

Evaluación del impacto de la producción de aceite de palma sobre el calentamiento global

(I) Un modelo de campo

Evaluating the Global Warming Impact of Palm Oil Production

(I) A Field Model

AUTORES

Ian E. Henson

7 Richmond Dale, Bristol BS8 2UB,
Reino Unido

K. C. Chang

111 Jalan 12/14, 46200 Petaling
Jaya, Selangor, Malasia

Palabras CLAVE

Palma de aceite, cambio en el uso de suelo, secuestro de carbono, emisiones de gases de efecto invernadero, modelo de monocultivo.

Oil palm, land use change, carbon sequestration, greenhouse gas emission, single crop model.

Tomado de:
The Planter, Kuala Lumpur, 85
(997): 193-211 (2009)

Resumen

Existe mucho interés en conocer en qué medida la producción de aceite de palma tiene un efecto sobre el calentamiento global en términos de su impacto en los flujos de gases efecto invernadero. Las áreas cultivadas de palma de aceite se han extendido considerablemente en los últimos años, principalmente en el sureste asiático, donde han reemplazado bosques y otros tipos de vegetación, lo que seguramente ha generado un cambio en el balance general de carbono de la región. Anteriormente se han hecho varios intentos para evaluar estos cambios y determinar la naturaleza de su impacto. Este trabajo describe un modelo flexible que se aplica a las localidades individuales donde existen plantaciones de palma de aceite y que contempla los principales factores que probablemente tienen alguna incidencia sobre el balance de carbono de los cultivos. El modelo calcula todas las principales ganancias y pérdidas de C que se producen tanto en las localidades (plantaciones) como fuera de ellas (plantas de beneficio), teniendo en cuenta las diferentes condiciones locales y las prácticas de manejo. Ofrece diversas opciones que incluyen la posibilidad de seleccionar el uso que se le daba anteriormente al suelo y el ciclo de vida del cultivo. Ofrece opciones específicas sobre las emisiones de C de suelos de turba, mientras que los diferentes potenciales de rendimiento del cultivo se representan por medio de una opción de curvas de crecimiento de la palma de aceite. Permite también ingresar datos del usuario. Se tienen en cuenta diferentes opciones de manejo, tales como la reutilización de subproductos de las plantas de beneficio en el campo y el consumo de combustibles fósiles equivalentes en los cultivos, tanto de fuentes directas (como el combustible para el transporte y la maquinaria) como indirectas (fertilizantes, herbicidas, agroquímicos para la protección de cultivos, etc.). El modelo arroja resultados que muestran los efectos de los diferentes usos dados anteriormente a los suelos y otros factores. El modelo también se extiende para hacer seguimiento al balance de C a lo largo de sucesivos cultivos de palma de aceite.



Abstract

There is substantial interest in the extent to which palm oil production affects global warming *via* its impact on fluxes of greenhouse gases. Oil palm planting has expanded considerably in recent years, most markedly in Southeast Asia, replacing forest and other vegetation and hence most likely changing the overall carbon balance of the region. Several previous attempts have been made to assess effects of these changes and to determine the nature of the impacts. This paper describes a flexible model which applies to individual sites and stands of oil palm, and which takes account of the major factors likely to influence the carbon balance of the crop. The model calculates all major on-site (plantation) and off-site (mill) gains and losses of C, taking into account different site conditions and management practices. It offers numerous options that include choice of previous land use and crop lifespan. There are specific options governing C emission from peat soils, while different crop yield potentials are represented *via* a choice of oil palm growth curves. Provision is made for input of data by the user. Different management options are catered for such as use of palm oil mill by-products and fossil fuel equivalent inputs in the field, the latter including both direct (*i.e.* fuel for transport and machinery) and indirect (fertilizers, herbicides, crop protection chemicals, etc.) sources. Outputs from the model showing effects of different previous land uses and other factors are presented. The model is also extended to track the C balance over successive oil palm crops.



En los últimos años, el área sembrada con palma de aceite se ha expandido considerablemente, en particular en Indonesia y Malasia, donde ha sustituido a bosques naturales y otros tipos de vegetación. Estos grandes cambios en la utilización del suelo con seguridad han alterado el intercambio de carbono entre la vegetación y la atmósfera, con un potencial impacto a largo plazo sobre el clima y el balance de calor terrestre. Se han llevado a cabo diversas investigaciones con distintos enfoques para evaluar los efectos del cultivo de la palma de aceite sobre los intercambios de CO₂ y otros gases de efecto invernadero (Henson, 2004, 2005^a; Melling et ál., 2007; Germer y Sauerborn, 2007; Reinhardt et ál., 2007; Schmidt, 2007; Reijnders y Huijbregts, 2008; Wicke et ál, 2008; Henson, 2009). Dichos efectos, que involucran cambios en el uso del suelo, condiciones locales y factores de manejo, probablemente varíen de un sitio a otro.

En el pasado, se han adoptado diferentes enfoques para desarrollar presupuestos de carbono para la palma de aceite, en su mayoría basados en datos generales. Por lo general, no existen datos disponibles sobre regiones específicas; por ello, en vez de tener que esperar cerca de 25 años para obtenerlos, se ha preferido avanzar utilizando procesos de modelado. Si bien no se puede esperar que los modelos ofrezcan respuestas precisas, sí ayudan a definir la importancia relativa de

los diferentes factores y a indicar los límites dentro de los cuales se podrían encontrar los valores reales.

Este trabajo describe un modelo anualizado para una sola localidad que ofrece la facilidad de modificar los datos de entrada para ajustarse a una gran variedad de condiciones. El modelo no es de ninguna manera la última palabra y está sujeto a mejoras en la medida en que nuevos datos se encuentren disponibles. Aquí se ofrecen ejemplos con el fin de ilustrar su flexibilidad y su capacidad de adaptarse a las circunstancias individuales. Los procesos subyacentes están basados en el modelo más amplio a “nivel de paisaje” (Henson, 2004, 2009), el cual calcula los balances a nivel regional para Malasia. Sin embargo, el modelo de localidad individual se puede utilizar ampliamente, y no es de ninguna manera específico para las condiciones de Malasia.

Metodología

En los presupuestos que se presentan, toda la contabilidad se hace en términos de carbono, o de equivalentes de C (C_{eq}), estos últimos se basan en el potencial de calentamiento global (PCG) de las emisiones como se describió anteriormente (Henson, 2009). Para efectos comparativos con otros estudios, algunos datos han sido convertidos a cantidades de CO₂. Se utiliza un enfoque simple de “hoja de balance”, donde los ítems



que representan ganancias y pérdidas anuales de C se presentan por separado, incluyendo la pérdida inicial de biomasa causada por el desmonte de terrenos para sembrar palma de aceite. Esto es calculado en términos de promedios anuales a lo largo del ciclo del cultivo. (Nótese que algunos de los componentes de las “ganancias”, tales como la biomasa de la cobertura del suelo, pueden en efecto mostrar pérdidas en algunos años debido a la reducción de biomasa. Para mayor sencillez, estas pérdidas se incluyen en los valores promedio de las ganancias).

Se ofrecen ocho opciones para especificar esta biomasa inicial (ver Apéndice), cuya pérdida de C se “amortiza” o reparte a lo largo de la vida del cultivo. Para las resiembras de palma de aceite, la pérdida inicial la representa el saldo final de biomasa del cultivo anterior de palma de aceite, incluyendo la cobertura vegetal y el desperdicio. El carbono recuperado de los materiales del desmonte, tales como la madera de los bosques tumbados o el caucho, se resta de la biomasa inicial. El carbono en los residuos de la biomasa que se dejan descomponer *in-situ* también se suma a la demás biomasa perdida y se calcula con base en las tasas de descomposición estimadas que se describen en otros estudios (Henson, 2004, 2009).

El ciclo de vida del cultivo puede variar de 15 a 30 años. El secuestro de C del cultivo se evalúa a partir de los cambios anuales (generalmente incrementos) en biomasa seca y contenido de C. Cuando fue posible hacerlo, los contenidos de C medidos (% de biomasa seca) se utilizaron en los cálculos. En el caso de la palma de aceite, los valores fueron de 57,6% para racimos y de 45,0% para material vegetal seco (Henson, 1999, 2004). En el caso del caucho, se utilizaron los contenidos de C determinados por Yew (2000) y Yew y Mohd Nasaruddin (2002), mientras que para los bosques se utilizó un contenido promedio de carbono de 45,0% (Chan, 1982; Kira, 1987). Para el contenido de C del cacao y del coco se consideró el 45,0%, y para los pastos y los cultivos arables el 50,0%.

En la evaluación de los cambios en el almacenamiento total de C en los cultivos de palma de aceite, se incluyeron todos los componentes del cultivo además de las palmas de aceite, como son la cobertura vegetal, las hojas amontonadas, las bases de hojas cortadas y las inflorescencias masculinas sueltas. Las cantidades de los componentes diferentes a las palmas, que son influenciadas por el crecimiento de las palmas de

aceite, se calcularon de la misma manera realizada en estudios anteriores (Henson, 2009).

Las cantidades de productos y subproductos resultantes del procesamiento de racimos de fruto fresco (RFF) se calcularon con base en los rendimientos de RFF y las cantidades relativas de cada componente. Los últimos se basaron en datos de Wood y Corley (1993). El secuestro de carbono en los componentes de los RFF se evaluó con base en su contenido de C y los supuestos sobre su ciclo de vida (Henson, 2009). Para los subproductos, tales como los racimos de frutos vacíos (RFV), los efluentes de las plantas de beneficio de palma de aceite (EPBPA) y los cuescos, las tasas de descomposición dependen de su uso. Si se reutilizan como fertilizantes en el campo, los RFF y EPBPA pueden incrementar la materia orgánica del suelo (MOS) (Lim, 1988; Mohd Hashim, 1993; Lim y Zaharah, 2002). Por lo anterior, para ellos se utilizó un supuesto de un secuestro parcial en MOS, tal y como lo describe Melling et ál. (2007). Para los RFV se utilizaron las tasas de descomposición medidas por Lim y Zaharah (2000) para evaluar el C remanente. Para los EPBPA y cuescos, dada la ausencia de datos experimentales comparables, la pérdida de C se calculó bajo el supuesto de una reducción lineal a lo largo de un ciclo de vida fijo (Henson, 2004).

En el campo las mayores pérdidas (emisiones) de C, ya sea como CO_2 o como otros gases de efecto invernadero (GEI), resultan de la pérdida inicial de biomasa por el desmonte, la respiración microbiana del suelo, las emisiones de N_2O de los fertilizantes a base del nitrógeno y de los suelos de turba, y los equivalentes de C de los combustibles fósiles consumidos ya sea directamente (p.ej., el diésel utilizado en la maquinaria) o indirectamente (durante la fabricación y el transporte de suministros para los cultivos tales como fertilizantes, pesticidas y herbicidas, etc.). Dichas pérdidas en los suministros se basaron en Wood y Corley (1993), ajustadas para tener en cuenta un menor consumo de fertilizantes en los primeros años y en los dos últimos años del cultivo. Las emisiones de N_2O del fertilizante de N aplicado se evaluaron según lo describe Caliman et ál. (2005), y convertidos a C_{eq} con base en un MOS 296 veces más alto que el CO_2 .

Las pérdidas de C por respiración bacteriana en suelos de turba y en los suelos minerales se trataron de modo diferencial. Para la turba, se parte del supuesto

de que la oxidación del C en el suelo es generada por el drenado previo al cultivo. Se pueden ajustar opcionalmente en el modelo los factores que afectan la tasa, como son la tasa de remisión, la densidad de masa, el contenido de C y la proporción de remisión debido a la pérdida de C (Wosten et ál., 1997). A pesar de la evidencia que indica mayores emisiones de C en suelos de turba a mayor profundidad de drenado, no hay suficientes datos experimentales disponibles para cuantificar adecuadamente su efecto y, por tanto, este enfoque no se adoptó.

Para los suelos minerales se utiliza el supuesto de una tasa estable donde las pérdidas de MOS debido a la respiración microbiana (RM) se compensan con las adiciones de los desechos del cultivo (hojas cortadas, inflorescencias masculinas, etc.) como lo propone Lamade et ál. (1996). Debido a que la RM y las adiciones de desechos se toman como iguales y opuestos, se cancelan el uno al otro y, por tanto, pueden ser eliminados del presupuesto, lo que simplifica sustancialmente el análisis. Este enfoque además obvia la necesidad de contabilizar la rotación de raíces (que es difícil de evaluar), puesto que se supone que la rotación de C, que de otra manera contribuiría al inventario de MOS, se disipa como RM. Aunque, estrictamente hablando no existe un estado estable de MOS, debido a que una parte del C de las hojas cortadas también se incorpora en la MOS (Fairhurst, 1996; Lamade et ál., 1996; Haron et ál., 1998), particularmente en las primeras etapas del cultivo (DID, 1989), los cambios serían pequeños en el largo plazo, puesto que hay poca evidencia de un aumento o una reducción promedio en la MOS a lo largo del cultivo.

El presupuesto de C producido se puede restringir al campo o se puede incluir en el proceso de conversión. Si no se reincorporan los subproductos de la planta de beneficio y el alcance del modelo se programa para excluir los materiales por fuera del cultivo (la planta de beneficio), entonces la totalidad de C exportada en los RFF se pierde y no contribuye al presupuesto. Esto también significa que los GEI generados por fuera del campo también son excluidos. Sin embargo, si se programa el alcance para incluir los materiales y procesos de beneficio, entonces el secuestro y las pérdidas de C adicionales que ocurren fuera del campo se contabilizan.

El metano es la principal fuente de emisión de GEI en la planta de beneficio, el cual se genera en los

estanques abiertos de EPBPA. Su producción se calculó a partir de los RFF procesados con base en datos de Yacob et ál. (2006). Los EPBPA y otros materiales de desecho de las plantas de beneficio también emiten CO₂, pero debido a que esto representa un C que había sido secuestrado previamente por el cultivo (pero que no se cuenta como una ganancia de C en el campo porque se exporta), puede ser ignorado. El metano, por su parte, representa la producción de GEI adicional que es mucho más fuerte que el CO₂ y, por tanto, debe ser contabilizado.

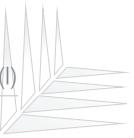
Resultados y discusión

Se presentan cuatro ejemplos para ilustrar la utilización del modelo, los cuales se diferencian en los materiales de siembra empleados, la vegetación previa y los tipos de suelos.

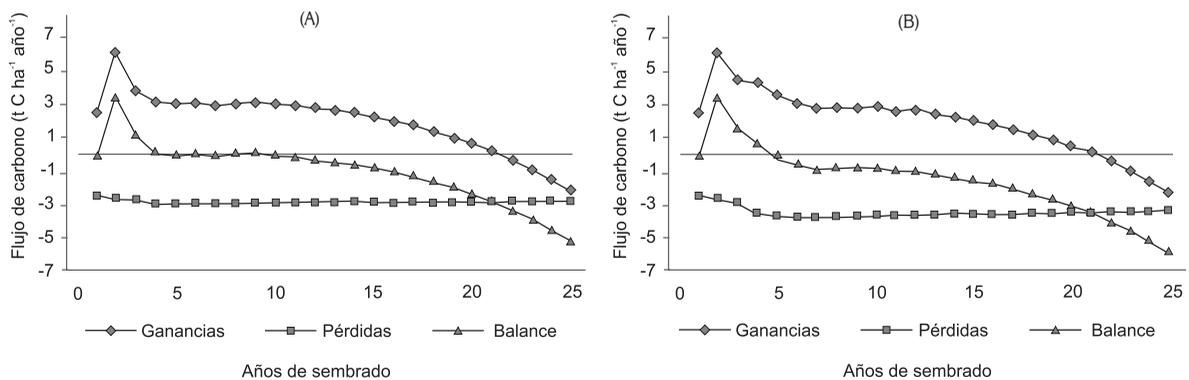
Caso 1. Presupuestos nacionales promedio de palma de aceite en Malasia luego de cultivos de caucho en suelos minerales

El promedio nacional (PN) de palma de aceite (Henson, 1999, 2003), como su nombre lo indica, representa el comportamiento promedio del cultivo en Malasia, el cual arroja un rendimiento promedio a lo largo de su ciclo de vida igual al rendimiento promedio reciente de palma de aceite en Malasia. Los rendimientos promedio a nivel nacional son por supuesto más bajos que los de los mejores cultivos bien administrados. En este ejemplo, se supone que el PN de palma de aceite se cultiva en suelos minerales (en el año 2006 los suelos de turba representaban < 9% del área total sembrada con palma de aceite), que reemplazó a un cultivo anterior de caucho, que se cultivó sin reciclar subproductos de la planta de beneficio en el campo y que se resembró después de 25 años.

La Tabla 1 muestra el resumen de los presupuestos de C. Luego de descontar la pérdida inicial de biomasa, tanto el presupuesto de la localidad como el presupuesto total muestran un balance general negativo. Sin embargo, se observa que el balance cambia a lo largo de la vida del cultivo (Figura 1), y se convierte en negativo únicamente a partir del quinto año en adelante tanto para el presupuesto de la localidad como para el presupuesto total.

**Tabla 1.** Presupuestos nacionales promedio de palma de aceite en Malasia

		Toneladas C _{eq} ha ⁻¹ año ⁻¹	Notas
Presupuesto local			
Ganancia de carbono	Palma de aceite	1,628	Incluye raíces
	Cobertura vegetal	0,059	Incluye desechos de cobertura
	Desechos de palma de aceite	0,172	Hojas amontonadas, bases, inflorescencias masculinas
	Subproductos de planta de beneficio	0	Se supone que no retornan
	Ganancias totales	1,859	
Pérdidas de carbono	Suministros de plantación	0,333	Con base en el uso de combustibles fósiles
	Emisiones de N ₂ O	0,166	De fertilizante de N
	Pérdida inicial de biomasa	2,466	Caucho maduro. Amortizado en 25 años
	Pérdidas totales	2,965	
Balance de carbono		-1,105	El signo negativo representa una emisión neta de C
Ítems del presupuesto por fuera de la localidad			
Ganancia de carbono	Productos y subproductos de la planta de beneficio	0,079	Aceite de palma, aceite de palmiste, torta de palmiste, racimos vacíos, fibra, cáscaras, efluentes de planta de beneficio
Pérdidas de carbono	CH ₄ de los efluentes de las plantas de beneficio	0,671	
Presupuesto total (local más fuera de la localidad)			
	Ganancias totales de C	1,938	
	Pérdidas totales de C	3,636	
	Balance de C	-1,698	El signo negativo representa una emisión neta de C

**Figura 1.** Presupuesto de carbono de la localidad (A) y total (B) para el promedio nacional de palma de aceite sembrado después de caucho maduro.

Caso 2. Palma de aceite sobre suelo costero de Malasia simulado utilizando el modelo OPRODSIM.

El modelo OPRODSIM (Henson, 2005b) tiene la capacidad de generar diversas curvas de biomasa de palma de aceite y parámetros asociados con base en una

amplia variedad de opciones. En este ejemplo, se seleccionó una opción de localidad costera utilizando la radiación como el único factor climático efectivo. Las opciones seleccionadas dieron como resultado una producción promedio de RFF a lo largo de 25 años de 25,2 t ha⁻¹ año⁻¹, comparado con 18,7 t que resultaron en el caso del PN (ambos promedios excluyen

los primeros dos años sin producción). Debido a que la mayoría de los suelos costeros han sido cultivados durante muchos años, se partió del supuesto de que el cultivo anterior era palma de aceite. Los presupuestos resultantes se resumen en la Tabla 2.

Ambos presupuestos estándar para las localidades costeras fueron negativos, a pesar de la mayor productividad. Aquí también los balances varían a lo largo de la vida del cultivo (Figura 2), y se vuelven negativos a partir del 5^o y el 7^o año en adelante para

Tabla 2. Presupuestos de palma de aceite en suelos costeros			
		Toneladas C _{eq} ha ⁻¹ año ⁻¹	Notas
Presupuesto local			
Ganancia de carbono	Palma de aceite	2,015	Incluye raíces
	Cobertura vegetal	0,048	Incluye desechos de cobertura
	Desechos de palma de aceite	0,217	Hojas amontonadas, bases, inflorescencias masculinas
	Subproductos de planta de beneficio	0	Se supone que no retornan
	Ganancias totales	2,280	
Pérdidas de carbono	Suministros de plantación	0,333	Con base en el uso de combustibles fósiles
	Emisiones de N ₂ O	0,166	De fertilizante de N
	Pérdida inicial de biomasa	2,280	Aceite de palma maduro. Amortizado en 25 años
	Pérdidas totales	2,779	
Balance de carbono		-0,499	El signo negativo representa una emisión neta de C
Ítem del presupuesto por fuera de la localidad			
Ganancia de carbono	Productos y subproductos de la planta de beneficio	0,127	Aceite de palma, aceite de palmiste, torta de palmiste, racimos vacíos, fibra, cáscaras, efluentes de planta de beneficio
Pérdidas de carbono	CH ₄ de los efluentes de las plantas de beneficio	0,900	
Presupuesto total (local más fuera de la localidad)			
Ganancias totales de C		2,407	
Pérdidas totales de C		3,679	
Balance de C		-1,272	El signo negativo representa una emisión neta de C

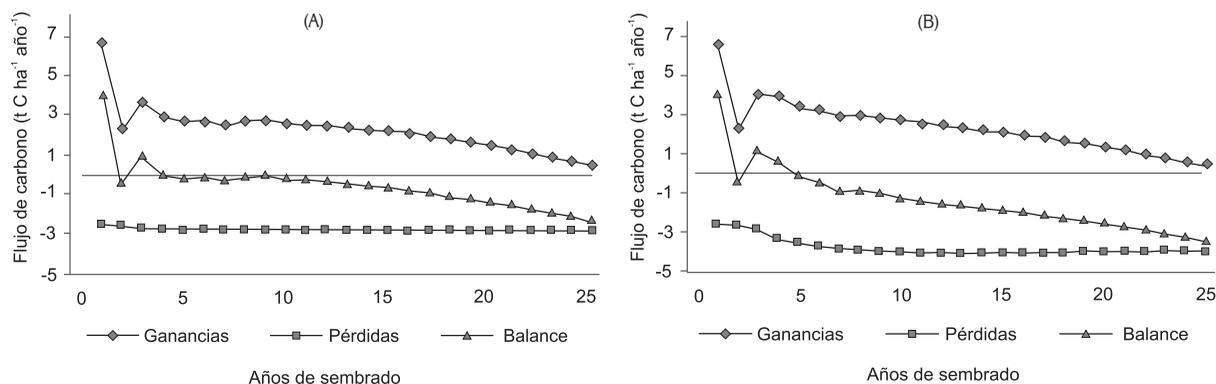


Figura 2. Presupuesto de carbono local (A) y total (B) para palma de aceite en suelos costeros sembrados después de un cultivo de palma anterior.



el presupuesto total y local, respectivamente. Esto se explica principalmente por la reducción en las tasas de producción de biomasa de palma de aceite y en la productividad en los años más tardíos.

Caso 3. Palma de aceite en una localidad del interior de Malasia utilizando OPRODSIM

En este ejemplo se utilizan datos generados por OPRODSIM para un terrero de productividad baja a media. La vegetación previa consistía de pastizales que, aunque no son muy comunes en Malasia, sí lo son en Indonesia. Los promedios de 25 años, que muestran un balance positivo de C tanto para los presupuestos totales como locales, se muestran en la Tabla 3. Si bien los presupuestos promedios fueron ambos positivos, los cambios anuales (Figura 3) también muestran algunos años con balances negativos.

Caso 4. Palma de aceite en suelo de turba

Un tipo de desarrollo que probablemente tiene un impacto particularmente marcado en el balance de C es el establecimiento de cultivos en suelos de turba. La palma de aceite es en la actualidad el principal cultivo que se está estableciendo en turbas tanto en Malasia como en Indonesia, en parte debido a la creciente escasez de suelos minerales. Se considera que la conversión de pantanos de turba tropicales, que originalmente soportan bosques con alta densidad de biomasa para ser utilizados para cultivos, en general tiene un impacto negativo sobre la biodiversidad, la hidrología y otros factores del ecosistema que generan la remisión de la turba y emisiones de carbono (Hooijer et ál., 2006; Greenpeace, 2007). Esto se debe en gran parte al drenaje que se debe realizar para asegurar el crecimiento exitoso de los cultivos.

Tabla 3. Presupuestos de palma de aceite en suelos del interior

		Toneladas C _{eq} ha ⁻¹ año ⁻¹	Notas
Presupuesto local			
Ganancia de carbono	Palma de aceite	1,902	Incluye raíces
	Cobertura vegetal	0,052	Incluye desechos de cobertura
	Desechos de palma de aceite	0,185	Hojas amontonadas, bases, inflorescencias masculinas
	Subproductos de planta de beneficio	0	Se supone que no retornan
	Ganancias totales	2,139	
Pérdidas de carbono	Suministros de plantación	0,333	Con base en el uso de combustibles fósiles
	Emisiones de N ₂ O	0,166	De fertilizante de N
	Pérdida inicial de biomasa	0,199	Pastizales. Amortizado en 25 años
	Pérdidas totales	0,698	
Balance de carbono		+1,441	El signo positivo representa una ganancia neta de C
Artículos del presupuesto por fuera de la localidad			
Ganancia de carbono	Productos y sub-productos de la planta de beneficio	0,125	Aceite de palma, aceite de palmiste, torta de palmiste, racimos vacíos, fibra, cáscaras, efluentes de planta de beneficio
Pérdidas de carbono	CH ₄ de los efluentes de las plantas de beneficio	0,650	
Presupuesto total (local más fuera de la localidad)			
Ganancias totales de C		2,264	
Pérdidas totales de C		1,348	
Balance de C		+0,916	El signo positivo representa una ganancia neta de C

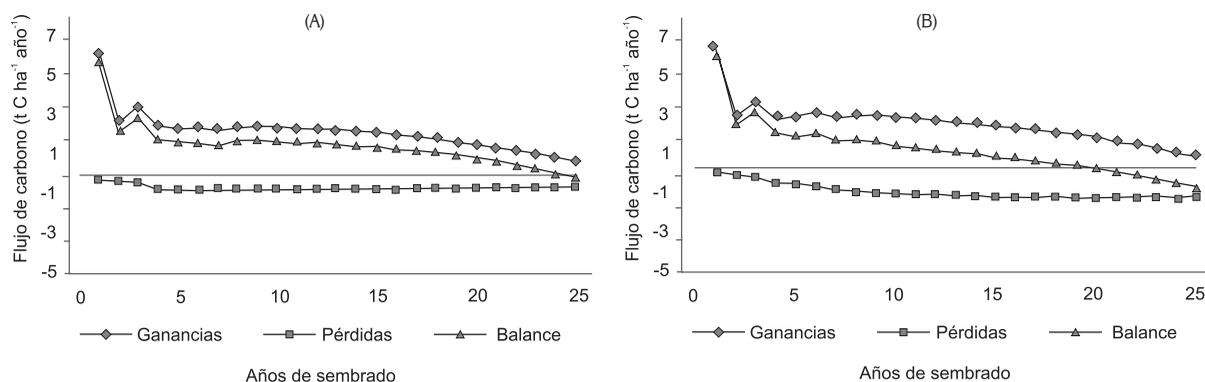


Figura 3. Presupuesto de carbono local (A) y total (B) para palma de aceite en suelos del interior cuando se reemplazan pastizales.

Los datos utilizados en este ejemplo fueron, en parte, modelados y otros fueron tomados en un ensayo de densidad de palma de aceite en turba moderadamente profunda en una región peninsular de Malasia (Henson y Mohd Tayeb, 2003). Los datos del cultivo de densidad media en un ensayo de 160 palmas por hectárea fueron seleccionados, debido a que esta densidad representa una práctica comercial típica. Sin embargo, los datos de la prueba (Tabla 4) únicamente estaban disponibles para los primeros 16 años, por tanto, con el fin de facilitar su comparación con los otros ejemplos se extrapolaron los resultados para cubrir 25 años utilizando una regresión lineal (Figura 4).

Las tendencias fueron lineales en los tres principales componentes del presupuesto. Los valores del presupuesto local presentaron pocas diferencias en términos de promedios y tendencias con respecto al presupuesto total (local + fuera de la localidad), como se indica en la Figura 4. Por ello, las contribuciones de estos últimos fueron menores.

Claramente, en la localidad de turba las pérdidas son mayores que las ganancias, y las emisiones de C, debido a la oxidación de la turba, representaron cerca del 62% de las pérdidas locales y 59% de las pérdidas locales más las pérdidas por fuera de la localidad. La tasa de oxidación de la turba es crucial para el presupuesto de los cultivos en suelos de turba. La tasa de oxidación promedio a lo largo de 25 años, que se estima aquí en $8,03 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, es comparable con la tasa medida por Melling et al. (2007) de $9,17 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para palmas de aceite de cinco años de edad en Sarawak, y con las tasas medidas por Wosten et al. (1997), quienes calcularon una tasa de $7,2 \text{ t C ha}^{-1}$

año^{-1} , a pesar de un largo periodo de asentamiento anterior en Johor. Sin embargo, el estimado aquí sería más bajo para resiembras posteriores si se presupone que la tasa de remisión continúa reduciéndose con el tiempo. A lo largo de dos ciclos de cultivo (50 años), la pérdida de C tendría un promedio de 5,39 toneladas por hectárea por año, y a lo largo de cuatro ciclos de cultivos, el promedio sería de 3,01 toneladas. Se debe tener en cuenta que aún cuando la pérdida de C debido a la oxidación de la turba fuese cero, la localidad de todas maneras presentaría un balance de C negativo, tanto en el presupuesto local como en el total.

Los efectos del cambio en el uso del suelo

El efecto del cambio en el uso del suelo (CUS) en los presupuestos de C de palma de aceite se investigó mediante un conjunto de parámetros estandarizados para la palma de aceite con base en el PN de palma de aceite, sin incluir la reutilización de subproductos de las plantas de beneficio. Se estudiaron siete clases de usos de suelo anteriores (bosque primario, bosque secundario, caucho maduro, cacao maduro, coco maduro, palma de aceite y pastos u otros tipos de vegetación de baja biomasa), localizados en suelos minerales o en suelos de turba. Al igual que en otros estudios anteriores (p.ej., Germer y Sauerborn, 2007), se encontró que el CUS, además del tipo de suelo, tuvo un efecto importante sobre el balance de C (Tabla 5).

Germer y Sauerborn (2007) calcularon las emisiones netas de CO_2 por hectárea a lo largo de 25 años luego de la conversión a cultivos de palma de aceite en terrenos que anteriormente eran pastizales, bosques en suelos minerales y bosques en suelos de turba. Los

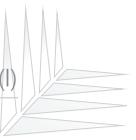


Tabla 4. Presupuestos en suelos de turba			
		Toneladas C _{eq} ha ⁻¹ año ⁻¹	Notas
Presupuesto local			
Ganancia de carbono	Palma de aceite	2,021	Incluye raíces
	Cobertura vegetal	0,095	Incluye desechos de cobertura
	Desechos de palma de aceite	0,191	Hojas amontonadas, bases, inflorescencias masculinas
	Subproductos de planta de beneficio	0	Se supone que no retornan
	Ganancias totales	2,307	
Pérdidas de carbono	Oxidación del C de turba	8,032	
	Suministros de plantación	0,392	Con base en el uso de combustibles fósiles
	Emisiones de N ₂ O	0,176	De fertilizante de N
		0,148	De la turba
	Pérdida inicial de biomasa	4,149	Bosque secundario. Amortizado en 25 años
	Pérdidas totales	12,897	
Balance de carbono		-10,590	El signo negativo representa una emisión neta de C
Artículos del presupuesto por fuera de la localidad			
Ganancia de carbono	Productos y sub-productos de la planta de beneficio	0,226	Aceite de palma, aceite de palmiste, torta de palmiste, racimos vacíos, fibra, cáscaras, efluentes de planta de beneficio
Pérdidas de carbono	CH ₄ de los efluentes de las plantas de beneficio	0,759	
Presupuesto total (local más fuera de la localidad)			
Ganancias totales de C		2,533	
Pérdidas totales de C		13,656	
Balance de C		-11,123	El signo negativo representa una emisión neta de C

Notas:

Los datos son promedios de 16 años después de sembrados (1985) con una densidad de 160 palmas por hectárea. Todos los datos de crecimiento fueron medidos en la localidad. La pérdida de carbono debido a la oxidación de la turba (respiración microbiana) se calculó como un promedio a lo largo de 25 años con base en la tasa de remisión medida (6,7 cm.año⁻¹), la cual incluyó un ajuste por el cambio en la tasa a lo largo del tiempo, un contenido de C en la turba del 40%, una densidad de masa de 0,1 g.cm⁻³, y una fracción conservadora de oxidación de 0,3 (cf. Murayama y Bakar, 1996). El método de cálculo utilizado fue el de Wosten et ál. (1997).

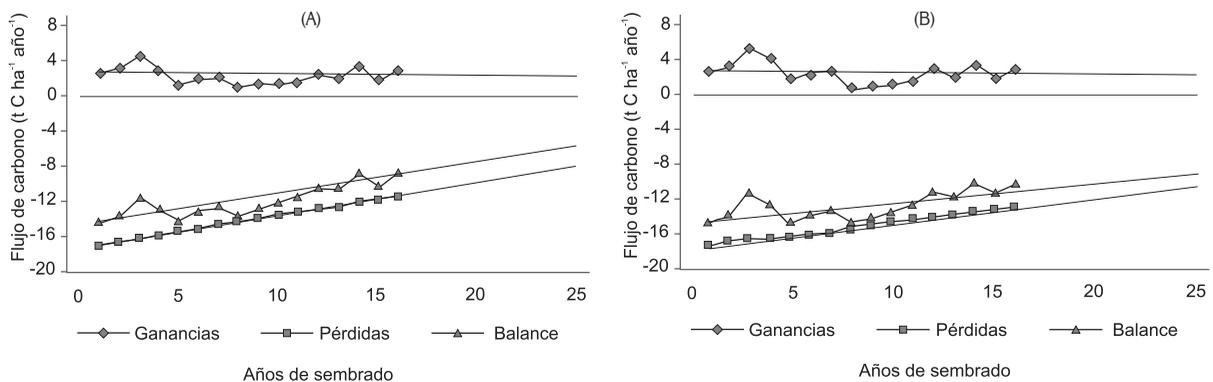


Figura 4. Presupuesto de carbono de la localidad (A) y total (B) para palma de aceite en suelo de turba, sembrado en terrenos donde anteriormente existían bosques secundarios.

Tabla 5. Efectos del cambio en el uso de suelo y tipo de suelo sobre el balance neto

Uso anterior del suelo	Suelo mineral	Suelo de turba
	Toneladas de C ha ⁻¹	
Pastizales	+0,569	-7,611
Cacao	-1,006	-3,378
Coco	-1,010	-3,383
Palma de aceite	-1,091	-3,994
Caucho	-1,698	-4,070
Bosque secundario	-3,381	-11,561
Bosque primario	-4,549	-12,728

Notas:

Los datos hacen referencia al balance total (es decir, local más fuera de la localidad). Un valor positivo indica que el sistema presenta una ganancia de C, mientras que un valor negativo indica una pérdida neta de C. La pérdida inicial de biomasa se amortiza a lo largo de un ciclo de cultivo (25 años). Los cálculos suponen el uso del promedio nacional de palma de aceite, una TEA de 0,20 y que ninguno de los subproductos de las plantas de beneficio se reciclan en el campo. La densidad de la biomasa al momento del desmonte de la palma de aceite depende de la edad de la palma en ese momento y se toma como 25 años. La densidad de la biomasa al momento del desmonte de los bosques depende del año en que se hace, el cual se toma como el año 1985. Para la palma de aceite sembrada turba, donde anteriormente existían cultivos de caucho, cacao o palma de aceite, se presupone que la remisión de la turba sigue una curva estándar que depende del tiempo y que comienza en el momento de la siembra del cultivo anterior, pero para los pastizales y los bosques primarios o secundarios, la remisión comienza en el año en que se siembra la palma de aceite. Los cálculos de pérdidas de C presuponen un contenido de C en la turba del 40%, una densidad de masa de 0,1g.cm⁻³, y una fracción de oxidación de 0,3.

datos de los presupuestos que se presentan aquí son muy similares a los de dichos autores (Tabla 6).

Existe una relación lineal entre el C que se pierde al desmontar la biomasa para sembrar un nuevo cultivo de palma de aceite y las emisiones netas de C equivalente de todas las fuentes (Figura 5). Con base en esta relación se puede estimar el inventario

Tabla 6. Efecto del cambio en el uso del suelo sobre el balance neto de CO₂ en dos estudios

Uso anterior del suelo	Toneladas de CO ₂ ha ⁻¹ año ⁻¹	
	Germer y Sauerborn (2007)	Estudio actual
Pastizales	+5,4	+4,3
Bosque	-26,3	-10,2
Bosque en turba	-53,0	-40,2

Notas:

La pérdida inicial de biomasa se amortizó a lo largo de un ciclo de cultivo (25 años). Ambos conjuntos de datos hacen referencia a los balances "locales" y bosques (primarios) con biomasa de alta densidad. Los datos de Germer y Sauerborn (2007) son los promedios de casos de quema y de no quema (que presentaron pocas diferencias). Las localidades diferentes a los bosques en suelo de turba eran en suelos minerales. Los datos del estudio actual se basaron en las mismas opciones que las de la Tabla 5. Un valor positivo indica que el ecosistema presenta una ganancia de C, mientras que un balance negativo indica una pérdida neta de C.

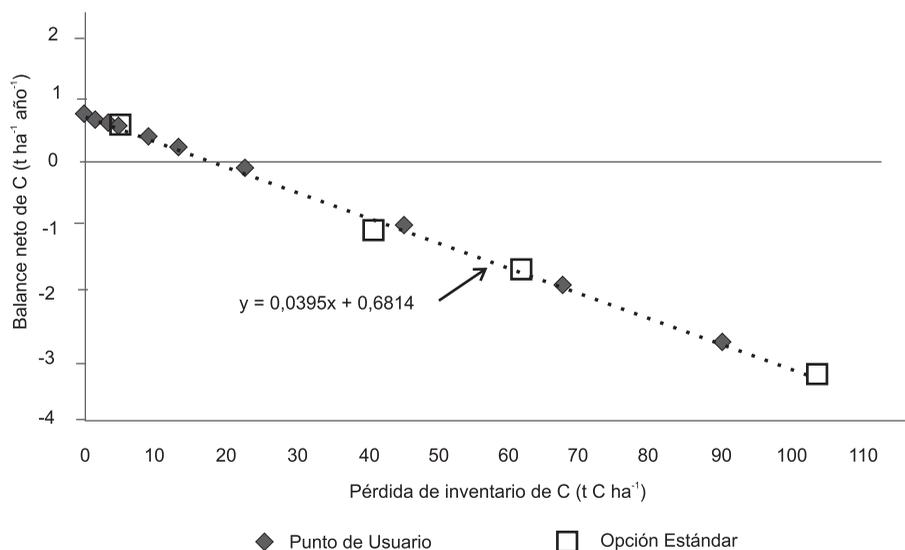


Figura 5. Relación entre el balance de C_{eq} y la pérdida de inventario de C (PIC) durante el desmonte para un nuevo cultivo de palma de aceite.

Notas:

Los datos generados hacen referencia al promedio nacional de palma de aceite, un ciclo de cultivo de 25 años, la no reutilización de los subproductos de las plantas de beneficio en los campos, suelos minerales, y suministros estándar para los cultivos. Los puntos de usuario hacen referencia a valores arbitrarios de inventario de C que fueron ingresados en el modelo, mientras que las opciones estándar son valores (en orden ascendente) supuestos para tipos específicos de utilización de suelos, específicamente, pastizales, palma de aceite, caucho y bosque secundario. Las ecuaciones de las regresiones de los dos conjuntos de datos no presentan diferencias significativas; el que se presenta corresponde a las opciones estándar de CUS.



de C existente en la localidad para el que las emisiones son cero, con una pérdida menor resultante en el secuestro de C y una pérdida más alta en emisiones netas de C. Este punto “neutral” varía un poco dependiendo del rendimiento y la biomasa del nuevo cultivo, pero con base en las opciones seleccionadas (ver las notas de la Figura 5), el resultado fue de 17,25 toneladas por hectárea.

Efectos de la utilización de los subproductos de las plantas de beneficio

En los ejemplos anteriores no se reincorporaban los subproductos de las plantas de beneficio en los cultivos. Sin embargo, se encontró que la reutilización de estos (RFV, EPBPA, cuescos) tenía solamente un pequeño efecto en los balances, incrementando las ganancias totales locales de C en el caso de resiembras de palma de aceite en 7,5% (Tabla 7).

Periodo de amortización del cambio en el uso del suelo

Hasta ahora, la pérdida inicial de biomasa ha sido amortizada sobre el ciclo de vida (25 años) del siguiente cultivo de palma de aceite. Otros trabajos (p.ej. Reinhardt et ál., 2007, Wicke et ál., 2008) han

Utilización anterior del suelo	Toneladas C ha ⁻¹		% ganancia al utilizar subproductos
	Sin utilización de subproductos	Con utilización de subproductos	
Pastizales	+0,569	+0,631	10,9
Cacao	-1,006	-0,943	6,3
Coco	-1,010	-0,948	6,1
Palma de aceite	-1,091	-1,028	5,8
Caucho	-1,698	-1,635	3,7
Bosque secundario	-3,381	-3,318	1,9
Bosque primario	-4,549	-4,486	1,4

Notas:

Los datos hacen referencia a los balances totales (es decir, locales más fuera de la localidad). Un valor positivo indica que el sistema presenta una ganancia de C, mientras que un balance negativo indica una pérdida neta de C. La pérdida inicial de biomasa se amortiza a lo largo de un ciclo de cultivo (25 años). Los cálculos hacen referencia al promedio nacional de palma de aceite cultivado en suelos minerales con una TEA de 0,20.

Utilización anterior del suelo	Toneladas de C t ⁻¹ APC	
	Suelo mineral	Suelo de turba
Pastizales	+0,165	-2,200
Cacao	-0,291	-0,976
Coco	-0,292	-0,978
Palma de aceite	-0,315	-1,154
Caucho	-0,491	-1,176
Bosque secundario	-0,977	-3,341
Bosque primario	-1,315	-3,679

Notas:

La pérdida inicial de biomasa se amortiza a lo largo de un ciclo de cultivo (25 años). Los datos hacen referencia al balance total (es decir, local más fuera de la localidad). Un valor positivo indica que el sistema presenta una ganancia de C, mientras que un balance negativo indica una pérdida neta de C. Los cálculos hacen referencia al promedio nacional de aceite de palma con una TEA de 0,20 y sin la reutilización de subproductos en los campos. Los datos son la relación de los promedios de 25 años de balance de C y la productividad de TEA.

probado periodos más largos de amortización (hasta de 100 años), pero al mismo tiempo han ignorado la pérdida de C por los cultivos subsiguientes de palma de aceite (ver más adelante). En el caso de algunos suelos de turba, un periodo largo de amortización podría, en todo caso, ser poco realista debido a la remisión continuada y a la pérdida de la turba (lo que limita su tiempo de vida efectivo), o a la presencia de suelos ácidos sulfatados por debajo de la turba. Si se presupone entonces una reducción exponencial en la tasa de remisión aplicada en el Caso 4, la remisión total a lo largo de 100 años totaliza 251 cm, lo que dejaría una capa de turba de solo 49 cm de espesor si la profundidad inicial era de 3 metros.

Costo de carbono por tonelada de aceite de palma

Las toneladas de C equivalente secuestradas o emitidas por tonelada de aceite de palma crudo (APC) producida para los balances totales (es decir, en el lado positivo fuera de la localidad) del PN de aceite de palma se presenta en la Tabla 8. Estas oscilan entre +0,165 y -1,315. En un estudio anterior, Reijnders y Huijbregts (2008) dan un rango de -2,8 a -19,7 toneladas de CO₂ por tonelada de APC, igual a -0,76 a -5,37 toneladas de CO₂ por tonelada de APC. El rendimiento promedio de APC (25 años) en el estudio actual fue de 3,46 t ha⁻¹ año⁻¹.

Cultivos consecutivos luego de la conversión de suelos

Suponiendo que el incremento de biomasa es similar en cada uno de los cultivos consecutivos, en un cultivo promedio habrá poco o ningún cambio neto en el inventario de C de biomasa existente a lo largo del tiempo en el cultivo (Figuras 6A y 6B). La pérdida de C de la biomasa está representada entonces por la diferencia entre el inventario inicial de C y el promedio de C de la biomasa existente, incluyendo la biomasa de los desechos, de los residuos de cultivos anteriores y de la cobertura vegetal, a lo largo de los cultivos sucesivos. En el caso de la conversión de bosque a palma de aceite (Figura 6A), la pérdida fue de 67,46 t C ha⁻¹ a partir de un inventario inicial de 103,7 t. En el caso de la conversión de pastizales a palma de aceite (Figura 6B), se presentó una ganancia neta de 31,3 t ha⁻¹ debido a la palma de aceite. Si la palma se siembra luego de un cultivo anterior de palma de aceite, a menos que el nuevo cultivo tenga una mayor capacidad de secuestro de C, cualquier ganancia en C

en el cultivo siguiente será totalmente contrarrestada por la pérdida de la palma anterior, como también se muestra en la Tabla 2.

Discusión general

Los presupuestos que se presentan aquí incorporan los principales factores que determinan el balance de carbono tanto a lo largo de un ciclo de un cultivo individual de palma como a lo largo de cultivos sucesivos. Por supuesto que la precisión de cada presupuesto dependerá de la precisión de los datos ingresados, los cuales para los fines actuales son necesaria y únicamente aproximaciones. La estructura del presupuesto es deliberadamente sencilla, tomando la forma de una cuenta de pérdidas y ganancias, en vez de utilizar una metodología más compleja basada en la ecología. En consecuencia, a diferencia del estudio reciente de Melling et ál. (2007), no se hacen distinciones entre la producción neta primaria, la producción neta del ecosistema y la producción neta de biomasa. Este enfoque obvia los problemas que en ocasiones surgen en la categorización de algunos ítems. De otra parte, el presupuesto se amplía un poco para producir un estimado que incluye tanto los procesos locales como los que ocurren por fuera de la localidad. Este presupuesto "total" siempre da un resultado menos favorable en términos de balance de GEI que el presupuesto local, debido a la producción de metano por parte de los EPBPA, que es mayor que cualquier secuestro adicional de C en los productos y subproductos de las plantas de beneficio.

Una característica importante de los presupuestos es su aplicación en los ciclos completos de los cultivos. El balance de C cambia a lo largo del ciclo de crecimiento de la palma de aceite, lo cual hace que los estimados basados en años individuales sean poco confiables. Dos características en común que se observaron fueron las variaciones del balance durante los primeros dos o tres años y, en el caso de suelos minerales, la reducción general en los años más tardíos del cultivo. Lo anterior refleja los cambios rápidos que ocurren en los primeros años del cultivo de palma de aceite y en la biomasa de cobertura del cultivo (que tienden a ser antagónicos, dado que en la medida en que se extiende la cobertura vegetal de la palma se reduce la biomasa de sombrío para el cultivo), mientras que la reducción en los años tardíos es un reflejo de la

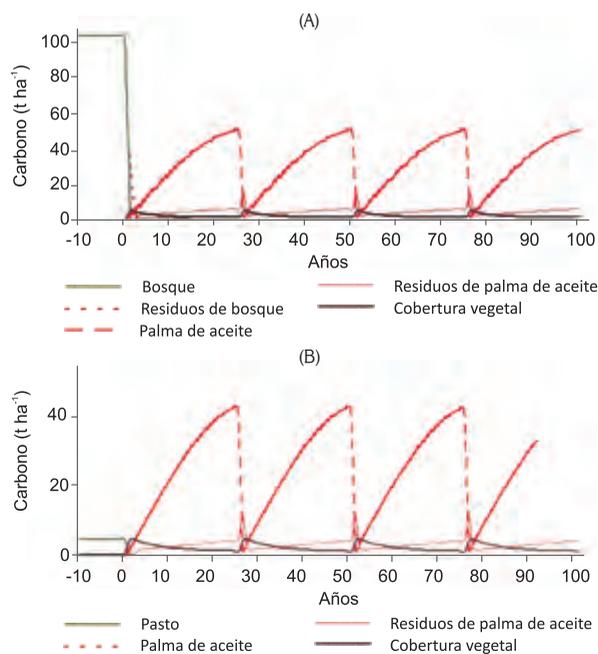


Figura 6. Cambios en la biomasa de C luego de la conversión de suelos, siembra y resiembra de palma de aceite. (A) Palma de aceite cultivada sobre un bosque anterior en una localidad costera. (B) Palma de aceite cultivada sobre pastizales anteriores en una localidad del interior. La presentación está de acuerdo con la Figura 2 de Anderson (2007).



reducción en la producción de biomasa en la medida en que aumenta la edad del cultivo. Por el contrario, en los suelos de turba una reducción gradual a lo largo del tiempo en la oxidación del C en la turba compensa esta reducción y hace que el balance se haga menos negativo (Figura 1).

La utilización de suelos de turba tiene un impacto sustancial sobre los presupuestos. A diferencia de la pérdida de la biomasa inicial, que es el otro ítem más significativo en el lado de los débitos, la pérdida de C en la turba es sustancial y continua (Wosten et ál., 1997). Por tanto, la estimación de la oxidación de la turba y su cambio a lo largo del tiempo es crucial para la precisión del presupuesto. La oxidación de la turba depende de varios factores, a partir de los cuales se puede calcular. Una mejor alternativa sería la medición directa en el campo; sin embargo, esta es necesariamente una tarea de largo plazo, por lo cual muy pocas mediciones han sido tomadas. La pérdida promedio de la turba en 25 años que se ha estimado aquí en el Caso 4 ($8,03 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) es, sin embargo, comparable tanto a la tasa promedio de $7,2$ toneladas de C por hectárea por año calculada por Wosten et ál. (1997) durante la etapa posterior de un estudio a largo plazo en Johor, donde la remisión en la localidad era relativamente baja y con tendencia a la estabilización y a la medida por Melling et ál. (2007) en una plantación relativamente reciente en Sarawak ($9,17 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

En contraste con el caso de la turba, los presupuestos para los suelos minerales excluyen cualquier pérdida de C debido a la respiración microbiana del suelo. Se parte del supuesto de que existe una condición constante en términos de la materia orgánica del suelo, y que cualquier pérdida se compensa con ganancias de la biomasa que cae (Lamade et ál., 1996). Si bien es posible que este no sea estrictamente el caso, al menos para todas las etapas del ciclo del cultivo, como por ejemplo al inicio, cuando generalmente se considera que las operaciones de desmonte generan una liberación de C (Anderson, 2007), existe una ausencia de datos específicos sobre la conversión a palma de aceite, y la evidencia relacionada con cambios de largo plazo es tanto escasa como muy necesaria.

El otro elemento importante es la biomasa inicial que se pierde durante el desmonte. Este es ignorado a veces, pero si no se toma en cuenta resulta, en el corto plazo, en una sobreestimación del balance de C. Este estudio, al igual que el de Germer y Sauerborn (2007), también incluyó los residuos de C de la biomasa cortada, la cual puede tardar varios años en descomponerse, particularmente en el caso de los bosques (Kira, 1987; Ismail et ál., 2005).

Los valores de biomasa para los bosques varían ampliamente. Los presupuestos que se presentan aquí utilizan datos basados en estimaciones cuidadosas consideradas para Malasia, según lo describe Henson (2005a; 2009). Son conservadores a la luz de algunos estudios más recientes. Es así como en un estudio en Indonesia realizado por Adi et ál. (2007) halló una biomasa superficial en bosques primarios y secundarios en turba pantanosa de 621 y 336 t ha^{-1} , respectivamente, mientras que la biomasa debajo del suelo contribuye con 169 y 45 t ha^{-1} adicionales, respectivamente. La vegetación baja, los residuos y la madera muerta agregaban otras 38 y 45 t ha^{-1} . Aún no está claro qué tan representativos son estos datos, dado que el inventario promedio de C superficial de solo el bosque secundario totalizaría 172 t ha^{-1} , suponiendo un contenido de C del 45%. Esta cifra es sustancialmente mayor a las 133 y 87 t C ha^{-1} que se presupuestan aquí para los bosques primarios y secundarios, después de tener en cuenta la cosecha de maderables.

Un problema adicional en el manejo de la pérdida de biomasa local para cultivos específicos es la amortización de la pérdida a lo largo del tiempo. Si bien esta se puede amortizar a lo largo de la vida útil del cultivo actual, también se podría extender a lo largo de varios cultivos sucesivos, pero en este caso se tendrían que tener en cuenta las pérdidas de C de cada cultivo.

Agradecimientos

Expresamos nuestros agradecimientos al Sr. Goh Kah Joo, Tuan Hj Ahmad Tarmizi Mohd, Dr. Khalid Haron y al Profesor J. M. Anderson por sus comentarios sobre la versión preliminar de este trabajo, al Sr. Edison Too por su ayuda en el desarrollo del software del modelo, y al Malaysian Palm Oil Board por facilitar parcialmente el estudio.



Bibliografía

- Adij, Siregar U. J.; Massijaya, M. Y.; Rielely, J. O. and Page S. 2007. Biomass content and biodiversity of tropical peat swamp forest under various land cover conditions. Paper presented at International Symposium and Workshop on Tropical Peatland. International Peat Society. Yogyakarta, Indonesia, 27 - 31 August, 2007.
- Anderson, J. M. 2007. Eco-friendly approaches to sustainable palm oil production. In: *Proceedings of PIPOC 2007 International Palm Oil Congress (Agriculture, Biotechnology and Sustainability Conference)*, Volume I. Malaysian Palm Oil Board, Kuala Lumpur. 347-370.
- Caliman, J. P.; Carcasses, R.; Girardin, P.; Pujianto, Dubos B. and Liwang, T. 2005. Development of agri-environmental indicators for sustainable management of oil palm growing: general concept and the example of nitrogen. In: *Proceedings of the PIPOC 2005 International Palm Oil Congress (Agriculture, Biotechnology and Sustainability)*. 413-432.
- Chan, Y. - H. 1982. Storage and release of organic carbon in Peninsular Malaysia. *International Journal of Environmental Studies*, 18,211 -222.
- Department Of Irrigation And Drainage, Malaysia (DID). 1989. Sungai Tekam Experimental Basin Final Report. Water Resources Publication no.20, 93 pp.
- Fairhurst, T. 1996. Management of nutrients for efficient use in smallholder oil palm plantations. PhD Thesis, Wye College, University of London. 211 p.
- Germer, J. and Sauerborn, J. 2007. Estimation of the impact of oil palm plantation establishment on greenhouse gas balance. *Environment, Development and Sustainability*, 10,697-716.
- Greenpeace. 2007. *How the oil palm industry is cooking the climate*. Greenpeace International. Report. 81 p.
- Haron, K. Brookes, P. C., Anderson J M And Zakaria Z Z. 1998. Microbial biomass and soil organic matter dynamics in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations, West Malaysia. *Soil Biology and Biochemistry*, 30, 547-552.
- Henson, I. E. 1999. Chapter 2. Comparative Ecophysiology of Oil Palm and Tropical Rain Forest. In: *Oil Palm and The Environment - A Malaysian Perspective*. (Gurmit Singh, Lim Kim Huan, Teo Leng and D Lee Kow, eds.) Malaysian Oil Palm Growers Council, Kuala Lumpur. 9-39.
- Henson, I. E. 2003. The Malaysian national average oil palm: concept and evaluation. *Oil Palm Bulletin*, 46,15-27.
- Henson, I. E. 2004. Modelling carbon sequestration and emissions due to oil palm cultivation and associated land use change in Malaysia. *MPOB Technology*, 27,51 pp.
- Henson, I. E. 2005a. An assessment of changes in biomass carbon stocks in tree crops and forests in Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science*, 17, 279-296.
- Henson, I. E. 2005b. OPRODSIM, a versatile, mechanistic simulation model of oil palm dry matter production and yield. In: *Proceedings of PIPOC 2005 Agriculture, Biotechnology and Sustainability Conference*. Malaysian Palm Oil Board, Kuala Lumpur. 456-468.
- Henson, I. E. 2009. Modelling carbon sequestration and greenhouse gas emissions associated with oil palm cultivation and land-use change in Malaysia. A re-evaluation and a computer model. *MPOB Technology*, 31, 116 p.
- Henson, I. E. and Mohd Tayeb, D. 2003. Physiological analysis of an oil palm density trial on a peat soil. *Journal of Oil Palm Research*, 15 (2), 1127.
- Hooijer, A.; Silvius, M.; Wösten, H. D. and Page S. 2006. PEAT-CO₂. Assessment of CO₂ emissions from drained peatlands in S E Asia. Delft Hydraulics report Q3943. 36 p.
- Ismail, A. B.; Mohammad A.; Janice, A. and Mohd Hanif, M. J. 2005. Choice of land clearing technique for new oil palm cultivation on peat. In: *Proceedings of PIPOC 2005 International Palm Oil Congress (Agriculture, Biotechnology and Sustainability Conference)*. Malaysian Palm Oil Board, Kuala Lumpur. 456-468.
- Kira T. 1987. Primary production and carbon cycling in a primeval lowland rainforest of Peninsular Malaysia. In: *Tree Crop Physiology* (M R Sethuraj and A S Raghavendra, eds.). Elsevier, Amsterdam. 99-119.
- Lamade, E.; Djegui, N. and Leterme, P. 1996. Estimation of carbon allocation to the roots from soil respiration measurements of oil palm. *Plant and Soil*, 181,329-339.
- Lim, K. C. and Zaharah, A. R. 2000. Decomposition and N and K release by oil palm empty fruit bunches applied under mature palms. *Journal of Oil Palm Research*, 12 (2), 55-62.
- Lim, K. C. and Zaharah A. R. 2002. The effects of oil palm empty fruit bunches on oil palm nutrition and yield, and soil chemical properties. *Journal of Oil Palm Research*, 14 (2),1-9.
- Lim, K. H. 1988. Trials on long-term effects of application of POME on soil properties, oil palm nutrition and yields. In: *Proceedings of 1987 International Oil Palm/Palm Oil Conference - Agriculture*. 575-595.
- Melling, L; Goh, K. J.; Beauvais, C. and Hatano, R. 2007. Carbon flow and budget in a young mature oil palm agroecosystem on deep tropical peat. Presented at International Symposium and Workshop on Tropical Peatland. International Peat Society. Yogyakarta, Indonesia, 27-31 August, 2007. 5 p.
- Mohd Hashim. 1993. Treated POME as nutrient source for oil palm. In: *Proceedings 1991 PORIM International Palm Oil Conference - Agriculture*. Palm Oil Research Institute of Malaysia, Kuala Lumpur. 244-260.
- Murayama Sand Bakar, Z. A. 1996. Decomposition of tropical peat soils. 2. Estimation of in situ decomposition by measurement of CO₂ flux. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 30, 153 - 158.
- Reijnders, L. and Huijbregts, M. A. J. 2008. Palm oil and the emission of carbon-based greenhouse gases. *Journal of Cleaner Production*, 16,477-482.
- Reinhardt, G.; Rettenmaier, N.; Gartner, S. and Pastowski, A. 2007. *Rainforest for biodiesel? Ecological effects of using palm oil as a source of energy*. WWF Germany, Frankfurt am Main. 50 p.



- Schmidt, J. H. 2007. *Life cycle assessment of rapeseed oil and palm oil*. PhD Thesis. Aalborg University, Denmark. Part 3. 275 p.
- Wicke, B.; Dornburg, V.; Junginger, M. and Faaij, A. 2008. Different palm oil production systems for energy purposes and their greenhouse gas implications. *Biomass and Bioenergy*, 32, 1322 - 1337.
- Wood, B. J.; Corley, R. H. V. 1993. The energy balance of oil palm cultivation. In: *Proceedings of 1991 PORIM International Palm Oil Conference, Agriculture*. Palm Oil Research Institute of Malaysia, Kuala Lumpur. 130-143.
- Wösten, J. H. M.; Ismail, A. B. and Van Wijk, A. L. M. 1997. Peat subsidence and its practical implications: a case study in Malaysia. *Geoderma*, 78, 25-36.
- Yacob, S.; Mohd Ali, H.; Shirai, Y.; Wakisaka, M. and Subash, S. 2006. Baseline study of methane emission from anaerobic ponds of palm oil mill effluent treatment. *Science of the Total Environment*, 366, 187-196.
- Yew, F. K. 2000. Impact of zero burning on biomass and nutrient turnover in rubber replanting. Paper presented at International Symposium on Sustainable Land Management, Sri Kembangan, Kuala Lumpur.
- Yew, F. K. and Mohd Nasaruddin, M. D. A. 2002. Biomass and carbon sequestration determinations in rubber: Methodologies and case studies. Paper presented at Seminar on Climate Change and Carbon Accounting. Department of Standards, Malaysia and SIRIM Sdn Bhd Shah Alam, Malaysia. 13 pp.

Apéndice

Listado de opciones disponibles en el modelo

El modelo, programado inicialmente en QBasic, se encuentra disponible en la forma de módulo de campo del paquete de software OPCABSIM compatible con Windows (Henson, 2009). Ofrece las siguientes opciones, en el orden en que aparecen en el módulo.

1. Opciones de crecimiento de palma de aceite
 - a) Promedio nacional para aceite de palma
 - b) Palma de aceite generada por OPRODSIM
 - i) Opción de biomasa promedio (en el interior)
 - ii) Opción de biomasa media-alta (en zonas costeras)
 - c) Datos del usuario
2. Tiempo del ciclo de resiembra de la palma de aceite (15 a 30 años)
3. Cambio en el uso de suelos – tipo de biomasa inicial antes del desmonte
 - a) Bosque húmedo primario
 - b) Bosque húmedo secundario
 - c) Caucho maduro
 - d) Cacao maduro
 - e) Coco maduro
 - f) Palma de aceite
 - Edad al tumar
 - g) Pastos o tierras cultivables
 - h) Datos del usuario
4. Tasa de extracción de aceite (10 a 30%)
5. Utilización de subproductos de la planta de beneficio en el campo
 - a) Racimos de fruta vacíos (RFV)
 - b) Efluentes de la planta de beneficio de aceite de palma (EPBAP)
 - c) Cáscaras
 - d) RFV y EPBAP
 - e) RFV y cuescos
 - f) EPBAP y cuescos
 - g) RFV, EPBAP y cuescos
 - h) Ninguno
6. Tipo de suelo
 - a) Suelo mineral
 - b) Suelo de turba
 - i) tasa de subsistencia de la turba constante dependiente del tiempo
 - ii) densidad de masa de la turba
 - iii) contenido de carbono de la turba
 - iv) fracción de oxidación de la turba
7. Utilización de combustibles fósiles como suministros para el cultivo
 - a) La mitad de los suministros estándar
 - b) Suministros estándar
 - c) 1,5 veces los suministros estándar