

# Memorias



Sociedad Latinoamericana en  
Percepción Remota y Sistemas  
de Información Espacial  
Capítulo Colombia

**30**  
AÑOS

Medellín, Colombia  
29 de Septiembre al 3 de Octubre de 2014



## **Detección de movimientos en masa a escala regional empleando imágenes del sensor MODIS**

Obed Moncada Rojas<sup>1</sup>, Verónica Botero Fernández<sup>2</sup>, Andres Ochoa Jaramillo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Estudiante de maestría en Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Nacional de Colombia.

<sup>2</sup> Profesor asociado al departamento de Geociencias y Medio Ambiente, facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia. Email: oamoncad@unal.edu.co, vbotero@unal.edu.co

---

### **Resumen**

Valorar una metodología para la detección de superficies afectadas por movimientos en masa a escala regional, soportada en el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) del SENSOR MODIS. Esta investigación avanzó en un método automatizado para el monitoreo de la superficie terrestre a una escala de tiempo anual, a partir de la identificación de características espectrales de la cobertura vegetal y cambios en diferentes momentos asociables con movimientos en masa. El procedimiento se basó en la excedencia de un valor umbral entre imágenes pre y post NDVI-MODIS, condición considerada como un candidato a movimiento en masa.

El método es útil para clasificaciones automáticas de variaciones temporales y espaciales de la cobertura superficial (procesos erosivos, cortes y movimientos en masa) con una fiabilidad global de 67,59%, este puede incrementar para procesos terrestres asociados a un proceso específico en el tiempo. Esta condición limitó el rendimiento para la detección de cambios por movimientos en masa, una fiabilidad del 22%, por falsas identificaciones debido a procesos antrópicos u otros fenómenos naturales.

**Palabras claves:** NDVI-MODIS, Movimientos en masa, series de tiempo.

### **Abstract**

Rate a methodology for the detection of areas affected by movements in mass at regional level supported on the Normalized Vegetation Index (NDVI) from MODIS SENSOR. This research advanced into an automated method for monitoring the overland's surface to an annual time scale from the identification of spectral characteristics of vegetal coverage and changes in different times associated with movements in mass. The procedure was based on the exceedance of a threshold value between images pre and post NDVI-MODIS, condition considered as a candidate to movement in mass.

The method is useful for automatic classifications of temporal and spatial variations of the superficial coverage (erosion processes, cuts and movements in mass) with a global reliability of 67.59%, this result can increase for analysis where the variability of the overland processes associated with a specific process in time. This condition limited the yield for the change detection by movements in mass, a reliability of 22%, by false identifications due to areas affected by anthropics processes or other natural phenomena.

**Keywords:** NDVI-MODIS, landslide, time series.

## **1. Introducción**

Los registros de movimientos en masa en muchos lugares están restringidos a reportes realizados por entidades oficiales o directamente por la población afectada, esto limita la información para eventos ocurridos en regiones de difícil acceso, lo que configura una limitante para la caracterización cartográfica de zonas afectadas (Martha *et al.*, 2010; Metternicht *et al.*, 2005). En Colombia los deslizamientos son reportados por las autoridades competentes y descritos en publicaciones locales, pero rara vez son objeto de cuidadosa evaluación (Hermelin y Hoyos, 2010). Otros autores plantean que algunos eventos son invisibles a nivel nacional, al considerarse de poca trascendencia, sin embargo, la frecuencia y el efecto acumulado tienen consecuencias económicas, ambientales y sociales que deben ser atendidas (IDEA, 2005; Marulanda et al., 2010).

En la actualidad numerosos estudios emplean sistemas de información geográfica y de teledetección para la localización y mapeo de movimientos en masa (Rau *et al.* 2007; Peduzzi 2010; Rickli & Graf 2009; Guzzetti *et al.* 2012).

Zhang et al., 2010 y Yang et al., 2013, emplean el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) del sensor MODIS para la identificación de deslizamientos detonados por el sismo de Wenchuan. Aunque la resolución espacial de 250 metros puede limitar el detalle del análisis, concluyen que es útil para identificar zonas de remoción a escala regional. En especial cuando otras observaciones no están disponibles. Las pretensiones de esta investigación es definir una metodología de alcance regional, para la recolección sistemática y continúa de registros

indicativos de procesos de remoción en masa en la región del oriente antioqueño, con el empleo del producto NDVI-MODIS

## 2. Metodología

Se representa mediante un flujo de actividades, cuya finalidad es detectar en el tiempo cambios en la cobertura terrestre con el empleo de imágenes del sensor MODIS. La información substraída corresponde al NDVI y la capa de calidad (QA). Para esto se siguen los siguientes pasos: 1. Área de estudio 2. Adquisición de datos, 3. Procesamiento de datos, 4. Identificación de cambios, 5 filtrado por pendiente 6. Validación de resultados.

### 2.1 Definición del área de estudio

El Oriente Antioqueño es una región geográfica estratégica con grandes potencialidades ambientales, económicas y ecosistémicas (CORNARE, 2009). Sin embargo la importancia económica y social contrasta con cuadros graves referentes a una gestión eficaz del riesgo por fenómenos geológicos (Gallego, 2012). Se localiza entre las coordenadas geográficas 5° 24' 39.77'' N, 75° 34' 58.92'' W y 6° 35' 11.78'' N, 75° 13.58'' W (Figura 1). Presenta un amplio rango altitudinal con mínimos de 200 msnm y máximas de 3.340 m.s.n.m. (CORNARE, 2009). El sensor MODIS define ventanas para la ubicación espacial. El área de estudio corresponde con la ventana H10V08, acotada en el sistema sinusoidal por las coordenadas superior izquierda, latitud 730412.4976 y longitud -8367890.9732; e inferior derecha, latitud 730412.4976 y longitud -8237005.1308.

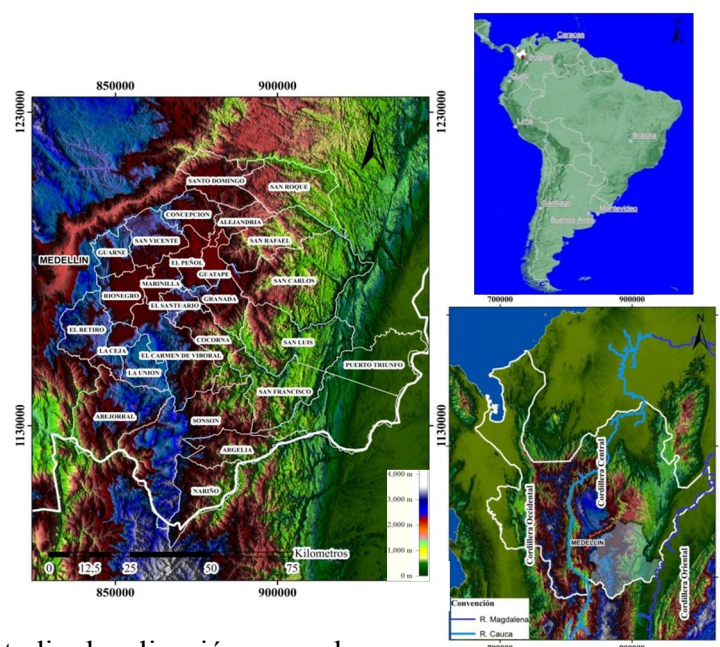


Figura 1 Área de estudio, localización general

## 2.2 Adquisición de Datos

Esta puede ser categorizada en una sola fase. Obtener para la superficie de estudio la información disponible a partir del año 2003 hasta el 2013, equivalente a 506 registros. Los datos fueron descargados de la dirección: <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>.

## 2.3 Procesamiento de los índices de vegetación NDVI-MODIS

La extensión del NDVI-MODIS es HDF-EOS, ésta soporta múltiples formatos y estructuras de manera que la información requerida se encuentra empaquetada en capas. Para el caso, es necesario sustraer el conjunto de datos científicos (SDS) recogidos en los siguientes productos.

**“250 m 8 days NDVI Quality”** (A)

**“250 m 8 days NDVI”** (B)

La capa A es sustraída mediante el software *“Land Data Operational Product Evaluation”* (LDOPE). Con éste y la capa de valoración de calidad (QA), se construyó un algoritmo para la evaluación de los datos. La finalidad es descartar los registros indeseables. Nubes, sombras de nubes y píxeles de mala calidad.

Los datos del producto B son sustraídos con el software ENVI-IDL. Ésta herramienta se usa para aplicar a los datos de NDVI, la máscara de calidad. Capa A (filtrado y análisis).

## 2.4 Valoración de calidad (Quality Assessment, QA)

Para acceder al rango de bits con una calidad aceptable o alta, se emplea el código MASK\_sds del software (LDOPE). Los parámetros se relacionan en la Tabla 1. Los píxeles que no cumplen con el criterio se asignan un valor arbitrario de -9999. Luego, en un paso adicional, en el software IDL se definió las coordenadas geográficas y matriciales que acotan el área de estudio, esta última es la utilizada para la substracción de los datos.

Tabla 1 Parámetros de empleado en la valoración de calidad para los datos de NDVI

| Bits   | Parámetro             | Value | Descripción                    |
|--------|-----------------------|-------|--------------------------------|
| 0-1    | Índice de Calidad     | 0     | VI producido con buena calidad |
|        | (MODLAND QA Bits)     | 1     | VI producido, cheque otro QA   |
| 06-jul | Cantidad de aerosoles | 0     | Climatico                      |
|        |                       | 1     | Bajo                           |
|        |                       | 10    | Intermedio                     |
|        | Nube Adyacente        | 0     | No                             |
| 15     | Posible sombra        | 0     | No                             |

### ***2.5 Serie de tiempo a partir de índices de vegetación NDVI-MODIS***

Los registros captados por el sensor MODIS varían en función del entorno y el sensor, para este análisis no fue posible obtener una serie continua sin influencia de estos factores, en tal sentido, la importancia de aplicar a las escenas de NDVI-MODIS una máscara de valoración de calidad.

Se combinó los productos semanales del MODIS-Terra y MODIS-Aqua, luego a cada pixel, se aplica la máscara de valoración de calidad. Los resultados son composiciones temporales que contienen la información para cada pixel, bien sea un registro nulo para los pixeles que no se ajustan a los niveles de calidad o el respectivo valor de NDVI. Aun después de aplicar los filtros de calidad persisten pixeles con un algún grado de contaminación, “*diente de sierra*”, comportamiento que reporta (Lunetta *et al.*, 2006; Xiao *et al.*, 2005) condición que se acentúa en zonas lluviosas (Tzitziki Janik *et al.*, 2011). Como alternativa se explora un criterio adicional, bajones de NDVI con una continuidad mínima de dos fechas (Figura 3). Además con la intención de corregir lo reportado por Xiao *et al.* (2005) datos que persisten con algún nivel de contaminación por nubes, se emplea la banda azul del sensor MODIS para descartar los niveles digitales mayores a 2000.

Para identificar el comportamiento espectral de los datos y apoyar los criterios para la implementación y ajuste del protocolo de procesamiento de los registros MODIS-NDVI, se probó para las coberturas más frecuentes en la zona de estudio, un análisis cualitativo de los perfiles temporales (Figura 2).

### ***2.6 Identificación de cambios en la cobertura superficial e información de referencia***

El procedimiento se basa en la diferencia entre imágenes pre y post de NDVI-MODIS. Por lo que se hace necesario identificar el valor residual al cual se asocien posibles cambios en la cobertura vegetal. La intención de este planteamiento es definir el umbral de cambio para cada pixel donde la excedencia de dicha cifra, es considerada como un candidato a movimiento en masa. El Valor umbral de  $\Delta\text{NDVI}$  será logrado con el uso de la siguiente forma:

$$\text{NDVI: } \text{NDVI}_{\text{Pre}} - \text{NDVI}_{\text{Post}}$$

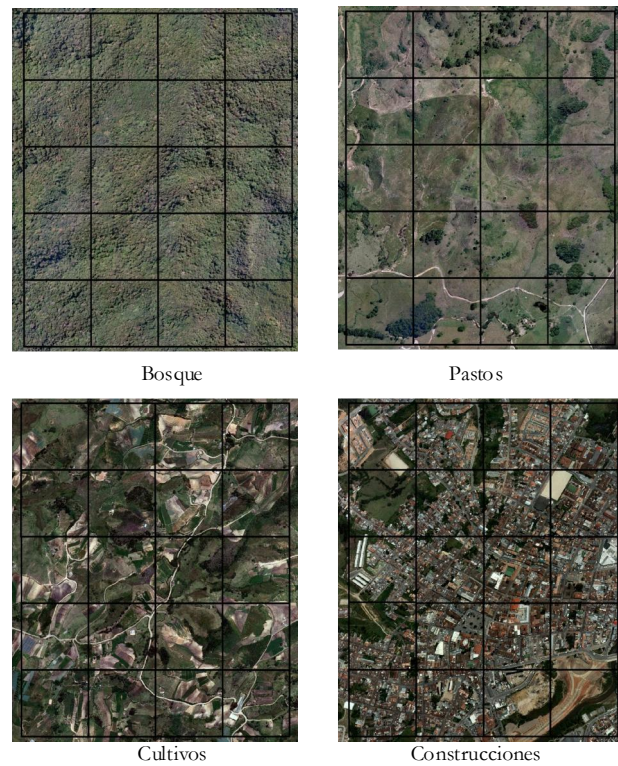


Figura 2 Coberturas de referencia

Para explorar el valor umbral asociado con cambios en la cobertura vegetal, se adopta lo planteado por (Lunetta *et al.*, 2006) cuatro niveles de desviaciones estándar como una estimación apropiada para la identificación de cambios en la cobertura vegetal (2.0, 2.5, 3.0, 3.5). Donde  $\Delta NDVI$  superiores al valor umbral pueden ser el resultado de cambios en la cobertura vegetal. En el presente análisis se optó por un criterio de selección discreto en el que se consideran, para el  $\Delta NDVI$ , una distribución de probabilidad positiva de 0.15%, 0.35% y 0.5% de donde se obtienen el número de desviaciones estándar asociada con deslizamientos, además de los valores contenidos. Número de deslizamientos.

Los valores de  $\Delta NDVI$  presentan una distribución normal lo que significa que en condiciones constantes de vegetación, el  $\Delta NDVI$  tendrá valores cercanos a cero al no presentar cambios significativos entre  $T_1$  y  $T_2$ , los que se alejen de  $X=0$  estarán asociados con variaciones fenológicas entre  $NDVI_{pre}$  y  $NDVI_{post}$  y cambios de la cobertura. La última, representa la remoción de la cobertura vegetal dinámica de interés para la investigación.

El proceso de calibración para identificar el  $\Delta_{Umbral}$ , será realizado para el año 2010 ya que para este periodo se disponía de información para la validación de los resultados. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se representa el comportamiento de la serie temporal de NDVI-MODIS a un movimiento en masa o posibles variaciones por condiciones climáticas (Figura 3).

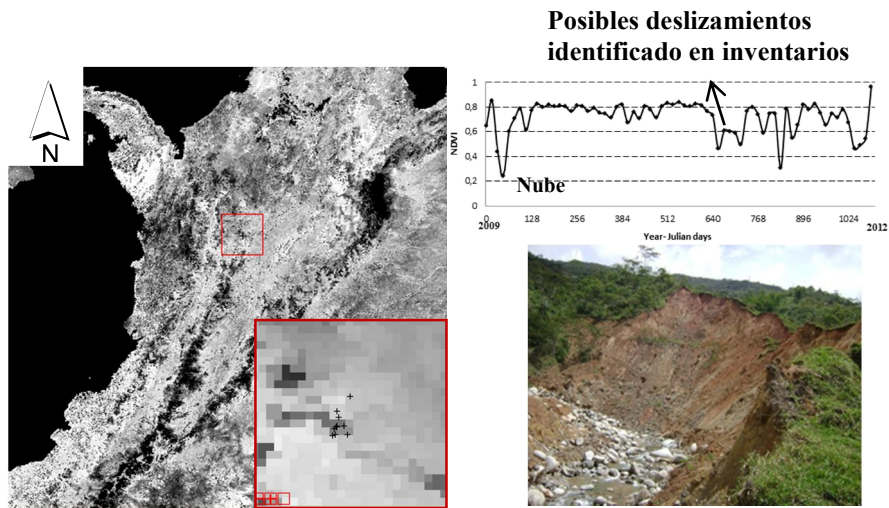


Figura 3 Comportamiento de serie de tiempo por el registro de un movimiento en masa

### **2.7 Correlación de movimientos en masa con la pendiente**

Con el ángulo de la pendiente se construye un segundo filtro basado en las características del terreno y la susceptibilidad de este a movimientos en masa, para de esta manera descartar los pixeles candidatos a movimientos en masa, a causa de bajones en el  $\Delta$ NDVI, pero que no cumplen con el valor de pendiente adoptado. Para precisar el valor se recurre a estudios en los que se definen, para pendientes calculadas con MDE, condiciones críticas de susceptibilidad a movimientos en masa. Ángulos mayores o iguales a  $15^\circ$  para el occidente de Grecia Miliarensis *et al.*, (2005) y valores mayores o iguales a  $30^\circ$  para eventos detonados por lluvias en cinco regiones del Japón (Iwahashi *et al.*, 2012). Adicionalmente (Fell *et al.*, 2008) plantea pendientes superiores a  $20^\circ$ . Por lo variable de los resultados se adopta como criterio el menor valor que reportan los autores mencionados,  $8^\circ$ .

Para este proceso se recurre al modelo digital de elevación ASTER 30 m corregido con el modelo SRTM 90. Luego en el software ARCGIS 10 se emplea la extensión “*resample*” y la técnica del vecino más cercano para remuestrear el MDE con una resolución espacial de 30 m a una celda de salida de 231,65 m.

### **2.8 Validación de resultados**

Según Tzitziki Janik *et al.* (2011) los índices más utilizados para validar las clasificaciones del sensor MODIS, son el de fiabilidad global y el coeficiente de kappa. Sin embargo con la información disponible solo es posible determinar el parámetro fiabilidad global (pixeles correctamente clasificados respecto del total de pixeles verificados). Se empleó como herramienta secundaria de validación un inventario de movimientos en masa disponible para toda la región de estudio (CORNARE, 2012). Los datos fueron procesados para luego

filtrar los eventos que no correspondían con movimientos en masa. Como insumo primario se emplean mosaicos de subescenas captadas por el sensor *Vexcel Ultracam* con una resolución espacial de 1 m. Ortofotomosaicos consolidados en el año 2012 y disponibles para parte de la región de estudio (Figura 4). Las escenas que la componen corresponden al año 2010 y comienzos del 2011. Como limitante se tiene que el mayor número de procesos reportados pertenecen al primer semestre del año 2011.

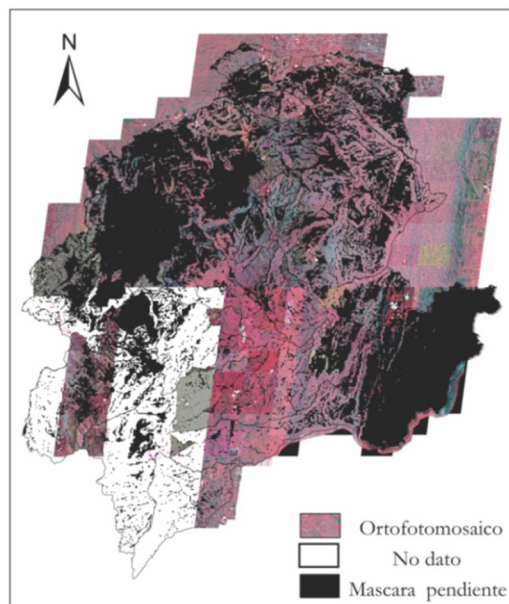


Figura 4 Datos empleados para la validación de resultados

### 3. Resultados

#### 3.1 Mascara de calidad (*Quality Assessment, QA*)

De este proceso el número de registros obtenido es igual al número inicial de escenas, 506, así mismo la estructura y el nombre de origen. La diferencia entre el archivo de salida y el inicial, es el número de variables que contiene el producto, ya que solo se almacena la máscara del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI). Los registros de salida son empaquetados en formato HDF. La Figura 5 representa de manera análoga los metadatos antes y después de la máscara, y la Figura 6 muestra las escenas.

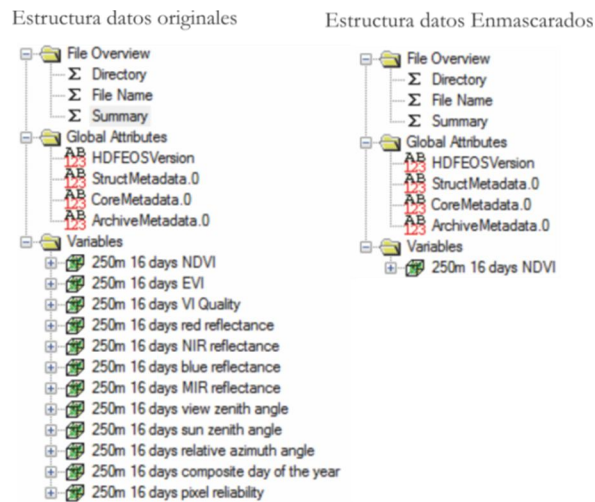


Figura 5 Visualización estructura de los datos antes y después ( *software IDL* )

En la Figura 6 se aprecia que los mapas presentan superficies de color blanco las cuales predominan al sur del área de análisis, estos espacios están asociados con valores de NDVI cercanos a cero, comportamiento que corresponde a franjas de nubes para las cuales los valores de reflectancia son similares en la porción del R y IRC. Luego, proceso que se representa en la Figura 6 (mascara de calidad de datos), se descartan los pixeles con características inferiores, presencia de nubes, sombras y alto contenido de aerosoles, para estas condiciones el dato de salida tiene asignado un marcador de -9999, los valores restantes, los útiles, presentan valores entre 0 y 10000.

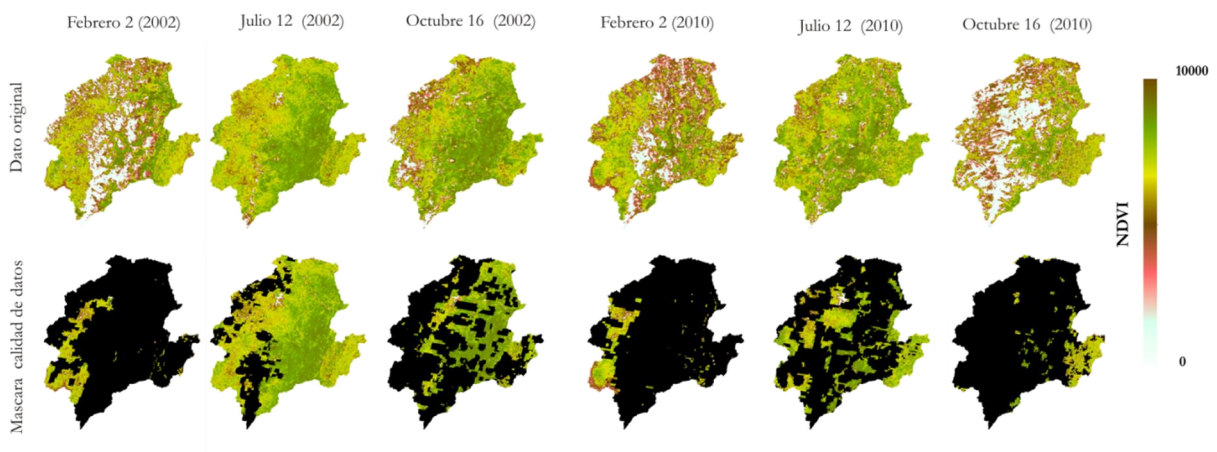


Figura 6 Comparación de imágenes MODIS-NDVI. A. imagen original B. imagen después de aplicar las máscaras de calidad.

### 3.2 Mascara por pendiente

la pendiente es empleada como una variable lógica (Martha *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010) cuya fin es representar las unidades geomorfológicas de primer orden y el ángulo de pendiente para los cuales, soportado en literatura, se asocia una alta susceptibilidad a

movimientos en masa. En la Figura 7 se observa como con el criterio de pendiente permite, en buena medida, delimitar los elementos morfológicos detallados por Arias, (1995) como estructuras básicas del relieve en la zona central del departamento de Antioquia. Superficies de erosión, escarpes regionales y frentes erosivos. Además de las superficies aluviales asociadas al río de La Magdalena y la Formación Honda (Hermelin, 2003). La importancia de recoger estas unidades radica en el nivel de susceptibilidad de algunas de estas formaciones a fenómenos denudativos, donde las de menor susceptibilidad se representan en la escena de salida, como bloques o superficies de color negro.

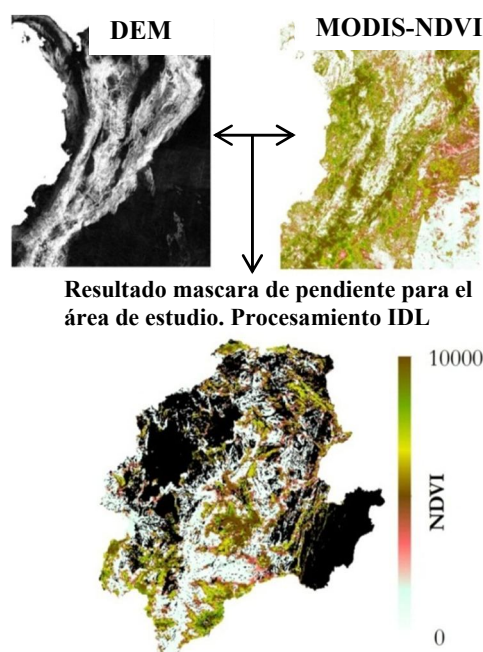


Figura 7 Mascara de pendiente

### 3.3 *Análisis de series de tiempo NDVI-MODIS*

Las series de tiempo recogen los valores para cada cobertura “*endmembers*” en esta se diferencian los datos filtrados y los no filtrados, también se presenta el cálculo de la media y la desviación estándar. Esta valoración cualitativa se basó en lo publicado por (Lunetta *et al.*, 2006). En la Figura 8 se observa en los datos de origen (línea negra) que para todas las superficies representadas existe un fuerte comportamiento en *diente de sierra* a lo largo de los trece años de registros, esta condición da algunas aproximaciones del ruido inherente al índice de vegetación (NDVI-MODIS), lo cual se evidencia en los gráficos filtrados por los índices de calidad (QA) (color rojo).

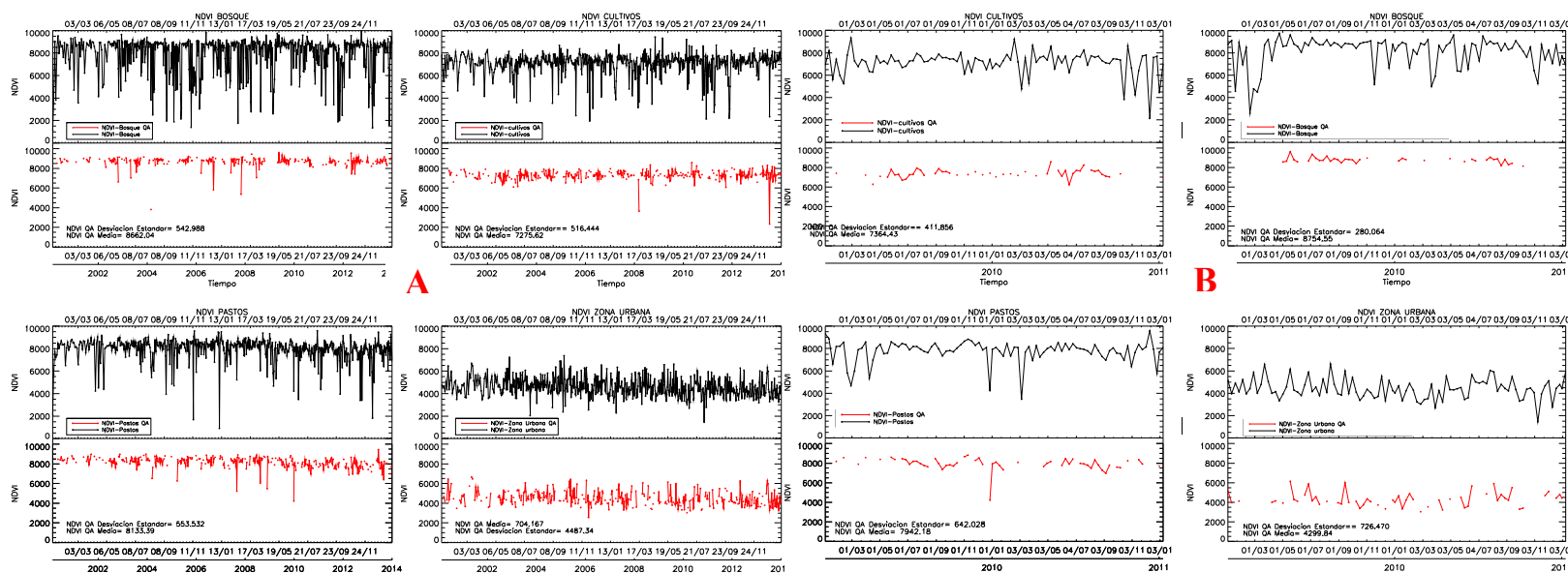


Figura 8 Series de tiempo para las coberturas de referencia. 2000-2013 (A) y 2010-2011(B)

Además se observa en la Figura 8 que en la totalidad de los datos con filtro de calidad (QA), persisten algunos bajones aislados, lo que coincide con lo planteado por (Xiao *et al.*, 2005) el filtro no es totalmente confiable para descartar el ruido en los datos. Por tal razón se aplica el criterio propuesto por este mismo autor. Descartar los Niveles digitales superiores a 2000 en la banda azul del sensor MODIS.

### 3.4 Cambio de cobertura Año 2010. Año de calibración

Para validar los pixeles identificados como movimiento en masa una de las mayores restricciones fue la fecha de captura de la escena, ya que en algunos casos no recogen el momento en el que ocurre el evento, por lo que se emplearon imágenes disponibles en *Google Earth* y registros del inventario de movimientos en masa, con estos insumos fue posible validar algunos procesos subsanando en esos casos dicha limitante (Figura 10). Debido a esta condición es posible que pixeles de cambio no fueran validados y por tal razón se etiquetaran como omisión al no observarse cambios en la superficie, ya que éstas pudieron ser posteriores a la captura de la imagen *Vexcel Ultracam D*.

Para el mosaico se realizó la combinación en falso color (432) lo que facilitó la identificación de deslizamientos al relacionarlo con variaciones en la cobertura terrestre y la exposición del suelo residual. También fueron útiles para validar bajones en la serie de tiempo MODIS-NDVI asociados con otro tipo de eventos, los cuales se definen como casos de comisión (Figura 10). Los más frecuentes son las superficies alteradas con tala y quema de ecosistemas boscosos e intervenciones antrópicas; cortes en la ladera con fines constructivos. Ambos casos, omisión y comisión, definen el nivel de fiabilidad del modelo.

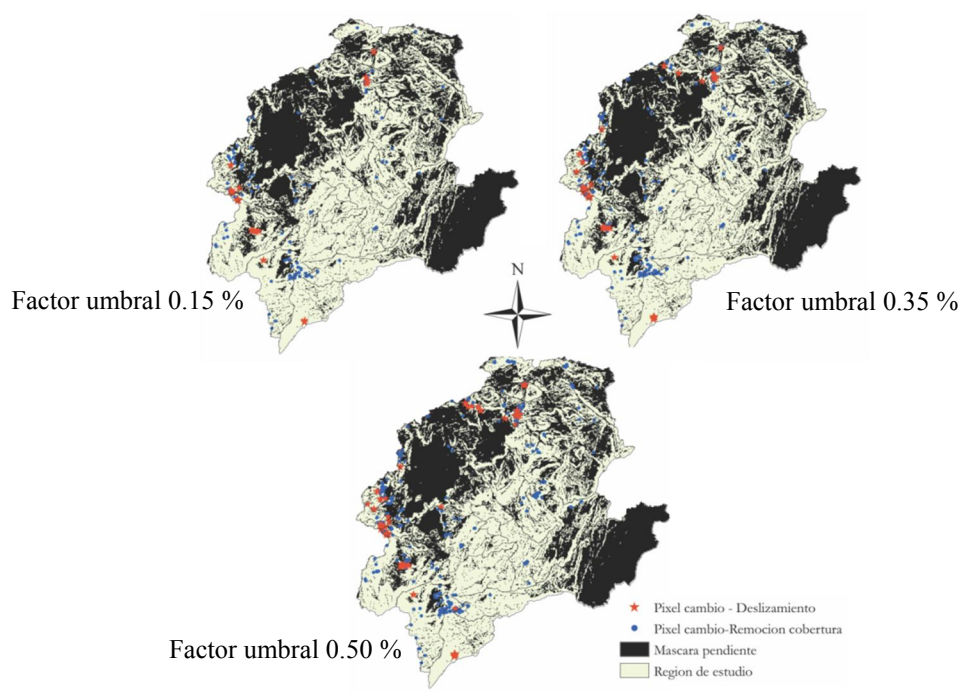


Figura 9 Candidatos a movimiento en masa en la región de estudio

Se realizó el conteo del número de píxeles que contenían dichas superficies, ya que en la mayoría de los casos son píxeles mezclados en los que incluso se recogen eventos de diversos orígenes, para estos casos primo la etiqueta de movimientos en masa. Los resultados del conteo se recogen en la Tabla 2. De igual forma se encontró un número elevado de píxeles etiquetado como error de clasificación, los cuales corresponden terrenos destinados a cultivos agrícolas. Por tal razón se aplica un filtro adicional para descartar dichos usos.

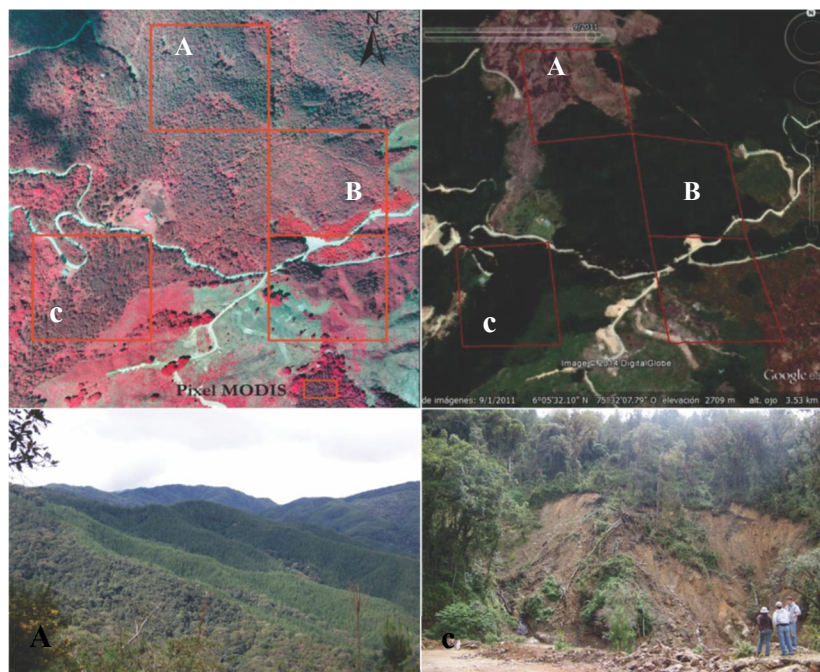


Figura 10. Condiciones detectadas como cambio de cobertura por el índice NDVI-MODIS. Cambios de cobertura identificados por el sensor MODIS y validados con imágenes de alta resolución y registros de campo, en la fila superior imágenes remotas (Derecha ortomosaico e izquierda imagen *google earth*) y la fila

inferior registros de campo. (A) Aprovechamiento y quema de una plantación forestal. B Cortes en la ladera para la conformación de una vía y viviendas (C) Movimiento en masa. Municipio de El Retiro, vereda Normandía (X: 846.758 Y: 1'160.034 magna sirgas).

Tabla 2 Pixeles detectados como movimiento en masa para cada factor umbral. Año 2010.

| Factor umbral | # pixeles de cambio | Movimiento en masa* | Error clasificación* | Sin validación* | Total Cambio* |
|---------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------|---------------|
| 0,50%         | 370                 | 52                  | 197                  | 121             | 249           |
| 0,35%         | 228                 | 34                  | 111                  | 83              | 145           |
| 0,15%         | 129                 | 19                  | 56                   | 54              | 75            |

De la Tabla 3 se tiene que, para cada factor umbral corresponde un número total de pixeles de cambio para los cuales se calcula, previo descuento de registros sin validación y omisión por agricultura, el porcentaje de fiabilidad global asociada. Para este ejercicio, el cálculo de la fiabilidad global no considera los elementos validados como acierto de no cambio (Tabla 3), debido a que el acuerdo de esta unidad en función del número total de pixeles y el número omitido para cada factor umbral supera el 98% , lo que aumentaría los resultados de fiabilidad global enmascarando los rendimientos para la unidad de interés, deslizamientos, en este caso la fiabilidad global se determinó para los pixeles clasificados como movimiento en masa y los clasificados de manera de incorrecta por comisión u omisión.

Los resultados muestran que la fiabilidad global (Tabla 3) varía en función de los valores de comisión, de donde el mejor rendimiento de fiabilidad 20,99%, se obtiene para el factor umbral de 0.35%. Sin embargo el comportamiento es opuesto para el número de deslizamientos validados, donde el mayor número de eventos 52, se asocia a un factor umbral del 0.5%. En este sentido es necesario emplear filtros lógicos adicionales puesto que ocurren procesos sobre el relieve que se confunden con movimientos en masa, lo que hace incierta la identificación y gestión, resultando niveles de comisión superiores al 75%. En síntesis para un factor umbral del 0.5% se obtendría el mayor número de registros con el menor nivel de omisión, 52 eventos y 23,53% respectivamente, sin embargo, para este caso se presenta los mayores niveles de comisión 79.12% aportando al inventario regional de movimientos en masa un número elevado de cambios que obedecen a otras dinámicas.

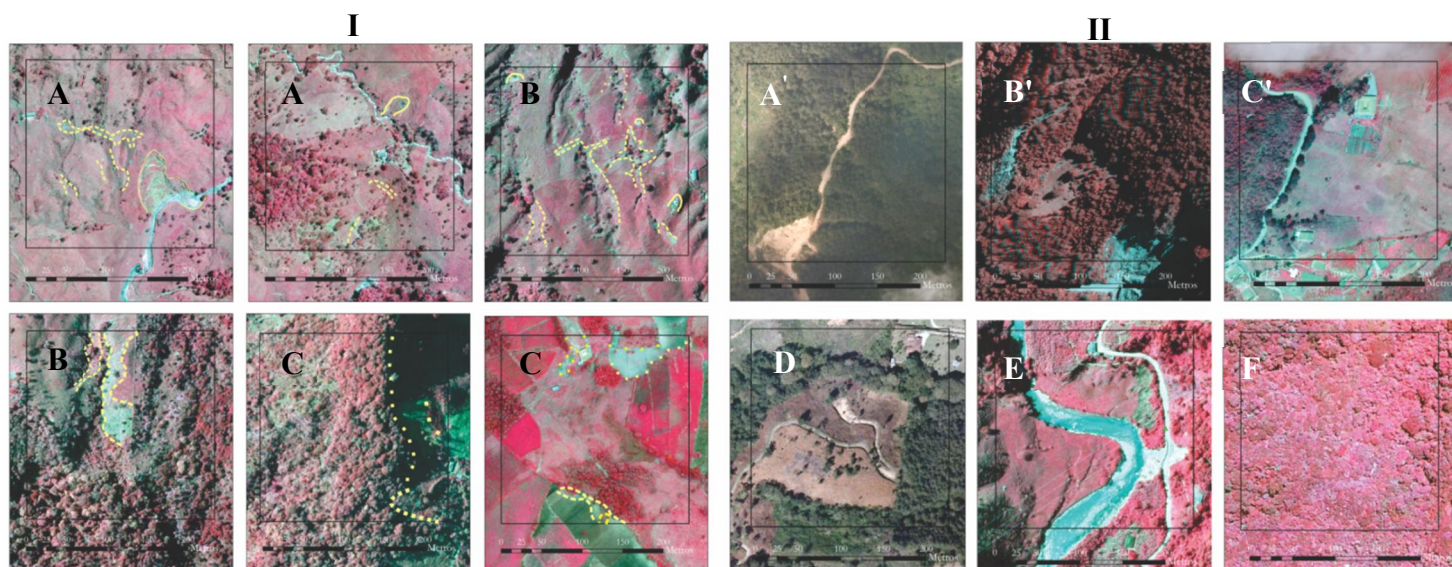


Figura 11 **(I)** Condiciones detectadas como cambio de cobertura por el índice NDVI-MODIS A Desprendimientos por socavación de canal y contraste por procesos erosivos concentrados a. B procesos erosivos. C. Saprolito expuesto en superficie por actividades agrícolas. **(II)** Cambio de cobertura y casos de omisión – comisión **A'** Movimiento en masa y apertura de vía en zona boscosa. Municipio de El Retiro ( $X_{\text{Centroide}}: 838.088$   $Y_{\text{Centroide}}: 1'158.778$  magna sirgas). **B'** Movimiento en masa sucesivo en zona boscosa. Municipio de Abejorral ( $X_{\text{Centroide}}: 851.561$   $Y_{\text{Centroide}}: 1'137.753$  magna sirgas) **C'** Pixel Mixto Pasturas-Bosque clasificado como comisión. Municipio de Guarne ( $X_{\text{Centroide}}: 844.009$   $Y_{\text{Centroide}}: 1'179.531$  magna sirgas). **D** Intervención antrópica para la construcción de vivienda, corte y apertura de vía. Municipio de El Retiro ( $X_{\text{Centroide}}: 840.572$   $Y_{\text{Centroide}}: 1'165.943$  magna sirgas). **E** Movimiento en masa omitido por el análisis NDVI-MODIS. Municipio de Granada ( $X_{\text{Centroide}}: 881241$   $Y_{\text{Centroide}}: 1'167.000$ ) **F** Cobertura boscosa clasificada como comisión. Municipio de San Francisco. ( $X_{\text{Centroide}}: 896.418$   $Y_{\text{Centroide}}: 1'138.861$  magna sirgas).

Tabla 3 Matriz de error para los factores umbrales de detección de movimientos en masa

|                 | Cambio 0.15% | No cambio 0.15% | Cambio 0.35% | No cambio 0.35% | Cambio 0.50% | No cambio 0.50% | Total                                                                                                                                                                 | Correcto | Comisión |
|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|
| Cambio 0.15%    | 19           | 56              |              |                 |              |                 | 75                                                                                                                                                                    | 25,33%   | 74,67%   |
| No cambio 0.15% | 19           | -               |              |                 |              |                 | 19                                                                                                                                                                    |          |          |
| Cambio 0.35%    |              |                 | 34           | 111             |              |                 | 145                                                                                                                                                                   | 23,45%   | 76,55%   |
| No cambio 0.35% |              |                 | 17           | -               |              |                 | 17                                                                                                                                                                    |          |          |
| Cambio 0.50%    |              |                 |              |                 | 52           | 197             | 249                                                                                                                                                                   | 20,88%   | 79,12%   |
| No cambio 0.50% |              |                 |              |                 | 16           | -               | 16                                                                                                                                                                    |          |          |
| Total           | 38           |                 | 51           |                 | 68           |                 | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">           FG (%)<br/>           0.50 19,62%<br/>           0.35 20,99%<br/>           0.15 20,21%         </div> |          |          |
| Correcto        | 50,00%       |                 | 66,67%       |                 | 76,47%       |                 |                                                                                                                                                                       |          |          |
| Omisión         | 50,00%       |                 | 33,33%       |                 | 23,53%       |                 |                                                                                                                                                                       |          |          |
|                 |              |                 |              |                 |              |                 |                                                                                                                                                                       |          |          |

FG= Fiabilidad global

Al considerar en detalle algunos de los valores de comisión (Ce), se encuentra que estos están asociados con modificaciones similares a movimientos en masa; fenómenos erosivos concentrados y cortes en la ladera. Si se determinan los resultados incluyendo este tipo de coberturas, se encuentra que en estos casos la mayor precisión corresponde a un factor umbral de 0.35% el cual se asocia un acierto de 67,59%, debido a un mejor balance entre los datos validados y los omitidos (Tabla 4).

Las condiciones descritas a lo largo de este capítulo motivaron la escogencia del factor de 0.35% como el umbral para los procesos posteriores. Para este corresponde un número de 6.9282 desviaciones estándar.

Tabla 4 Pixeles detectados como cambio de cobertura para cada factor umbral. Año 2010

| Factor umbral | # pixeles cambio | Validados* | Error de clasificación* | Sin validación* | Fiabilidad Cambio de cobertura* | Comisión |
|---------------|------------------|------------|-------------------------|-----------------|---------------------------------|----------|
| 0,50%         | 370              | 159        | 89                      | 121             | 63,86%                          | 36,14%   |
| 0,35%         | 228              | 98         | 47                      | 83              | 67,59%                          | 32,41%   |
| 0,15%         | 129              | 49         | 26                      | 54              | 65,33%                          | 34,67%   |

\*Pixel MODIS

### ***3.5 Cambio de cobertura para los 2003-2013 con series de tiempo NDVI-MODIS***

Los valores son calculados a partir del factor umbral de 0.35% al cual corresponde un número de 6.9282 desviaciones estándar, cifra que se desprende del análisis anterior. Así mismo para esta zona se empleó el mapa de coberturas 2007 disponible para la región CORNARE, la intención de su uso es descartar las zonas destinadas a cultivo limpio, a pesar de las diferencias temporales de este mapa y el periodo de análisis, la cobertura empleada como filtro es relativamente estable en el tiempo, dado que la mayor presencia de esta unidad se da en las veredas periféricas a las zonas pobladas donde la vocación presenta pocos cambios en el tiempo, dinámica favorecida por el desarrollo vial y la cercanía a centros de comercialización.

Tabla 5 Número de pixeles detectados como posibles movimientos en masa

| Año  | # de pixeles detectados | Año   | # de pixeles detectados |
|------|-------------------------|-------|-------------------------|
| 2003 | 295                     | 2009  | 116                     |
| 2004 | 233                     | 2010* | 228                     |
| 2005 | 195                     | 2011  | 213                     |
| 2006 | 115                     | 2012  | 138                     |
| 2007 | 146                     | 2013  | 212                     |
| 2008 | 399                     |       |                         |

\* Resultados obtenidos para el año de calibración.

Soportado en los resultados obtenidos para el año de calibración, generar inventarios de movimientos en masa a partir de los resultados para los años 2003-2013, podría ser incierto debido a los niveles de comisión 75% y fiabilidad global 20,99%, no obstante los registros NDVI-MODIS pueden ser útiles representando la alteración en el tiempo por remoción de la cobertura vegetal causado por diversos procesos. 67,59%. En este caso no se dispone de elementos para validar el número de resultados. Los totales son consolidados en la Tabla 5.

## **4. Discusión**

### ***4.1 Filtrado de datos***

Se observó para el filtro de calidad una marcada reducción de los píxeles que conforman la escena de salida, incluso aquellas porciones que en la (Figura 6, primera fila), no se inferían como nubes, pero que no se ajustaron a los criterios de calidad restantes. Aun así, al final del procesamiento se aportan datos útiles para el análisis. Las imágenes utilizadas como ejemplo la fecha de captura se relaciona con contrastes de alta nubosidad asociada con periodos de pluviosidad en la región de estudio, esto debido a la oscilación meridional de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) lo cual hace de éste el mecanismo físico de mayor importancia para explicar el ciclo anual de la precipitación, por ende la presencia de nubes sobre la región de estudio (Poveda, 2004). Para esta condición Colditz *et al.* (2006) menciona que la variabilidad temporal de los datos útiles es generalmente causada por influencias estacionales, como la cobertura de nubes o el alto contenido de aerosoles, además de influencias anexas a la calidad de los datos por variación en los ángulos de iluminación solar; anisotropía; todo lo anterior influye en la consistencia temporal de la serie de tiempo.

Para la región de estudio la variedad de interacciones suelo-atmosfera inducen climas locales y regionales de gran complejidad (Poveda *et al.*, 2006) estas circunstancias configuran la mayor limitante para análisis temporales a partir de imágenes satelitales, teniendo en cuenta que el principal detonante para la ocurrencia de movimientos en masa es la precipitación. Aun así el producto NDVI-MODIS ofrece ventajas que se desprenden de la alta resolución temporal, registros diarios, lo que puede reducir la cantidad de nubes al momento del registro, así mismo el disponer de información multitemporal consistente que

permita clasificar la cubierta vegetal, información limitada para Colombia (Sánchez-Cuervo *et al.*, 2012). Además de otras ventajas como la disponibilidad de datos de manera rápida y sin costo.

Los datos filtrados a partir de las consideraciones geomorfológicas planteadas por el profesor Arias, (1995), como las de mayor sensibilidad a procesos denudativos y valores de pendiente susceptibles a movimientos en masa son recogidas por el filtro, por lo tanto se puede decir que, el mapa de salida se ajusta a los criterios morfométricos y geomorfológicos planteados en la literatura, por lo que al recoger las superficies de alta susceptibilidad a estos procesos y descartar las demás, facilita el procesamiento de las escenas y la identificación de movimientos en masa.

#### ***4.2 series de tiempo NDVI-MODIS***

En el caso de la cobertura vegetal, los valores promedio son consistentes con el comportamiento fotosintético de cada cobertura, siendo ligeramente superior en bosque en comparación con pastos, esto puede ser debido a la saturación del NDVI (Huete *et al.*, 2002). En el caso de las construcciones los valores de NDVI son relativamente bajos (Figura 8, Construcciones A) debido a la alta cubierta de superficies no fotosintéticas, como tejados y calles. Así mismo las series no presentan variaciones debido a comportamiento fenológicos prolongados con actividad fotosintética contrastada (letargo o senescencia). Este comportamiento se valora para una serie de tiempo de menor escala, 2010- 2011 (Figura 8, B). La intención es definir un periodo climático en el que se recoja en totalidad una época de lluvias y una época seca y detectar variaciones en el NDVI asociados con comportamientos fenológicos. En este caso los valores presentan un comportamiento similar al descrito para la serie de 13 años, sin embargo en el caso de las coberturas boscosas la desviación estándar es la menor, 280.064, esta condición influye al momento de definir un valor umbral, ya que una menor desviación estándar, incrementa el contraste en los valores de NDVI asociado a un cambio de cobertura.

#### ***4.3 Cambio de cobertura para el año 2010***

Los altos niveles de comición pueden ser explicados por comportamientos espectrales por la exposición en superficie de horizontes subsuperficiales del suelo, los cuales se asemejan

a los presentados por un deslizamiento, por ejemplo las intervenciones antrópicas en el relieve; corte de taludes, modificación de drenaje, apertura de vías y llenos artificiales, los cuales casos aportan más del 50% de los datos detectados de manera inadecuada, falsos positivos (Tabla 3). Para estas alteraciones la respuesta espectral presenta una marcada reducción en la porción del infrarrojo cercano (Cheng et al., 2004; Rau et al., 2007) por ende en los valores de NDVI. Otro comportamiento que se clasifica como comisión pero con un comportamiento espectral equivalente, son los procesos erosivos concentrados, los cuales generan en el terreno la exposición del saprolito y se expresa con la formación de surcos o cárcavas (Hermelin, 1992). Adicional se detectan espacios afectados por incendios o deforestación que también pueden llevar a la exposición del saprolito en superficie. Para corregir esta condición puede ser de utilidad el empleo de información proveniente del sensor MODIS para identificar las zonas afectadas por incendios forestales (Anaya *et al.*, 2009).

Otros tipos de cobertura; pastos, bosques y arbustos, para los cuales no se apreció variación aparente. Esta dinámica se puede desprender de la reducción del valor umbral donde procesos fenológicos se consideren movimientos en masa. Este comportamiento es más sensible para coberturas boscosas al considerar la menor variabilidad del comportamiento espectral (Figura 8, NDVI bosques). Otra explicación se desprende del ruido que presentan los datos de origen (Figura 8). En este caso luego de aplicados los filtros de calidad permanecen bajones aislados. Para esta condición Tzitziki Janik *et al* (2011) reporta para zonas con fuerte presencia de nubes, la persistencia de valores bajos de NDVI por registros no removidos por el filtro de calidad, en este caso el elevado número por comisión en zonas de bosques y arbustos, corresponde a regiones donde persiste la alta nubosidad y niebla (CORNARE, 2009). Otra explicación son los cambios en la cobertura no recogidos debido a la fecha de los ortomosaicos empleados. En el caso de los pastos los valores de comisión pueden estar dados por condiciones de estrés o erosión, en estos casos la respuesta espectral es similar a la que presentan los suelos desnudos (Figura 11, B).

Los movimientos en masa detectados (Figura 9) se distribuyen en los frentes erosivos del cauca y magdalena y algunos escarpes, en especial en la margen occidental de la región de

estudio, la cual corresponde a las superficies erosivas del cauca cuyo avance posee una eficiencia geomorfológica alta, transformando el relieve colinado en un relieve montañoso de cañones profundos con alturas relativas del orden de 1.200-1.500 m con una red de valles en “V”, profundos y estrechos (Vélez Restrepo, 2006) cuya morfodinámica está definida por la intensidad de los procesos denudativos incluidos los movimientos en masa (Arias, 1996). Por lo anterior podría considerarse la ubicación y concentración espacial de los deslizamientos detectados como un resultado consistente.

Dada la resolución espacial del índice de vegetación NDVI-MODIS, 250 m, implica que para ser registrado como un pixel puro, el deslizamiento debe ser superior a seis hectáreas o de acuerdo a lo planteado por Lunetta *et al* (2006) debe ser superior a 1.5 hectáreas para pixeles mezclados. Sin embargo, algunos de los eventos detectados son inferiores a este valor, lo cual puede estar dado por particularidades que facilitan su identificación, como deslizamientos sucesivos o acompañados de otros fenómenos; ensanchamiento de canales por flujos torrenciales y procesos erosivos concentrados (Figura 11, A; B).

Adicional a lo ya mencionado y teniendo en cuenta los niveles inferiores al 50% de omisión, deslizamientos identificados además de los falsos positivos, se podría considerar estos resultados como un potencial de las series de tiempo del sensor MODIS, para detectar cambios en la superficie terrestre asociada a intervenciones que impliquen la remoción de la cobertura original, construcciones, minería, tala. Para el caso es necesario ajustar los umbrales de cambio y las variables lógicas de control, lo anterior coincide con lo planteado por Lunetta *et al* (2006). Un sistema de alerta por cambios en la cubierta vegetal.

#### ***4.2 Cambio de cobertura para los 2003-2013***

Al contrastar los resultados obtenidos contra imágenes de alta resolución espacial (Figura 12), se observa que los registros candidatos a movimientos en masa se ubican en zonas boscosas fragmentadas con predominio de una matriz de pastos. En términos cualitativos la concentración de estos pixeles podría ser coincidente con zonas marcadas por una dinámica de explotación de los recursos y abandonado de estas prácticas en los periodos (2000 - 2006) debido a dinámicas político-sociales en la región (CORNARE, 2009).

La concentración de registros en dichas zonas puede estar asociado con condiciones fenológicas, deforestación o el avance de la frontera agrícola, los últimos son reportados

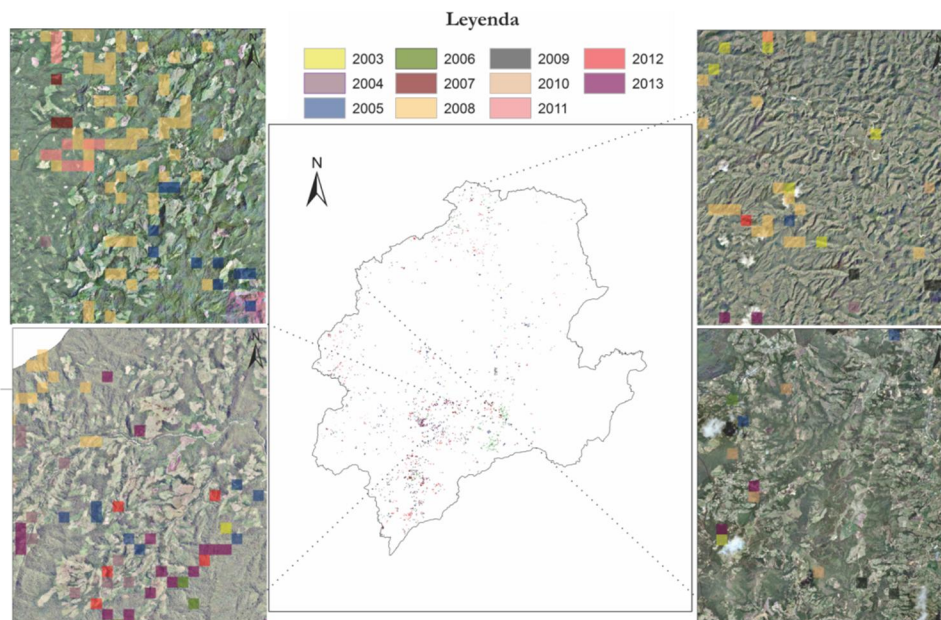


Figura 12 Distribución de la variación anual de la cubierta vegetal asociada con candidatos a movimientos en masa en la zona de estudio.

Las imágenes de fondo corresponde con ortomosaicos de alta resolución *Vexcel Ultracam* para el año 2010. La imagen central contiene los pixeles clasificados como candidatos a movimientos en masa para la región de estudio, como procesos severos en esta región (CORNARE, 2009). Además al considerar los resultados de fiabilidad global, un porcentaje cercano al 20,59% podría corresponder con procesos de remoción en masa.

## 5. Conclusiones

El desarrollo de aplicaciones con un alto grado de automatización es de utilidad en las estrategias regionales de gestión del riego por fenómenos geológicos a escala regional, lo que permite analizar parámetros intrínsecos a estos procesos. El método presenta limitaciones para la generación de bases de datos de movimientos en masas, ya que presenta una limitada precisión, fiabilidad del 20,99%, debido a la variabilidad de la superficie terrestre para periodos prolongados de tiempo. Sin embargo tiene potencial para variaciones temporales y espaciales (Procesos erosivos, tala, cortes, construcciones y movimientos en masa) representado en una fiabilidad global del 67,59%.

En el caso de movimientos en masa su mayor potencial puede estar dado en la detección y documentación de deslizamientos ocurridos en periodos de tiempo específico, como eventos sucesivos detonados por fenómenos naturales de gran energía, altas precipitaciones o sismos. En estos casos puede explorarse como un insumo primario para la caracterización de áreas afectadas a escala regional, esto dado la eficiencia en términos de disponibilidad de información, costos y procesamiento.

## 6. Bibliografía

- Anaya, J. a., Chuvieco, E., Palacios-Orueta, A., 2009. Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. *For. Ecol. Manage.* 257, 1237–1246. doi:10.1016/j.foreco.2008.11.016
- Arias, L., 1995. El relieve de la zona central de Antioquia: Un palimpsesto de eventos tectónicos y climáticos. ... Fac. Ing. Univ. Antioquia.
- Arias, L., 1996. Altiplanos y cañones en Antioquia: Una mirada genética. ... Fac. Ing. Univ. Antioquia.
- Colditz, R., Conrad, C., Wehrmann, T., Schmidt, M., Dech, S., 2006. Generation and Assessment of MODIS Time Series using Quality Information. *IEEE Int. Symp. Geosci. Remote Sens.* 779–782. doi:10.1109/IGARSS.2006.200
- CORNARE, 2009. PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL REGIONAL 2009-2034 [WWW Document]. PGAR. URL [http://www.cornare.gov.co/Visibilidad\\_y\\_transparencia/PGAR/PGAR\\_2009-2034.PDF](http://www.cornare.gov.co/Visibilidad_y_transparencia/PGAR/PGAR_2009-2034.PDF)
- CORNARE, 2012. Evaluación y zonificación de Riesgo y dimensionamiento de Procesos en los 26 municipios de la jurisdicción de CORNARE. Inédito.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z., 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Eng. Geol.* 102, 85–98. doi:10.1016/j.enggeo.2008.03.022
- Gallego, J.J., 2012. Análisis geomorfológico como apoyo a la búsqueda de actividad neotectónica en el Oriente Antioqueño (Oriente Cercano a la ciudad de Medellín). Análisis geomorfológico como apoyo a la búsqueda Act. neotectónica en el Oriente Antioqueño (Oriente Cercano a la Ciudad Medellín) Trab. fin carrera (en edición), Univ. Nac. Colomb. Medellín. Universidad Nacional de Colombia.
- Guzzetti, F., Cesare, A., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K., 2012. Earth-Science Reviews Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth Sci. Rev.* 112, 42–66. doi:10.1016/j.earscirev.2012.02.001
- Hermelin, M., 2003. El paisaje antioqueño: otra perspectiva. *Revista Universidad EAFIT*, número 130, pp. 19 – 29. Medellín, Abril – Junio de 2003.
- Hermelin, M., Hoyos, N., 2010. Convulsive Events, a Widespread Hazard in the Colombian Andes, First Edit. ed, NATURAL HAZARDS AND HUMAN-EXACERBATED DISASTERS IN LATIN AMERICA. Elsevier. doi:10.1016/S0928-2025(08)10007-4
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 83, 195–213.
- IDEA, 2005. Indicators of disaster risk and risk management: Program for Latin America and the Caribbean. Instituto de Estudios Ambientales, Main Techn. ed, Main Technical Report. Washington, DC.
- Iwahashi, J., Kamiya, I., Yamagishi, H., 2012. High-resolution DEMs in the study of rainfall- and earthquake-induced landslides: Use of a variable window size method in digital terrain analysis. *Geomorphology* 153-154, 29–38. doi:10.1016/j.geomorph.2012.02.002
- Lunetta, R.S., Knight, J.F., Ediriwickrema, J., Lyon, J.G., Worthy, L.D., 2006. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sens. Environ.* 105, 142–154. doi:10.1016/j.rse.2006.06.018
- Martha, T.R., Kerle, N., Jetten, V., van Westen, C.J., Kumar, K.V., 2010. Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection

- using object-oriented methods. *Geomorphology* 116, 24–36. doi:10.1016/j.geomorph.2009.10.004
- Marulanda, M., Cardona, O., Barbat, A., 2010. Revealing the socioeconomic impact of small disasters in Colombia using the DesInventar database. *Disasters* 34, 552–570. doi:10.1111/j.0361
- Metternicht, G., Hurni, L., Gogu, R., 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sens. Environ.* 98, 284–303. doi:10.1016/j.rse.2005.08.004
- Miliareisis, G., Sabatakakis, N., Koukis, G., 2005. Terrain Pattern Recognition and Spatial Decision Making for Regional Slope Stability Studies. *Nat. Resour. Res.* 14, 91–100. doi:10.1007/s11053-005-6951-3
- Peduzzi, P., 2010. Landslides and vegetation cover in the 2005 North Pakistan earthquake: a GIS and statistical quantitative approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10, 623–640. doi:10.5194/nhess-10-623-2010
- Poveda, G., 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*
- Poveda, G., Waylen, P.R., Pulwarty, R.S., 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 234, 3–27. doi:10.1016/j.palaeo.2005.10.031
- Rau, J., Chen, L., Liu, J., Wu, T., 2007. Dynamics Monitoring and Disaster Assessment for Watershed Management Using Time-Series Satellite Images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 45, 1641–1649.
- Rickli, C., Graf, F., 2009. Effects of forests on shallow landslides – case studies in Switzerland. *For. Snow Landsc. Res.* 33–44.
- Sánchez-Cuervo, A.M., Aide, T.M., Clark, M.L., Etter, A., 2012. Land cover change in Colombia: surprising forest recovery trends between 2001 and 2010. *PLoS One* 7, e43943. doi:10.1371/journal.pone.0043943
- Tzitziki Janik, G.M., Mas, J.-F., Hinkley, E.A., 2011. Una revisión del uso de MODIS para el mapeo y monitoreo de las cubiertas terrestres, in: Mas, J.-F. (Ed.), *Aplicaciones Del Sensor MODIS Para El Monitoreo Del Territorio*. México, D.F, p. 318.
- Vélez Restrepo, M., 2006. Caracterización de facetas en un sector del cañón del río Buey mediante MDE. Universidad Nacional de Colombia.
- Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D., Frohling, S., Li, C., Salas, W., Moore, B., 2005. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sens. Environ.* 95, 480–492. doi:10.1016/j.rse.2004.12.009
- Yang, W., Wang, M., Shi, P., 2013. Using MODIS NDVI Time Series to Identify Geographic Patterns of Landslides in Vegetated Regions. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 10, 707–710. doi:10.1109/LGRS.2012.2219576
- Zhang, W., Lin, J., Peng, J., Lu, Q., 2010. Estimating Wenchuan Earthquake induced landslides based on remote sensing. *Int. J. Remote Sens.* 31, 3495–3508. doi:10.1080/01431161003727630