

# INDICADORES AGRO-AMBIENTALES

para la producción sostenible de aceite de palma

## AGRI-ENVIRONMENTAL INDICATORS

for Sustainable Palm Oil Production

### AUTORES



**Jean Pierre Caliman**

**R. Carcasses**

**N. Perel**

Cirad - PT Smart.  
SMARTRI PO Box 1348  
28 000 Pekanbaru -  
Riau - Indonesia

**J. Wohlfahrt**

**P. Girardin**

UMR INPL- (ENSAIA) -INRA  
Agronomie et Environnement  
Nancy- colmar 28,  
rue de Herrlisheim  
BP 20507, 68021 Colmar  
Cedex, France

**A. Wahyu**

**Pujianto**

P.T. SMART. SMARTRI  
PO Box 1348 28 000  
Pekanbaru-  
Riau - Indonesia

**B. Dubos**

**A. Verwilghen**

Cirad-CP -UPR 34 TA 80/02 -  
Avenue Agropolis 34398  
Montpellier Cedex 5, France

### Palabras CLAVE

Impacto ambiental, método  
Índigo, producción sostenible,  
aceite de palma.

Environmental impact, Indigo  
method, sustainable production,  
palm oil.

Traducido por Fedepalma.  
Versión original en inglés  
disponible en el Centro de  
Documentación de Fedepalma.



## RESUMEN

La presión de diferentes organizaciones en el mundo para que el ser humano desarrolle sus actividades productivas de manera sostenible, ha aumentado en los últimos años. En el sector agrícola, la palma de aceite en particular está en la mira de algunas ONG, que consideran que su creciente desarrollo contribuye a la deforestación de bosques húmedos tropicales, y con frecuencia a problemas sociales en las poblaciones de su influencia. Como respuesta, se han reforzado las normas nacionales, particularmente para reducir el riesgo de contaminación asociado a la producción de aceite de palma, y se creó a nivel global la RSPO (Mesa Redonda sobre Aceite de Palma Sostenible), cuyo objetivo principal es la adopción de mejores prácticas. Para alcanzar tal objetivo, se establecieron ciertos principios y criterios a los que, sin embargo, todavía no se les han definido herramientas de verificación y evaluación por parte de las plantaciones. Para coadyuvar en tal fin, el Cirad, en colaboración con socios -particularmente PT. Smart-, comenzó a desarrollar una serie de indicadores agro-ambientales, y es el objetivo de este artículo presentar su potencial para la producción sostenible de aceite de palma.

## SUMMARY

The pressure by various organizations worldwide to conduct human productive activities in a sustainable manner has been increasing in the last few years. In the agricultural sector, the oil palm is in the crosshairs of some NGO's, as they consider that its growing development contributes to significant deforestation of the tropical rain forest, and often to social problems with regards to local populations. In response, national regulations have been reinforced, particularly in order to reduce the risk of pollution related to palm oil production. The RSPO (Roundtable on Sustainable Palm Oil) was then created with the main objective of adopting the best practices. In order to achieve the objective, a set of principles and criteria have been



established. However, the tools required for the verification and evaluation of these principles and criteria have yet to be defined by the plantations. To this end, Cirad, in collaboration with its partners, notably PT. Smart-, has started to build a set of agri-environmental indicators, and the purpose of this article is to present their potential for the sustainable production of palm oil.



## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 20 años, un creciente número de organizaciones ha venido ejerciendo presión para el desarrollo sostenible, que incluye no solo aspectos económicos, sino también consideraciones sociales y ambientales con el fin de proteger el bienestar de futuras generaciones. Esta presión ha aumentado con la publicación en 1987 del informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, también conocido como “El informe Brundtland”, seguido por las conferencias de Río (1992), Kyoto (1996) y Johannesburgo (2002).

La agricultura es parte de las actividades humanas que se ven como fuente posible de injusticia social y amenaza para el medio ambiente y los recursos naturales. La palma de aceite, en particular, está en la mira de unas ONG (WWF, 2003; Amigos de La Tierra, 2005), que consideran que su creciente desarrollo contribuye a la deforestación de bosques húmedos tropicales, y con frecuencia a problemas sociales en las poblaciones de su influencia.

Como respuesta, se han reforzado las normas nacionales, particularmente para reducir el riesgo de contaminación asociado a la producción de aceite de palma. Grandes plantaciones han venido implementando iniciativas individuales para mejorar su imagen, como la búsqueda de la certificación ISO 14001 para plantaciones y plantas de beneficio.

A mayor escala, cualquier actor de la cadena productiva tiene ahora la posibilidad de comprometerse con un proceso de desarrollo sostenible, adhiriéndose a la RSPO (Mesa Redonda sobre Aceite de Palma Sostenible), una importante iniciativa recientemente desarrollada por varias compañías y WWF (<http://www.sustainable-palmoil.org>). El objetivo principal de la RSPO es la adopción de mejores prácticas (Omont,

2005) y, para alcanzarlo, se establecieron principios y criterios que se han venido discutiendo públicamente durante los dos últimos años (RSPO, 2006).

Sin embargo, todavía no se ha definido cuáles serán las herramientas que se utilizarán para verificar y evaluar la aplicación por las plantaciones de esos principios y criterios. No obstante, Vis *et al.* (2001) y más recientemente Lord y Clay (2006) propusieron un interesante punto de partida con la utilización de 10 grupos de indicadores.

Para coadyuvar en tal fin, el Cirad, en colaboración con socios -particularmente PT. Smart-, ha comenzado a desarrollar una serie de indicadores agro-ambientales, como los definidos por Ocede (1999).

El objetivo de este artículo es presentar el potencial de los indicadores agro-ambientales para la producción sostenible de aceite de palma, el método usado para su desarrollo, basado en dos ejemplos relacionados con el manejo de nitrógeno y pesticidas, y perspectivas futuras de esta herramienta.

## EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS: EL MÉTODO ÍNDIGO<sup>®</sup>

### Objetivo

Como se mencionó, el principal objetivo es desarrollar una herramienta para la evaluación del impacto de la producción de aceite de palma en el medio ambiente, la cual debe ser científicamente sólida para que sea creíble, pero al mismo tiempo ser simple y fácil de entender para todos -desde cultivadores hasta consumidores-, y proveer un panorama representativo. Adicionalmente, su implantación no debe ser costosa. Por tanto, podría ser usada para hacer diagnósticos y

monitorear avances, y también como herramienta de toma de decisiones para seleccionar la mejor opción en términos de prácticas. Finalmente, los resultados serían comunicados interna y externamente.

### Razones para desarrollar indicadores específicos

Medir en forma directa o indirecta el impacto de una práctica en el medio ambiente no es una solución sostenible en la mayoría de los casos, debido a su alto costo y a las dificultades en el proceso de implementación. En la actualidad no hay disponibles modelos en realidad operacionales a gran escala.

De manera que la solución más apropiada parece ser el desarrollo de variables específicas basadas en conocimiento experto, o en la observación de registros y comparación de resultados con un valor de referencia determinado por una norma, un experto o cualquier otra forma apropiada. Esta variable y su valor de referencia es lo que llamaremos un indicador agro-ambiental.

### El método Índigo®

El método Índigo® fue propuesto por Inra (Institut National de la Recherche Agronomique-France) para caracterizar el efecto de las prácticas agrícolas, consideradas una por una, en todos los parámetros ambientales, así como para evaluar el impacto de

todas las prácticas relacionadas con la producción agrícola en cada parámetro específico (considerado uno por uno) del medio ambiente (Bockstaller *et al.*, 1997; Girardin *et al.*, 1999a; 1999b; 2000). El concepto se presenta como una matriz de doble entrada que cruza prácticas agrícolas con componentes ambientales del agro-ecosistema. Una celda de la matriz representa el impacto de una práctica agrícola en un parámetro específico del medio ambiente. Representa la unidad básica (módulo) sobre la cual se basará el indicador agro-ambiental. La agregación “vertical” de todos estos módulos para una columna representa el impacto de una práctica sobre todos los parámetros ambientales; éste es el indicador agroambiental. Por otro lado, la agregación horizontal de cada módulo da la posibilidad de desarrollar un indicador de impacto ecológico, por ejemplo, una evaluación de qué tanto se ve afectado un parámetro ambiental específico por la producción de aceite de palma.

El sistema de agregación tendrá que ser muy explícito para todos los usuarios del indicador. Esta estructura proporciona la posibilidad de tener un enfoque modular, basado en la importancia del impacto posible o esperado de la práctica sobre el medio ambiente. La evaluación del impacto puede ser cuantitativa, semi-cuantitativa o cualitativa.

La Figura 1 presenta la matriz propuesta en relación con la producción de aceite de palma. Las prácticas

Matriz agroambiental		Preparación y manejo de tierras						Riego		Fertilización					Pesticidas		Planta de beneficio				Indicador ecológico	
		Deforestación	Preparación suelo	Preparación suelo	Preparación suelo	Mejoramiento tierra	Cobertura leguminosas	Materia orgánica biomasa manejo	Vivero	Plantación	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Magnesio	Micro elementos	Pesticidas	Herbicidas	RV	Efluentes	Humo		Pérdidas aceite
Agua	Superficial	**	**	*	**	**	*	*	**	*	**	*	*	*	*	*	*	**	*	**	**	Calidad agua superficial Calidad agua subterránea
	Subterránea	**	*	*	*	*	*	*	**	**	*	*	*	*	*	*	*	**	**	**	**	
Aire		**	*	*	*	*	*	*	**	**	*	*	*	*	*	*	*	**	**	**	**	Calidad aire
Suelo	Químico	**	*	*	*	**	**	*	*	*	*	*	*	*	*	*	**	*	*	*	*	Fertilidad química suelo
	Físico	**	**	**	*	**	**	*	*	*	*	*	*	*	*	*	**	*	*	*	*	Fertilidad física suelo
	Biológico	*	*	*	*	**	**	*	*	*	*	*	*	*	*	*	**	*	*	*	*	Fertilidad biológica suelo
Recursos no renovables		*	*	*	*	**	*	**	**	**	**	**	**	*	*	*	*	*	*	*	*	Recursos naturales
Biodiversidad		***	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	**	**	*	*	*	*	
Paisaje		***	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Indicador agroambiental																						

Figura 1. Matriz agro-ambiental para producción de aceite de palma.

se han reagrupado en cinco componentes principales relacionados con el manejo y preparación de tierras, irrigación, fertilización, protección y procesamiento del cultivo. El medio ambiente se caracteriza por medio de seis parámetros, por ejemplo: agua, aire, suelo, recursos no renovables, biodiversidad y paisaje.

Se propone una evaluación semi-cuantitativa tentativa del impacto potencial de cada práctica en el medio ambiente: los principales impactos se mencionan mediante el código “++”, mientras que los impactos secundarios o menores se representan con “+”.

Hasta el momento, hemos desarrollado dos indicadores agroambientales, uno relacionado con el manejo de nitrógeno ( $I_N$ ) y otro con el uso de pesticidas ( $I_{phy-Palm}$ ) (Caliman *et al.*, 2005; Wohlfart *et al.*, 2006). Se ha dado prioridad a estos dos temas, debido a que muchos los consideran como importantes problemas ambientales. El nitrógeno también es considerado por Unep (2004) como un “*reto ambiental emergente de importancia mundial*”, ya que se han identificado impactos negativos del “nitrógeno reactivo” en el ambiente en cada paso del ciclo del nitrógeno (Galloway *et al.*, 2003).

Ambos indicadores representan algún riesgo para la calidad del agua y del aire. El nitrógeno también usa recursos no renovables para la producción de fertilizantes minerales, pero este punto se abordará desarrollando un indicador específico. Los pesticidas son una importante amenaza para la biodiversidad, aunque el tema es difícil de evaluar. Hasta cierto punto, el impacto en el suelo y en el paisaje también se podría mencionar.

En nuestro primer enfoque, hemos considerado únicamente módulos que se sabe tienen un impacto significativo en el medio ambiente:

- Para el indicador de nitrógeno, se han considerado tres módulos; el primero tiene que ver con la calidad del agua subterránea en relación con el riesgo de contaminación debido a lixiviación de nitrato, los otros dos se refieren a la contaminación del aire en relación con la volatilización de amonio, y emisiones de óxido nítrico.
- Para el indicador de pesticidas también se consideraron tres módulos. Uno relacionado con la calidad del agua subterránea, otro con la calidad del agua

superficial, y el tercero con la calidad del aire. A estos tres módulos se le agregará un cuarto módulo relacionado con la cantidad de pesticidas usados.

## Selección de las variables para cada módulo

Uno de los pasos clave en el desarrollo de estos indicadores es la selección de las variables que se tomarán en cuenta. Existen muchos factores que tienen un impacto en el posible riesgo de cada práctica en el medio ambiente. Sin embargo, considerando que, como se dijo, el indicador debe ser definido como una herramienta simple y de bajo costo de implementación, se considerarán como variables únicamente factores que se puedan evaluar fácilmente con los registros normalmente disponibles en la mayoría de las plantaciones, o que sean relativamente fáciles y económicos de implementar como parte de las políticas de manejo. Además, la información requerida se debe obtener con una precisión y escala de espacio aceptables (bloque, división, plantación, dependiendo de la variable), y con una frecuencia compatible con la escala de tiempo del indicador.

Estas consideraciones nos han conducido a eliminar, por lo menos temporalmente, algunas variables que se sabe tienen impacto en el proceso evaluado, pero que son difíciles de obtener, por ejemplo, la intensidad del viento cuando se evalúa el riesgo de contaminación de aire con pesticidas.

Las tablas 1 y 2 presentan las variables tomadas en cuenta para el desarrollo de los dos indicadores. Se han identificado tres tipos de variables:

**Tabla 1.** Variables tomadas en cuenta para el cálculo de  $I_N$

<b>Agua subterránea:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tasa de aplicación de N o abono</li> <li>• Clima: cantidad y distribución de la precipitación</li> <li>• Características del suelo (textura).</li> </ul>
<b>Aire:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volatilización de <math>NH_3</math>:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo de fertilizante nitrogenado, abono, ...</li> <li>- Tasa de aplicación</li> <li>- Características del suelo (textura, humedad, compactación)</li> <li>- Método de aplicación (voleo, ...)</li> </ul> </li> <li>• Emisión de <math>N_2O</math>:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tasa de aplicación de N, abono, ...</li> <li>- Características del suelo (humus)</li> <li>- Método de aplicación</li> </ul> </li> </ul>

**Tabla 2.** Variables tomadas en cuenta para el cálculo de  $I_{phy-palm}$

<b>Agua superficial:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Riesgo de escorrentía (cobertura del suelo, pendiente)</li> <li>• Potencial de desplazamiento (distancia al agua superficial, método de aplicación)</li> <li>• Posición de aspersión (cobertura del suelo, riesgo de lavado foliar, método de aplicación)</li> <li>• Vida media del ingrediente activo: DT50</li> <li>• Toxicidad del ingrediente activo: (Aquatox)</li> </ul>
<b>Agua subterránea:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Índice GUS (Coeficiente de ubicuidad de Gustafson) = f (DT50, Koc)</li> <li>• Posición de aspersión (cobertura del suelo, riesgo de lavado foliar, método de aplicación)</li> <li>• Riesgo de lixiviación (materia orgánica, textura del suelo, profundidad del suelo)</li> <li>• Toxicidad del ingrediente activo (IDA –Ingesta Diaria Admisible)</li> </ul>
<b>Aire:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Riesgo de volatilización del ingrediente activo: (Kh = Constante de Henry)</li> <li>• Tamaño de gota (equipo y método de aplicación)</li> <li>• Vida media del ingrediente activo: DT50</li> <li>• Toxicidad del ingrediente activo: IDA</li> </ul>

- variables relacionadas con el tipo y cantidad de fertilizantes nitrogenados o pesticidas usados.
- variables relacionadas con las características del medio ambiente (clima, suelo, etc.).
- variables relacionadas con prácticas de campo (equipo usado, épocas de aplicación, técnicas de siembra, curvas de nivel, terrazas, etc.).

La gerencia de la plantación ya ha registrado algunas variables como práctica estándar (precipitación, datos de suelo y topografía, métodos de aplicación, tasa de aplicación, etc.). Otras se pueden evaluar usando tablas creadas por los autores durante el desarrollo de estos indicadores con base en literatura, o en estrecha cooperación con la gerencia de la plantación. Por ejemplo, la Tabla 3 muestra los posibles valores del coeficiente usado para calcular el riesgo de escorrentía con base en la intensidad de la pendiente mencionada en los mapas de suelo, y la práctica de manejo de

cultivos de cobertura (estándar, vegetación densa, poca cobertura o suelo sin cobertura). La tabla también presenta factores correctivos que se puedan aplicar a este riesgo cuando la gerencia de la plantación ha implementado prácticas específicas para reducir la escorrentía (terrazas, etc.).

También hay variables disponibles en la literatura, o a través de proveedores o en bases de datos internacionales a través de Internet. Estas incluyen, por ejemplo, ingredientes activos usados en agricultura: vida media, GUS, Kh, IDA son parámetros que comúnmente se encuentran en estas bases de datos. La Tabla 4 presenta varios ejemplos de estas características.

### Agregación de variables

Una vez definidas las variables, es necesario agregarlas para presentar un valor que sea representativo de la situación:

**Tabla 3.** Cálculo de escorrentía. Impacto de la pendiente y la cobertura del suelo

Riesgo de escorrentía = sensibilidad del ambiente				
Pendiente (&)	Suelo desnudo	Cobertura pobre	Manejo estándar	Vegetación densa
0-3	0,4	0,3	0	0
3-8	0,8	0,6	0,2	0
8-15	1	0,8	0,4	0,2
>15	1	1	0,6	0,4

Este riesgo es ponderado para prácticas de campo (CF = factor correctivo)

Siembra en curvas de nivel	CR = 0,8
Manejo de tierra (terrazas)	CR = 0,6
Manejo de biomasa (aplicaciones de RV, hojas)	CR = 0,2
Manejo de rebrote de leñosas	CR = 0,2

**Tabla 4.** Características de algunos pesticidas usados.

Producto comercial	Ingrediente activo	Vida media (días)	GUS	KH	ADI (mg/kg)
Gramoxone	Paraquat	743	-0,5	1,6e-12	0,06
	Diquat	1.000	-1,5	0,00002	0,02
Ally	Metsulfuron methyl	14	3,1	9,4e-14	0,00125
Round-up	Glifosato	14	1,15	8,5e-11	0,05
Starane	Fluroxpyr	5	1,63	1,45e-6	0,2

Coeficiente de ubicuidad – agua subterránea =  $\log(DT50) * (4 - \log(Koc))$

Ingesta Diaria Admisible: IDA

Vida media de molécula: DT50

Aquatox = LC50 del organismo acuático más sensible

Constante de Henry: KH = presión de vapor / solubilidad

Vida media de molécula: DT50

Favorable  
Transición  
Desfavorable



- Para  $I_N$ , se ha propuesto una evaluación cuantitativa de pérdidas de nitrógeno para los tres módulos (Carcasses, 2004). Por ejemplo, las emisiones de óxido nitroso se calculan usando la siguiente ecuación:

$$N_{N_2O} = (\text{Rate} - N_{NH_3} \text{ losses}) * k_{BWM} * K_{soil} * 1.5$$

Donde:

$N_{N_2O}$  = pérdida de nitrógeno a través de emisiones de  $N_2O$

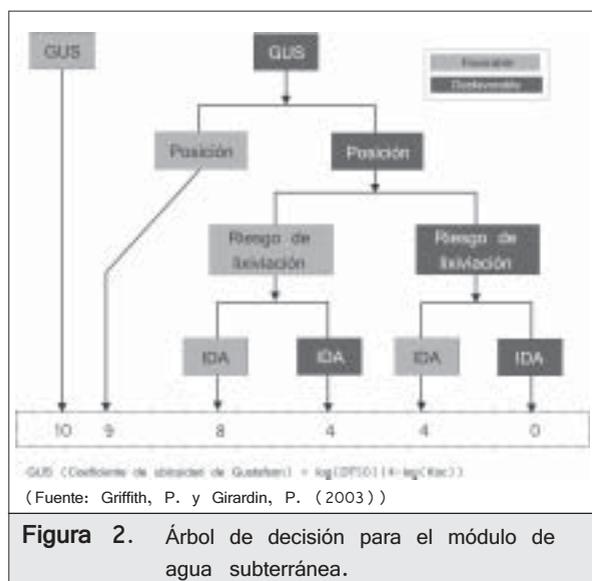
$N_{NH_3}$  = pérdidas de nitrógeno a través de volatilización de  $NH_3$

K BWM = coeficiente de Bouwman (1996)

K Soil = coeficiente relacionado con el suelo  
= 1.25 en su mayoría

El sub-módulo  $I_{NO_3}$  es un balance entre el nitrógeno requerido por las plantas para su desarrollo vegetativo y rendimiento, y las pérdidas en el medio ambiente. El puntaje global final  $I_N$  sería igual al valor menor del módulo.

- $I_{phy\ palm}$  se desarrolló con base en un concepto diferente. En general, es muy difícil cuantificar qué tanto ingrediente activo ha estado fuera de objetivo. Por tanto,  $I_{phy\ palm}$  es un indicador cualitativo de riesgo, de tal manera que el sistema de agregación se basa en un sistema de árbol de decisión, similar a un sistema experto.



**Figura 2.** Árbol de decisión para el módulo de agua subterránea.

La Figura 2 muestra el árbol de decisión relacionado con agua subterránea. Se hacen cuatro evaluaciones sucesivas, incluyendo las características propias de la molécula, la capacidad de lixiviación (GUS), las características de aplicación (cultivo de cobertura, riesgo de escorrentía, etc.), riesgo de lixiviación, con base en el contenido de materia orgánica y textura del suelo (Figura 3), y la toxicidad del ingrediente activo (representado por la Ingesta Diaria Admisible – IDA), ya que se supone que el agua subterránea se usa para consumo humano.

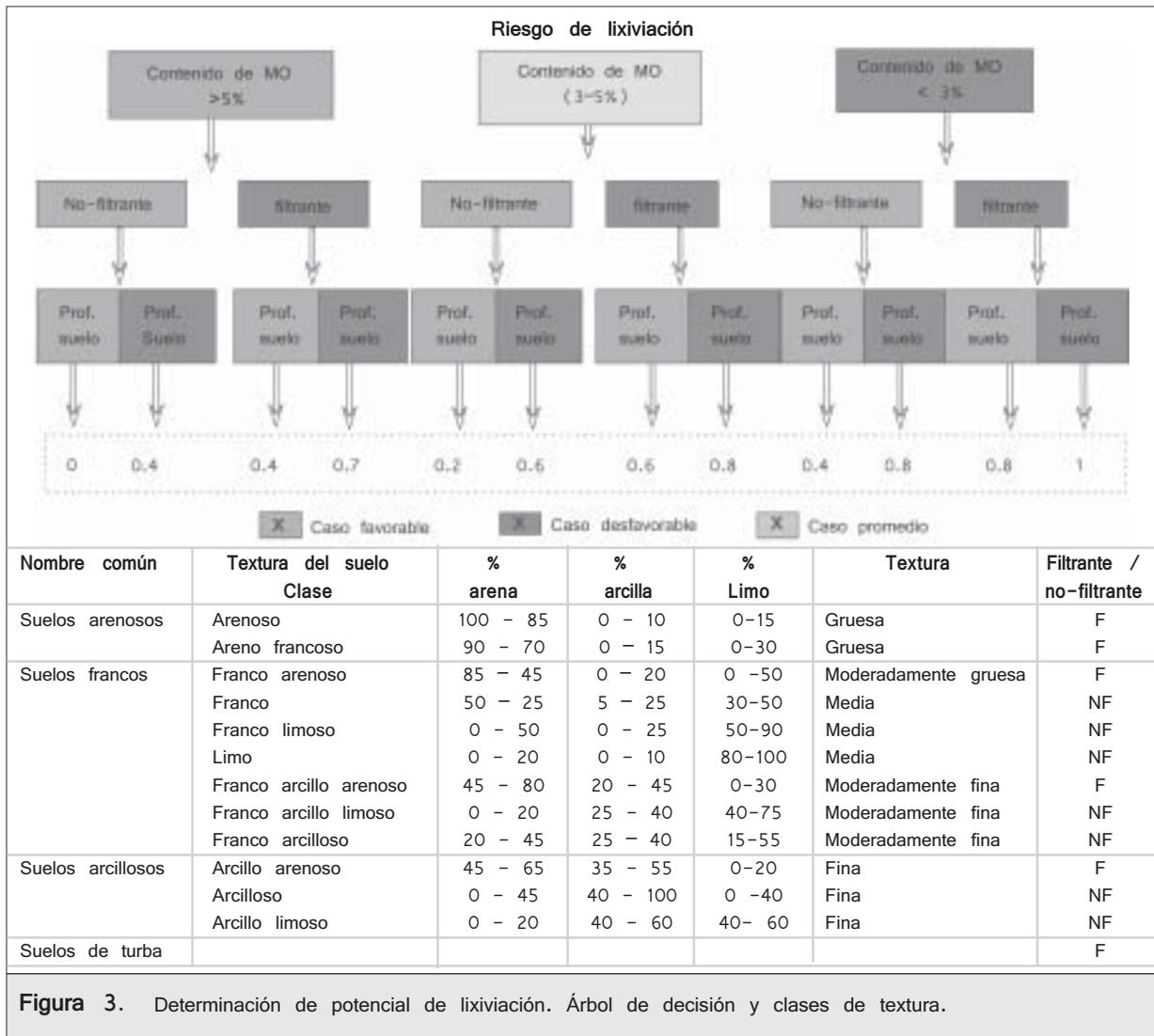
Se han desarrollado árboles de decisión similares para los otros dos módulos relacionados con la calidad de agua superficial y aire.

### Sistema de puntaje y nivel de referencia

Una vez establecida la estructura del indicador, se debe proponer sistema de puntaje junto con un nivel de referencia. Este último representa el límite por encima del cual la práctica puede ser considerada como sostenible. El puntaje Índigo® final se basa en una escala de 0 a 10 con un valor de referencia de 7, lo que significa que cualquier puntaje por encima o igual a 7 se puede considerar sostenible en relación con la práctica. Un puntaje por debajo de 7 debe conducir al mejoramiento de las prácticas para hacerlas más sanas ambientalmente.

El sistema de puntaje para  $I_N$  está directamente basado en la cantidad de nitrógeno perdido en el ambiente (Carcasses, 2003). Sin embargo, la ecuación de calificación no es lineal, con el fin de tomar en cuenta que generalmente es más fácil lograr mejoras cuando se usan muy malas prácticas inicialmente (Figura 4). El puntaje “sostenible” de 7 se obtiene cuando las pérdidas de nitrógeno son iguales a 20 kg de N perdido como  $NH_3$  por volatilización, 30 kg de N se pierden como  $NO_3$  por lixiviación, y 3 kg de N se pierden como  $N_2O$  a través de emisiones. Estos niveles de pérdida se han considerado como “aceptables” con base en las técnicas actualmente disponibles (Bobbink *et al.*, 1996; Bockstaller y Girardin, 2002). A veces se obtienen valores menores de pérdidas de N, dando como resultado puntajes por encima de 7.

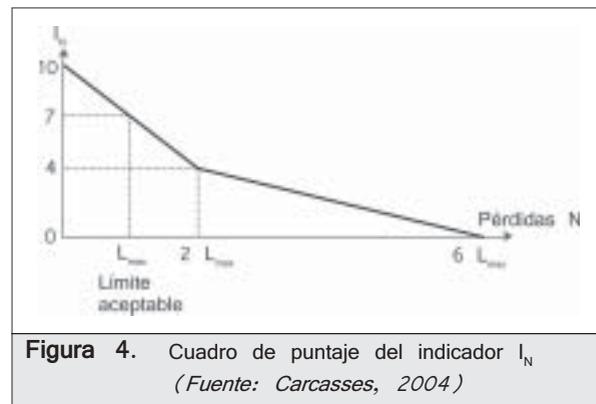
El sistema de puntaje para  $I_{PHV-Palm}$  se desarrolló con base en un enfoque muy diferente. El valor de cada



**Figura 3.** Determinación de potencial de lixiviación. Árbol de decisión y clases de textura.

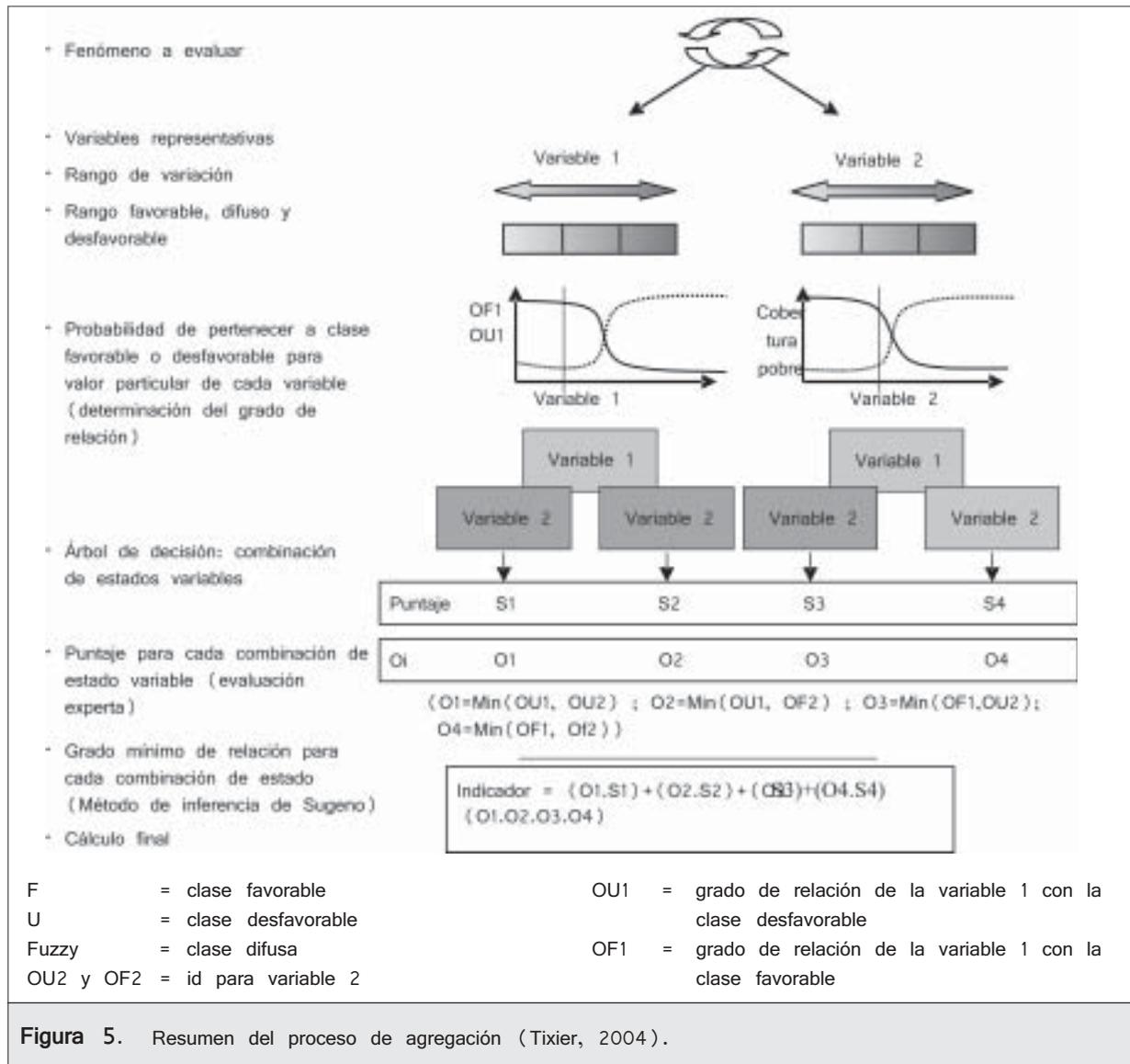
variable se determinó usando las reglas de lógica difusa. Este método es apropiado para la evaluación de riesgos que no son fáciles de evaluar debido a que no hay límites claros entre niveles aceptables y no aceptables. Además, las variables seleccionadas en el modelo no tienen la misma unidad de cuantificación (g/ha por tasa de aplicación, porcentaje de componentes del suelo, como textura y contenido de materia orgánica, porcentaje de pendiente, distancias, etc.). El método de lógica difusa ayuda a solucionar este problema.

Adicionalmente, la mayoría de las variables usadas pueden ser parcialmente afectadas por una situación y parcialmente afectadas por la situación opuesta. En otras palabras, la tasa de aplicación puede ser considerada completamente favorable al medio



**Figura 4.** Cuadro de puntaje del indicador  $I_N$  (Fuente: Carcasses, 2004)

ambiente cuando se usa en muy pequeñas cantidades x1; y puede ser considerada completamente desfavorable cuando se usa en altas cantidades x2. Sin embargo, si se aplica a una tasa intermedia, no puede



considerarse ni completamente favorable ni completamente desfavorable. La lógica difusa consiste en ajustar dos curvas entre las dos situaciones extremas, una mostrando las variaciones de la situación favorable de 0 a 1 por ejemplo, y la segunda mostrando la variación de la situación desfavorable de 1 a 0. El valor correspondiente de una aplicación intermedia será  $x$  para la curva favorable, y  $1-x$  para la curva desfavorable. El método se ha usado con éxito en el sistema Índigo® (Van der Werf y Zimmer, 1998).

Para cada uno de los tres módulos definidos anteriormente (agua superficial, agua subterránea, calidad del aire), los valores de las variables se estipularon basándose en esta técnica. Además, los resultados

de la agregación de las variables dentro de cada módulo, con base en árbol de decisión, también se presentan con un puntaje calculado con base en la lógica difusa. La calificación de los resultados del árbol de decisión se basa en consideración experta. El método de inferencia de Sugeno se usa para obtener un puntaje final entre 0 y 10.

El sistema completo se presenta en la Figura 5, (Tixier, 2004).

### Sensibilidad y validación del indicador

Durante el desarrollo de cada indicador se realizó un análisis de sensibilidad, con resultados satisfactorios (Carcasses, 2004; Wohlfahrt *et al.* 2006).

Por otro lado, el proceso de validación toma más tiempo y requiere mediciones en campo para confirmar la relación entre el indicador y la variable.

Para validación de  $I_N$ , se desarrolló un diseño específico en el campo a comienzos del año 2005, para cuantificar las pérdidas de nitrógeno por lixiviación. La validación del módulo correspondiente deberá estar terminada dentro de los próximos dos años.

La validación de  $I_{phy-palm}$  es sustancialmente más complicada, debido a que las técnicas de verificación y el equipo requerido no han sido identificados todavía, especialmente para muestreo. Sin embargo, en los próximos años lograremos un nivel aceptable de validación.

## VARIOS EJEMPLOS DE APLICACIÓN

A pesar de que los indicadores de validación no se han completado todavía, ya se han hecho aplicaciones a escala relativamente pequeña (unos cientos de hectáreas) (Caliman *et al.*, 2005; Wohlfahrt *et al.*, 2006). Además, actualmente estamos haciendo algunas pruebas a nivel de plantación (varios miles de hectáreas). También se han usado los indicadores  $I_N$  y  $I_{phy-palm}$  para hacer simulaciones acerca del posible impacto de las nuevas prácticas. A continuación se presentan algunos resultados.

A escala relativamente pequeña, a nivel del bloque comercial representativo (30 ha), los resultados de  $I_N$ , junto con el valor de los tres módulos se presentan en la Tabla 5: las pérdidas de nitrógeno a través de volatilización son relativamente altas, dando un valor  $I_{NH_3}$  de 4,3. Esto ciertamente se debe al tipo de fertilizante usado (urea), algunas veces aplicado en condiciones demasiado secas, y sin mezclar con capa vegetal. Los valores de  $I_{NO_3}$  y  $I_{N_2O}$  están por encima de 7,93 y 7,2, respectivamente. En teoría, el puntaje global final sería igual al menor valor del módulo, o sea 4,3.

En relación con  $I_{phy-palm}$ , se hizo una comparación en varias situaciones naturales a escala de división (varios cientos de hectáreas), para plantaciones desarrolladas en suelos minerales y en suelos de turba, usando da-

tos registrados en 2004. Los resultados se presentan en la Tabla 6 y en la Figura 6. El valor de  $I_{phy-palm}$  es muy aceptable en suelos minerales, mientras que en suelos de turba está por debajo del nivel de sostenibilidad. Los detalles del cálculo hecho para un ingrediente activo aplicado en un bloque comercial representativo muestran que:

- en suelos minerales, aunque el riesgo de contaminación del aire es relativamente bajo, existe el riesgo de afectar la calidad del agua subterránea y del agua superficial, aunque sea baja la cantidad de pesticida aplicado. Por tanto, la situación puede mejorarse ( $R_{sur} = 6,4$  y  $R_{grd} = 6,5$ ).
- En suelos de turba, el riesgo de contaminar el agua superficial es dramáticamente alto, como lo sugiere el bajo puntaje de  $R_{sur}$  (0,6). Esto se debe a la presencia de una red abierta de drenaje en los campos, que conduce a un alto riesgo de contaminación del agua superficial.

A escala de plantación, la implementación de  $I_N$  y  $I_{phy-palm}$  para todo el año de 2005 ha dado resultados interesantes:

- La Figura 7 muestra el valor de  $I_N$ , tomando el mínimo de  $I_{NO_3}$ ,  $I_{NH_3}$  y  $I_{N_2O}$ . Tres de las ocho divisiones presentan valores aceptables. Por otro

**Tabla 5.** Cálculo de pérdidas de nitrógeno e indicador correspondiente. Situación general para palmas de 9 años fertilizadas con 2 kg urea/año/palma

	Pérdidas de nitrógeno (kg/ha/año)	Valor de sub-indicadores correspondientes
NH <sub>3</sub>	38,1	4,3
NO <sub>3</sub>	7,3	9,3
N <sub>2</sub> O	2,8	7,2
Pérdidas totales:	48,2	

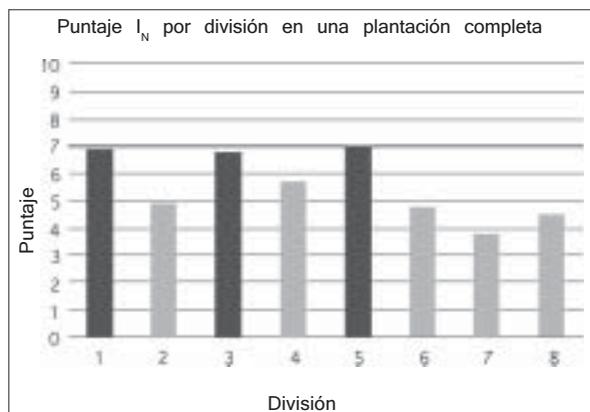
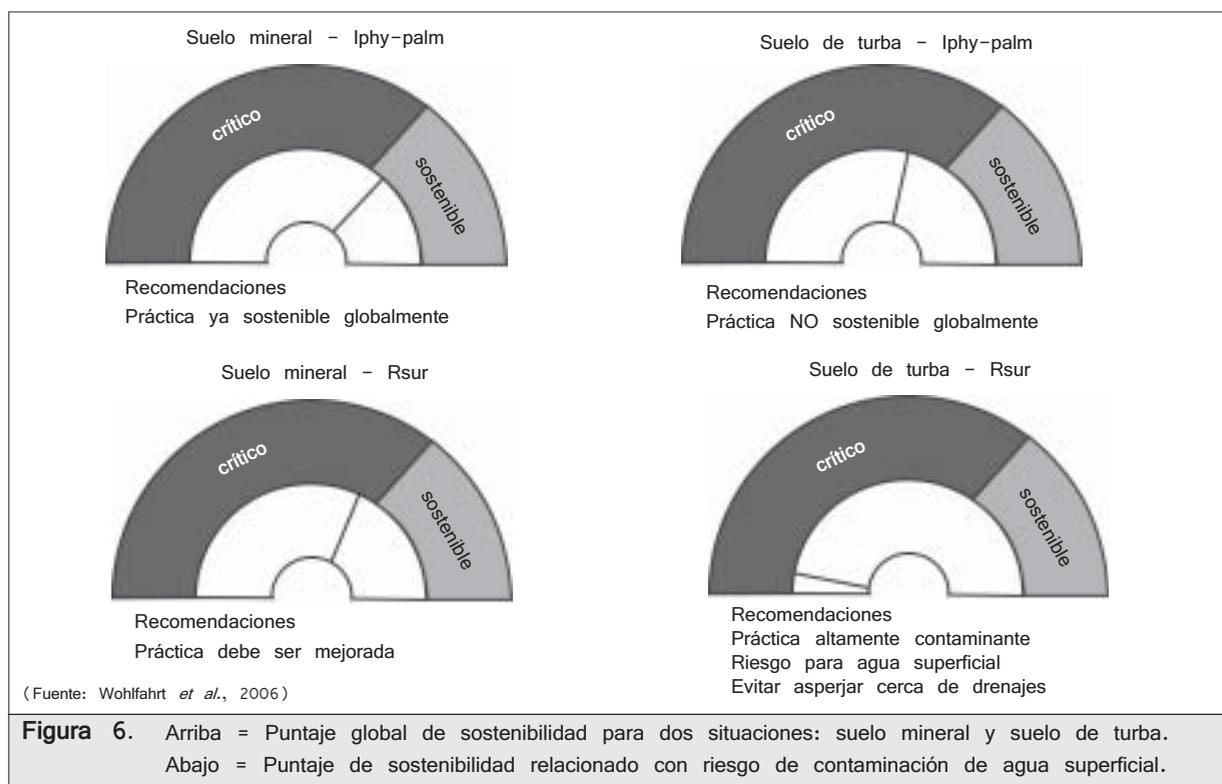
Fuente: Caliman *et al.* (2005)

**Tabla 6.** Resultados de  $I_{PHYpalm}$  para diferentes tipos de suelo (suelos minerales y de turba), y detalle de los módulos (riesgo ambiental) para un ingrediente activo aplicado en un bloque comercial representativo.

Sitio	$I_{phy-palm}$	$I-PHY$ ai (*)	$R_{sur}$	$R_{grd}$	$R_{air}$	Rate
Suelo mineral	7,4	8,0	6,4	6,5	8,7	10
Suelo de turba	5,6	6,7	0,6	6,7	8,7	10

(\*) ai: metsulfuron-methyl (nombre comercial: Ally)

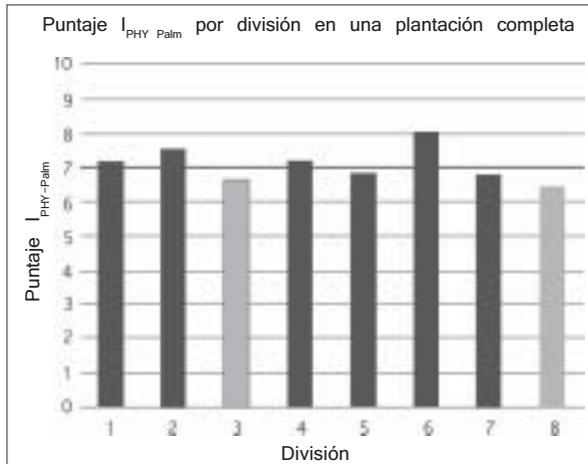
Fuente: Wohlfahrt *et al.* (2006)



lado, las divisiones 2, 4, 6, 7 y 8 están significativamente por debajo del puntaje objetivo: 7. La Tabla 7 muestra los valores detallados de los tres módulos para cada división e información de las prácticas relacionadas con el manejo de nutrición mineral. Es claro que la aplicación de nitrógeno de fuentes orgánicas a través de los racimos vacíos (RV) da un mejor puntaje que la aplicación de urea o la aplicación de efluentes de la planta de beneficio. Una vez más, el manejo de la aplicación de urea, en términos de época de aplicación, se debe mejorar para reducir la volatilización y la lixiviación. La aplicación de efluentes está bajo investigación para ver cómo ajustar la tasa de aplicación para reducir el riesgo de lixiviación de N.

**Tabla 7.** Cálculo de  $I_N$  y los tres valores de los módulos ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) a nivel de plantación

	1	2	3	4	5	6	7	8	Estate
Superficie (ha)	910	919	1.066	854	786	575	913	971	6.992
$I_N$	6,9	4,9	6,8	5,7	7,0	4,8	3,8	4,5	6,1
$R(\text{NO}_3)$	7,1	4,9	6,8	5,7	7,0	4,8	3,8	4,5	6,1
$R(\text{NH}_3)$	6,9	6,1	7,8	6,5	8,0	5,2	4,0	5,3	6,4
$R(\text{N}_2\text{O})$	8,6	7,0	8,2	8,0	8,6	7,4	6,6	7,2	8,0
Aplicaciones EFB (área tota %)	39	27	48	22	80	0	0	0	28
Aplicaciones POME (área total %)	0	28	13	0	0	0	0	0	6
Aplicaciones UREA (área total %)	61	45	39	78	20	100	100	100	67



**Figura 8.** Cuadro de puntaje del indicador  $I_{phy-Palm}$  por división a nivel de plantación.

- La Figura 8 presenta el puntaje obtenido por  $I_{phy-palm}$  a nivel de división. Los valores son buenos, aunque por debajo de 7 para la división 8 y en menor grado para la división 3. Estos resultados relativamente buenos se deben al hecho de que en el año 2005 se aplicaron únicamente herbicidas y no se usaron insecticidas.

Para las divisiones 8 y 3, el análisis de la condición en el campo muestra que un número significativo de bloques es atravesado por pequeños ríos o quebradas, y por tanto el riesgo de contaminación de aguas superficiales es relativamente alto cuando se aplican pesticidas (Tabla 8).

Como se mencionó anteriormente, estos indicadores se pueden usar para hacer simulaciones para evaluar el posible impacto de las nuevas prácticas. Por ejemplo, en el caso de la división 8 que acabamos de analizar, mantener una zona divisoria de 5 metros libres de pesticidas a lo largo de los ríos sobre cualquier superficie de agua reduciría significativamente el riesgo de contaminación cuando se aplican

herbicidas (usando bombas de espalda). La Tabla 8 muestra los resultados de la simulación hecha en tres bloques representativos de esa división para una aplicación de un ingrediente activo, dando como resultado una mejora significativa en el puntaje del módulo relacionado con calidad del agua superficial  $R_{sur}$ . Por tanto, el valor del indicador para este ingrediente activo mejora, para situarse muy cerca o encima de 7.

## PERSPECTIVAS Y CONCLUSIÓN

Aunque hasta el momento únicamente dos indicadores agroambientales se han desarrollado, los resultados son muy promisorios en términos de aplicaciones posibles:

- Proporciona una interesante evaluación comparativa entre diferentes unidades dentro de una plantación en relación con prácticas de manejo en campo.
- Proporciona una interesante evaluación comparativa de las nuevas prácticas, en términos del posible impacto en el medio ambiente. En otras palabras, es una herramienta de simulación.
- Las dos ventajas anteriores combinadas dan como resultado una buena herramienta de apoyo para toma de decisiones para que el cultivador seleccione la práctica más adecuadas (época de aplicación, cantidad, tipo de ingrediente activo, etc.) para una situación específica.
- Estos indicadores serán una herramienta clave para identificar oportunidades de mejora, no sólo en términos de aspectos ambientales sino también en términos de la eficiencia de insumos y por tanto en la productividad, ya que en muchas situaciones el uso ineficiente de insumos (fertilizantes, pesticidas, etc.) conlleva un alto riesgo de daños ambientales.

Los resultados se pueden usar para aplicación externa, por ejemplo como un panel de información acerca del monitoreo de parámetros ambientales.

Mayores mejoras se tienen programadas para los próximos

**Tabla 8.** Cálculo de  $I_{phy-Palm}$  y los 3 valores de los módulos ( $R_{sur}$ ,  $R_{gnd}$ ,  $R_{air}$ ) a nivel de plantación. Los tres módulos se calcularon para una aplicación de un ingrediente activo (metsulfuron methyl).

División	Bloques	Práctica	$I_{PHY AI}$	$R_{sur}$	$R_{gnd}$	$R_{air}$
8	24	Normal	6,4	5,2	7,2	8,4
8	26	Normal	6,8	5,1	7,2	8,4
8	28	Normal	6,7	5,2	7,2	8,4
8	24	5 m zona libre	6,8	7,0	7,2	8,4
8	26	5 m zona libre	7,2	6,9	7,2	8,4
8	28	5 m zona libre	7,1	7,0	7,2	8,4



meses, como por ejemplo la calibración para diferentes áreas (Sureste asiático, Suramérica, África) para ampliar el campo de utilización, en términos de validación y en términos de utilización con el desarrollo de un software más fácil de usar.

También está programado el desarrollo de otros indicadores, incluyendo indicadores relacionados

con la fertilidad del suelo (materia orgánica, nutrientes del suelo), biodiversidad e impacto social, entre otros.

Este trabajo debe conducir finalmente al desarrollo de un índice de sostenibilidad, a través de la agregación de los indicadores más importantes o indicadores agregados.



## BIBLIOGRAFÍA

- Bobbink, R; Hornug, M; Roelofs, J.G.M. 1996. Empirical nitrogen critical loads for natural and semi natural ecosystems, In: Werner, B., Sprenger, T., (Eds.), *Manual on methodologies for mapping critical loads/levels and geographical areas where they are exceeded*, Umweltbundesamt (UBA), Berlin, pp. (Annex III 1-54).
- Bockstaller, C; Girardin, P. 2002. *Mode de calcul des indicateurs agro-écologiques*. Méthode INDIGO - 110p.
- Bockstaller, C; Girardin, P; Van Der Werf, H. 1997. Use of agro ecological indicators for the evaluation of farming systems. *European Journal of Agronomy*. 7: 261-270.
- Bouwman, AF. 1996. Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agro ecosystems* 46: 53-70.
- Brady, NC; Weil, RR. 1999. *The Nature and Properties of soil*. Twelfth Edition.
- Caliman, JP. *et al.* 2005. Development of agri-environmental indicators for sustainable management of oil palm growing. General concept and the example of nitrogen. *MPOB International Palm Oil Congress (PIPOC)*. 25-29 September 2005. Kuala Lumpur. Malaysia.
- Carcasses, R. 2004. *Adaptation d'un indicateur agro-environnemental de pollution azotée à la culture du palmier à huile à Sumatra. Première adaptation de l'indicateur azote de la méthode INDIGO*. Mémoire de fin d'études DAA-ENSA Montpellier-France. 56 p.
- Friends of the Earth. 2005. *The social and ecological impacts of large-scale oil palm plantation development in Southeast Asia* (Wakler E. ed.). Friends of the Earth, London, England.
- Galloway, JN *et al.* 2003. The nitrogen cascade. *Bioscience* 53: 341-356.
- Girardin, P; Bockstaller, C; Van der Werf, H. 1999a. Indicators: tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. *Journal of sustainable agriculture* 13(4): 5-21.
- Girardin, P; Bockstaller, C; Van Der Werf, H. 1999 b. A method to assess the environmental impact of farming system by means of agri ecological indicators. In *"Environmental indices: systems analysis approach"*. Pykh Y.A., Hyatt E., Lenz R. (edi): 297-312.
- Girardin, P; Bockstaller, C; Van Der Werf, HMG. 2000. Assessment of potential impacts of agricultural practices on the environment; the AGRO\*ECO method. *Environment Impact Assessment Review* 20: 227-239.
- Griffith, P ; Girardin, P. 2003. "L'indicateur Phytosanitaire I-PHYarbo." unpublished.
- Lord, S; Clay J. 2006. Environmental impacts of oil palm. Practical considerations in defining sustainability for impacts on the air, land and water. *International Planters Conference*. Kuala Lumpur. 26-28 June 2006. p 125-143.
- OCDE. 1999. *Environmental indicators for agriculture*. Concepts and framework. Volume 1.
- Omont, H. 2005. *Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO)*. OCL, vol 12 No 2 - p 80-91.
- RSPO. 2006. *Principles and Criteria Guidelines* (see <http://www.sustainable-palmoil.org>).
- Smith, OH; Petersen, G.W; Needelman, B.A. 2000. Environmental indicators of agro ecosystems. *Advances in Agronomy* 69: 75-91.
- Tixier, P. 2004. *Conception assistée par modèles de systèmes de culture durables: Application aux systèmes de bananiers de Guadeloupe*. Thesis, Agronomic Sciences Department. ENSAM, Montpellier, France.
- UNEP. 2004. *GEO YEAR BOOK 2003*.
- Van Der Werf, H.M.G; Zimmer, C. 1998. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere* 36(10): 2225-2249.
- Vis J-K; Smith, BG; Rao, V; Corley, RHV. 2001. Sustainable agriculture. Unilever's View. *MPOB International Palm Oil Congress (PIPOC)*. 20-21 August 2001. Kuala Lumpur. Malaysia.
- Wohlfahrt, J. *et al.* 2006. Development of an agro-ecological indicator (I-PHY Palm) to assess the sustainability of pesticides utilization in oil palm plantations. *IOPRI International Palm Oil Conference*. 20-24 June 2006. Bali. Indonesia
- World Commission on Environment and Development. 1987. *Our common future*. Oxford University Press: Oxford.
- WWF. 2003. Oil palm and soy: the expending threat to forests. *Forest conservation INFO*. July 2003. 4p.