



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
POSGRADO EN GEOGRAFÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL  
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

MODELADO ESPACIAL DE LA DINÁMICA DE LOS BOSQUES DE *QUERCUS*  
MANEJADOS PARA CARBÓN VEGETAL EN LA CUENCA DEL LAGO DE  
CUITZEO, MICHOACÁN

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:  
JAIME RAFAEL GONZÁLEZ LÓPEZ

TUTOR  
DR. ADRIÁN GHILARDI  
CIGA-UNAM

MÉXICO, D. F., Septiembre 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Agradecimientos

A mi familia.

A mis amigos.

A toda la comunidad del CIGA. Especialmente a Adrián Ghilardi.

A los sinodales: Gabriela Cuevas García, Jean-François Mas Causel, Omar Raúl Masera Cerutti y Luis Miguel Morales Manilla por mejorar la tesis.

A CONACYT por el apoyo brindado estos dos años.

Y... al que la lea.

## Why Model?

"Why model?" Imagining a rhetorical (non-innocent) inquisitor, my favorite retort is, "You *are* a modeler." Anyone who ventures a projection, or imagines how a social dynamic—an epidemic, war, or migration—would unfold is running *some* model.

Joshua M. Epstein

## El mapa y el territorio

"En aquel Imperio, el arte de la Cartografía logró tal perfección que el mapa de una sola provincia ocupaba toda una ciudad, y el mapa del Imperio, toda una provincia. Con el tiempo, esos mapas desmesurados no satisficieron y los colegios de cartógrafos levantaron un mapa del Imperio que tenía el tamaño del Imperio y coincidía puntualmente con él. Menos adictas al estudio de la cartografía, las generaciones siguientes entendieron que ese dilatado mapa era inútil y no sin impiedad lo entregaron a las inclemencias del sol y los inviernos. En los Desiertos del Oeste perduran despedazadas ruinas del mapa, habitadas por animales y mendigos."

Jorge Luis Borges

# RESUMEN

El presente trabajo se enmarca dentro del manejo de recursos naturales, en particular de recursos forestales maderables con fines energéticos en países en desarrollo.

La extracción de madera para producir carbón vegetal en los países en desarrollo es frecuentemente identificada como una causa de degradación forestal, e incluso de deforestación (Mwampamba, 2007; IEA, 2009; Chidumayo y Gumbo, 2013). Esto tiene a su vez implicaciones climáticas por las emisiones netas de gases de efecto invernadero y ambientales por la pérdida de servicios ecosistémicos. Sin embargo, bajo prácticas de manejo sustentable, el carbón vegetal representa una fuente de energía renovable y de ingresos para la población rural de bajos recursos (Minten *et al.*, 2013; Schure *et al.*, 2013). Se ha resaltado en la literatura internacional la necesidad de contar con metodologías y modelos espaciales para evaluar los impactos asociados a la producción tradicional de carbón vegetal, como así también su potencial de producción sustentable (Kituyi, 2004; Arnold *et al.*, 2006; Ghilardi *et al.*, 2013).

La degradación forestal ocasionada por la extracción de madera para producir carbón vegetal es un proceso dinámico, determinado en parte por la respuesta de la vegetación a la perturbación y por las preferencias y limitaciones de los diferentes actores (*e.g.* los carboneros). En este trabajo, a través del análisis y modelado espacial se analiza la dinámica espaciotemporal de la cosecha de madera de encino para producir carbón vegetal en la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán. El modelo proyecta a futuro los sitios y el volumen de cosecha de manera iterativa con a) cambios de cobertura y uso del suelo, b) crecimiento natural de la vegetación después del aprovechamiento, c) preferencias de los leñadores por ciertos lugares para producir carbón vegetal, y d) un componente estocástico que evita que las proyecciones sean totalmente deterministas.

El primer capítulo es una breve introducción sobre la producción y consumo de carbón vegetal en México y el mundo, y los impactos ambientales frecuentemente asociados. Se describe también el área de estudio.

En el segundo capítulo se describen los objetivos de la investigación y se justifica la presente investigación.

El tercer capítulo se compone del desarrollo del modelo que integra dos submodelos: uno sobre la dinámica de cambio de cobertura y uso de suelo, y el otro sobre la extracción de madera para producir carbón vegetal y la respuesta de la vegetación al disturbio.

En el cuarto capítulo se generaron escenarios en donde se incorporan cambios en las prácticas de manejo: conservación, deforestación y restauración; y en las eficiencias de conversión de madera a carbón vegetal (*i.e.* hornos más eficientes).

Por último, a manera de conclusión, se concretan los aportes de la tesis y se mencionan aquellas líneas de trabajo que deben ser exploradas como continuación del presente trabajo, a fin de mejorar nuestro conocimiento sobre la producción sustentable de carbón vegetal.

# ÍNDICE

---

1	Introducción .....	1
1.1	Panorama mundial de la producción y consumo de carbón vegetal.....	4
1.2	Producción y consumo de carbón vegetal en México.....	6
1.3	Área de estudio .....	7
2	Justificación del trabajo y objetivos .....	9
2.1	Objetivo general.....	10
2.2	Objetivos particulares .....	10
3	Modelado espacialmente explícito de la dinámica de producción de carbón vegetal y del cambio de cobertura y uso de suelo en la cuenca del lago de Cuitzeo .....	11
3.1	Submodelo de cambio de cobertura y uso de suelo.....	11
3.1.1	Introducción.....	11
3.1.2	Métodos.....	12
3.1.3	Resultados.....	15
3.2	Submodelo de producción de carbón vegetal .....	21
3.2.1	Introducción.....	21
3.2.2	Métodos.....	21
3.2.3	Resultados.....	27
4	Escenarios .....	34
4.1	Introducción .....	34
4.2	Métodos .....	34
4.3	Resultados.....	36
5	Conclusiones y direcciones futuras de investigación .....	40
6	Referencias.....	42

## Índice de tablas

Tabla 1. Variables explicativas del modelo de CCUS. ....	12
Tabla 2 Clases utilizadas en los mapas de coberturas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo para los años 1975 y 2000. ....	13
Tabla 5. Matriz de transición de un solo paso para el período 1975-2000.....	16
Tabla 6. Probabilidades de cambio anual y por período completo por transición. ....	16
Tabla 8. Insumos para el submodelo de producción de carbón vegetal.....	21
Tabla 9. Criterios utilizados en la generación de escenarios.....	30
Tabla 10. Escenarios generados a partir de la combinación de distintos criterios.....	30
Tabla 11. Parámetros del modelo.....	34
Tabla 12. Probabilidad utilizada para generar el escenario de conservación.....	35
Tabla 13. Probabilidad utilizada para realizar el escenario de deforestación.....	36
Tabla 14. Eficiencias de hornos.....	36

# Índice de figuras

Figura 1. Horno tradicional en la cuenca de Cuitzeo.....	2
Figura 2. Construcción de un horno tradicional en el siglo XVI.....	2
Figura 3. Porcentajes en el 2010 de principales fuentes de energía primaria en el mundo. ....	4
Figura 4. Porcentajes de las principales fuentes de energía renovable. ....	5
Figura 5. Porcentaje de producción por continente .....	5
Figura 6. Principales 4 productores mundiales y México. ....	6
Figura 7. Cuenca del lago de Cuitzeo. ....	8
Figura 8. Cálculo de la matriz de transición. ....	14
Figura 9. Porcentajes de las clases del área total. ....	15
Figura 10. Tasas de cambio. ....	16
Figura 11. Comparación entre las distintas clases para los años 1975, 2000 y la simulación para el año 2030.....	17
Figura 12. Cambio de cobertura y uso de suelo de las coberturas de los años 1975, 2000 y la cobertura simulada de 2030. ....	18
Figura 13. Cambio de cobertura y uso de suelo de las coberturas de los años 1975, 2000 y la cobertura simulada de 2030. ....	19
Figura 14. Integración del submodelo de CCUS y de producción de carbón vegetal. ....	22
Figura 15. Selección de los sitios de cosecha de madera y producción de carbón .....	23
Figura 16. Proyección de la cantidad de madera cosechada .....	24
Figura 17. Identificación de sitios cosechados .....	24
Figura 18. Efecto del aumento de la clase “Bosque de encino” .....	27
Figura 19. Efecto de la reducción de la clase “Bosque de encino”. ....	28
Figura 20. Efecto de la cosecha en la biomasa aérea disponible. ....	29
Figura 21. Biomasa total bajo distintos escenarios. ....	31
Figura 22. Trayectorias de las simulaciones bajo distintos escenarios proyectados a 30 años.....	31
Figura 23. Dinámica de la clase “bosque de encino” .....	33
Figura 24. Escenarios de prácticas de manejo.....	37
Figura 25. Escenarios bajo distintos hornos. ....	37
Figura 26. Impacto del cambio tecnológico en la deforestación. ....	38
Figura 27. Prácticas de conservación, restauración y cambio de tecnología.....	38
Diagrama de flujo 1. Modelo de producción de carbón vegetal y de cambio de cobertura y uso de suelo.....	26



# 1 INTRODUCCIÓN

---

La madera es la fuente de energía más antigua utilizada por la humanidad (Cleveland y Ayres, 2004; Cleveland, 2009), y sigue ocupando un lugar preponderante en la oferta de energía a nivel global (FAOStat, 2012). El uso de la madera como fuente de energía en países en desarrollo incluye básicamente dos tipos: leña, la cual consiste en madera secada al aire que se quema para producir fuego y calor, así como carbón vegetal<sup>1</sup>, un producto secundario que se obtiene por la pirólisis de la madera. A diferencia de la leña, la quema de carbón vegetal alcanza temperaturas más altas que los puntos de fusión de los minerales de cobre y de hierro. Por ésta propiedad, el carbón vegetal catalizó la transición de la Edad de Piedra a la Edad de Bronce, y posteriormente a la Edad de Hierro (Harris, 1999).

El método de producción de carbón vegetal usado hace cientos de años no ha cambiado al día de hoy en los países en desarrollo, como se muestra en las figuras 1 y 2. Esta tradición milenaria consiste en que el carbonero apila cientos de leños en forma de iglú, después los tapa con tierra y hojas para que no entre aire desmesuradamente. El carbonero, enciende unos cuantos leños en el interior del horno de tierra y durante varios días aguarda y cuida que no ardan los demás leños para que estos no ardan y se conviertan en cenizas y así no perder la producción. Lo que ocurre al producirse carbón vegetal es la destilación de la madera. Al restringirse la entrada de oxígeno, las sustancias volátiles y el agua que la madera contiene se evaporan sin que ocurra combustión. El resultado es un producto estructuralmente similar a la madera de origen, pero formado casi exclusivamente por carbono, cenizas y algunos restos de sustancias volátiles y humedad. Originalmente la madera seca está constituida por 70% de sustancias volátiles y al ser transformada a carbón solo permanecen del 15 al 20% (de Miranda *et al.*, 2013). Los gases resultantes de la pirolisis pueden ser divididos en condensables y no-condensables. Dentro de los condensables se encuentran el metanol (CH<sub>3</sub>OH), ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O) (Brito y Barrichelo, 1981). En los no-condensables se encuentran el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el monóxido (CO), el metano (CH<sub>4</sub>) y el hidrógeno (H<sub>2</sub>)<sup>2</sup>. El qué tan eficiente se desarrolle esta tarea depende mucho de la eficiencia del horno y de la experiencia del carbonero (Emrich, 1985).

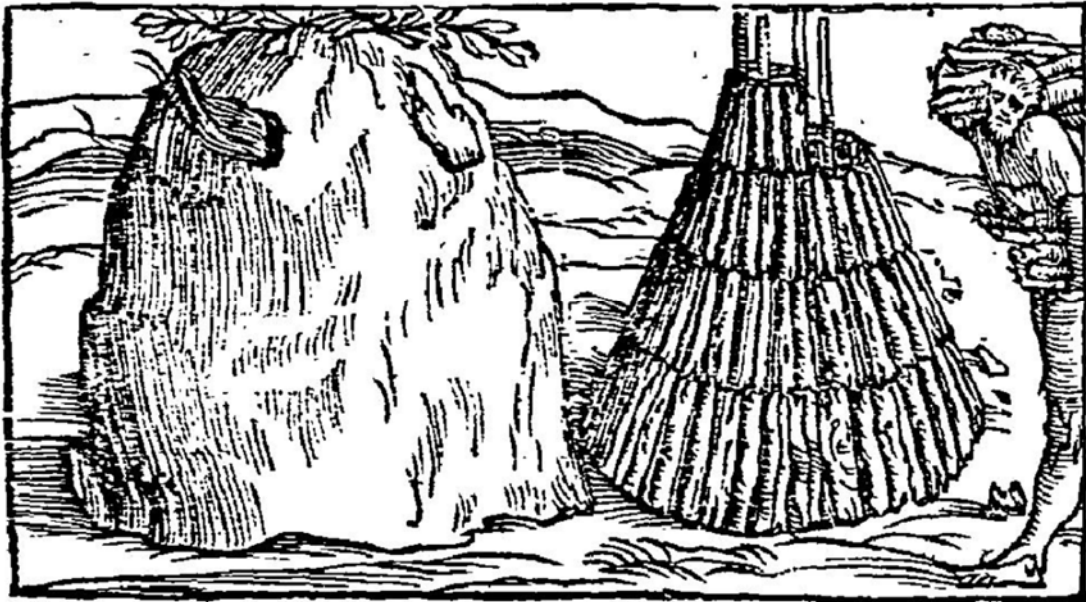
---

<sup>1</sup> En ocasiones se utiliza de manera indistinta la palabra “carbón” para hacer referencia al “carbón vegetal”.

<sup>2</sup> El metano y dióxido de carbono se catalogan como gases de efecto invernadero.



*Figura 1. Horno tradicional en la cuenca de Cuitzeo. Fotógrafo: Ernesto Vega.*



*Figura 2. Construcción de un horno tradicional en el siglo XVI. Figura obtenida del libro "De la pirotechnia: 1540" (Biringuccio y Carugo, 1977).*

Hoy en día el carbón vegetal satisface al sector industrial así como al residencial; siendo utilizado como agente reductor en la industria metalúrgica (producción de ferrogusa) y como fuente de calor para la cocción de alimentos de hogares y comercios.

Esta investigación se concentra en el carbón vegetal utilizado en el sector residencial y comercial urbano (no industrial), donde los principales consumidores son centros urbanos de países en vías de desarrollo.

Dentro de los principales impactos ambientales asociados a la producción/consumo de carbón vegetal esta la deforestación y la degradación forestal (Chidumayo y Gumbo, 2013; Zulu y Richardson, 2013), así como la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Bailis, 2009). Existe controversia sobre si la producción de carbón vegetal es una causa de deforestación y/o degradación forestal (*i.e.* si su producción es renovable o no lo es). El consenso general es que depende del contexto geográfico particular, de la escala o resolución del análisis, y de las definiciones mismas de deforestación y degradación forestal. A una escala grande la remoción de madera puede asociarse con deforestación, lo que a menudo resulta erróneo porque las áreas “deforestadas” pueden ser en realidad parcelas de manejo en rotación, lo que se “ve” a escalas más pequeñas o de paisaje. En cuanto a las definiciones, la deforestación es la pérdida a largo plazo de la cobertura forestal, mientras la degradación forestal es la remoción temporal de toda o parte de la biomasa forestal (Sasaki *et al.*, 2011), en detrimento de los servicios ecosistémicos asociados. Es por esto que se cree que la producción de carbón vegetal como tal es una causa de degradación forestal, ya que en muchos casos se han reportado prácticas de cosecha selectiva, lo que resulta en una disminución de biomasa, pero sin cambio en el tipo de cobertura de la vegetación (Chidumayo y Gumbo, 2013). Así mismo, muchas veces se ha registrado regeneración en los bosques sometidos a producción de carbón vegetal en comparación con la deforestación provocada por la transición a áreas de cultivo o pastizales principalmente, *i.e.* cambio de cubierta del suelo (Chidumayo, 1993; Ribot, 1999). Una tercera posibilidad, muy frecuente, es la producción de carbón como subproducto de la deforestación con fines agrícolas y pecuarios de largo plazo. Por lo anterior resulta importante generar metodologías y modelos que permitan diferenciar si la madera proviene de cosechar árboles con el fin único de producir carbón, o si por el contrario, la madera es un subproducto del desmonte para cultivar o introducir ganado, lo que a su vez afecta las fuentes de madera a futuro. Para generar escenarios de corto plazo que evalúen si la producción tradicional de carbón vegetal es una causa de deforestación y/o degradación forestal, se deben integrar modelos de cambio de cubierta y uso del suelo, con el balance entre la oferta y demanda de madera de los bosques remanentes en un contexto espacial y dinámico.

Otro impacto asociado a la producción/consumo es en la salud de los productores y consumidores, se vincula a los gases que se respiran producto muchas veces de una combustión ineficiente o una sobre-exposición a estos gases, lo que genera infecciones respiratorias en los niños y enfermedades pulmonares en los adultos, debido al tipo de horno y a la estufa con la que se produce/consume el carbón (Zulu y Richardson, 2013).

Finalmente cabe destacar que la producción de carbón vegetal no está incluida en planes ni políticas energéticas de los principales países productores. Por lo tanto se habla acerca de que la formalización de la cadena de producción de carbón mejorará la situación o equidad económica de los productores con respecto a los comerciantes, producto de la disminución de sobornos, por lo cual al ser trabajos regulados la salud será un tema importante en los trabajadores y así se contará con información estandarizada y fiable, con la cual se pueda regularizar a ésta cadena tratando de beneficiar a todos sus eslabones (Schure *et al.*, 2013). Cuando la producción sea sustentable y el costo ambiental se vea reflejado en los precios del producto y el beneficio de los productores y consumidores existirá un mercado justo.

## 1.1 PANORAMA MUNDIAL DE LA PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE CARBÓN VEGETAL.

La producción de carbón vegetal representa alrededor del 8% de la extracción mundial global de madera (FAO, 2005, 2006). A nivel global el consumo de carbón vegetal ha aumentado más del 50 por ciento entre los años 1989 y 2008 con un gran incremento en África, donde se consume más de la mitad del total global debido a que la migración a áreas urbanas y periurbanas ha contribuido a este fenómeno en donde el carbón es más barato y fácil de transportar que la leña (FAO, 2010) al igual que la cantidad de energía generada por kilogramo de carbón es mayor a la generada por la leña.

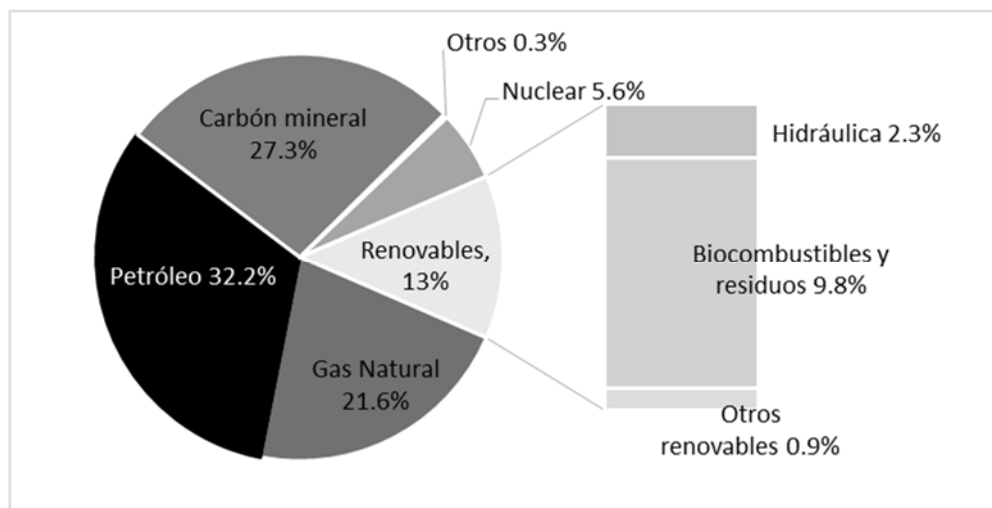


Figura 3. Porcentajes en el 2010 de principales fuentes de energía primaria en el mundo (IEA, 2012).

En la figura 3 se muestran los porcentajes de las principales fuentes de energía en el mundo según la Agencia Internacional de Energía<sup>3</sup> (IEA, 2012), en donde actualmente el petróleo y sus derivados son la principal fuente de energía en el planeta y se caracterizan por ser no renovables. La agencia internacional de energía señala que dentro de los combustibles renovables podemos encontrar al carbón vegetal, dentro de los biocombustibles sólidos los cuales representan la primera fuente renovable de energía superando a la hidroeléctrica, eólica, geotérmica y solar juntas (IEA, 2012). Esto amerita serias consideraciones, en primera instancia porque no toda la producción de carbón vegetal es renovable, ya que esto depende de la capacidad de regeneración de la vegetación y su permanencia en el largo plazo junto a los servicios ecosistémicos que provee. En segundo porque se está clasificando a la leña y al carbón vegetal en el mismo grupo, lo cual genera cierta controversia ya que ambas fuentes de energía tienen mecanismos de producción, transporte y consumo sustancialmente diferentes, lo que se traduce en impactos ambientales diferenciables.

Muchas de las interpretaciones incorrectas se pueden deber a la falta de información, ya que al ser producciones no reguladas, no existen instituciones formales que se encarguen de generar información sobre la producción/consumo –a diferencia de las demás fuentes de energía– (Mwampamba et al., 2013).

<sup>3</sup> IEA por sus siglas en inglés *International Energy Agency*.

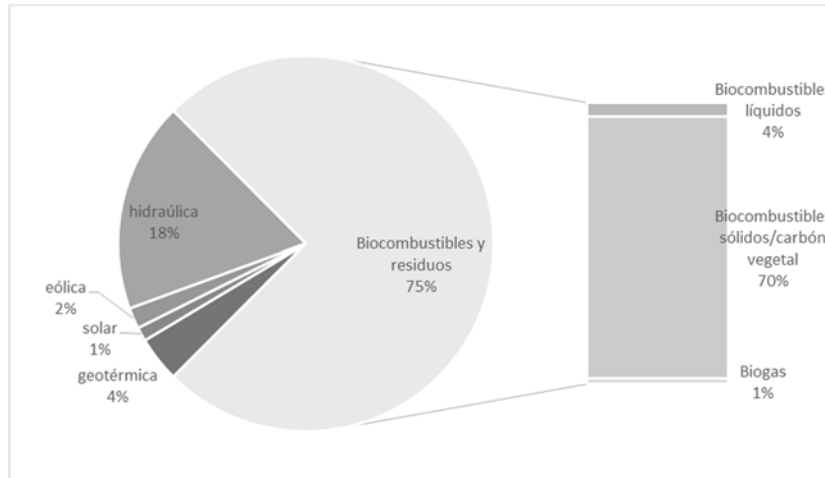


Figura 4. Porcentajes de las principales fuentes de energía renovable ((IEA, 2012).

Según IEA, el carbón vegetal junto con los biocombustibles sólidos aportan más del 70 % de la energía renovable, constituyendo la fuente que más aporta dentro del grupo de las fuentes renovables.

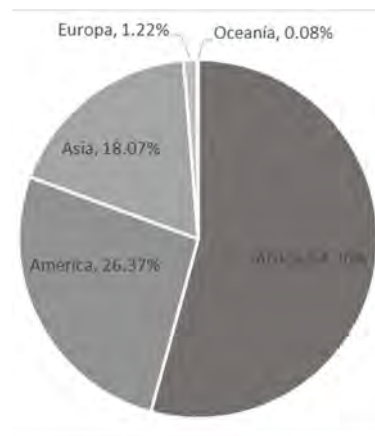


Figura 5. Porcentaje de producción por continente (FAO, 2013).

Aunque el principal país productor sea Brasil (figura 6) por continente el mayor productor es África (figura 5), en donde son distintas las finalidades de producción de cada uno de estos lugares. Mientras en Brasil la producción es principalmente con finalidades industriales, en los países de África la finalidad es para el consumo en hogares.

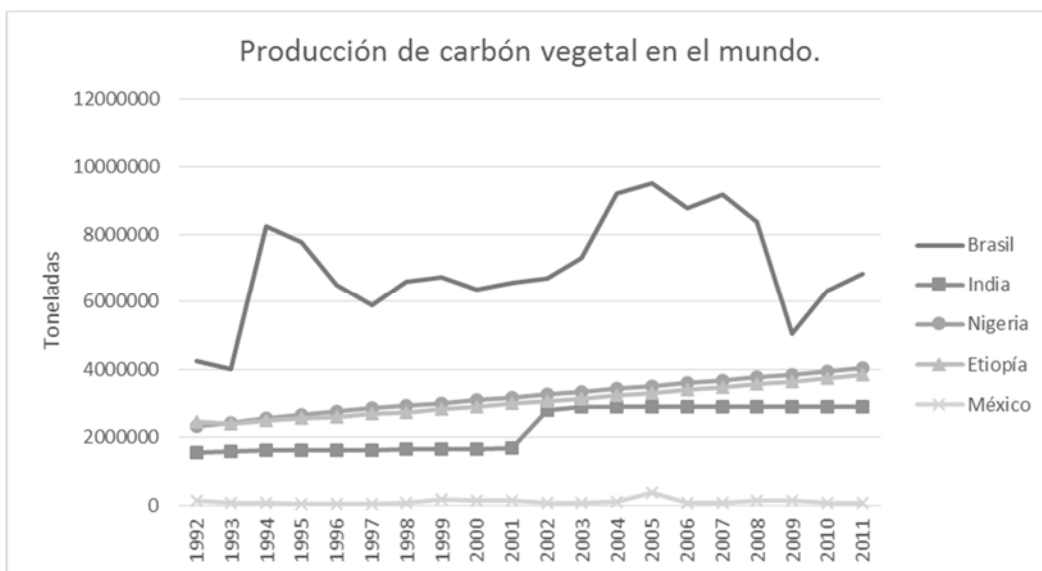


Figura 6. Principales 4 productores mundiales y México (FAO, 2013).

En la figura 6 se evidencia el contraste en los volúmenes de producción entre los principales cuatro países productores, en comparación con México —el cual se encuentra en la quincuagésima primera posición mundial—.

## 1.2 PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE CARBÓN VEGETAL EN MÉXICO

El anuario estadístico de la producción forestal de SEMARNAT (2011) hace hincapié en el incremento en los volúmenes de postes y combustibles en forma de carbón. Con respecto al 2010 se presenta una alza de 12.6% (utilizándose 48 mil m<sup>3</sup>r). La producción de carbón vegetal ocupa el cuarto lugar del grupo de productos de producción forestal maderable (3.8%), después de la escuadría (82.9%); Postes, pilotes y morillos (4.4%); Chapa y triplay (3.9%). Dentro de los combustibles se menciona que el combustible de mayor producción fue el carbón con 426,477 m<sup>3</sup>r (metros cúbicos de madera en rollo), superando a la leña con 203,994 m<sup>3</sup>r y los estados que más producen carbón vegetal son Sonora, Tamaulipas, Durango, Puebla y Guanajuato. El carbón vegetal a nivel nacional es principalmente producido a partir de maderas comunes tropicales (119.538 m<sup>3</sup>r), seguido de otras latifoliadas<sup>4</sup> (187.865 m<sup>3</sup>r) y el género Encino (118.656 m<sup>3</sup>r). Los principales productos obtenidos de las Comunes Tropicales son los combustibles en forma de carbón y la escuadría. Los estados de Tamaulipas, Campeche y Nuevo León son los principales estados en donde se aprovecha esta madera. Los estados de Sonora, Coahuila y Tamaulipas son los principales lugares en donde se aprovecha la madera obtenida de latifoliadas como carbón vegetal.

El género Encino ocupa el segundo lugar de aprovechamiento a nivel nacional como recurso maderable. Su principal destino es para escuadría y para combustible en forma de leña o carbón. Los estados que aprovechan mayor cantidad de volumen como carbón vegetal son los estados de Durango, Guanajuato y Sonora (SEMARNAT, 2011).

<sup>4</sup> En el anuario separan al género Encino de las demás latifoliadas, debido a su importancia de aprovechamiento.

En lo que refiere al consumo en México, Masera *et al.* (2010) reporta un incremento en el consumo de carbón vegetal en las últimas décadas y se espera que este incremento continúe. Para 1990 se estimó un consumo de 428 mil toneladas mientras para el 2010 de 686 mil toneladas de carbón. Además observaron que el consumo de carbón está altamente determinado por las tasas de crecimiento de las poblaciones de más de 10 mil habitantes y que alrededor del 70% del consumo se registra en el sector residencial. Para el 2010 las entidades que más consumieron carbón fueron Estado de México, Nuevo León y Distrito Federal.

### 1.3 ÁREA DE ESTUDIO

Se seleccionó la Cuenca del Lago de Cuitzeo como área de estudio por dos razones principales: los bosques de *Quercus spp.* son utilizados intensamente para la producción tradicional y no regulada de carbón vegetal, para su posterior uso en las principales ciudades como Morelia; y porque se cuenta con estudios previos que facilitan la parametrización de los modelos espaciales con datos robustos y validados con información de campo.

La Cuenca del Lago de Cuitzeo se encuentra dentro del cinturón volcánico transversal en la región central de México, perteneciente a la región hidrológica Lerma-Chapala (Mendoza *et al.*, 2006).

La cuenca incluye al segundo lago más grande de México y a la ciudad de Morelia, ha experimentado un gran crecimiento poblacional –alrededor del 330%– en el periodo de 1975-2000 (INEGI, 2010), al igual que la extensión de la ciudad ha incrementado alrededor de 600% (López *et al.*, 2001). Lo cual es significativo en cuanto a la producción de carbón vegetal, ya que la principal demanda de la cuenca se encuentra en esta ciudad. Otro fenómeno poblacional importante dentro de la cuenca es la migración, ya que 80% de los municipios incluidos presentan de altas a muy altas tasas de migración.

En la cuenca podemos encontrar representadas las condiciones socioeconómicas y ambientales de la región. En lo económico se puede encontrar un cambio en las principales actividades, ya que en 1975 el 88% de la población se dedicaba a actividades primarias (agricultura, focalizada en producción de granos y granjas), a diferencia de la actualidad en donde solo el 30% se mantiene en éstas actividades, y la mayoría desarrolla actividades secundarias o terciarias (Mendoza *et al.*, 2011).

Las principales clases de coberturas de vegetación y uso de suelo son: matorral 24.2%, bosques 20%, cultivos de temporal 19.9% y cultivos de riego 13.31% (García *et al.*, 2011). Originalmente la cuenca estaba cubierta por bosques mixtos de encino (*Quercus spp.*) y pino (*Pinus spp.*), que en la actualidad representan solo el 20 %.

Las especies más utilizadas para producir carbón vegetal son *Quercus castanea* Née y *Quercus laeta* Liebm. Cabe destacar que no existe desde hace más de 10 años un plan de manejo, tampoco existen permisos de producción en vigor, lo cual nos habla que la producción, transporte y venta del carbón en la cuenca es de tipo informal y no regulado (Aguilar *et al.*, 2012).



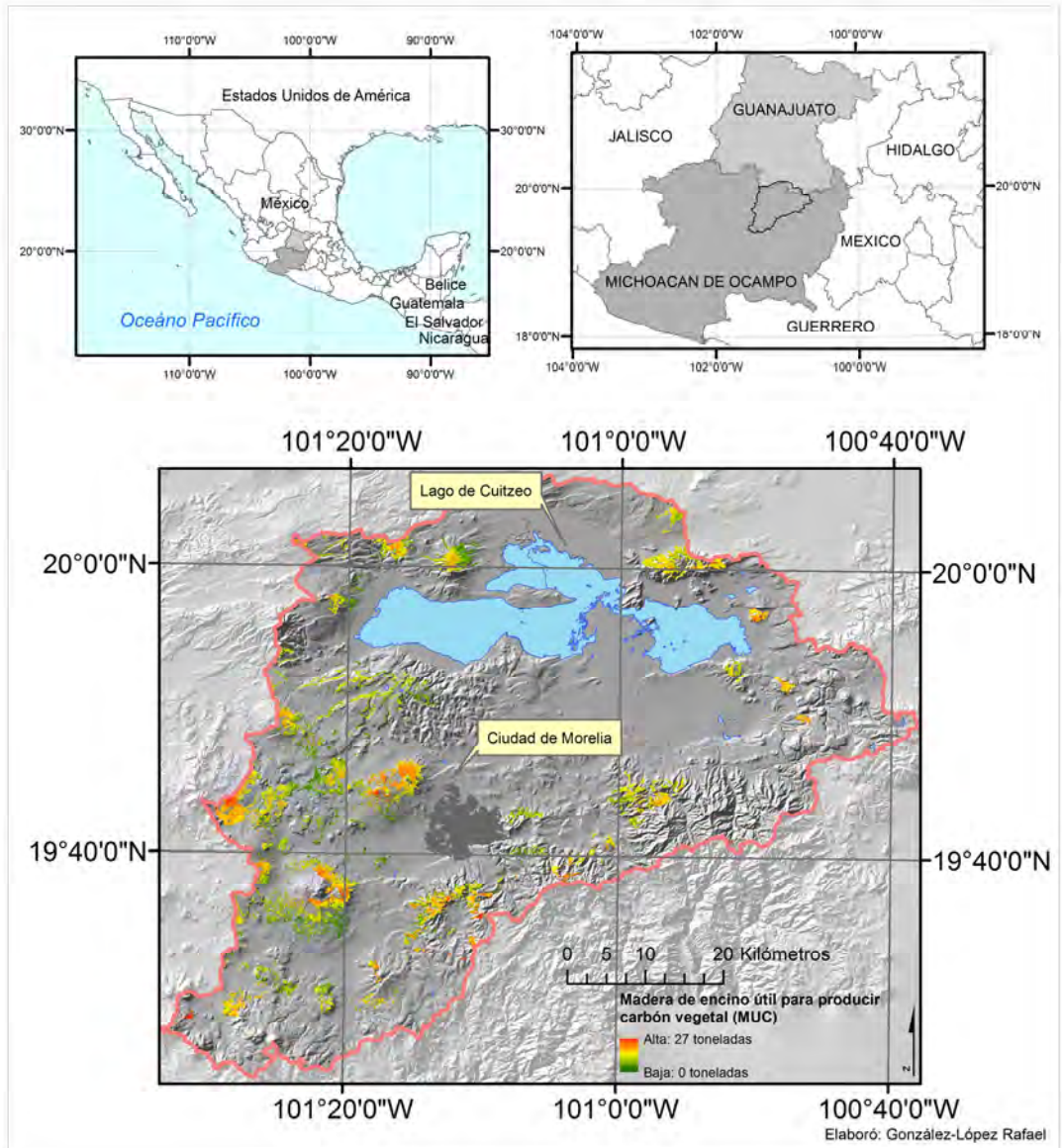


Figura 7. Cuenca del lago de Cuitzeo.



## 2 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO Y OBJETIVOS

---

Cuando el manejo forestal está sustentado en una actividad comercial estrictamente lucrativa, se pueden generar impactos indeseables sobre el medio ambiente, en pro de maximizar la producción sobre el resto de criterios de conservación. El manejo forestal sustentable es una opción concreta cuando la extracción comercial de la madera es prevista en el mediano y largo plazo, y se requiere además de algún tipo de certificación para su comercialización.

Un caso particular lo representan los campesinos de menores ingresos -a menudo sin tierra- como lo son la mayoría de productores de carbón vegetal del centro de México, quienes tienen la urgencia de generar ganancias en el muy corto plazo. Sus prácticas de manejo difícilmente maximizan la producción sustentable de madera que requiere de ciclos de corta más espaciados; y además, esta necesidad de dinero por falta de liquidez no deja espacio para consideraciones de conservación y restauración de los bosques en el mediano o largo plazo.

Esta situación abre oportunidades para diseñar estrategias valiosas de manejo que optimicen la productividad forestal, y a la vez preserven o restauren los servicios ecosistémicos que provee el bosque. Bajo este escenario más eficiente, sustentado posiblemente en microcréditos o apoyos extraordinarios externos, los carboneros podrían percibir un incremento en la producción, mientras la densidad de madera se incrementaría, y ciertos servicios ecosistémicos tenderían a la restauración.

Sin embargo, para poder evaluar estrategias plausibles (en cuanto a técnicas de manejo se refiere) que beneficien al productor y al ambiente, hay que conocer primero la relación entre la extracción de madera para producir carbón vegetal y la respuesta de los bosques bajo aprovechamiento. Esta relación es también preciso analizarla en el contexto de paisajes dinámicos, es decir, donde las cubiertas y usos del suelo cambian en el tiempo por múltiples factores ajenos a la producción de carbón vegetal. La propuesta de esta tesis es modelar la dinámica espaciotemporal de la cosecha de madera de encino para producir carbón vegetal, integrando simultáneamente cambios de cobertura y uso del suelo mediante simulaciones prospectivas del paisaje. El modelo proyecta a futuro los sitios y el volumen de cosecha de madera de encino de manera iterativa con a) cambios de cobertura y uso del suelo causados por factores ajenos a la producción de carbón vegetal, b) crecimiento natural de los encinos después del aprovechamiento y suponiendo solamente regeneración vegetativa, c) preferencias de los leñadores por ciertos lugares para producir carbón vegetal, y d) dos componentes estocásticos que evitan que tanto la selección de los sitios de cosecha, como los cambios de cobertura y uso del suelo, sean deterministas.

El objetivo último es construir una herramienta de apoyo para la toma de decisiones, que permita explorar qué podríamos esperar bajo cambios en las estrategias de manejo y conservación de los bosques de encino utilizados de manera irregular para la producción de carbón vegetal en el área de estudio.

## **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar si la producción tradicional de carbón vegetal de encino puede ser causa de degradación forestal o deforestación en la Cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán.

## **2.2 OBJETIVOS PARTICULARES**

- 1) Construir un modelo de cambio de cobertura y uso de suelo, el cual representará la dinámica de los bosques de encino que serán aprovechados para producir carbón vegetal.
- 2) Construir un modelo espacialmente explícito y dinámico que represente la cosecha de madera de encino para la producción de carbón vegetal y la consecuente respuesta de la vegetación al disturbio.
- 3) Integrar el modelo de cambio de cobertura y uso de suelo con el de cosecha-revegetación y así generar escenarios prospectivos del paisaje.
- 4) Comparar el escenario tendencial con escenarios alternativos que incorporen cambios en las tecnologías utilizadas para la producción (hornos mejorados), así como en las prácticas de manejo forestal.

### 3 MODELADO ESPACIALMENTE EXPLÍCITO DE LA DINÁMICA DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN VEGETAL Y DEL CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO

---

Con el crecimiento vertiginoso en las últimas dos décadas de la capacidad de procesamiento y almacenamiento computacional, los modelos han ganado relevancia para entender mejor procesos de degradación ambiental y sus proyecciones futuras. Entendemos la simulación como un método o proceso que nos permite evolucionar un sistema abstracto en el tiempo a fin de comprender su funcionamiento y comportamiento, con el objeto final de evaluar el efecto que producen ciertos cambios en sus supuestos, estructura y funcionamiento (Paegelow y Camacho Olmedo, 2008). La simulación se puede obtener de una situación actual (para comparar con la realidad y para validar el modelo), de una situación pasada (para entender la evolución histórica) o la evolución en el futuro. Actualmente muchos autores utilizan el término modelo en el sentido de la simulación.

En una manera concreta Epstein (2008) describe dieciséis razones para construir un modelo, de las cuales se espera que esta tesis haya cumplido o cumpla en un futuro con la mayoría.

Éstas razones son: 1) Explicar, 2) Guía para colecta de datos, 3) Encontrar las dinámicas principales, 4) Sugerir analogías, 5) Descubrir nuevas preguntas, 6) Promover un hábito de pensamiento científico, 7) Considerar resultados a intervalos plausibles, 8) Identificar las principales incertidumbres, 9) Ofrecer opciones de respuesta a alguna crisis en tiempo casi real, 10) Principales costos-beneficios y sugerir eficiencias, 11) Desafiar la robustez de la teoría a través de perturbaciones, 12) Exponer incompatibilidades entre lo deseado con los datos disponibles, 13) Capacitación profesional, 14) Guiar el diálogo político, 15) Educación, 16) Revelar lo aparentemente simple como complejo o viceversa.

Se construyó un modelo a través de la plataforma de modelado ambiental DINAMICA EGO en el cual se integran dos submodelos. Uno que simula la cosecha de los bosques de *Quercus* para producir carbón vegetal y la respuesta de la vegetación al disturbio, y otro que simula el cambio de cobertura y uso de suelo en la cuenca. Se describe primero cada submodelo por separado y por último su funcionamiento integrado.

#### 3.1 SUBMODELO DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO.

##### 3.1.1 Introducción

Los procesos de cambio de cobertura y uso de suelo son complejos, por lo que al realizar este modelo se realizó una simplificación de esta realidad y solo se utilizaron ciertas causas y variables que influyen en el CCUS. Las causas directas de la deforestación se pueden clasificar a *grosso modo* en tres grupos: expansión agrícola, extracción de madera (para aserradero o con fines energéticos) y ampliación de infraestructura (Geist y Lambin, 2002). A su vez, las causas de cambio responden a procesos más generales y mucho más difíciles de modelar, llamadas causas subyacentes. Estas causas se pueden clasificar en cinco grandes grupos: factores demográficos, factores económicos, factores tecnológicos, factores político-institucionales y un complejo de factores político-sociales o culturales

(Geist y Lambin, 2001; Lambin *et al.*, 2001). Operan directamente a nivel local o indirectamente desde el nivel nacional y/o global (*e.g.* redefinición nacional de los objetivos o leyes forestales, incremento del precio de un cultivo, variación en los precios de las fuentes energéticas) (Kaimowitz y Angelsen, 1998). La importancia de modelar el cambio de cobertura y uso de suelo radica en que muchas de las consecuencias del cambio son a largo tiempo y en muchas ocasiones irreversibles (Paegelow y Camacho Olmedo, 2008). En el submodelo solo se integran causas próximas de la deforestación, aunque en la creación de escenarios en el penúltimo capítulo se hace un esfuerzo por integrar que pasaría bajo el efecto de cierta toma de decisiones en los bosques de *Quercus* del área de estudio.

### 3.1.2 Métodos

Se construyó el modelo de CCUS en el software DINAMICA EGO (Soares-Filho *et al.*, 2002). La resolución utilizada fue de 1/16 hectáreas (píxeles de 25x25m o 625m<sup>2</sup>), la cual se corresponde (aunque algo ajustado) con la escala de los mapas de CCUS, de caminos y ríos de INEGI, todos a escala 1:50,000. Los insumos cartográficos en formato raster como el modelo digital de elevación o la distribución de biomasa útil para carbón tienen una resolución original de 25x25m. La construcción del modelo para su posterior simulación requiere de varios pasos que se encuentran detallados en los siguientes incisos.

A través de la plataforma de modelación ambiental DINAMICA EGO se evaluaron los cambios de cobertura y uso de suelo utilizando datos de mapas pasados con lo cual se simuló la conversión de una clase de cobertura terrestre a otra mediante de ecuaciones de transiciones parametrizadas.

#### 3.1.2.1 Insumos necesarios

Para realizar el modelo de CCUS fue necesario decidir con que variables explicativas trabajar. En la tabla 5 se presenta una descripción de las variables utilizadas. Se decidió trabajar con estas variables porque han sido identificadas como causas próximas de CCUS (Cuevas y Mas, 2008; Maeda *et al.*, 2011; Pérez-Vega *et al.*, 2012).

Tabla 1. Variables explicativas del modelo de CCUS.

Variable	Descripción	Supuesto
Distancia a brechas y veredas Caminos sin terraplén ni revestimiento (en el caso de las brechas permite el paso en general de vehículos, y en ambos casos permite el tránsito de personas y animales).	Distancia euclidiana desde todas las vías de comunicación.	Representan el nivel de accesibilidad, en donde a menor distancia y por lo tanto mayor accesibilidad a los bosques, la probabilidad de deforestación incrementa.
Distancia a carreteras pavimentadas (vía pavimentada diseñada para el tránsito de vehículos automotores).		
Distancia a terracerías (con terraplén y revestimiento, permiten el paso permanente de vehículos)		

Procede (Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares)		Permite identificar diferencias en prácticas y costumbres en el manejo de la tierra de acuerdo al régimen de propiedad.
Elevación	Modelo digital de elevación	Relacionadas con la aptitud para la transformación a cultivos, urbanización, etc.
Pendiente		
Distancia a sitios previamente deforestados	Distancia euclidiana	Incrementa la probabilidad de deforestación de los remanentes que se encuentran rodeados de zonas previamente deforestadas.
Distancia a centros urbanos	Distancia euclidiana	Muchos fenómenos varían dependiendo de la distancia a los centros urbanos. Por lo que la dinámica de las ciudades repercute en la dinámica de variables del CCUS.
Distancia a ríos	Distancia euclidiana	Es un promotor del cambio de uso de suelo debido a las prácticas relacionadas a la cercanía de fuentes de agua, donde el agua ha sido un ente que ha regulado la dinámica de la sociedad.

Otro insumo necesario fueron los mapas de cobertura y uso del suelo de Mendoza *et al.* (2011) para los años 1975 y 2000. Para incorporarlas al modelo se necesitó realizar una reclasificación en la cual se redujeron las clasificaciones originales a 8 clases (Tabla 6. Las coberturas originales se encuentran en la sección de anexos).

*Tabla 2 Clases utilizadas en los mapas de coberturas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo para los años 1975 y 2000.*

ID	Cobertura	Abreviación
1	Bosque mixto	BM
2	Matorral	M
3	Cultivos	C
4	Pastizales	P
5	Bosque de pino	BP
6	Bosque de encino	BE
7	Plantaciones forestales	PF
8	Otros	O

### 3.1.2.2 Construcción del modelo

#### 1.- Cálculo de matrices de transición

Estas matrices describen los cambios de un sistema a través de incrementos discretos de tiempo, en los cuales el valor de cualquier variable (en nuestro caso cobertura y uso de suelo) en un periodo dado de tiempo es la suma de porcentajes fijos del valor de las variables en el periodo de tiempo previo (Bell y Hinojosa, 1977; Soares-Filho *et al.*, 2002).

Para poder realizar este cálculo son necesarios los mapas de cobertura para el inicio y el término del periodo a analizar, así como determinar la distancia temporal entre cada una de las coberturas. Se obtienen entonces dos matrices de transición; una anual y una de un sólo paso.

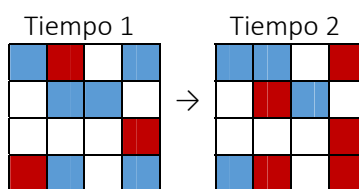


Figura 8. Un ejemplo de cómo calcular la matriz de transición es contando cuánto es reemplazado por otra clase. El número de píxeles que pasan de azul a rojo son 3 de 5 píxeles. Por lo tanto la probabilidad de que un píxel azul pase a uno rojo es de 0.6. Para la transición rojo a azul es de 0.66 ya que dos de tres píxeles cambiaron.

Se descartaron las transiciones inverosímiles (*e.g.* bosque de abies a encino, o viceversa), que se cree son producto de errores de clasificación de los mapas originales en ambos años, dejando solo las transiciones verosímiles y que afectan la distribución de los bosques de encinos.

#### 2.- Cálculo de rangos para categorizar variables

Dinámica EGO cuenta con un algoritmo para optimizar la categorización de los datos. En esta fase se transforman las variables continuas en discretas. En esta fase el modelo selecciona para cada variable el número de intervalos con el propósito de mejorar la estructura de los datos, esto es debido a que el cálculo de pesos de evidencia (ver próximo apartado) solo puede realizarse con variables categóricas.

En el cálculo de la distancia a las áreas previamente deforestadas se decidió utilizar las distancias a las clases cultivos, pastizales y matorrales.

#### 3.- Cálculo de pesos de evidencia

Se basa en las probabilidades de transición de cobertura y uso del suelo a partir de probabilidades condicionales. Este método indica la probabilidad de que una categoría cambie dada que cierta condición está presente (Bonham-Carter, 1994). Para esto son necesarios los rangos calculados en el punto anterior. Los pesos de evidencia nos dicen cuál es la probabilidad de que una transición ocurra dependiendo del efecto de una variable sobre esta transición. Es necesario tener información acerca de los rangos de las variables, así como los mapas de distribución de las variables, con lo cual se puede determinar la probabilidad de transición dependiendo de la presencia de una variable.

#### 4.- Análisis del mapa de correlación

Con base en el índice de Cramer se decidió utilizar todas las variables al ser independientes, es decir, no estar correlacionadas (el índice fue menor a 0.4)(Cuevas y Mas, 2008). Las variables utilizadas

fueron: distancia a brechas y veredas, distancia a carreteras pavimentadas, distancia a ciudades, distancia a terracerías, distancia a ríos, distancia a zonas deforestadas, altitud y pendiente.

### 5.- Simulación

Ya seleccionadas las variables y las transiciones deseadas se elaboran los mapas de cobertura y uso del suelo prospectivo, en donde se utilizan dos tipos de autómatas celulares para que los cambios modelados tengan una configuración espacial más realista. Por un lado existe el EXPANDER (e.g. expansión de la frontera agrícola), el cual simula los cambios por expansión y por otro el PARCHER, que crea nuevos parches de cambio (e.g. desmontes aislados en un bosque). La simulación es la única parte del submodelo CCUS que ha sido integrada en conjunto al modelo de producción de carbón vegetal, por lo que su funcionamiento determina la distribución de los bosques de encino para ser cosechados.

### 6.- Cambio de cobertura y uso de suelo

A partir de la simulación se obtienen mapas prospectivos de cambio de uso de suelo, los cuales serán utilizados para determinar la distribución de los bosques de *Quercus* a futuro y así determinar la biomasa disponible dentro de la cuenca.

#### 3.1.2.3 **Cálculo de tasas de cambio**

De manera independiente a los análisis necesarios para que el modelo funcione de manera adecuada, se realizó un cálculo de las tasas anuales de cambio para las distintas clases durante el período 1975-2000.

La fórmula utilizada para calcular las tasas es la proporcionada por FAO (1996).

$$r = 1 - \left(1 - \frac{A1 - A2}{A1}\right)^{1/t}$$

#### 3.1.3 **Resultados**

Se calcularon los porcentajes de las coberturas para la cuenca, en donde para ambos años la cobertura que mayor extensión ocupó es la clase “cultivo”, seguido de “matorral” y “bosque mixto” (Figura 9).

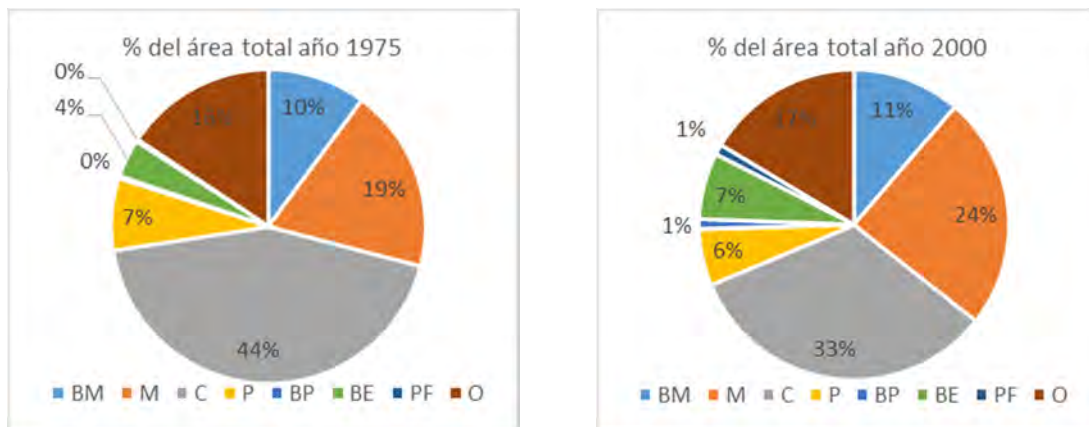


Figura 9. Porcentajes de las clases del área total.

En la siguiente gráfica se presentan las tasas de cambio de las clases para el período comprendido entre 1975 y 2000 calculadas a partir de la ecuación proporcionada por la FAO. Las tasas de las clases mayores a cero indican una pérdida de extensión. Esto demuestra una pérdida de cobertura para las clases “cultivo” y “pastizal”, mientras para las demás clases se presenta una ganancia relativa, siendo mayor en la clase “plantaciones forestales”.



Figura 10. Tasas de cambio.

Se obtuvo la siguiente matriz de transición de un solo período para las distintas clases. En amarillo se destacan las transiciones seleccionadas utilizadas en el modelo. Tres de estas transiciones son de bosques de encino a sitios deforestados y una de matorral a bosques de encino. Se seleccionó la clase matorral como la cobertura que puede transformarse a clase encino ya que en ocasiones pueden ser confundidos sitios recién aprovechados para producir carbón vegetal con matorrales al momento de realizar la clasificación.

Tabla 3. Matriz de transición de un solo paso para el período 1975-2000.

	BM	M	C	P	BP	BE	PF	O
BM		0.0614472	0.0475501	0.0137294	0.0559804	0.0515557	0.0079875	0.0028939
M	0.0526982		0.1066525	0.0548439	0.0082482	0.1350165	0.015287	0.0286941
C	0.0279505	0.190844		0.0538295	0.0030017	0.0187589	0.0034494	0.0664816
P	0.0452462	0.3198413	0.1943596		0.002219	0.0614826	0.0286515	0.0696334
BP	0.5505759	0.0619374	0.2200541	0.0254296		0.0196387	0.0195758	0.0106376
BE	0.1691377	0.2260829	0.0717226	0.0392754	0.0206482		0.0207546	0.0113162
PF	0.0216531	0.0882088	0.0331737	0.0299119	--	0.0100632		0.1251301
O	0.0160436	0.0507691	0.0711942	0.0092765	0.0015948	0.0547761	0.0065635	

Las transiciones seleccionadas para la simulación del modelo fueron las siguientes. En la simulación las probabilidades utilizadas son las de cambio anual.

Tabla 4. Probabilidades de cambio anual y por período completo por transición.

Cobertura inicial	Cobertura transformada	Probabilidad de cambio Período completo	Probabilidad de cambio anual
Bosque de encino	Matorrales	0.224314	0.015936
Bosque de encino	Cultivos	0.0717226	0.002745
Bosque de encino	Pastizales	0.0392754	0.002671
Matorrales	Bosque de encino	0.1350165	0.010248



Se proyectó la dinámica del CCUS para el año 2030. En la siguiente tabla y gráfica se presentan las extensiones de las clases para los años 1975, 2000 y 2030.

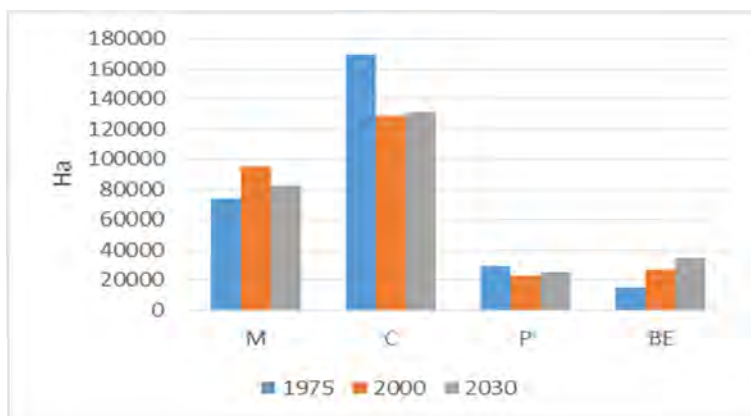


Figura 11. Comparación entre las distintas clases para los años 1975, 2000 y la simulación para el año 2030.

Se exhibe a continuación el resultado de la simulación para 30 años del CCUS en la cuenca. Hay que mencionar que se trata de treinta iteraciones y solo se muestra el mapa prospectivo de la 30ª iteración. En el caso de la integración con el submodelo de producción de carbón cada simulación determina la distribución de la biomasa proveniente de encinos en la cuenca.

En la primera figura (12) se observa el incremento de la cobertura de la clase “Bosque de encino” en un área seleccionada para poder apreciar el cambio, mientras en la segunda figura (13) se muestra el efecto de la disminución de la cobertura de ésta clase. Ambas representaciones son con la finalidad de demostrar que en el submodelo se simulan varios procesos de CCUS al mismo tiempo (tanto las transiciones que implican deforestación cómo revegetación).

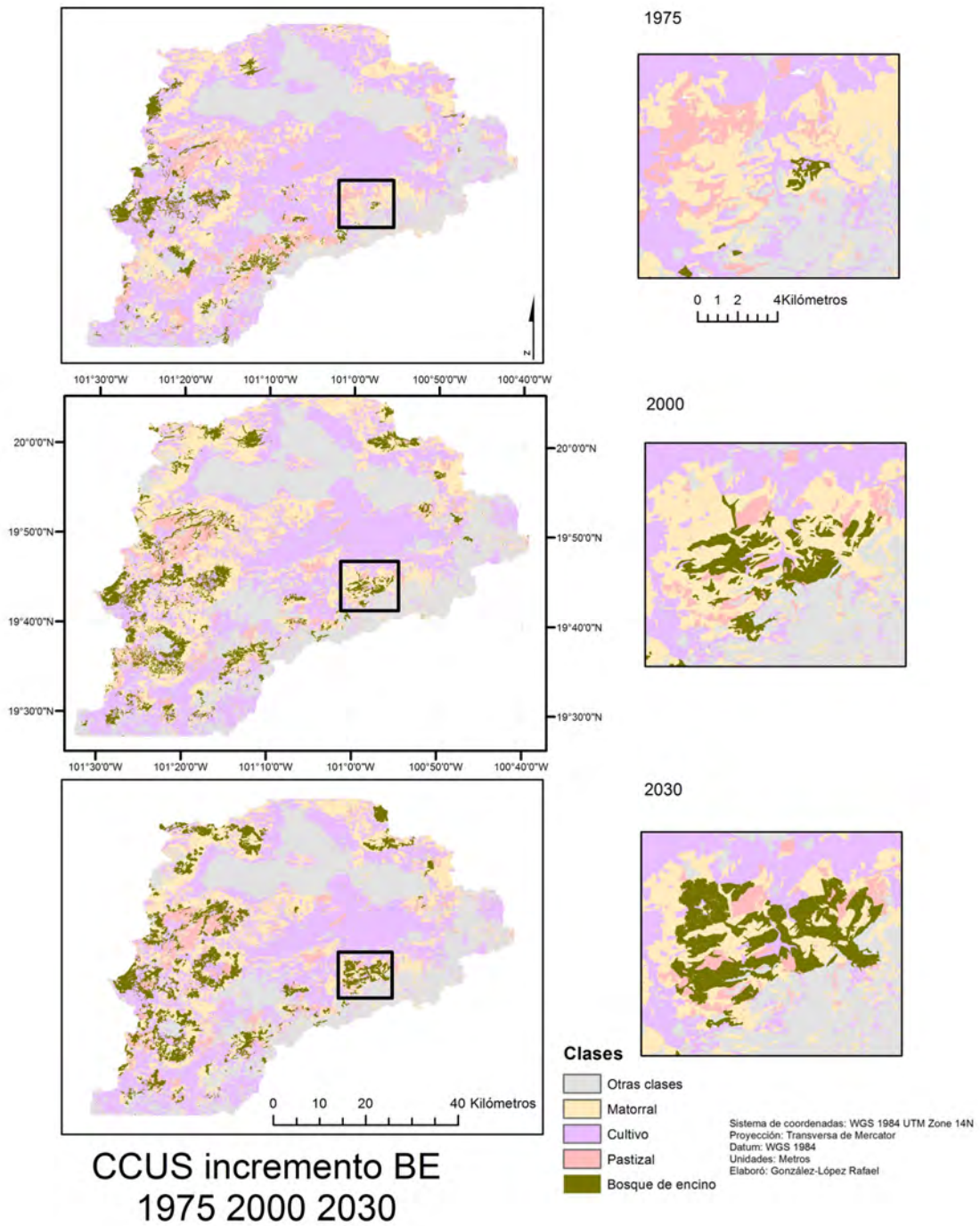


Figura 12. Cambio de cobertura y uso de suelo de las coberturas de los años 1975, 2000 y la cobertura simulada de 2030. Se representa el aumento de la cobertura Bosque de encino en cada acercamiento.

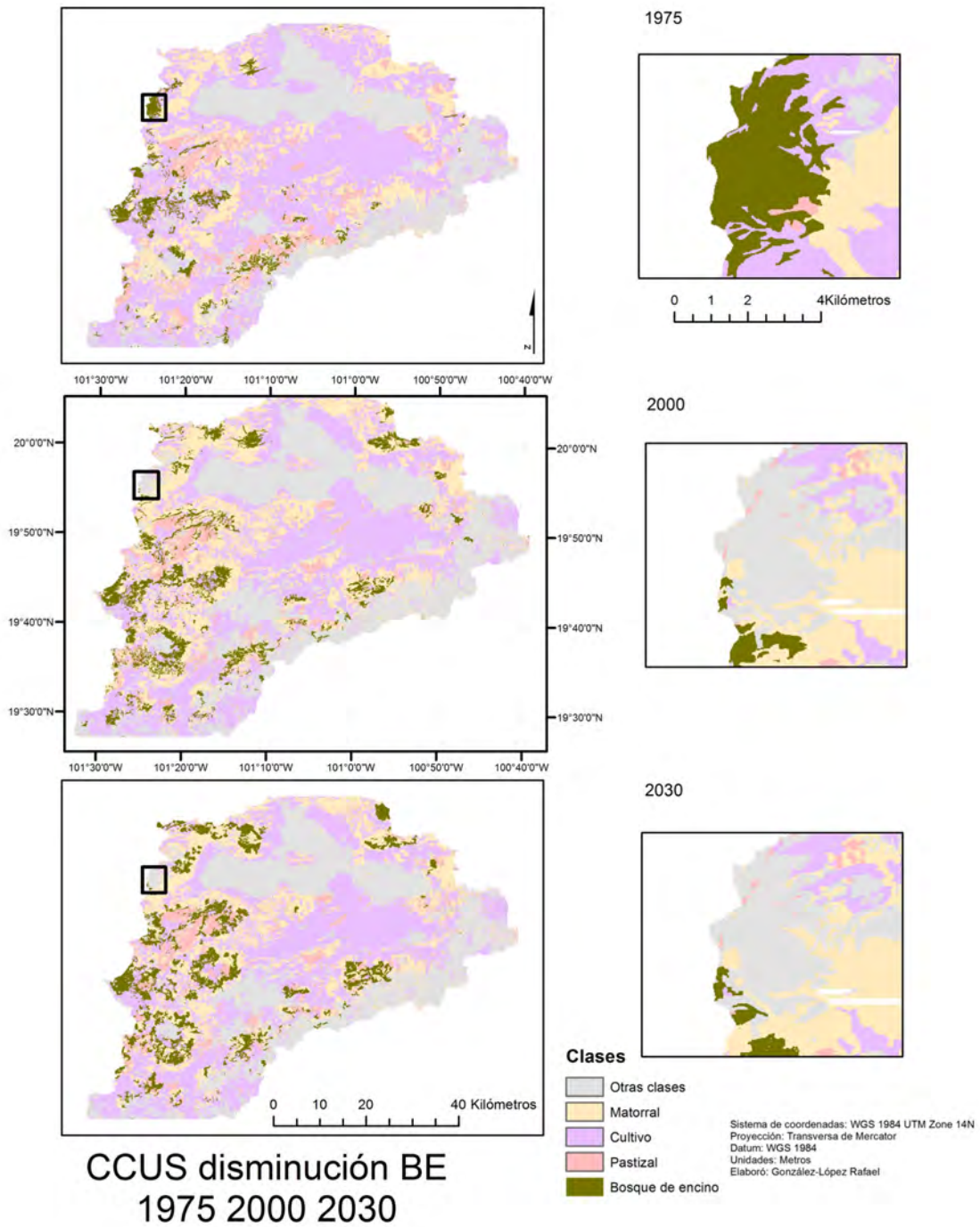


Figura 13. Cambio de cobertura y uso de suelo de las coberturas de los años 1975, 2000 y la cobertura simulada de 2030. Se representa la disminución de la cobertura Bosque de encino en cada acercamiento.

### **3.1.3.1 *Discusión y Conclusiones***

Se reclasificaron las clases pertenecientes a los años 1975 y 2000 reduciéndose a clases comparables, debido a que para el año 1975 existían 32 clases mientras para el año 2000, 43 (véase anexos). Por ejemplo para el año 1975 existían las clases “bosque de encino abierto” y “bosque de encino cerrado”, mientras para el año 2000 existían las clases bosque de encino abierto, cerrado y semiabierto, por lo que todas estas clases se reclasificaron a “bosque de encino” (todas las reclasificaciones se encuentran en anexos). Las transiciones seleccionadas fueron aquellas consideradas más importantes en la dinámica de los bosques de encino en base a las probabilidades obtenidas en la matriz de transición y a que las transiciones fueran consideradas posibles o verosímiles.

No se contó con un tercer mapa de cobertura y uso de suelo para la cuenca con el cual se pudiese validar el modelo de cambio.

En cuanto a la confusión en la clasificación de matorral con encinares recién cosechados, pueden existir errores de comisión/omisión los cuales afectan la distribución de los encinares proyectados al 2030. Por lo tanto es necesario un análisis más detallado de los mapas de cobertura y uso de suelo que permita esclarecer la transición de matorral (confundido como encinar cosechado) a bosque de encino. En el caso de la tesis se decidió permanecer con esta transición, ya que esto permite que exista una clase que retroalimente a la clase bosque de encino y no sólo existan transiciones hacia la deforestación.

Del submodelo de CCUS se puede concluir que las clases que modifican de manera importante la dinámica de los bosques de encino son las transiciones a áreas de cultivo, matorral y pastizal, así como la transición de matorral a bosque de encino. El cambio de cobertura y uso de suelo determina la disponibilidad de la madera para producir carbón vegetal así como la biomasa total en la cuenca a través de la modulación de la dinámica de los bosques de encino.

## 3.2 SUBMODELO DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN VEGETAL

### 3.2.1 Introducción

La gran mayoría de producción de carbón vegetal en la cuenca es a partir del manejo no regulado (i.e. sin programas de aprovechamiento registrados) de los bosques de *Quercus* (encinos). Por lo tanto, no existen fuentes de información oficiales o confiables acerca del volumen de la producción de carbón. Un estudio previo, basado en encuestas a hogares determinó la demanda de la ciudad de Morelia, la cual se extrapoló a las ciudades de la cuenca con más de 5 000 habitantes obteniendo 2 606 tCv (Ghilardi, *in prep*). Este valor es congruente con una estimación previa a nivel nacional en donde se reporta un consumo total para el estado de Michoacán de 14 000 toneladas métricas de carbón (tCv). Esto resulta para la cuenca en una demanda de 3 640 tCv, lo cual en cantidad de biomasa es equivalente a un rango de entre 11 742 a 20 222 tMseq (Masera *et al.*, 2010). La diferencia entre ambos estudios radica en que el segundo incluye el carbón empaquetado de procedencia legal y que proviene en su totalidad de afuera de la cuenca.

### 3.2.2 Métodos

Gracias a la flexibilidad del modelador ambiental DINAMICA EGO se simuló la cosecha de madera de encino apta para producción de carbón vegetal de acuerdo con las estimaciones de consumo de carbón en la cuenca, las preferencias de los carboneros para producir carbón así como el crecimiento de la biomasa a través de una función de crecimiento.

#### 3.2.2.1 Insumos

En la siguiente tabla se explican los insumos utilizados para poder realizar el submodelo de producción de carbón.

Tabla 5. Insumos para el submodelo de producción de carbón vegetal.

Mapa de la distribución de biomasa de madera de encino útil para producir carbón vegetal (MUC)	Es la cantidad de madera disponible en la cuenca apta para poder producir carbón vegetal en base al trabajo de Castillo-Santiago <i>et al.</i> (2013). En donde mediante información de la biomasa en parcelas experimentales se extrapoló a partir de imágenes Landsat y Spot los valores de biomasa para toda la cuenca.
Demanda	Los datos de demanda utilizados fueron de 26000 tMseq que equivale aproximadamente a 2600tCv asumiendo una eficiencia de conversión del 10%.
Mapa de la preferencia de los carboneros para construir hornos y producir carbón.	Realizado a partir de un mapa de costo-distancia a localidades. El mapa representa las preferencias de los carboneros por ciertos sitios para montar los hornos y producir carbón. Estas preferencias se estimaron en función del acceso físico que tienen los carboneros a los bosques de encino y de la

	cercanía a los centros de venta y consumo final, como por ejemplo, a la ciudad de Morelia.
Tasa de crecimiento vegetativo (i.e. por rebrote) de <i>Quercus spp.</i>	En base a los estudios realizados por Aguilar et al. (2012).

### 3.2.2.2 Construcción del modelo

#### 7.- Integración del submodelo de CCUS y submodelo de producción de carbón vegetal.

El modelo completo es iterativo, ya que se realizan todas las operaciones hasta cumplir el total del período a analizar mediante las proyecciones a futuro, por lo que cada paso generado en cada inciso se repite n veces hasta cumplir su función.

El primer paso de este submodelo es integrar la dinámica espacial de los bosques de encino debida a cambios de cobertura y uso del suelo por razones ajenas a la producción de carbón. Los mapas anuales prospectivos de la distribución de bosques de encino producidos por el submodelo de CCUS se evalúan para cada paso de tiempo con el fin de identificar presencia o ausencia de encinos, como un primer filtro en la identificación de lugares aptos para la producción de carbón vegetal.

Primero se identifica mediante una condición en qué píxeles del mapa anual proyectado de cobertura y uso del suelo existen encinos (i.e. mapa de presencia/ausencia). De haber encinos la probabilidad de que se produzca carbón dependerá entonces del mapa de biomasa (MUC) y el de preferencias como se explica más adelante. De lo contrario, la probabilidad de que se produzca carbón se vuelve nula hasta el siguiente paso de tiempo o ciclo donde se evalúa un nuevo mapa de cobertura y uso del suelo, como se muestra en la figura 14.

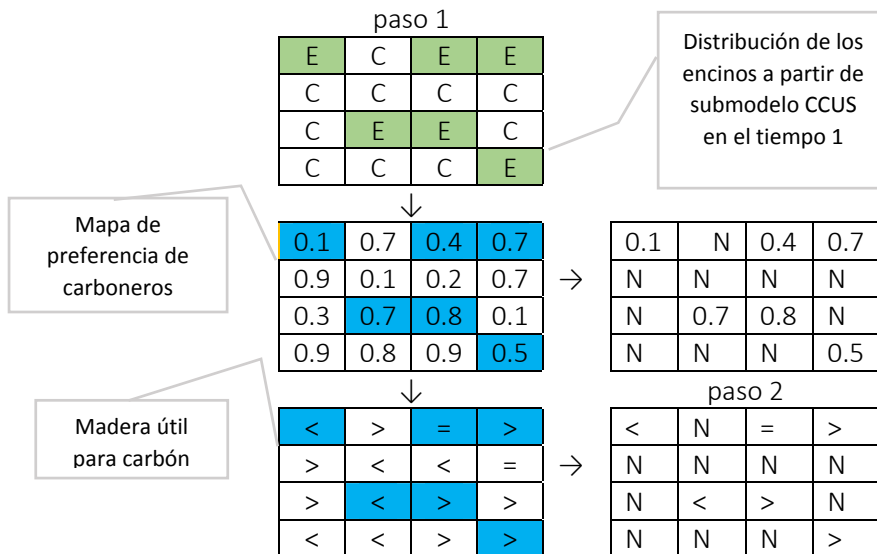


Figura 14. en el tiempo t el mapa de distribución de los encinos proveniente del submodelo de CCUS identifica los píxeles en el mapa de preferencia de carboneros y el mapa madera útil para carbón que coinciden con la distribución de los encinares determinada por el submodelo de CCUS, convirtiendo en valores nulos (tiempo 2) los píxeles que no coincidieron.

### 8.- Selección de los sitios de cosecha de madera y producción de carbón

Se necesitan como mínimo 3,000 kgMSeq para obtener 300kg de carbón según las eficiencias de conversión conservadoras que se asumieron para los hornos de tierra tradicionales. Los leñadores no hacen hornos de menos de 300 o 500 kgCv porque de lo contrario el trabajo no les rinde. Así mismo, estudios previos han mostrado que la madera muy pocas veces se acarrea desde más de 15 o 20 metros porque es muy laborioso mover los troncos de encino cuando están recién cortados y húmedos. Si los píxeles tienen 25x25, la distancia del centro a las esquinas es de 17.5 metros, y la podemos usar como límite. Es decir, por cada píxel de 25x25 los carboneros harían por lo menos un horno de 300 kgCv para lo cual necesitan un mínimo de 3,000 kgMSeq en pie. Si hubiera más madera el modelo presupone que se construyen más hornos o más grandes, que es lo que ocurre en la realidad. En este segundo paso, el modelo busca en el mapa de biomasa píxeles con al menos 3000 kgMSeq de lo contrario, y al igual que en el paso anterior, la probabilidad de que se produzca carbón en esos píxeles se vuelve nula hasta el siguiente paso temporal o ciclo como se muestra en la figura 15.

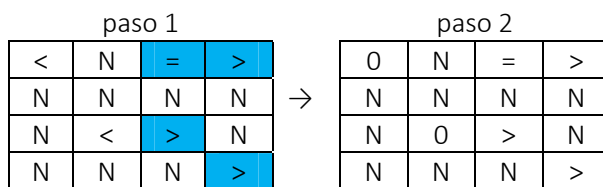


Figura 15. En el paso 1 se seleccionan de azul los sitios que contienen igual o mayor cantidad de biomasa necesaria para construir un horno. En el paso 2 los sitios que no cumplen, quedan en 0.

### 9.- Proyección de la cantidad de madera cosechada

Antes de proyectar cuanta madera puede ser cosechada para producir carbón en los sitios seleccionados, el modelo evalúa si el total disponible en la cuenca, es decir, en todos aquellos píxeles con al menos 3,000 kgMSeq de madera de encino útil para carbón, es suficiente para cubrir la demanda. Esto es para naturalmente evitar que el modelo intente cosechar más madera de la que hay disponible para la producción de carbón vegetal.

Posteriormente, el modelo comienza a seleccionar los píxeles “cosechables” para un mismo paso temporal (i.e. aquellos con al menos 3 000kgMS de madera de encino útil para carbón) en función del mapa de preferencias de los carboneros. Para cada píxel, el modelo cosecha toda la madera de encino presente, que es como ocurre en la gran mayoría de los casos en la realidad. Es decir, casi no se han reportado casos de tala selectiva, salvo en bosques muy densos -que son pocos, justamente porque esa práctica requiere de mayor esfuerzo porque hay que acarrear troncos desde más lejos, y porque los carboneros tampoco la identifican como ambientalmente más “sustentable” en comparación con la tala rasa. Cuando la cosecha acumulada de madera llega a igualar la demanda anual de carbón (i.e. de madera para carbón) el modelo pasa al siguiente paso.

Como se mencionó anteriormente, si el modelo sólo tomara en cuenta el mapa de preferencias, el cual es estático en el tiempo, siempre se seleccionarían los mismos píxeles cosechables, una y otra vez. Es decir, sería una selección determinística de los sitios, lo que no concuerda con la realidad. Para realizar la cosecha, el modelo utiliza un operador denominado



“patcher” (selección por parches), el cual en términos generales elige al azar los píxeles a ser cosechados. Cuando se configura el operador para que funcione de manera completamente aleatoria, cualquier píxel cosecharle puede ser elegido. A medida que la selección tiende más hacia lo determinista y menos hacia a lo aleatorio, los píxeles con valores más altos en el mapa de preferencias, tienen mayores probabilidades de salir sorteados.

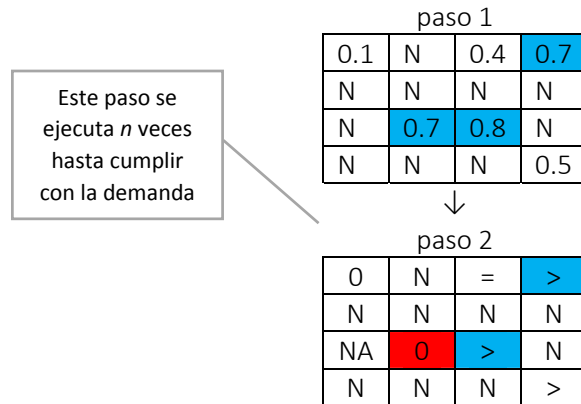


Figura 16. En el primer tiempo están en azul los píxeles con mayor preferencia para ser cosechados. En el segundo paso se encuentran seleccionados de azul los píxeles que coinciden con los de mayor preferencia y que tienen la cantidad necesaria para producir un horno. En cambio los píxeles con alta probabilidad pero que no cuentan con la cantidad necesaria de biomasa para construir un horno no se seleccionan (en el paso 2 se encuentra iluminado de rojo). Esto se repite hasta alcanzar la demanda anual.

### 10.- Identificación de sitios cosechados

Es necesario identificar los lugares cosechados para simular el rebrote de los encinos en los lugares en donde existió producción de carbón vegetal, y se mantenga el crecimiento en los sitios no cosechados.

En esta operación se resta el mapa binario de cosecha que proviene del paso anterior con un mapa binario de la distribución de encinos –producto del modelo de CCUS-. Por lo que resulta un mapa en donde “0” son los sitios cosechados y “1” los sitios que permanecen. Después al mapa de “1” se le asigna el valor de biomasa para cada píxel.

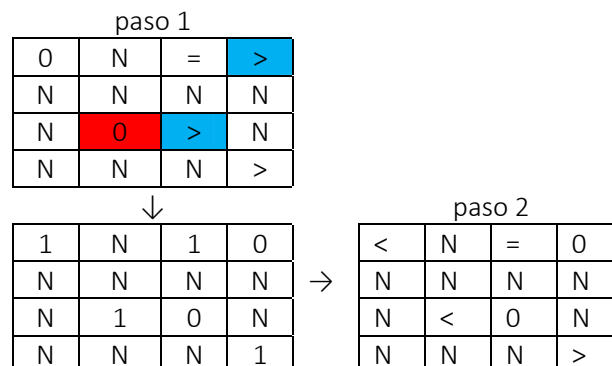


Figura 17. En el paso 1 los píxeles cosechados en azul, pasan a ser 0, para indicar que fueron cosechados. Después a los sitios que no fueron cosechados se vuelve a asignar su valor de biomasa en el paso 2, para que después con la función de crecimiento sigmoidea comiencen desde el valor de biomasa que tenían, así como los lugares cosechados comiencen a rebrotar.



### 11.- Crecimiento de los rebrotes

El último paso del modelo para cada iteración anual consiste en modelar el crecimiento por rebrote de los encinos remanentes del paisaje según una función sigmoidea, parametrizada a partir de datos previos de cronosecuencias generados por Aguilar *et al.* (2012) . Dado que los bosques de encino de la cuenca se encuentran manejados desde mucho tiempo atrás, no es sencillo estimar su capacidad máxima de acumulación de biomasa, o de madera para producir carbón. Se utilizaron tres supuestos de capacidad de carga (cantidad de madera que puede soportar un área): 1) constante a 80 000 t por hectárea que es un valor cercano al máximo encontrado en los bosques de la zona, 2) la misma madera útil para carbón (MUC) presente por hectárea al 2010, lo cual asume que los bosques al 2010 estaban en su capacidad de carga, y 3) el mapa de MUC más una constante de 20 000 t por hectárea (MUC + 20 000 t).

### 12.- Biomasa aérea total

Se cuenta cual es la biomasa total restante, incluyendo la biomasa perdida por cambio de cobertura. Con esto se determina la cantidad de biomasa disponible para el siguiente año y el modelo vuelve a funcionar durante el periodo de tiempo especificado para realizar el estudio.

La información de la biomasa restante se obtiene después del crecimiento sigmoideo y de la modificación proveniente del cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS).

#### **3.2.2.3 Generación de modelo neutro**

Se realizó un modelo en el cual no existe efecto tanto del cambio de cobertura y uso de suelo ni producción de carbón vegetal. Por lo tanto el único proceso que se lleva a cabo en este modelo es el aumento de la biomasa al únicamente operar la función de crecimiento, la cual está determinada por la capacidad de carga y la tasa de crecimiento. La manera de construirlo fue eliminando las transiciones del submodelo de CCUS y anulando la demanda anual de carbón vegetal.

#### **3.2.2.4 Síntesis del modelo**

El modelo que anida a ambos submodelos es presentado en el diagrama de flujo 1, donde cada paso importante indicado con un número es descrito en cada *Método* de los submodelos de los incisos 3.1 y 3.2.

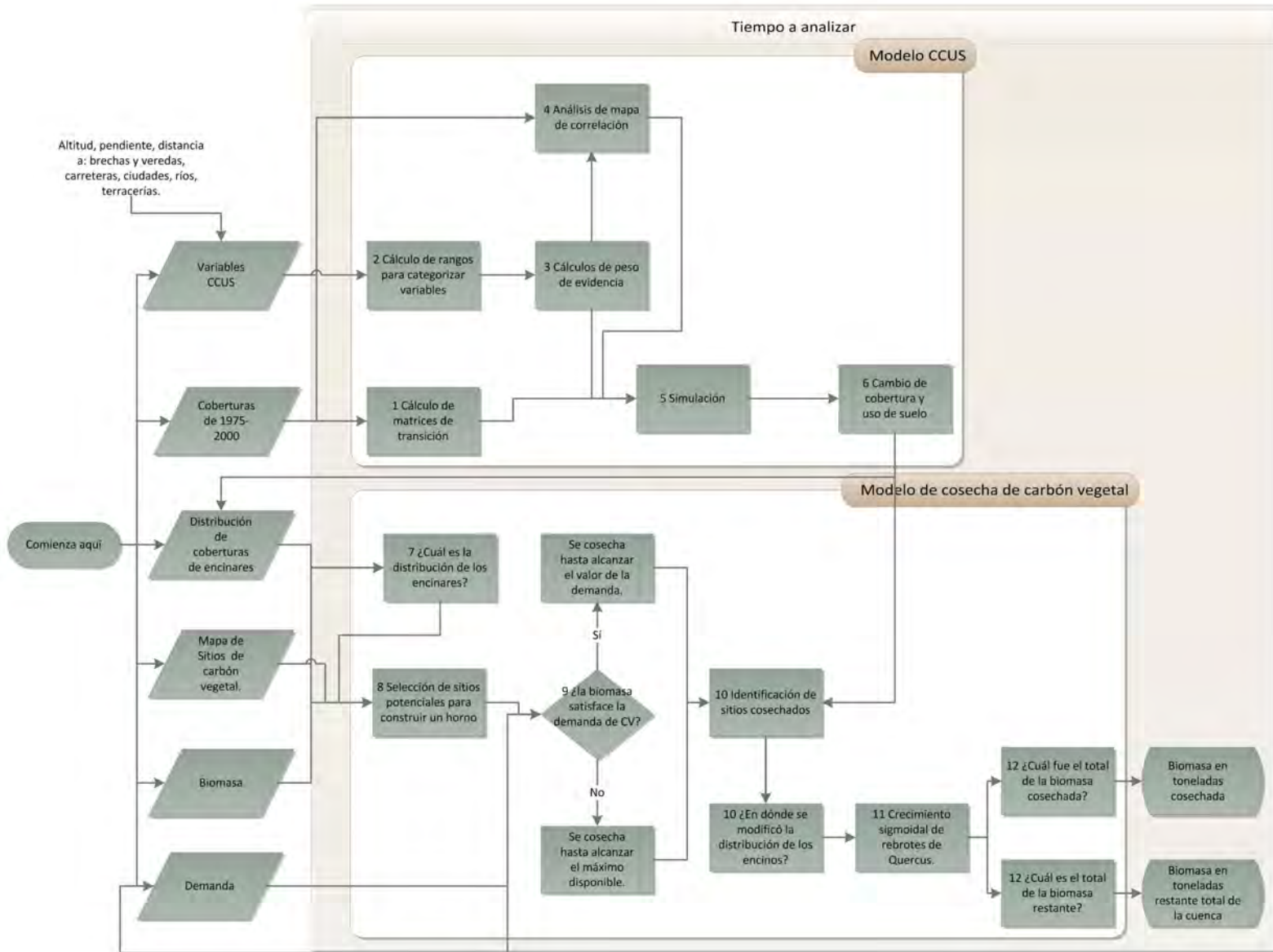


Diagrama de flujo 1. Se presenta la síntesis del funcionamiento del modelo, el cual engloba a los submodelos de CCUS y el de producción de carbón vegetal.

### 3.2.3 Resultados

Se exhibe el funcionamiento del submodelo de CCUS en la biomasa aérea disponible para producir carbón vegetal. En CCUS 1 no existe el parche de "Bosque de encino" que se añade en CCUS2, por lo que en BA2 los encinares comienzan su crecimiento desde cero. Se aprecia en BA2 (biomasa aérea) el nuevo parche de color verde lo cual representa cero en la escala de color en el recuadro de acercamiento y que comenzará a crecer en función de la capacidad de carga y la tasa de crecimiento.

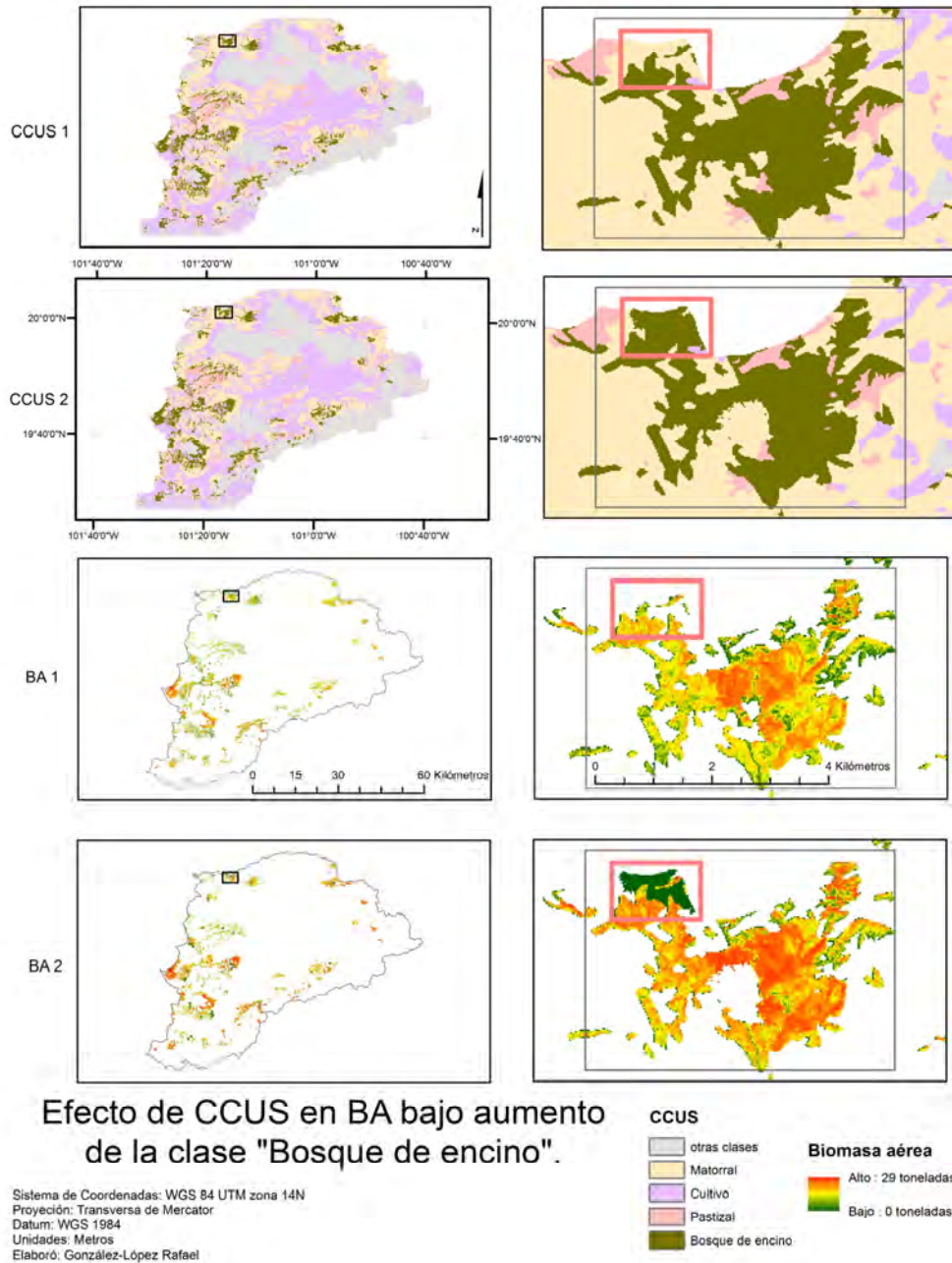


Figura 18. Efecto del aumento de la clase "Bosque de encino" debido al cambio de cobertura y uso de suelo en la biomasa aérea disponible para la producción de carbón vegetal. BA=biomasa aérea La distancia temporal entre BA1 y BA2 es de un año.

Por el contrario de la figura anterior en el siguiente caso se presenta qué pasa cuando se reduce la extensión de la clase “Bosque de encino” sobre la biomasa aérea disponible (cuando se transforma a otra clase –se deforesta-). En CCUS2 se reduce un porcentaje de la extensión a causa del crecimiento de la clase “Matorral”, lo cual reduce la cantidad de biomasa aérea disponible en BA2. En BA2 desaparece un parche que existía en BA1, producto de su desaparición en el cambio de CCUS1 a CCUS2.

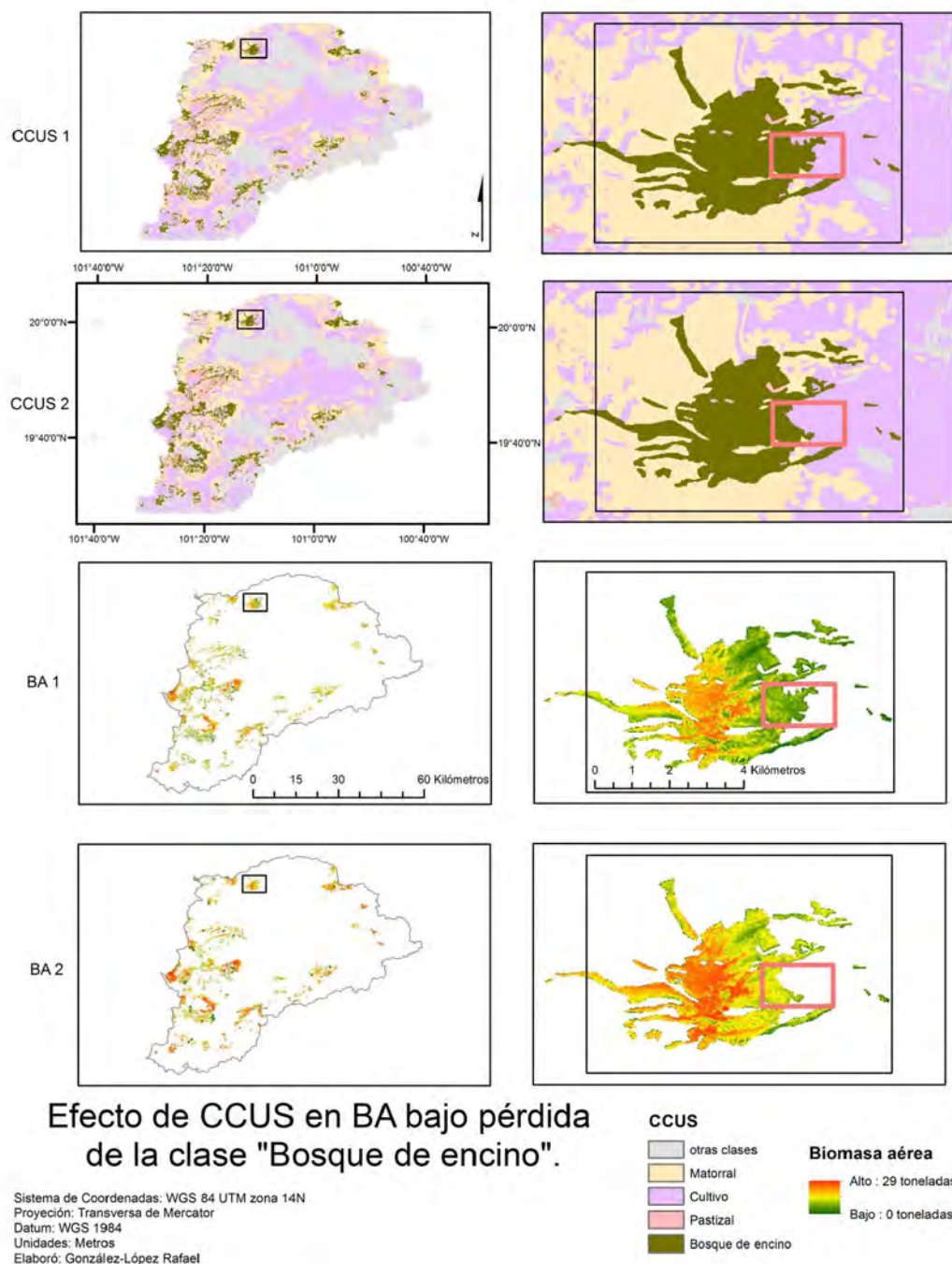


Figura 19. Efecto de la reducción de la clase “Bosque de encino” debido al cambio de cobertura y uso de suelo en la biomasa aérea disponible para la producción de carbón vegetal. BA= biomasa aérea.



En la siguiente figura se expone el efecto de la cosecha en la biomasa aérea disponible. En BA1 se observa la biomasa aérea antes de ser cosechada. La cosecha se determina por la preferencia de los carboneros y la cantidad de biomasa para poder construir un horno (El recuadro azul indica el área de interés en el mapa de "Cosecha"). En BA2 se puede observar como el área cosechada obtiene el valor de cero (color verde que representa el valor más bajo en la leyenda de "Biomasa aérea"). En esta área comenzará el rebrote de los encinares en función de la capacidad de carga y la tasa de crecimiento de los rebrotes.

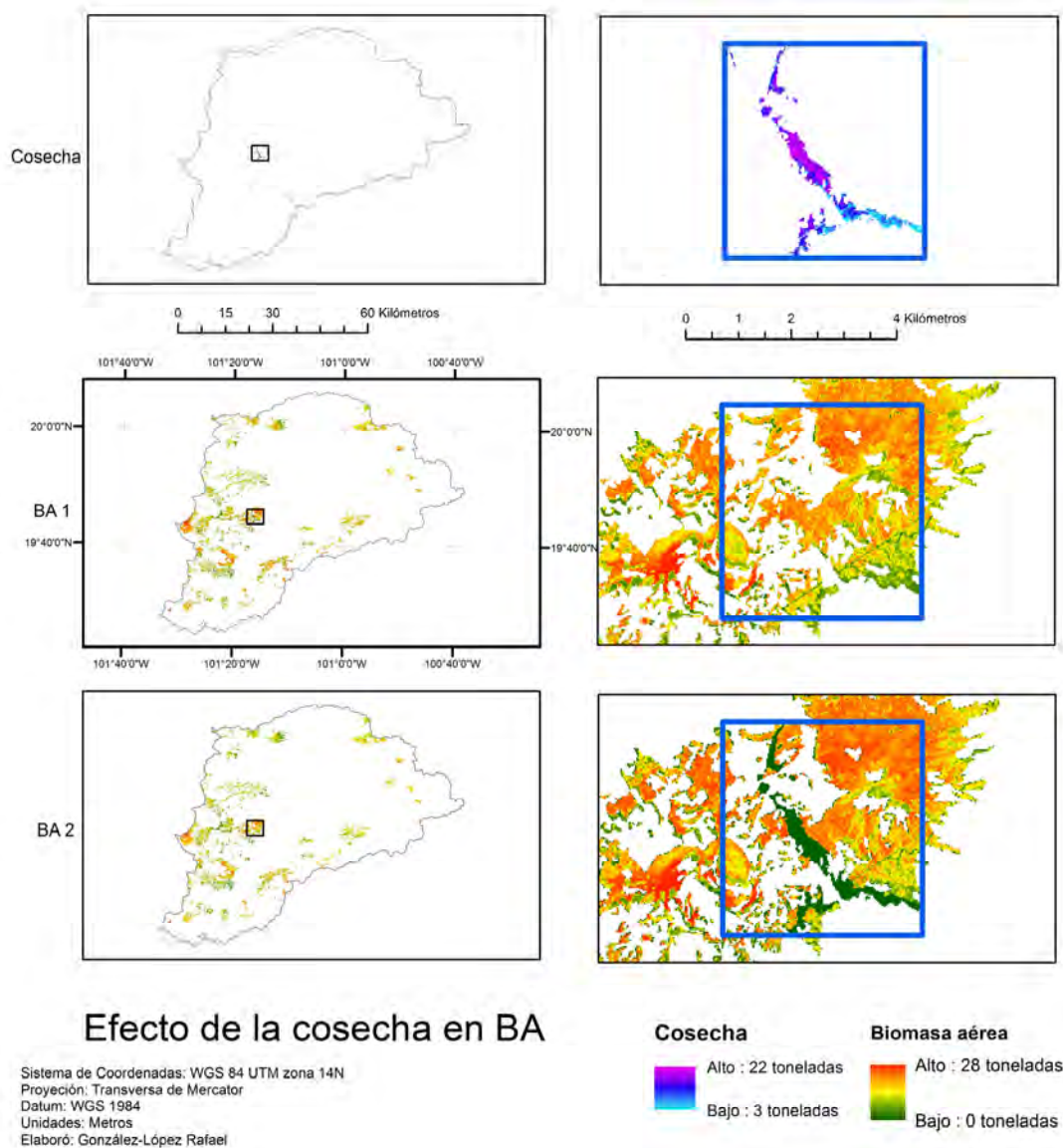


Figura 20. Efecto de la cosecha en la biomasa aérea disponible. Dentro del recuadro azul se presenta la biomasa cosechada para producir carbón vegetal. En BA1 se puede observar la biomasa antes de ser cosechada, mientras en BA2 se observa el efecto en la biomasa después de ser cosechada (el sitio obtiene el valor de cero, lo cual con el rebrote incrementará su biomasa de no ser que el CCUS lo transforme en otra clase).

Se presentan los escenarios proyectados a treinta años con variaciones en la capacidad de carga, en el cambio de cobertura y uso de suelo, y en la producción de carbón vegetal con la finalidad de comprender el funcionamiento y ver el impacto del submodelo en la biomasa disponible en la cuenca. En la siguiente tabla se muestran los criterios que se utilizaron para generar las combinaciones de los distintos escenarios.

*Tabla 6. Criterios utilizados en la generación de escenarios.*

+carbón	Presencia de producción de carbón vegetal
-carbón	Ausencia de producción de carbón vegetal
+CCUS	Presencia de cambio de cobertura y uso de suelo
-CCUS	Ausencia de cambio de cobertura y uso de suelo
neutro	Modelo neutro para cada capacidad de carga
80	80 000 toneladas por hectárea de capacidad de carga.
MUC	La capacidad de carga la determina la cantidad de biomasa que se tiene del mapa MUC
MUC+20	La capacidad de carga la determina la cantidad de biomasa que se tiene del mapa MUC más 20 000 toneladas

Las combinaciones que se utilizaron fueron las siguientes:

*Tabla 7. Escenarios generados a partir de la combinación de distintos criterios.*

ESCENARIOS			
+carbón+CCUS_MUC	-carbón+CCUS_MUC	+carbón-CCUS_MUC	neutro_MUC
+carbón+CCUS_MUC+20	-carbón+CCUS_MUC+20	+carbón-CCUS_MUC+20	neutro_MUC+20
+carbón+CCUS_80	-carbón+CCUS_80	+carbón-CCUS_80	neutro_80

En la primera gráfica se muestra la suma de la biomasa al 2030 para cada escenario. Existe el mismo patrón del efecto de la presencia/ausencia de producción de carbón vegetal así como del cambio de cobertura y uso de suelo, la diferencia radica en la capacidad de carga utilizada, siendo mayor la cantidad de biomasa fija a 80 000 t, seguida por MUC+20 000 t y por último MUC.

El impacto negativo en la biomasa es mayor cuando ocurre el cambio de uso de suelo aunado a la producción de carbón, seguido de cuando sólo opera el cambio de uso de suelo y por último la producción de carbón vegetal aislada. El modelo neutro siempre presenta mayor cantidad de biomasa ya que sólo existe crecimiento de los rebrotes.

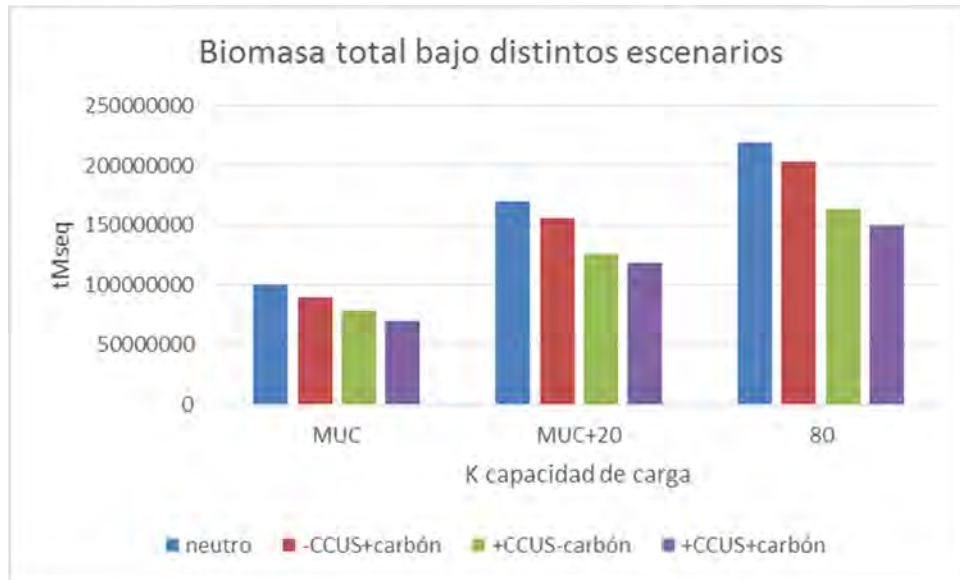


Figura 21. Biomasa total bajo distintos escenarios. A manera de resumir los datos para cada escenario se sumó la biomasa para cada escenario y se presenta en tres bloques definidos por la capacidad de carga.

En la siguiente figura se muestran las trayectorias de la biomasa para los distintos escenarios proyectados a 30 años. Igual que en la figura anterior el mayor impacto lo ocasiona el CCUS aunado a la producción de carbón vegetal, seguido por el CCUS aislado, después la producción de carbón sin CCUS y por último la inexistencia del CCUS y de la producción de carbón vegetal (modelo neutro). La única variación es entre las distintas capacidades de carga.

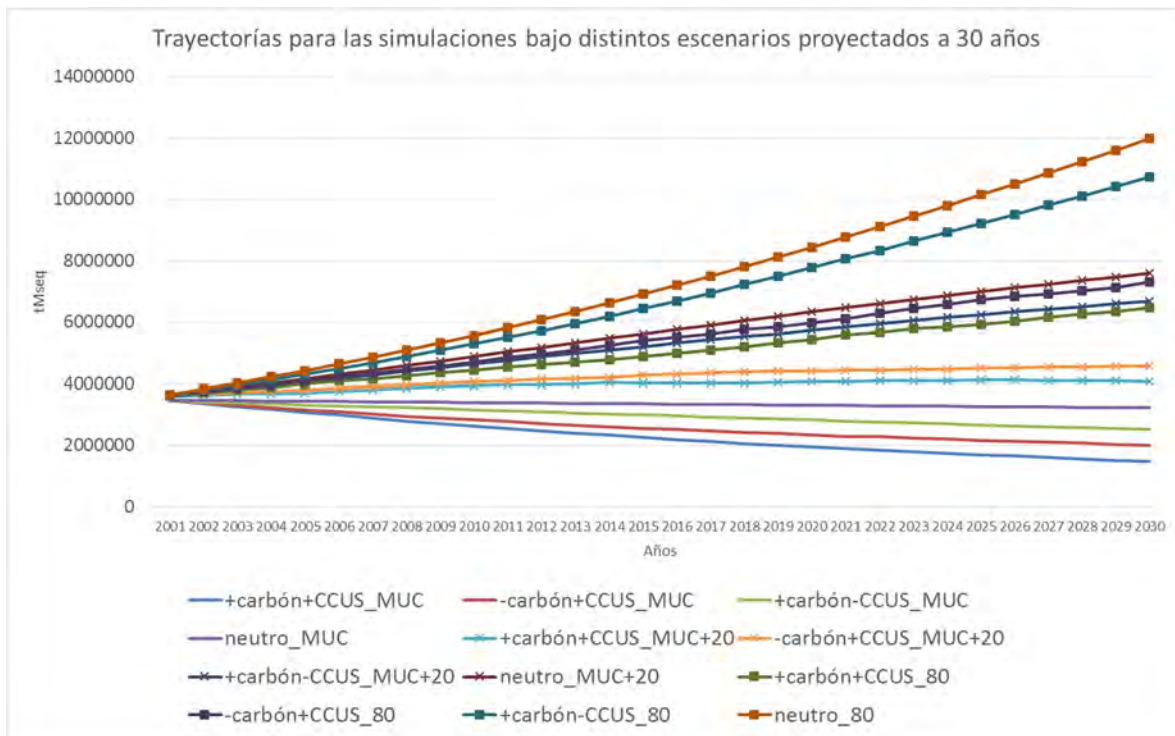


Figura 22. Trayectorías de las simulaciones bajo distintos escenarios proyectados a 30 años.

### 3.2.3.1 *Discusión y conclusiones*

Tanto la producción de carbón vegetal como el CCUS alteran la trayectoria determinada mayormente por la capacidad de carga supuesta. Esto complica la interpretación del rol real que estarían jugando ambas dinámicas en la permanencia en el largo plazo de los bosques de encino de la cuenca. Cuando se comparan por separado escenarios con una misma capacidad de carga, se puede ver que la producción de carbón (+carbón) tiene un menor efecto comparado con el CCUS (+CCUS) lo que se discute adelante de forma más detallada.

Con respecto a la capacidad de carga las trayectorias muestran la necesidad de realizar estudios sobre ésta variable si se quiere tener información más precisa sobre la dinámica de los bosques de encino. Es decir la capacidad de carga es un parámetro que debe de ser ajustado para cada zona de estudio en donde se utilice este modelo. Se argumenta que es independiente al funcionamiento del modelo ya que en todos los escenarios con distintas capacidades de carga el mayor impacto lo ocasiona el CCUS aunado a la producción de carbón vegetal, seguido por el escenario de CCUS sin producción de carbón vegetal y por último el escenario en donde solo existe producción de carbón vegetal. De la misma forma el escenario neutro con cualquier capacidad de carga se mantiene como el escenario en donde existe mayor cantidad de biomasa debido a que sólo opera la función de crecimiento sin CCUS ni producción de carbón vegetal. Una aproximación metodológica a este problema podría consistir en evaluar la variación espacial de biomasa aérea en encinares relativamente conservados y bajo condiciones biofísicas disímiles. Esto requiere de un esfuerzo de campo considerable, pero aportaría información muy valiosa para seleccionar sitios donde un manejo eficiente de los bosques tendría las mayores probabilidades de éxito en términos del potencial de revegetación.

Aunque la cobertura de los bosques de encino aumenta entre los años 2000 y 2030 (Figura 11), la biomasa disminuye en los escenarios que incluyen al CCUS en comparación con aquellos que no lo hacen. Esto responde al hecho de que cuando un píxel de encino cambia a otro uso, la biomasa de encino naturalmente se pierde, pero además, cuando un área de otro uso se transforma en encino, el modelo le asigna una biomasa inicial muy baja, lo que resulta en un crecimiento sumamente lento durante los primeros años; de hecho, una nueva área de encino difícilmente va siquiera a llegar a los 3 000kgMS necesarios para que sea cosechable en el periodo de simulación. Al incorporar el CCUS en la modelación, lo que afecta mayormente al valor de biomasa total es la pérdida del área con encinos (que afecta negativamente a la biomasa total), y muy poco los nuevos parches de encino que aparecen (que afecta positivamente a la biomasa total). En otras palabras, aunque son más los píxeles que pasan de otros usos y coberturas a encino, que los que pasan de encino a otros usos y coberturas (Figura 23), la biomasa total desciende porque el crecimiento en los parches nuevos de encino es muy lento. Este criterio responde a que se asume que un parche nuevo de encino tarda tiempo en establecerse y comenzar a crecer. Por la manera en que funciona el modelo, el mapa de coberturas gana y pierde encinos de manera discreta en cada paso de tiempo: mientras un píxel cosechado para carbón mantiene los tocones con sus sistemas radiculares y por lo tanto un alto potencial de revegetación, otro píxel nuevo de encino debería albergar unos pocos árboles que se habrían establecido a través la dispersión y germinación de bellotas, compitiendo a la vez con otras especies, lo que naturalmente no permite un crecimiento comparable a un encinar recientemente talado. Idealmente, sería prudente asignar tasas de crecimiento a éstos encinares nuevos que se correspondan con aquellas observadas en reforestaciones, pero dicha información no



está disponible para la zona de estudio por lo que se prefirió asumir un valor inicial de biomasa suficientemente bajo para que el crecimiento de los primeros años sea muy lento.

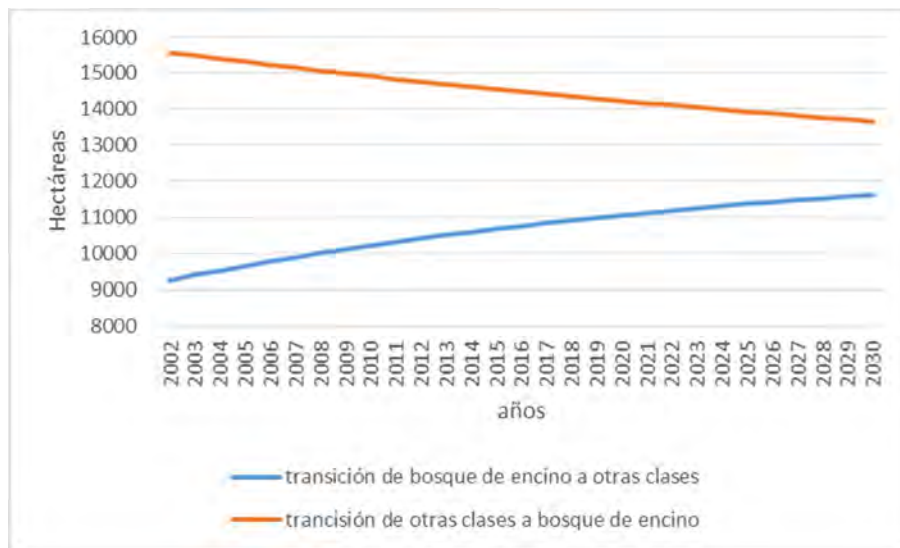


Figura 23. Dinámica de la clase "bosque de encino".

Para concluir se encontró que independientemente de la información sobre la capacidad de carga, el cambio de cobertura y uso de suelo es el principal agente que contribuye a la dinámica de los bosques de *Quercus* en la cuenca. La producción de carbón vegetal afecta negativamente la cantidad total de biomasa en la cuenca, por ser una causa de degradación de los bosques de encino. Sin embargo, durante el periodo de simulación, ningún escenario llega al equilibrio, ya sea estabilizándose en algún valor casi-constante de biomasa total, o bien de agotamiento de los bosques. Esto no permite valorar el impacto real de la producción de carbón o del CCUS, por sobre la variación que supone los escenarios alternativos en la capacidad de carga. De cualquier manera, estos resultados son un primer indicio de que al suprimir la producción de carbón y el CCUS, se esperarían condiciones de equilibrio donde el paisaje albergue un mayor contenido de madera de encino útil para la producción de carbón.

Dado que, suprimir la producción de carbón o el CCUS son escenarios alternativos inverosímiles, se explora en el siguiente capítulo el efecto de introducir hornos mejorados para producir carbón, y alteraciones en las probabilidades de transición del modelo de CCUS que reflejen un manejo del paisaje que tienda a la recuperación de las superficies boscosas por sobre los matorrales y las áreas de cultivo.

## 4 ESCENARIOS

---

### 4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se generaron distintos escenarios modificando los parámetros del modelo en donde se precisa el efecto de la ausencia o presencia de toma de decisiones. En la introducción del submodelo de Cambio de Cobertura y Uso de Suelo se definieron las causas que modifican la manera en la que operan los actores locales como causas subyacentes (*i.e.* factores demográficos, económicos, tecnológicos y político-institucionales).

Dentro de estas decisiones se incorporan escenarios de restauración, deforestación, conservación y qué pasaría si se decide mejorar la tecnología para producir carbón vegetal. En ocasiones se combinan escenarios que incorporan tanto mejoría en el manejo de la tierra como en las tecnologías de producción.

### 4.2 MÉTODOS

Para poder generar los escenarios es necesario modificar los parámetros del modelo que tengan que ver con el efecto del CCUS y de la producción de carbón en la biomasa disponible.

En la tabla se presentan los parámetros que se pueden modificar y así generar distintos escenarios. Se describe de manera general el parámetro y el efecto que su modificación podría llegar a tener en la dinámica de la biomasa de la cuenca. Cabe destacar que muchos de los valores que se usan en este escenario son suposiciones de cómo podría verse modificado cada parámetro. En muchas ocasiones el obtener información de cada parámetro requiere mayor investigación. Es aquí en donde podemos encontrar el papel del modelo para saber qué información de campo es más crucial para entender mejor la dinámica de la producción del carbón en la cuenca. Aunque también se cumple con la tarea de ser una herramienta didáctica en la cual un tomador de decisiones evalúe qué pasaría si se lleva a cabo un plan de manejo o ante la ausencia del mismo.

*Tabla 8. Parámetros del modelo. Mediante la modificación de estos parámetros se pueden generar distintos escenarios "que pasaría si...", en donde se puede evaluar los posibles efectos de la toma o la ausencia de tomas de decisiones.*

Parámetros	Descripción	Efecto
Probabilidades de transición.	Se obtienen a partir del cálculo de matrices de Markov y es la probabilidad de que una clase de cambie a otra en un período de tiempo.	Al modificar estas probabilidades se pueden generar escenarios que se vean reflejados en el submodelo de cambio de uso de suelo. Permitiendo generar escenarios de conservación o deforestación. Por otra parte se puede anular el efecto del CCUS y así obtener un modelo neutro.
Madera necesaria para construir un horno.	En base al horno a evaluar, se decide cuánta madera es necesaria para poder construir un horno en una hectárea. Este valor varía dependiendo del tipo de horno. Ya que un horno	Aquí se puede modificar la cantidad de biomasa necesaria para generar un horno. Dependiendo de la eficiencia del horno es el valor de leña necesario para que la producción sea redituable. Existen hornos que utilizan menos leña para

	tradicional necesita 3 tMseq para producir 1 t de Carbón.	producir la misma cantidad de carbón que un horno tradicional.
Crecimiento de los rebrotes de encino.	Se basa en la tasa de crecimiento de los encinos.	Con la tasa de crecimiento se determina la velocidad con la que crecen los rebrotes de encino y por lo tanto la biomasa.

#### Escenario tendencial

A partir de los resultados del capítulo 3 se decidió utilizar el escenario <MUC+20 000> con CCUS y producción de carbón vegetal como el escenario tendencial (+carbón+CCUS\_MUC+20), de otra manera fue elegido como el escenario que describe cómo se desenvuelve la producción de carbón vegetal y el cambio de cobertura y uso de suelo en la cuenca (BAU<sup>5</sup>). Se eligió ya que era el escenario intermedio entre MUC+80 000 y MUC.

#### Escenario de conservación

Para generar el escenario de conservación se modificaron las probabilidades de las transiciones, favoreciendo la expansión de los encinares por sobre su contracción (Tabla 12). Esto se consiguió reduciendo las transiciones que hagan que se pierda cobertura de los encinares, así como manteniendo estable la transición que aporta cobertura para la expansión de encinares.

Tabla 9. Probabilidad utilizada para generar el escenario de conservación.

Cobertura inicial	Cobertura transformada	Probabilidad de cambio anual	Probabilidad de cambio escenario de conservación
Bosque de encino	Matorrales	0.015936	0.01
Bosque de encino	Cultivos	0.002745	0.002
Bosque de encino	Pastizales	0.002671	0.002
Matorrales	Bosque de encino	0.010248	0.01

#### Escenario de deforestación

En este escenario por el contrario del escenario de conservación lo que se hizo fue aumentar las probabilidades de transición de bosque de encino a sitios deforestados (*e.g.* la aparición de una política que incentive la producción agrícola).

<sup>5</sup> BAU por sus siglas en inglés de *Business as usual*.

Tabla 10. Probabilidad utilizada para realizar el escenario de deforestación.

Cobertura inicial	Cobertura transformada	Probabilidad de cambio	Probabilidad de cambio escenario de deforestación
Bosque de encino	Matorrales	0.015936	0.02
Bosque de encino	Cultivos	0.002745	0.003
Bosque de encino	Pastizales	0.002671	0.003
Matorrales	Bosque de encino	0.010248	0.01

#### Escenario de restauración

El supuesto de este escenario es que los sitios en los que se produjo carbón vegetal sean sometidos a restauración (restauración post-cosecha). La manera en que se representa la restauración en este escenario es optimizando la tasa de crecimiento de los rebrotes. Durante todos los escenarios se utilizó una tasa de crecimiento de 0.06; en el caso de este escenario se utilizó una tasa de crecimiento de 0.07.

#### Escenarios hornos mejorados

En este escenario se propone el reducir la cantidad de biomasa necesaria para poder satisfacer la demanda de la cuenca. Cabe mencionar que al ser hornos eficientes la cantidad de carbón no disminuye pero sí la cantidad de materia seca equivalente, siendo menor en hornos mejorados.

Tabla 11. Eficiencias de hornos (Stassen, 2004).

Eficiencias de varios tipos de hornos	Producción de un kg de CV a partir de	Eficiencias de los hornos
Hornos Tradicionales	8- 12 kg madera	8 – 12%
Hornos tradicionales mejorados	6 – 8 kg madera	12 - 17%
Tecnologías industriales	5 – 7 kg madera	20 – 14%
Nuevos hornos con reducción de emisiones	3 – 4 Kg madera	25 - 33%

### 4.3 RESULTADOS

Las alteraciones en las probabilidades de transición se vieron reflejadas en los resultados de los distintos escenarios que estuvieron relacionados con prácticas de manejo específicas. En el caso del escenario de conservación, existe un incremento en la cantidad de biomasa comparado con el escenario tendencial. El escenario que disminuye considerablemente la cantidad de biomasa es el escenario de deforestación, en donde la expansión de las transiciones de reducción de los bosques de encino se ven favorecidas.

Por último el escenario de restauración post-cosecha presenta una recuperación e incremento de la biomasa mayor a que si no existiera esta acción, por lo cual cuidar y ayudar a la regeneración de los bosques después de ser sometidos a producción de carbón vegetal trae impactos positivos de la biomasa disponible.

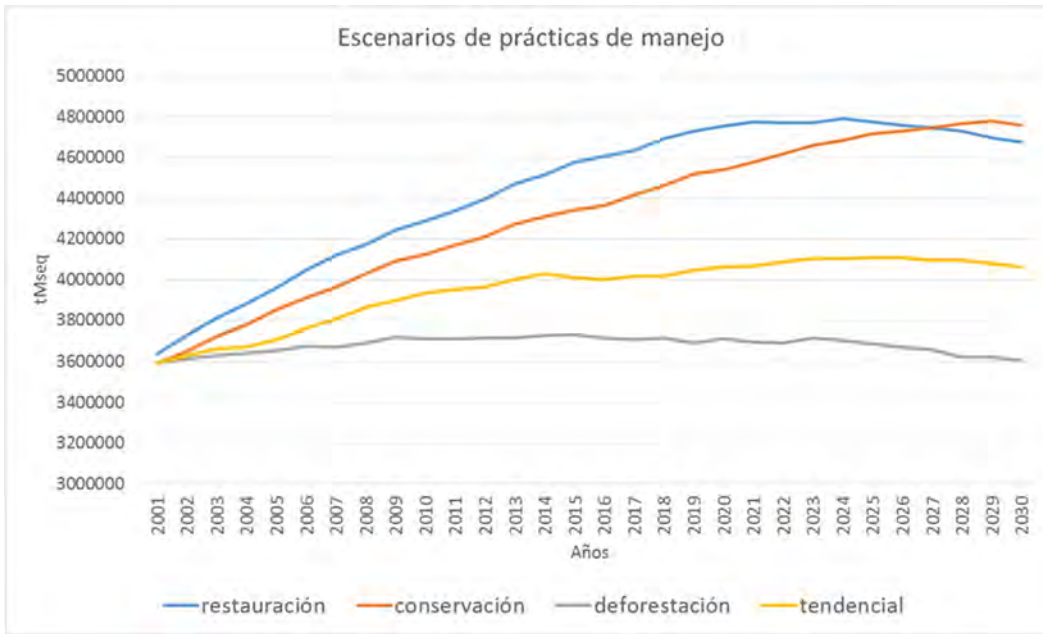


Figura 24. Escenarios de prácticas de manejo.

A su vez la tecnología con la cual se produce carbón vegetal trae consecuencias positivas en lo que se refiere a la biomasa disponible en la cuenca. El resultado que más destaca es el del horno reductor de emisiones. Todos los hornos eficientes generan un menor impacto en la biomasa disponible para la cuenca a comparación de los hornos tradicionales –escenario tendencial–.

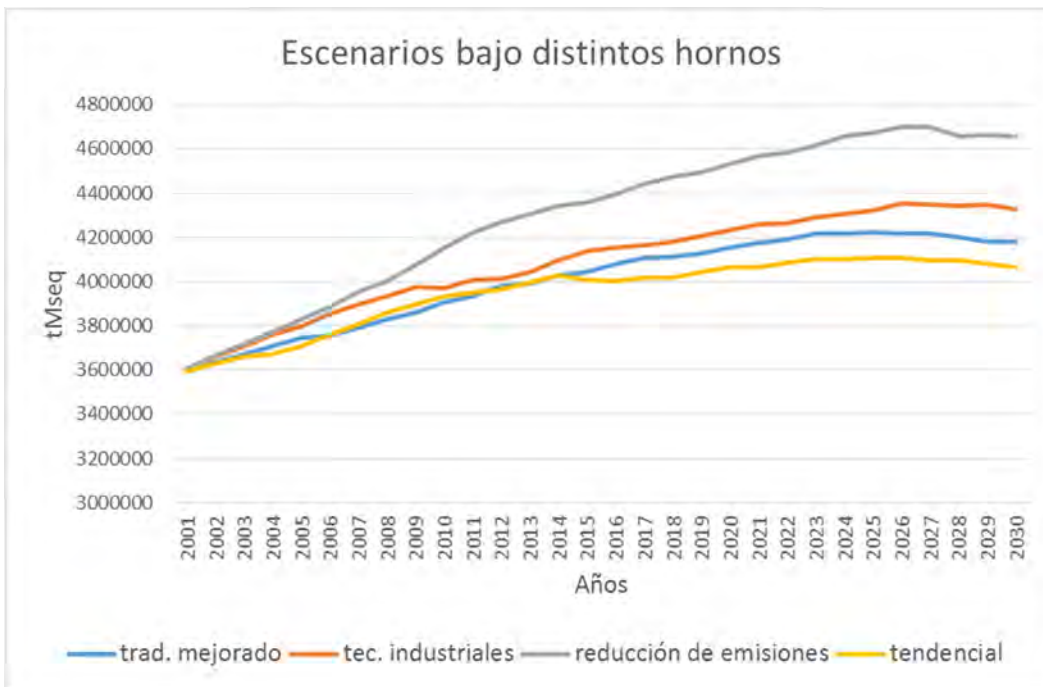


Figura 25. Escenarios bajo distintos hornos.

En los siguientes escenarios se presenta qué pasaría si ante un escenario de deforestación se sustituyera la tecnología para producir carbón (*i.e.* hornos más eficientes). El resultado es positivo, el

cambio de los hornos reduce el impacto de un escenario de deforestación (e.g. aumento de deforestación por la intensificación de algún cultivo). El horno que mejor amortiguó el impacto de la deforestación fue el horno con reducción de emisiones superando al escenario tendencial.

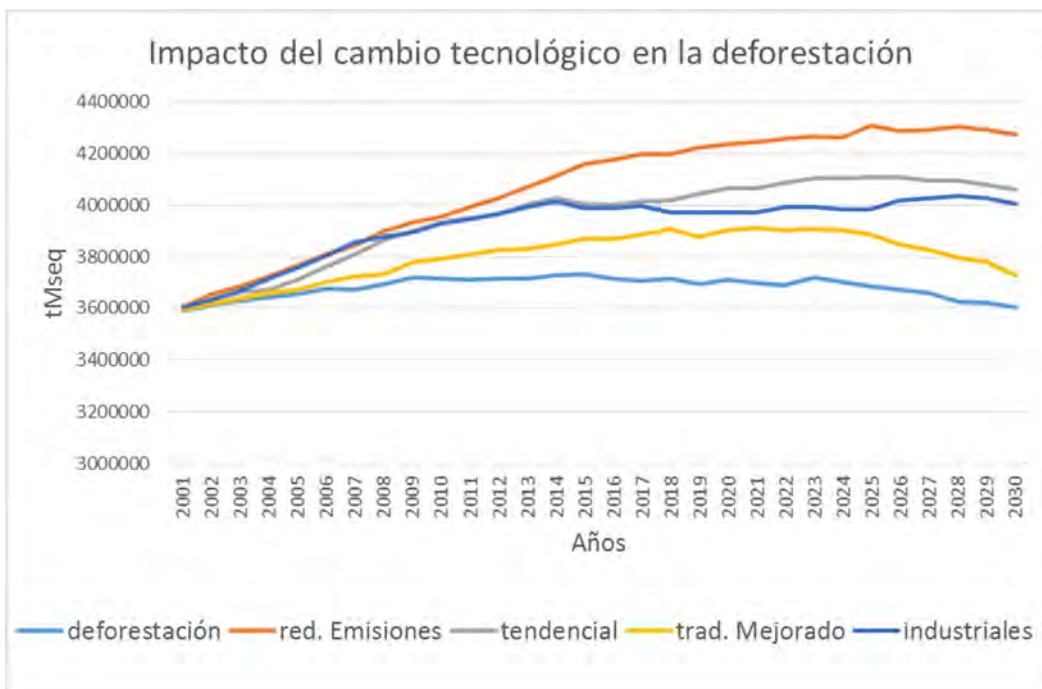


Figura 26. Impacto del cambio tecnológico en la deforestación.

Por último se presentan los escenarios que serían considerados “óptimos” en los cuales existe una integración en planes de conservación, restauración, así como hornos más eficientes para producir carbón vegetal.

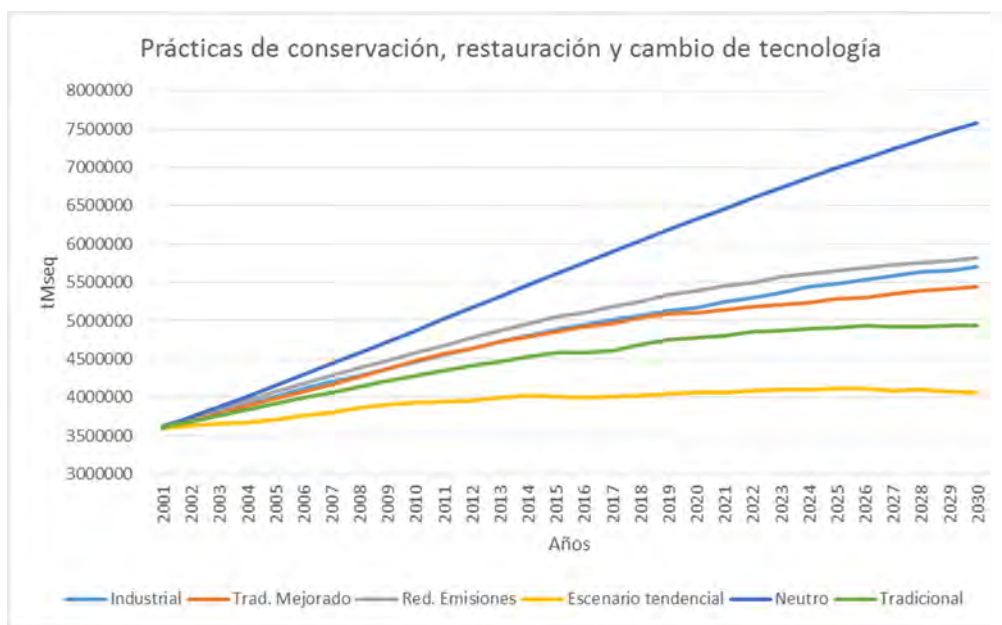


Figura 27. Prácticas de conservación, restauración y cambio de tecnología.

#### **4.3.1.1 Discusión**

A través del modelaje se puede observar que mediante la introducción de hornos mejorados y cambios en las prácticas de manejo existe un incremento en la biomasa disponible en la cuenca, lo cual puede ser traducido en que un cambio en estas prácticas tiende a escenarios más sustentables.

Los valores en los parámetros utilizados en el escenario de conservación y restauración fueron determinados asumiendo cual sería el efecto de la presencia de toma de decisiones. Al desarrollarse trabajos sobre áreas prioritarias para la conservación en donde se beneficie a los bosques de encino, podríamos contar con información más específica sobre cuál sería la cobertura de bosques de encino conservados y entonces saber qué áreas no serán transformadas y por lo tanto no se llevarán a cabo las transiciones a áreas deforestadas, por lo cual la probabilidad de la transición al realizar el cálculo de las matrices disminuiría. En la deforestación se espera lo contrario, que las transiciones a sitios deforestados aumenten y por lo tanto las probabilidades de transición.

No hay que dejar de lado el papel del modelo, el cual sirve como herramienta para la toma de decisiones o la ausencia de éstas, mediante la construcción de escenarios.

Por lo tanto si se cuenta con datos puntuales de la cuenca se podría calibrar los parámetros de manera precisa para la construcción de los escenarios del modelo.

#### **4.3.1.2 Conclusión**

La modelación espacialmente explícita permite tener una idea de la amplitud que tendrían cambios en la toma de decisiones a través del cambio o la optimización de las tecnologías utilizadas para producir carbón vegetal, reduce la degradación de los bosques.

Se sugiere que la incorporación de planes de conservación y restauración tiene consecuencias positivas en cuanto a la reducción de la deforestación así como la recuperación de sitios bajo aprovechamiento.

Juntos, la implementación de planes de manejo y la optimización de los hornos para producir carbón vegetal son capaces de reducir la degradación y la deforestación en los bosques de la cuenca.

## 5 CONCLUSIONES Y DIRECCIONES FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

---

El modelado espacialmente explícito cumplió con su objetivo de ser una herramienta útil para estudiar la dinámica de los bosques de encino bajo manejo para la producción de carbón vegetal. Se desarrollaron escenarios que permitieron observar la respuesta de la dinámica de la vegetación a cambios hipotéticos en las prácticas de manejo del paisaje y en la tecnología empleada para producir carbón vegetal.

Independientemente de la variación en las trayectorias de biomasa total debidas a los diferentes supuestos en la capacidad de carga de los encinares, sobre la cual no existe información previa, tanto el CCUS como la producción de carbón vegetal alteraron los escenarios “neutros” (i.e. sin CCUS ni producción de carbón). Esto sugiere que una mejora en las prácticas de producción de carbón vegetal -a través de la introducción de hornos eficientes- así como en el manejo de la tierra -mediante prácticas de manejo del paisaje orientadas hacia la conservación y restauración de los bosques de encino- resultaría en un aumento en la cantidad total de madera de encino útil para carbón en la cuenca en el año 2030.

El modelo realizado en esta tesis, cumple con las ideas propuestas en la sección 3 de porqué realizar un modelo. Ya que explica la dinámica de los bosques de encino en la cuenca; sugiere la colecta de datos en campo para poder contar con una estimación de la capacidad de carga de los encinares de la cuenca así como experimentos de restauración en sitios de producción y la priorización de áreas para conservación; se encontraron las dinámicas principales que afectan la distribución de los bosques de encino en el modelo de cambio de cobertura y uso de suelo así como la cosecha/rebote de encinares debido a la producción de carbón vegetal; no se sugirieron analogías, pero en cambio se suma a las propuestas para separar la producción de carbón vegetal de otros biocombustibles renovables provenientes de la madera con la finalidad de tener información para cada uno de los combustibles; se descubrieron nuevas preguntas, *e.g.* ¿qué pasaría si hacemos dinámico el crecimiento poblacional?, ¿En qué cambiaría el utilizar este modelo en países en donde la principal fuente para producir energía para la cocción de alimentos es el carbón vegetal? O en sitios en donde su finalidad es industrial; se obtuvieron resultados a intervalos plausibles al generar escenarios a corto plazo (*i.e.* 30 años); las principales incertidumbres fueron: A) existen variables que afectan a la dinámica del cambio de uso de suelo que son causas subyacentes, por lo que solo se pueden utilizar causas directas. B) El crecimiento de los encinos depende de la capacidad de carga, por lo que hace falta realizar investigaciones en esta área. C) La demanda utilizada en el modelo es fija, por lo que falta saber cómo actuaría ante una demanda dinámica (*i.e.* con crecimiento poblacional); se obtuvieron respuestas a una crisis en tiempo casi real, mediante la generación de escenarios; se propusieron los costos-beneficios del cambio en las tecnologías así como la ausencia/presencia de toma de decisiones en el manejo de la tierra.

Los resultados del presente estudio permitieron identificar vacíos de información para lograr una mejor parametrización del modelo, por ejemplo, en lo que respecta a la capacidad de carga de los bosques de encino en la cuenca, así como tasas de crecimiento tanto vegetativas como por reproducción sexual en ambientes biofísicos disímiles; lo cual requiere necesariamente de un esfuerzo considerable en cuanto a trabajo de campo se refiere.



Además, sería importante profundizar en otros parámetros como por ejemplo el mapa de preferencias para la producción de carbón, o en los ajustes puntuales del modelo de CCUS mediante tres fechas que permitan una correcta calibración y validación. Así mismo, sería útil en un futuro realizar también un análisis de sensibilidad para identificar aquellas variables que más afectan los resultados finales en cuanto a madera de encino disponible para carbón se refiere. Finalmente, e independientemente de los ajustes al modelo en sí mismo, sería interesante explorar la aplicabilidad de este enfoque en otras zonas de México donde se aprovechen bosques nativos para la producción tradicional de carbón vegetal.

## 6 REFERENCIAS

---

- Aguilar, R., A. Ghilardi, E. Vega, M. Skutsch y K. Oyama (2012). "Sprouting productivity and allometric relationships of two oak species managed for traditional charcoal making in central Mexico." Biomass & Bioenergy **36**: 192-207.
- Arnold, J. E. M., G. Kohlin y R. Persson (2006). "Woodfuels, livelihoods, and policy interventions: Changing perspectives." World Development **34**(3): 596-611.
- Bailis, R. (2009). "Modeling climate change mitigation from alternative methods of charcoal production in Kenya." Biomass and Bioenergy **33**(11): 1491-1502.
- Bell, E. y R. Hinojosa (1977). "Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes." Socio-Economic Planning Sciences **11**(1): 13-17.
- Biringuccio, V. y A. Carugo (1977). De la pirotechnia: 1540, Il polifilo.
- Bonham-Carter, G. (1994). Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS, Pergamon press.
- Brito, J. O. y L. E. Barrichelo (1981). Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia, IPEF.
- Castillo-Santiago, M. Á., A. Ghilardi, K. Oyama, J. L. Hernández-Stefanoni, I. Torres, A. Flamenco-Sandoval, A. Fernández y J.-F. Mas (2013). "Estimating the spatial distribution of woody biomass suitable for charcoal making from remote sensing and geostatistics in central Mexico." Energy for Sustainable Development.
- Cleveland, C. J. (2009). Concise encyclopedia of the history of energy, Access Online via Elsevier.
- Cleveland, C. J. y R. U. Ayres (2004). Encyclopedia of Energy: Ec-Ge, Academic Press.
- Cuevas, G. y J. F. Mas (2008). Land use scenarios: a communication tool with local Communities. Modelling Environmental Dynamics. M. Paegelow and M. T. Camacho-Olmedo. Berlin, Springer-Verlag.
- Chidumayo, E. N. (1993). "Zambian Charcoal Production - Miombo Woodland Recovery." Energy Policy **21**(5): 586-597.
- Chidumayo, E. N. y D. J. Gumbo (2013). "The environmental impacts of charcoal production in tropical ecosystems of the world: A synthesis." Energy for Sustainable Development - Special Issue on Charcoal **17**(2): 86-94.
- Chidumayo, E. N. y D. J. Gumbo (2013). "The environmental impacts of charcoal production in tropical ecosystems of the world: a synthesis." Energy for Sustainable Development.
- de Miranda, R. C., R. Bailis y A. d. O. Vilela (2013). "Cogenerating electricity from charcoaling: A promising new advanced technology." Energy for Sustainable Development.
- Emrich, W. (1985). Handbook of charcoal making: the traditional and industrial methods. Dordrecht, D. Reidel Publishing Company.
- Epstein, J. M. (2008). "Why model?" Journal of Artificial Societies and Social Simulation **11**(4): 12.
- FAO (1996). Forest Resources Assessment 1990. Rome.
- FAO (2005). Global Forest Resources Assessment 2005. A Forest Resources Assessment publication. Rome, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations (UN).
- FAO (2006). FAOSTAT, FAO.
- FAO (2013). FAOStat - Forestry Statistics. Rome, FAO.
- FAOStat (2012). ForestStat - Forestry Statistics. Rome, FAO.
- García, A. A., E. G. López y M. E. Mendoza (2011). "Three approaches to the assessment of spatio-temporal distribution of the water balance: the case of the Cuitzeo basin, Michoacán, Mexico." Investigaciones Geográficas(76): 34-55.
- Geist, H. J. y E. F. Lambin (2001). "What drives tropical deforestation." LUCC Report series **4**: 116.

- Geist, H. J. y E. F. Lambin (2002). "Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation." BioScience **52**(2): 143-150.
- Ghilardi, A. (*in prep*). "Is traditional charcoal making a treat to oak forests conservation in central Mexico? The case of the Cuitzeo basin."
- Ghilardi, A., T. H. Mwampamba y G. Dutt (2013). "What role will charcoal play in the coming decades? Insights from up-to-date findings and reviews." Energy for Sustainable Development - Special Issue on Charcoal **17**(2): 73-74.
- Harris, P. (1999). "On charcoal." Interdisciplinary Science Reviews **24**(4): 301-306.
- IEA (2009). World Energy Outlook 2009. Paris Cedex, France, International Energy Agency (IEA).
- IEA (2012). Renewables information. Paris, France, Internatioan Energy Agency.
- INEGI (2010). XIII Censo General de Población y Vivienda, 2010. México DF, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).
- Kaimowitz, D. y A. Angelsen (1998). Economic models of tropical deforestation: a review, Cifor.
- Kituyi, E. (2004). "Towards sustainable production and use of charcoal in Kenya: exploring the potential in life cycle management approach." Journal of Cleaner Production **12**(8-10): 1047-1057.
- Lambin, E. F., B. L. Turner, H. J. Geist, S. B. Agbola, A. Angelsen, J. W. Bruce, O. T. Coomes, R. Dirzo, G. Fischer y C. Folke (2001). "The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths." Global Environmental Change **11**(4): 261-269.
- López, E., G. Bocco, M. Mendoza y E. Duhau (2001). "Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe: A case in Morelia city, Mexico." Landscape and Urban Planning **55**: 271-285.
- Maeda, E. E., C. M. de Almeida, A. de Carvalho Ximenes, A. R. Formaggio, Y. E. Shimabukuro y P. Pellikka (2011). "Dynamic modeling of forest conversion: Simulation of past and future scenarios of rural activities expansion in the fringes of the Xingu National Park, Brazilian Amazon." International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation **13**(3): 435-446.
- Masera, O., T. Arias, A. Ghilardi, G. Guerrero y P. Patiño (2010). Estudio sobre la evolución nacional del consumo de leña y carbón vegetal en México 1990-2024. Reporte para la Secretaría de Energía de México. México DF, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mendoza, M., G. Bocco, M. Bravo, E. López y W. Osterkamp (2006). "Predicting water-surface fluctuation of continental lakes. A RS and GIS based approach in Central Mexico." Water Resour. Manage. **20**: 291-311.
- Mendoza, M. E., E. L. Granados, D. Geneletti, D. R. Pérez-Salicrup y V. Salinas (2011). "Analysing land cover and land use change processes at watershed level: a multitemporal study in the Lake Cuitzeo Watershed, Mexico (1975–2003)." Applied Geography **31**(1): 237-250.
- Minten, B., K. Sander y D. Stifel (2013). "Forest management and economic rents: Evidence from the charcoal trade in Madagascar." Energy for Sustainable Development - Special Issue on Charcoal **17**(2): 106-115.
- Mwampamba, T. H. (2007). "Has the woodfuel crisis returned? Urban charcoal consumption in Tanzania and its implications to present and future forest availability." Energy Policy **35**(8): 4221-4234.
- Paegelow, M. y M. T. Camacho Olmedo (2008). Advances in geomatic simulations for environmental dynamics. Modelling Environmental Dynamics: Advances in Geomatic Solutions. M. Paegelow and M. T. Camacho Olmedo. Berlin, Heidelberg, Springer: 3-54.
- Pérez-Vega, A., J.-F. Mas y A. Ligmann-Zielinska (2012). "Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest." Environmental Modelling & Software **29**(1): 11-23.

- Ribot, J. C. (1999). "A history of fear: imagining deforestation in the west african dryland forests." Global Ecology and Biogeography **8**(3/4): 291-300.
- Sasaki, N., G. P. Asner, W. Knorr, P. B. Durst, H. R. Priyadi y F. E. Putz (2011). "Approaches to classifying and restoring degraded tropical forests for the anticipated REDD+ climate change mitigation mechanism." iForest-Biogeosciences and Forestry **4**(1): 1.
- Schure, J., V. Ingram, M. S. Sakho-Jimbira, P. Levang y K. F. Wiersum (2013). "Formalisation of charcoal value chains and livelihood outcomes in Central- and West Africa." Energy for Sustainable Development - Special Issue on Charcoal **17**(2): 95-105.
- Schure, J., V. Ingram, M. S. Sakho-Jimbira, P. Levang y K. F. Wiersum (2013). "Formalisation of charcoal value chains and livelihood outcomes in Central-and West Africa." Energy for Sustainable Development.
- SEMARNAT (2011). Anuario estadístico de la producción forestal. México, DF, Secretaria del medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT).
- Soares-Filho, B. S., C. L. Pennachin y G. Cerqueira (2002). "DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier." Ecological Modelling **154**(3): 217-235.
- Stassen, H. (2004). "Developments in charcoal production technology." UNASYLVA-FAO:- 34-35.
- Zulu, L. C. y R. B. Richardson (2013). "Charcoal, livelihoods, and poverty reduction: Evidence from sub-Saharan Africa." Energy for Sustainable Development.

## Anexos

Durante la realización del submodelo de CCUS fue necesario realizar una reclasificación de las coberturas como se mencionó en los métodos de la construcción del submodelo de CCUS.

ID	CLASES 1975	ID	RECLASIFICACIÓN
1	Pastizal_cerrado	4	Pastizales
2	Matorral_cerrado	2	Matorral
3	Cultivos_estacionales_temporales	3	Cultivos
4	Matorral_pastizal_abierto	4	Matorral
5	Cultivos_estacionales_de_riego	3	Cultivos
6	Lagos	8	Otros
7	Zonas_de_inundación_de_lago	8	Otros
8	Asentamientos_humanos	8	Otros
9	Matorral_pastizal_semiabierto	2	Matorral
10	Bordos	8	Otros
11	Suelo_desnudo	8	Otros
12	Bosque_de_encino_cerrado	6	Bosque de encino
13	Terrenos_baldíos	8	Otros
14	Pastos_halófitos	8	Otros
15	Zonas_de_inundación_de_bordos	8	Otros
16	Bosque_mixto_abierto	1	Bosque Mixto
17	Huertas	3	Cultivos
18	Vegetación_acuática(tular,_carrizal_y_lirio_acuático)	8	Otros
19	Cultivos_estacionales_de_riego_en_zonas_de_inundación	3	Cultivos
20	Plantaciones_de_arboles_cerradas	7	Plantaciones forestales
21	Bosque_de_pino	5	Bosque de pino
22	Cuerpos_de_agua_naturales	8	Otros
23	Bosque_mixto_cerrado	1	Bosque Mixto
24	Bosque_mixto_semiabierto	1	Bosque Mixto
25	Bosque_de_abies_semiabierto	8	Otros
26	Bosque_de_encino_abierto	9	Bosque de encino

27	Bosque_de_pino	5	Bosque de pino
28	Plantaciones_de_arboles_abiertas	7	Plantaciones forestales
29	Plantaciones_de_arboles_semiabiertas	7	Plantaciones forestales
30	Bosque_de_pino	5	Bosque de pino
31	Bosque_de_abies_cerrado	8	Otros
32	Bosque_de_abies_abierto	8	Otros

ID	CLASES 2000	ID	RECLASIFICACIÓN
1	Bosque_mixto_cerrado	1	Bosque Mixto
2	Matorral_cerrado	2	Matorral
3	Matorral_pastizal_semiabierto	2	Matorral
4	Cultivos_estacionales_temporales	3	Cultivos
5	Pastizal_cerrado	4	Pastizales
6	Bosque_mixto_abierto	1	Bosque Mixto
7	Matorral_pastizal_abierto	2	Matorral
8	Bosque_de_pino_semiabierto	5	Bosque de Pino
9	Cultivos_estacionales_en_terrazas	3	Cultivos
10	Bosque_de_encino_semiabierto	6	Bosque de encino
11	Bosque_de_encino_cerrado	6	Bosque de encino
12	Asentamientos_humanos	8	Otros
13	Terrenos_baldíos	8	Otros
14	Bordos	8	Otros
15	Bosque_de_encino_abierto	6	Bosque de encino
16	Pastos_halófitos	8	Otros
17	Cultivos_estacionales_de_riego	3	Cultivos
18	Cultivos_estacionales_de_riego_en_zonas_de_inundación	3	Cultivos
19	Vegetación_acuática(tular_carrizal_y_lirio_acuático)	8	Otros
20	Acuicultura	8	Otros
21	Lagos	8	Otros
22	Zonas_de_inundación_de_lago	8	Otros
23	Suelo_desnudo	8	Otros
24	Huertas	3	Cultivos
25	Bosque_de_pino_abierto	5	Bosque de pino
26	Zonas_de_inundación_de_bordos	8	Otros
27	Plantaciones_de_arboles_cerradas	7	Plantaciones forestales
28	Plantaciones_de_arboles_abiertas	7	Plantaciones forestales
29	Cuerpos_de_agua_naturales	8	Otros
30	Plantaciones_de_arboles_cerradas_pino	7	Plantaciones forestales
31	Bosque_mixto_semiabierto	5	Bosque Mixto
32	Bosque_de_pino_cerrado	5	Bosque de pino
33	Plantaciones_de_arboles_semiabiertas	7	Plantaciones forestales
34	Matorral_cerrado_en_zona_arqueológica	2	Matorral_cerrado
35	Plantaciones_de_arboles_abiertas_eucalipto	7	Plantaciones forestales
36	Plantaciones_de_arboles_semiabiertas_eucalipto	7	Plantaciones forestales
37	Bosque_no_diferenciado_semiabierto	8	Otros
38	Plantaciones_de_arboles_cerradas_eucalipto	7	Plantaciones forestales
39	Plantaciones_de_arboles_semiabiertas_pino	7	Plantaciones forestales
40	Plantaciones_de_arboles_abiertas_pino	7	Plantaciones forestales
41	Bosque_de_abies_abierto	8	Otros
42	Bosque_de_abies_semiabierto	8	Otros
43	Bosque_de_abies_cerrado	8	Otros