



Munich Personal RePEc Archive

# **Aplicando un modelo bio-económico de control óptimo a la producción de carbón vegetal: el caso de las comunidades agrícolas de roza-tumba-quema en México**

Arrocha, Fernando and Villena, Mauricio G.

Departamento de Economía, Universidad de Concepción, Chile.,  
Escuela de Negocios, Universidad Adolfo Ibáñez, Chile.

15 January 2011

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/36361/>

MPRA Paper No. 36361, posted 02 Feb 2012 19:14 UTC

1     **Applying a Bio-Economic Optimal Control Model to Charcoal Production: The**  
2                     **Case of Slash and Burn Agriculture in Mexico**

3  
4                                     by

5  
6                     **Fernando Arrocha<sup>†</sup> & Mauricio G. Villena<sup>‡</sup>**

7  
8  
9     <sup>†</sup> Departamento de Economía, Universidad de Concepción, Chile. Casilla (Box) 1987,  
10  Concepción, Chile. E-mail: [farrocha@udec.cl](mailto:farrocha@udec.cl).

11  
12  <sup>‡</sup> Escuela de Negocios, Universidad Adolfo Ibáñez, Chile. Avenida Diagonal las Torres  
13  2640, Peñalolén. Santiago, Chile. E-mail: [mauricio.villena@uai.cl](mailto:mauricio.villena@uai.cl).

14  
15  
16  
17                                     **This version: February 2012**

18  
19     **Abstract**

20  
21     This paper analyzes the relationship between rural poverty and forest land management in  
22     the context of charcoal production under slash and burn. An optimal control model  
23     determines how a representative household makes decisions on the allocation of forest  
24     areas to work and use them to affect the renewable resource base on which it depends. The  
25     proposed optimal control model for charcoal production is built upon the agricultural model  
26     of slash and burn by Pascual and Barbier (2007). This theoretical model is calibrated with  
27     data from the community of Chunkanán, Campeche, Mexico. The simulation and  
28     comparison of the traditional forestry slash and burn management with the Forest  
29     Management Program for the Exploitation of Timber Resources (FMETR), proposed by the  
30     regulatory authority as a policy of use and conservation of forest resources, showed that the  
31     former is indeed sustainable from an ecological point of view and efficient from an  
32     economic point of view, implying that households allocate an optimal amount of work and  
33     forest biomass.

34  
35     **Key words:** Forest Management, Rural Poverty, Charcoal Production, Rural Households.

1 **Aplicando un Modelo Bio-Económico de Control Óptimo a la Producción de**  
2 **Carbón Vegetal: El Caso de las Comunidades Agrícolas de Roza-Tumba-Quema**  
3 **en México**

4  
5 Por

6  
7 **Fernando Arrocha<sup>†</sup> & Mauricio G. Villena<sup>‡</sup>**  
8

9  
10 <sup>†</sup> Departamento de Economía, Universidad de Concepción, Chile. Casilla (Box) 1987,  
11 Concepción, Chile. E-mail: [farrocha@udec.cl](mailto:farrocha@udec.cl).

12  
13 <sup>‡</sup> Escuela de Negocios, Universidad Adolfo Ibáñez, Chile. Avenida Diagonal las Torres  
14 2640, Peñalolén. Santiago, Chile. E-mail: [mauricio.villena@uai.cl](mailto:mauricio.villena@uai.cl).

15  
16 **Resumen**

17  
18 Este trabajo analiza las relaciones entre pobreza rural y el manejo de las tierras forestales en  
19 el contexto de la producción de carbón vegetal bajo roza-tumba-quema. Un modelo de  
20 control óptimo determina cómo un hogar representativo toma decisiones sobre la  
21 asignación de trabajo y superficies forestales a utilizar, mismas que afectan la base de este  
22 recurso renovable del cual depende. El modelo de control óptimo propuesto para la  
23 producción de carbón vegetal, está basado en el modelo agrícola de roza-tumba-quema de  
24 Pascual and Barbier (2007). Este modelo teórico es calibrado con datos de la comunidad de  
25 Chunkanán, Campeche, México. La simulación y comparación del manejo forestal  
26 tradicional de roza-tumba-quema con respecto al programa de manejo forestal para el  
27 aprovechamiento de los recursos forestales maderables (PMFARMF) propuesto como  
28 política de uso y conservación del recurso forestal por la autoridad regulatoria, demostró  
29 que el primero es sostenible desde el punto de vista ecológico y eficiente desde el punto de  
30 vista económico, donde los hogares asignan una cantidad óptima de trabajo y biomasa  
31 forestal.

32  
33 **Palabra clave:** Manejo forestal, Pobreza Rural, Producción de Carbón Vegetal, Hogares  
34 Rurales.

## 1 **Introducción**

2

3 Las políticas de conservación de los recursos naturales se han concentrado en la elaboración y  
4 aplicación de planes de manejo y conservación en superficies forestales que albergan una gran  
5 cantidad de flora y fauna, los cuales contribuyen con servicios ambientales clave que mantienen un  
6 equilibrio ecológico local, regional y mundial.

7

8 En este contexto, la elaboración de los planes de manejo y conservación de los recursos forestales  
9 requiere de la utilización de métodos de análisis que permitan mejorar el entendimiento sobre los  
10 incentivos económicos y sociales que llevan a los seres humanos a propiciar un manejo, uso y  
11 conservación óptimo del recurso natural.

12

13 En particular en Latinoamérica, la subsistencia de diversas comunidades indígenas depende  
14 principalmente del uso de recursos forestales. Típicamente estas comunidades realizan un manejo  
15 forestal basado en la propiedad colectiva de la tierra, utilizando los factores trabajo, tierra y recurso  
16 forestal como insumos productivos para asegurar su estabilidad económica, social y ambiental.  
17 Específicamente, en México en la zona aledaña al Área Natural Protegida Reserva de la Biosfera de  
18 Los Petenes (ANPRBLP), las economías locales se encuentran diversificadas en actividades de  
19 producción agrícola, pecuaria, forestales, actividades de traspasío, artesanías y trabajo asalariado  
20 dentro y fuera de las localidades (Arrocha, 2007). El recurso forestal es particularmente importante  
21 para mantener los niveles de ingresos y bienestar para los hogares a nivel local.

22

23 En este sentido, los esfuerzos de los tomadores de decisión y hacedores de política pública en el  
24 ámbito de manejo y conservación de los recursos naturales, han dirigido sus esfuerzos en crear  
25 programas de manejo forestal comunitarios con la idea de mejorar el manejo, uso y conservación  
26 del recurso forestal, además de aumentar producción e ingresos monetarios de los hogares  
27 agrícolas-forestales. Actualmente, la producción de carbón vegetal se realiza bajo un sistema de  
28 *roza-tumba-quema* en pequeños parches que son utilizados posteriormente para la producción  
29 agrícola. La estrategia de tala implica un corte selectivo de especies forestales de la región como  
30 son: Ja'abin (*Piscidia Piscicula*), Chukum (*Pithecellobium Albicans*), Ts'its'ilche' (*Gymnopodium*  
31 *Floribundum*), Tsalam (*Lysiloma Latisiliquum*) y Katsin (*Acacia Gaumeri*), dejando troncos de 30  
32 cm de alto, para su posterior regeneración. La producción de carbón vegetal se realiza mediante el  
33 uso de hornos artesanales contruidos con la leña cortada y acomodada en pirámide, sellándolos con  
34 tierra y zacate.

1 La propuesta sugerida por el programa de manejo forestal para el aprovechamiento de los recursos  
2 forestales maderables (PMFARMF) considera cambios importantes en la forma de manejo forestal  
3 comunitario. Específicamente el PMFARMF sugiere lo siguiente: (i) determinar un sólo polígono  
4 para la explotación forestal comunitaria, (ii) realizar cortes de las especies forestales de la región  
5 con clareo de superficies productivas, (iii) reforestar con estas mismas especies, (iv) determinar una  
6 zona de producción de carbón vegetal dentro del polígono y por último, (v) sugiere una rotación de  
7 15 a 20 años de los lotes productivos. Ver tabla 1.

8  
9 **[INSERT TABLE 1 ABOUT HERE]**  
10

11 El presente estudio tiene como principal objetivo evaluar los efectos de la aplicación del  
12 PMFARMF en relación al uso de la biomasa y cantidad de trabajo forestal a través de un modelo  
13 bio-económico de control óptimo para la producción de carbón vegetal. En particular, los resultados  
14 del modelo bio-económico de control óptimo de la aplicación del PMFARMF se comparan con los  
15 resultados obtenidos con el modelo considerando el manejo forestal tradicional actual. Lo anterior,  
16 con el objeto de contrastar la hipótesis de trabajo que propone que el manejo forestal tradicional  
17 basado en *roza-tumba-quema* es eficiente en el largo plazo, y no así la aplicación del PMFARMF,  
18 en términos de la cantidad asignada de trabajo forestal y de los niveles de uso de la biomasa forestal  
19 utilizados por los hogares productores de carbón vegetal.

20  
21 La política forestal del Estado de Campeche, tiene como objetivo utilizar el tipo de manejo basado  
22 en polígonos de explotación forestal con la finalidad de mejorar el uso y conservación de las  
23 superficies forestales y aumentar la productividad de los hogares agrícolas-forestales. En la última  
24 década se ha financiado de manera importante la elaboración de planes de manejo forestal  
25 comunitarios con las características de manejo de plantaciones forestales bajo polígonos de  
26 explotación. De acuerdo a los resultados de este trabajo, se puede inferir que esta política es  
27 ineficiente en términos bio-económicos y que por tanto su aplicación debe ser revisada y  
28 reformulada tomando en cuenta los incentivos económicos generados, de forma de propiciar un  
29 manejo, uso y conservación óptimo del recurso natural.

## 30 **Materiales y Métodos**

31  
32  
33 *El modelo dinámico de control óptimo de Pascual y Barbier.* El trabajo de Pascual y Barbier (2007)  
34 formula un modelo teórico para analizar el uso de tierras forestales típicamente utilizadas para la

1 agricultura en las comunidades rurales de México, proponiendo además una metodología para  
2 calibrar el modelo con datos reales (ver también Pascual y Martínez-Espiñeira, 2006). Utilizando la  
3 conceptualización teórica de Pascual y Barbier (2007), en el presente trabajo se propone un modelo  
4 teórico de producción de carbón vegetal, el cual es la base para la calibración empírica realizada.

5  
6 Las modificaciones específicas al modelo original de Pascual y Barbier son las siguientes: a) La  
7 adecuación conceptual del parámetro biomasa forestal, denotado por  $Q(t)$ , que se define como la  
8 cantidad de leña extraída en una superficie determinada, considerando la densidad de especies  
9 forestales que son costadas. b) La función de utilidad que se define como función agregada del  
10 gasto en bienes de consumo que satisfacen las necesidades primarias, a partir de los ingresos  
11 monetarios totales del hogar. c) La restricción presupuestaria que depende de los ingresos  
12 monetarios derivados de la producción de carbón vegetal más los ingresos por otras actividades  
13 productivas y transferencias (familias y gobierno). d) La función de producción que depende de la  
14 cantidad de superficie forestal cortada, de la cantidad de trabajo utilizada en la producción de  
15 carbón vegetal y de la cantidad de biomasa utilizada.

16  
17 Estos cambios permiten realizar la evaluación bio-económica del manejo forestal tradicional y de la  
18 aplicación del PMFARMF, formalizándose a través de un modelo autónomo dinámico usando un  
19 escenario de largo plazo y tasas de descuento positivas que maximizan el valor de la función de  
20 utilidad sujeta a las restricciones de producción, presupuesto y cantidad de biomasa utilizada de los  
21 hogares productores de carbón vegetal.

22  
23 *El modelo dinámico de control óptimo para la producción de carbón vegetal bajo un sistema de*  
24 *roza-tumba-quema.* La función de utilidad del hogar productor representativo se asume como una  
25 función agregada del gasto en bienes de consumo que satisfacen las necesidades primarias, a partir  
26 de los ingresos monetarios totales del hogar ( $m$ ). La función de utilidad directa se define como  
27  $U = U(m)$ , la cual se asume continua  $U'(m) > 0$ , doblemente diferenciable, no decreciente y  
28 cóncava  $U''(m) < 0$ . El tiempo de ocio no se encuentra incluido en la función de utilidad de los  
29 hogares, dado que se considera como predeterminado en cada ciclo productivo y con una tasa de  
30 descuento  $r$  positiva.

31  
32 La producción anual de carbón vegetal  $CH_i(t)$  está determinada por el sistema de roza-tumba-  
33 quema y la tecnología utilizada de producción artesanal. Aquí la producción del  $i$ -ésimo hogar  
34 productor en un periodo ( $t$ ) está determinada por la cantidad de superficie forestal que es utilizada

1 en la producción,  $g Li/bi$ , la cantidad de trabajo usado en la producción de carbón distinta al  
 2 corte de biomasa,  $(1-g) Li(t)$ , esto es, la cantidad de trabajo para la construcción, cuidado y  
 3 apagado del horno de carbón tradicional, así como el envasado del carbón vegetal y por último, en  
 4 la cantidad de biomasa existente en la superficie a explotar forestalmente,  $Qi(t)$ . Formalmente se  
 5 tiene:

$$6 \quad CH_i(t) = f_i [g Li/bi, (1-g) Li(t), Qi(t)] \quad (1)$$

8  
 9 Específicamente, la producción es función de la superficie que se utiliza para producir carbón  
 10 vegetal  $g Li/bi$ , término que se encuentra integrado a su vez, por el total de trabajo destinado a la  
 11 producción de carbón vegetal,  $Li$ , la proporción de trabajo asignado al corte o clareo de la tierra  
 12 forestal,  $g$ , y la medida de intensidad de la limpieza o corte de la tierra,  $bi$  (por ejemplo: cantidad  
 13 de horas en cortar una hectárea de superficie para la producción de carbón vegetal). El segundo  
 14 argumento de la ecuación  $(1-g) Li(t)$  representa la cantidad de trabajo realizado para la  
 15 producción de carbón vegetal, que depende del trabajo productivo de otras tareas distintas al clareo  
 16 o corte de la vegetación secundaria. Por último, el tercer término de la función de producción está  
 17 determinado por la cantidad total de biomasa utilizada en la producción anual,  $Qi(t)$ , donde la  
 18 cantidad de biomasa puede ser modelada como un recurso renovable debido a que el manejo  
 19 forestal tradicional realizado por los productores permite la recuperación por intervalos de tiempo  
 20 (8 a 12 años) por rotación de tierras. La recuperación del recurso forestal depende principalmente de  
 21 la composición de especies maderables que se dejan en barbecho o descanso.

22  
 23 La restricción presupuestaria con que cuentan los hogares productores de carbón vegetal se define  
 24 por la cantidad producida, los ingresos derivados de una actividad distinta a la producción de carbón  
 25 vegetal y las transferencia monetarias:

$$26 \quad m_i = CH_i(t) + c [T_i - L_i(t)] + E_i \quad (2)$$

28  
 29 La función de presupuesto indica que el ingreso anual de un hogar productor está determinado por  
 30 la cantidad producida  $CH_i(t)$  más el ingreso asalariado obtenido dentro y fuera de la comunidad,  
 31  $c [T_i - L_i(t)]$ , donde  $c$  es la tasa de salario real ( $w/p$ ),  $T$  es el trabajo discrecional diversificado  
 32 dentro y fuera del sector productivo,  $Li(t)$  es el trabajo total empleado en el sistema productivo, y

1 más el ingreso real exógeno que incluye las transferencias entre hogares, gobierno u otros ingresos,  
2  $E(t)$ . Se asume además que las derivadas parciales de la función de producción  
3 satisfacen:  $f_j \geq 0$ ,  $f_{jj} \leq 0$  y  $f_{jk} = f_{kj} \geq 0$  para  $k \neq j$ . Donde  $i$  identifica a los hogares y  $j$  los  
4 argumentos de la función de producción de carbón vegetal.

5

6 *Dinámica de la biomasa forestal.* La dinámica de la biomasa forestal es fundamental en el análisis,  
7 dado que los hogares productores de carbón vegetal requieren de la utilización de tierras forestales  
8 para obtener este insumo base para la producción. Estas superficies se mantienen en descanso o  
9 barbecho como parte fundamental del sistema de manejo forestal tradicional utilizado en la roza-  
10 tumba-quema.

11

12 La acumulación de biomasa viene dada por la tasa de crecimiento intrínseca de ecosistemas  
13 forestales, la recuperación de superficies perturbadas (quemadas) y las superficies agrícolas  
14 (recuperadas forestalmente) en rotación que son introducidas a la producción (Lucio, 2006), siendo  
15  $Q(t)$  la cantidad de biomasa existente en tierras con cobertura vegetal de especies adecuadas para  
16 esta actividad productiva.

17

18 Específicamente, la cantidad de biomasa promedio anual está determinada por el índice de biomasa  
19 forestal, el cuál considera el peso relativo  $\rho$  de especies de árboles utilizados en el carbón vegetal,  
20 por el promedio de biomasa forestal existente en la superficie utilizada,  $X(t)$ , como lo muestra la  
21 siguiente ecuación:

22

$$23 \quad Q(t) = \rho X(t) \quad (3)$$

24

25 Donde la cantidad de biomasa forestal sobre el terreno viene dada por:

26

$$27 \quad X(t) = \frac{(Vg(t) - \underline{Vg})}{(\overline{Vg} - \underline{Vg})} \quad (4)$$

28

29 Donde  $\underline{Vg}$  y  $\overline{Vg}$  son respectivamente los pesos mínimos y máximos de las especies arbóreas y  
30  $Vg(t)$  es el peso total del stock de biomasa dentro de una superficie determinada.

31

1 Suponiendo que en la superficie seleccionada por el productor no se encuentren las especies de  
2 árboles específicos utilizados en la producción de carbón vegetal, se tendría que  $\underline{Vg} = 0$  y que  
3  $0 \leq X(t) = \frac{Vg(t)}{Vg} \leq 1$ . Además  $\rho$ , el peso relativo adjunto al índice de cantidad de biomasa  
4 forestal, tomaría un valor de 1 dado que está relacionado con la biomasa forestal.

5  
6 La función stock de biomasa forestal  $Vg(t)$  está determinada por el parámetro  $\lambda$ , que no varía a  
7 través del tiempo, y de la variable  $W_0$ , que representa el promedio de biomasa existente en la  
8 superficie productiva utilizada:

9  
10 
$$Vg(t) = \lambda \ln[W_0] \quad (4a)$$

11  
12 La cantidad total de biomasa utilizada por la comunidad está determinada por el parámetro  
13  $\lambda = \rho \overline{Vg(t)}$ , que es el porcentaje máximo de biomasa utilizable para la producción de carbón  
14 vegetal, multiplicado por el logaritmo (ln) del promedio de biomasa forestal existente en la  
15 superficie,  $W_0$ .

16  
17 De aquí se tiene que la biomasa forestal existente en las tierras en barbecho o descanso que  
18 cambian de un periodo a otro viene dada por:  $Q(t) = \frac{\dot{W}_0}{W_0}$ , donde  $\dot{W}_0$  es la cantidad de biomasa  
19 utilizada de un periodo o ciclo productivo a otro (considerando un ciclo productivo de un año  
20 cronológico), y por la cantidad de biomasa existente en las superficies en descanso o barbecho,  $W_0$ .

21  
22 Esta ecuación muestra que si los hogares productores permiten el barbecho de la tierra forestal para  
23 un periodo más largo de tiempo, se tendría un incremento de la biomasa existente en la superficie.  
24 Bajo el manejo tradicional comunitario se asume que la biomasa sobre el terreno forestal depende  
25 del total restante de tierra en barbecho disponible en la comunidad en su conjunto (López, 1997).

26  
27 Entonces, la cantidad de tierra en barbecho aprovechada para la producción de carbón vegetal solo  
28 estará determinada por el total de los hogares productores,  $n$ , de la comunidad que introducen la  
29 tierra en descanso o barbecho al sistema productivo de carbón vegetal  $\dot{W}_0$ , donde este

1 aprovechamiento forestal está determinado por los parámetros  $a_i = b_i / g_i$ , que representan la  
 2 intensidad de producción de carbón vegetal por unidad de área (hectárea) que un hogar realiza bajo  
 3 manejo forestal tradicional, misma que está integrada por la intensidad en trabajo de corta  
 4 (promedio de horas por corte de una hectárea)  $b_i$  y por el porcentaje de trabajo de corte de biomasa  
 5 para la producción  $g_i$ ; el término del numerador  $L_i$  representa el total de horas de trabajo dedicado  
 6 a la corta de leña y por último, el parámetro  $A$  denota el área total de tierra en barbecho y  
 7 productiva bajo el control de la comunidad. El parámetro  $k$  mide el aumento o disminución de la  
 8 utilización de tierras por tipo de manejo forestal (tradicional  $k = 1$  y PMFARMF  $k \neq 1$ ) sobre el  
 9 equilibrio en el manejo de la biomasa forestal.

$$10 \quad \dot{WO} = \gamma - \frac{k \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{a_i}}{A} WO \quad (5)$$

11 La ecuación 5 muestra que la tasa de crecimiento de la biomasa forestal sobre la superficie de tierra  
 12 está determinada por la constante de crecimiento intrínseco de vegetación secundaria,  $\gamma$  (Ibíd.),  
 13 menos la depreciación del stock de biomasa explotada forestalmente por el hogar productor dado  
 14 por el tipo manejo forestal.

15  
 16 Ahora, asumiendo que todos los hogares productores de carbón son idénticos tenemos que la  
 17 biomasa forestal existente en la comunidad bajo un acceso comunal cambia de un periodo a otro,  
 18 como sigue:

$$19 \quad \dot{Q} = \lambda \left( \gamma e^{-q} - k \Theta \frac{L_i}{a_i} \right) \quad (6)$$

20 La ecuación 6 muestra que la cantidad de biomasa forestal está en función de los cambios en la  
 21 tasa de crecimiento natural intrínseca,  $\gamma e^{-q}$ , de la vegetación secundaria y especies forestales  
 22 (considerando una depreciación del capital natural  $e^{-q}$ ) menos  $\Theta \equiv \frac{n}{A}$  que es la cantidad de

23 hogares ( $n$ ) que están usando las superficies ( $A$ ) dentro del ejido, por la intensidad de trabajo  $\frac{L_i}{a_i}$  en  
 24 la producción y el tipo de manejo forestal  $k$  utilizado para la producción de carbón vegetal.

25  
 26 *La asignación óptima de cantidad de trabajo y biomasa forestal realizada por los hogares*  
 27 *productores de carbón vegetal.* El problema del hogar productor de carbón vegetal, se establece de

1 manera formal como un modelo dinámico autónomo, considerando un escenario de largo plazo y  
 2 asumiendo una tasa de descuento positiva  $r$ .

3  
 4 De aquí se tiene que el problema del hogar es escoger cuánto trabajo se asigna a la producción de  
 5 carbón vegetal restringido por la función de producción, ingreso productivo y tiempo, que  
 6 maximice el bienestar de los hogares productores sobre un horizonte de tiempo. Considerando un  
 7 horizonte de tiempo infinito, el problema es continuo en el tiempo y se puede expresar de la  
 8 siguiente forma:

$$9 \quad V^* = \max_L \int_{t_0}^{t \rightarrow \infty} e^{-rt} U[m(t)] dt \quad (7)$$

10 Con el supuesto de las restricciones en las ecuaciones de la función de producción, restricción  
 11 presupuestaria y la cantidad de biomasa utilizada por el hogar representativo, esto es, las  
 12 ecuaciones (1), (2) y (6), se obtiene el siguiente Hamiltoniano de valor presente:

$$13 \quad \bar{H}[Q(t), L(t), \mu(t)] = U[m(t)] + \mu(t)\lambda \left[ \gamma e^{-q} - \Theta k \frac{L}{a} \right] \quad (8)$$

14 Donde la función objetivo es maximizar la función de utilidad del hogar productor sujeto a una  
 15 restricción presupuestaria ( $m$ ) que está determinada principalmente por la función de producción,  
 16 teniendo como variable de control el trabajo, la variable de estado la biomasa forestal y la variable  
 17 de co estado,  $\mu(t)$ , la cual representa el valor sombra de la cantidad de biomasa utilizada en un  
 18 periodo  $t$ .

19  
 20 Por aproximación, usando tiempo continuo y asumiendo una solución interior, se aplica el  
 21 *Principio del Máximo*, además de considerar un estado estacionario para las variables de control,  
 22 estado y co estado:  $\dot{L} = \dot{Q} = \dot{\mu} = 0$ .

23  
 24 Asumiendo las condiciones de primer orden para un sendero óptimo con las condiciones de límite y  
 25 transversalidad se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$26 \quad U'(m) \left[ \frac{f_1}{a} + (1+g)f_2 - c \right] = \frac{\mu k \Theta \lambda}{a} \quad (9a)$$

$$28 \quad \frac{\dot{\mu}}{\mu} + \frac{U'(m)f_3}{\mu} = r + \gamma e^{-q} \quad (9b)$$

1 
$$\dot{Q} = \lambda \left[ \gamma e^{(-q)} - \frac{k\Theta L}{a} \right] \quad (9c)$$

2 
$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mu(t) Q(t) = 0 \quad (9d)$$

3 
$$Q(0) = Q_0 \quad (9e)$$

4

5 La ecuación condicionante (9a) indica que los hogares usan trabajo forestal hasta que consiguen  
 6 utilidad por la tierra forestal adicional que introducen a su sistema productivo y utilizan el tiempo  
 7 restante en actividades distintas a la producción de carbón vegetal como su costo de oportunidad de  
 8 asignación de trabajo. El otro costo, consiste en el valor marginal del salario real más el valor de la  
 9 depreciación de biomasa forestal en la que incurren, mismas que les significa una disminución del  
 10 valor del capital natural comunitario, debido a las superficies introducidas a la producción.

11

12 La ecuación (9b) se conoce como la *regla de asignación óptima* para mantener la cantidad de  
 13 biomasa forestal. La no ganancia de utilidad puede lograrse por el cambio de la cantidad de biomasa  
 14 cuando la tasa de retorno marginal actual es igual a los costos. Esto incluye la tasa de descuento  $r$   
 15 como valor económico de la biomasa, más el costo adicional por esperar el crecimiento de la  
 16 biomasa forestal  $\gamma/W_0$ . La participación sobre los retornos de la cantidad de biomasa forestal

17 involucra una apreciación actual sobre este valor,  $\frac{\dot{\mu}}{\mu}$  más el incremento de la utilidad adicional por

18 la cantidad de biomasa forestal por la producción actual de carbón vegetal  $\frac{U'(m)f_3}{\mu}$ .

19

20 La ecuación de estado (9c) describe la evolución que sigue la biomasa forestal que es influida por el  
 21 parámetro  $k$ , que implica un aumento o disminución de la cantidad promedio de superficie que  
 22 utilizan anualmente los hogares de la comunidad.

23

24 Por último, la ecuación (9d) asegura que los hogares optimicen la cantidad de biomasa al final del  
 25 tiempo, donde los retornos de la biomasa forestal tienden a cero y en el periodo del tiempo se  
 26 aproximan a infinito.

27

28 En definitiva, el parámetro de manejo forestal  $k$  impacta de manera directa en la cantidad de  
 29 biomasa forestal que es utilizada por lo hogares, pero estará limitada por el costo del trabajo forestal  
 30 y los retornos del recurso forestal (biomasa) existente.

1 Lo anterior, condiciona que los hogares productores de carbón vegetal tienen que decidir entre dos  
 2 alternativas, la primera es hacer uso inmediato de la cantidad de biomasa como insumo en la  
 3 producción o dejar a estas tierras forestales en barbecho sin utilizar para acumular una mayor  
 4 cantidad de biomasa en el futuro.

5

6 Resolvemos considerando los valores conocidos de  $\dot{L} = \dot{Q} = \dot{\mu} = 0$  donde se obtienen los valores  
 7 de un estado estacionario de largo plazo como se indica a continuación:

$$8 \quad \dot{L} = 0: \quad \lambda \Theta k f_Q = a(r+i)(f_L - c) \quad (10)$$

$$9 \quad \dot{Q} = 0: \quad \gamma \exp(-q) = k \Theta \frac{L^*}{a} \quad (11)$$

$$10 \quad \dot{\mu} = 0: \quad \mu^* = \frac{U'(m) f_3}{r+i} \quad (12)$$

11 Donde  $f_1/a + (1-g)f_2 \equiv f_1/a + (1-g)f_2$  representa el producto marginal de la cantidad de  
 12 biomasa utilizada y la cantidad de trabajo aplicada a la producción de carbón vegetal, en la cual  $f_1$   
 13 es el producto marginal asociado al primer argumento de la función de producción, es decir el área  
 14 cortada y  $f_2$  es el producto marginal asociado al trabajo forestal distinto a la corta.

15

16 Dadas estas relaciones se puede formular un sistema de dos ecuaciones en  $(Q, L)$ . Representando  
 17 los valores de estado estacionario con un asterisco, el valor sombra de la biomasa forestal a largo  
 18 plazo es:

$$19 \quad \mu^* = \frac{U'(m) f_3}{r+i} \quad (13)$$

20 Sustituyendo (13) en (9a) se obtiene una función del equilibrio de largo plazo del hogar  
 21 representativo. Sustituyendo  $\dot{Q} = 0$  y  $\dot{\mu}$  derivamos la igualdad de (9a) y (9b), y obtenemos que el  
 22 sendero óptimo para el trabajo forestal  $L$  viene dado por:

$$23 \quad \dot{L} = \frac{\lambda \Theta k f_Q - (r - e^{-q^*}) a f_L}{\theta a (f_L - c)^2 - f_{LL}} \quad (14)$$

24 Donde  $\theta$  es la elasticidad marginal de la producción de carbón vegetal y medida de concavidad  
 25 global de la función de utilidad (Pascual y Barbier, 2007).

26

1 *Análisis estático comparativo del efecto del manejo forestal sobre la asignación de trabajo y*  
 2 *biomasa forestal del modelo propuesto.* La cantidad de trabajo y biomasa forestal óptima a largo  
 3 plazo para los productores de carbón vegetal es sensible a los cambios de los parámetros del  
 4 modelo. Para nuestro análisis consideramos que la cantidad de biomasa utilizada para el sistema  
 5 productivo es influida por el parámetro  $k$  de manejo forestal que representa la presión sobre el  
 6 recurso.

7

8 La propuesta del PMFARMF sugiere realizar un manejo forestal más intensivo, agregando una  
 9 mayor cantidad de trabajo y uso de biomasa para promover mayores niveles de producción para los  
 10 hogares productores, así como regular el acceso a la zona de explotación forestal, dado por el  
 11 polígono de explotación comunitaria.

12

13 Siguiendo la lógica del modelo para la producción de carbón vegetal, se contempla que el trabajo y  
 14 biomasa forestal de equilibrio están en función a la cantidad de hogares que se encuentran en el  
 15 sistema productivo, así como por la utilidad marginal del trabajo y costo marginal por la unidad de  
 16 superficie forestal introducido a la producción.

17

18 Considerando las ecuaciones de equilibrio del modelo se tiene que:

19 
$$\dot{L} = 0: \quad \lambda \Theta k f_Q = a(r+i)(f_L - c) \quad (15)$$

20 
$$\dot{Q} = 0: \quad \gamma \exp(-q) = k \Theta \frac{L^*}{a} \quad (16)$$

21 
$$\dot{\mu} = 0: \quad \mu^* = \frac{U'(m) f_3}{r+i} \quad (17)$$

22 Según esta especificación, el comportamiento de los hogares productores de carbón vegetal con  
 23 respecto al manejo de la biomasa forestal puede explicarse de la siguiente forma. Si los hogares  
 24 explotan sus selvas bajas caducifolias y sub caducifolias, con altos niveles de biomasa,  $Q_0 > Q^*$ ,  
 25 éstos podrían asignar un mayor tiempo a las actividades forestales. Sin embargo, una mayor  
 26 cantidad de trabajo forestal dedicada a la corta resultaría en una declinación de la biomasa existente  
 27  $\dot{Q} < 0$ . Consistente con un sendero estable, tendríamos que a lo largo de este periodo la cantidad de  
 28 biomasa y trabajo en actividades forestales podrían regenerarse en el equilibrio.

29

1 Por otro lado, si los hogares inicialmente tienen acceso a tierras forestales con baja biomasa de las  
2 especies maderables para la producción de carbón, es decir  $Q_0 < Q^*$ , entonces el hogar debe asignar  
3 menos tiempo a las actividades forestales. Dependiendo de la baja densidad de especies forestales  
4 utilizadas en la producción de carbón vegetal, los hogares disminuirían el uso de tierras forestales  
5 para la producción, debido a las cantidades marginales de biomasa, y esto repercutiría en un  
6 aumento de los niveles de cobertura forestal de la comunidad.

7  
8 El proceso de manejo forestal productivo está determinado por el promedio de trabajo aplicado en  
9 la producción y la escala social de extracción de biomasa forestal que describe el grado de presión  
10 sobre las tierras forestales, representada por la tasa de área-población  $\Theta$ . Lo anterior, se da de  
11 manera endógena a la comunidad, considerando la internalización de los costos sociales de la  
12 disminución de la biomasa forestal y por ende, la disminución de las superficies en barbecho o  
13 descanso que están bajo el manejo comunitario.

14  
15 Ahora procedemos a analizar los efectos que tendría sobre las decisiones de los hogares la  
16 aplicación del PMFARMF. En el presente modelo, el manejo forestal (uso de la superficie forestal  
17 para la producción) está representado por el parámetro  $k$ , donde se asume que para un manejo  
18 tradicional de roza-tumba-quema el valor de  $k$  es igual 1; por otro lado un manejo de tierras  
19 forestales consistente con el PMFARMF, el parámetro  $k$  tomaría un valor distinto a 1. Esto debido a  
20 que el uso productivo de tierras forestales se encuentra en función al promedio de aumento del

21 esfuerzo de corta, dado por  $k\Theta \frac{L^*}{a}$ . Aquí se considera que el aumento de la producción propuesta  
22 en el PMFARMF se logra cuando los hogares productores ajustan sus factores de producción  
23 (superficie utilizada, trabajo forestal y cantidad de biomasa) sin cambiar la tecnología de  
24 producción artesanal de hornos de carbón vegetal y con el sistema de la roza-tumba-quema.

25  
26 Ahora, podemos estimar cuánto trabajo forestal puede realizar el hogar y a qué cantidad de  
27 biomasa forestal están condicionados los hogares, asumiendo la internalización de los costos  
28 sociales del uso de tierras forestales en descanso o reposo. Esto lo analizamos a través de la  
29 aproximación del aumento de la presión de los hogares sobre las tierras forestales a largo plazo,  
30 utilizando el parámetro  $k$  en el nivel óptimo de  $L^*$  y  $Q^*$ .

31  
32

1 **Proposición 1.** La condición necesaria para obtener un equilibrio único en el manejo forestal  $k$ ,  
 2 viene dada por:

$$3 \quad a(f_{LL} - c) \geq F, \text{ donde } F = \left[ \frac{(r+i)f_Q - \lambda\Theta / f_{QQ}}{i} + \frac{f_Q}{L^*/a} \right] > 0 \quad (18)$$

4 Esta implica que la tasa de retorno del trabajo forestal es mayor o igual al costo marginal de  
 5 utilizar la biomasa forestal en el presente y no mantenerla para el siguiente periodo.

6

7 **Demostración:** Derivando la función de trabajo forestal con respecto al parámetro de manejo  
 8 forestal  $k$  se obtiene lo siguiente:  $\frac{\delta L^*}{\delta k} = L^* \Theta$  donde  $L^* \Theta \geq 0$ , sujeto a que:  $\frac{\delta L^*}{\delta k} \geq 0$ .

9 Resolviendo se obtiene:  $L^* \Theta \geq 0$  y  $\Theta \geq 0$ . De aquí se cumple la desigualdad:  $a(f_{LL} - c) \geq F$ ,

$$10 \quad \text{donde } F = \left[ \frac{(r+i)f_Q - \lambda\Theta / f_{QQ}}{i} + \frac{f_Q}{L^*/a} \right] > 0 \text{ Q.E.D.}$$

11

12 La ecuación 18, muestra que en equilibrio el trabajo forestal para el hogar productor representativo  
 13 se incrementaría con el manejo forestal hasta cuando la tasa de retorno marginal de trabajo forestal,  
 14  $a(f_{LL} - c)$ , sea mayor o igual que el costo de explotación de la cantidad de biomasa introducida al  
 15 sistema productivo del carbón vegetal.

16

17 La valoración del costo marginal para los hogares incluye las externalidades recíprocas sobre el  
 18 resto de la comunidad, las cuales son completamente internalizadas. De este modo, si los hogares no  
 19 están sujetos a condición (9a), entonces es posible que los hogares apliquen menos trabajo forestal  
 20 bajo un aumento de la densidad de productores.

21

22 **Proposición 2.** El manejo forestal óptimo se encuentra cuando la superficie total utilizada por los  
 23 productores es mayor o igual al umbral de disminución social de biomasa forestal, esto es:

$$24 \quad \Theta \geq \Omega, \text{ donde } \Omega = \frac{(r+i)}{\lambda} \left( \frac{f_{LL}}{f_{LQ} - f_Q/L} \right) \quad (19)$$

25 **Demostración:** El efecto que tendría el manejo forestal sobre la cantidad de biomasa forestal  
 26 utilizada se obtiene al derivar la ecuación de biomasa forestal,  $Q^* = Q^*(k\Theta)$ , con respecto al

1 parámetro  $k$ , i.e.  $\frac{\delta Q^*}{\delta k} \leq 0$  sujeto a  $Q^* \cdot \Theta \leq 0$ . De aquí se tiene que:  $Q^* \cdot \Theta \leq 0$  con  $\Theta \geq 0$ .

2 Por lo tanto,  $\Theta \geq \Omega$  con  $\Theta \geq 0$ , donde:  $\Theta \geq \max(\Omega, 0)$  con  $\Omega$  positivo. De aquí se demuestra  
3 que  $\Theta \geq \Omega$  y que se cumple con la desigualdad inicial. **Q.E.D.**

4

5 Esto indica, que el aumento de la producción que los hogares están dispuestos a realizar se  
6 encuentra en función del umbral de biomasa que el hogar espera disminuir de su dotación total,  
7 siendo conscientes de ello y asumiendo los costos completamente. Este es un factor importante que  
8 determina el valor de variación del parámetro  $k$  de manejo forestal.

9

10 Para la función de producción de carbón vegetal se asumen lo siguiente:  $f_{LL} < 0$ ,  $f_{LQ} > 0$  y  
11  $f_Q > 0$ , de aquí se tiene que:

$$12 \quad L^* > \frac{f_L}{f_{LQ}} \Rightarrow \frac{\delta Q^*}{\delta k} < 0 \quad (20)$$

$$13 \quad \varepsilon_L > \sigma_{LQ} \Rightarrow \frac{\delta Q^*}{\delta k} < 0 \quad (21)$$

14 Donde  $\varepsilon_L$  es la elasticidad producto del  $L^*$  y  $\sigma_{LQ}$  es la elasticidad sustitución entre el nivel óptimo  
15 de  $L^*$  y  $Q^*$ , lo cual refleja que el manejo forestal toma en cuenta el nivel de tecnología empleado en  
16 la producción de carbón vegetal.

17

18 De esto, se desprende que el manejo forestal ejerce una presión sobre el recurso forestal cuando la  
19 elasticidad producto del trabajo sobrepasa la elasticidad de sustitución entre el trabajo y cantidad de  
20 biomasa utilizada, una vez que los insumos se asignaron de manera óptima. El aumento de la  
21 cantidad de trabajo y biomasa dentro del sistema de manejo forestal, se rige en función de que la  
22 tasa de retorno marginal de trabajo forestal,  $a(f_{LL} - c)$  sea mayor que el costo de explotación de la  
23 cantidad de biomasa introducida al sistema productivo de carbón vegetal.

24

25 *Aplicación del estudio de caso para Campeche*

26

27 *Área del estudio.* La comunidad de Chunkanán se encuentra ubicada dentro del Municipio de  
28 Hecelchakán, Campeche y en las cercanías con la zona de amortiguamiento del Área Natural  
29 Protegida Reserva de la Biosfera Los Petenes, cuenta con un total de 168 hogares y una población

1 de 871 personas (INEGI,2005). Este núcleo urbano, se encuentra asentado dentro de una superficie  
2 de 5,015 hectáreas de tierra de propiedad de uso colectivo, con un total de 86 ejidatarios o personas  
3 con derechos de explotación de la tierra. Los hogares productores de carbón vegetal fueron 45 para  
4 el año 2007, lo que representó cerca del 27% del total de los hogares de la comunidad.

5  
6 *Diseño del instrumento.* Por las características de información requerida para obtener los  
7 parámetros necesarios del modelo de control óptimo, fue necesario realizar una encuesta a cada uno  
8 de los 45 jefes de hogares productores de carbón vegetal, durante el 2007, donde se consideraron  
9 aspectos demográficos, económicos, sociales, ambientales y productivos. Siguiendo la metodología  
10 para la construcción de matrices de contabilidad social para pueblos (Yunez, A. and Taylor, E.,  
11 1999)

12  
13 En términos de las variables demográficas se obtuvo información sobre individuos en el hogar,  
14 edad, escolaridad y relación con el jefe. La sección económica las preguntas se centraron en las  
15 principales actividades que realizan los hogares como producción de carbón vegetal, trabajo  
16 asalariado dentro y fuera de la comunidad, subsidios (programas productivos y de asistencia) y  
17 remesas. La parte social se centró en indagar los diferentes apoyos que reciben de los servicios de  
18 salud, agua potable, alumbrado público y carreteras o caminos. Y por último, la parte ambiental se  
19 realizaron preguntas sobre el uso del recurso forestal, el promedio de biomasa utilizada como  
20 insumo a la producción de carbón vegetal y las especies forestales más comunes existentes en la  
21 comunidad.

22  
23 *Estimación de los parámetros.* Con los datos obtenidos de los hogares se estimaron el ingreso anual  
24 de los hogares a partir de los ingresos derivados de la producción de carbón vegetal, ingresos por  
25 actividad asalariada dentro y fuera de la comunidad (migración), otros ingresos (subsidios,  
26 transferencias, etc.).

27  
28 Se obtuvo también por hogar la cantidad promedio producida de carbón vegetal (CH), trabajo total  
29 L (hrs/hombre anual), porcentaje de trabajo dedicado a la corta (g), horas promedio para cortar una  
30 hectárea (b), total de hectáreas en producción (L/a), porcentaje relativo del uso total de biomasa  
31 (Q%), precio promedio de venta al intermediario (P), se construyó las líneas de pobreza con el  
32 índice de FGT (ver Foster, Greer and Thorbecke, 1984).

1 El parámetro de tasa de crecimiento natural de la biomasa ( $y$ ) fue obtenido del PMFARMF, el  
2 parámetro densidad de población fue estimado con datos de la superficie total del ejido ( $A$ )  
3 brindada por la autoridad de la comunidad, el número de hogares ( $n$ ) se obtuvo del II conteo de  
4 población y vivienda 2005 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). El salario  
5 mínimo fue obtenido de la Secretaria de Administración Tributaria (SAT). Por último, el parámetro  
6  $k$  fue construido con el promedio de superficie que se utiliza con el manejo tradicional y con las  
7 superficies forestales propuesta a introducir a la producción de carbón vegetal anual por el  
8 programa de manejo forestal para el aprovechamiento de los recursos forestales maderables  
9 (PMFARMF)

10  
11 *Consideraciones para la calibración del modelo empírico.* Para realizar la simulación y comparar el  
12 manejo forestal tradicional actual y el del PMFARMF, se asume que los hogares reaccionan a la  
13 política de manejo forestal ajustando su nivel de esfuerzo sobre la superficie forestal propuesta, es  
14 decir, ajustarán la variable trabajo  $L(t)$  para alcanzar las superficies programadas, siendo el  
15 parámetro  $k$ , el que registre la variación en el manejo forestal. Los parámetros soportan las  
16 restricciones del modelo, considerando la tasa de retorno marginal del trabajo forestal mayor o  
17 igual al costo de oportunidad de utilizar la biomasa en el periodo  $t$  que en  $t+1$ . Además se ajusta la  
18 superficie total utilizada por los hogares al nivel establecido como el umbral aceptable de  
19 utilización de biomasa forestal internalizando completamente todos los costos sociales.

20  
21 Otro aspecto importante para efectuar la simulación y comparación del manejo tradicional actual  
22 con el del PMFARMF, fue la obtención de un promedio de las superficies productivas anualmente,  
23 dado que dicho programa de manejo no considera promedios estables, sino que entrega superficies  
24 que varían de mayores a menores cantidades año a año y por un total de 5 periodos. El promedio  
25 anual que se obtuvo fue de  $k=1.59$  y para el manejo tradicional  $k=1$ , donde se considera la  
26 superficie 64.35 hectáreas promedio que se utiliza anualmente por el total de productores de carbón  
27 vegetal. Con el objeto de observar los efectos sobre la cantidad de biomasa forestal utilizada,  
28 trabajo invertido y producción de carbón vegetal obtenido por tipo de manejo forestal se realiza la  
29 simulación del modelo bio-económico de control óptimo en un horizonte de planeación de 35 años.  
30 Ver tabla 2.

31  
32 **[INSERT TABLE 2 ABOUT HERE]**  
33

1 *Calibración del modelo.* Para el análisis del modelo se utilizó el programa *Vensim DSS 5*, el cual  
2 realiza la construcción del diagrama de flujo que permite el ingreso de los parámetros estimados y  
3 los periodos de inicio y termino para determinar los senderos de expansión óptimos para cada uno  
4 de los manejo forestales. Ver figura 1.

5  
6 **[INSERT FIGURE 1 ABOUT HERE]**  
7

8 Como se observa en la Figura 1, la presión social sobre las superficies forestales en la comunidad,  
9 está relacionada con el parámetro de manejo forestal  $k$ , el número total de hogares productores de  
10 carbón vegetal ( $n$ ), la dotación total de tierras de la comunidad ( $A$ ) y el promedio de superficies  
11 utilizadas. Dicha presión social impacta el cambio (variación) de la biomasa forestal en cada ciclo  
12 productivo.

13  
14 La variación de la biomasa en cada ciclo, asociado al promedio de biomasa existente en las  
15 superficies y al índice de densidad arbórea impacta de manera efectiva a la utilización de biomasa  
16 total existente en la comunidad.

17  
18 A su vez, la utilización de biomasa forestal, la función de producción (con la técnica de hornos  
19 artesanales) y la cantidad de trabajo forestal aplicado en la producción, repercuten en el nivel de  
20 producción de los hogares. Donde el nivel de producción se ve afectado por el precio de venta del  
21 productor (establecido de manera exógena) fijado por los intermediarios comerciales, lo que  
22 determina el valor de la producción.

23  
24 El ingreso productivo se integra con los ingresos monetarios obtenidos del trabajo asalariado fuera  
25 de esta actividad dentro y fuera de la comunidad, así como por las transferencias recibidas  
26 (subsidios y apoyos productivos del gobierno). Donde este conjunto de ingresos forman parte del  
27 ingreso total del hogar, el cual integra el presupuesto de los hogares y que influye de manera directa  
28 en la función de la utilidad del hogar.

29  
30 Siguiendo esta lógica de flujo, el programa *Vensim DSS 5* entrega una solución al modelo bio-  
31 económico de control óptimo.

## 1 **Resultados y Discusión**

2

3 El análisis de los resultados indica que los hogares productores presentan una situación de pobreza.  
4 Los hogares con pobreza extrema, pobreza ajustada y no pobres (índice F-G-T), percibieron  
5 ingresos totales per cápita al mes de US\$40.51, US 65.33 y US\$93.80 lo que equivale a ingresos de  
6 1.35, 2.17 y 3.12 dólares per cápita diarios, respectivamente.

7

8 La producción de carbón vegetal para estos hogares sólo representa el 33% del total de ingresos, el  
9 trabajo asalariado 46% y otros ingresos 21%, que en su conjunto les permiten a las familias  
10 satisfacer sus necesidades básicas de alimentación.

11

12 Estimando un modelo linealizado de la función de producción tipo Coob-Douglas (García et al,  
13 2007) se obtuvieron los siguientes valores de los parámetros, donde  $\alpha = -0.8180$ ; los coeficientes  
14  $\beta_1 = 0.559$ ,  $\beta_2 = 0.482$  y  $\beta_3 = -0.206$ . La tecnología de producción artesanal muestra  
15 rendimientos decrecientes de la producción (0.835). Así el nivel de producción de los hogares se  
16 estableció con la siguiente ecuación:

17

$$18 \quad CH_i = 6.158 * (L/a)_i^{.559} * ((1-g)L)_i^{.482} * (Q_0)_i^{-.206} \quad (22)$$

19

20 *Resultados del modelo con manejo forestal tradicional* Los cálculos realizados para obtener los  
21 parámetros del modelo con manejo forestal tradicional arrojaron que el hogar productor  
22 representativo tuvo una producción promedio anual,  $CH_i$ , de 10.10 toneladas, trabajo forestal de  
23 994 (horas/año), el porcentaje de trabajo en el corte de biomasa,  $g$ , de 0.32, un promedio de

24 266.60 (horas/ha.) para el corte de árboles, la superficie utilizada promedio anual por hogar,  $\frac{L_i}{a_i}$ , de

25 1.43 hectáreas, la biomasa forestal promedio utilizada por hectáreas de 13.16 toneladas, una tasa de  
26 crecimiento intrínseca de la superficie comunitaria,  $\gamma$ , de 15%, la tasa de utilización de biomasa  
27 forestal de los hogares productores,  $Q(t)$ , del 4.5%, un precio promedio por kilogramo de carbón  
28 de \$1.20, una dotación total horas de trabajo del hogar productor de 1,749, así como un ingreso  
29 promedio anual de \$36,638, derivado de los ingresos por producción de carbón vegetal de \$12,124,  
30 ingresos por trabajo fuera del sector forestal \$19,167.80 y otros ingresos de \$5,346.09. Estos datos  
31 se consideran como la línea base para la simulación dinámica.

32

1 Si se pretende consolidar la producción de carbón vegetal como una actividad productiva principal  
2 para los hogares productores de la comunidad de Chunkanán y éstos deciden aumentar los esfuerzos  
3 para producir a mayor escala se tendría el siguiente panorama. Si los productores mantienen el  
4 manejo forestal tradicional actual de roza-tumba-quema con rotación de las tierras. El resultado en  
5 un periodo de 5 años sería que la cantidad de horas invertida de trabajo forestal se fijaría en 1,892  
6 horas/anuales, la utilización de biomasa aumentaría de 4.5 a 7.5%; la producción ascendería a  
7 11.89 toneladas y el ingreso a \$14,270 pesos, aumentando la superficie explotada por hogar de 1.44  
8 a 2.34 hectáreas anuales, ver tabla 3.

9  
10 **[INSERT TABLE 3 ABOUT HERE]**

11  
12 Es importante mencionar que este incremento de las superficies a introducir a la producción de  
13 carbón vegetal se verá determinada porque la tasa de retorno marginal del trabajo forestal sea mayor  
14 al costo de oportunidad de la biomasa utilizada en la producción. Además de la función de  
15 producción que muestra rendimientos decrecientes, dado por la tecnología de hornos artesanales de  
16 producción de carbón vegetal, ver figura 2.

17  
18 **[INSERT FIGURE 2 ABOUT HERE]**

19  
20 *Resultados del modelo con el PMFARMF.* Si se aplica este programa de manejo forestal, la  
21 actividad del corte de árboles se realiza utilizando una mayor tecnificación (uso popular de moto  
22 sierras), lo que representa una disminución de las horas de trabajo forestal; donde al término del  
23 periodo de aplicación de este programa (5 años) se contaría con una cantidad invertida de horas de  
24 trabajo forestal de 1,189 horas/anuales, una utilización de biomasa de 7.76 %, la producción  
25 ascendería a 10.90 toneladas y el ingreso a \$13,080 pesos, que en el primer año se utilizarían 2.14  
26 hectáreas y en último año sería de 2.42 hectáreas anuales por hogar.

27  
28 **[INSERT FIGURE 3 ABOUT HERE]**

29  
30 *Resultados comparativos del manejo forestal tradicional y del PMFARMF.* La comparación de los  
31 niveles de utilización de biomasa y la cantidad producida para el manejo forestal tradicional y el del  
32 PMFARMF, da como resultado que el manejo tradicional mantiene una dinámica de utilización de  
33 biomasa creciente con respecto a la tasa de crecimiento intrínseca de biomasa que se igualarían en

1 el año 18, con un porcentaje de utilización del 15.31%; punto en el cual tendría un nivel de  
2 producción de 15.96 toneladas equivalente a un ingreso aproximado de \$19,152 pesos, ver tabla 4.

3  
4 **[INSERT TABLE 4 ABOUT HERE]**

5  
6 Con el PMFARMF el punto de partida de manejo forestal de  $k=1.59$  que equivale a un promedio de  
7 102.23 hectáreas de superficie total utilizada por los productores, situación que impacta sobre la  
8 sostenibilidad ecológica, debido a que alcanza a igualar la tasa de crecimiento intrínseca en un  
9 periodo más corto (16 años), con un porcentaje de utilización de biomasa de 14.94%, un nivel de  
10 producción 12.31 toneladas que equivale a \$14,772 pesos. El cambio de utilización de superficie se  
11 inicia el año uno con 2.14 y llega a 3.40 hectáreas por hogar en el año 16, lo que indica una  
12 presión mayor sobre el recurso forestal.

13  
14 A su vez, el aumento de la utilización de biomasa forestal en los primeros ciclos productivos  
15 propuesto por el PMFARMF impacta en las ecuaciones de  $Q(t)$ , la asignación de trabajo forestal y  
16 superficies utilizadas, factores que ponen en riesgo los ingresos futuros de los hogares, debido a que  
17 disminuye los niveles de producción y promueve la pérdida de calidad del suelo (por el corte  
18 completo de los árboles), en el corto, mediano y largo plazo comparado el comportamiento del  
19 manejo tradicional en la comunidad.

20  
21 En conclusión, se puede señalar que de la comparación entre las dos alternativas de manejo forestal  
22 (tradicional y con el PMFARMF) queda patente que los hogares asignan una cantidad óptima de  
23 trabajo forestal, cuando la tasa de retorno marginal del trabajo forestal es mayor o igual al costo de  
24 oportunidad de usar biomasa en el periodo actual ( $t$ ) que el siguiente periodo ( $t+1$ ), mismo que está  
25 en función a la posibilidad de reutilizar la superficie para la agricultura en el mismo ciclo, dado que  
26 disminuye el costo de oportunidad de las horas invertidas en la corta de la superficie.

27  
28 Además se pudo constatar que los hogares productores de carbón vegetal internalizan los costos  
29 sociales del uso de la biomasa forestal, dado que a medida que se acerca la tasa de uso de biomasa  
30 forestal a la tasa de crecimiento intrínseco de la vegetación, éstos disminuyen la presión sobre el  
31 uso del recurso, a través de la disminución promedio de superficies explotadas para esta actividad.

32  
33 Cabe destacar que el PMFARMF no determina un cambio en la tecnología de producción de carbón  
34 vegetal utilizada, misma que actualmente muestra rendimientos decrecientes. Esto en cierta medida

1 limita el análisis presentado de las dos estrategias de manejo forestal consideradas debido a que no  
2 se pudo realizar un análisis de sensibilidad considerando un cambio en las funciones de producción  
3 que pudiera cambiar las condiciones iniciales y finales dentro del modelo de control óptimo.  
4

5 De manera empírica se comprueba que las comunidades indígenas Mayas aledañas a la reserva de la  
6 biosfera Los Petenes en México, tienen un manejo sostenible de sus recursos forestales, dado que se  
7 encuentran con niveles de utilización de biomasa forestal por debajo de las tasas de crecimiento  
8 intrínsecas y obtienen ingresos monetarios positivos de la producción de carbón vegetal, además de  
9 utilizar estas superficies forestales para la producción agrícola, lo que permite una optimización del  
10 trabajo invertido como hogar.

11  
12 En consecuencia, la principal recomendación de política que puede desprenderse de este trabajo es  
13 que la Secretaria de Medioambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de México debería  
14 promover planes de manejo forestal que consideren las condiciones económicas, además de  
15 distinguir la complementariedad de las actividades forestales y agrícolas, las cuales determinan los  
16 incentivos económicos y sociales de utilización de las superficies forestales. En este caso en  
17 particular, nuestro análisis bio-económico sugiere que la política óptima sería mantener el manejo  
18 tradicional, sistema de roza-tumba-quema de pequeñas superficies, dado que permite a los  
19 productores mantener esta actividad forestal con la producción agrícola, disminuyendo la presión  
20 adicional para el recurso forestal y optimizando la cantidad de trabajo asignada a la corta de  
21 biomasa a nivel local. Lo que se traduce en una mejora en la toma de decisión social, dado que no  
22 se presiona el umbral de utilización de biomasa esperado de cada familia. Así, los resultados de este  
23 trabajo muestran la necesidad de que los tomadores de decisiones en Latinoamérica ahonden en el  
24 análisis de los incentivos económicos y sociales que tienen las comunidades para hacer uso del  
25 recurso forestal, esto con la finalidad de definir con claridad cómo se podría aumentar la costo  
26 efectividad de las políticas de manejo y conservación ambiental en comunidades indígenas aledañas  
27 a las áreas naturales protegidas.  
28

1 **Referencias**

- 2
- 3 Arrocha, M. 2007. La contribución del recurso forestal hacia los hogares rurales de la zona aledaña  
4 al Área Natural Protegida Reserva de la Biosfera Los Petenes: Un cálculo del incentivo  
5 económico de conservación, San Francisco de Campeche, México. Indesol - Kairos, A.C.,  
6 1-80.
- 7 Chiang, A. y Wainwright K. 2006. Métodos fundamentales de economía matemática México D.F.  
8 Ed. Mc Graw Hill. 1-688.
- 9 Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2006. Plan de Conservación y  
10 Manejo de la Reserva de la Biosfera Los Petenes, México, DF., págs. 198.
- 11 Foster, J., J. Greer y E. Thorbecke. 1984. A class of decomposable poverty measures. *Econometrica*  
12 81: 761–766.
- 13 García, A., N. Ceular, J.M. Caridad, R. Acero, J.M. Perea y M.E. Martín. 2007. Determinación de  
14 funciones de producción y análisis de eficiencia de la invernada pampeana Argentina.  
15 Córdoba, España. *Archivos de Zootecnia* 56 (213): 23-32.
- 16 Instituto nacional de Estadística, informática y geografía (INEGI). 2005. II Censo Nacional de  
17 Población y Vivienda, México, D.F.
- 18 Contreras, J. 2006. Programa de Manejo Forestal para el aprovechamiento de los Recursos  
19 Forestales Maderables, Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), San Francisco de  
20 Campeche, México. 1-110.
- 21 Lopez, R. 1997. Environmental externalities in traditional and the impact of trade liberalization: the  
22 case of Ghana. *Journal of Development Economics* 53 (1):17–39.
- 23 Pascual, U. and Barbier, E.B. 2007. On price liberalization, poverty and shifting cultivation: An  
24 example from Mexico, *Land Economics*, 83(2):192-216.
- 25 Pascual, U. and Martínez-Espiñeira, R. 2006. Second-best policy options against poverty and  
26 environmental degradation in forest based agricultural systems, *Economía Agraria y*  
27 *Recursos Naturales*, 12: 121-144.
- 28 Pat, F., Hernández, P. y Sánchez L., 2006. Villalobos G., Memoria del Taller Participativo El  
29 Contexto Demográfico, Económico y Social en las Comunidades Aledañas a la Reserva de  
30 la Reserva de Los Petenes (RBLP), Hecelchakán, Campeche, México. UAC, ECOSUR,  
31 EPOMEX Y RBLP, 1-95.
- 32 Yunez-naude, A y Taylor, E.J. 1999. Manual para la construcción de matrices de contabilidad social  
33 para pueblos, México, D.F. Colegio de México, 1-104.

**Anexo**

**Table 1.** Characteristics of the Traditional Forestry Slash and Burn Management with the Forest Management Program for the Exploitation of Timber Resources (FMETR)

<b>Traditional Forest Management</b>	<b>Forest Management Plan</b>
System slash burning.	System slash burning,
Small areas (patches) for the production.	Rotating polygon bath management for production delimited.
Selective logging and low impact (keeping logs of 30 cm in height).	Semi thinning of the productive area (full cut trees).
Free access to the total strength of the community forest area.	Limited access to a single polygon community forestry.
Charcoal production site handcrafted oven.	Production of charcoal in the area within the polygon.
Land rotation period of 8 to 12 years.	Land rotation period of 15 to 20 years.

**Table 2.** Parameters of Forest Management Policies for the Calibration of the Optimal Control Model for the Chunkanan Community, Campeche, Mexico.

	Using Traditional Management Value for periods K	Management Program With Value for periods K**
Year 1	1	2.83
Year 2	1	2.06
Year 3	1	1.72
Year 4	1	1.28
Year 5	1	0.93

\*\*These values were obtained considering the annual average surface used in the traditional practice, 64.6 hectares for 2008.

Source: Authors` own calculations derived from the household survey of Chunkanan charcoal producers 2008 and the Forest Management Program for the Exploitation of Timber Resources (FMETR), Conafor-Semarnat 2006.

1  
2**Table 3.** Parameters Used in the Model Calibration

<b>PARAMETER</b>	<b>MEDIA</b>	<b>STANDARD DEVIATION</b>	<b>MIN</b>	<b>MAX</b>
<b>Y (\$)</b> Average annual income	\$ 36,637.20 \$	15,547.06 \$	13,390.00 \$	81,120.00
<b>CH (\$)</b> Charcoal income	\$ 12,124.00 \$	8,852.79 \$	1,296.00 \$	46,656.00
<b>c(T-L) (\$)</b> Wage labor income	\$ 19,167.80 \$	25,271.68 \$	- \$	153,270.00
<b>E (\$)</b> Other income	\$ 5,346.09 \$	3,794.13 \$	- \$	14,104.00
<b>CH (kilos)</b> Amount of Charcoal produced	10,101.44	7,381.94	1,080.00	38,880.00
<b>L</b> (Total work hours/men annual)	994.00	469.22	264.00	2,256.00
<b>g</b> (Percentage of forest work dedicated to the cutting of trees)	0.32	0.07	0.18	0.45
<b>b</b> Average hours to cut a hectare	266.00	245.87	96.00	1,728.00
<b>L/a</b> Total hectare used in production	1.44	0.76	0.50	4.00
<b>Wo</b> Biomass of trees used in the production (Ton/Ha.)	11.42	7.05	1.79	44.64
<b>Q</b> % relative percentage of biomass using total household budget	4.500	0.884	0.310	6.100
<b>y</b> Intrinsic rate of natural increase of biomass	15.00	n/a	n/a	n/a
<b>P</b> Purchasing prices for the producer	1.20	n/a	n/a	n/a
<b>n/A</b> <b>Population density</b> (Home/Hectares)	0.0087	n/a	n/a	n/a
<b>K</b> Forest management parameter	1.00	n/a	n/a	n/a
<b>Ti</b> (Allocation of household total annual working hours)	1,749.00	n/a	n/a	n/a
<b>c</b> (Minimum wage)	47.60	n/a	n/a	n/a

3  
4  
5  
6

1  
2

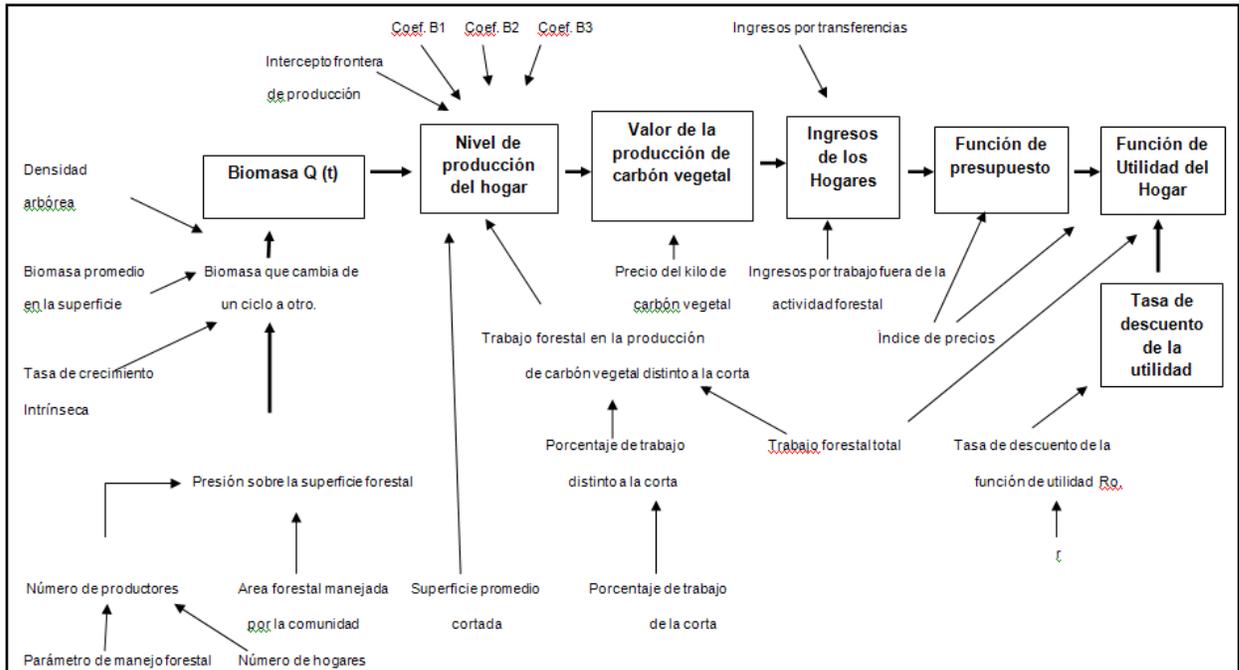
**Table 4.** Results of The Optimal Control Model for Biomass, Production and Household Income.

		<b>BIOMASS</b>				
		<b>PERCENTAGE</b>				
	Baseline	5 Year	10 Year	20 Year	30 Year	35 Year
<b>TRADITIONAL (K=1)</b>	4.5	7.503	10.5	16.51	22.52	25.52
<b>FMPETR (K=1.59)</b>	4.5	7.765	11.03	17.56	24.09	27.35
		<b>PRODUCTION</b>				
		<b>TONS</b>				
	Baseline	5 Year	10 Year	20 Year	30 Year	35 Year
<b>TRADITIONAL (K=1)</b>	10.1	11.89	13.53	16.54	19.33	20.67
<b>FMPETR (K=1.59)</b>	10.1	10.9	11.62	12.96	14.19	14.78
		<b>INCOME</b>				
		<b>MEXICAN PESOS (MX)</b>				
	Baseline	5 Year	10 Year	20 Year	30 Year	35 Year
<b>TRADITIONAL (K=1)</b>	\$ 12,120.00	\$ 14,270.40	\$ 16,239.60	\$ 19,848.00	\$ 23,196.00	\$ 24,800.40
<b>FMPETR (K=1.59)</b>	\$ 12,120.00	\$ 13,080.00	\$ 139,944.00	\$ 15,555.60	\$ 17,030.40	\$ 17,739.60

3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26

1  
2

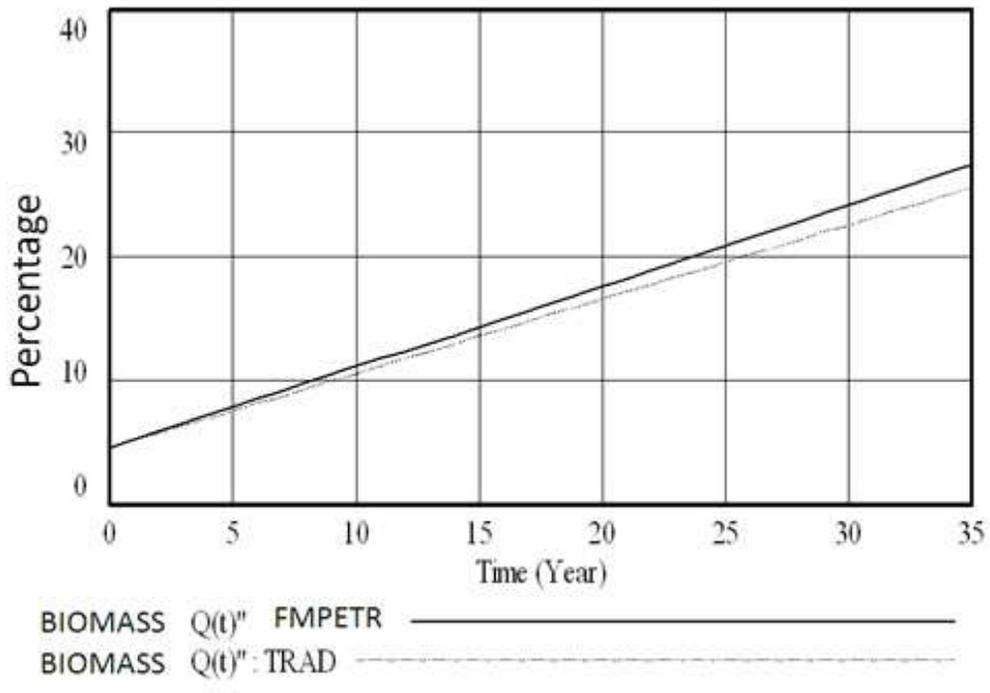
**Figure 1.** Flow Diagram Describing the Structure of the Optimal Control Model for Charcoal Production.



3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30

1  
2

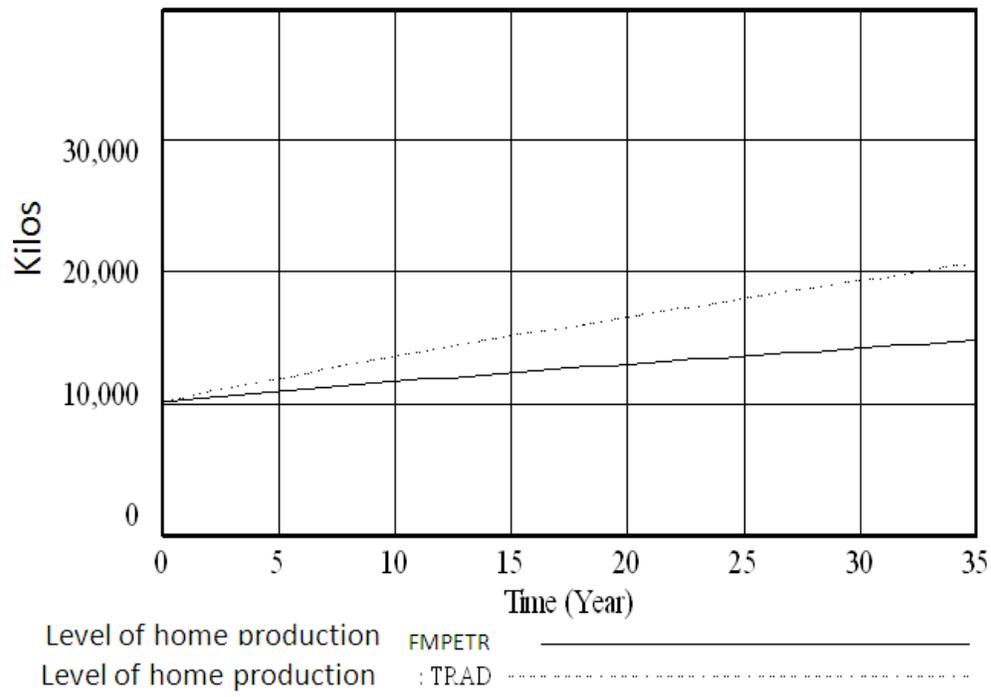
**Figure 2.** Percentage of Biomass.



3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30

1  
2  
3

**Figure 3.** Level of Household Production.



4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28