

## **IMPLICACIONES DEL MERCADO DE CARBONO EN EL MANEJO DE LOS BOSQUES TEMPLADO-FRÍOS DEL NOROESTE DE MÉXICO**

**Dr. Benedicto Vargas-Larreta.** Instituto Tecnológico de El Salto. Mesa del Tecnológico s/n, 34942, El Salto, Durango, México. [bvargas@itelsalto.edu.mx](mailto:bvargas@itelsalto.edu.mx)

**M.A. Len B. Eddy.** Carbon Basis Company Ltd. 4503- 41 Avenue, Beaumont, Alberta Canada T4X 1G1, 780 909-6841. [len.eddy@carbonbasis.com](mailto:len.eddy@carbonbasis.com)

**Ms.C. Álvaro Mendoza.** Duke University - The Fuqua School of Business. [alvaro.mendoza@duke.edu](mailto:alvaro.mendoza@duke.edu)

**M.A. Alfonso Vazquez.** Closewaters LLC Energy and Carbon Management, 665 Seville Court, Satellite Beach, FL 32937 USA. [alvazquez@closewaters.com](mailto:alvazquez@closewaters.com)

**L.E. Mike Kennedy.** The Pembina Institute, 2<sup>nd</sup> Floor, 10008 – 82<sup>nd</sup> Avenue, Edmonton, Alberta Canada, T6E 1Z3, 780 485-9610. [mikek@pembina.org](mailto:mikek@pembina.org)

## RESUMEN

Los bosques de México, particularmente los bosques templados, son uno de los mayores almacenes de carbono del país. La forma en que éstos son manejados puede afectar significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> al tiempo que presenta una nueva fuente de ingresos para los propietarios y gestores forestales. El objetivo de este estudio fue evaluar cómo el mercado del carbono podría modificar las prácticas de manejo forestal en la región.

Se cuantificaron las posibles fuentes de biomasa en los residuos de la cosecha forestal y los desechos de los aserraderos en tres ejidos (aprox. 250,000 ha) en el estado de Durango, México, y se compararon las compensaciones de carbono que podrían obtenerse de las prácticas del manejo forestal tradicional y la reducción de gases de efecto invernadero, por el cambio en algunas de estas prácticas y por el desplazamiento de combustibles fósiles por bioenergía.

Se desarrolló un procedimiento de modelización integrado que incorpora esquemas de suministro de madera con un modelo de cuantificación del carbono dentro de un marco de gestión óptimo. Este enfoque de modelización permite la consideración de distintas alternativas de mercado y escenarios normativos, junto con un amplio rango de intensidades de manejo y esquemas de optimización de la cosecha forestal a nivel regional. Tanto el carbono como los esquemas de cosecha forestal fueron modelados con el modelo Woodstock, software utilizado por numerosas empresas para la optimización del manejo forestal.

Los incentivos provenientes del carbono forestal pueden incrementar el valor de los bosques templado-fríos de México y, en general, fomentar cambios en el manejo de dichos bosques en consonancia con las prácticas sostenibles de gestión forestal encaminadas a mitigar los efectos del cambio climático.

## **1 INTRODUCCIÓN**

Se han identificado muchos factores que causan cambios en las reservas de carbono de los bosques, pero la importancia relativa de cada uno sigue siendo difícil de cuantificar (Goodale *et al*, 2002). En ese sentido, las estrategias de manejo forestal se pueden adaptar para manipular la intensidad de la captura de carbono de los sistemas forestales mediante una variedad de actividades, entre ellas la aforestación, la restauración forestal, la agroforestería, el manejo forestal, la bioenergía, la preservación de los bosques y el manejo de productos de madera (Birdsey *et al.*, 2000).

Sin embargo, el papel potencial de la silvicultura para ayudar a estabilizar el CO<sub>2</sub> atmosférico depende de las políticas de gobierno, la cosecha forestal y las tasas de disturbios y perturbaciones naturales, las expectativas a futuro de la productividad de los bosques, el destino y la longevidad de los productos forestales, y la capacidad para implementar tecnologías y prácticas forestales para aumentar la retención del CO<sub>2</sub>. Un manejo forestal flexible y adaptativo que tenga en cuenta todos los escenarios posibles y permita además considerar múltiples opciones de uso, sería la alternativa más adecuada para maximizar por un lado, las ganancias por la cosecha de madera y, por otro, incrementar su aportación en la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Por otra parte, la biomasa forestal es considerada un combustible renovable cuando se origina a partir de bosques que son manejados de forma sostenible, y su conversión a energía reduce las emisiones de (GEI) cuando ocurre como consecuencia el desplazamiento de combustibles fósiles. En los bosques de la región forestal de El salto, Durango, México, una parte significativa de la biomasa forestal, como las ramas de los árboles, por lo general no se recupera durante el proceso de cosecha, ya que no se puede convertir fácilmente en productos de madera utilizables como la madera aserrada. En muchos casos, los restos de la tala son reducidos y esparcidos en el bosque para reducir el riesgo de incendio o simplemente se deja descomponer en el suelo. Sin embargo, convirtiendo en trozos pequeños los residuos, es posible su utilización como combustible, y cuando se añaden los residuos de los aserraderos el volumen de combustible disponible puede ser suficiente para crear una valiosa fuente de materia prima para su transformación en energía renovable.

La inclusión de los créditos de carbono del sector forestal es fundamental para el éxito de cualquier sistema de comercialización de compensaciones por reducción de emisiones de GEI. Esta integración es necesaria para utilizar efectivamente el potencial de mitigación de los bosques, para aprovechar los muchos factores económicos y otros beneficios ambientales relacionados con las opciones de mitigación que ofrece la Silvicultura.

## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 Área de estudio**

El estudio se llevó a cabo en la región de El Salto, en el estado de Durango, México. La zona se localiza dentro de la cadena de montañas de la Sierra Madre Occidental que se extiende desde el sureste de Arizona hasta el sureste de México donde se une con la cadena de montañas de la Sierra Madre Oriental. La Sierra Madre Occidental cuenta con algunos de las más ricas biodiversidades de América del Norte, y contiene aproximadamente dos terceras partes de la madera

en pie en México. 23 especies diferentes de pino y unas 200 especies de encino residen dentro de la eco-región de la Sierra Madre Occidental (Kennedy, 2008).

## **2.2 Métodos de manejo considerados**

Existen dos alternativas para el manejo de la superficie del bosque productivo en la región (Vargas-Larreta, 2006). La alternativa de manejo de rodales incoetáneos es el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) y el método para rodales coetáneos es el Método de Desarrollo Silvícola (MDS).

El MMOBI es un sistema de cubierta forestal continua caracterizado por una extracción selectiva periódica en intervalos cortos (10 años). El aclareo selectivo es por lo alto eliminando los árboles que han alcanzado su turno. No existe una edad del rodal verdaderamente definida y se asume que las tasas de crecimiento son constantes y la intensidad de la cosecha no puede ser más que el crecimiento del rodal.

El MDS es un sistema de manejo para rodales coetáneos con una rotación de 60 años, aunque en algunas regiones puede ser mayor. Se caracteriza por tres o cuatro aclareos por lo bajo a intervalos de 10 años seguidos por una corta de regeneración que deja un porcentaje de árboles como semilleros. 10 años después de la corta de regeneración, se aplica una corta de liberación, eliminando el volumen residual y raleando de manera pre-comercial la regeneración. Los regímenes de manejo para los rodales son seleccionados basándose en las características del rodal incluyendo pendiente, índice de sitio, la composición de especies, índice de densidad del rodal y edad.

## **2.4 Cálculo de la biomasa y el carbono**

Para el cálculo de la biomasa se utilizaron los coeficientes reportados por Návar (2009). Los resultados produjeron una estimación de biomasa a nivel de árbol (kg/árbol) para cada clase de edad. Para expandir la biomasa a una estimación a nivel de rodal para cada clase de edad ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), se calculó un factor de expansión (árboles/ha). La biomasa a nivel de árbol se convirtió en volumen a nivel de árbol individual ( $\text{m}^3$ ) dividiendo la biomasa por el peso específico (Návar, 2009). El carbono de la biomasa viva en pie fue calculado utilizando la relación de la biomasa con el carbono de 0.5 como es definido por el IPCC (1996). Se crearon curvas de carbono para cada una de las curvas de índice de sitio del régimen de manejo aplicando la relación de la biomasa con el carbono a las curvas de rendimiento de la biomasa.

## **2.5 Reservorios de Bioenergía**

El procedimiento para la cuantificación de la biomasa de las ramas, follaje y copas no comerciables que son el resultado de las actividades de cosecha y, por lo tanto, una fuente potencial de reservorios de bioenergía, se muestra en la figura 1. Para este análisis se asumió que 90% de material en estos reservorios es recuperable para bioenergía.

## **2.6 Modelo de optimización**

Las intensidades de cosecha y la respuesta de los rodales a los métodos de manejo fueron estimadas con los modelos de crecimiento forestal desarrolladas por Vargas-Larreta (2006) e incorporados en el simulador de crecimiento forestal BWINPro7 (Vargas et al., 2010). Además, se desarrolló un modelo de optimización forestal utilizando el software Remsoft Spatial Woodstock. El modelo

optimiza un valor deseado (por ejemplo volumen de cosecha) basado en las opciones de manejo disponibles sujeto a cualquier restricción. También permite simular la producción anual de madera y de residuos de la cosecha (ramas y copas no comerciables del árbol) para un determinado periodo.

## **2.7 Cálculo de la reducción de Gases de Efecto Invernadero**

Para cuantificar la reducción potencial de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), se utilizaron los resultados reportados por The Pembina Institute (Kennedy, 2008). En dicho trabajo se reporta que 1 tonelada de biomasa quemada a través de un sistema de gasificación de biomasa podría producir 0.54 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (tCO<sub>2</sub>eq) de reducción de emisiones.

## **2.8 Comercialización de bonos de carbono**

Además de los beneficios obtenidos de la venta de la madera y la energía, del manejo forestal podrían obtenerse compensaciones de carbono que son comerciables. Una compensación de carbono, a veces llamado un crédito (bono) de carbono, representa la reducción de las emisiones de una tonelada métrica de dióxido de carbono o su equivalente en otros GEI. Debido a que cada uno de los GEI tiene un impacto diferente en la atmósfera, las compensaciones de carbono se miden en relación al efecto equivalente del CO<sub>2</sub>, o dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq). La tabla 1 muestra el potencial de calentamiento atmosférico (PCA) de cada uno de los GEI, medidos en toneladas de CO<sub>2</sub>eq (Climate Change, 2007).

El proyecto de El Salto podría generar créditos de carbono a partir de dos fuentes: la reducción de emisiones debido al desplazamiento de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, y el secuestro de carbono por los bosques y productos de madera. En este sentido, el objetivo de esta parte del estudio consistió en determinar qué tipo de mercado sería el más apropiado para cada tipo de bono; esta determinación se basó en el valor de los bonos de carbono en el mercado y el método utilizado para calcular el rendimiento de compensación en cada mercado respectivo.

## **2.9 Línea base**

El primer paso para determinar las compensaciones fue conocer la línea base, mediante el cálculo de las emisiones actuales y las emisiones futuras resultado del manejo forestal. El método estándar consiste en establecer la diferencia en generación de emisiones entre el *status quo* y la ejecución del proyecto mediante el cálculo de la cantidad de emisiones de GEI que se evitan con el desplazamiento de combustibles fósiles para la generación de energía.

Eddy (2010) estimó que la mezcla de combustibles utilizados para generar electricidad para la red nacional en México resulta en unas emisiones de GEI de 0.48 tCO<sub>2</sub>eq por megavatio y hora (MWh) de electricidad, equivalente a 0.13 tCO<sub>2</sub>eq por cada Gigajulios (GJ) de energía producida. Debido a que el establecimiento potencial de una planta de cogeneración en El Salto generaría emisiones de GEI insignificantes, se decidió utilizar 0,13 tCO<sub>2</sub>eq/GJ como factor de emisión de referencia. Finalmente, debido a que el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) no reconoce las compensaciones a partir de una planta de bioenergía si se produjo un cambio en la gestión forestal, las compensaciones de la bioenergía sólo se obtendrían si los ejidos continúan con su régimen actual de cosecha sostenible.

La segunda fuente potencial de compensaciones de carbono fue tanto del incremento del carbono retenido en productos de madera como del carbono secuestrado por los bosques. Después de considerar varios estándares, se eligió CAR (Climate Action Reserve) como el estándar para evaluar las compensaciones de carbono de los bosques de El Salto. El protocolo CAR define tres reservorios de carbono forestal: biomasa viva, biomasa muerta *in situ* y biomasa del suelo. Teniendo en cuenta algunas limitaciones en la información disponible, el estudio consideró sólo el almacén de carbono en la biomasa viva aérea. Con base en las características específicas y la mezcla de especies en los bosques del área de estudio, se estimó que, en promedio, una tonelada métrica de madera en pie en estos bosques pueden almacenar 0.5 tCO<sub>2</sub>eq. Además de los reservorios forestales, las reservas de carbono se transfieren de la madera en pie a los productos de madera, como tablas y muebles. Según las estimaciones de Vargas (Kennedy, 2008), cada tonelada métrica de producto de madera almacena, en promedio, 0.4 tCO<sub>2</sub>eq.

Una consideración final de los proyectos forestales de reducción de carbono es el riesgo de que el carbono secuestrado podría ser "retornado", o devuelto a la atmósfera si se ha perdido bosque de alguna manera, por ejemplo debido a incendios u otros eventos catastróficos. Este problema de la permanencia de carbono en los bosques representa un gran dilema para el mercado de carbono ya que cada estándar adopta un enfoque diferente, pero el protocolo CAR aborda el problema mediante la definición de dos tipos de pérdidas del carbono secuestrado. Un retorno evitable es causado por la acción humana de cambiar el uso del suelo, la sobreexplotación del bosque o por negligencia, mientras que un retorno inevitable es causada por agentes naturales como el fuego, los insectos, o el viento (Forest Project Protocol, 2010).

El efecto de un retorno inevitable es mitigado por la creación de un almacén amortiguador que es abastecido por la retención de un porcentaje de los bonos de carbono creados por la realización del proyecto. Teniendo en cuenta las condiciones específicas de El Salto, se estimó que el 25% de las compensaciones debía mantenerse en el almacén de amortiguamiento.

## **2.10 Alternativas de manejo forestal**

Después de haber analizado los diferentes componentes del proyecto, fue necesario definir la estrategia de manejo que los ejidos debían implementar para maximizar sus beneficios. Se plantearon tres alternativas:

1. Seguir utilizando el actual régimen de manejo y vender créditos de carbono a partir del secuestro de carbono del bosque.
2. Mantener el régimen actual de manejo y construir una planta de bioenergía para producir electricidad, además de vender créditos de carbono tanto por la captura de los bosques como por el desplazamiento de combustibles fósiles.
3. Cambiar a la estrategia de manejo que maximice la cosecha y construir una planta de bioenergía para producir electricidad. Esta alternativa se traduciría en una mayor producción de madera y residuos (y por lo tanto una mayor producción de energía) en comparación con la alternativa 2, pero evitaría cualquier compensación por secuestro de carbono o por desplazamiento de combustibles fósiles.

## **3. RESULTADOS**

### **3.1 Alternativa 1**

Un resumen de los datos de entrada en el modelo utilizado se presenta en la tabla 2. Los rodales fueron asignados a un régimen de aprovechamiento de acuerdo con los planes de manejo vigentes. Se asume que los rodales no cambiarán de régimen de manejo durante el horizonte de la planificación. También se supone que no hay perturbaciones naturales o antropogénicas y por lo tanto la superficie forestal productiva sigue siendo la misma a través del tiempo. La figura 2 destaca algunos de los resultados del escenario de referencia (línea base).

Basándose en las prácticas actuales de manejo este análisis demuestra que esta región produce 229,000 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> de madera; 55,000 toneladas/año de residuos de la cosecha (ramas y copas) actualmente son dejadas en el bosque; 31,000 toneladas/año de desechos de las industrias son recuperables (aserrín y leña no vendidos localmente) para bioenergía; existiría una reducción de GEI de 46,000 toneladas de CO<sub>2</sub>/año al cambiar la fuente de electricidad por una instalación de biomasa; y las reservas promedio de carbono asciende a 21,000 toneladas de C/año en árboles en pie vivos y productos forestales.

En comparación con los planes de manejo, el volumen de cosecha promedio en 100 años es más alto que los volúmenes indicados en los planes de manejo actuales (~10%). Los planes de manejo utilizan inventarios detallados a nivel de subrodales para calcular la intensidad de la cosecha basada en los incrementos de crecimiento actuales para cada unidad de manejo. El escenario de referencia está desarrollado a un nivel estratégico, a largo plazo para toda la superficie evaluada.

### **3.2 Alternativa 2**

La alternativa 2 evaluó el impacto de la regulación de los flujos de las cosechas con el fin de estabilizar el suministro de productos forestales a industrias y a potenciales instalaciones de bioenergía. A fin de estabilizar los flujos, algunas limitaciones en el régimen de la cosecha de los tratamientos del MDS se modificaron permitiendo que la corta de regeneración en los rodales previstos se retrasara 40 años adicionales.

Esta alternativa produjo menores volúmenes de cosecha (Figura 3) que la alternativa de referencia (1) como resultado de que algunos rodales retrasaron la cosecha a fin de lograr un flujo más sostenible de los productos de la madera y residuos a las industrias. A pesar de retrasar la cosecha en algunos rodales, no hubo un aumento de las reservas de carbono en comparación con la línea base. Los rodales que se cosecharon más de 60 años experimentaron un crecimiento nulo a medida que el volumen del rodal comienza a disminuir, y por lo tanto, no hubo aumento en las existencias de carbono. También, con el mismo volumen cosechado que en la alternativa 1, no hay ganancia en el carbono almacenado en los productos de madera.

### **3.3 Alternativa 3**

La alternativa 3 examinó el impacto de retrasar el primer aclareo comercial por 10 años hasta la edad de 30 años permitiendo al rodal acumular volumen adicional y potencialmente retener más carbono. Para este análisis se supone que la intensidad de la cosecha y la respuesta de crecimiento es la misma que en el escenario de referencia.

Esta opción de manejo da lugar a mayores volúmenes de cosecha y el aumento de las existencias de carbono (Figura 4). Retrasando el primer raleo 10 años, los rodales son capaces de acumular volumen y existencias de carbono adicionales ya que todavía están en una edad joven y de rápido crecimiento.

Después de analizar el estado actual de los mercados de carbono, se obtuvo una estimación de los precios de los dos tipos de compensaciones que podrían ser generados por el proyecto (desplazamiento de combustibles fósiles, y el secuestro de los productos de madera y los bosques). Además, se estimaron los precios de los productos de madera y bioenergía el ciclo de vida del proyecto. Con base en esta información, se estimó el Valor Actual Neto (VAN) de cada alternativa de manejo en un horizonte temporal de 50 años.

Aunque el modelo proporciona buenas estimaciones de los beneficios económicos de cada alternativa, existe una incertidumbre significativa asociada con muchos de los datos de entrada del modelo, especialmente los precios de los bonos de carbono. Por lo tanto, sería importante analizar el impacto de esta incertidumbre en el rendimiento económico de cada alternativa.

De manera lógica, la alternativa tres (que maximiza la producción de madera) tuvo el valor más alto del VAN (\$ 48,551,814 USD), muy por encima de la alternativa 1 (\$2,545,916 USD), la cual no considera ganancias por bioenergía. Sin embargo, los ingresos provienen exclusivamente de la producción de madera y/o productos de ésta, es decir, no existen compensaciones por secuestro o retención de carbono. Desde una perspectiva económica, la comercialización de los créditos de carbono a nivel internacional por secuestro de carbono y el desplazamiento de combustibles fósiles para generación de energía, sería la opción más atractiva ya que el costo de disminuir las emisiones de GEI es menor a través del manejo sostenible actual, que a través de otras estrategias de gestión. Los resultados indican que el valor económico de la madera cosechada de forma sostenible (alternativa 2), los productos forestales de madera y la venta de créditos de carbono de los bosques puede ser considerablemente mayor que la ganancia proveniente de un esquema de manejo que maximice la producción exclusiva de madera.

El financiamiento internacional para la conservación y manejo sostenible de los bosques es abundante, tanto de organismos nacionales e internacionales como de organizaciones no gubernamentales e incluso empresas privadas. Los objetivos de esta financiación son diversos, por lo que en algunos casos (como El Salto) el secuestro y almacenamiento de carbono puede ser un beneficio secundario no intencional.

Las nuevas alternativas de manejo con fines de producción de créditos de carbono, generará un cambio de paradigma sobre la conservación y uso sostenible de los bosques existentes en esta región del norte de México, la cual permitirá lograr mayores beneficios, además de asegurar que la producción de los múltiples beneficios de los bosques sea mantenida y mejorada.

## **5. CONCLUSIONES**

El actual modelo está muy regulado por los regímenes de manejo actualmente utilizados en los ejidos, debido principalmente a que la gestión está encaminada a la producción de madera. Esto limita el modelo de manera que se convierte en un modelo de simulación en lugar de la optimización. Para ser un modelo de



optimización de verdad, el modelo requiere de distintas opciones en los regímenes de manejo con múltiples objetivos. Con este fin, una matriz de intensidad de la cosecha, la respuesta de crecimiento en las distintas edades, la cuantificación del carbono, la comercialización de los créditos de carbono y el uso de la biomasa con fines bioenergéticos, deberá ser creada para maximizar las ganancias por el uso del bosque.

Los incentivos provenientes del carbono forestal incrementarán el valor de los bosques templado-fríos de esta región del norte de México y, en general, fomentarán cambios en el manejo de dichos bosques en consonancia con las prácticas sostenibles de gestión forestal encaminadas a mitigar los efectos del cambio climático.

## **6. BIBLIOGRAFÍA**

- Birdsey, R.A.; R. Alig, and D. Adams. 2000. Mitigation activities in the forest sector to reduce emissions and enhance sinks of greenhouse gases. *In: The Impact of Climate Change on America's Forests: A Technical Document Supporting the 2000 USDA Forest Service RPA Assessment* [Joyce, L.A. and R.A. Birdsey (eds.)]. RMRS-GTR-59, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO. 112-131 pp.
- Climate Change. 2007. The Physical Science Basis. IPCC AR4, Working Group 1 Report (2007): 212-213.
- Eddy, L. 2010. Advancing Biomass Energy Production: Wood Feedstock, Energy and Greenhouse Gas Emissions Assessment, Durango, Mexico. Carbon Basis Company, LTD. 127 p.
- Forest Project Protocol. 2010. Climate Action Reserve. Version 3.2. 61 p.
- Goodale, C.L., M.J. Apps; R.A. Birdsey; C.B. Field; L.S. Heath; R.A. Houghton; J.C. Jenkins; G.H. Kohlmaier; W. Kurz; S. Liu; G.J. Nabuurs; S. Nilsson, and A.Z. Shvidenko. 2002. Forest carbon sinks in the Northern Hemisphere. *Ecological Applications*. 12(3): 891-899.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1996. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol 2.
- Kennedy, M. 2008. Assessment of Potential for Emission Reduction Credits in Durango, Mexico. The Pembina Institute.
- Vargas-Larreta, B. 2006. Analyse und Prognose des Einzelbaumwachstums in Strukturreichen Mischbeständen in Durango, Mexiko. Univ. Gött. Diss. 173 p.
- Vargas-Larreta, B.; Corral-Rivas, J.J.; Aguirre-Calderón, O.; Nagel, J. 2010. Modelos de crecimiento de árbol individual: Aplicación del Simulador BWINPro7. *Madera y Bosques* 16 (4): 81-104.
- Navar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *For Ecol Manage* 257:427-434.

## **Lista de figuras**

**Figura 1** Esquematización del proceso para la cuantificación de la biomasa aérea forestal

**Figura 2** Modelo económico parcial de la Alternativa 1 de manejo en El Salto, Durango, México

**Figura 3** Modelo económico parcial de la Alternativa 2 de manejo en El Salto, Durango, México

**Figura 4** Modelo económico parcial de la Alternativa 3 de manejo en El Salto, Durango, México

## **Lista de tablas**

**Tabla 1** Gases de Efecto Invernadero (GEI) y Potencial de Calentamiento Atmosférico (PCA)

**Tabla 2** Datos de entrada del modelo

**Tabla 3** Resumen de los resultados claves del escenario de referencia

## **Reconocimientos**

Parte de este trabajo se basó en el estudio de caso "*Los Ejidos de El Salto: Biomass Energy and Carbon Offsets in the El Salto Forests*", escrito por Len Eddy de la empresa Carbon Basis Company Ltd. y Álvaro Mendoza y Robert Clemen de la Escuela de Negocios de Fuqua, de la Universidad de Duke.

**Tabla 1**

GEI	Nombre	(PCA)
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono	1
CH <sub>4</sub>	Metano	25
N <sub>2</sub> O	Óxido Nitroso	298
HFCs	Hidrofluorocarbonos	124-14,800
PFCs	Perfluorocarbonos	7,390-12,200
SF <sub>6</sub>	Hexafluoruro de Azufre	22,800

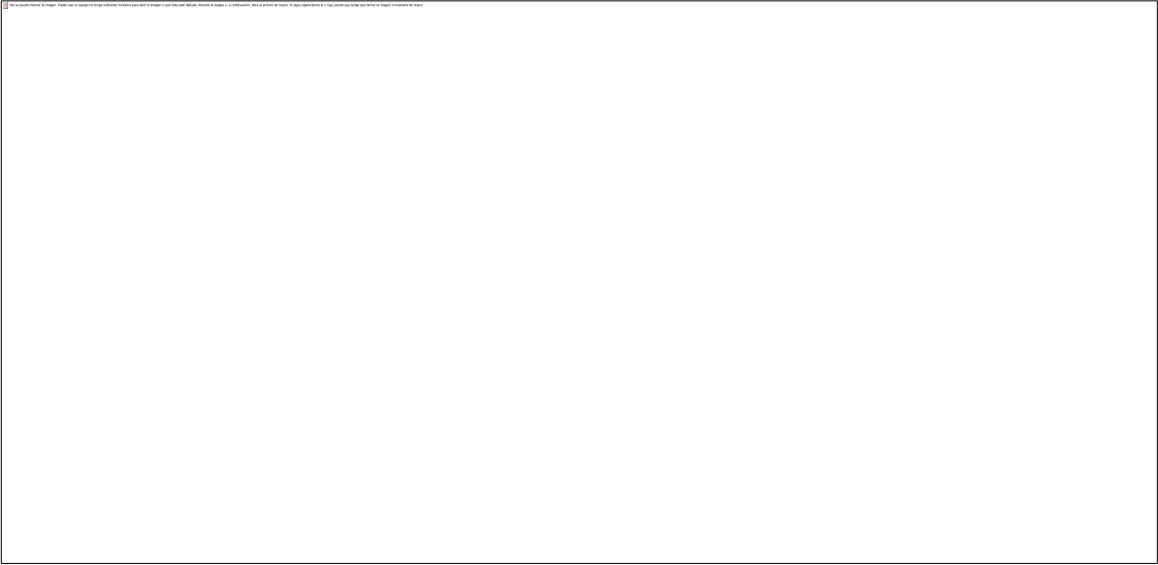
**Tabla 2**

Parámetro	Unidades	Valor
Factor de conversión de madera	t madera en producto / t madera (trozas)	0.50
Factor de rendimiento bioenergía	Gj / t residuos de madera	2.46
Factor de conversión de carbono forestal	tCO <sub>2</sub> eq / t de madera	0.50
factor de conversión de C retenido en madera	tCO <sub>2</sub> eq / t en productos de madera	0.40
Amortiguamiento de carbono forestal	%	25%
Factor de emisiones de la red de electricidad	tCO <sub>2</sub> eq / Gj	0.13
Precio productos de madera	\$ / t en productos de madera	\$ 40.00
Costo variable de productos de madera	\$ / t en productos de madera	\$ 37.00
Precio bioenergía	\$ / kWh	\$ 0.0675
Factor de conversión Gj a MWh	Gj/MWh	\$ 3.6
Inversión inicial planta de energía	\$	\$ 30,500,000
Costo de mantenimiento de la planta año 26	\$	\$ 10,000,000
Precio bonos de C no forestales (MDL)	\$ / tCO <sub>2</sub> eq	\$ 11.00
Precio bonos de C forestal (mercado voluntario)	\$ / tCO <sub>2</sub> eq	\$ 3.85
Costo comercialización de los bonos de C	\$ / tCO <sub>2</sub> eq	\$ 2.00
Tasa de descuento		11.23%

**Tabla 3**

<b>Indicador</b>	<b>Promedio de 100 años</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Volumen Total de Cosecha (pino y encino)	229,000 m <sup>3</sup> /año	201,000m <sup>3</sup> /año	257,000m <sup>3</sup> /año
Residuos de cosecha recuperables	55,000 ton/año	48,000 ton/año	68,000 ton/año
Desecho recuperable de aserradero (aserrín y leña)	31,000 ton/año	27,000 ton/año	38,000 ton/año
Reducciones de GEI	46,000 tCO <sub>2</sub> /año	40,000t CO <sub>2</sub> /año	57,000 tCO <sub>2</sub> /año
Aumentos en las existencias de carbono totales (anual)	21,000 tC/año	8,000t C/año	40,000 tC/año

**Figura 1**



**Figura 2**

DATOS DE CAMBIO DE PRECIOS		Año 1	Año 5	Año 10	Año 15	Año 20	Año 25	Año 30	Año 40	Año 50
Factor de inflación de la madera			1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
Factor de inflación bioenergía			3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Precio bioenergía		7%	8%	9%	10%	12%	14%	16%	21%	29%
Cambio en el precio de los bonos de C	%		3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Precio de los bonos no forestales (MDL)	\$/ tCO2eq	\$ 11.00	\$ 12.38	\$ 14.35	\$ 16.64	\$ 19.29	\$ 22.36	\$ 25.92	\$ 34.84	\$ 46.82
Precio de los bonos de C forestal (mercado voluntario)	\$/ tCO2eq	\$ 3.85	\$ 4.33	\$ 5.02	\$ 5.82	\$ 6.75	\$ 7.83	\$ 9.07	\$ 12.19	\$ 16.39
<b>EVALUACIÓN ECONÓMICA</b>										
<b>ALT 1: Régimen de manejo actual</b>										
	<b>Unidades</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 10</b>	<b>Año 15</b>	<b>Año 20</b>	<b>Año 25</b>	<b>Año 30</b>	<b>Año 40</b>	<b>Año 50</b>
<b>Productos</b>										
Cosecha	t por año	114500	114500	114500	114500	114500	114500	114500	114500	114500
Productos de madera	t por año	57250	57250	57250	57250	57250	57250	57250	57250	57250
Residuos de la industria	t por año	57250	57250	57250	57250	57250	57250	57250	57250	57250
Residuos de la cosecha	t por año	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000
Producción de energía	Gj por año	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Bonos de C</b>										
Bonos de C forestal	tCO2eq por año	16875	16875	16875	16875	16875	16875	16875	16875	16875
Bonos de c en productos de madera	tCO2eq por año	17175	17175	17175	17175	17175	17175	17175	17175	17175
Bonos por bioenergía	tCO2eq por año	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Ganancias</b>										
Ganancias productos de madera	\$/ por año	\$ 171,750	\$ 175,211	\$ 179,635	\$ 184,171	\$ 188,822	\$ 193,590	\$ 198,478	\$ 208,628	\$ 219,298
Ingresos bioenergía	\$/ por año	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Ganancias bioenergía	\$/ por año	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Ganancias bonos de C forestal	\$/ por año	\$ 31,219	\$ 39,373	\$ 51,019	\$ 64,521	\$ 80,173	\$ 98,318	\$ 119,353	\$ 172,008	\$ 242,771
Ganancias bonos de C productos de madera	\$/ por año	\$ 31,774	\$ 40,073	\$ 51,926	\$ 65,668	\$ 81,598	\$ 100,066	\$ 121,475	\$ 175,066	\$ 247,087
Ganancias bonos de C bioenergía	\$/ por año	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>Ganancias totales</b>	\$/ por año	\$ 234,743	\$ 254,657	\$ 282,581	\$ 314,360	\$ 350,593	\$ 391,974	\$ 439,306	\$ 555,702	\$ 709,156
<b>ALT 1 Valor Actual Neto (VAN)</b>		<b>\$2,545,916</b>								

**Figura 3**

<b>ALT 2: Régimen de manejo actual + planta de energía</b>										
	<b>Unidades</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 10</b>	<b>Año 15</b>	<b>Año 20</b>	<b>Año 25</b>	<b>Año 30</b>	<b>Año 40</b>	<b>Año 50</b>
<b>Productos</b>										
Cosecha	t por año	114500	114500	114500	114500	114500	114500	114500	114500	114500
Productos de madera	t por año	57250	57250	57250	57250	57250	57250	57250	57250	57250
Residuos de la industria	t por año	57250	57250	57250	57250	57250	57250	57250	57250	57250
Residuos de la cosecha	t por año	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000
Producción de energía	Gj por año	276135	276135	276135	276135	276135	276135	276135	276135	276135
<b>Bonos de C</b>										
Bonos de C forestal	tCO2eq por año	16875	16875	16875	16875	16875	16875	16875	16875	16875
Bonos de c en productos de madera	tCO2eq por año	17175	17175	17175	17175	17175	17175	17175	17175	17175
Bonos por bioenergía	tCO2eq por año	35897.55	35897.55	35897.55	35897.55	35897.55	35897.55	35897.55	35897.55	35897.55
<b>Ganancias</b>										
Ganancias productos de madera	\$ por año	\$ 171,750	\$ 175,211	\$ 179,635	\$ 184,171	\$ 188,822	\$ 193,590	\$ 198,478	\$ 208,628	\$ 219,298
Ingresos bioenergía	\$ por año	\$ 5,177,531	\$ 5,827,357	\$ 6,755,504	\$ 7,831,481	\$ 9,078,832	\$ 10,524,855	\$ 12,201,192	\$ 16,397,381	\$ 22,036,709
Ganancias bioenergía	\$ por año	\$ 2,271,237	\$ 2,200,509	\$ 2,747,621	\$ 3,395,679	\$ 4,158,212	\$ 5,051,376	\$ 6,094,281	\$ 8,723,023	\$ 12,273,669
Ganancias bonos de C forestal	\$ por año	\$ 31,219	\$ 39,373	\$ 51,019	\$ 64,521	\$ 80,173	\$ 98,318	\$ 119,353	\$ 172,008	\$ 242,771
Ganancias bonos de C productos de madera	\$ por año	\$ 31,774	\$ 40,073	\$ 51,926	\$ 65,668	\$ 81,598	\$ 100,066	\$ 121,475	\$ 175,066	\$ 247,087
Ganancias bonos de C bioenergía	\$ por año	\$ 323,078	\$ 372,638	\$ 443,425	\$ 525,486	\$ 620,617	\$ 730,901	\$ 858,749	\$ 1,178,779	\$ 1,608,871
<b>Ganancias totales</b>	\$ por año	\$ 2,829,058	\$ 2,827,804	\$ 3,473,626	\$ 4,235,525	\$ 5,129,422	\$ 6,174,250	\$ 7,392,336	\$ 10,457,503	\$ 14,591,696
<b>ALT 2 Valor Actual Neto (VAN)</b>		<b>\$31,940,624</b>								



**Figura 4**

<b>ALT 3: Máxima cosecha + Planta de energía</b>										
	<b>Unidades</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 10</b>	<b>Año 15</b>	<b>Año 20</b>	<b>Año 25</b>	<b>Año 30</b>	<b>Año 40</b>	<b>Año 50</b>
<b>Productos</b>										
Cosecha	t por año	159500	159500	159500	159500	159500	159500	159500	159500	159500
Productos de madera	t por año	79750	79750	79750	79750	79750	79750	79750	79750	79750
Residuos de la industria	t por año	79750	79750	79750	79750	79750	79750	79750	79750	79750
Residuos de la cosecha	t por año	95000	95000	95000	95000	95000	95000	95000	95000	95000
Producción de energía	Gj por año	429885	429885	429885	429885	429885	429885	429885	429885	429885
<b>Bonos de C</b>										
Bonos de C forestal	tCO2eq por año	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bonos de c en productos de madera	tCO2eq por año	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bonos por bioenergía	tCO2eq por año	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Ganancias</b>										
Ganancias productos de madera	\$ por año	\$ 239,250	\$ 244,071	\$ 250,234	\$ 256,553	\$ 263,031	\$ 269,673	\$ 276,483	\$ 290,622	\$ 305,484
Ingresos bioenergía	\$ por año	\$ 8,060,344	\$ 9,071,988	\$ 10,516,920	\$ 12,191,993	\$ 14,133,862	\$ 16,385,019	\$ 18,994,728	\$ 25,527,326	\$ 34,306,592
Ganancias bioenergía	\$ por año	\$ 3,395,534	\$ 4,253,447	\$ 5,127,538	\$ 6,154,655	\$ 7,356,622	\$ 8,759,210	\$ 10,392,677	\$ 14,499,708	\$ 20,037,050
Ganancias bonos de C forestal	\$ por año	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Ganancias bonos de C productos de madera	\$ por año	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Ganancias bonos de C bioenergía	\$ por año	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
<b>Ganancias totales</b>	<b>\$ por año</b>	<b>\$ 3,634,784</b>	<b>\$ 4,497,518</b>	<b>\$ 5,377,772</b>	<b>\$ 6,411,208</b>	<b>\$ 7,619,653</b>	<b>\$ 9,028,883</b>	<b>\$ 10,669,159</b>	<b>\$ 14,790,330</b>	<b>\$ 20,342,534</b>
<b>ALT 3 Valor Actual Neto (VAN)</b>		<b>\$48,551,814</b>								