

**Uso de técnicas de percepción remota para la estimación del incremento de áreas cultivadas de palma aceitosa y su relación con el conflicto armado en el Departamento del Meta-Colombia**

Federico Pinzón Pinzón <sup>1</sup>  
María Silvia Pardi Lacruz <sup>2</sup>  
Jeniffer Trejos Serrato <sup>3</sup>  
Silvia Midori Saito <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Grupo Conflicto, Aprendizaje y Teoría de Juegos  
Centro de Investigación y Documentación Socio-Económica – CIDSE  
Universidad del Valle  
Calle 13 # 100 – 00, Sede Meléndez – Cali, Valle del Cauca, Colombia  
fedepinzon@gmail.com

<sup>2</sup> CRECTEALC – Campus Brasil  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE  
Av. Roraima 1000, 97 – Santa María - RS, Brasil  
lacruz@dsr.inpe.br

<sup>3</sup> Grupo de Investigación en Geomática Aplicada - GIGA  
Universidad del Valle  
Calle 13 # 100 – 00, Sede Meléndez – Cali, Valle del Cauca, Colombia  
jeniffertrejos@gmail.com

<sup>4</sup> Núcleo de Aplicação e Pesquisa de Geotecnologias  
em Desastres Naturais e Eventos Extremos  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE  
Av. Roraima 1000, 97 – Santa María - RS, Brasil  
silvia.saito@crs.inpe.br

**Abstract.** The need for alternative fuels, has led to increase the extension of the crop areas for the biodiesel production. At the present, Colombia is first producer of palm oil in Latin America and the fourth in the World. Many non governmental organizations have indicated that the growth of crops for biofuels is related to the violent actions arising from the armed conflict. The objective of this study is to using remote sensing techniques to establish the relationship that exist between the increments crop's oil palm and the actions developed by illegal groups. These actions of illegal groups are causing the forced displacement of local people to get territories without habitants for the economic exploitation of crops source raw material for biofuels. The use of remote sensing techniques, as the linear spectral mixture model, segmentation and classification of TM/Landsat and CCD/CBERS2 images, constitute an invaluable tools to get information about the land use and land cover changes, due to the establishment of oil palm crops. These changes are directly related to the irregular warfare in Colombia. The results show the existence of a strong relation between the extension of the oil palm areas and the increment of the violent actions in the rural regions of the study area

**Palabras claves:** biofuel, oil palm crops, linear spectral mixture model, TM/Landsat images, CCD/CBERS2 images, biocombustibles, cultivos de palma aceitosa, modelo lineal de mezcla espectral, imágenes TM/Landsat, imágenes CCD/CBERS2.

## **1. Introducción**

Los cada vez más escasos combustibles fósiles han conducido a la búsqueda de soluciones con recursos renovables, como lo son los biocombustibles. Sin embargo, el

aumento de la producción de estos combustibles alternativos requiere que se incrementen las áreas de cultivos de las cuales se obtiene la materia prima vegetal para su extracción.

La Organización de las Naciones Unidas para Agricultura y Alimentación (FAO) propone el uso de la bioenergía como una salida posible ante los precios elevados del petróleo, sin dejar de lado el equilibrio que debe existir entre los cultivos que se destinan a la producción de biocombustibles y los cultivos para la alimentación. Según Monbiot (2004) mantener este equilibrio resulta difícil, ya que por ejemplo, sólo para Inglaterra se destinarían 25,9 millones de hectáreas para cubrir la demanda de combustibles para automóviles y buses, en un país que sólo cuenta con 5,7 millones de hectáreas cultivables.

El crecimiento de la producción de combustibles que provienen de materias vegetales depende de la disponibilidad de extensiones cada vez más amplias con monocultivos; como consecuencia de esta necesidad de generar más biodiesel, puede originar un aumento de la explotación de áreas naturales o el reemplazo de cultivos propios de las regiones, y el consecuente deterioro de la biodiversidad.

Otro de los efectos de esta expansión de cultivos es el desplazamiento de personas de áreas rurales con el fin de poder establecer territorios óptimos para la explotación agrícola y que permitan un crecimiento de cultivos tales como: caña de azúcar, soya, maíz o palma aceitosa, que son las principales fuentes vegetales de obtención de los biocombustibles.

En Colombia existen denuncias como las registradas por Rey (2007) y WRM (2008) que muestran que la expansión del cultivo de palma africana o palma aceitosa, principal materia prima del biodiesel, puede tener una conexión con el desplazamiento forzado, el cual supera la cifra de las 3.000.000 de personas según ACNUR (2008). De ser así, se tiene un fenómeno en el que la producción de biodiesel está relacionada con acciones del conflicto armado colombiano.

Este fenómeno refleja una grave situación social y ambiental, en la cual los pobladores son obligados a abandonar sus tierras o sometidos a través de acciones violentas de grupos ilegales, masacrando o asesinando líderes campesinos para después poder cambiar el uso del suelo existente por cultivos generadores de biocombustibles.

Una forma de analizar los cambios de uso y cobertura del suelo es a través de imágenes de satélites y técnicas de procesamiento de las mismas. La ventaja del uso de estas técnicas radica en que las zonas potenciales para la realización del estudio son de alta presencia de grupos armados irregulares, lo que implica que por razones de seguridad sería muy riesgoso realizar otro tipo de análisis que conlleve a una cercanía directa con el área de estudio. Adicionalmente la percepción remota tiene la ventaja de obtener datos más precisos para la estimación de superficies agrícolas en comparación con métodos tradicionales que se realizan a un costo más alto y con menor precisión tal como lo muestra Ippoliti-Ramilo (1999).

En Colombia, técnicas de percepción remota han sido usadas con éxito para el seguimiento de cultivos ilícitos por parte de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) a través del Sistema Integrado de Monitoreo de Cultivos Ilícitos – SIMCI. Sin embargo no se conocen estudios que utilicen las ventajas de los sensores ópticos para el análisis de otras problemáticas que ocurren por causa de la guerra irregular en el país, ni las consecuencias de esta guerra en el uso y cobertura del suelo.

El objetivo de este trabajo es utilizar técnicas de percepción remota para conocer la evolución de las áreas cultivadas con palma aceitosa para la extracción de biodiesel y la relación existente entre el aumento de estas áreas cultivadas con las acciones realizadas por grupos ilegales en el conflicto armado colombiano.

## **2. Metodología**

A continuación se describen los datos usados en la elaboración de este trabajo así como la metodología aplicada.

## 2.1. Área de estudio

El área de estudio está localizada en la región oriental de Colombia, en el Departamento del Meta (Figura1), entre las coordenadas geográficas: 72° 40' 19" y 73° 51' 41" de longitud Oeste y 3o 29' 51" y 4o 8' 7" de latitud Norte, con una extensión de 414.900 hectáreas. Comprende la totalidad de los municipios Castilla la Nueva y San Carlos de Guaroa, y parte de los municipios Acacias, Puerto López, San Martín y Villavicencio.

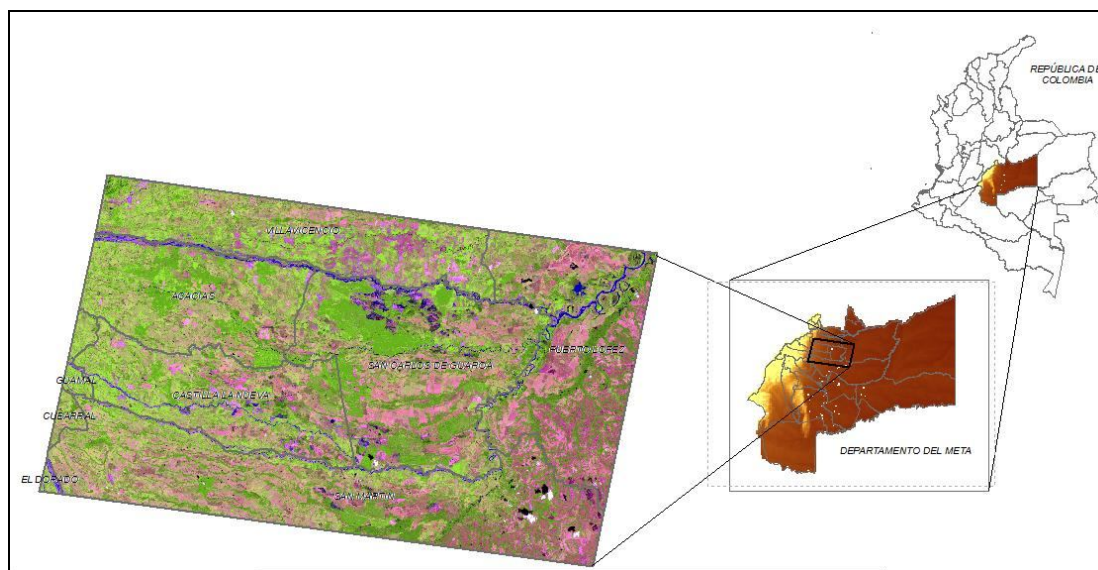


Figura 1. Localización del área de estudio.

Esta zona comprende una unidad fisiográfica en su mayoría de planicie en la que se destaca la actividad ganadera, además cuenta con ríos que surcan e inundan el territorio, favoreciendo las actividades agrícolas, ya que no se requiere invertir en sistemas de riego, estableciendo condiciones propicias para el cultivo de la palma de aceite (Secretaría de Agricultura del Meta, 2001).

## 2.2. Datos de acciones del conflicto armado colombiano

La complejidad del conflicto armado colombiano dificulta la recolección de datos estadísticos que permitan llevar un registro detallado de los hechos violentos. Históricamente en el área de estudio existía un control territorial por parte de las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC). A finales de los años noventa se dio un crecimiento de los grupos paramilitares en la zona, creando una situación inestable y de vulnerabilidad aun mayor para la población civil, que desencadenó en un nuevo régimen social y económico, con una lucha de grupos insurgentes por obtener el máximo de territorios para establecer economías ilegales o para apoderarse de la explotación de los recursos naturales.

Existen organizaciones de derechos humanos que se encargan de realizar, en la medida de lo posible, una recolección sistemática de datos para mostrar la situación de los pobladores en los escenarios del conflicto, a pesar del riesgo que esto implica. Para el presente estudio se utilizaron los datos del registro del Centro de Investigaciones y Educación Popular (CINEP) complementándolos con información de prensa escrita, recopilados en la base de datos del grupo de investigación Conflicto, Aprendizaje y Teoría de Juegos de la Universidad del Valle.

Toda esta información fue espacializada a nivel municipal para ser analizada con la información resultante de la aplicación de técnicas de percepción remota.

### 2.3. Procesamiento de las imágenes

Para calcular las extensiones de los cultivos de palma aceitera se utilizó una imagen *TM/Landsat 5* del año 1988 disponibilizada por la Universidad de Maryland y una imagen *CCD/CBERS2* del año 2005 del catálogo de Imágenes del INPE. Ambas escenas fueron adquiridas en enero, que corresponde a la época seca en el área de estudio. Para el procesamiento de las imágenes se utilizó el *software* SPRING versión 4.2.

El registro de las escenas se realizó usando una imagen georreferenciada del *ETM+/Landsat 7* del año 2000, ubicando puntos de control y aplicando el algoritmo de interpolación de vecino más próximo, obteniéndose en cada caso un error cuadrático medio inferior a un píxel.

Para poder realizar una comparación temporal entre las imágenes de diferentes sensores se transformaron los niveles digitales de ambas escenas a valores de reflectancia, tal como lo sugieren Ponzoni y Shimabukuro (2007). Para realizar esta transformación se utilizó el Lenguaje Espacial para Geoprocesamiento Algebraico (LEGAL) disponible en el *software* SPRING.

Posteriormente, sobre las imágenes reflectancia se aplicó el modelo lineal de mezcla espectral con la finalidad de estimar las proporciones de los diferentes componentes que están presentes en la respuesta del píxel; de esta manera se calcularon los componentes vegetación, suelo y sombra de acuerdo a la ecuación a seguir:

$$r_i = a * veg_i + b * suelo_i + c * sombra_i + e_i$$

donde  $r_i$  es la reflectancia espectral de la banda  $i$ ;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  son las proporciones de reflectancia de los componentes vegetación, suelo y sombra, y  $e_i$  representa el termino de error (Ponzoni y Shimabukuro, 2007).

Las fracciones vegetación, suelo y sombra de la imagen *TM/Landsat 5* fueron segmentadas utilizando un algoritmo de crecimiento de regiones y con un umbral de similitud de 6 y de área igual a 15. Posteriormente se aplicó una clasificación supervisada por regiones que utiliza la distancia de Bhattacharya como medida de separabilidad de clases con un límite de aceptación del 95%. En el caso de las fracciones resultantes de la aplicación del modelo de mezcla espectral en la imagen *CCD/CBERS* se utilizaron los mismos algoritmos de segmentación y clasificación de la imagen *TM/Landsat*, variando solamente los umbrales de similitud y área para 8 y 12 respectivamente.

### 3. Resultados y Discusión

A partir de la clasificación se definieron las siguientes clases temáticas: palma aceitosa, bosque de galería, sabanas/pastos, cultivos, suelo expuesto, quemada, ciudad, drenaje y arena. La clase palma aceitosa comprende varios estados de crecimiento del cultivo y en algunas ocasiones presentó una respuesta espectral similar a los bosques de galería, debido a las formaciones de sombra por la altura alcanzada por la palma.

Por las condiciones fisiográficas del área estudiada se identificaron gran cantidad de sabanas y pastos que no eran fácilmente separables debido a la semejanza de sus respuestas espectrales; estas clases de cobertura vegetal son utilizadas en su mayoría para la actividad ganadera. De igual manera se detectaron áreas de quema en las zonas de sabanas para recolección de cultivos, ampliación de la frontera agrícola y renovación de pastos.

En la clase cultivos, se agregaron plantaciones transitorias y características de la región como el arroz, algodón maíz y soya. Los principales ríos presentes en el área de estudio son Guayuriba, Guamal y Humadea, los cuales se encontraban cercados por bancos de arena.

Los suelos expuestos corresponden a suelos preparados para cultivos o siembras efectuadas próximas a la adquisición de las imágenes. Como las fechas de las imágenes correspondían con la época seca de la región, se encontraron sabanas con vegetación en su mayoría seca, lo que producía una respuesta semejante a la del suelo expuesto, sin embargo con la aplicación del modelo lineal de mezcla espectral fue posible separar estas dos clases.

La imagen clasificada de 1988 realizada sobre las fracciones vegetación, suelo y sombra de la imagen *TM/Landsat* muestra un predominio de las áreas de sabana, con presencia de cultivos transitorios en la parte superior del área de estudio y la existencia de pocos cultivos de palma aceitosa, destacándose por su tamaño un cultivo de palma sobre la planicie inundable del río Guayuriba (Figura 2).

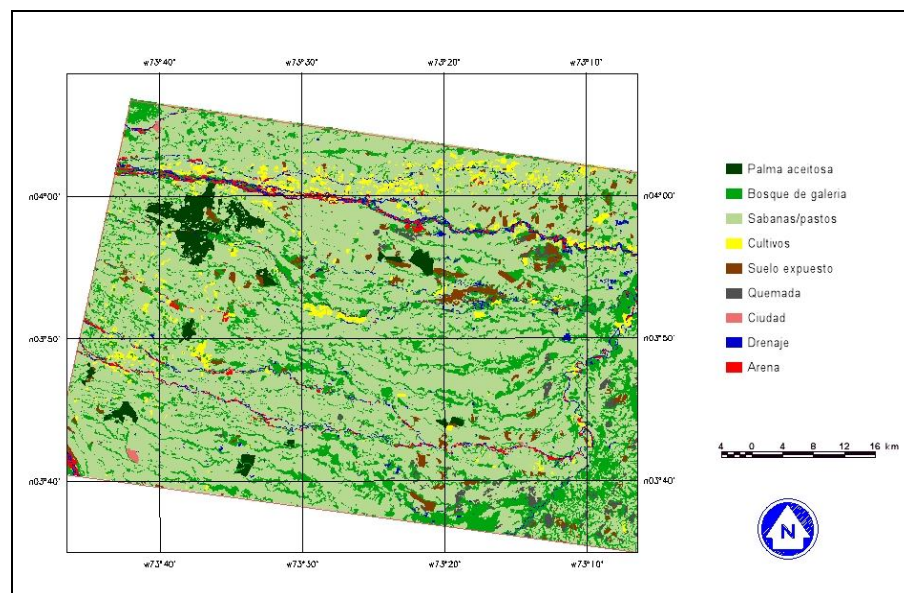


Figura 2. Clasificación temática del resultado del modelo lineal de mezcla espectral aplicado sobre la imagen *TM/Landsat* 5 de 1988.

En la clasificación temática de 1988 la actividad agrícola corresponde predominantemente a cultivos transitorios (2,65%), mientras que las plantaciones de palma aceitosa ocupan un área menor que representa 1,94% del área total. La palma en el año de 1988 fue utilizada en su mayoría para extracción de aceite vegetal para el consumo humano, ya que las plantas de extracción de biodiesel comenzaron a ser implantadas en Colombia a finales de la década de 90. Las clases temáticas de mayor extensión son las sabanas y pastos con 67,67% y el bosque de galería con 20,16 % del área total.

La imagen clasificada de las fracciones resultantes de la aplicación del modelo de mezcla espectral sobre la imagen *CCD/CBERS* de 2005 presentó las mismas clases temáticas que en 1988, siendo las clases de bosque de galería, sabanas/pastos y palma aceitosa las que mostraron las mayores variaciones en extensión.

Las clases de bosques de galería y sabanas/pastos presentaron en 2005 un decrecimiento de 18.338 ha (4,42%) y 11.856 ha (2,85%), respectivamente. Las clases restantes no presentaron cambios significativos entre los dos años considerados (Figura 3).

La palma aceitosa presentó un incremento del 500% de la extensión ocupada por los cultivos, llegando a ocupar un 10,09% del área total en estudio. Este crecimiento se debió al

aumento de la rentabilidad de sembrar esta especie, ya que la escasez de combustibles fósiles, dio origen a la producción de combustibles renovables extraídos de materias vegetales, convirtiendo este tipo de palma en la especie más rentable para la producción de biodiesel (Ministerio de Agricultura, 2006).

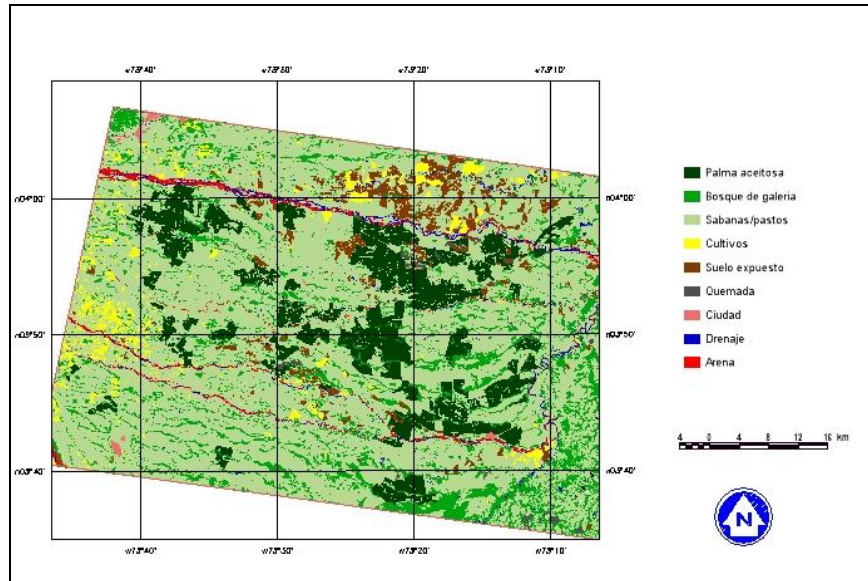


Figura 3. Clasificación temática del resultado del modelo lineal de mezcla espectral aplicado sobre la imagen CCD/CBERS2 de 2005.

La Figura 4 muestra en color verde claro las áreas que correspondían a palma aceitosa en las dos fechas analizadas, las clases verde oscuro, naranja y amarillo indican áreas con palma aceitosa en 2005 y que en 1988 correspondían a bosque de galería, otros cultivos y otras clases, respectivamente.

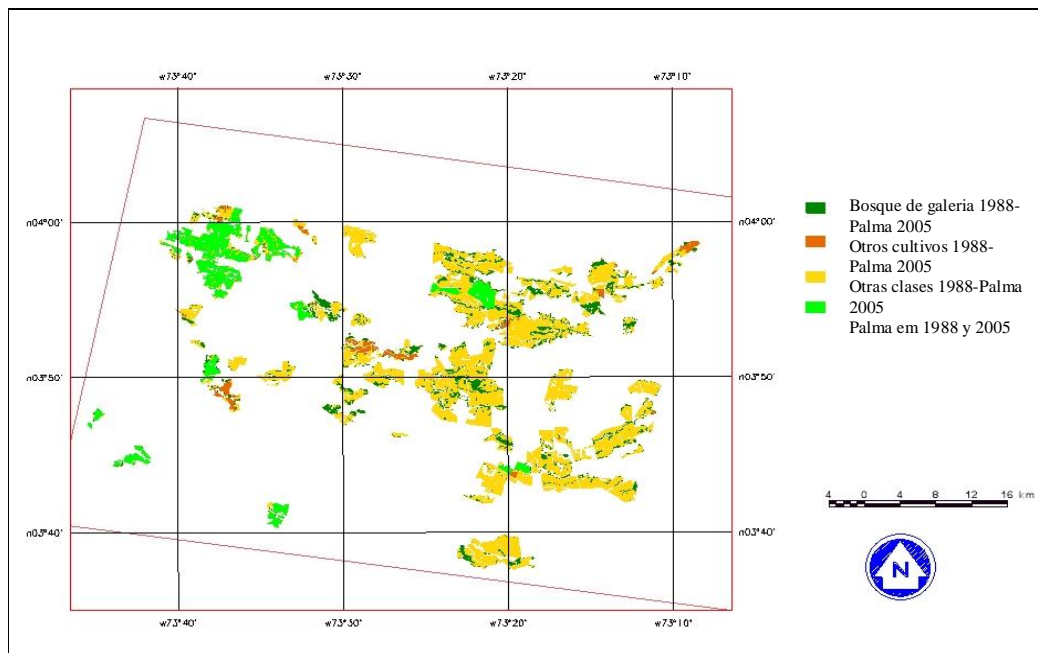


Figura 4. Áreas clasificadas como palma aceitosa en 2005 con la discriminación de las clases determinadas en 1988.



En la parte central del área de estudio se observa el mayor crecimiento de sembrados de palma aceitosa principalmente en áreas que en 1988 correspondían a sabanas, pastos y bosques de galería. Cabe destacar que esta área corresponde a territorios de alta influencia paramilitar y guerrilleras. En la Tabla 1 se registra el crecimiento de áreas cultivadas de palma en el período de 1988 a 2005 discriminado para los 6 municipios que conforman el área de estudio.

Municipios	Área de palma (ha) 1988	Área de palma (ha) 2005	Diferencia (ha) 1988 - 2005	Diferencia (%) 1988 - 2008
Acacias	5391,15	8851,49	3460,35	10,23
Castilla la Nueva	325,31	5659,11	5333,80	15,78
Puerto López	0,00	443,89	443,89	1,31
San Carlos de Guaroa	1117,49	23564,83	22447,34	66,39
San Martín	1072,33	2988,35	1916,02	5,67
Villavicencio	0,00	207,85	207,85	0,61

El crecimiento de palma registrado en la zona central del Departamento en el municipio de San Carlos de Guaroa concentra el 66,39% del total de palma mapeada en el área de estudio. Tal incremento puede ser explicado por las condiciones sociales y de la intensidad del conflicto que se dieron en este municipio; es importante mencionar que todos los municipios analizados tienen las características físico-ambientales óptimas para el desarrollo del cultivo de la palma aceitosa.

Al relacionar las informaciones de áreas cultivadas derivadas del procesamiento de imágenes con las bajas producidas por acciones relacionadas con el conflicto armado, se observa una clara relación de las zonas rurales afectadas por masacres y asesinatos con la expansión del cultivo de palma (Figura 5).

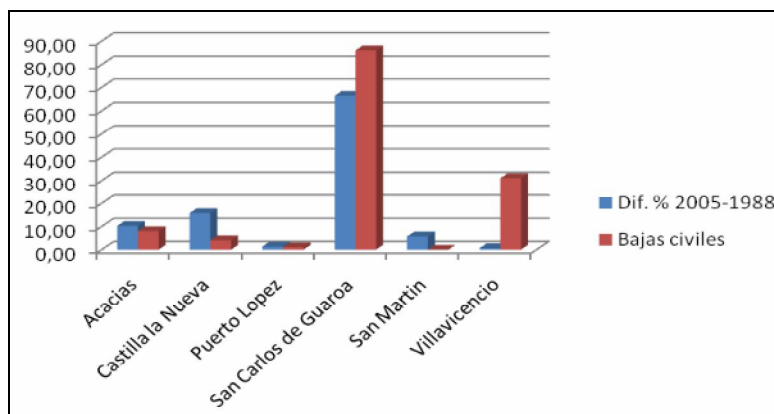


Figura 5. Relación entre el incremento de área cultivada con palma aceitosa y las bajas civiles, por municipios.

El municipio de Villavicencio presenta 31 bajas civiles en el período de 1988 – 2005, sin embargo no tuvo un incremento considerable en la extensión de palma aceitosa, debido probablemente a que dicho municipio es el principal centro urbano del departamento del Meta y las acciones violentas realizadas por los grupos ilegales son sufridas por la población civil, en su mayoría, en el área urbana; el resto de los municipios presentan 50% o más de su población ubicada en áreas rurales, ocasionando que los efectos del conflicto armado tengan mayor incidencia en las actividades de explotación agrícola.

#### 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos permitieron verificar la relación existente entre el aumento de áreas de cultivos de palma aceitosa con el accionar violento de grupos ilegales en áreas rurales. Las técnicas de percepción remota se mostraron de gran utilidad para realizar este tipo de estudios, ya que permiten obtener información espacial sobre la extensión de cultivos y otros tipos de uso y cobertura, sin necesidad de entrar en contacto directo con el área a analizar, por lo cual para estudios sobre conflictos armados se convierte en una herramienta de gran utilidad.

Adicionalmente, la aplicación del modelo lineal de mezcla espectral tuvo un buen desempeño en la discriminación de las diferentes clases temáticas, principalmente sabanas y pastos en época seca, evitando confusiones con superficies de suelo expuesto, minimizando los errores de interpretación, tanto de las imágenes *TM/Landsat* como las *CCD/CBERS2*.

La combinación de estudios sociales de conflictos armados con la información derivada del procesamiento digital de imágenes, amplía el campo metodológico para desarrollar nuevos estudios que colaboren en el entendimiento de conflictos de larga duración en los que el espacio territorial y la explotación de los recursos naturales son de gran importancia.

Sería de gran utilidad realizar un estudio similar en otras áreas de cultivos de palma aceitosa, que presenten condiciones sociales y/o fisicoambientales diferentes, a fin de comparar con los resultados obtenidos en este estudio.

Dada la dificultad de recolección de estadísticas del conflicto armado se sugieren estudios futuros en los que se amplíe el área de estudio con el fin de incrementar las muestras y poder desarrollar modelos estadísticos, dinámicos y predictivos que permitan medir la relación de las acciones del conflicto armado con el crecimiento de palma aceitosa.

#### Referencias Bibliográficas

ACNUR; **Cifra récord de refugiados y desplazados.** 2008 Disponible en: <<http://www.un.org/spanish/News/fullstorynews.asp?newsID=12739&criteria1=refugiados>> Accesado en: 25 de agosto de 2008.

Ippoliti-Ramilo, G. A.; **Imagens tm/ Landsat-5.da época de pré-plantio para a previsão de área de culturas de verão** 1999. 183 p. (INPE-7116-TDI/668). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1999.

Ministerio de Agricultura Colombia; **Estrategia de desarrollo de biocombustibles: implicaciones para el sector agropecuario**, 2006. Disponible en: <<http://www.minagricultura.gov.co/archivos/biocombustibles.pdf>> Accesado en: 21 de agosto de 2008

Monbiot, G.; **Fuels for Nought, biofuels would be a humanitarian and environmental disaster** **The Guardian of London**, 2004. Disponible en: <<http://politics.guardian.co.uk/green/comment/0,9236,1357499,00.html>>, Accesado en: junio 27 de 2008

Ponzoni, F. J.; Shimabukuro Y. E.; **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetacao.** São Jose dos Campos, SP: Parêntese editora, 2007. 97 p.136

Rey, G.; **Colombia quiere entrar en la era de los biocombustibles**, 2007. Disponible en: <<http://www.cumbresiberoamericanas.com/principal.php?p=589>> Accesado en: 20 de agosto de 2008.

Secretaria de agricultura del Meta, 2001. Disponible en: <[http://www.geocities.com/secagri\\_meta/](http://www.geocities.com/secagri_meta/)>. Accesado en: 15 de noviembre de 2008

WRM; **Colombia: la palma aceitera crece a fuerza de violencia**, julio 2008. Disponible en <<http://www.wrm.org.uy/boletin/132/Colombia.html>> Accesado en: 19 de agosto de 2008