

Uso de la teledetección para el estudio de la vegetación de sabana

Ramón Alberto Serna-Isaza*

Resumen.~ Las sabanas naturales constituyen uno de los biomas característicos del cordón intertropical mundial de baja altitud y ocupan una gran extensión de la superficie terrestre. La teledetección permite abordar de manera sintética múltiples aspectos de estos ecosistemas. En el presente documento se revisan algunas técnicas de teledetección utilizadas para la cartografía de la vegetación de sabana a diferentes niveles de estudio, desde una perspectiva de zonas biogeográficas hasta un enfoque de comunidad y población vegetal, pasando por aspectos relacionados con las formaciones, fenología y dinámica de las comunidades vegetales. Finalmente se presentan trabajos realizados para las sabanas de los Llanos Orientales de Colombia. **Palabras clave:** biogeografía, formaciones vegetales, vegetación de sabana, teledetección.

* Biólogo. Especialista Sistemas de Información Geográfica. Alumno del Programa de Estudios Maestría Geografía del Convenio UPTC-IGAC.

Introducción

El término **sabana** define una gran variedad de tipos de vegetación que van desde una cubierta de gramíneas pura hasta un denso matorral, con la presencia de una capa más o menos continua de gramíneas debajo o entre los árboles como denominador común (Susach, 1989). Los ecosistemas de sabanas tropicales se caracterizan por presentar un clima isotérmico cálido, con dos estaciones marcadas (clima de sabana, A_w en el sistema climático de Köeppen), son exclusivos del trópico bajo, presentan recurrencia del fuego y pobreza de nutrientes como factores ecológicos.

Constituyen uno de los grandes biomas característicos del cordón intertropical, ocupando cerca de 10 millones de km^2 de la superficie terrestre (3 millones de km^2 en América del Sur y Centroamérica). En América se extienden desde México y Cuba en el norte, hasta Bolivia y Paraguay en el sur, pero alcanzan mayor superficie e importancia nacional como fuente de recursos económicos y como unidad natural en Colombia, Venezuela y Brasil (Hernández et al., 1994).

Las sabanas, ecosistemas con bajo potencial productivo y alta biodiversidad (Serna-Isaza et al., 1996), son utilizadas en ganadería extensiva principalmente. Debido al impacto ocasionado por diferentes formas de manejo (sobrepastoreo, quemadas, etc.), para su aprovechamiento sostenible es necesario adquirir conocimientos en cuanto a la distribución espa-

cial, dinámica de la vegetación y potencial forrajero de las comunidades vegetales, entre otros aspectos relevantes y cuya cartografía puede ser abordada gracias a la teledetección que constituye una herramienta de estudio de los paisajes vegetales, las formaciones y las comunidades vegetales (Girard & Girard, 1989).

En este documento se presentan algunas técnicas de teledetección empleadas para el estudio de la vegetación, la evaluación de las quemadas, la biomasa, la fenología, el uso y la cobertura de ecosistemas de sabana, información que es abordada a diferentes niveles: Zona biogeográfica, formación, sucesión, comunidad y población vegetal. En la parte final se revisan algunos trabajos realizados para los Llanos Orientales de Colombia.

1. Estudio de zonas biogeográficas y de formaciones vegetales de sabana

1.1 Estudio de zonas biogeográficas

Teniendo en cuenta las dimensiones de estas zonas, el estudio se hace principalmente a escala continental. Con la llegada de los satélites NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) de los Estados Unidos, con los cuales se obtienen imágenes de un tamaño de pixel de 1×1 km, o de 4×4 km, es posible realizar este tipo de estudios de escala bastante pequeña, disminuyendo el número de imágenes empleadas. Por otra parte, al utilizar imágenes

de mayor resolución espacial, p.e. LANDSAT, para cubrir un continente como Africa, eran necesarias 1100 escenas de 185x185 km (Girard & Girard, 1989).

Existen varios satélites NOAA que toman imágenes cada 12 horas de un mismo sitio de la tierra (una vez con luz del día), con un campo de visión utilizable de 3000x3000 km. La resolución es de 1x1 km en el visible y de 17x17 km en el infrarrojo, aunque los productos pueden proveer datos con una resolución de 1.1, 4, 15 y 25 km. El sensor utilizado es el AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*). Estos satélites adquieren datos digitales de emisividad y reflectividad de la superficie de la tierra en el rojo visible (0.580 a 0.680 μm), el infrarrojo cercano (0.725 a 1.10 μm), medio (3.55 a 3.93 μm) y termal (10.3 a 11.3 y 11.5 a 12.5 μm) (Stone et al., 1994). Realizan 14.1 órbitas por día (cada una con una duración de 102 minutos), con trayectorias orbitales que aunque no se repiten, se asimilan a nodos ecuatoriales cada 8 días (Montoya, 1997). Esta baja resolución espacial y espectral permite manejar un menor volumen de datos, al tiempo que su mayor resolución temporal ofrece ventajas para análisis globales de la cobertura frente a otros sensores (p.e. de los programas de satélites LANDSAT y SPOT) (Brown et al., 1993).

Entre las bandas más ampliamente utilizadas están la 1 (C_1) y la 2 (C_2). El mayor valor obtenido en el curso de una semana para cada uno de los índices C_2/C_1

(Índice Normalizado de Vegetación) y C_2-C_1/C_2+C_1 (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) (siendo C_1 y C_2 las bandas para el infrarrojo y rojo respectivamente, Chuvieco 1995) es retenido para caracterizar cada malla de la grilla de los datos AVHRR. Luego, el mayor valor de cada uno de estos índices, para un periodo de 3 semanas, es retenido para calificar cada malla. Así se descartan las peores condiciones de irradiancia debido a nubosidad o aerosoles en suspensión en la atmósfera (Girard & Girard, 1989).

Con estas metodologías se ha realizado el mapeo de cobertura terrestre a escala pequeña (Sylvander et al., 1988; Millington et al., 1992). Se han utilizado datos NOAA/AVHRR del Índice Global de Vegetación (GVI, resolución 15-25 km), para monitorear la cobertura terrestre mundial, mediante una clasificación no supervisada (Murai et al., 1991; Tateishi & Kajiwara, 1991) o mapear la cobertura terrestre de diferentes biomas basado en datos NOAA/AVHRR LAC (Cobertura Local de Área, resolución de 1.1 km) (Nelson & Horning, 1993; Stone et al., 1994). También se ha utilizado el análisis multitemporal de las series de Fourier para lograr una clasificación de la cobertura terrestre (Andres et al., 1994).

Para investigar el cambio de la cobertura terrestre global, es necesario utilizar datos complementarios de múltiples fuentes, incluyendo datos de elevación y región ecológica, para marcar y refinar las clases de cobertura terrestre en donde se presentan diferentes tipos de cobertu-

ra para una única firma espectro-temporal (Brown et al., 1993).

En otros trabajos se cuestiona la confiabilidad del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*), ya que es influenciado por cambios climáticos de corta duración; en su lugar se usan datos de Cobertura de Área Global (GAC) de AVHRR de 8 a 9 años, con los cuales se logra una clasificación de la cobertura vegetal usando datos promedios multianuales para el NDVI y la Temperatura Superficial (Ts) y la relación NDVI/Ts, relación que es menos influenciada por variaciones interanuales de las condiciones climáticas (Mather, 1992; Ehrlich & Lambin, 1996; Malingreau et. al., 1996).

Otra aplicación ampliamente difundida de los datos AVHRR en ecosistemas de sabana es la evaluación de la distribución espacial de las quemas de vegetación de sabana (Frederiksen et al., 1990; Riggan et al., 1993; Pereira & Setzer, 1996) y la emisión de gases de las mismas (Kaufman et al., 1992) y sus implicaciones en el cambio climático y la ecología de ecosistemas terrestres (Levine, 1991; Lindsay, 1992); aunque la mejor discriminación de cenizas y áreas quemadas se logra con datos de alta resolución espacial como p.e. LANDSAT MSS o TM (Riggan et al., 1993).

1.2 Estudio de formaciones vegetales

Teniendo en cuenta la resolución, los datos de LANDSAT MSS están bien adaptados a este tipo de estudios (Girard & Girard, 1989).

En la estación seca, la vegetación está en gran medida desecada, y en el infrarrojo próximo, la reflectancia del suelo desnudo es frecuentemente superior a la de la vegetación, contrario a lo que se observa en zonas templadas. Es posible poner en evidencia formaciones vegetales con una composición en color realizada a partir de 3 canales MSS, pero utilizando una combinación diferente a la utilizada comúnmente para obtener una composición coloreada de tipo color infrarrojo. Bajo esta composición coloreada las sabanas arbustivas más o menos densas, no pueden ser distinguidas entre ellas y son codificadas en rojo confundiendo con la quema reciente de la maleza que se codifica también en rojo. Las sabanas arboladas más densas y aún un poco clorofílicas aparecen en amarillo verdoso, al igual que los bosques de galería que bordean los ríos. A continuación hay que extraer las quemas recientes de la maleza; una forma de realizarlo es seleccionar todos los píxeles para los cuales los valores de luminiscencia son los más débiles para los 3 canales (Girard & Girard, 1989).

El cálculo del Índice de Vegetación Normalizado, permite poner en evidencia las diferentes clases de vegetación, p.e. quemadas recientes de maleza, suelos desnudos, barbechos, sabanas herbáceas, sabanas arbustivas, sabanas arboladas y selvas de galería. Una clasificación realizada a partir de componentes principales daría las mismas unidades (Girard & Girard, 1989).

Por lo tanto, a partir de datos LANDSAT MSS, pueden distinguirse formaciones vegetales en función de la mayor o menor abundancia de estratos: herbáceo, arbustivo y arbóreo, con la condición que presenten estados fenológicos suficientemente diferenciados para exhibir diferentes comportamientos espectrales (Armand, 1986; Girard & Girard, 1989; Townshend & Justice, 1990).

Por el contrario, es difícil diferenciar entre las diversas sabanas arbustivas, ya que sus valores de luminiscencia son muy próximos y las diferencias estructurales que podrían diferenciarlos no son perceptibles, dada la resolución geométrica de los datos (Girard & Girard, 1989).

También se ha utilizado con buen éxito para discriminar formaciones de sabana, el satélite difusómetro de viento Seasat-A, el cual mediante técnicas de solapamiento de imágenes permite incrementar la resolución de estas (Hardin & Long, 1994).

1.3 Estudio de etapas y series de vegetación (fenología y dinámica de la vegetación)

La etapa de vegetación corresponde a una zona geográfica en la cual el clima condiciona la presencia de uno o varios grupos vegetales (definidos gracias a los arreglos de especies particulares y diferenciables) y de agrupaciones de la misma naturaleza pertenecientes a otra etapa. La serie de vegetación corresponde al arreglo de grupos vegetales que se suceden después de estar el terreno desnudo (o libre de agua) hasta alcanzar un estado de equilibrio (climático o no) en una sucesión progresiva o regresiva. Por lo tanto, estas unidades se ponen en correspondencia respectivamente con la región ecológica y el paisaje vegetal de una parte, y la formación y la comunidad vegetal de otra (Girard & Girard, 1989).

A una fecha dada, se puede diferenciar sobre un territorio bastante grande las etapas vegetales correspondientes por ejemplo a las diferentes fases fenológicas, y al interior de una serie, los estados de evolución presentes de fisionomías diferentes. Los datos LANDSAT MSS y TM son particularmente indicados para diferenciar y seguir la evolución de estas unidades (Girard & Girard, 1989).

El uso de datos NOAA/AVHRR también ha permitido evaluar la productividad de comunidades herbáceas (Baulies & Pons, 1995); así como discriminar fases

fenológicas, aspectos fisiológicos y fisionómicos de la vegetación, al emplear el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Justice et al., 1985; Gregoire, 1990; Lloyd, 1990; Gond et al., 1992), y clasificación supervisada o no supervisada (Jackson & Gaston, 1994), o la relación entre el NDVI y la salida de Radiación de Longitud de Onda Larga (OLR), especialmente en el cambio de una fase de reposo lag o una de crecimiento vegetativo (Shinoda, 1995). Así mismo se ha podido establecer, mediante el análisis de las series de tiempo, una correlación positiva entre el NDVI y la precipitación, como factores condicionantes de las fases fenológicas de los ecosistemas de sabana (Davenport & Nicholson, 1993; Fuller & Prince, 1996). Nuevamente se plantean las ventajas del uso de la relación multitemporal NDVI/Ts para la cartografía de la vegetación sometida a variaciones estacionales como las comunidades de sabana (Achard et al., 1989; Achard & Blasco, 1990; Mather, 1992; Ehrlich & Lambin, 1996; Malingreau et al., 1996).

La definición de etapas y series de vegetación se hace a partir de observaciones y registros en el campo. Los datos del MSS no pueden servir para ello. Una vez que se definan y describan las diferentes unidades, estas pueden ser reconocidas en las imágenes satelitales, y posteriormente ser cartografiadas y seguir la evolución de las mismas, como puede ser el establecimiento de cultivos, la regeneración vegetal, etc.

Los datos satelitales, colectados en fechas en las cuales la vegetación presenta diferentes estados fenológicos, son útiles en una fase preliminar de reconocimiento así como para la cartografía e inventario de series de vegetación. Por el contrario, no pueden reemplazar en ningún caso los datos y observaciones de campo necesarios en la fase de definición de las series.

2. Estudio de comunidades vegetales de sabana

Una comunidad vegetal puede definirse como un arreglo estructurado y definido de la vegetación, el cual ocupa un hábitat determinado, homogéneo en sus condiciones físicas y biológicas y con el cual interactúa.

Los objetos estudiados son de dimensiones más pequeñas que las zonas biogeográficas y las formaciones vegetales. Los sistemas de teledetección deben poseer una mejor resolución geométrica. De otra parte, las comunidades vegetales pertenecen frecuentemente a una misma formación vegetal y por lo tanto presentan fisonomías semejantes. Para distinguirlas es necesario disponer de información de las bandas espectrales más finas y de datos adquiridos en diferentes fechas.

La utilización de la teledetección para el estudio de las comunidades vegetales es posible solo cuando la mayoría de las especies presentes en la comunidad, y que

sirven para su descripción y clasificación fitosociológica, contribuyen con su comportamiento espectral a la caracterización radiométrica de la comunidad. Esta condición ocurre cuando se trata de comunidades con estratificación vertical simple y para las cuales el recubrimiento respecto al suelo es importante. Este es el caso particular de formaciones herbáceas y de matorrales: rastrojos, estepas, sabanas herbáceas densas, pastizales, praderas seminaturales, etc. (Girard & Girard, 1989; Choudury, 1993).

La metodología desarrollada para una región dada puede ser aplicada a otros casos, para comunidades vegetales herbáceas densas bajo diferentes tipos de climas (Girard & Girard, 1989).

2.1 Caracterización botánica y radiométrica de comunidades herbáceas de sabana

Esta caracterización se realiza a partir de observaciones y medidas radiométricas de campo y es indispensable antes de cualquier clasificación y cartografía, la cual se apoya principalmente en datos satelitales de teledetección.

Para comunidades de sabana, los levantamientos florísticos se realizan principalmente por el método del punto cuadrático (Boudet, 1991; Paladines, 1992) en estaciones ubicadas en posiciones topográficas diferentes y que corresponden a diferentes condiciones ecológicas. Estas estaciones deben ser suficientemente numerosas para representar los

principales tipos de sabanas permanentes existentes en el área.

Los levantamientos son luego tratados según el análisis factorial de correspondencia, el cual hace el reagrupamiento de los levantamientos en función de la presencia o ausencia de la totalidad de especies descritas (Boudet, 1991). Los grupos de levantamientos son luego asignados a alianzas, asociaciones, subasociaciones, según métodos fitosociológicos (Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974).

Las mediciones de reflectancia se realizan a baja altura sobre las parcelas de muestreo: 1.5 a 2 m, y en diferentes etapas fenológicas de la comunidad en cuestión, las cuales condicionarán las fechas de adquisición de los datos radiométricos (Mueksch, 1983; Benoit et al., 1988; Girard & Girard, 1989). Puede muestrearse en un amplio rango de longitudes de onda según el sensor que se vaya a utilizar (Girard & Girard, 1989), o las unidades de tierra se equipan con sensores para longitudes de onda específicas, como p.e. la medición de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) y el Flujo de Radiación en el Infrarrojo Cercano (NIR), para conocer el comportamiento espectral durante la estación de crecimiento (Begue et. al., 1996).

Se pueden analizar medidas espectrométricas y densidades ópticas de fotografías aéreas multizonales sintetizadas (escala 1:10.000), según diferencias en color, tono y estructura para calcular

la disponibilidad de biomasa en pastizales, detectar y delimitar áreas de interés específico e identificar especies vegetales (Ferrer et al., 1988). Se ha reportado para las bandas de infrarrojo cercano (IR), rojo (R) y la relación IR+R una correlación significativa e inversa con la biomasa seca y la densidad de clorofila respectivamente (Torres et al., 1991). Mediante el uso de negativos fotográficos se han compilado índices de vegetación, lo cual revela diferencias en la disponibilidad de las especies de comunidades de sabana (Torres et al., 1994). Para mapear la distribución de la fitomasa forrajera y las comunidades vegetales también se han utilizado fotografías aéreas pancromáticas e infrarrojas en falso color mediante la aplicación del programa SIG Terrasoft (Toure et al., 1994).

Los datos radiométricos son tratados numéricamente, fecha a fecha, utilizando el Análisis de Componentes Principales (ACP). Generalmente, la mejor información para la cartografía de la vegetación utilizando satélites LANDSAT TM y SPOT, se logra con bandas del visible y el IR próximo. Por ejemplo, un ACP realizado para datos adquiridos con 12 bandas espectrales repartidas de 500 a 1400 nm, puede mostrar que se puede trabajar solo con 4 bandas espectrales, centradas respectivamente bajo las longitudes de onda de 550, 675, 850 y 1400 nm. La longitud de onda de 1400 nm, empleada en el campo, no es utilizable para el registro satelital, debido a que la atmósfera terrestre, rica en agua, no permite pasar suficiente señal. Los canales 5 (1570-1780 nm) y 7 (2100-2350 nm) de TM, sensi-

bles al agua de la vegetación, deben aportar una información más o menos equivalente. Para caracterizar radiométricamente los grupos vegetales previamente definidos, debe calcularse el valor promedio de reflectancia, fecha a fecha, en cada una de las 4 longitudes de onda, a partir de los valores de reflectancia correspondiente medidos para las diferentes estaciones. Un ACP realizado con los valores de reflectancia de diversos grupos vegetales, en función de las fechas, permite representar los tipos de evolución fisiológica y fenológica según los dos primeros ejes, correspondientes a las 4 longitudes de onda retenidas en el visible y en el infrarrojo próximo (Girard & Girard, 1989).

Los comportamientos espectrales son diferentes para los diversos grupos de sabanas. Una vez definidas las clases radiométricas en el tiempo, para las cuales se conocen los valores de reflectancia a fechas determinadas, es posible asignarlas a tipos de sabanas.

2.2 Clasificación de comunidades vegetales

El interés agronómico de las especies de sabana es función de su naturaleza y su cobertura, ya que pueden constituir una parte más o menos importante del material de pastoreo. De otra parte, la cobertura de una especie refleja condiciones de clima, suelo y explotación de la comunidad vegetal.

Es por esto que se procede a una nueva clasificación de las comunidades herbá-

ceas en función de un número limitado de especies que presenten los mayores coeficientes de abundancia-dominancia en los levantamientos. Las unidades así definidas son denominadas unidades agroecológicas. Los datos radiométricos medidos en el terreno sirven para medir el comportamiento de las unidades agroecológicas (Girard & Girard, 1989).

El estudio de los valores de luminiscencia y reflectancia para diversas estaciones de pastizales, muestra que los valores medidos no son siempre los mismos para estaciones pertenecientes a una misma unidad agroecológica. Por el contrario, para determinar las variaciones en el tiempo, la evaluación se hace al interior de una unidad agroecológica (Girard, 1987b; Girard & Girard, 1989).

De esta manera, el comportamiento espectral servirá de base para una clasificación y una cartografía a escala mediana (p.e. 1:100.000), a partir de valores de luminiscencia suministrados por datos LANDSAT TM (Warmick-Smith, 1981; García & Álvarez, 1994), y SPOT principalmente (Girard & Girard, 1989; Girard & Rippstein, 1994; Rippstein & Girard, 1994), utilizando clasificación híbrida (supervisada / no supervisada) y definiendo la firma espectral para cada una de las unidades; proceso que, acoplado con fotografías aéreas e información de campo, permite una diferenciación muy precisa de los tipos de vegetación, (Ferrer et al., 1988; Torres et al., 1991, 1994; Brondizio et al., 1993; García & Álvarez, 1994).

2.2.1 Unidades Agro-ecológicas

Los datos LANDSAT TM u SPOT, ofrecen posibilidad de cartografía a escala mediana a grande (p.e. 1:100.000 - 1:25.000). Puesto que aquí el pixel es de grandes dimensiones, las unidades son poco detalladas y se pueden reagrupar en función del drenaje del suelo por ejemplo (Girard & Girard, 1989).

Aplicando el modelo de comportamiento espectral en el espacio de la imagen, se pueden definir diferentes unidades cartográficas. Para caracterizar estas unidades desde un punto de vista agronómico, es necesario realizar el estudio fitosociológico de base, 1º, según presencia-ausencia de especies, y, 2º, según la abundancia de un número menor de especies. Esto permite colocar una leyenda al mapa (Girard & Girard, 1989).

A dos escalas cartográficas, en algunas partes del mapa, las unidades pueden reunir varias unidades agroecológicas, que corresponden por lo tanto a un mosaico.

P.e. a escala 1:150.000, puede determinarse reagrupar las pasturas y los cultivos para asegurar una coherencia espacial de la unidad, ya que en ciertos casos, la resolución geométrica de LANDSAT no permite hacer una diferenciación confiable (Girard & Girard, 1989).

A escala 1:25.000, la resolución SPOT permite diferenciar sin ambigüedad los cultivos de las sabanas. El modo de explotación de las parcelas se puede detec-

tar por el satélite, para lo cual se hace reagrupación de algunas unidades agroecológicas diferentes con explotación semejante.

Esta mayor escala es ampliamente utilizada para evaluar los cambios en el uso de la tierra en ecosistemas de sabana (Jadhav et al., 1993; Lovett & Prins, 1994). Para ello, se aplican diferentes técnicas como el análisis digital de bandas incrementadas de imágenes LANDSAT TM, que permite discriminar suelo desnudo y pastizales en diferentes etapas según su uso (Movia & Navone, 1994) y el impacto que sobre la sabana ejerce la introducción de germoplasma exótico (Boutrais & Lortic, 1983). La teledetección también se ha utilizado para definir, según aspectos fisiográficos y edáficos, el uso óptimo de las unidades de tierra (Alcantara et al., 1989), información enriquecida en muchos casos con técnicas combinadas a diferentes niveles de datos (Mackel et al., 1989).

La evaluación de la sucesión vegetal de ecosistemas forestales, los cuales forman parte de las “matas de monte” en ecosistemas de sabana (*sensu lato*) y que son manejados principalmente por sistemas de tala y quema por grupos aborígenes, ha sido abordado mediante el análisis de imágenes LANDSAT TM multitemporales. Para ello, se han utilizado como parámetros indicativos de la etapa de sucesión, la reflectancia del infrarrojo cercano, el índice de diferencia, el verdor de Kauth-Thomas, el porcentaje de cobertura foliar e índices

espectrales del brillo del dosel (Mausel et al., 1993; Steininger, 1996).

2.2.2 Biomasa de la vegetación de sabana

El conocer la cantidad de materia seca, lo cual se establece a partir de medidas y observaciones de campo y el cálculo de la relación IR/R a partir de datos de luminiscencia de SPOT HRV, permite trazar un mapa en donde figure a escala 1:25.000, las unidades según la cantidad de materia seca. Dichos mapas son obtenidos muy rápidamente por el tratamiento de datos numéricos espaciales. Dan una evaluación casi instantánea del estado o potencial de un territorio (Grouzis & Methy, 1983; Girard, 1987a; Girard & Girard, 1989; Girard et al., 1990).

A escala pequeña se han utilizado datos AVHRR para estimar la biomasa de grandes áreas y por lo tanto la capacidad de carga animal de las pasturas (Harrington & Wylie, 1989).

3. Estructura de poblaciones en sabanas

La población de individuos de la misma especie puede ser estudiada mediante teledetección, siempre que estas poblaciones cubran superficies de dimensiones compatibles con la resolución geométrica de datos aéreos o espaciales (Girard & Girard, 1989). Aquí se aborda el estudio de poblaciones mono o pauciespecíficas, seminaturales, ya que las poblaciones naturales son generalmente muy pequeñas.

3.1 Identificación de especies

En clima templado o tropical, solo las plantaciones industriales y algunas masas forestales raras, cubren varias decenas o centenares de hectáreas, de dimensiones que permitan una identificación de datos satelitales a mediana o pequeña escala (LANDSAT MSS), p.e. las plantaciones de caucho (*Hevea* sp.) y los pastos introducidos en los Llanos Orientales del género *Brachiaria* principalmente).

Por lo tanto, solo es posible realizar identificación con fines de inventario utilizando datos multiespectrales de buena resolución geométrica (TM - SPOT) o fotografías a gran escala. La identificación a partir de datos multiespectrales se hace a partir de valores de luminiscencia. Para las fotografías aéreas se utiliza el criterio de la escala de grises o de color, así como criterios de forma, ligado con características morfológicas de los límites. La identificación de especies será más confiable al definir fases fenológicas, responsables de valores de luminiscencia y de fisonomías particulares. Por ello, para obtener una buena identificación es importante la escogencia de las fechas de toma de las imágenes. En pastizales permanentes, se pueden reconocer ciertas especies (o ciertos grupos de especies), en diferentes periodos del año en los cuales se presenten estados fenológicos particulares formados por poblaciones densas (Ferrer et al., 1988; Torres et al., 1991, 1994).

3.2 Estructura de poblaciones

Aunque este tipo de evaluación puede hacerse con fotografías aéreas, el número de fotografías es numeroso para cubrir un área grande, la duración del análisis es muy largo y los resultados son rápidamente obsoletos. Por ello se utilizan datos multiespectrales, que presentan diferentes ventajas según las resoluciones geométricas de los diferentes sistemas (Girard & Girard, 1989). Al utilizar información de satélites LANDSAT MSS, inclusive para poblaciones forestales monoespecíficas, el promedio de los valores de luminiscencia de muchas parcelas presentan una desviación elevada debido a la fuerte heterogeneidad de las parcelas, suponiendo la misma fecha. Esta heterogeneidad está ligada con diferentes fisonomías resultante de los tratamientos silvícolas. Debido a la baja resolución espacial, son poco importantes los estratos del sotobosque.

Para la cartografía forestal realizada con imágenes SPOT y LANDSAT TM (p.e. en plantaciones comerciales y “matas de monte”), la diferenciación no se puede hacer en los mismos términos que los anteriormente citados, ya que el pixel tiene dimensiones mucho más pequeñas. Los estratos arbustivos y herbáceos tienen mayor importancia, ya que su comportamiento espectral puede influir sobre los valores de luminiscencia. No se puede hablar propiamente de reconocimiento de especies, sino de una interpretación de especies en función de su comportamiento espectral estacionario.

Según el objetivo del estudio, es importante seleccionar los documentos de teledetección a utilizar. Para un estudio de estructura de poblaciones, es conveniente disponer de datos bastante sintéticos como los que aporta el LANDSAT MSS. Por el contrario, para una identificación bastante precisa, para poblaciones pluriespecíficas, utilizar datos de buena resolución geométrica. Son preferibles las fotografías aéreas a gran y mediana escala; los datos SPOT y LANDSAT TM corresponden a la mínima resolución necesaria (Girard & Girard, 1989).

4. Uso de la teledetección para el estudio de la vegetación de sabanas de los Llanos Orientales colombianos

Los trabajos iniciales del uso de la teledetección en los Llanos Orientales, se han centrado principalmente en aspectos fisiográficos, con poco énfasis en la discriminación de la cobertura vegetal (p.e. Forero, 1977-1978; Khobzi, 1981). Montoya (1977-1978), utiliza el procesamiento digital de imágenes LANDSAT MSS, mediante transformación de componentes principales de las cuatro bandas producidas por el barredor multiespectral, para definir grupos fisionómicos de vegetación según clases espectrales diferentes.

Con base en una primera zonificación general de unidades fisiográficas lograda por interpretación preliminar de imágenes LANDSAT (bandas 5 y 7, con esca-

la aproximada de 1:1'000.000) se realiza una caracterización de la vegetación de sabana. Para ello, se llevan a cabo inventarios de vegetación en algunas de las unidades fisiográficas, teniendo en cuenta las plantas dominantes y subdominantes. Las unidades mapeadas se ajustaron de acuerdo a la información del mapa geomorfológico; sin embargo, la parte del estudio se apoya en revisión bibliográfica para Colombia, Venezuela y Brasil (Salamanca, 1983).

Botero & Serrano (1992) confrontan la información extraída de diferentes tipos de imágenes, fotografías aéreas, radar y satélite (LANDSAT TM y SPOT) . Se utilizó una cartografía base 1:100.000 a la cual se le transfirió la interpretación temática. Concluyen que las composiciones a color de imágenes LANDSAT (escala 1:250.000 a 1:100.000) o SPOT (escala 1:100.000), o las fotografías aéreas pancromáticas (escala 1:60.000 a 1:10.000), infrarrojas (escala 1:80.000 a 1:10.000) o a color (escala 1:80.000 a 1:10.000), son buenas para discriminar los tipos de bosques, pastos, cultivos, así como las áreas taladas al interior de los bosques.

Para la altillanura de los Llanos Orientales, con la ayuda de datos SPOT HRV (escala 1:50.000), se ha realizado un inventario del uso de la tierra, el manejo y el estado fisiológico de la vegetación. Paralelamente, se tomaron datos de la reflectancia de la superficie terrestre con ayuda de un radiómetro CIMEL, en las mismas frecuencias que el sensor SPOT XS. Estos datos se utilizaron para definir

parcelas de verificación, que fueron posteriormente analizadas con base en las imágenes SPOT; la reflectancia a nivel de campo se utilizó para realizar una clasificación del uso de la tierra en categorías mayores y un inventario de la vegetación de sabana (Girard & Rippstein, 1994; Rippstein & Girard, 1994).

Dado que la zona está cubierta principalmente por vegetación natural (sabanas y bosques), con relieve bajo, cuya principal característica es la disección de los planos sedimentarios, causado por los patrones de drenaje, Botero et al. (1996) consideran fácil la mapificación de diferentes unidades, ya que se dispone de una cobertura total del área mediante teledetección (imágenes LANDSAT, especialmente TM; SPOT en algunas partes; Radar SLAR y fotografías aéreas, principalmente de áreas muestra).

5. Consideraciones finales

La revisión de la información presentada permite encontrar algunos puntos comunes para la cartografía de la vegetación de sabana según el nivel de evaluación con el cual se esté trabajando y que son resumidos en la tabla 1.

El uso de la teledetección para la cartografía de la vegetación de sabana, permite entre otros aspectos:

1. Localizar mejores puntos de observación sobre el terreno.

2. Extrapolar información obtenida sobre el terreno. Es un instrumento útil para cartografía de objetos cuyas dimensiones estén entre 10 a 10^6 m (y más).

3. Ayuda a seguir la evolución y cambio de comunidades, formaciones y paisajes vegetales, por seguimiento intra e interanual, con duración de varias decenas de años.

4. Constituye una valiosa herramienta para el ordenamiento, gestión y protección del medio ambiente, ya que permite resaltar relaciones entre el ecosistema y las formas de uso.

5. Los datos complementarios son indispensables para refinar las clases de cobertura cuando estas presentan una misma firma espectral.

6. La reflectancia espectral de sabanas es determinada por las especies más abundantes.

7. El cambio estacional en la reflectancia, permite diferenciar comunidades de sabana florísticamente diferentes.

8. En zonas florísticamente similares, la relación entre el infrarrojo cercano y el rojo, permite estimar la biomasa de la vegetación en rangos mayores, pero esta relación es influenciada por cambios climáticos, por lo cual es útil corregir dicha información (aplicación de un algoritmo de temperatura de la superficie terrestre p.e.).

| Naturaleza de los objetos | Fenómeno Evaluado | Dimensiones correspondientes (Orden de magnitud)* | Instrumento de percepción (Proceso)** |
|----------------------------------|---|--|--|
| Zona Biogeográfica | Bioma, cambio climático, emisión de gases, distribución de quemas | 10^6 a 5×10^6 m | NOAA/AVHRR (IGV, CAG, IVDN, CAL) |
| Formación | Formaciones vegetales, fenología | 10 a 10^4 m | LANDSAT MSS-TM (CC, IVDN, CP) |
| Sucesión | Sucesión vegetal | 10^{-1} a 10^4 m (Hasta 10^6 a nivel mundial) | LANDSAT TM, NOAA/AVHRR (IVDN, IGV, IVDN/SLR, IVDN/Ts) |
| Comunidad | Comunidades vegetales, biomasa de la comunidad, uso de la tierra | 10^{-1} a 10^3 m | Radiometría terrestre (CIMEL), LANDSAT TM, SPOT, fotografía aérea (múltiples procesos) |
| Población | Estructura poblacional | 10^{-3} a 10^2 m | Los mismos que para la comunidad |

* Modificado de Girard & Girard (1989)

** IGV = Índice global de vegetación
CAG = Cobertura de área global
IVDN = Índice de vegetación de diferencia normalizada
CAL = Cobertura de área local
CC = Composiciones en color
CP = Componentes principales
SLR = Salida de radiación de longitud de onda larga
TS = Temperatura de la superficie terrestre

Tabla 1. Características generales de algunos sensores y procesos utilizados para la cartografía de la vegetación de sabana.

Bibliografía

Achard, F. & F. Blasco. 1990. **Analysis of vegetation seasonal evolution and mapping of forest cover in West Africa with the use of NOAA AVHRR HRPT data.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 56(10):1359-1365.

_____. F. Lavenu, F. Blasco & A. Podaire. 1989. **Etude de la dynamique saisonnière des formations au contact forêt-savanne en Afrique de l'Ouest par télédétection.** Bulletin Société Française de Photogrammetrie et de Télédétection 114:37-39.

Alcántara P. B., G. L. Da Rocha, M. J. P. Junior & P. L. Donzelli. 1989. **Ecological zoning of Sao Paulo, Brazil for tropical forage plants.** Proceedings of the XVI Grasslands Congress, 4-11 October 1989, Nice, France. pp. 1367-1368.

Andrés L., W. A. Salas & D. Skole. 1994. **Fourier analysis of multi-temporal AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) data applied to a land cover classification.** Int. J. Remote Sensing 15(5):1115-1121.

Armand M. 1986. **Reconnaissance des formations végétales du secteur preforestier guineen à partir des images Landsat.** Bulletin Société Française de Photogrammetrie et de Télédétection 103:33-49.

Baulies X. & X. Pons. 1995. **Approach to forestry inventory and mapping by means of multi-spectral airborne data.** Int. J. Remote Sensing 16(1):61-80.

Begue A., J. L. Roujean, N.P. Hanan, S. D. Prince, M. Thawley, A. Huete & D. Tandre. 1996. **Shortwave radiation budget of Sahelian vegetation: 1. Techniques of measurements and results during HAPEX-Sahel.** Agricultural and Forest Meteorology 79(1-2):79-96.

Benoit M., C. M. Girard & E. de Vaubernier. 1988. **Comparaison du type de comportement spectral de prairies permanentes en Lorraine avec leur type d'utilisation.** Agronomie 8:265-272.

Botero P. & D. H. Serrano. 1992. **Estudio comparativo de Orinoquia-Amazonia (ORAM) Colombianas.** Revista CIAF 13(1):87-115

_____. B. Jiménez, J. M. Herrera, L. A. Castillo, N. Rodríguez, A. Duque & Y. Mendoza. 1996. **Inestabilidad de los paisajes en Orinoquia-Amazonia.** Trabajo presentado al VII Congreso Colombiano de Geología. II Seminario Sobre el Cuaternario. Agosto 1996. Santafé de Bogotá. 13 p. (Mimeografiado).

- Boudet G. 1991. **Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères**. Ministère de la Coopération et du Développement, Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux, ORSTOM, Paris. 266 p. (Collection Manuels et Précis de Élevage).
- Boutrais J. & B. Lortic. 1983. **Geographie par télédétection d'un complexe cerealier tropical (Nord Cameroun)**. Traitements photochimiques d'imagerie Landsat. Cahiers ORSTOM, Serie Sciences Humaines 19(2):141-166.
- Brondizio E. S., E. E. Morán, P. Mausel & Y. WU. 1993. **Dinamica na vegetação do baixo Amazonas: análise do uso da terra integrando imagens Landsat TM, levantamentos florístico e etnográfico**. Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Anais, Curitiba, Brasil. V.2, pp. 38-47.
- Brown J. F., T. R. Loveland, J. W. Merchant, B. C. Reed & D. O. Ohlen. 1993. **Using Multisource Data in Global Land-Cover Characterization: Concepts, Requirements, and Methods**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 59(6):977-987.
- Choudury B. J. 1993. **Reflectivities of selected land surfaces types at 19 and 37 GHz from SSM/I observations**. Remote Sensing of Environment (USA) 46(1):1-17.
- Chuvieco E. 1995. **Fundamentos de teledetección espacial**. 2a. ed., Rialp, Madrid, España. 453 p.
- Davenport M. L. & S. E. Nicholson. 1993. **On the relation between rainfall and the Normalized Difference Vegetation Index for diverse Vegetation types in East Africa**. Int. J. Remote Sensing 14(12):2369-2389.
- Ehrlich D. & E. F. Lambin. 1996. **Broad scale land-cover classification and interannual climatic variability**. Int. J. Remote Sensing 17(5):845-862.
- Ferrer E., V. Torres & E. San Martín. 1988. **Estudio preliminar sobre la aplicación de la teledetección en la identificación de los pastizales**. Revista Cubana de Ciencia Agrícola 22(3):219-224.
- Forero M. C. 1977-1978. **Patrones de dunas de los Llanos Orientales de Colombia sobre imágenes ERTS-MSS y fotografías aéreas**. Revista CIAF 4:71-82.
- Frederiksen P., S. Langaas & M. Mbaye. 1990. **NOAA-AVHRR and GIS-based monitoring of fire activity in Senegal: A provisional methodology and potential applications**. Ecological studies analysis and synthesis (USA) 84:400-417.
- Fuller D. O. & S. D. Prince. 1996. **Rainfall and foliar dynamics in tropical Southern Africa: Potential impacts of global climate change on savanna vegetation**. Climatic Change 33(1):69-96.
- García M. C. & R. Álvarez. 1994. **TM digital processing data of a tropical forest region in southeastern Mexico**. Int. J. Remote Sensing 15(8):1611-1632.
- Girard C. M. 1987a. **Caratérisation des prairies permanentes par leur physionomie saisonnière et leur comportement spectral: Application à l'évaluation de la biomasse**. Acta Oecologica - Oecologia Plantarum 8:345-356.
- _____. 1987b. **Spectral and botanical classification of grasslands: Auxois example**. Adv. Space Res. 7(11):67-70.

_____, M. Benoit, E. De Vaubernier & P. J. Curran. 1990. **SPOT HRV data to discriminate grassland quality**. *Int. J. Remote Sensing* 11:2253-2267.

_____ & G. Rippstein. 1994. **Utilisation de données SPOT HRV pour la cartographie de savanes et pâturages dans les Llanos de Colombie**. *Bull. S.F.P.T.* 133:11-19.

Girard M. C. & C. M. Girard. 1989. **Téledétection appliquée: Zones tempérées et intertropicales**. Masson, Paris. 260 p.

Gond V., J. Hubschmann & C. Meste. 1992. **Analyse par télédétection spatiale du rythme bioclimatique et du comportement phenologique de la végétation dans le Nordeste du Bresil**. *Secheresse (France)* 3(2):97-102.

Gregoire J. M. 1990. **Effects of the dry season on the vegetation canopy of some river basins of West Africa as deduced from NOAA-AVHRR data**. *Hydrological Sciences Journal* 35(3):323-338.

Grouzis M. & M. Methy. 1983. **Détermination radiométrique de la phytomasse herbacée en milieu Sahélien: Perspectives et limites**. *Acta Oecologica - Oecologia Plantarum* 4:241-257.

Hardin P. J. & D. G. Long. 1994. **Discriminating between tropical vegetation formations using reconstructed high-resolution Seasat-A scatterometer data**. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 60(12):1453-1462.

Harrington J. A. Jr. & B. K. Wylie. 1989. **Assessing annual changes in the Sahelian Vegetation of Niger**. *Papers and Proceedings of Applied Geography Conferences* 12:107-115.

Hernández J. I., G. Sarmiento, J. M. Renjifo, D. Samper, H. Sánchez & M. E. Romero. 1994. **Sabanas Naturales de Colombia**. Banco de Occidente, Cali, Colombia. 207 p.

Jackson P. L. & G. G. Gastón. 1994. **Digital enhancement as an aid to detecting patterns of vegetation stress using medium-scale aerial photography**. *Int. J. Remote Sensing* 15(5):1009-1018.

Jadhav R. N., M. M. Kimothi & A. K. Kandya. 1993. **Grassland mapping/monitoring of Banni, Kachhh (Gujarat) using remotely-sensed data**. *Int. J. Remote Sensing* 14(17):3093-3103.

Justice C. O., J. R. Townshend, B. N. Holben & C. J. Tucker. 1985. **Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data**. *Int. J. Remote Sensing* 6(8):1271-1318.

Kaufman Y. J., A. Setzer, D. Ward, D. Tanre, B. N. Holben, P. Menzel, M. C. Pereira & R. Rasmussen. 1992. **Biomass Burning Airborne and Spaceborne Experiment in the Amazonas (BASE-A)**. *J. Geogr. Res.* 97:14581-14599.

Khobzi J. 1981. **Los campos de dunas del norte de Colombia y de los Llanos del Orinoco (Colombia y Venezuela)**. *Revista CIAF (Colombia)* 6:257-292 (Memorias del primer seminario sobre el cuaternario en Colombia).

Levine J. S. 1991. **Global biomass burning: Atmospheric, climatic, and biospheric implications**. Chapman Conference, American Geophysical Union, Willtasmburg, Virginia, USA, 19-23 March 1990. 569 p.

- Lindesay J. A. 1992. **Biomass burning as a factor in atmospheric chemistry and terrestrial ecology.** South African Journal of Science 88(3):143-144.
- Lloyd D. 1990. **A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery.** Int. J. Remote Sensing 11(12):2269-2279.
- Lovett J. C. & E. Prins. 1994. **Estimation of land use changes on Kitulo Plateau, Tanzania, using satellite imagery.** Oryx (United Kingdom) 28(3):173-182.
- Mackel R., G. Menz & D. Walther. 1989. **Weidepotential und Landdegradierung in den Trockengebieten Kenias, dargestellt an Testflächen im Samburu Distrikt.** Erdkunde 43(4): 253-267.
- Malingreau J.P., D. Ehrlich & E.F. Lambin. 1996. **Are there detectable boundaries between African biomes?** Int. J. Remote Sensing 17(5):841-844.
- Mather P. M. 1992. **Terra-1: Understanding the terrestrial environment: The role of earth observations from space.** Taylor & Francis, London, U.K. 251 p.
- Mausel P., Y. WU, Y. H. LI, E. F. Morán & E. S. Brondizio. 1993. **Spectral identification of successional stages following deforestations in the Amazon.** Geocarto International (Hong Kong) 4:61-71.
- Millington A. C., P. J. Styles & R. W. Critchley. 1992. **Mapping forests and savannas in sub-Saharan Africa from advanced very high resolution radiometer (AVHRR) imagery.** In Furley P.A., J. Proctor & J.A. Ratter, eds. Nature and Dynamics of Forest-Savanna Boundaries. Chapman & Hall, London. pp. 35-62.
- Montoya A. 1977-1978. **Comparación de Interpretaciones Fisiográficas de Imágenes Landsat, Radar y Fotografías Aéreas para una Zona de los Llanos Orientales de Colombia.** Revista CIAF (Colombia) 4(1):83-89.
- _____. 1997. **Percepción remota y procesamiento digital de imágenes: Conceptos básicos.** Instituto Geográfico "Agustín Codazzi", Centro de Investigación en Percepción Remota, CIAF. 154 p. (Serie 1 - Docencia).
- Movía C. P. & S. M. Navone. 1994. **Imágenes LANDSAT TM: Una herramienta para evaluar el deterioro de los pastizales en La Puna, Argentina.** Investigación Agraria, Producción y Protección Vegetales (Argentina) 9(1):127-136.
- Mueksch M. C. 1983. **Determination of reflectances of tropical vegetation by combined methods of radiometry and photometry.** Institut National de la Recherche Agronomique, Paris (France); Centre National d'Etudes Spatiales, Paris. Colloque international: Signatures spectrales d'objets en télédétection, Bordeaux, INRA, 12-16 Septembre 1983. pp. 287-294.
- Mueller-Dombois D. & H. Ellenberg. 1974. **Aims and Methods of Vegetation Ecology.** John Wiley & Sons, New York. 547 p.
- Murai S., Y. Honda & A. Eiumnoh. 1991. **World forest watch using NOAA vegetation index.** International workshop on conservation and sustainable development, 22-26 April, 1991, AIT - Bangkok and Khao Yai National Park, Thailand. pp. 213-220.
- Nelson R. & N. Horning. 1993. **AVHRR-LAC estimates of forest area in Madagascar, 1990.** Int. J. Remote Sensing 14(8):1463-1475.

- Paladines O. 1992. **Metodología de Pastizales: Para trabajar en fincas y proyectos de desarrollo agropecuario**. Proyecto de Fomento Ganadero, MAG/GTZ, Quito, Ecuador. 219 p.
- Pereira A. C. & A. W. Setzer. 1996. **Comparison of fire detection in savannas using AVHRR's channel 3 and TM images**. *Int. J. Remote Sensing* 17(10):1925-1938.
- Riggan P. J., J. A. Brass & R. N. Lockwood. 1993. **Assesing fire emissions from tropical savanna and forests of central Brazil**. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (USA)* 59(6):1009-1015.
- Rippstein G. & C. M. Girard. 1994. **Utilización de datos radiométricos espacial y terrestre para el estudio e inventario de la vegetación de los Llanos Orientales de Colombia**. *Pasturas Tropicales (Colombia)* 16(2):9-17.
- Salamanca S. 1983. **La vegetación de la Orinoquia-Amazonia. Fisiografía y Formaciones Vegetales**. *Colombia Geográfica* 10(2):5-31.
- Serna-Isaza R. A., G. Rippstein, C. Grollier & E. Mesa. 1996. **Biodiversidad de la vegetación de sabana nativa en altillanura plana y serranía en los Llanos Orientales de Colombia**. Trabajo presentado en el Taller Regional "Agrociencia y Tecnología. Siglo XXI. Orinoquia Colombiana". Villavicencio, Meta, Colombia. Noviembre 13, 14 y 15 de 1996. 31 p.
- Shinoda M. 1995. **Seasonal phase lag between rainfall and vegetation activity in tropical Africa as revealed by NOAA satellite data**. *Int. J. Climatology* 15(6):639-656.
- Steininger M. K. 1996. **Tropical secondary forest regrowth in the Amazon: Age, area, and change estimation with Thematic Mapper data**. *Int. J. Remote Sensing* 17(1):9-27.
- Stone T. A., P. Schlesinger, R. A. Houghton & G. M. Goodwell. 1994. **A map of the vegetation of South America based on satellite imagery**. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 60(5): 541-551.
- Susach C. 1989. **Caracterización y clasificación de la vegetación de sabanas del sector oriental de los Llanos Centrales Venezolanos**. *Acta Biol. Venez.* 12(3-4):1-54.
- Sylvander R., M. Bystroem & P. Hoegberg. 1988. **The use of satellite imagery for delineation of vegetation types in eastern Tanzania** (incl. dry forests, Miombo woodland). Umeaa, Sweeden. 38 p.
- Tateishi R. & K. Kajiwara. 1991. **Land cover monitoring in Asia by NOAA GVI data**. *Geocarto International (Hong Kong)* 6(4):53-64.
- Torres V., E. Ferrer & E. San Martín. 1991. **Utilización de la teledetección en el estudio de los pastizales**. 1. Fotointerpretación y procesamiento óptico. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 25:1-6.
- _____, E. Ferrer & E. San Martín. 1994. **Utilización de la teledetección para el inventario de áreas con pasturas en Cuba**. *Pasturas Tropicales (Colombia)* 16(2):18-22.
- Toure A. S., M. M. Grandtner & P. Y. Hiernaux. 1994. **Relief, sols et vegetation d'une savane soudano-sahelienne du Mali Central**. *Phytocoenologia* 24:233-256.
- Townshend J. R. G. & J. C. Justice. 1990. **The spatial variation of vegetation changes at very coarse scales**. *Int. J. Remote Sensing* 11(1):149-157.
- Warmick-Smith, R. M. 1981. **The use of digitally processed Landsat imagery for vegetation mapping in Sulawesi, Indonesia**. *Remote Sensing Quarterly* 3(2):21-26.