la utilidad marginal de la deforestación producida al llevarse a cabo cada actividad.

Esto significa que en el estado estacionario la utilidad marginal de una deforestación adicional, puede ser igual al valor presente de los beneficios futuros marginales de los que se abstendrá por renunciar a un uso de suelo determinado. Esto tiene relación con el costo de oportunidad, o ganancias que se dejan de obtener por una toma de decisión presente para cambio de uso de suelo.

La solución de las ecuaciones 30 y 31 permite conocer la cubierta forestal potencial en estado estacionario. Estas ecuaciones muestran la condición de equilibrio básico en la teoría de la producción.

Sector agrícola:

$$Z_{XA}(D_A, F_A, X_A) = P_{XA}/P_A \dots\dots\dots(30)$$

Sector ganadero:

$$Z_{XG}(D_G, F_G, X_G) = P_{XG}/P_G \dots\dots\dots(31)$$

Obtención de la cubierta forestal potencial en el estado estacionario.

Ehui y Hertel (1989) propusieron las ecuaciones para determinar la cubierta forestal potencial en estado estacionario, la cual está en función del cambio de uso de suelo para agricultura y ganadería.

La solución de las ecuaciones 32 y 33 permite obtener el grado óptimo de los insumos X_A^* y X_G^* .

Sector agrícola:

$$\bar{P}_{XA} = P_{XA}/P_A \Rightarrow X_A^* = \frac{\bar{P}_{XA} - \alpha_1}{\alpha_{11}} \dots\dots\dots(32)$$

Sector ganadero:

$$\bar{P}_{XG} = P_{XG}/P_G \Rightarrow X_G^* = \frac{\bar{P}_{XG} - \beta_1}{\beta_{11}} \dots\dots\dots(33)$$

En las cuales \tilde{P}_{XA} y \tilde{P}_{XG} son los costos de los insumos agrícolas y ganaderos con relación a los ingresos de la producción agrícola y ganadera respectivamente.

Suponiendo que en el estado estacionario el cambio en la cubierta forestal es cero y al resolver para F_A^* y F_P^* en las ecuaciones 34 y 37, el área de bosques que puede ser usada con fines agrícolas o ganaderos se calcula de la siguiente manera:

Sector agrícola:

$$F_A^* = F_A(0) + \frac{\Delta}{\Omega} + \frac{(\Omega - \alpha_3) * A}{\Omega} \dots\dots\dots(34)$$

Donde:

$$\Delta = \alpha_0 + \alpha_1 X_A^* + \frac{1}{2} \alpha_{11} X_A^* + \alpha_4 AT + \alpha_5 PF - \bar{P}_{XA} X_A^* - \bar{P}_{FA} \dots\dots\dots(35)$$

$$\Omega = \gamma(\alpha_2 + \alpha_{12} X_A^*) + 2\alpha_3$$

\bar{P}_{FA} son los ingresos por hectárea de actividades forestales en correspondencia con el precio de la producción agrícola P_F/P_{XA} y $A = L_A - F_A(0) \dots\dots\dots(36)$

Sector ganadero:

$$F_G^* = F_G(0) + \frac{\Gamma}{\Theta} + \frac{(\Theta - \beta_3) * B}{\Theta} \dots\dots\dots(37)$$

Donde:

$$\Gamma = \beta_0 + \beta_1 X_G^* + \frac{1}{2} \beta_{11} X_G^* + \beta_4 LT + \beta_5 PF - \bar{P}_{XG} X_G^* - \bar{P}_{FG} \dots\dots\dots(38)$$

$$\Theta = \gamma(\beta_2 + \beta_{12} X_G^*) + 2\beta_3$$

\bar{P}_{FG} son los ingresos por ha de actividades forestales en correspondencia con el precio de la producción ganadera P_F/P_{XG} y $B = L_G - F_G(0) \dots\dots\dots(39)$

Recopilación de información

Para el ajuste de los modelos se consideraron dos medidas de deforestación obtenidas a partir de la diferencia de la cubierta forestal en el ámbito estatal

(excepto el Distrito Federal) entre las mediciones de los tres inventarios forestales existentes a la fecha (SARH, 1992; 1994a). La información de precios y valores de la producción se obtuvo de los Anuarios Estadísticos de la Producción Forestal (SARH, 1994b; SAGAR, 1995a).

Del sector agrícola se recopiló información correspondiente a la producción de arroz, cebada, frijol, maíz, papa, sorgo y trigo. Los datos de nivel tecnológico, precios, rendimiento, producción y superficie de los cultivos seleccionados, se obtuvieron de los Anuarios Estadísticos de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos de los años 1980 y 1994 (SARH, 1980; SAGAR, 1995b).

La superficie dedicada a la agricultura fue utilizada como una aproximación de los insumos agrícolas; esta superficie se ponderó con la producción de maíz obtenida para cada uno de los estados. Considerando que tal superficie podría ser bajo riego o sin riego, se obtuvo la siguiente variable:

$$X_A = \frac{y_i * L_i + y_n * L_n}{y_n}$$

En donde y representa la producción de maíz en cada tipo de superficie (i : irrigada, n : no irrigada) y L la cantidad de superficie agrícola en cada condición de riego.

La producción agregada de los cultivos agrícolas seleccionados y de la producción de carne en pie se estimó como la media geométrica de los siguientes índices:

$$I_{90} = \frac{\sum_j p_{jtk} q_{jtk}}{\max_k [\sum_j p_{j90k} q_{j90k}]}$$

$$I_{94} = \frac{\sum_j p_{jtk} q_{jtk}}{\max_k [\sum_j p_{j94k} q_{j94k}]}$$

En donde I_{90} e I_{94} son índices cuantitativos de precios indexados a 1990 y 1994 respectivamente. Los valores p_{jtk} y q_{jtk} corresponden al precio y la cantidad del bien jtk en el tiempo t (indexado de acuerdo al año base definido por el índice

en 1990 o 1994) y producido en el estado k . El índice de producción fue entonces estimado como:

$$I = \sqrt{I_{90} * I_{94}}$$

La función de producción agregada por estado para el sector ganadero incluyó solo producción de carne en pie de ganado bovino, ovino y caprino. Los datos de los inventarios de cabezas de ganado, producción, rendimiento y precios de carne en pie, así como de la producción de leche fueron tomados de SARH (1994c) y SAGAR (1996).

Para estimar la cantidad de forraje producido por la superficie ganadera se usó información de productividad y de los coeficientes de agostadero (SAGAR 1998); el valor de forraje por cabeza de ganado se estimó como precio real por tonelada (Guerra, 1995).

La precipitación anual fue considerada otro insumo importante en la función de producción de ganadería y se obtuvo de la base de datos publicada por Quintas (1996).

Ajuste de los modelos a la base de datos

Las funciones de producción tanto agrícola como ganadera se graficaron para observar su comportamiento ante diferentes niveles de insumos aplicados y verificar la disminución de los rendimientos.

Para ajustar las funciones de producción agrícola y ganadera a la base de datos se normalizaron los índices de producción mediante una transformación Box-Cox y posteriormente se utilizó el método de mínimos cuadrados de regresión lineal, por el procedimiento *regression* del paquete SAS (*Statistical Analysis System*) versión 6.03. El supuesto de no autocorrelación espacial de los residuales se confirmó con la prueba D de Durbin-Watson.

Obtención de la cubierta forestal potencial en el estado estacionario y simulación.

Al emplear los parámetros de las ecuaciones ajustadas se obtuvo la cubierta forestal potencial para cada sector y se evaluaron en el siguiente orden: ingresos y costos, niveles óptimos de insumos y la solución final en el estado estacionario.

Los ingresos anuales promedio de producción agrícola (P_A) y ganadera (P_G) se calcularon como valores reales promedio de la producción anual por tonelada. Los ingresos anuales por actividades forestales (P_F) se consideraron como el valor anual real promedio de todas las especies maderables por hectárea.

Los precios de los insumos en el caso del sector agrícola fueron obtenidos de inventarios como precios reales promedio de fertilizante por tonelada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelos ajustados

El ajuste de los modelos proporcionó los siguientes resultados:

a) Sector agrícola:

$$Z(t) = 2.2961 + 0.001896X_A(t) + 0.0263D_A(t) - 0.0032[F_A(0)-F_A(t)] +$$

(7.288) (2.584) (1.027) (-2.133)

$$1.30075AT(t) - 0.363X_A^2(t) - 0.000237D_A^2(t) -$$

(3.361) (-0.830) (-2.330))

$$0.01737X_A(t)*D_A(t)$$

(-0.897)

$$Fc=13.59 \quad R^2=0.662 \quad DW=1.967 \quad n=62$$

b) Sector ganadero:

$$Y(t) = 0.800263 + 0.001462X_L(t) - 0.007364D_L(t) +$$

(2.685) (5.032) (-2.325)

$$0.000354[F_L(0)-F_L(t)] + 1.7962LT(t) - 0.2581X_L^2(t) +$$

(-1.789) (4.679) (-3.638)

$$6.8341D_L^2(t) + 0.97648X_L(t)*D_L(t) + 0.000461PP -$$

(1.701) (1.953) (2.259)

$$0.5732D(y)$$

(-2.821)

$$Fc=14.732 \quad R^2=0.7682 \quad DW=1.914 \quad n=62$$

En ambas ecuaciones los números entre paréntesis muestran los valores de t para cada parámetro estimado.

Para la función agrícola se obtuvieron todos los signos esperados para todos los parámetros estimados. Sin embargo, la deforestación (D_A) y los insumos al cuadrado no son estadísticamente significativos. El nivel de significancia para D_A^2 confirma que la deforestación aumenta la producción agrícola a una tasa decreciente; por otra parte, el bajo nivel de significancia para X_A^2 sugiere que la función de producción agrícola no es cóncava. No obstante, este resultado puede deberse tanto a los intervalos de valores usados para ajustar el modelo, como a la forma en que los insumos son estimados.

La función de producción del sector ganadero muestra algunos parámetros con signos diferentes a lo esperado. Tal es el caso de los valores de D_G y D_G^2 , lo que indica que la función de producción en el intervalo considerado por los datos es convexa con respecto a la deforestación, *i.e.*, a medida que la deforestación se incrementa la producción aumenta a una tasa creciente. De acuerdo con este comportamiento, el parámetro [$F_G(0) - F_G(t)$] es positivo, lo que significa que la superficie que se va incorporando al sector ganadero no es marginal y conlleva a un incremento mayor de la producción en este sector.

Simulación

Con base en los resultados del ajuste de las funciones de producción, se estimaron las existencias forestales potenciales agrícola y ganadera en el estado estacionario definidas como F^* , mediante la suma de la cubierta potencial de todos los estados. Tal valor se calculó duplicando y cuadruplicando precios de la producción agrícola (Cuadro 1) y ganadera (Cuadro 2) con diferentes tasas de interés.

Bajo todas las condiciones anteriores, los valores de los cuadros 1 y 2 representan la sumatoria de la cubierta forestal estatal en el ámbito nacional. Los resultados muestran que los incrementos en la tasa de interés ejercen un mayor efecto en el cambio de uso de suelo al sector ganadero que al agrícola. Esto probablemente es debido al hecho de que la producción ganadera genera ingresos más altos que la producción agrícola por unidad de superficie, especialmente en tierras forestales, las cuales son marginales para el sector agrícola, pero no para la ganadería.

El efecto de los precios es diferente. Se observa que un incremento en el precio agrícola induce una mayor reducción en la cubierta forestal potencial, que el mismo incremento proporcional de precio en el sector ganadero. Este

Cuadro 1. Cambios en la cubierta forestal potencial agrícola con tasas diferentes de interés.

Tasa de interés (γ)	Cubierta forestal potencial agrícola (F_A^*) en miles de ha		
	P_A Precios originales	$2P_A$	$4P_A$
0.03	15080.132	14153.9998	11812.3216
0.05	12920.4475	10663.8107	3186.9745
0.07	9877.9857	4774.975	-25772.7836
0.09	5272.2308	-7286.4608	-
0.11	-2519.229	-46063.9709	-

$2P_A$: precio duplicado de la producción agrícola

$4P_A$: precio cuadruplicado de la producción agrícola

Cuadro 2. Cambios en la cubierta forestal potencial ganadera con diferentes tasas de interés.

Tasa de interés (γ)	Cubierta forestal potencial ganadera (F_G^*) en miles de ha		
	P_G Precios originales	$2P_G$	$4P_G$
0.03	53565.921	53564.315	53561.101
0.04	38714.727	38712.834	38709.048
0.05	17426.557	17424.255	17419.65
0.06	-15641.449	-15644.388	-15650.266
0.07	-74006.858	-74010.92	-74019.044

$2P_G$: precio duplicado de la producción ganadera

$4P_G$: precio cuadruplicado de la producción ganadera

resultado puede explicarse por el hecho de que al ser la ganadería una actividad extensiva, un incremento en el precio puede interpretarse como un efecto a corto plazo sin cambiar la superficie dedicada a tal actividad, mientras que para la agricultura, por ser una actividad anual y más intensiva que la ganadera, el cambio en los precios tiene un impacto mayor.

La implicación política de estos resultados muestra que un programa de incentivos en el sector agrícola es probable que produzca mayor deforestación que un programa de incentivos en el sector ganadero. La estabilización de precios reales disminuirá los motivos que conllevan al cambio de uso de suelo.

En las mismas condiciones se realizó la simulación con la variación de los precios de la producción forestal (Cuadro 3); se observó que la cubierta forestal en ambos sectores fue poco sensible a tales cambios y presentó incrementos casi imperceptibles.

Por último, se simuló la cubierta forestal variando el nivel tecnológico en ambos sectores. Los cuadros 4 y 5 muestran el efecto de la tecnología en el cambio de uso de suelo; tales variaciones no tienen mayor efecto sobre la cubierta forestal potencial. Este resultado confirma que al incrementar la productividad agrícola y ganadera es posible reducir la deforestación inducida por causas de mercado. Finalmente todos los cuadros indican que las condiciones actuales de la cubierta forestal actual pueden conservarse a tasas de interés que van de 3.4 - 4 %. Condiciones de mercado con tasas de interés por arriba de 5.5 % conducen a la deforestación.

La información presentada en los cuadros 1, 2 y 3 ratifica el supuesto de que la deforestación en México al igual que en algunos otros países tropicales latinoamericanos se debe, principalmente, a cambios en el uso del suelo de forestal a ganadero. Esta suposición ha sido documentada en trabajos como los de Toledo (1988), Villafuerte *et al.* (1993) y Cairns *et al.* (1995).

Hay evidencia del auge extensivo del sector ganadero a expensas del cambio de uso del suelo forestal; para Villafuerte *et al.* (1993) este auge no es resultado de un proceso de tecnificación de las explotaciones, sino más bien de la ampliación de las áreas ganaderas bajo el incentivo de varios factores, tales como: marco jurídico, políticas agrarias de fomento ganadero (como aquellas que refuerzan a la gran propiedad); también hay que incluir las perspectivas favorables del mercado junto con créditos abundantes a bajas tasas de interés y buenos precios relativos. Cabe señalar que muchos de estos incentivos se han mantenido hasta años recientes.

Cuadro 3. Cambios en la cubierta forestal potencial agrícola y ganadera como respuesta a diferentes precios de la producción forestal y tasas de interés.

Tasa de interés (γ)	F_A/P_F	F_G/P_F	$(F_G+F_A)/P_F$	$F_A/2P_F$	$F_G/2P_F$	$(F_G+F_A)/2P_F$	$F_A/4P_F$	$F_G/4P_F$
0.03	15080.13	53565.92	68646.05	15080.14	53566.72	68646.87	15080.17	53567.11
0.05	12920.44	17426.55	30347.00	12920.46	17427.70	30348.17	12920.50	17428.23
0.07	9877.98	-74006.85	-64128.87	9878.01	-74004.82	-64126.81	9878.05	-74004.02

F_A : cubierta forestal potencial agrícola

F_G : cubierta potencial ganadera

P_F : precio de la producción forestal

$2P_F$: precio duplicado de la producción forestal

$4P_F$: precio cuadruplicado de la producción forestal

Cuadro 4. Cambios en la cubierta forestal potencial agrícola en diferentes niveles tecnológicos

Tasa de interés (γ)	Cubierta forestal potencial agrícola (F_A^*) en miles de ha		
	F_A Valores originales	2AT	4AT
0.03	15080.132	15077.8221	15073.2024
0.05	12920.4475	12917.7468	12912.3454
0.07	9877.9857	9874.735	9868.2335
0.09	5272.2308	5268.1486	5259.9842
0.11	-2519.229	-2524.7157	-2535.6872

2AT: nivel tecnológico en el sector agrícola duplicado

4AT: nivel tecnológico en el sector agrícola cuadruplicado

Cuadro 5. Cambios en la cubierta forestal potencial ganadera en respuesta a diferentes niveles tecnológicos

Tasa de interés (γ)	Cubierta forestal potencial ganadera (F_G^*) en miles de ha		
	F_G Valores originales	2LT	4LT
0.03	53565.921	53554.403	53548.651
0.04	38714.727	38701.147	38694.37
0.05	17426.557	17410.018	17401.773
0.06	-15641.449	-15662.598	-15673.045

2LT: nivel tecnológico en el sector ganadero duplicado

4LT: nivel tecnológico en el sector ganadero cuadruplicado

CONCLUSIONES

Los incrementos en las tasas de interés y en los precios del sector agrícola y ganadero disminuyen el motivo de conservación de la cubierta forestal potencial y aumentan los beneficios provenientes del cambio de uso del suelo, con la consecuente disminución de la cubierta forestal.

La superficie forestal potencial incorporada al sector ganadero permanece altamente productiva, al menos en el intervalo de tiempo analizado; por el contrario en el sector agrícola la superficie incorporada es marginal. Esto ocasiona que el sector ganadero favorezca más el cambio de uso de suelo.

Los incrementos en el valor de los productos forestales maderables no tienen mayor efecto en disminuir la deforestación, por lo que otras actividades y usos como la recreación y el aprovechamiento de productos forestales no maderables que pudieran aumentar el valor por hectárea, tienen menor posibilidad de disminuir el cambio del uso del suelo al agrícola y ganadero.

REFERENCIAS

- Barbier, E. B., J. Burguess and A. Markandya. 1991. The economics of tropical deforestation. *Ambio* 20 (2): 55-58
- Cairns, A., R. Dirzo y F. Zadroga. 1995. Forests of Mexico. *Journal of Forestry* 93 (7): 21-24
- Centeno, J. C. 1997a. Caen los bosques en Venezuela. <http://www.ciens.ula.ve/~jcenteno>
- Centeno, J. C. 1997b. El efecto invernadero. <http://www.ciens.ula.ve/~centeno>
- Ehui, S. and T. Hertel. 1989. Deforestation and agricultural productivity of the Côte d'Ivoire. *American Journal of Agricultural Economics* 71 (3): 703-711.
- Freeman, M. 1997. Defeat the Kyoto Protocol. *21st Century Science & Technology* 10 (4): 84-85.
- Guerra de la Cruz, V. 1995. Determinación del nivel óptimo de producción combinada de madera y forraje en rodales de *Pinus montezumae* Lamb. Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México 82 p.
- Karl, T., N. Nichols and J. Gregory. 1997. The coming climate. *Scientific American* 276 (5): 56-59.
- Kuhn, G. 1997. The impact of volcanic eruptions on worldwide weather. *21st Century Science & Technology* 10 (4): 48-58.

- López, M., N. Rosenber, D. Legler, A. Ruiz, R. Shrinivasan, R. Brown, G. García, M. Velásquez y C. Izaurralde. 1998. Algunos efectos del fenómeno climático "El Niño" en la agricultura mexicana. *Ciencia y Desarrollo*. 25 (139): 5-13.
- Quintas, L. 1996. Extractor rápido de información climatológica (ERIC): Manual del usuario. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Colección Proyectos IMTA. 56 p.
- SAGAR. 1995a. Anuario estadístico de la producción forestal 1994. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Subsecretaría de Planeación. México D. F. 200 p.
- SAGAR. 1995b. Anuario estadístico de la producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos 1994. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Subsecretaría de Planeación. México. 698 p.
- SAGAR. 1998. Programa de praderas y agostaderos 1995-2000. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Subsecretaría de Agricultura y Ganadería. Comisión Técnica Consultiva de Coeficientes de Agostaderos. México D. F. 100 p.
- SARH. 1980. Anuario Estadístico de la Producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Dirección General de Economía Agrícola. México, D.F. 287p.
- SARH. 1992. Inventario Nacional Forestal de Gran Visión. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subsecretaría Forestal. México, D.F. 53 p.
- SARH. 1994a. Inventario Nacional Forestal Periódico. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subsecretaría Forestal. Subsecretaría de Planeación. México, D. F. 81 p.
- SARH. 1994b. Compendio estadístico de la producción forestal 1994. Secretaría de Agricultura y Recursos hidráulicos. Subsecretaría de Planeación. México D. F. 210 p.
- SARH. 1994c. Compendio estadístico de la producción pecuaria de los Estados Unidos Mexicanos 1989-1993. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subsecretaría de Planeación. México D. F. 158 p.
- SEMARNAP. 1997. Programa de conservación de la vida silvestre y diversificación productiva en el sector rural. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca. Instituto Nacional de Ecología. México, D. F. 207 p.
- Schneider, D. 1997. The rising seas. *Scientific American* 276 (3): 96-101.
- Toledo, V. M. 1988. La diversidad biológica de México. *Ciencia y Desarrollo* 81: 17-30
- Villafuerte S. D., M. García y S. Meza. 1993. Deforestación en el trópico mexicano y sus expresiones en el estado de Chiapas. Proyecto realizado por convenio CINVESTAV-PROAFT (SARH). CINVESTAV. México, D.F. 85 p.