

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Forestal

Informe de Práctica de Especialidad

Comprobación de técnicas de procesamiento de imágenes del sensor remoto ETM+ de Landsat 7, en la identificación de Bosques Secundarios en la Región Huetar Norte de Costa Rica

Luis Coronado Chacón

930879-6

Cartago, 2001

Comprobación de técnicas de procesamiento de imágenes del sensor remoto ETM+ de Landsat 7, en la identificación de Bosques Secundarios en la Región Huétar Norte de Costa Rica

Luis Coronado Chacón *

Resumen

Con la finalidad de poder identificar efectivamente aquellos sitios con cobertura forestal de bosque secundario, se procesó digitalmente la imagen del sensor remoto ETM+ del satélite Landsat 7 del 20 de enero del año 2000. Se efectuó la clasificación empleando cuatro aproximaciones diferentes. Clasificación no supervisada, por el método de *Isoclusters*; Clasificación supervisada, por los métodos de: máxima similitud con la adición de un canal de textura, correspondiente al coeficiente de variación de los píxeles dentro de ventanas de tamaños dados por 3 x 3, 5 x 5 y 7 x 7 píxeles, para la banda 5 (1.55 - 1.75, infrarojo medio); por el método de clasificación espacial empleando los algoritmos *Echo* y *Smag*; y por el método de componentes principales. Los métodos de clasificación espacial, basados en ECHO y SMAP, brindaron los mejores resultados y las más claras opciones de acierto para la categoría de bosque secundario. Los métodos basados en textura, carecen de la capacidad para mejorar la clasificación correcta de bosques secundarios. Además provocan un problema adicional asociado a la detección de bordes, debido al cambio entre regiones de píxeles semejantes. En general, los métodos de clasificación espectral, poseen una calidad visual considerablemente más baja que permite descartar sus resultados. Como consecuencia del buen resultado del clasificador SMAP, se planteó una metodología adicional que implica la transformación y alteración del contraste de las bandas originales a fin de mejorar la separabilidad radiométrica existente. De éste modo, fue posible lograr un incremento general en las tasas de acierto, de alrededor del 20%. Los resultados obtenidos se mantienen en condición preliminar debido a la incapacidad de verificación con puntos de control.

* Informe de Práctica de Especialidad. Escuela de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica, 2001.

Comprobación de técnicas de procesamiento de imágenes del sensor remoto ETM+ de Landsat 7, en la identificación de Bosques Secundarios en la Región Huetar Norte de Costa Rica

Informe presentado a la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar al título de Bachiller en Ingeniería Forestal

Miembros del Tribunal

Dr. Edgar Ortiz Malavasi
Profesor Guía

Dr. Julio Calvo Alvarado
Lector

Marvin Castillo Ugalde
Lector

Mama gracias por esperar

Beatriz gracias por
hacerme ver lo
que valgo

A los árboles, por ser
aquellos a quienes admirar

Agradecimientos

Habiendo finalizado con éxito la elaboración del presente documento, se hace necesario agradecer a las siguientes personas por su colaboración y disposición total:

Al profesor Edgar Ortiz Malavasi, por permitirme tener el honor de ser un estudiante más de práctica de especialidad bajo su dirección.

Al profesor Ruperto Quesada Monge, por su entera disposición a facilitarme el acceso a los sitios estudiados por el y sus estudiantes, a fin de la recolección de puntos de control.

Al personal docente y administrativo de la Escuela de Ingeniería Forestal, especialmente a Vilma Vargas por su constante y pujante interés por mi desarrollo profesional.

Al Ingeniero Wagner López por sus consejos siempre acertados y por ser una persona sencillamente admirable. Gracias compañero.

A mis queridos compañeros de carrera acuñados durante tantos años. Sería egoísta de mi parte señalar a unos cuantos. Gracias todos por unas inolvidables giras y por ese calor humano que sólo en forestal se siente.

Gracias a todos.

Índice General

	Página
Resumen.....	iii
Acreditación.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Índice General.....	vii
Índice de Cuadros.....	viii
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Anexos.....	xii
Introducción.....	1
Objetivos.....	3
Revisión Bibliográfica.....	4
Metodología.....	30
Resultados y Discusión.....	48
Conclusiones.....	76
Recomendaciones.....	78
Bibliografía.....	80
Anexos.....	83

Índice de Cuadros

Número	Título	Página
1	Descripción general de los sensores en los satélites Landsat para las misiones de 1 a 6	17
2	Descripción general del sensor ETM+ de Landsat 7	18
3	Resumen de características descriptivas de estructura del bosque, para cinco rodales distribuidos en la Zona Norte de Costa Rica	25
4	Coordenadas límite de las zonas de trabajo definidas	34
5	Categorías de cobertura del suelo establecidas para cada zona de trabajo	38
6	Combinaciones de color realizadas para la interpretación visual y trazado de áreas de entrenamiento	41
7	Resultados de clasificación de la imagen satelital, en función del índice kappa de la categoría bosque secundario y el clasificador general	50
8	Categorías de cobertura forestal definidas dentro de la máscara binaria para cada zona de trabajo	70
9	Resultados de clasificación de la imagen satelital, en función del índice kappa de las categorías dentro la máscara binaria, para cada zona de trabajo	71
10	Cuantificación aproximada del área correspondiente a cada categoría de cobertura, para las tres zonas de trabajo estudiadas	75

Índice de Figuras

Número	Título	Página
1	Espectro de la energía electromagnética descrito por la longitud de onda	6
2	Ejemplo de firmas espectrales de cuatro rasgos de la superficie terrestre	9
3	Secuencia en la variación de la estructura vertical para un bosque tropical, a través del tiempo	23
4	Efecto de la distribución irregular de las copas de los árboles en aspecto general de un bosque natural, en contraste a otros tipos de cobertura del suelo	24
5	Estructura vertical para bloque de bosque secundario de 10 años, en Boca Tapada de San Carlos, Costa Rica	26
6	Estructura vertical para bloque de bosque secundario de 21 años, en Finca Coope San Juan, Aguas Zarcas, Costa Rica	27
7	Estructura vertical para bloque de bosque secundario de 18 años, en Florencia de San Carlos, Costa Rica	28
8	Comparación del efecto de la resolución espacial de dos sensores remotos, sobre el nivel de detalle visible. Landsat TM 5 contra IKONOS.	29
9	Diagrama general de la configuración del sistema empleado. Windows y las aplicaciones, corren dentro del sistema LINUX, de modo simultáneo	31
10	Ubicación de las zonas de trabajo trazadas en la imagen seleccionada	34

Índice de Figuras (continuación)

Número	Título	Página
11	Procedimiento general de clasificación digital implementado. Tratamiento de imágenes para tres zonas de trabajo. Sensor ETM+, Landsat7. 2001	35
12	Arbol de categorías de cobertura del suelo para tres zonas de trabajo. Clasificación de imagen del sensor ETM+	36
13	Procedimiento específico de clasificación para la aplicación IDRISI 32	42
14	Procedimiento específico de clasificación para la aplicación MultiSpec	43
15	Procedimiento de conversión de formato de áreas de entrenamiento, de IDRISI a GRASS	44
16	Procedimiento específico de clasificación para la aplicación GRASS	45
17	Comparación de la calidad visual de la clasificación dada por dos métodos. Nótese la homogeneidad del procedimiento de la derecha	56
18	Firmas espectrales obtenidas para el procedimiento de clasificación con uso de textura. Zona de trabajo 1, textura de 5 x 5 pixeles	57
19	Secciones aumentadas de las imágenes temáticas que ilustran el efecto de borde incorporado por la variable de textura empleada	61
20	Comparación del efecto de la modificación del contraste en la apreciación de elementos superficiales registrados por el sensor	66

Índice de Figuras (continuación)

Número	Título	Página
21	Procedimiento alternativo de clasificación basado en el algoritmo SMAP de GRASS	68

Índice de Anexos

Número	Título	Página
1	Archivo de búsqueda digital de imágenes del sensor remoto ETM+ en el sistema EOS Data Gateway	84
2	Matrices de error e índices kappa para cada uno de los procedimientos implementados, según la metodología empleada	85
3	Imágenes temáticas resultantes. Mapa de cobertura del suelo para cada región de trabajo estudiada	85

Introducción

El resultado del proceso de deforestación de que han sido víctima los bosques nativos de Costa Rica, ha provocado un mosaíco de variados usos de la tierra. Núcleos de bosque primario se encuentran ahora fragmentados, reducidos y separados, rodeados de áreas dedicadas a plantaciones extensivas de cultivos como banano, cítricos, caña y en algunos casos plantaciones forestales, además de un panorama dominado por pastos para la ganadería extensiva. Estas son las características que describen muy acertadamente el paisaje de la Zona Norte de Costa Rica. Ubicado dentro de los límites de las provincias de Alajuela y Heredia, esta región inicio su colonización alrededor de la década de los 40. Fueron taladas y quemadas enormes extensiones de bosque virgen sin que fuera utilizada una mínima parte de sus recursos (Lehmann, 1992; Fournier, 1997). Numerosas actividades productivas y de subsistencia fueron las causales de una violenta expansión de la frontera agrícola en detrimento de la cobertura vegetal original. Por otro lado, aunque si bien es cierto, no fue el eje central de la deforestación de la región, la explotación masiva de madera se convirtió en los últimos 20 años en otra causa más de pérdida de bosque nativo (Pierce, 1992). En la década de 1980 se presentan las mayores tasas de aprovechamiento forestal tradicional, siendo la Zona Norte la región más afectada (Lehmann, 1992). Prácticas desordenadas, alta selectividad de especies, bajos rendimientos en los aserraderos tradicionales y elevado desperdicio al momento de la extracción, permitió degradar grandes extensiones de bosques de la zona. Como consecuencia directa de lo anterior, actualmente la Zona Norte enfrenta un deficit del recurso forestal por la excesiva fragmentación del bosque, una pérdida de variabilidad genética y el riesgo severo de extinción de ciertas especies vegetales y animales.

Incentivos financieros y fuertes influencias extranjeras sobre la economía nacional, han sido parte de los factores detrás de la destrucción irracional de los bosques en Costa Rica (Lehmann, 1992). De igual manera, la irregularidad en el mantenimiento de políticas de desarrollo económico y agrario, provocó el "abandono" de tierras, debido a la pérdida de su

rentabilidad. Por lo tanto, de modo paralelo con la explotación de las tierras de la región, todos aquellos sitios abandonados iniciaron un proceso de regeneración natural, muy dinámico y acelerado en un principio pero posiblemente en la actualidad más pasivo por la lejanía de las fuentes de semillas, la alteración del banco de semillas del suelo y patrones de dispersión de especies forestales (Jacobs, 1981). Muchas áreas escaparon nuevamente a la tala y quema y se han convertido en bosques secundarios. El mecanismo natural que permite esta recuperación se denomina sucesión secundaria y se define como una forma de regeneración del bosque, que aprovecha el potencial que tiene la naturaleza de restablecer en cada sitio las condiciones originales (Fournier, 1997). Estos bosques son un elemento más en el mosaico de uso del suelo de la Zona Norte.

La cantidad, extensión, edad aproximada, constitución florística y estructura de estos bosques ha significado una ardua labor en investigación y trabajo de campo, ya que dichos bosques son el recurso forestal de un futuro próximo. Identificar las zonas que poseen cobertura de bosques secundarios es posible empleando sensores remotos que permiten el inventariado de grandes extensiones de tierra, logrando minimizar los costos asociados a dicha actividad. Se han planteado y probado diferentes metodologías de procesamiento de imágenes de satélite para distinguir efectivamente el componente de bosque secundario en una región en particular. Los resultados han sido variables. Algunos autores señalan que aunque es posible distinguir el bosque secundario (Castillo, 1999), no es así posible distinguir las fases de desarrollo de este (Helmer, 1988). Puig (1996), dejó sin validez dicha aseveración al lograr determinar clases de edad de etapas sucesionales del bosque. En todo caso, se resalta la posibilidad de mejorar los métodos empleados y así lograr el objetivo buscado.

El presente trabajo busca poder desarrollar y probar diferentes técnicas para lograr distinguir efectivamente los bosques secundarios de otros tipos de cobertura del suelo a partir de imágenes del sensor remoto ETM+ del proyecto Landsat, para así realizar una cuantificación certera de éste creciente recurso forestal. Sin embargo, se evita tratar de

distinguir fases de desarrollo de dichos bloques de bosque, por las limitaciones de resolución espacial que impone las características del sensor remoto utilizado.

Objetivos

El presente trabajo posee la siguiente estructura de objetivos:

Objetivo General

- Desarrollar y probar diferentes técnicas para lograr distinguir efectivamente, a partir de imágenes del sensor remoto ETM+, del Landsat 7, los bosques secundarios de otros tipos de cobertura del suelo.
- Aplicar el método de clasificación supervisada de máxima similitud con las siguientes variantes:
 1. Empleando Textura: Ventanas de búsqueda de 3 x 3 pixeles, 5 x 5 pixeles y 7 x 7 pixeles; y aplicando como parámetro estadístico de prueba el coeficiente de variación.
 2. Sin Textura.
 3. Análisis de componentes principales (Cuatro bandas extra).
- Aplicar técnicas de clasificación no supervisada de imágenes de satélite (Isocluster, método iterativo).

Objetivos Específicos

- Identificar con base al procesamiento de imágenes de satélite Landsat 7 y su ETM+, los bosques secundarios de la Zona Norte.
- Realizar la cuantificación aproximada del área de cobertura de bosques secundarios en la región estudiada.

Revisión Bibliográfica

Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica

La percepción o teledetección remota como una ciencia y a la vez como todo un arte de obtener información sobre un objeto, área o fenómeno mediante el análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no se encuentra en contacto directo con el objeto, área o fenómeno bajo estudio. Los datos recopilados remotamente pueden corresponder a varias formas de energía, donde se incluye: variaciones de fuerza, ondas de sonido o bien energía electromagnética. Los sensores usualmente empleados en la actualidad son capaces de trabajar captando variaciones de energía electromagnética (Lillesand y Kiefer, 1999).

La radiación electromagnética posee propiedades fundamentales y se comporta de manera predecible de acuerdo con los principios de la física del electromagnetismo. Específicamente la radiación electromagnética consiste de un campo de energía que varía en magnitud en dirección perpendicular al sentido en que se desplaza la radiación y un campo magnético orientado en un ángulo recto al plano del campo de energía. Ambos campos se trasladan a la velocidad de la luz y varían de modo armónico y sinusoidal (CCRS, 1998; Lillesand y Kiefer, 1999). De esta manera, existen dos características de la energía electromagnética que son necesarias para entender la percepción remota: la frecuencia y la longitud de onda. La longitud de onda se refiere a la distancia entre dos picos de la onda sinusoidal y se expresa en unidades de distancia (m), y la frecuencia, a la cantidad de picos de onda pasando por un punto determinado del espacio por unidad de tiempo y se expresa en Hertz (Hz), que es equivalente a ciclos por segundo (CCRS, 1998). Estas dos variables están asociadas de la siguiente manera:

$$c = \lambda * v$$

donde, c: velocidad de la luz (3×10^8 m/s);

λ : longitud de onda (m);

v: frecuencia (ciclos por segundo, Hz).

Lo anterior describe una relación indirectamente proporcional entre la frecuencia y la longitud de onda, es decir, a mayor longitud de onda, menor la frecuencia y viceversa (CCRS, 1998). La unidad comúnmente empleada para categorizar energía electromagnética por medio de su longitud de onda, es el micrómetro (mm).

Se define al espectro electromagnético como la extensión de dicha energía en función de la longitud de onda. No existe una clara división de dicho espectro y cualquier partición del mismo responde a rangos nominales establecidos. Los nombres asignados a diferentes segmentos del espectro electromagnético han surgido como respuesta a los métodos de detectar las diferentes radiaciones de energía (Lillesand y Kiefer, 1999).

Es posible dividir el espectro electromagnético de tal manera de que se adapte a las necesidades del usuario. Se define un segmento *visible* del espectro, que se extiende desde 0.4 mm hasta 0.7 mm. El ojo humano es sensible en este rango del espectro. Dentro de este se establecen tres secciones, correspondientes a los colores primarios. El *azul*, desde 0.4 mm hasta 0.5 mm; el *verde*, desde 0.5 mm hasta 0.6 mm; y finalmente el *rojo*, desde 0.6 mm hasta 0.7 mm. Precediendo al rango del color *azul* (< 0.4 mm), se presenta la porción *ultravioleta*, *rayos X* y *rayos gamma*. Posterior al rango del color *rojo*, sigue la porción asignada al *infrarojo*. Este segmento también se divide en tres partes de la siguiente manera: *infrarojo cercano* de 0.7 mm hasta 1.3 mm; *infrarojo medio*, desde 1.3 mm hasta 3 mm; y finalmente el rango *termal*, desde 3 mm hasta 14 mm. A partir de longitudes de onda superiores a 1 mm hasta 1 metro, es considerada la porción de *microondas* del espectro (CCRS, 1998; Lillesand y Kiefer, 1999). En la figura 1, se muestra de manera gráfica el espectro de energía electromagnética en función de su longitud de onda y su frecuencia.

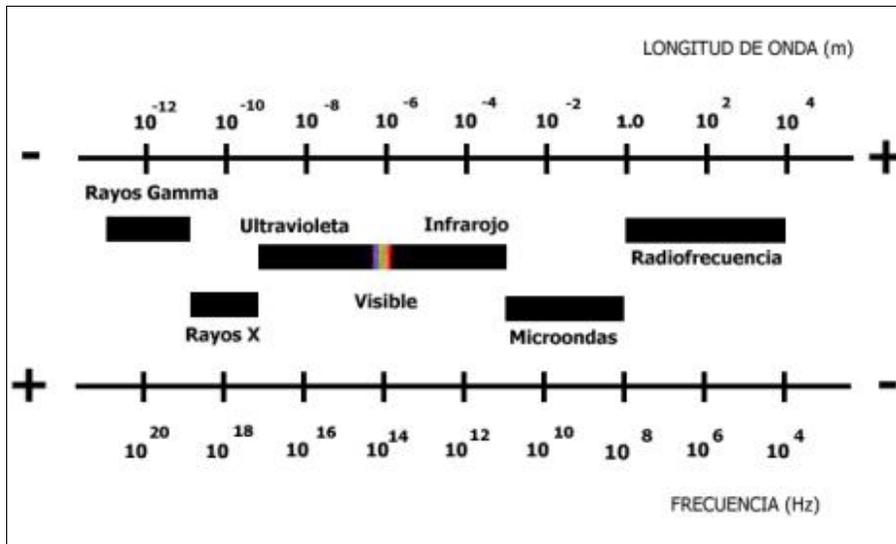


Figura 1. Espectro de la energía electromagnética descrito por la longitud de onda (Adaptado de CCRS, 1998).

Proceso de percepción remota y generación de información

Lillesand y Kiefer (1999), describen el proceso que se sigue para registrar datos provenientes de fenómenos remotos. Los autores, establecen dos fases elementales del proceso: *adquisición de datos* y *análisis de datos*. Los elementos que atañen a la primera fase son:

- Propagación de la energía a través de la atmósfera;
- Interacción de la energía con los rasgos de la superficie de la tierra;
- Retransmisión de la energía a través de la atmósfera;
- Nivel de ubicación de los sensores remotos (aéreo o espacial);
- Generación de datos del sensor en forma pictórica o digital.

De manera similar, para la segunda fase del proceso, los elementos constituyentes son:

- Examinar los datos producidos por medio de dispositivos de despliegue de imágenes o bien a través de análisis digital con computadoras. Dicho paso incluye la utilización de recursos de referencia, tales como mapas de suelos, mapas de topografía, mapas de zonas de vida, estadísticas de cosechas o bien registros de chequeo en el campo.

Como objetivo se busca generar información de primer orden acerca de los rasgos registrados remotamente.

- Cada paquete de información generado por los pasos anteriores, representa capas de datos a ser ingresados a un Sistema de Información Geográfica (SIG), con el fin de generar nueva y diversa información que será presentada a los usuarios para su aplicación en la solución de problemas reales.

Interacción de la energía con la atmósfera

Antes de que la radiación proveniente de la fuente primaria de energía, alcance la superficie de la tierra, debe de viajar un trayecto a través de la atmósfera. Partículas en suspensión y algunos de los gases presentes en la atmósfera pueden provocar cierto grado de distorsión en la energía radiada por la fuente. Los mecanismos básicos de interacción son:

- Dispersión: Ocurre cuando partículas en suspensión y moléculas de gases presentes interactúan y causan la redirección de la radiación electromagnética, modificando su camino inicial. La magnitud de la dispersión que ocurra, depende de factores como: longitud de onda, abundancia y concentración de partículas y gases en el medio, y la distancia que deba cruzar la radiación (CCRS, 1998; Lillesand y Kiefer, 1999).
- Absorción: En contraste con la dispersión, este mecanismo implica que moléculas de gases de la atmósfera absorben la radiación de diferentes longitudes de onda. Como ejemplos conocidos de este tipo de interacción de la atmósfera, están gases tales como el ozono y el dióxido de carbono. Debido a que este fenómeno ocurre de manera irregular a lo largo de todo el espectro, no todo el bloque inicial de energía pasa a través de la atmósfera. Esta situación determina lo que se denomina *ventanas atmosféricas*, que corresponden a los rangos de longitud de onda en los cuales la atmósfera es particularmente transmisible a la energía entrante (Lillesand y Kiefer, 1999). Estas ventanas determinan las características de sensibilidad espectral de la mayoría de los sensores remotos empleados en la actualidad.

La atmósfera juega un doble papel en el resultado final de las respuestas espectrales de cada objeto para cada condición. Los fenómenos de dispersión y absorción que ocurren al

momento del ingreso de la energía a la atmósfera también se presentan en ocasión de la salida de dicha energía (por la reflectancia). El resultado es que el sensor remoto capta una mezcla final compuesta de la radiación proveniente del objeto en el cual incidió directamente y también de aquella que haya sido dispersada inicialmente por la atmósfera. El efecto final de distorsión de la reflectancia de cada objeto es también función de la longitud de onda (Lillesand y Kiefer, 1999).

Interacción de la energía con la rasgos terrestres

La radiación entrante que logra escapar a los fenómenos de dispersión y absorción provocados por la atmósfera terrestre, interactúa con los objetos de la superficie de la tierra (CCRS, 1998; Lillesand y Kiefer, 1999). Existen tres diferentes formas de interacción que pueden presentarse al momento del contacto (energía incidente). Estas son:

- Absorción: ocurre cuando la energía es absorbida por el objeto;
- Reflexión: ocurre cuando la radiación rebota en el cuerpo y es redireccionada (la percepción remota está dirigida, en la mayoría de los casos, a registrar la magnitud de la reflectancia de objetos en la superficie terrestre). Cuando la superficie del objeto es fina y suave, la reflexión ocurrida se denomina *especular*, o tipo espejo, y cuando la superficie es irregular, se denominará reflexión *difusa* ;
- Transmisión: ocurre cuando la radiación simplemente atraviesa el objeto sobre el cual incide directamente.

La energía total incidente interactuará de una o varias maneras con los objetos en la superficie y la proporción en que esto ocurra será función de la longitud de onda, del material y condición del objeto. Si se grafica la relación existente entre la reflectancia espectral de un objeto contra la longitud de onda de la energía reflejada que es captada por el sensor remoto, se obtiene una *curva de reflectancia espectral* (o respuesta espectral del objeto).

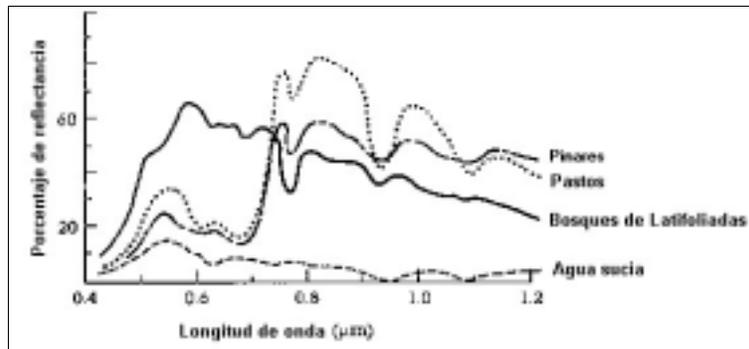


Figura 2. Ejemplo de firmas espectrales de cuatro rasgos de la superficie terrestre (Adaptado de: USGS Y GEOSDIS, 2000).

En la figura anterior, se muestra de manera ilustrativa los trazados espectrales de cuatro tipos de cobertura. Las curvas de respuesta espectral permiten poder distinguir tipos o clases de objetos presentes en la superficie terrestre (agua de vegetación, bosques de desiertos o bien tipos de cultivos, entre otros ejemplos posibles). Después de haber estudiado de manera continua las curvas de reflectancia para un objeto en particular, es posible distinguir lo que se denomina, *firma espectral*. Idealmente esta respuesta espectral debería ser constante para cada rasgo de la superficie, sin embargo se conoce que esta respuesta puede cambiar.

Tipos de Sensores Remotos

Se emplea comúnmente al Sol como la fuente de energía que genera una cadena de fenómenos de interacción con los rasgos terrestres estudiados y que finalmente producen sobre los sensores remotos, respuestas espectrales particulares que permiten su identificación. Sin embargo, no todos los sensores remotos emplean al Sol como su fuente energética inicial. Por eso se debe hacer diferencia entre sensores remotos pasivos y activos (CCRS, 1998). A continuación se describen las características generales de cada uno:

- Sensores Pasivos: son aquellos sensores que sólo pueden ser empleados en detectar energía cuando existe una fuente natural o externa (Sol). En la mayoría de los casos,

solamente es posible el funcionamiento de dichos sensores en el día. La actividad en la noche es mínima, y solo podría ser captada la energía emitida por los mismos objetos (siempre existente cuando se posee una temperatura por arriba del cero absoluto, -273°C);

- Sensores Activos: Estos dispositivos disponen de su propia fuente de energía la cual proyectan hacia los objetos de interés, a fin de obtener la respuesta espectral buscada. Estos presentan una ventaja sobre los sensores pasivos, ya que pueden obtener mediciones sin importar la hora del día o estación del año. Además son la opción para estudiar la respuesta espectral de objetos con respecto a longitudes de onda de menor energía incidente (*microondas*), e inclusive no se ven afectados por la presencia de nubes.

Adquisición de datos

La detección de energía electromagnética puede llevarse a cabo tanto de manera fotográfica como electrónica. En la primera opción, se emplea una superficie (papel o plástico impregnados) sensible a la luz, a fin de detectar variaciones de energía dentro de una escena. La detección electrónica implica la generación de señales eléctricas que corresponden a variaciones de energía en la escena original. Se asume como convención en la teledetección remota, que una fotografía es el resultado de un proceso fotográfico común. Para generalizar se emplea el término *imagen*, para expresar cualquier representación gráfica de datos (Lillesand y Kiefer, 1999). Aunque si bien es cierto, la interpretación visual de imágenes representa una herramienta bastante tratada para la extracción de información de sensores remotos, es posible que por su relativa simplicidad, deje de lado información inherente a cada rango del espectro captado. En ese caso se prefiere analizar de modo digital las imágenes obtenidas. Una imagen digital está compuesta por un arreglo de dos dimensiones de elementos gráficos o *pixeles* (del inglés *picture elements*). La intensidad de cada *pixel*, corresponde al promedio del brillo o reflectancia captada por el sensor sobre un área del suelo. Cada pixel tiene asociado un *número digital* (*DN*, del inglés *digital*

number), en el rango de 0 a 255, que son valores enteros positivos resultado de la cuantificación de la señal eléctrica original (Lillesand y Kiefer, 1999).

Dejando de lado el campo de sensores remotos en el ámbito aéreo (fotografías aéreas, radar, laser, etc.), al presente se conocen cerca de 36 diferentes sistemas de satélites en órbita con sensores remotos a bordo. Una variada combinación de características como tipo de sensor, altura, periodo, inclinación y tipo de órbita (sol sincrónica como un caso particular), definen la sensibilidad del sistema (Ortiz, 1999). Esta se define con base a cuatro variables:

- Resolución espacial: especifica cual es el área mínima sobre la superficie de la tierra para la cual el sensor es capaz de medir la energía reflejada o emitida. Esta resolución es la que permite poder separar e identificar un objeto de su entorno y se expresa en metros.
- Resolución radiométrica: Es la habilidad del sensor para definir pequeñas diferencias de energía.
- Resolución espectral: Es la capacidad del sensor para distinguir energía proveniente de diferentes longitudes de ondas.
- Resolución temporal: Es el lapso de tiempo necesario para que el satélite portador del sensor, cubra nuevamente una misma región de la superficie. Usualmente se expresa en días.

Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de imágenes implica la manipulación e interpretación de imágenes digitales registradas por sensores remotos, con la ayuda de computadoras (Lillesand y Kiefer, 1999). Este campo de la percepción remota es singularmente amplio, por lo que se presenta como una secuencia de operaciones asistidas por computadora. Estas son:

- Rectificación y restauración de imágenes: también denominado *preprocesamiento*, estas operaciones tienen como objetivo corregir imágenes distorsionadas y/o degradadas a fin de crear una representación más fiel de la imagen original. Típicamente implica realizar correcciones de distorsiones geográficas (georeferenciación), correcciones radiométricas y eliminación de ruidos.

- Mejora de imágenes: Estos procedimientos son aplicados a datos de una imagen con el objetivo de hacer más eficiente el despliegue o registro de datos para una subsecuente interpretación. Usualmente se aplican a capas separadas correspondiente a una banda o canal en especial. Se presentan tres técnicas de mejora de imágenes:
 - Manipulación de contraste;
 - Manipulación de rasgos espaciales;
 - Manipulación de multi-imágenes (o Transformación de imágenes según la CCRS, 1998): implica el proceso combinado de múltiples bandas de datos espectrales. Se aplican operaciones aritméticas sobre diferentes bandas del sensor, para combinar y transformar las capas de datos originales en nuevas imágenes que logren desplegar o destacar mejor ciertos rasgos de la escena.
- Clasificación digital de imágenes: El objetivo principal de estas operaciones es sustituir el análisis visual (clasificación) de imágenes, con técnicas cuantitativas para automatizar la identificación de rasgos en una escena. Normalmente esto implica el análisis de imágenes multiespectrales y la aplicación de reglas de índole estadístico para determinar la identidad de tipo de cobertura de cada pixel en una imagen. Es el proceso de distribuir los pixeles de una imagen en un número finito de clases o categorías de datos, basado en sus valores asociados. Para ser clasificados, cada uno de los pixeles debe satisfacer un criterio determinado. Este proceso también es conocido como segmentación de imágenes (ERDAS, 1997).

El reconocimiento de patrones se considera tanto una ciencia como un arte y consiste en encontrar patrones en los datos que se puedan extraer por medio de una clasificación. Mediante la adecuada mejora espacial y espectral de una imagen, la clasificación se puede realizar con la misma vista. Con el uso de computadoras, la distribución de los pixeles en las clases definidas se debe realizar a partir de criterios estadísticos y matemáticos (ERDAS, 1997). El modo de implementar estos criterios de clasificación para un sistema computadorizado se divide en dos pasos: entrenamiento y clasificación.

La sección anterior representa quizás unos de los pasos más importantes en el procesamiento de imágenes de satélite y se denomina también reconocimiento espectral de patrones. Los procedimientos comunes de clasificación son dos:

- Clasificación supervisada: En este caso, el analista identifica en la imagen muestras homogéneas de los diferentes tipos de cobertura de interés. Estas muestras se denominan *áreas de entrenamiento*. Estas se escogen de acuerdo a un proceso similar al de interpretación visual para lo cual se debe de tener cierto grado de conocimiento de los rasgos superficiales estudiados. La cantidad de clases definidas en este paso se denominan clases de información, es decir, aquellas categorías que el analista desea identificar (CCRS, 1998). Como el conjunto de datos implica varias capas de imágenes para cada banda del espectro captado por el sensor, entonces cada área permite establecer la respuesta espectral para cada cobertura. Por medio de varios algoritmos empleados, el computador asigna cada pixel en la imagen a la categoría que mejor describe sus características (CCRS, 1998).

Son ampliamente conocidos y empleados los siguientes: método de la mínima distancia, en el cual se calcula la distancia de un pixel a ser clasificado al punto medio de cada firma espectral previamente establecida, y el pixel se asigna al grupo para el cual la distancia sea mínima. Dicho criterio de clasificación no permite dejar ningún pixel sin categoría (Ortiz, 1999); método del paralelepípedo, con base a cada firma espectral determinada anteriormente, se calcula un valor máximo y mínimo de cada banda. La asignación de un pixel a cierta categoría depende si su valor (*DN*), está incluido dentro de los rangos de valores calculados para el tipo de cobertura. Si el valor de un pixel no se ajusta a ningún rango dado para todas las categorías de cobertura, entonces pueden quedar pixeles sin asignación de categorías (Ortiz, 1999). Además existe el riesgo de que los valores máximos y mínimos de dos o más categorías se traslapen lo que podría confundir la clasificación (Lillesand y Kiefer,

1999); método de máxima similitud: para cada firma espectral se establece una función de densidad para todos los píxeles incluidos en las áreas de entrenamiento. Esto permite calcular valores de probabilidad de pertenencia a una u otra categoría. Básicamente su funcionamiento consiste en crear zonas de isoprobabilidad alrededor de cada firma espectral y clasificar cada píxel dependiendo de su cercanía con estas. Variaciones de este método consisten en modificar el modo de determinar las funciones de probabilidad (gausiana o bayesiana) (Lillesand y Kiefer, 1999).

- Clasificación no supervisada: A diferencia del método anterior, este no requiere la entrada de áreas de entrenamiento que indiquen al computador las clases que se deben distinguir. Se limita en un principio a agrupar mediante un algoritmo llamado *cluster*, todos aquellos píxeles que poseen valores digitales similares para todas las bandas incluidas. Parte del hecho ideal de que debe existir suficiente distinción espectral entre clases y mucha similitud espectral dentro de una. Por esto es que denomina a dichas clases como de tipo *espectral*. Realizada la clasificación pertinente corresponde al analista hacer una asignación de categorías de cobertura del suelo a cada clase determinada por el método (Lillesand y Kiefer, 1999). Se incluye además del algoritmo de *cluster*, el método de *análisis de textura* (o rugosidad), como base para establecer los puntos de partida de cada cluster. Este análisis se define como:
 - Textura: Típicamente definida como la variación multidimensional observada en una ventana móvil al ser pasada sobre una imagen. El tamaño de la ventana está dado por la cantidad de píxeles que incluye (por ejemplo, 3 x 3 píxeles). Corresponde al analista definir un valor de "variabilidad", donde hacia abajo de este se considere una superficie *lisa*, y hacia arriba, una superficie *rugosa*. Una vez procesada la imagen con el análisis de textura, se procede a clasificar la imagen resultante, mediante un método de clasificación supervisada (mínima distancia o máxima similitud) (Lillesand y Kiefer, 1999). La textura de una imagen es una cuantificación de la variación espacial de los valores tonales de una imagen que están relacionados a los cambios en la distribución espacial de

la vegetación forestal, tanto de manera vertical como horizontal (Franklin, et_al, 2000).

Además de los métodos descritos anteriormente, se emplean también los métodos *híbridos*. Estos han sido desarrollados para mejorar la precisión final de procedimientos supervisados o no supervisados. Consisten en principio en aplicar de modo secuencial, algoritmos tanto de clasificación supervisada como de no supervisada, con el objetivo de obtener la máxima separabilidad posible

En el mercado existen varios sistemas de procesamiento de imágenes de sensores remotos (GRASS, IDRISI, ERDAS IMAGINE, PCI, MultiSpec), y cada uno tiene un modo particular de implementar y ejecutar los procedimientos de entrenamiento y clasificación. En el caso de ERDAS, tanto la fase de entrenamiento como de clasificación pueden ser supervisada como no supervisada. La ventaja asociada es que permite que las operaciones se ejecuten de modo repetitivo, es decir en bucles, lo que permite afinar considerablemente los resultados de la clasificación.

Evaluación de Calidad de la Clasificación

La valoración de la precisión se refiere a una comparación de una clasificación con respecto a datos geográficamente ciertos. Como métodos empleados se encuentran:

- Matriz de error: Este compara categoría por categoría los resultados de una clasificación supervisada y permite conocer el error de exclusión (pixeles no representados correspondientes a una clase) así como el error de inclusión (pixeles pertenecientes a una clase incluidos dentro de otra). Además brinda un estimado de la precisión general de la clasificación (Castillo, 1999). De esta tabla se obtiene, el error del usuario (por omisión), que es el error esperado al utilizar el producto final (un mapa) en el campo, y el error del productor o clasificador, que indica la exactitud alcanzada por el método de clasificación (Castillo, 1999).

- Índice Kappa (k): es un valor estadístico multivariado discreto que mide la diferencia entre los aciertos de los datos de referencia y el método de clasificación (Lillesand y Kiefer, 1999). Indica básicamente qué proporción de los píxeles clasificados correctamente son independientes del azar o por el contrario dependen por completo del azar (Castillo, 1999).

Para todo proceso de clasificación Lillesand y Kiefer (1999) insisten en la importancia de tener suficientemente claro las clases o categorías que se desea obtener. Destacan que existen diferencias entre los conceptos de uso del suelo y cobertura del suelo, y que por lo tanto no deben ser utilizados indistintamente. Dichos autores señalan las siguientes diferencias:

- Cobertura del suelo: Se refiere al tipo de carácter presente en la superficie de la tierra, por ejemplo: cultivos de café, maíz, arroz, plantaciones forestales, bosque natural primario, bosque natural secundario, pastos, agua.
- Uso del suelo: Se refiere a la actividad humana o función económica con que está asociada una parte de la superficie de la tierra, por ejemplo: zona residencial, zona urbana, zona industrial, zona agrícola, zona forestal.

Puig (1996), emplea en su trabajo en la región de Sarapiquí, una clasificación basada en el método de la USGS (United States of Geological Survey), explicado por Lillesand y Kiefer (1999). Este método supone la organización de las clases de coberturas de acuerdo a sus semejanzas. Además se establecen niveles de clasificación donde la profundidad en el detalle está dado en función de la resolución espacial del sensor remoto empleado.

Programa de Satélites LANDSAT

Este programa iniciado por la NASA en conjunto con el Departamento del Interior de los Estados Unidos de América, nació con la idea de poner en funcionamiento un sistema satelital denominado *Earth Resources Technology Satellites*, *ERTS*. El proyecto inició en el año 1967, y se tenía planificado colocar seis satélites en órbita. El primer lanzamiento fue

logrado el 23 de julio de 1972 y se mantuvo en funcionamiento hasta el año 1978. El sensor abordo, fue un sistema Nimbus de funciones meteorológicas, pero adaptado para los objetivos buscados con el proyecto. En el año 1975, la NASA renombra oficialmente el proyecto como *Landsat*. Hasta la fecha, se han lanzado con éxito seis satélites, nombrados secuencialmente de 1 al 7 (Landsat 6 sufrió de un desperfecto al momento del lanzamiento) (Lillesand y Kiefer, 1999). En el cuadro 1, se presenta un resumen de las características de los sensores remotos instalados en los primeros satélites del proyecto Landsat.

Cuadro 1. Descripción general de los sensores en los satélites Landsat para las misiones de 1 a 6.

Sensor	Misión	Sensibilidad (μm)	Resolución Espacial (m)
RBV	1, 2	0.475-0.575	80
		0.580-0.680	80
		0.690-0.830	80
	3	0.505-0.750	30
MSS	1-5	0.5-0.6	79/82 ^a
		0.6-0.7	79/82 ^a
		0.7-0.8	79/82 ^a
		0.8-1.1	79/82 ^a
	3	10.4-12.6 ^b	240
TM	4-5	0.45-0.52	30
		0.52-0.60	30
		0.63-0.69	30
		0.76-0.90	30
		1.55-1.75	30
		10.4-12.5	120
		2.08-2.35	30
ETM ^c	6	Mismas bandas del TM	30 (120 en banda termal)
		0.50-0.90 adicional	15

^a79 metros para Landsat 1-3 y 82 metros para Landsat 4-5.

^bFalló después del lanzamiento (banda 8 de Landsat 3)

^cLandsat 6 fallo en lanzamiento.

Fuente: Adaptado de Lillesand y Kiefer, 1999.

Proyecto Landsat 7 y sensor ETM+

El más reciente satélite enviado a la órbita terrestre por el proyecto Landsat, corresponde al Landsat 7. Este lleva a bordo el sensor ETM+ (por sus siglas en inglés de *Enhanced Thematic Mapper*). Fue lanzado el 15 de abril de 1999. El sensor posee la capacidad de registrar datos en 8 bandas espectrales. Entre otras mejoras con respecto al TM (Thematic

Mapper), de Landsat 4 y 5, corresponde a su canal pancromático con una resolución espacial de 15 metros. Las características de dicho sensor se resumen en el cuadro 2.

Cuadro 2. Descripción general del sensor ETM+ de Landsat 7.

BANDA	Sensibilidad (μm)	NOMBRE DE BANDA ESPECTRAL	RESOLUCION ESPACIAL (m)
1	0.45 - 0.52	azul	30
2	0.53 - 0.61	verde	30
3	0.63 - 0.69	rojo	30
4	0.78 - 0.90	infrarojo cercano (NIR)	30
5	1.55 - 1.75	infrarojo medio (VNIR)	30
6	10.4 - 12.5	termal (LWIR)	60
7	2.09 - 2.35	onda corta (SWIR)	30
8	0.52 - 0.90	pancromática	15

Fuente: Lillesand y Kiefer (1999) y TELSAT (2000).

Landsat 7 sigue una órbita descendente, sol sincrónica a 98 grados de inclinación con respecto al Ecuador y gira a una altura de 705 kilómetros. Cada escena captada por el sensor tiene un ancho de 183 kilómetros y un largo de 170 kilómetros (USGS, 2000). Su resolución temporal es de una imagen cada 16 días. Los productos finales se ofrecen al público interesado en tres niveles de procesamiento (USGS(1), 2000):

- Nivel 0 Reformateado (L0R)
- Nivel 1 Radiométricamente Corregido (L1R)
- Nivel 1 Geométricamente Corregido (L1G)

Dichos productos, a diferencia de otros provenientes de proyectos privados se adquieren a precios muy reducidos, que varían desde 475 dólares americanos para el nivel de procesamiento L0R, hasta 600 dólares americanos para los niveles de procesamiento L1R y L1G (USGS(2), 2000). Solamente regiones del mundo que se localicen dentro de los límites territoriales de los Estados Unidos de América, poseen prioridad de una imagen cada 16 días. De manera variable, los demás países o regiones del mundo reciben menos atención por parte del proyecto. Para el caso de Costa Rica, la frecuencia de adquisición de imágenes

ha variado dependiendo de la zona (ha sido más común obtener imágenes de la región central del país, que de la Península de Osa).

Aplicaciones de Teledetección remota: Antecedentes

Muy variadas han sido las aplicaciones que se le han dado a las imágenes brindadas por el proyecto Landsat. Entre otras, la determinación del uso y cobertura del suelo ha sido quizás la más común. Como casos particulares se puede citar el trabajo de Steven y Daus (1987), que realizó la cuantificación de bosques en Nigeria, empleando al sensor MSS (Multispectral Scanner). También, Li, Mausel y Wu (1994) empleando imágenes TM de Landsat 5, identificaron cobertura de bosques secundarios en la región de Altamira en Brazil, zona de intensiva explotación forestal en la selva amazónica. En dicho estudio, se emplearon además de las bandas dadas por el sensor remoto, varios canales correspondientes a índices de vegetación y a componentes principales. Se utilizó un método híbrido de clasificación de la imagen de satélite denominado *ECHO* (análisis de textura - máxima similitud). Los resultados de la aplicación de dicho método de trabajo arrojó una exactitud en la clasificación de 93 % a un 97%. Castillo (1999) y Puig (1996) estudiaron la región de Puerto Viejo de Sarapiquí, en Costa Rica, empleando imágenes TM de Landsat 5, con la finalidad de establecer la cobertura del suelo y también de distinguir fases sucesionales del bosque. Castillo (1999) logró obtener valores de exactitud entre 88.14% y 95.48%, empleando un método de clasificación supervisada con el algoritmo de máxima similitud. Puig (1996), obtuvo valores de exactitud variables entre 75% y 95%, dependiendo del nivel de categorización de los diferentes tipos de cobertura del suelo. Dentro de las posibilidades de aplicación de datos de Landsat y el sensor TM, Helmer (1988) determina la cobertura del suelo, pero en este caso, para zonas de altura en la Cordillera de Talamanca en Costa Rica.

Además se han empleado imágenes producidas por el proyecto SPOT de origen francés, en varias aplicaciones de mapeo de recursos. Entre otros se destaca el Inventario Forestal de la Región Huetar Norte de Costa Rica, elaborado por el proyecto COSEFORMA

(COSEFORMA, 1994), el cual permitió distinguir la cobertura del suelo para la zona. Las clases empleadas fueron más generales que en los casos anteriores, pero logra brindar un estimado de área para bosques intervenidos, bosques primarios, plantaciones forestales y bosques secundarios.

Bosques Secundarios: Generalidades

Son variadas las definiciones de *bosque secundario* que se obtienen al revisar la literatura especializada en el tema. Smith, et al (1997), adapta los conceptos de varios autores y extrae la siguiente:

"Vegetación leñosa de carácter sucesional que se desarrolla sobre tierras cuya vegetación original fue destruida por actividades humanas". Además continúa describiendo algunos aspectos de su posible composición: "El grado de recuperación dependerá mayormente de la duración e intensidad del uso anterior por cultivos agrícolas o pastos, así como de la proximidad de fuentes de semillas para recolonizar el área disturbada". La anterior definición contrasta con otras similares por el hecho de no considerar a los bosques secundarios como el resultado de un abandono de cierto uso del suelo anterior, y más bien le asigna un valor más alto al hecho de iniciar un proceso de recuperación. Pero de hecho, esta definición contrasta la expuesta por Jacobs (1981), que enmarca al bosque secundario dentro de la dinámica de un bosque natural, donde las alteraciones que se presentan son por la misma actividad de renovación del bosque. La palabra *chablis*, es el término empleado por Jacobs para nombrar el disturbio provocado, que permite la entrada de un bosque secundario al sistema.

Independientemente de las definiciones encontradas sobre el tema, es notorio el aumento generalizado de atención hacia este recurso. Quesada (2000), subraya que diez años atrás no se trataba ese tema como en la actualidad. Los cambios se han dado, inclusive desde el punto de vista del marco legal, donde se tipifica la figura del bosque secundario en la más reciente Ley Forestal. Budowski (2000), señala que son varios los factores que han

provocado el auge de los bosques secundarios como un recurso de importancia para la producción de madera. Entre otros el autor señala:

- Debido a que ya no existe ilimitada disponibilidad de los bosques primarios como productores de madera, ya sea por haber sido convertidos a otros usos o por ser restringidos;
- Por estar ubicados en zonas relativamente accesibles;
- Porque se ha dado un cambio en el gusto por maderas de especies de rápido crecimiento con menor densidad y propiedades diferentes a las especies tradicionalmente explotadas en bosques primarios.

Varias han sido las experiencias desarrolladas en el manejo del bosque secundario en Costa Rica, donde mediante la aplicación de tratamientos silviculturales, se ha demostrado que es una opción viable en la preparación de bosques secundarios de producción (Morales, 2000; Quirós, 2000; Chiari, 2000; Segura, 2000). Según Guillen et al (1998), citado por Morales (2000), existen alrededor de 400.000 ha de bosques secundarios en todo el país y para la región Huetar Norte, la estimación corresponde a un área de 15.000 ha. El patrón de distribución de estos bosques, es fragmentado y disperso, en unidades de bosques de área reducida, con aproximadamente 5 ha de tamaño por rodal. Con respecto a su origen, ocupan en la mayoría de los casos, sitios que fueron abandonados por la baja productividad natural o bien por cambios en las políticas agropecuarias. Resalta además el autor, que no existe un diagnóstico en el ámbito nacional de la localización geográfica y de las condiciones en que se encuentran los bosques secundarios. Respecto este último punto, son rescatables los trabajos en teledetección realizados por Puig (1996), Helmer (1988) y Castillo (1999), para diferentes zonas del país. COSEFORMA (1994), realizó una estimación de la cobertura forestal de la Zona Norte de Costa Rica y determinó el área de bosques secundarios para la región en 17.924 ha. Señala además, que el potencial de estos bosques se basa en su riqueza de especies maderables comerciales a parte de un crecimiento anual apreciable. Redondo, Vilchez y Chazdon (2000), reportan niveles de crecimientos que verifican otras mediciones

similares para la zona norte, lo que implica cierto nivel de estandarización en datos reportados.

El recurso forestal existente dentro de un bosque secundario posee un elevado potencial de utilización. Redondo (1998), como resultado de evaluar la situación de varios bloques de bosques secundarios en la región de Sarapiquí, confirma lo anterior, al encontrar una capacidad de producción de madera en especies comerciales, en el rango de 84 a 124 m³/ha. De igual manera, Morales (2000), encuentra que la respuesta de bosques secundarios a la aplicación de tratamientos silviculturales es positiva, lográndose mejorar los incrementos diamétricos en las especies comerciales seleccionadas. Carrillo (2000), que enfoca su estudio a evaluar las características de la materia prima proveniente de especies comunes de bosques secundarios, logra determinar que la mayoría de las especies analizadas poseen buenas características de trabajabilidad y estabilidad dimensional.

Estructura del Bosque Secundario

Dentro de un ciclo de crecimiento natural del bosque tropical, la estructura de un rodal está directamente relacionada con la edad. Las fases sucesionales para el bosque tropical, están dadas por una secuencia establecida de niveles. Budowski (1965), citado por Jacobs (1981), define cuatro fases sucesionales:

- Pioneras: cuya edad está entre 1 y 3 años, alcanza una altura de 5 a 8 metros, se distingue solo un estrato muy denso en el perfil vertical;
- secundario temprano: edad ronda de 5 a 15 años, alcanza una altura de 12 a 20 metros y está compuesto por dos estratos verticales bien definidos;
- secundario tardío: con una edad de 20 a 50 años, una altura entre 20 y 30 metros, y con tres estratos en el perfil vertical, que tienden a ser difíciles de distinguir;
- climax: con una edad mayor a los 100 años, alturas generalmente entre los 30 y 45 metros y presentando un número variable de estratos verticales difíciles de distinguir.

La composición florística de plantas leñosas también se incrementa al paso entre cada fase sucesional. También se presenta una alternancia de especies dominantes, comenzando con especies heliófitas, tolerantes a las condiciones de alta iluminación, hasta las especies esciófitas, tolerantes a la sombra.

En general, el aspecto más apreciable del cambio de la estructura de un bosque secundario, está dado por la altura alcanzada por los individuos presentes en dicho rodal. En la figura 3, se muestra un perfil idealizado del desarrollo de la estructura vertical de un bosque.

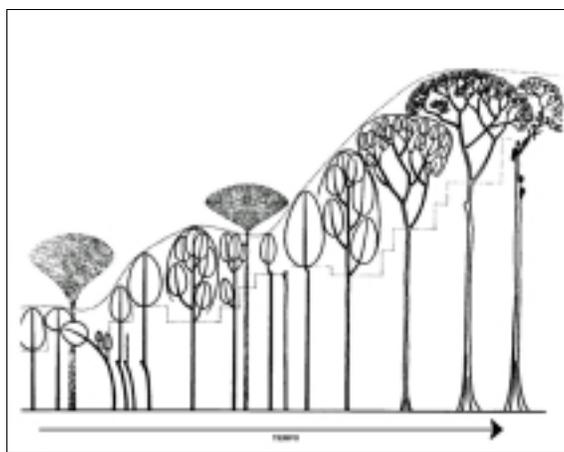


Figura 3. Secuencia en la variación de la estructura vertical para un bosque tropical, a través del tiempo (Adaptado de: Jacobs, 1981).

Los cambios que se efectúan consisten en un desarrollo del tamaño, tipo y distribución de las copas de los árboles en el dosel. En las etapas tempranas de desarrollo, es posible esperar, un dosel homogéneo en altura, de copas de diámetro uniforme y sin árboles sobresalientes (aunque es posible encontrar en la literatura que se reporten árboles remanentes dentro de los bloques de bosque secundario). En las etapas de bosque maduro, el dosel adquiere un aspecto más irregular, de mayor altura y copas de diámetro variable. El aspecto de un bosque maduro, posee una *textura* determinada que lo distingue de otros tipos de cobertura del suelo. En la figura 4, se muestra un extracto de una fotografía aérea pancromática, que permite apreciar el efecto del aspecto irregular del dosel del bosque.

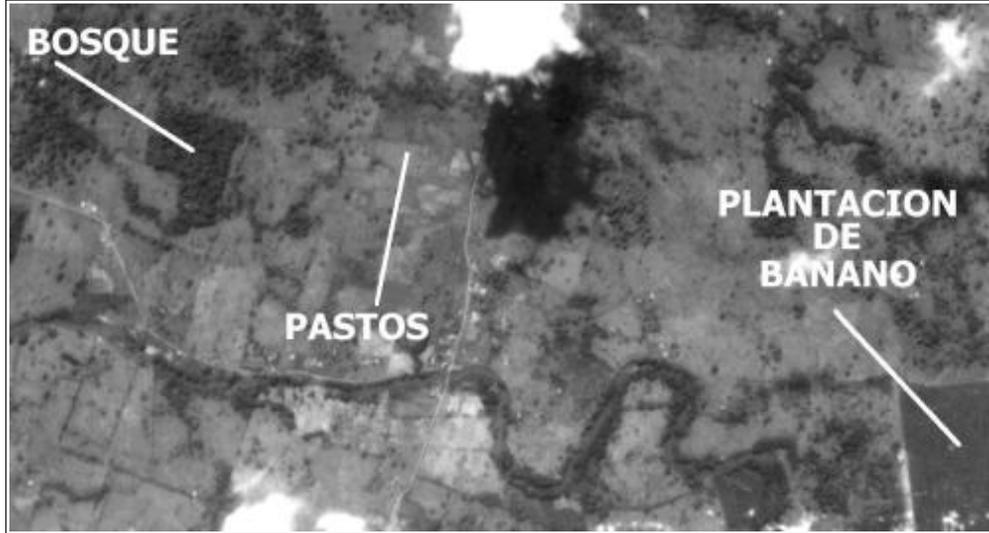


Figura 4. Efecto de la distribución irregular de las copas de los árboles en aspecto general de un bosque natural, en contraste a otros tipos de cobertura del suelo (Adaptado de imagen *indio.bmp*, contenido del curso de S.I.G, ITCR).

En esta imagen, se hace evidente la diferencia entre un bloque de terreno cubierto de bosque, que se observa como un área irregular de diferentes tonos, causados por la presencia de árboles emergentes que provocan sombras de diferentes tamaños, contra un área cubierta por una plantación de banano, que se muestra de manera muy homogénea, con un solo tono.

Lo anterior se debe constituir de tal manera que el conocimiento acumulado sobre la estructura del bosque secundario sirva para la identificación de las áreas con este tipo de cobertura. Por lo tanto, cualquier estudio de procesamiento de imágenes de sensores remotos debe implementar esta información en su favor.

En el cuadro 3, se presenta un resumen de las características generales de la estructura de bloques de bosque secundario en la Zona Norte de Costa Rica.

Cuadro 3. Resumen de características descriptivas de estructura del bosque, para cinco rodales distribuidos en la Zona Norte de Costa Rica.

(Las familias dadas se presentan en orden descendente de abundancia)

Ubicación	Características Descriptivas de Estructura							Fuente
	Edad (años)	Area (ha)	G (m ² /ha)	N (árboles/ha)	Número de especies	Número de familias	Familias más comunes	
Coope San Juan	21	1.76	25.43	441	27	18	Tiliaceae Mimosaceae Vochysiaceae	Segura (2000)
	21	4.52	22.95	396	43	30	Mimosaceae Tiliaceae Boraginaceae	
	21	1.38	31.97	503	25	18	Mimosaceae Flacourtiaceae Boraginaceae	
Hiloba, Boca Tapada	10	12.78	6.92	332	46	28	Mimosaceae Flacourtiaceae Euphorbiaceae	Chiari (1999)
Los Gansos, Boca Tapada	25	8.56	22.71	536	72	35	Mimosaceae Arecaceae Rubiaceae Vochysiaceae	
Florencia	10	1.7	10.22	338	17	19	Tiliaceae Boraginaceae	Morales (1999)
	18	3.9	20.51	518	61	35	Tiliaceae Boraginaceae	
Pénjamo	25	3.9	17.61	422	54	31	Tiliaceae Euphorbiaceae Annonaceae	Quiros (2000)

Las condiciones previas al establecimiento de un bosque secundario determinan necesariamente su constitución florística y estructural. Es decir, el efecto de la perturbación del suelo, la presencia o no de fuentes cercanas de semillas y la intensidad de las actividades humanas previas. Por esta razón se presentan las variaciones en las características de la estructura de los diferentes bloques. Las diferencias con respecto a las familias botánicas dominantes en cada caso, aunque se presenta en bloques de bosque de edad similar, no constituyen un factor crítico en la identificación de estos, ya que lo que sucede es un cambio en las especies que ocupan los nichos ya establecidos.

Para ilustrar las variaciones de la estructura en el bosque secundario, se presenta a continuación perfiles verticales para tres parcelas establecidas en tres sitios de la Zona

Norte de Costa Rica. Es común encontrar bosques donde se localicen individuos de grandes dimensiones, lo que no corresponden a la línea de desarrollo del bosque presente y más bien a árboles remanentes del bosque anterior (Segura, 2000). Estos individuos generalmente son de especies como: *Dipteryx panamensis*, *Vochysia guatemalensis*, *Dussia macrophyllata* (Morales, 1999), y en ocasiones *Ceiba pentandra*.

En la figura 5, se muestra el perfil de un bloque de bosque secundario ubicado en la región de Boca Tapada de San Carlos. Este es un caso de un bosque de desarrollo pobre, ya que posee a sus 10 años apenas 6.92 m²/ha. No es posible definir un dosel homogéneo con los árboles presentes, y se hace evidente la presencia de especies remanentes. En promedio, la altura de los árboles no supera los 15 metros. *Jacaranda copia*, presenta un patrón de crecimiento tal que le permite superar rápidamente en altura a los demás individuos a fin de posicionarse sobre el dosel.

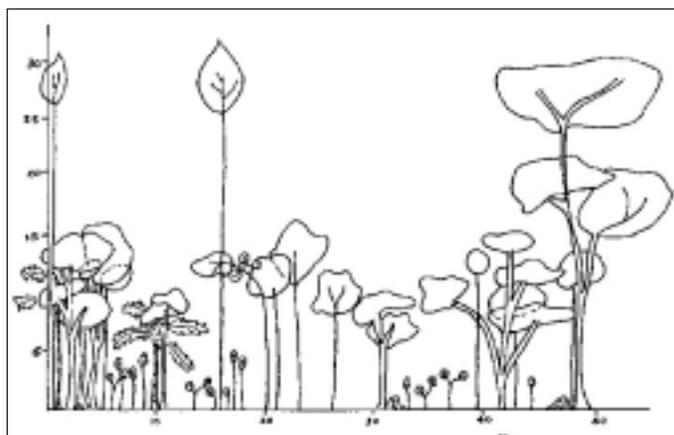


Figura 5. Estructura vertical para bloque de bosque secundario de 10 años, en Boca Tapada de San Carlos, Costa Rica (Adaptado de: Chiari, 1999).

En la figura 6, se presenta el caso de un bloque de bosque secundario ubicado en la finca Coope San Juan, en Agua Zarcas de San Carlos.



Figura 6. Estructura vertical para bloque de bosque secundario de 21 años, en Finca Coope San Juan, Aguas Zarcas, Costa Rica (Adaptado de: Segura, 2000).

En este caso, la altura promedio del dosel es de aproximadamente 20 metros y de igual manera, se tiene la presencia de árboles remanentes. En el plano horizontal, el rodal es más denso que el caso anterior, por presentar un área basal de $22.9 \text{ m}^2/\text{ha}$. Comparativamente, el efecto de la edad sobre la constitución estructural de los dos bloques es evidente.

Finalmente, en la figura 7, se muestra el caso de un bloque de bosque, ubicado en Florencia de San Carlos. Este con 18 años de edad, posee un desarrollo aún mayor del dosel, con una altura promedio de 25 metros y un área basal de $20.51 \text{ m}^2/\text{ha}$. Nótese que para este caso, el dosel presenta una densidad de copas considerablemente mayor a los dos casos anteriores. De igual manera, existe la presencia de árboles remanentes.

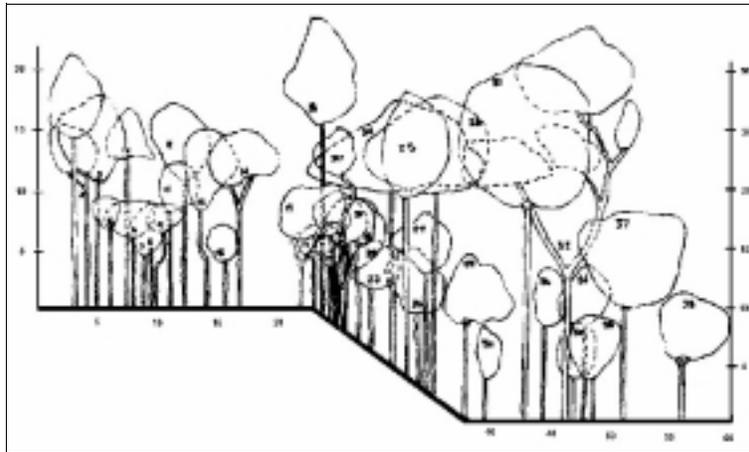


Figura 7. Estructura vertical para bloque de bosque secundario de 18 años, en Florencia de San Carlos, Costa Rica (Adaptado de: Morales, 2000).

Implicaciones técnicas de la composición del bosque secundario en el proceso de clasificación

Ahondar en los detalles de composición florística y estructural de los bosques secundarios tiene como objetivo principal determinar las posibles respuestas espectrales de este tipo de cobertura en imágenes registradas por sensores remotos. El efecto real depende en gran medida de las características del sensor remoto en sí. Difícilmente las áreas cubiertas de bosque secundario tendrán una extensión superior a las 100 ha (COSEFORMA, 1994), lo que dificulta su identificación visual. Aún más, por las características propias del dosel superior, es posible que exista algún grado de traslape con otros tipos de cobertura del suelo, principalmente plantaciones forestales y bosques primarios intervenidos (Castillo, 1999). Para el sensor ETM+ (y del tipo TM en general), el grado de detalle asociado no es superior a 30 metros, mientras que en IKONOS, el detalle puede inclusive ser tanto como 1 metro. La figura 8 muestra el efecto real del nivel de detalle.

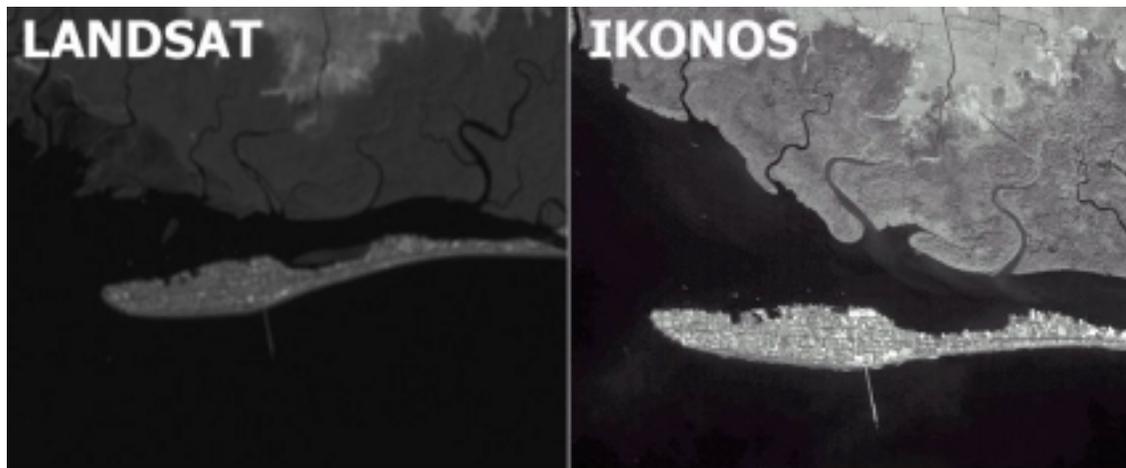


Figura 8. Comparación del efecto de la resolución espacial de dos sensores remotos, sobre el nivel de detalle visible. Landsat TM 5 contra IKONOS.

Se muestra en esta figura, una comparación de los dos tipos de imágenes para cada sensor, para la región de Puntarenas, en la costa pacífica de Costa Rica. Se hacen evidentes las diferencias de detalle apreciables para cada una. En el caso de la imagen derecha, que corresponde al sensor IKONOS, se aprecian con facilidad elementos tales como embarcaciones en el estero y el detalle del trazado de calles y avenidas en la ciudad, lo cual es apenas inferible de la imagen Landsat. Las posibles diferencias existentes tienden a compensarse por el mayor grado de detalle espectral que posee Landsat en contra del pobre paquete de bandas ofrecido por IKONOS.

METODOLOGIA

Generalidades

La práctica de especialidad se desarrolló en el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica de la Escuela de Ingeniería Forestal, en el Instituto Tecnológico de Costa Rica y bajo la dirección del profesor Edgar Ortiz Malavasi. Se recibió la colaboración directa del profesor Ruperto Quesada Monge para la coordinación y ejecución de giras de campo para la recolección de puntos de control.

Para la consecución de los objetivos planteados se empleó una imagen digital registrada por el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) del satélite Landsat 7, registrada el 20 de enero del año 2000, que posee una ubicación determinada por el sistema WRS (World Reference System) (EDC DAAC User Services, 1999), en la *ruta 15 y fila 53*. La búsqueda de la imagen se realizó en el sistema de archivo digital de la NASA (<http://eosims.cr.usgs.gov>).

El nivel de procesamiento de dicha imagen es denominado producto *Level LIG*, que corresponde a imágenes radiométricamente corregidas y geográficamente referenciadas. El formato de archivos en que fue recibida la imagen es *GEOTIFF* (archivos *TIFF* con encabezados que indican posición geográfica) en discos ópticos ISO 9660. La imagen está georeferenciada con el datum WGS84 y el sistema de proyección UTM en la zona 16 (norte).

Se cuenta con una población de puntos de control que contiene aquellos donados por el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica de la Selva (OET), así como los recopilados en el recorrido por la zona.

Equipo y Recursos

El trabajo de procesamiento y análisis de la imagen se efectuó en una estación de trabajo propiedad del autor con las siguientes características:

Procesador Intel Pentium III - 550 Mhz

256 MB de memoria RAM

40 GB de espacio en disco duro

Monitor de 17"

Bajo la plataforma LINUX (Slackware Linux 8.0, kernel 2.4.5, Xfree86 4.1), se compiló e instaló el paquete GRASS, en su versión 5.0.0 pre 1. En este se realizaron las operaciones de clasificación espacial (algoritmo SMAP). Dentro del sistema LINUX, se instaló la aplicación VMWARE¹, versión 2.0.4 (Máquina virtual), y sobre ésta se instaló el sistema operativo Windows 98 SE. De esta manera fue posible utilizar IDRISI 32 y MultiSpec 5.0, en la misma máquina de LINUX. La figura 9 muestra de modo esquemático, la configuración del sistema.

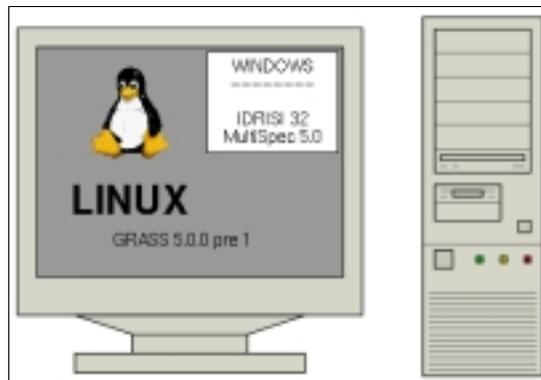


Figura 9. Diagrama general de la configuración del sistema empleado. Windows y las aplicaciones, corren dentro del sistema LINUX, de modo simultáneo.

Además se emplearon otros programas de aplicación (en su mayoría de código fuente abierto, bajo la licencia GPL, del proyecto GNU). Estos fueron: *GpsManager*, utilizado para obtención de los puntos de control recopilados por el GPS; librerías de funciones *GDAL*, empleadas para la interpretación de los archivos geotiff; librerías *libtiff* y *libgeotiff*, para el procesamiento y transformación de las imágenes; *PROJ4*, librerías para realizar conversión de coordenadas de un sistema de proyección y datum a otro; *Geotrans*,

¹ Se utilizó la licencia temporal brindada por la empresa fabricante del programa.

aplicación que realiza las conversiones necesarias; *DIA*, diagramador esquemático; *StarOffice*, suite de oficina para la edición y presentación del documento final; *GIMP* y *SODIPODI*, para la edición y preparación de diagramas e imágenes.

Recopilación de puntos de control

Se empleó una unidad GPS marca Garmin, modelo Etrex Summit (firmware v.2.07), sin corrección diferencial. A fin de lograr un nivel aceptable de error en las mediciones de posición se procuró la permanencia en el sitio por lo menos 30 minutos (Aunque la permanencia por más de un minuto, permite obtener un error de aproximadamente 6 metros, lo cual está dentro de un rango aceptable dada la resolución espacial de las imágenes a utilizar). Como los archivos *geotiff* traen de antemano definidas las coordenadas de la imagen, no es necesario efectuar ningún procedimiento de georeferenciación, sin embargo, para efectuar operaciones de ubicación correcta de puntos de control así como ubicación de poblados, ríos y otros elementos geográficos, se emplearon las hojas cartográficas listadas en el siguiente cuadro, en escala 1:50000:

Cuadro 4. Nombres y números de hoja cartográfica empleadas para ubicación de zonas de trabajo

NOMBRE	NUMERO DE HOJA
Fortuna	3247 II
Monterrey	3247 I
Tres Amigos	3347 IV
Aguas Zarcas	3347 III
Quesada	3346 IV
Poás	3346 I
Río Cuarto	3347 II
Chaparrón	3347 I
Chirripó Atlántico	3447 IV
Río Sucio	3447 III
Guápiles	3446 IV

Descripción del área de estudio

El presente trabajo se desarrolló para la Región Huetar Norte, que se ubica en la provincia de Alajuela y algunos cantones de la provincia de Heredia, y una sección de la Zona Atlántica, que incluye a los cantones de Guápiles y Guácimo de la provincia de Limón. Exceptuando aquellas zonas ubicadas en las faldas de la Cordillera Volcánica Central y Cordillera de Tilarán, es una región de tierras bajas, en el rango de 0 a 500 metros sobre el nivel del mar. Se desarrollan varias actividades productivas de importancia como: cultivo de banano, cultivo de piña, cultivo de cítricos, ganadería extensiva y plantaciones forestales. La explotación maderera tradicional así como abusos cometidos en el cambio del uso de la tierra, han producido una región muy heterogénea con respecto a la cobertura del suelo. La existencia de un mosaico complejo de fragmentos de bosque primario, bosque natural intervenido, bosques secundarios y plantaciones forestales tienden a complicar la extracción de información de imágenes de satélite.

Inicialmente se planeaba tratar toda la región con los métodos que a continuación se muestran, sin embargo, la presencia considerable de nubes, limitaron la región de estudio a tres zonas de trabajo. Estas son:

- Zona de trabajo 1: Región que contiene a los sitios Florencia, Aguas Zarcas, Río Cuarto, Boca Arenal, Altamira y Pital de San Carlos.
- Zona de trabajo 2: Región que contiene a los sitios Horquetas de Sarapiquí, Puerto Viejo de Sarapiquí, Boca del Río Sucio, Estación Biológica la Selva y una sección del Parque Nacional Braulio Carrillo.
- Zona de trabajo 3: Región que contiene a los sitios Guápiles, Guácimo (Llanura de Santa Clara), y Cariari de Pococí.

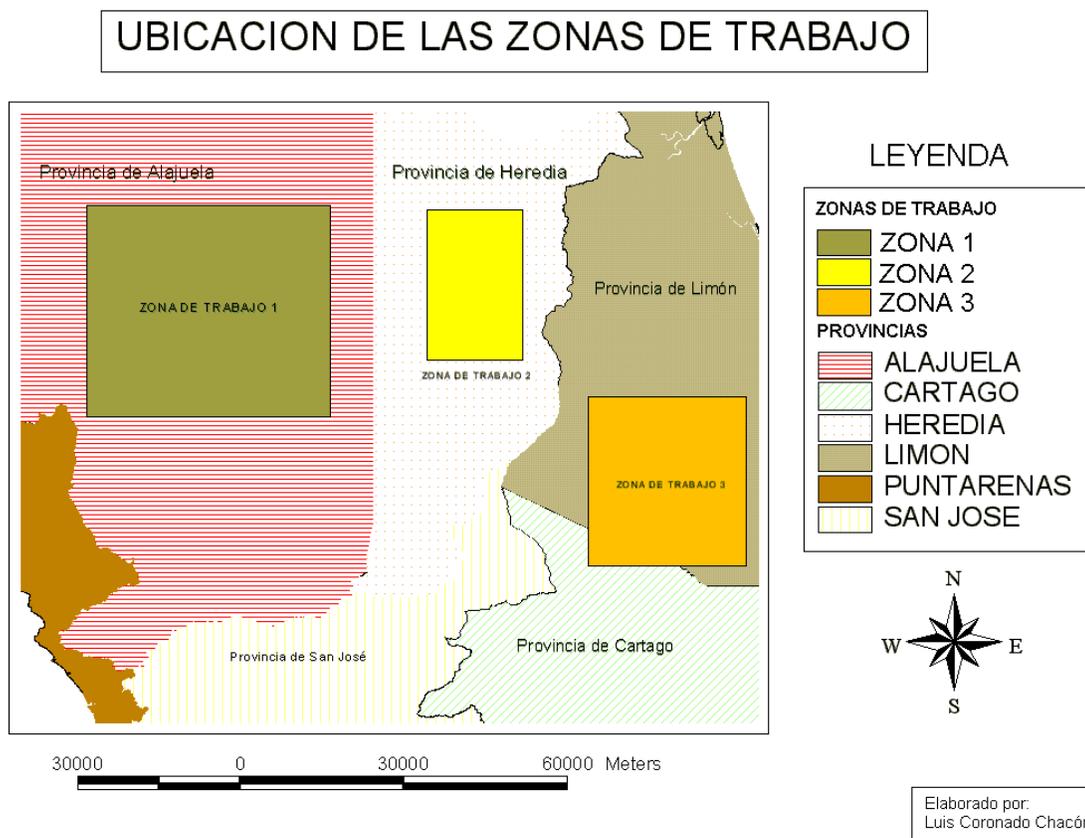
Los prefijos *ZT1*, *ZT2* y *ZT3*, fueron asumidos para cada operación y archivo generado durante la ejecución del procedimiento. En el cuadro siguiente, se presentan las coordenadas límite de cada una de las zonas de trabajo trazadas.

Cuadro 5. Coordenadas límite de las zonas de trabajo definidas.

Esquina	Coordenadas Límite					
	ZT1		ZT2		ZT3	
	X	Y	X	Y	X	Y
Superior Izquierda	769905	1175505	815955	1176135	848565	1155165
Inferior Derecha	808035	1146015	840825	1145385	875115	1127325

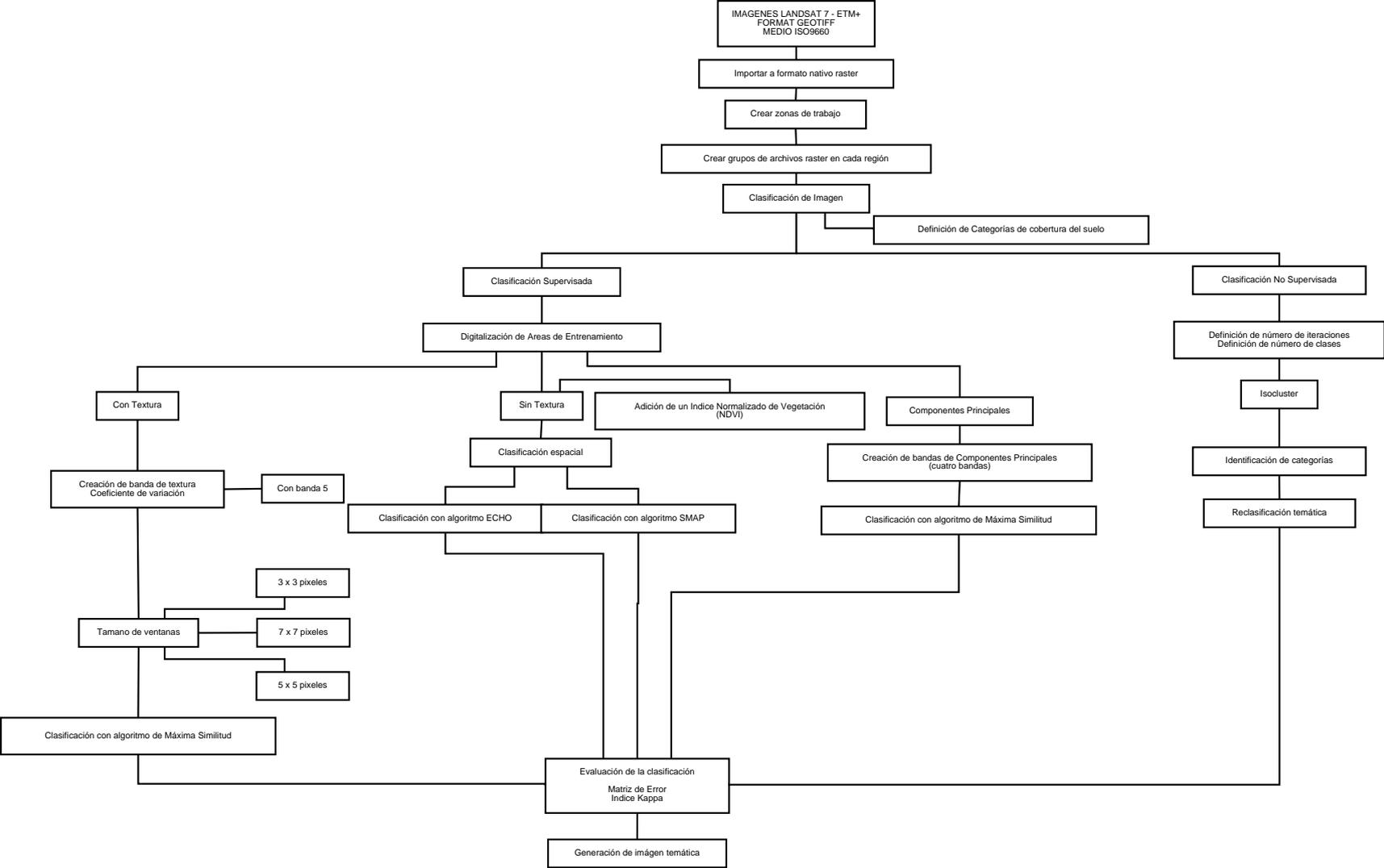
Coordenadas dadas en UTM 16 norte y sobre WGS84

En la figura 10, se muestra una composición de la región estudiada.

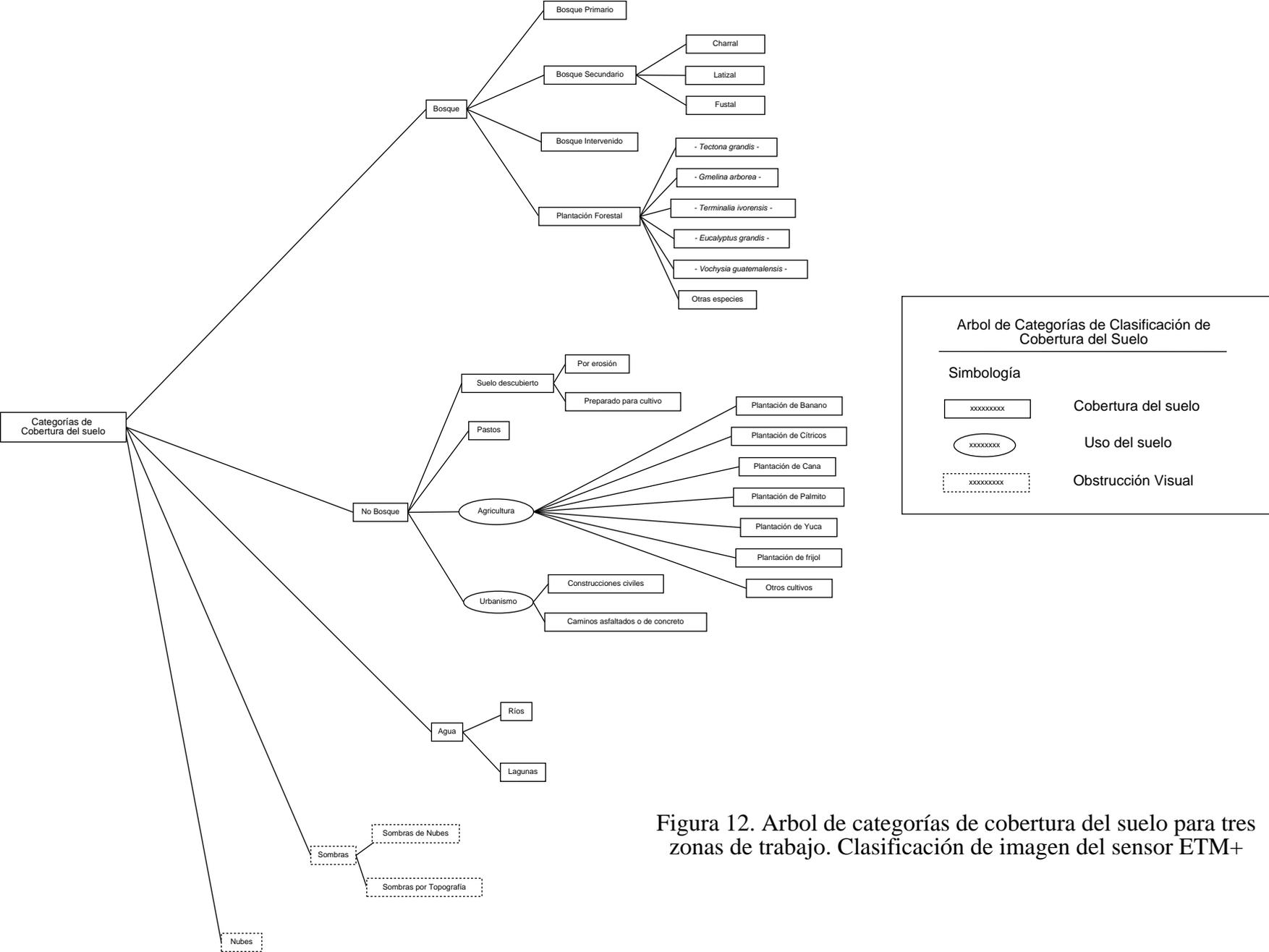


Procedimiento inicial para interpretación y clasificación de imágenes de satélite

El procedimiento general establecido para la clasificación digital de la imagen satelital se describe a continuación. En la figura 11 se muestra el diagrama esquemático de este



**Figura 11. Procedimiento general de clasificación digital implementado
Tratamiento de imágenes para tres zonas de trabajo
Sensor ETM+, Landsat 7. 2001**



Arbol de Categorías de Clasificación de Cobertura del Suelo

Simbología

xxxxxxxxxx	Cobertura del suelo
xxxxxxxxxx	Uso del suelo
xxxxxxxxxx	Obstrucción Visual

Figura 12. Arbol de categorías de cobertura del suelo para tres zonas de trabajo. Clasificación de imagen del sensor ETM+

procedimiento. Como primer paso, se hace necesario importar al formato raster nativo de cada aplicación la información contenida en cada imagen separada y luego crear las zonas de trabajo con las coordenadas listadas anteriormente. Para trabajar libremente con cada procedimiento, se crean grupos de archivos raster (definidos por directorios o por archivos concatenados).

Categorías de cobertura del suelo

Se definen en este punto las categorías de cobertura del suelo que se desean identificar digitalmente. Se muestra en la figura 12, el árbol de clasificación establecido. Inicialmente se crean cuatro categorías: nubes, sombras, agua, bosque y no bosque. nótese que las categorías nubes y sombras están definidas por polígonos con borde de puntos, lo que indica que en realidad no son tipos de cobertura, sino algún tipo de obstrucción visual. En la categoría agua, se incluyen la situación de agua en lagunas y ríos (no se hace la distinción entre agua limpia y agua sucia). Los dos bloques de categorías más importantes son bosque y no bosque. El segundo incluye cualquier tipo de cobertura del suelo que no corresponda a una acumulación masiva y visible de árboles (bloques de 30 por 30 metros). Dentro de este grupo se incluyen: suelo descubierto (ya sea por erosión o por suelos preparados para cultivos) y pastos. Además se definen tres tipos de uso del suelo, a fin de ilustrar las demás categorías:

1. Urbanismo, donde se incluyen, construcciones civiles y obras como caminos de concreto y asfalto;
2. Agricultura, donde se incluyen de modo genérico todo tipo de cobertura del suelo, relacionada con actividades agrícolas. En el caso particular de las zonas bajo estudio: plantaciones de banano, cítricos, caña, piña, palmito, etc.
3. Bosque, se establecen 4 grupos de categorías: Bosque primario, bosque intervenido, bosque secundario, plantaciones forestales. Para plantaciones forestal, se establece una categoría de cobertura para cada especie forestal ensayada en la región. En el caso particular de Bosques secundarios, se establecen a su vez tres categorías de acuerdo al

desarrollo de este tipo de cobertura (aunque no se emplean en el proceso de clasificación digital).

El árbol de clasificación funciona como una guía para definir las categorías a clasificar en cada zona de trabajo. Dada la heterogeneidad de las zonas de trabajo, no todas las categorías están representadas en cada una. El siguiente cuadro, muestra las categorías definidas para cada zona de trabajo.

Cuadro 6. Categorías de cobertura del suelo establecidas para cada zona de trabajo.

CATEGORIA	ZONA DE TRABAJO		
	ZT1	ZT2	ZT3
Nubes	x	x	x
Sombras	x	x	x
Bosque primario	x	x	x
Bosque intervenido		x	
Bosque secundario	x	x	x
Plantación forestal	x		x
Plantación de banano		x	x
Plantación de caña	x		
Plantación de piña	x		
Plantación de cítricos	x		
Plantación de palmito		x	
Suelo descubierto	x	x	x
Pastos	x	x	x
Urbanismo			x
Agua	x	x	

Se debe resaltar el hecho de que aunque algunas categorías estuvieran presentes en una zona de trabajo en particular no se incluyeron dentro de las áreas de entrenamiento, debido principalmente a que no significaban una muestra considerable de píxeles. Tratar de delimitar estas categorías dentro de áreas de entrenamiento implicaría incluir píxeles de otras categorías aledañas, lo que afecta el proceso de clasificación. Particularmente las categorías eliminadas fueron: urbanismo, para las zonas de trabajo 1 y 2; y agua, para la zona 3.

En un principio no se hace diferencia entre plantaciones de varias especies, entre bosque primario y bosque intervenido, ya que se hace muy difícil delimitar polígonos de entrenamiento que incluyan áreas homogéneas con estas clases. En el caso particular de plantaciones forestales, se buscaron casos genéricos y de gran tamaño (por ejemplo, Fincas de la empresa Flor y Fauna, en Altamira de San Carlos). La digitalización de áreas de entrenamiento de bosque secundario en las zonas de trabajo, se realizó tomando como guía la relación entre puntos de control registrados, identificación en diferentes composiciones de color verdadero y falso color y la experiencia de conocer la región.

Clasificación digital de la imagen

Clasificación supervisada

Se digitalizaron en pantalla, a partir de elementos de interpretación visual, áreas de entrenamiento para la alimentación del proceso de clasificación supervisada. Se emplearon tres aproximaciones al problema:

1. Uso de textura: Se adicionó a cada conjunto de bandas, una banda² extra de textura, basada en la banda 5 (infrarojo medio). La medida de textura empleada fue el coeficiente de variación entre los valores digitales de cada pixel dentro de un *kernel* de tamaño definido. Cada banda de textura se creó para tamaños de ventanas móviles de 3 por 3, 5 por 5 y 7 por 7 pixeles. El procedimiento para obtener cada nueva banda correspondió a calcular la media aritmética y la desviación standard de los valores digitales de cada pixel dentro del *kernel*, en cada tamaño de ventana para luego dividir estas dos capas y multiplicarlas por el escalar 100. El cálculo de la desviación estándar de un archivo raster implica la aplicación de un filtro. Para esta variable en particular, el filtro utilizado corresponde a una matriz de igual tamaño de la ventana a procesar y cuyos valores son igual a uno. Una vez creadas las bandas adicionales se aplica el algoritmo de clasificación de máxima similitud para obtener la imagen temática y evaluarla.

² El hacer referencia a una capa de textura como una banda extra es incorrecto ya que no corresponde a una sección adicional del espectro electromagnético, sin embargo se hace uso en este caso por referirse a una situación genérica.

2. Sin textura (análisis espacial): Este método no requiere necesariamente capas raster adicionales y se basa en la aplicación de un algoritmo de clasificación espacial, que a diferencia del anterior, no solo se fundamenta en los valores de reflectancia registrados en cada pixel, sino en la distribución espacial de estos. Para mejorar el conjunto de datos, se incorporó una banda adicional compuesta por un índice normalizado de vegetación. De igual manera, la imagen temática resultante fue evaluada.
3. Componentes principales: Este método implica la extracción de un nuevo conjunto de bandas que incorporen la mayor variabilidad de los valores digitales en cada una de las bandas. Para este caso particular, se generaron cuatro nuevas bandas y fueron clasificadas por el método de máxima similitud. De igual manera, la imagen temática resultante fue evaluada.

Clasificación no supervisada

Este enfoque emplea el método basado en el agrupamiento de píxeles o *cluster*. El algoritmo empleado es *ISOCLUSTER*, y consiste en la agrupación iterativa de píxeles con base a los valores digitales en un grupo de bandas espectrales. Requiere un paso adicional que consiste en la identificación de los clusters creados y asignarlos a las categorías anteriormente definidas para cada zona. De igual manera, la imagen temática resultante es evaluada.

Interpretación y digitalización

Para realizar la identificación de las categorías a definir en cada zona de trabajo, se crearon composiciones de bandas, a color verdadero y falso color. Estas combinaciones fueron:

Cuadro 7. Combinaciones de color realizadas para la interpretación visual y trazado de áreas de entrenamiento.

COMBINACION	COLOR		
	ROJO	VERDE	AZUL
COLOR VERDADERO	3	2	1
FALSO COLOR	4	3	2
	5	4	3
	7	5	4
	1	2	3
	2	3	4
	3	4	5
	4	5	7

Todo el proceso de delineación de áreas de entrenamiento fue efectuado probando la correcta existencia de una u otra clase en cada una de las anteriores combinaciones. En todos los casos, las composiciones a color, fueron realizadas con un estiramiento del rango de valores basado en el histograma de frecuencias y no se contabilizaron los pixeles con valor de cero. De este modo, la composición resultante posee un alto contraste y por lo tanto es fácil la interpretación visual.

Detalle del procedimiento para cada aplicación

Se emplearon aplicaciones distintas para cada uno de los métodos debido a que no todos los programas existentes poseen todas las herramientas requeridas. Esta situación no complica la tarea de clasificación ya que en general los diferentes formatos raster son fácilmente exportables a otros tipos nativos. A continuación se indica para cada aplicación, el segmento del procedimiento resuelto.

- IDRISI 32 (Windows 98 SE): En este programa se aplicó la clasificación supervisada con textura y con componentes principales, y la clasificación no supervisada con isocluster. Además la digitalización de las áreas de entrenamiento empleadas por IDRISI y más adelante por GRASS fueron creadas con este programa (con la idea de

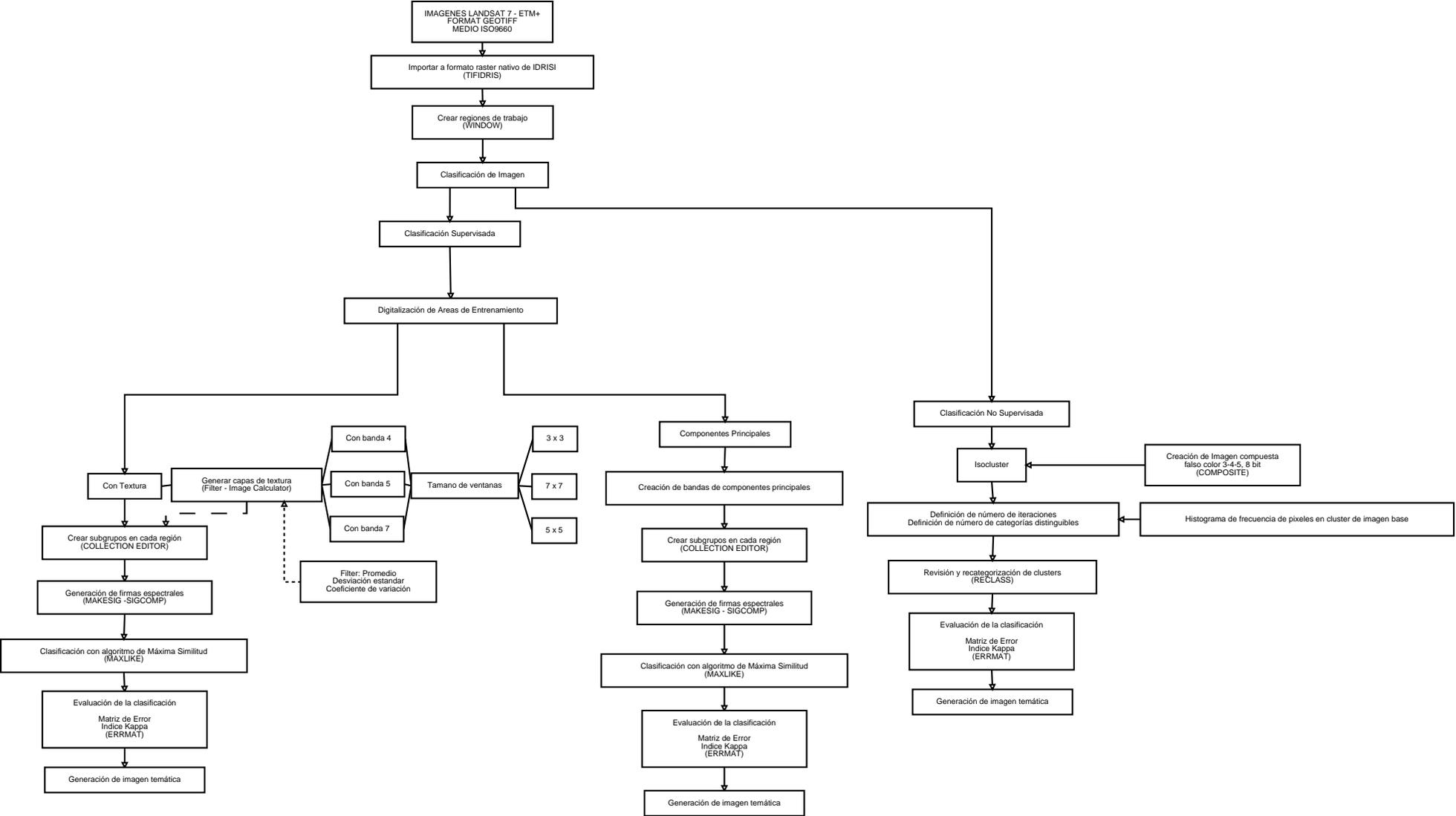


Figura 13. Procedimiento específico de clasificación para la aplicación IDRISI 32.

Figura 14. Procedimiento específico de clasificación para la aplicación MultiSpec.

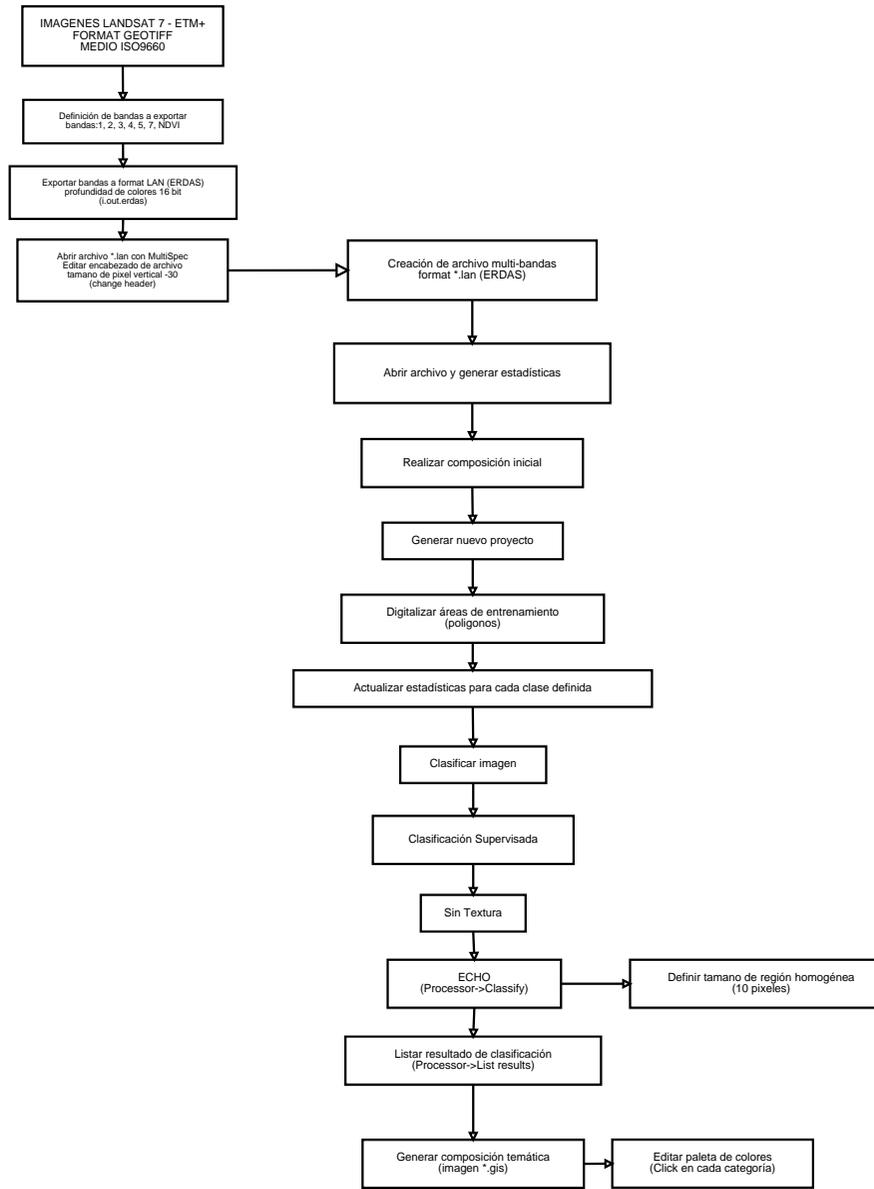
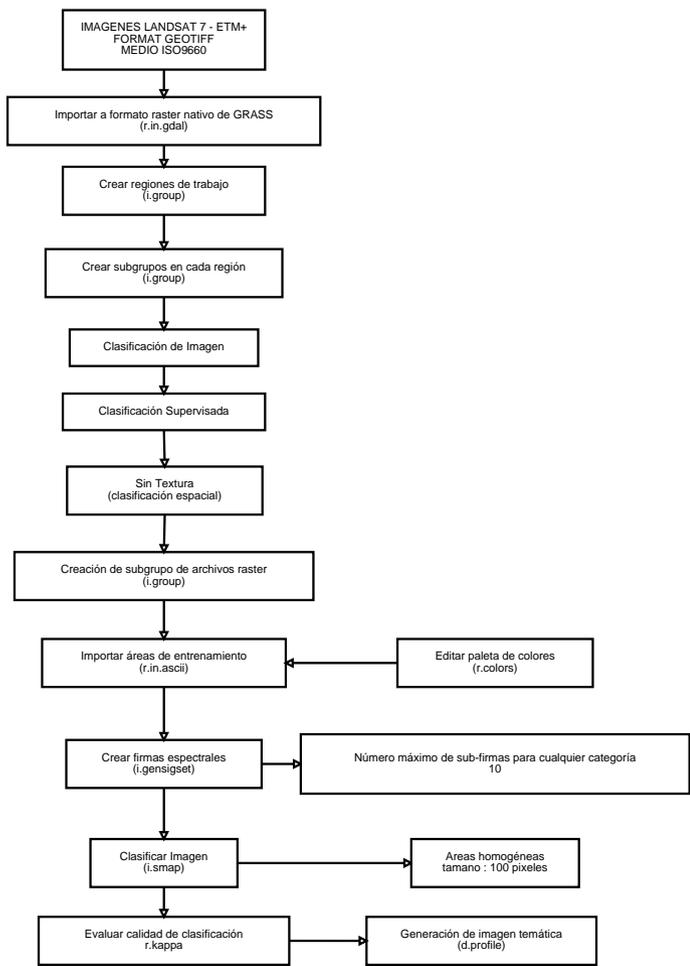


Figura 16. Diagrama específico de clasificación para la aplicación GRASS.



mantener homogéneas las áreas definidas y no introducir ruido al proceso). En la figura 13 se presenta el detalle de la secuencia de comandos.

- MultiSpec 5.0 (Windows 98 SE): En este programa se aplicó la clasificación supervisada sin textura y análisis espacial con el algoritmo ECHO. La digitalización de las áreas de entrenamiento fue independiente de IDRISI y GRASS, sin embargo se trazaron lo más similar posible a las anteriores. En la figura 14, se presenta el detalle de la secuencia de comandos. El archivo empleado por esta aplicación, es del formato ERDAS 7.4, (*.lan). Este formato en particular responde al método de almacenamiento de datos denominado *BIL* (de las siglas en inglés de Band Interleaved by line), lo que permite obtener un solo archivo con todas las bandas deseadas. Para obtener este archivo, fue necesario emplear el módulo *i.out.erdas*, de GRASS. Además de las siete bandas espectrales se añadió la banda del *NDVI*. Esta aplicación no crea archivos con las firmas espectrales de cada clase, sino que mantiene un base de datos (estadísticas) de las categorías que son digitalizadas. También posee la ventaja de que no es necesario crear archivos nuevos para cada composición a color, sino que solamente hace falta presentar la combinación deseada y esta se despliega, sin tener la necesidad de sobreponer la capa de las áreas de entrenamiento de nuevo. Esta es una aplicación de libre distribución, con la limitante de ser dirigida a un campo meramente académico por lo que no dispone de muchas herramientas para el tratamiento y composición final de la imagen. En la figura 14 se presenta el detalle de la secuencia de comandos.
- GRASS 5.0.0 pre 1 (LINUX): En este programa se aplicó la clasificación supervisada sin textura y análisis espacial con el algoritmo SMAP (se presenta una descripción más detallada de este comando en el anexo 4). Las áreas de entrenamiento fueron importadas de IDRISI a fin de mantener su homogeneidad. En la figura 15, se muestra la secuencia de pasos realizada para la conversión del formato. En esta aplicación, que es en principio una aplicación meramente raster, el formato de este tipo de

archivos es apreciablemente diferente. Las diferentes capas de información introducidas o bien creadas por el usuario, se agregan y acomodan ordenadamente en un sistema de directorios, donde cada uno indica si es raster, vector, archivo de documentación, etc. Los archivos se importaron directamente del disco, empleando el módulo r.in.gdal, que es una aplicación para importar múltiples formatos raster existentes. El comando automáticamente reconoce las características georeferenciadas de la imagen y establece los límites de la región más amplia. Para generar las zonas de trabajo, no se requiere crear nuevos archivos raster, sino que solo se definen las coordenadas de las esquinas y la aplicación sólo realiza las operaciones ahí. Este método ayuda a mantener la ocupación de espacio reducido. El detalle del procedimiento y los diferentes comandos empleados se muestran en la figura 16.

Evaluación de la calidad de clasificación

Para evaluar los resultados obtenidos por cada método, se utilizaron los indicadores de calidad más empleados en este tipo de operaciones: Matriz de error e Índice Kappa. Cada aplicación posee un comando o procedimiento particular para obtener esta información, sin embargo, el funcionamiento interno es básicamente el mismo. Además de estos métodos numéricos de evaluación se incluye el criterio del autor para determinar la calidad visual del producto final de modo que se pueda definir el mejor método de clasificación dirigido a identificar bosques secundarios,

RESULTADOS Y DISCUSION

Identificación de Bosques Secundarios

Esta investigación asume la hipótesis de que es posible distinguir acertadamente aquellos lugares que posean cobertura de bosques secundarios. Un bosque secundario es un bosque natural en desarrollo temprano y como tal posee características estructurales particulares que pueden ser determinadas fácilmente con un análisis silvicultural y así separado de otro tipos de bosque existente. Sin embargo, desde el punto de vista espectral, las diferencias tienden a disminuirse y por lo tanto a traslaparse fácilmente. Esta situación es entendible cuando se reconoce que lo que se está analizando es aquel tipo de cobertura que reflejó cierta cantidad de energía y que esta es captada a 700 kilómetros de altura por un sensor, y que son solo pequeñas posibles diferencias las que determinan el éxito o fracaso de la clasificación.

Para incrementar las opciones de éxito, usualmente los sensores empleados para identificación de cobertura del suelo, ofrecen datos de diferentes segmentos del espectro electromagnético que captan. Estas bandas espectrales ofrecen la posibilidad de poder distinguir entre diferentes tipos coberturas. Para el caso particular de vegetación (sin considerar aún sus tipos), las bandas que correspondan al segmento conocido como infrarojo son de gran ayuda. La vegetación refleja fácilmente la radiación infraroja en comparación con otros tipos de cobertura (o bien con obstrucciones como el caso de las nubes, que reflejan todo). Estas bandas infrarojas en conjunto con la banda del color rojo (rango del espectro que determina el color rojo, de 0.63 a 0.69 μm), se emplean para generar uno de los índices de vegetación más empleados, el índice normalizado de vegetación (*NDVI*). La interpretación visual de este índice permite, entre otras cosas, determinar aproximadamente la diferencia entre vegetación sana y enferma, entre suelo descubierto y bosques, tipo de cultivos, etc.

Las respuestas espectrales de cada tipo de cobertura del suelo pueden emplearse como firmas que determinen la correspondencia a una u otra clase. Este ha sido el enfoque más comúnmente empleado en el campo de los sensores remotos. Sin embargo, tiene el problema de que cada una de las clases a distinguir deben poseer un trazado espectral totalmente independiente (traslape tendiente a cero). Esto podría ser el caso entre categorías tales como: suelo descubierto, agua y bosques, pero no aplica en su totalidad entre tipo de suelos, condición de pureza del agua y tipos de bosque. Clasificar imágenes siguiendo este fundamento es a lo que se le denomina análisis espectral.

Ahora bien, además de los valores que acompañan a cada pixel en una imagen (reflectancia captada en el área definida por el pixel), existe un parámetro adicional que consiste en la distribución entre grupos de pixeles con valores similares. Es decir, un grupo de pixeles de valor 50 podría corresponder a una zona con un cultivo de banano, en comparación con una zona cuyos pixeles en general tienen valores de 180, que corresponda a una nube sobre el terreno. Para una persona es muy fácil percibir esta situación y de hecho el análisis visual, que puede ser representado como el simple hecho de observar y distinguir diferentes objetos en una fotografía se fundamenta en esto. A pesar de que es muy fácil para el cerebro realizar tal interpretación de lo que capta el ojo humano, implementar éste en un sistema digital es ciertamente complicado, ya que implica enseñar a una computadora a ver. Una de las direcciones que se ha tomado, es la de adicionar al paquete de capas de bandas espectrales una capa con *textura*. Textura en este caso, es alguna medida de variación entre los valores digitales de pixeles adyacentes, donde la vecindad de la textura es usualmente definida por una ventana de $n \times n$ pixeles. Es decir, se trata de reconocer la variación de los valores de los pixeles cercanos y asignar un valor al pixel central. Otro de los métodos de clasificación es la de crear regiones homogéneas, donde el clasificador empleado parta de una firma espectral dada pero para una región donde la variación total de los valores de los pixeles se ha reducido y por ende aumentado el contraste y disminuido el traslape. Estos métodos se denominan usualmente análisis espacial. Existe cierto grado de similitud entre

estos y es común observar que se traten de modo genérico como métodos de análisis por textura.

El caso particular de la identificación de bosques secundarios presenta un reto considerable a ambos métodos. Los resultados presentados a continuación no deben ser interpretados como absolutos, sino más bien de tal modo de que permitan afinar más una metodología de identificación y en un caso extremo de delimitar el máximo grado de acierto para este tipo de cobertura.

Los resultados mostrados a continuación se basan en principio en la comparación de la imagen temática generada contra las áreas de entrenamiento definidas al principio del proceso de clasificación, fundamentado en el hecho de que éstas áreas han sido correctamente bien definidas.

Las imágenes temáticas obtenidas fueron evaluadas empleando una matriz de error, que describe las posibles confusiones existentes en los píxeles y el Índice Kappa que cuantifica los errores de omisión y comisión asignables al método de clasificación empleado.

Evaluación de Resultados

Se presenta en el cuadro 8, una tabla resumen del índice Kappa para la categoría de cobertura del suelo *-Bosque Secundario-* y para el resultado general de clasificación.

Clasificación Supervisada

Con textura

Los siguientes resultados provienen del procesamiento realizado con IDRISI 32 de la imagen inicial. La banda de textura se creó a partir de la estimación del coeficiente de variación de los píxeles de la banda 5, para los tamaños de ventanas anteriormente dados. Se probaron también resultados con la banda 4 y 7, pero se obtuvo mayor contraste de valores con la banda número 5. Se eliminó la posibilidad de emplear la banda del canal

Cuadro 8. Resultados de clasificación de la imagen satelital, en función del Índice Kappa de la categoría bosque secundario y el clasificador general.

Método de Clasificación			Zona de Trabajo					
			ZT1		ZT2		ZT3	
			Bosque Secundario	General	Bosque Secundario	General	Bosque Secundario	General
Supervisada	Textura	3 x 3	45.75	88.35	71.91	91.20	72.45	90.11
		5 x 5	46.10	88.93	72.32	91.44	71.45	90.27
		7 x 7	45.70	88.92	72.05	91.73	71.01	90.84
	Sin textura	SMAP	70.15	95.29	95.68	93.60	86.03	97.09
		ECHO	58.40	88.60	85.80	90.10	78.70	93.50
	Componentes Principales	35.66	81.66	67.71	90.81	67.81	89.80	
No supervisada	Isocluster	---	---	---	---	---	---	

Fuente: Anexos 2.

pancromático con resolución espacial de 15 metros por dos razones: IDRISI no procesa archivos con resolución espacial distinta³ y el contraste obtenido no es significativo, a pesar de la mejor resolución espacial (la banda número 8 es en principio una composición con las bandas 1, 2, 4 y 5 con una paleta de 256 niveles de gris).

Zona de Trabajo 1

El índice de clasificación general para los tres tamaños de ventana no superó el 88.93% y el índice de clasificación para la categoría de bosque secundario no superó el 46.10% para el tamaño de ventana de 5 x 5. No se presentan casos extremos y los resultados son muy similares. El resultado de la clasificación es visualmente pobre y por lo tanto poco confiable.

Zona de Trabajo 2

El índice de clasificación general para los tres tamaños de ventanas supera ahora el 90%, para un máximo de 91.73% para el tamaño de ventana de 5 x 5. De igual manera, la calidad de la identificación de bosque secundario aumenta aproximadamente a un 72%, para un máximo de 72.32% para el tamaño de ventana de 5 x 5. Se presentan resultados más homogéneos que en la zona anterior, sin embargo la calidad visual de la imagen temática resultante, aunque mejora, posee todavía elementos que permiten dudar de su validez.

Zona de Trabajo 3

El resultado de la clasificación general para esta zona es similar a la región anterior, con valores que superan el 90%. Los aciertos de la categoría de bosque secundario para esta zona, rondan el 71%, para un máximo de 72.45% para la ventana de 3 x 3 píxeles. Sin embargo, la calidad visual de la imagen temática obtenida, hace dudar de su validez.

³ Es posible reducir la resolución de las demás bandas sin embargo esto alteraría el procedimiento de análisis de textura, ya que un solo kernel de 3x3 píxeles, incluiría tres cuartas partes de un píxel antes del cambio de resolución. El caso opuesto de aumentar la resolución de la banda 8, lo que implica es una pérdida de información, ya que se truncaría la información incluida en los píxeles individuales.

Componentes Principales

Empleando también la aplicación IDRISI, se realizó el procedimiento de clasificación con componentes principales. Se generaron cuatro nuevas capas para cada zona de trabajo.

Zona de Trabajo 1

Esta zona posee los resultados más bajos obtenidos. Para este método el índice kappa para bosque secundario es de tan solo 35.66% y un 81.66% de la clasificación general. La calidad visual de la imagen resultante es igualmente baja.

Zona de Trabajo 2

Se obtiene resultados similares a los de textura. Con un 90.81% para la clasificación general y un 67.71% para los bosques secundarios.

Zona de Trabajo 3

Muestra el mismo comportamiento que la zona anterior, aunque resultados levemente más bajos que los de textura. Presenta un índice de clasificación general de 89.80% y un 67.81% para bosques secundarios.

Sin Textura

Se probaron dos implementaciones del mismo principio de análisis espacial. En MultiSpec, el algoritmo ECHO y en GRASS el algoritmo SMAP.

Zona de Trabajo 1

- SMAP: Se obtiene el mejor resultado de clasificación entre los probados aunque la separabilidad todavía es pobre. Para el bosque secundario el índice de clasificación es un 70.15% y el general es de 95.29. Las categorías homogéneas espacialmente, como plantaciones extensivas, obtuvieron resultados muy altos y la calidad de la imagen temática resultante es igualmente buena.

- ECHO: Aunque el resultado no es tan alto como el dado por SMAP, en comparación con los métodos de textura y componentes principales, la diferencia es considerable. Se obtuvo un 58.40% para el bosque secundario y un 88.60% para el resultado general. La calidad visual del resultado es apreciablemente buena, aunque el tratamiento de las regiones homogéneas creadas es visible (se notan los bloques de 10 x 10 píxeles que corresponden a las regiones homogéneas indicadas al algoritmo)

Zona de Trabajo 2

- SMAP: El Índice Kappa para el bosque secundario es el más alto obtenido, con un 95.68% y un 93.60% para la clasificación general. La imagen resultante presenta una distribución homogénea y visualmente correcta lo que hace pensar en que es altamente confiable.
- ECHO: No se obtiene un buen resultado con este procedimiento, ya que para el bosque secundario el índice dado es de 67.71% y un 90.81% en general. La calidad visual del resultado difiere apreciablemente de SMAP.

Zona de Trabajo 3

- SMAP: Nuevamente, este algoritmo brinda el mejor resultado en la clasificación de bosque secundario, con un 86.03% para la categoría en estudio y con un 97.09% como índice general.
- ECHO: En esta ocasión, este algoritmo brinda mejores resultados que los procedimientos basados en textura, aunque no muestra un acierto tan elevado como SMAP. En la categoría bosque secundario, presenta un 78.70% de acierto, para un índice general de 93.50%

Clasificación No Supervisada

Isocluster

Este procedimiento fue realizado empleando IDRISI 3.2. Los parámetros alimentados a la aplicación fueron los establecidos por defecto (tres iteraciones y la cantidad de cambios

apreciables en el histograma de frecuencias de la imagen de clusters). Además se indicó que se realizara un análisis fino del procedimiento de agrupación de píxeles.

Los métodos basados en el algoritmo cluster, que implica una clasificación por agrupación, se fundamentan en que es posible distinguir categorías que posean amplia separabilidad espectral, es decir que posean firmas espectrales apreciablemente diferentes. Normalmente es de esperar que los clusters generados por un procedimiento de este tipo no correspondan a las categorías definidas en un principio y más bien, respondan a un ordenamiento espectral lógico: meras agrupaciones de píxeles de valores digitales semejantes.

La imagen temática resultante no fue evaluada con los parámetros anteriores ya que no fue posible definir en esta la correspondencia a una u otra categoría de la lista anterior. Las agrupaciones fueron muy gruesas, debido a que incluían múltiples tipos de cobertura que se deseaban distinguir. Por lo anterior se concluye que este procedimiento no es adecuado desde ningún punto de vista para lograr la distinción de categorías muy finamente definidas espectralmente.

Calidad Visual y defectos de clasificación

Claro está que el valor del índice general de clasificación y el valor del índice kappa para cierta categoría de cobertura del suelo son los principales elementos para juzgar el resultado de la clasificación digital de una imagen, sin embargo la calidad visual de la imagen temática resultante, aunque no es medible mediante un índice, permite descartar uno u otro método.

Calidad visual sería entonces, la distribución combinada de los píxeles clasificados en una imagen temática. Otro modo de describir este aspecto, es como el *ruido* existente en una composición final, es decir, la existencia de píxeles de otras categorías ubicados en zonas donde no es posible que existan en la realidad. Como un caso particular sería el hecho de que se presenten píxeles de la clase *plantación de piña* dentro de una *plantación forestal*.

Estos errores se pueden localizar simplemente con analizar el contexto de la zona de trabajo, es decir, si se considera el tipo de cobertura, es sencillo determinar su correcta o errónea ubicación en uno u otro pixel. Este sería el caso particular de plantaciones comerciales conocidas que no pueden, poseer extensiones reducidas. Estos errores que son más comunes y evidentes en procedimientos de clasificación meramente espectral, se deben en principio a los traslapes ocurridos en las firmas espectrales de cada tipo de cobertura. Los métodos meramente espectral, como los son la gran mayoría de los empleados en la generación de capas temáticas a partir de datos de sensores remotos, se fundamentan en que existe, como requerimiento, algún grado de separabilidad en grupos espectrales definidos (Foody y Hill, 1996).

En la clasificación con el algoritmo de máxima similitud, se incluyó además de las bandas de textura adicionales, todo el conjunto de bandas standard (1, 2, 3, 4, 5, 7), ya que de algún modo todas brindan algún grado de diferenciación (Puig, 1996). En la figura 17, se muestra las diferencias visuales que se registran para una sección de la zona de trabajo 1 para los métodos de máxima similitud con textura y *SMAP*.

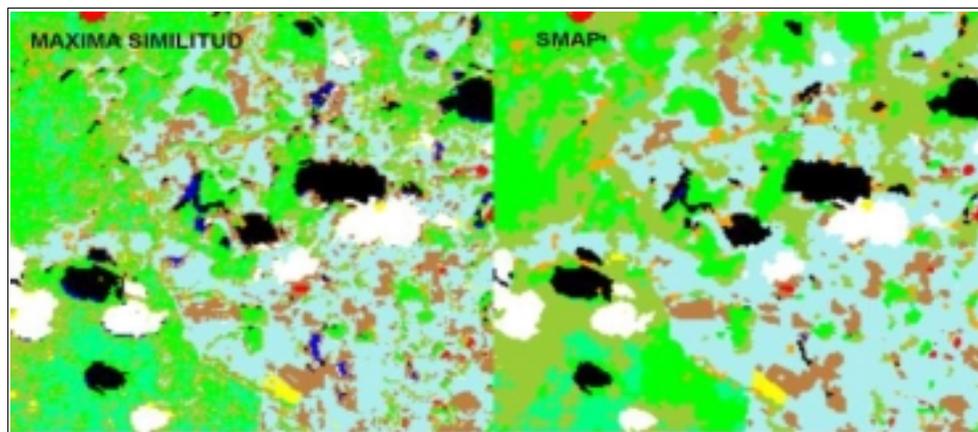


Figura 17. Comparación de la calidad visual de la clasificación dada por dos métodos. Nótese la homogeneidad del procedimiento de la derecha.

Una firma espectral consiste básicamente de la media aritmética de los valores de los píxeles ubicados dentro de las áreas de entrenamiento de cada clase, junto con las medidas de variación asociadas (desviación estándar, etc.) y en algunos casos, medidas de probabilidad de correspondencia. En la figura 18, se muestra las firmas espectrales obtenidas para la zona de trabajo 1 empleando el método de textura con una ventana de 5 x 5 píxeles.

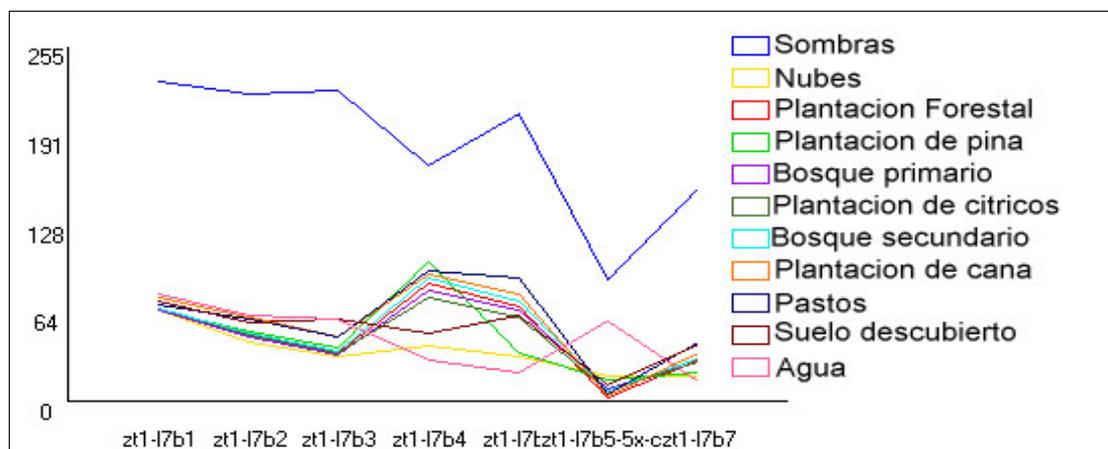


Figura 18. Firmas espectrales obtenidas para el procedimiento de clasificación con uso de textura. Zona de trabajo 1, textura de 5 x 5 píxeles.

Es evidente la reducida separabilidad existente entre los trazados espectrales de cada tipo de cobertura. Aunque no se presenta en la figura, el ámbito de variación de cada firma para cada banda, supera y se contrapone con los de firmas vecinas. Esto supone que se presenta una pobre diferencia radiométrica asociada a categorías similares.

Verificación de Resultados: apreciaciones

Las pruebas de calidad de la clasificación fueron realizadas contra las capas de áreas de entrenamiento digitalizadas en pantalla. Estas pruebas realizan una comparación pixel a pixel de los valores en la imagen temática resultante y la capa de entrenamiento, lo que hace pensar que al considerar zonas definidas por polígonos, es posible que en los métodos de

clasificación por máxima similitud, el *ruido* existente (píxeles de otras clases incluidos en regiones diferentes), afecte considerablemente los resultados dados. Si se realizara la comparación contra puntos de control y aquellos puntos que correspondan a cierta categoría, ajustaran en un píxel correctamente clasificado, entonces los índices kappa asociados tenderán a mejorar. Sin embargo, la distribución claramente aleatoria de los píxeles en las imágenes de éste método, difícilmente tenderán a ajustar de manera correcta, lo que permite adelantar que dichos resultados serán más dependientes del azar que de la calidad del clasificador. Por otro lado, al considerar los resultados de SMAP, es factible prevenir un aumento en la calidad de la clasificación si se compara con puntos de control.

En este trabajo no se presentan resultados de clasificación digital dados por la comparación de las imágenes temáticas resultantes contra puntos de control recopilados en el campo, debido a dos razones: primero, la gran mayoría de los puntos recopilados en la región bajo estudio correspondieron a sitios en la imagen cubiertos por nubes. Es importante descartar el hecho de que todos los sitios de recopilación de puntos correspondieron a lugares anteriormente visitados y estudiados por proyectos de práctica de especialidad. Estos sitios tienen asociado detalles de edad de desarrollo y estructura vegetal. Tristemente, por razones fuera de control, no fue posible sino emplear una muy reducida cantidad de puntos como referencia al momento de realizar la digitalización en pantalla de las áreas de entrenamiento; y segundo, el emplear una reducida cantidad de puntos implicaba obtener resultados totalmente inadecuados, en su mayor parte debido a que no se tenían puntos fuera de la cobertura de nubes en todas las categorías listadas en el árbol de clasificación mostrado anteriormente.

Ciertamente el emplear áreas de entrenamiento implica un posible sesgo y claro está, se asume que éstas han sido correctamente trazadas en la imagen. Para reducir el efecto de error en esta etapa, se invirtió una considerable cantidad de tiempo en el adecuado trazado de los polígonos. Con la ayuda de los puntos de control existentes y el conocimiento general de las zonas de trabajo estudiadas, fue posible establecer la ubicación de varios

sitios correspondientes a las categorías a distinguir. No fue necesario crear gran cantidad de áreas de entrenamiento para cada categoría y simplemente se delimitaron aquellos sitios que representaran fielmente a cada tipo de cobertura.

Conociendo esta situación, es posible recomendar una metodología más adecuada para la recopilación de puntos de control en el campo. Lo que se realiza comúnmente es ubicar con un solo punto alguna de las clases de cobertura que sean de interés. Usualmente se realiza este paso con una unidad GPS, pero también podrían emplearse fotografías aéreas recientes de la región. Si se toman en consideración los posibles efectos de ruido en las imágenes clasificadas, podría modificarse la recopilación de puntos, de tal modo de que se obtengan al menos cinco puntos de control de cada ubicación, separados estos al menos una distancia igual que dos veces la resolución espacial del sensor remoto utilizado. El primer punto de control estaría dado al centro de la ubicación y los demás sistemáticamente distribuidos en el sentido de los puntos cardinales. Esta operación aumentaría las posibilidades de acierto para cierto tipo de cobertura y además permite trazar pequeños polígonos que se traducen en áreas de entrenamiento utilizables.

Sin embargo, por el simple hecho de no realizarse la comprobación con puntos de control no implica que los resultados sean incorrectos. En muchas aplicaciones y en particular aquellas que requieran el análisis temporal del comportamiento del uso del suelo y de la cobertura de éste para una región del planeta en particular, muy pocas veces es posible contar con la disposición de puntos de control anteriores (Kimes, et al, 1998). Debido a ésto, las capas de áreas de entrenamiento o bien una muestra adquirida de ésta, se constituye en la única medida para evaluar la clasificación final de la imagen inicial.

De este modo, los resultados brindados poseen forzosamente una condición preliminar y hasta no ser verificados en un futuro, no deberían emplearse para el mapeo extensivo de la categoría de cobertura del suelo bajo estudio.

Análisis de textura: debilidades

En principio es posible afirmar de que la incorporación de una banda de textura no proporciona una ventaja considerable y apreciable en los resultados finales de la clasificación. Lo que sí permite afirmar, es que se genera un problema adicional que consiste en que la banda de textura empleada, básicamente funciona como un detector de bordes. Muchos de los filtros empleados en el procesamiento de imágenes digitales (no necesariamente en el campo de los sensores remotos, sino de modo más genérico, en el software de edición gráfica), se requieren para resaltar o difuminar el aspecto de una imagen. El coeficiente de variación en este caso, se obtiene como resultado de aplicar dos filtros de modo simultaneo:

- Un difuminador: el promedio de los pixeles dada una ventana móvil de $n \times n$ pixeles, permite suavizar la apariencia de esta, homogenizando las diferentes regiones.
- Un resaltador de cambios: la desviación standard de los valores de los pixeles dada una ventana móvil de $n \times n$ pixeles, permite reconocer en la imagen, los cambios apreciables de valores digitales entre regiones.

El coeficiente de variación se constituye como una medida de textura, ya que al suavizar la imagen se homogenizan los valores y al aplicar la desviación standard se reconocen las diferentes regiones gracias a la existencia de pixeles que denotan el cambio. En síntesis, esta medida de textura actua como un detector de bordes de aquellas regiones de la imagen que presentan categorías distintas.

Esta cualidad de detectar bordes parece ser también el defecto principal. Esto se debe a que no provee de valores diferenciables entre categorías y lo que se da es solo un aumento del valor digital de un pixel si este se encuentra en el límite de dos categorías (por ejemplo, de un lugar con pastos a una sombra o a una nube). Es decir, los valores de coeficiente de variación de una región con bosque secundario y una plantación de banano, pueden ser iguales y solo existir diferencias entre aquellos pixeles que están en el medio.

Al observar la figura 19, donde se muestran las firmas espectrales para una zona en particular donde se incorporó una banda de textura, se nota claramente que no se da una separabilidad efectiva para cada clase y más bien todas tienden a agruparse en valores bajos.

El efecto de borde lo que determina en realidad es que se clasifiquen erróneamente aquellos píxeles que logran valores de cambio que los ubiquen dentro de la nube de probabilidad de cada clase (al clasificar con el algoritmo de máxima similitud). Para ilustrar esta situación, se muestra en la siguiente figura, tres extractos de cada zona de trabajo, con casos particulares de píxeles clasificados de modo incorrecto, gracias al efecto de borde.

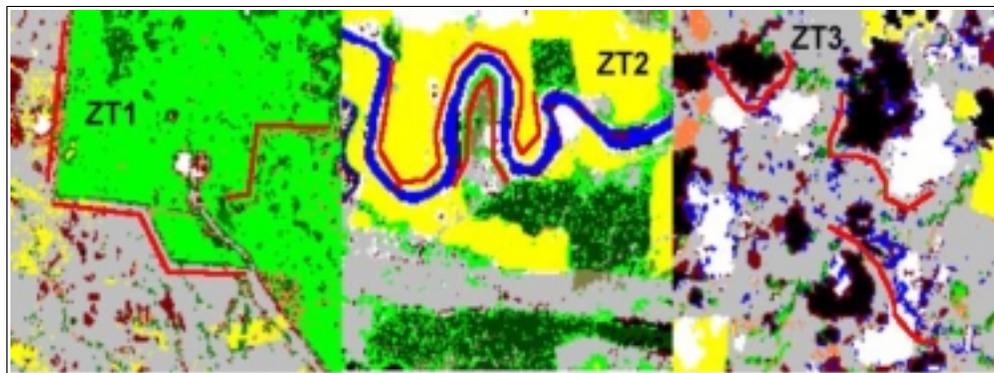


Figura 19. Secciones aumentadas de las imágenes temáticas que ilustran el efecto de borde incorporado por la variable de textura empleada (las regiones con efecto de borde son resaltadas con una línea color rojo).

En el caso de la zona de trabajo 1, mostrada a la izquierda de la imagen, el color verde claro, corresponde a la categoría de plantación forestal, el color gris, son pastos y el color amarillo, zonas con caña de azúcar. Los píxeles erróneamente clasificados, son los de color naranja, que corresponden a plantación de cítricos. En esa sección no existen plantaciones de este tipo y los píxeles están sistemáticamente ubicados en el borde de la gran plantación forestal. De igual modo, píxeles de color verde oscuro, son aquellos que corresponden a

bosque primario, se encuentran esporádicamente dentro del bloque de la plantación. En la zona de trabajo 2, esta situación se ilustra con los píxeles que bordean al río. El agua aparece correctamente clasificada, sin embargo aparecen píxeles asignados a la categoría de nubes bordeando al río. Finalmente en la zona de trabajo 3, los errores de clasificación por el efecto de borde, son visibles alrededor de las sombras de las nubes y de las nubes mismas. En el primer caso se asignan píxeles sistemáticamente a la categoría de suelo descubierto y en el segundo a la categoría de agua.

Lo descrito anteriormente y los bajos índices de acierto (expresados por el Índice Kappa), permite descartar la posibilidad de distinguir bosque secundario en la región estudiada, empleando bandas adicionales de textura, definidas por un coeficiente de variación en ventanas de 3 x 3, 5 x 5 y 7 x 7 píxeles y clasificando con el algoritmo de máxima similitud. No quiere decir esto, que no sea un buen procedimiento para distinguir otras categorías de cobertura, sin embargo las características propias de este tipo de bosque no permiten un acierto positivo. Además se experimentó con una sola medida de textura. Otros autores han incorporado de manera más exitosa bandas de textura, pero definidas por otro tipo de variables, como lo son *homogeneidad* y *entropía* (Franklin, et_al, 2000). No se reporta problemas asociados al efecto de borde descrito anteriormente y aunque se trata de un estudio realizado en regiones fuera del trópico, no se descarta su posible aplicación.

Clasificación espacial: fortalezas y posibilidades de expansión

Por otro lado, los métodos espaciales de clasificación, sí presentan un rango importante de posibilidad de identificación acertada. Para ser una prueba inicial y ser realizada con la totalidad de bandas brindadas por el sensor y sin ningún proceso intermedio, estos métodos prometen mucho. Aunque no se constituyen en una herramienta de reciente creación, los métodos de clasificación de análisis espacial, son menos empleados debido a su relativa mayor complejidad (Li, Mausel y Wu, 1994). El hecho de tratar a un píxel dentro de una imagen, no solamente por su valor digital correspondiente sino en mayor medida por su

entorno implica la capacidad de saltar las limitaciones de pobre separabilidad espectral dadas en muchos tipos de cobertura forestal en los trópicos.

Hay que hacer la diferencia clara en que el programa MultiSpec, es desarrollado para un medio meramente académico y de investigación de técnicas de procesamiento y en muchos casos no es utilizada para estudios masivos. Con esto no se quiere decir que no sea adecuada, más bien que sus posibilidades están en cierto grado limitadas por el tamaño del programa. Esta es una aplicación sencilla y dirigida a solo implementar algoritmos de procesamiento de diversos tipos. Sus cualidades fueron verificadas en un trabajo realizado en Brasil y desarrollado por Li, Mausel y Wu (1994), con la idea de identificar bosques secundarios. La fuerte distribución espacial de este tipo de cobertura en la región del Amazonas, permitió que el resultado fuera visiblemente bueno. Además, en dicha región no se tuvo la gran diversidad de usos del suelo que determinan una amplia gama de tipos de cobertura para las zonas de trabajo trazadas. Sin embargo, desde ese momento, dichos autores plantearon la posibilidad de comparar al método basado en ECHO contra métodos basados en máxima similitud.

En caso contrario, GRASS es un paquete SIG de avanzada. Ha sido desarrollado para estaciones de trabajo corriendo el popular sistema operativo UNIX, así como en sus derivados y similares. Como su código fuente ha estado libre a cualquier usuario potencial, las mejoras y corrección de errores no se hacen esperar. Este paquete incluye funciones encontradas en prácticamente todo programa SIG de tipo comercial, con la diferencia de que es gratis. Para el caso particular del procesamiento de imágenes, los algoritmos se han implementado de manera que resuelvan de modo eficiente los problemas que se deseen. El caso particular de SMAP, que es el nombre de este algoritmo de clasificación espacial se ha desarrollado con base a varios trabajos de investigación en el campo del procesamiento digital, que han finalizado en métodos avanzados para el escaneo de imágenes y texto. A diferencia de MultiSpec, se ha logrado evitar los errores de clasificación asociados a la independencia de las regiones homogéneas creadas, lo que permite obtener un resultado verídico y confiable.

SMAP permite obtener los valores de clasificación más altos para la categoría de bosque secundario, acompañado de una inmejorable calidad visual, por lo que se concluye que este es el método más adecuado para tratar de distinguir bosques secundarios en la región estudiada. En principio es factible extender su ámbito de acción a otras regiones del trópico que posean bosques en un ámbito altitudinal de 0 a 500 metros sobre el nivel del mar. Se hace esta distinción ya que no es posible afirmar de que dichos resultados sean igualmente favorables en regiones montañosas y quebradas. Para esto, sería necesario emplear bandas de sensores como el TM y generar las bandas extra de humedad, verdor y brillo, que se han probado antes con buenos resultados (Helmer, 1988). Su aplicación todavía no está disponible para ETM+, ya que requiere de un proceso de calibración de coeficientes muy complejo.

Metodología alterna propuesta

Reconociendo la capacidad del método de clasificación espacial SMAP y teniendo en cuenta que aún así existe un alto grado de traslape entre categorías (tipos de bosque, tipos de agua, tipos de cultivo, etc), es posible plantear un diseño alternativo de una metodología que trabaje de modo secuencial, descartando o haciendo de lado, las categorías que son absolutamente bien clasificadas. Esto permite, reestirar el rango de valores de la imagen resultante y por lo tanto, aumentar el contraste entre las categorías faltantes. En GRASS, esta metodología estaría ayudada por la capacidad de emplear máscaras que bloqueen grupos de píxeles al comando de clasificación SMAP. Este procedimiento se resolvería de modo iterativo, hasta lograr una composición temática altamente acertada. El número de iteraciones y el grado de detalle a lograrse dependería de:

- Número y tipo de subcategorías a distinguir: Si se deseara clasificar sitios con diferentes tipos de plantación forestal, el número de subclasificaciones sería igual al número de diferentes especies.
- Número y características de las bandas del sensor remoto empleado: En el caso de ETM+, se podría trabajar con el conjunto de bandas inicial (1,2,3,4,5,7), o bien, en

este nivel, generar bandas adicionales (NDVI, brillo, humedad y verdor), si se trabajara con TM.

Los algoritmos de procesamiento de imágenes trabajan con archivos raster con 256 niveles de grises, o dicho de otro modo imágenes con una profundidad de colores de 8 bits (aunque es el caso que pueden desplegar imágenes con profundidad de colores de 24 bits, pero solamente con el fin de mejorar la calidad visual desplegada en pantalla). El nivel de detalle de un archivo raster esta dado por 256 posibles valores digitales. La clasificación inicial se realiza con una imagen bajo esta condición. Con la metodología alterna propuesta, al colocar la máscara, el algoritmo no tratará con una variación desde 0 a 255, sino con un rango considerablemente menor. Si se reclasifica la imagen original con la máscara, el resultado final, sería básicamente idéntico al primero (sin máscara y con todas las categorías).

Para solucionar este problema, se deben manipular las imágenes correspondientes a cada banda del sensor. Las operaciones a realizar (descritas en detalle en la sección de revisión bibliográfica) se denominan *Mejora de imágenes*. En particular, el procedimiento corresponde a la manipulación del contraste de los elementos superficiales registrados por el sensor. El estiramiento del contraste de los valores digitales de una imagen en particular puede ser de tres tipos (Lillesand y Kiefer, 1999):

- Estiramiento Lineal: Consiste básicamente de una reclasificación de los valores digitales, dado un rango inicial a un rango de 0 a 255. En este caso, no se consideran la frecuencia de ocurrencia de los valores en el archivo inicial. Aunque implica una mejora visual considerable, no es un procedimiento que respete la integridad radiométrica de los valores digitales;
- Estiramiento de contraste por ecualización del histograma: Este caso toma en consideración la frecuencia de ocurrencia de los valores digitales de una imagen y asigna estos dependiendo de una mayor o menor frecuencia, de tal modo de que se

respetar y mejorar de modo ponderado las diferencias radiométricas existentes en la imagen inicial;

- Estiramiento especial: Este corresponde a una demarcación y aumento de contraste solamente a secciones definidas del rango de 0 a 255. Se plantea en casos en que se conoce de antemano la reflectancia correspondiente a cierto tipo de cobertura a ser estudiada (por ejemplo, que se conozca que el bosque en general, presenta valores digitales de 54 a 83, por lo que solo se trata ese rango y se estira desde 0 a 255). Sería ideal conocer de antemano los rangos de cada clase de cobertura y solamente trabajar estos. Sin embargo, para una misma imagen, para imágenes de diferentes fechas e imágenes de diferentes sensores, los registros radiométricos varían considerablemente. Particularmente en el caso de ETM+, al momento de escribir este documento, no se conocía de ecuaciones verificadas de normalización de imágenes registradas en tiempos distintos y sólo se conocen para el sensor TM y MSS.

Para ilustrar este procedimiento de pre-procesamiento, se muestra en la figura 20, la comparación visual de una sección de la imagen satelital, antes y después de aplicar el estiramiento del contraste.

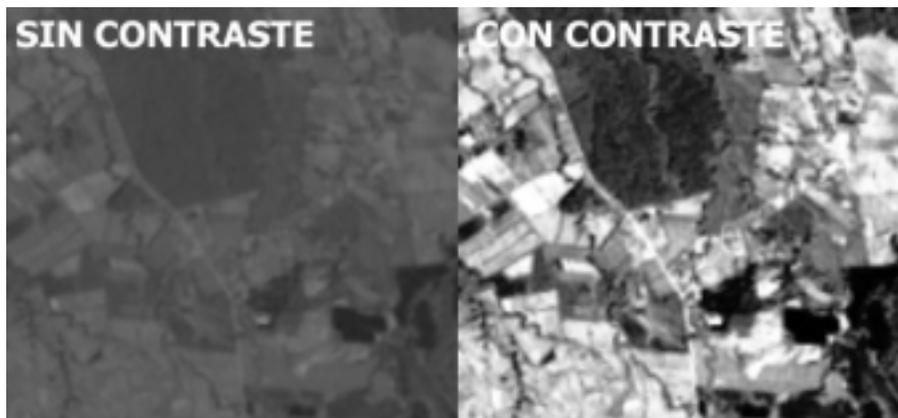


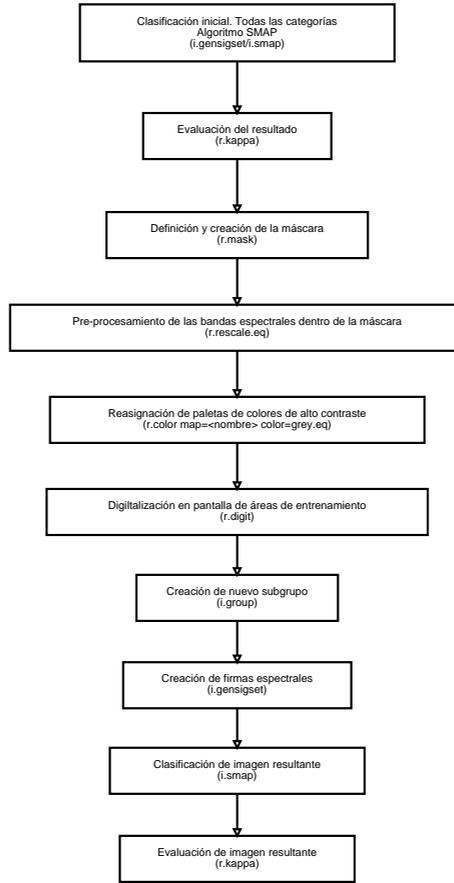
Figura 20. Comparación del efecto de la modificación del contraste en la apreciación de elementos superficiales registrados por el sensor.

Este tipo de pre-procesamiento puede realizarse de modo temporal (modificando la paleta de colores) o bien de modo permanente modificando los valores digitales de los píxeles de un archivo en particular (ERDAS, 1997). En el primer caso, es útil para definir áreas de entrenamiento para un primer paso de clasificación (de hecho así se realizó anteriormente) y no implica modificar o generar un nuevo archivo. En el segundo, este procedimiento genera un paquete nuevo de bandas y la clasificación de estas dentro de una máscara generará un resultado, considerablemente diferente y mejorado al inicial.

La metodología alterna planteada como consecuencia del buen resultado obtenido con el algoritmo SMAP, consiste primero en reclasificar la imagen temática obtenida y eliminar de esta toda aquella categoría que no corresponda a algún tipo de cobertura forestal. Posteriormente se crea un archivo de máscara que se aplica a todas las bandas. Aplicada esta máscara, el preprocesamiento realiza un estiramiento del contraste de ecualización del histograma. Se realiza de este modo a fin de respetar las diferencias radiométricas que establecen y definen las diferencias existentes de cada tipo de cobertura.

En la figura 21, se muestra la secuencia de comandos para aplicar la metodología planteada. Se parte de la imagen clasificada por el comando *i.smap*, en la cual, todas las demás categorías incluidas obtuvieron índices de clasificación superiores (90 % o más). Esta capa se reclasifica con *r.reclass*, para generar una capa con dos valores solamente: 1 con todos los píxeles que correspondieron en la imagen clasificada a algún tipo de cobertura forestal (y en el caso particular de la zona de trabajo 1, se incluyó a la categoría de plantación de cítricos), y valor nulo, a todos los demás píxeles que no correspondan a esta regla. Con este archivo reclasificado, se crea la máscara empleando *r.mask*, y se indica que los valores de 1 estarán dentro de la máscara, es decir aquellos píxeles a ser tratados a continuación, y los valores nulos serán ignorados por los comandos siguientes. Posteriormente se crean las nuevas capas de cada banda por medio del método de preprocesamiento descrito anteriormente. Se aplica *r.rescale.eq* para todas las bandas a ser incluidas (se eliminó la banda adicional del NDVI, ya que provocaba una clasificación

Figura 21. Procedimiento alternativo de clasificación basado en algoritmo SMAP GRASS



errónea de píxeles del tipo de cobertura de cítricos contra bosque secundario). A cada nueva banda creada, se le asigna además una paleta de colores de nivel de grises también con estiramiento del contraste a fin de mejorar aún más la interpretación visual. Esto no modifica las nuevas capas y solamente se emplea para fines de interpretación en pantalla y delimitación de áreas de entrenamiento. Debido a que se tratan al momento nuevas capas dentro de una máscara, no fue posible realizar el trazado de áreas de entrenamiento en IDRISI y posteriormente importarlas a GRASS. Para digitalizar en pantalla, se emplea el comando *r.digit*. Este comando trabaja de modo interactivo con el usuario, preguntando el tipo de elemento a ser delimitado en pantalla (puntos, líneas y polígonos). En GRASS, las áreas de entrenamiento se tratan como capas raster (aunque la conversión de raster a vector y viceversa es una operación muy simple). Una limitante en esta aplicación, es que hacer un acercamiento en una imagen (con *d.zoom*) implica delimitar una nueva región de trabajo, por lo que un archivo raster de un sección aumentada, no corresponderá a la imagen inicial. Para sobreponer esta limitante del controlador gráfico de la aplicación, se modificó la resolución gráfica virtual de la pantalla. Esta opción es controlable gracias a la versatilidad del servidor de video XFree86. Esta operación consiste en reducir la resolución de pantalla del monitor pero sin ajustar el límite del escritorio a las dimensiones del monitor, de modo tal de que es posible aumentar en una resolución de 1280 x 1024 una sección de la pantalla en resolución de 640 x 480. De este modo se aumenta el detalle de la imagen sin modificar la región de trabajo.

Como consecuencia del estiramiento del contraste para todas las banda incluidas, ciertas regiones antes consideradas como de una sola categoría presentaron variaciones apreciables que implicaron la definición de un nuevo conjunto de categorías a definir. En el cuadro 9, se muestran las categorías definidas dentro de cada máscara para cada zona de trabajo.

Cuadro 9. Categorías de cobertura forestal definidas dentro de la máscara binaria para cada zona de trabajo.

CATEGORIA	REGION		
	ZT1	ZT2	ZT3
Bosque primario	x	x	x
Bosque secundario (I)	x	x	x
Bosque secundario (II)	x	x	
Bosque intervenido		x	
Plantación forestal (I)	x		x
Plantación forestal (II)	x		x
Plantación de cítricos	x		

Para el caso particular de bosques secundarios y plantaciones forestales, que se diferencian mediante los símbolos I y II, ello es una indicación de que se lograron definir áreas de entrenamiento donde se conoce la existencia de categorías específicas, sin embargo, no se le asigna un nombre en particular (clase de edad o bien especie), ya que no se dispone de los medios para la verificación. Se hace la diferencia ya que presentaban un alto grado de contraste en pantalla lo que asegura algún grado de diferencia espectral dentro de la máscara. Sin embargo, al evaluar el resultado se manejaron de manera grupal.

Definidas y trazadas las áreas de entrenamiento, se procede a la creación de las firmas espectrales con el comando *i.gensigset*. Se debe crear para cada zona de trabajo un subgrupo que contenga las bandas recientemente creadas, de modo que solamente se ejecute el comando en ellas (se emplea el comando *i.group*). Finalmente, para cada firma espectral en cada zona de trabajo, se aplica nuevamente el comando *i.smap*, a fin de reclasificar la imagen.

Se evalúa el resultado final, con el comando *r.kappa*, el cual genera la matriz de error y los índices kappa y generales correspondientes.

La composición final se crea, eliminando la máscara y sobreponiendo la clasificación inicial con la clasificación posterior. Esta operación se puede efectuar de dos maneras: primero, multiplicando la primera clasificación por la máscara, a fin de blanquear las zonas con algún tipo de cobertura forestal y luego sumando esta capa a la última imagen temática realizada; y segundo, se pueden desplegar las dos capas, al dispositivo virtual *CELL* de modo que se genere una nueva composición temática. Esta última es posiblemente la más adecuada debido a que se trabajó con píxeles de valor nulo y cualquier operación sobre estos será un resultado nulo.

Resultados de reclasificación con máscara

Cada imagen temática resultante del procedimiento alternativo planteado, fue evaluada del mismo modo que en el primer procedimiento de clasificación. La única variación introducida es que se fusionaron las categorías de clases similares, ya sea plantaciones forestales o bien bosques secundarios (ver cuadro 8). Las pruebas, debido al nivel de detalle asumido fueron contrastadas con las áreas de entrenamiento trazadas.

A continuación en el cuadro 10, se presenta de manera resumida los índices kappa para cada categoría de cobertura forestal dentro de cada máscara y el índice general de clasificación.

Cuadro 10. Resultados de clasificación de la imagen satelital, en función del índice kappa de las categorías dentro la máscara binaria, para cada zona de trabajo.

Categoría de Cobertura	ZONA DE TRABAJO					
	ZT1		ZT2		ZT3	
	Indice Kappa	Indice General	Indice Kappa	Indice General	Indice Kappa	Indice General
Bosque Primario	79.27%		95.13%		98.94%	
Bosque Secundario	84.55%		94.77%		96.01%	
Bosque Intervenido	x	91.44%	92.91%	97.16%	x	99.04%
Plantación Forestal	97.08%		x		99.00%	
Plantación de Cítricos	99.13%		x		x	

Fuente: Anexo 2.

Los resultados anteriores son apreciablemente superiores a los obtenidos en el paso anterior con la aplicación individual de i.smap, sobre un conjunto de bandas sin modificar. Con resultados que superan en general el 90%, los números son alentadores. Sin embargo, hay que recordar que se han realizado las pruebas de error contra las áreas de entrenamiento trazadas en pantalla y aunque debido a la reducida gama de categorías y al aumento a las diferencias relativas radiométricas, no es un método enteramente válido.

Como caso particular, se puede resaltar la situación de la zona de trabajo uno. La categoría de plantaciones forestales posee un acierto muy adecuado, debido a que el procedimiento de estiramiento del rango, a logrado reducir el grado de traslape con otras categorías vecinas. En el caso del bosque secundario, es interesante el hecho de que fue posible determinar visualmente, al menos dos tipos de bosque secundario, que en teoría podría corresponder a grados de desarrollo de éstos rodales. Claro está, la clasificación y posterior evaluación no los considera por separado debido a la imposibilidad de validación apropiada. Además se tiene la situación de las plantaciones de cítricos que se desarrollan en la región a fin de brindar la materia prima a las industrias locales. Aunque el acierto es considerablemente bueno, siempre se presenta un importante grado de clasificación errónea (efecto de ruido), en zonas correspondientes a bosques secundarios y bosques primarios. En la primer situación, muy posiblemente, la razón se debe por semejanzas espectrales de cierto grado estructural de desarrollo del bosque secundario con una plantación de cítricos; y en el segundo caso, por razones de confusión al momento de diferenciar entre bosque secundario y bosque primario.

Para la zona de trabajo 2, es importante destacar el hecho de que se incluyó la categoría de bosque intervenido. De acuerdo a lo provocado por el estiramiento del contraste en las bandas empleadas y con la existencia de puntos de control que reportaban este tipo de cobertura dentro de la zona de trabajo dos, fue posible trazar polígonos de entrenamiento para esta categoría. El resultado es considerablemente acertado. La confusión existente

tiende más a incluir píxeles de bosque primario que píxeles de bosque secundario. De manera similar, como en la zona de trabajo anterior, fue posible distinguir visualmente, al menos dos posibles tipos de bosques secundarios. Se trazaron áreas de entrenamiento para cada una pero se evaluaron de manera grupal por las razones expuestas anteriormente. El grado de acierto general y por categoría supera el 93 % presenta menor grado de confusión con la cobertura de bosque primario.

Finalmente, en la zona de trabajo 3, se presenta el grado de acierto más elevado, con un 99% y un mínimo de 96% para la categoría de bosque secundario. Este elevado resultado estaría en parte respaldado por la reducida complejidad de tipos de cobertura forestal existente. Fue posible distinguir al menos dos tipos de cobertura de plantaciones forestales, de la cual se sabe que una corresponde a una plantación comercial de *Gmelina arborea*, sin embargo, también fueron evaluadas de forma grupal.

Debilidades del planteamiento alternativo

A pesar de poder obtener buenas aproximaciones de la correspondencia de los píxeles a una u otra categoría empleando el método alternativo planteado, hay que resaltar de que es un procedimiento tedioso. En principio, el nivel de detalle que exige el problema inicial delimita el número de iteraciones del procedimiento, sin embargo el grado de traslape que existe entre dos categorías en particular afecta considerablemente el desempeño del procedimiento, entendiéndose como desempeño, el tiempo y número de pasos requerido para afinar el resultado final. El caso particular que ilustra esta situación, se presenta en la zona de trabajo 1 para las categorías de plantación de cítricos y bosque secundario. Debe existir algún nivel de desarrollo del bosque secundario o bien algún otro tipo de cobertura no considerada, que sea muy similar espectralmente a una plantación pura de cítricos. A pesar de realizar trazados distintos de áreas de entrenamiento, no fue posible reducir el grado de traslape y mejorar el resultado final. Este traslape no implica que el resultado final sea bajo. Los índices de acierto obtenidos rondan el 90%, lo cual es considerablemente superior a la primera clasificación realizada, sin embargo, se presenta el problema descrito

anteriormente como *ruido*, es decir, píxeles de una categoría ubicados en sitios no correspondientes. Esta situación podría indicar el límite máximo de la capacidad del procedimiento para distinguir bosque secundario.

Se podría plantear una posibilidad para eliminar este problema: conociendo de que se trata de un cultivo comercial, es posible realizar directamente una consulta a los propietarios de las fincas de plantaciones de cítricos y así obtener la ubicación geográfica de estos lugares y simplemente adicionar los píxeles correspondientes en la imagen a la máscara anterior. De esta manera, existiría total seguridad de que no se está clasificando erróneamente bosque secundario ni otra categoría similar. Se podría operar de igual manera, para cualquier tipo de cultivo extensivo conocido, como por ejemplo, plantaciones de banano (aunque no existe problemas de clasificación errónea con este tipo de cobertura) y plantaciones de palmito (que podría estar siendo confundido con alguna etapa de bosque secundario en la zona de trabajo 2).

Estimación aproximada de área de bosques secundarios

A partir de los resultados obtenidos se realizó la cuantificación aproximada del área correspondiente a cada tipo de cobertura del suelo para cada zona de trabajo. En el cuadro siguiente, se muestra el área aproximada y su proporción correspondiente para cada tipo de cobertura listado en el cuadro 6. Se incluye la contabilización del área que se vió obstruída por nubes y sombras.

Cuadro 11. Cuantificación aproximada del área correspondiente a cada categoría de cobertura, para las tres zonas de trabajo estudiadas.

Categoría	AREA					
	ZT1		ZT2		ZT3	
	hectáreas	%	hectáreas	%	hectáreas	%
Nubes	10417.14	9.26	9002.34	11.77	2143.09	2.9
Sombras	4524.39	4.02	4884.39	6.39	1681.23	2.27
Bosque primario	5799.78	5.16	9433.71	12.34	2901.5	3.93
Bosque intervenido	---	---	3925.44	5.13	---	---
Bosque secundario	<i>21014.75</i>	<i>18.69</i>	<i>14575.86</i>	<i>19.06</i>	<i>10890.6</i>	<i>14.73</i>
Plantación forestal	6517.44	5.8	---	---	2670.74	3.61
Plantación de banano	---	---	4946.13	6.47	12098.54	16.37
Plantación de caña	6345.99	5.64	---	---	---	---
Plantación de piña	2335.23	2.08	---	---	---	---
Plantación de cítricos	2174.85	1.93	---	---	---	---
Plantación de palmito	---	---	4885.92	6.39	---	---
Suelo descubierto	6963.12	6.19	399.42	0.52	4081.26	5.52
Pastos	45686.61	40.63	23384.7	30.58	32303.71	43.71
Urbanísmo	---	---	---	---	5141.88	6.96
Agua	665.28	0.59	1037.34	1.36	---	---
Total	112444.58	100	76475.25	100	73912.55	100

Para las tres zonas de trabajo, la proporción cubierta por bosques secundarios supera el 10% del área total. En la zona de trabajo 1, para un 18.69%, el área aproximada de bosques secundarios, corresponde a 21.014 hectáreas del total. Para la zona de trabajo dos, aunque la proporción es mayor, para un 19.06% del total, el área es de 14.575 ha. Finalmente, para la zona de trabajo tres, con la menor proporción de bosque secundario, con un 14% del área total, se reportan 10.890 hectáreas cubiertas con este tipo de bosque.

Conclusiones

Los resultados obtenidos son necesariamente de naturaleza preliminar. Esto se debe a que se ha realizado el experimento bajo condiciones limitadas a las posibilidades de comprobación directa del campo. Los procedimientos planteados en un principio arrojaron diferencias apreciables en cuanto a las posibilidades de distinción de una u otra categoría. Para cada uno de los métodos planteados se concluye entonces que:

- Los métodos basados en textura, es decir, aquellos que implican la adición de una banda o capa extra que contenga como variable de textura el coeficiente de variación de los píxeles dentro de un kernel móvil de tamaño variable, 3 x 3, 5 x 5 y 7 x 7 píxeles, no permiten lograr identificar acertadamente los sitios con cobertura de bosques secundarios en las regiones estudiadas. El aporte dado por la adición del canal extra de textura es mínimo y provoca que el algoritmo de clasificación de máxima similitud, asigne erróneamente categorías a aquellos píxeles que estén ubicados en regiones de cambio. Esta situación se debe a que la medida de textura empleada es básicamente un detector de bordes. Aquellos píxeles ubicados entre dos regiones de categorías diferentes, presentan un valor de coeficiente de variación mayor que los píxeles dentro de cada región. Cada región, aunque posiblemente de diferente naturaleza, es igualmente homogéneo, por lo que no se presenta ninguna diferenciación entre cada una. El análisis de textura debería entonces dirigirse a la interpretación visual para la identificación de los límites de futuras áreas de entrenamiento para cada tipo de categoría.
- Los métodos basados en el análisis espacial de las imágenes presentan las mejores posibilidades para la identificación acertada de bosques secundarios en las zonas estudiadas. Los posibles errores registrados son considerablemente bajos, ya que el acierto obtenido supera el 85%, Como única variable limitante, está el hecho de que

se alcance rápidamente el máximo de la capacidad del sensor en diferenciar cierto tipo de categorías de otro.

- Los métodos basados en componentes principales, tampoco son adecuados para permitir la identificación adecuada de bosques secundarios y cualquier otro tipo de cobertura que presente alto grado de traslape espectral (tipos de bosque, tipos de cultivos, etc). Los componentes principales son bandas extraídas de un conjunto de bandas inicial (1,2,3,4,5,7), que registran la máxima variabilidad posible de todas las bandas. Es decir, en principio los canales de componentes principales, contienen toda la información de las bandas iniciales. El número de bandas extra a generar está dada en función del problema a resolver, pero en general, solamente una banda en particular, acumula cerca del 95% de la variación existente en todas las bandas iniciales. Basicamente la utilidad inmediata, sería la de poder distinguir fácilmente categorías extremas de cobertura (o bien de obstrucciones visuales). Es decir, que con la ayuda de los componentes principales, se puede eliminar de una escena en particular, nubes sombras y agua y de ese modo comenzar a filtrar hasta llegar a categorías más finamente enlazadas.
- Los métodos basados en clasificación no supervisada, quedan totalmente descartados en la identificación de bosques secundarios. En general para las zonas de estudio el grupo de categorías delimitado como *BOSQUE* en el árbol de clasificación mostrado en la metodología, no presenta suficiente separabilidad espectral para que sean agrupados efectivamente por el algoritmo *cluster*. El agrupamiento resultante, es difícil de interpretar y ajustar a un esquema de categorías definidas para una región de estudio en particular. Las categorías que delimitaría un método de este tipo, son necesariamente amplias (bosque, agua, nubes), por lo que no son aplicables al problema inicialmente planteado.
- La metodología alterna de clasificación basada en el algoritmo SMAP, proporciona una opción viable para la ubicación espacial de aquellos sitios bajo cobertura de bosque secundario. En principio, su aplicación estaría abierta a todas aquellas zonas con un rango altitudinal de 0 a 500 metros sobre el nivel del mar. El estiramiento del

contraste en las regiones dentro de una máscara creada a partir de la reclasificación de la imagen temática inicial, permite mejorar la interpretación visual de los tipos de cobertura restantes y aumentar de manera considerable los resultados de clasificación de categorías pobremente separables radiométricamente.

- La cobertura de bosques secundarios para todas las regiones de trabajo estudiadas superan el 10% del total del área, para un máximo de aproximadamente 20.000 hectáreas en la zona de trabajo 1 hasta un mínimo de aproximadamente 10.000 hectáreas en la zona de trabajo 3. En la mayoría de los casos, no se encuentran bloques homogéneos de bosques secundarios que superen las 100 hectáreas lo que resalta su naturaleza altamente fragmentada.

Recomendaciones

La investigación está dirigida a obtener soluciones de problemas cotidianos y también a señalar posibles rumbos tendientes a afinar los resultados buscados. En vista de lo anterior, se hace necesario plantear las siguientes inquietudes como las recomendaciones del presente trabajo:

- Es necesario evaluar más detalladamente las opciones asociadas a la incorporación de bandas extra de textura al conjunto inicial de bandas o bien, un conjunto particular de bandas transformadas que contengan alguna capa con una medida de textura en particular. Se deben explorar otras medidas de textura existentes y reconocer sus posibilidades técnicas reales.
- Con el fin de validar de manera inmediata el resultado de la clasificación de una imagen satelital, es necesario realizar un balance de la capacidad de emplear áreas de entrenamiento como muestras de evaluación de las imágenes temáticas creadas. La razón que justificaría tal esfuerzo es que, si se desea realizar un estudio de cambio en la cobertura del suelo a través del tiempo (ventanas temporales de 5 o más años), no es

posible obtener puntos de control de épocas pasadas, así que no sería verificables los resultados.

- Es necesario realizar el diseño e implementación de un registro completo de puntos de control y referencia para Costa Rica. Esta sería alimentada por la contribución de sus propios usuarios. Los puntos serían recopilados según lo expuesto en las secciones anteriores y se mantendría la base de datos al alcance libre y sin restricciones de cualquier individuo interesado. De este modo, se genera un recurso en extremo útil y necesario que se mantendría gracias a la necesidad de tal información y no como consecuencia de una presión de tipo económico.
- Finalmente, se constituye como una opción muy atractiva, la aplicación del algoritmo SMAP en la identificación acertada, tanto de bosques secundarios como de otros tipos de cobertura de algún interés en particular a lo largo del territorio nacional. Particularmente es necesario ensayar las herramientas que ponen a disposición los creadores del software de código abierto y a la vez contribuir de manera directa o indirecta a la mejora de éstos.

BIBLIOGRAFIA

- BUDOWSKI, G. 2000. **Los bosques secundarios en el mundo; cómo comparar su manejo con bosques primarios y con plantaciones forestales.** En Memoria Seminario; Avances en el manejo del Bosque Secundario en Costa Rica. Proyecto COSEFORMA/GTZ. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. pp 1-4.
- COSEFORMA. 1994. **Inventario Forestal de la Región Huetar Norte; Resumen de resultados.** COSEFORMA, GTZ. Costa Rica. 27p.
- CARRILLO, O. 2000. **Guácimo blanco, Cirrú y Fosforillo, especies maderables del bosque secundario.** En Memoria Seminario; Avances en el manejo del Bosque Secundario en Costa Rica. Proyecto COSEFORMA/GTZ. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. pp 96-104
- CASTILLO, M. 1999. **Creación y validación de un mapa de cobertura vegetal, usando imágenes del satélite Landsat 5, en Puerto Viejo, Sarapiquí.** Informe de Práctica de especialidad, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Cartago. 47 p.
- CHIARI, R. 2000. **Prescripción y aplicación de tratamientos silviculturales en bosques secundarios de 8 y 25 años, en Boca Tapada de Pital, San Carlos.** En Memoria Seminario; Avances en el manejo del Bosque Secundario en Costa Rica. Proyecto COSEFORMA/GTZ. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. pp 22-34.
- CHIARI, R. 1999. **Prescripción y aplicación de tratamientos silviculturales en bosques secundarios de 8 y 25 años, en Boca Tapada de Pital, San Carlos.** Informe de Práctica de especialidad, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Cartago. 103 p.
- CCRS. 1998. **Fundamentals of Remote Sensing Tutorial. Canadian Center of Remote Sensing.** <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/tutorial/tutore.html>
- CCT-CIEDES. 1998. **Estudio de cobertura forestal actual (196-1997) y de cambio de cobertura para el periodo entre 1986/87 y 1996/97 para Costa Rica.** CCT, CIEDES, FONAFIFO, CI, UCR. San José, Costa Rica. 20 p.
- DAUS, S.; GÜERO, M. 1987. **Quantification of the surface of forestry lands in the Republic of Niger using a remote sensing aided mapping procedure.** En Evaluación de tierras y recursos para la planeación nacional en las zonas tropicales. United States Department of Agriculture (USDA), USA. pp 203-208
- EDC DAAC User Services. 1999. **The Worldwide Reference System (WRS).** <http://landsat.gsfc.nasa.gov/documentation/wrs.html>
- ERDAS. 1997. **ERDAS Field Guide.** Cuarta Edición. Erdas Inc, Atlanta, Georgia, U.S.A. 442p.
- FOODY, G.; HILL, R. 1996. **Classification of tropical forests classes from Landsat TM data.** En: International Journal of Remote Sensing. Taylor & Francis, Ltd. Canada. pp. 2353-2367
- FOURNIER, L. 1997. **Recursos Forestales: Uso y Conservación.** En: Desarrollo Sostenible; La opción para Costa Rica. Academia Nacional de Ciencias. San José, Costa Rica. pp. 77-102

- FRANKLIN, S.; HALL, R.; MOSKAL, M.; MAUDIE, A. 2000. **Incorporating texture into classification of forest species composition from airborne multispectral images.** En: International Journal of Remote Sensing. Taylor & Francis, Ltd. Canada. pp. 61-79
- HELMER, E. 1988. **Identificación del uso de la tierra y etapas sucesivas del bosque en las reservas de los ríos Santos y río Macho.** En Simposio de Conservación del Bosque en Costa Rica. Academia Nacional de las Ciencias, San José. 180p.
- JACOBS, M. 1981. **The Tropical Rain Forest; a first Encounter.** Springer-Verlag, Alemania. Pp 89- 99
- KIMES, D.; NELSON, R.; SALAS, W.; SKOLES, D. 1999. **Mapping secondary tropical forest and forest age from SPOT HRV data.** En: International Journal of Remote Sensing. Taylor & Francis, Ltd. Canada. pp. 3625-3640
- LEHMANN, P. 1992. **Deforestation and Changing Land-use Patterns in Costa Rica.** En: Changing Tropical Forests; Historical perspectives on today's challenges in Central America & South America. IUFRO-FHS. pp. 58-76
- LILLESAND, T.; KIEFER, R. 1999. **Remote sensing and image interpretation.** John Wiley and Sons, USA. Cuarta edición. 724p.
- LI, Y.; MAUSEL, P.; WU, Y. 1994. **Discrimination between advanced secondary succession and mature moist forest near Altamira, Brazil, using Landsat TM data.**
<http://www.sgi.ursus.maine.edu/gisweb/spatdb/acsm/ac9440.html>.
- LAMPRECHT, H. 1990. **Silvicultura en los Trópicos; Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas -posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido-.** Traducción por: Antonio Carrillo. Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Alemania. 335p
- LOPEZ, W. 2001. **Técnicas y Comprobación del uso del GPS (Sistema de Posicionamiento Global) para el Levantamiento Forestal.** Informe de Práctica de especialidad, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Cartago. 47 p.
- MORALES, M. 2000. **Prescripción de tratamientos silviculturales en bosques de 10 y 18 años en Florencia de San Carlos.** En Memoria Seminario; Avances en el manejo del Bosque Secundario en Costa Rica. Proyecto COSEFORMA/GTZ. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. pp 22-34.
- MORALES, M. 2000. **Lineamientos para el manejo de un bosque secundario a partir de una evaluación silvicultural, Florencia, San Carlos, Costa Rica.** Informe de Práctica de especialidad, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Cartago. 144p.
- ORTIZ, E. 1999. **Introducción a Sistemas de Información Geográfica (Con referencias a IDRISI Windows, 2.0.** Serie de Apoyo Académico N°28. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR, Cartago, Costa Rica. 53p.
- PIERCE, S. 1992. **Environmental History of La Selva Biological Station: How colonization and deforestation of Sarapiquí Canton, Costa Rica, have altered the ecological context of the station.** En: Changing Tropical Forests; Historical perspectives on today's challenges in Central America & South America. IUFRO-FHS. pp. 40-57

- PUIG, C. 1996. **Identificación de las fases de desarrollo de bosques secundarios húmedos tropicales de tierras bajas en Costa Rica mediante análisis digital.** Tesis de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba. pp 4-45
- QUESADA, R. 2000. **Propuesta para el manejo del bosque secundario en Costa Rica; Experiencias de manejo forestal.** En Memoria Seminario; Avances en el manejo del Bosque Secundario en Costa Rica. Proyecto COSEFORMA/GTZ. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. pp 11-21.
- QUIROS, S. 2000. **Determinación y aplicación de tratamientos silviculturales en el bosque secundario de 25 años en Pénjamo, Florencia, San Carlos, Alajuela, Costa Rica.** En Memoria Seminario; Avances en el manejo del Bosque Secundario en Costa Rica. Proyecto COSEFORMA/GTZ. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. pp 22-34.
- QUIROS, S. 1999. **Determinación y aplicación de tratamientos silviculturales en el bosque secundario de 25 años en Pénjamo, Florencia, San Carlos, Alajuela, Costa Rica.** Informe de Práctica de especialidad, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Cartago. 91 p.
- REDONDO, A. 1998. **Estudio del potencial de uso del recurso forestal maderable del bosque secundario tropical en la región Huetar Norte, Sarapiquí -Costa Rica-.** Informe de Práctica de especialidad, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Cartago. 119 p.
- REDONDO, A.; VILCHEZ, B.; CHAZDON, R. 2000. **Número de individuos, incremento diamétrico y área basal en cuatro bosques secundarios de la región Huetar Norte, Sarapiquí, Costa Rica.** En Memoria Seminario; Avances en el manejo del Bosque Secundario en Costa Rica. Proyecto COSEFORMA/GTZ. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. pp 1-4.
- SEGURA, L. 2000. **Tratamientos Silviculturales aplicados al manejo de tres bloques de bosque secundario bicados en Coope San Juan, Aguas Zarcas, San Carlos, Costa Rica, 2000.** Informe de Práctica de especialidad, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Cartago. 143p.
- SMITH, J.; SABOGAL, C.; JONG, W.; KAIMOWITZ, D. 1997. **Bosques secundarios como recurso para el desarrollo rural y la conservación ambiental en los trópicos de América Latina.** En Memorias del Taller Internacional sobre el estado actual y potencial de manejo y desarrollo del Bosque Secundario Tropical en América Latina. Pucallpa, Perú. pp 79-106.
- TELSAT. 2000. **Sensor Type; ETM+ (LANDSAT-7) (Enhanced Thematic Mapper Plus).**
<http://telsat.belspo.be/satellites/satelliteresult.asp?var=14>
- USGS Y GEOSDIS. 2000. **Landsat-7 Level-0 and Level-1 Data Sets Document.**
http://eosims.cr.usgs.gov:5725/DATASET_DOCS/landsat7_dataset.html
- USGS. 2000. **Landsat 7 Factoids.**
<http://landsat7.usgs.gov/about.html>
- USGS (1). 2000. **A Comparison of Landsat 7 Processing Levels.**
http://landsat7.usgs.gov/17_processlevels.html
- USGS (2). 2000. **Landsat 7 News.**
<http://landsat7.usgs.gov/>

ANEXOS

Anexo 1. Archivo de búsqueda digital de imágenes del sensor remoto ETM+ en el sistema EOS Data Gateway⁴, en <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/plain.html>

```
GROUP          = INVENTORY_SEARCH
  MESSAGE_ID    = "0"
  DATA_CENTER_ID = (
    "EDC-L1"
  )
GROUP          = PATH_ROW_LOC
  WRS_TYPE      = "WRS-2"
  PATH          = (
    "15",
    "15"
  )
  ROW           = (
    "53",
    "53"
  )
END_GROUP      = PATH_ROW_LOC

GROUP          = RANGE_LOC
  NORTH_LATITUDE = 10.9888
  SOUTH_LATITUDE = 9.2550
  WEST_LONGITUDE = -85.0653
  EAST_LONGITUDE = -83.0685
END_GROUP      = RANGE_LOC

PROCESSING_LEVEL = (
  "1"
)
SENSOR_NAME      = (
  "LANDSAT ETM+"
)
GRANULE_LIMIT    = 100
GUIDE_LIMIT      = 100
TIME_LIMIT       = 45
END_GROUP        = INVENTORY_SEARCH

END
```

⁴ Para emplear esta herramienta, copie el texto a un archivo de texto y alimentelo en el casilla de recuperación de búsqueda en el sitio web.

Anexo 2. Matrices de error e índices kappa para cada uno de los procedimientos implementados, según la metodología empleada.

Nota al lector de la versión distribuida por la Biblioteca del ITCR: Estimado lector, por limitaciones interpuestas por la administración de la biblioteca, no me es posible añadir el contenido total de los anexos que corresponden a las matrices de error y otros parámetros de evaluación del procedimiento realizado. A fin de solucionar parcialmente esta limitante, pongo a su disposición un disco compacto con la información faltante en esta versión del presente documento.

El Autor.

Anexo 3. Imágenes temáticas resultantes. Mapa de cobertura del suelo para cada región de trabajo estudiada.

Nota al lector de la versión distribuida por la Biblioteca del ITCR: Estimado lector, por limitaciones interpuestas por la administración de la biblioteca, no me es posible añadir el contenido total de los anexos que corresponden a los archivos fuente y a las imágenes resultantes. A fin de solucionar parcialmente esta limitante, pongo a su disposición un disco compacto con la información faltante en esta versión del presente documento.

El Autor.

Anexo 4. Explicación detallada del funcionamiento del comando *i.smap*, que brinda GRASS para el procesamiento digital de imágenes.

El comando *i.smap*, contenido en el paquete de herramientas de procesamiento digital de imágenes de GRASS, es una función que efectúa la clasificación contextual de imágenes empleando la estimación SMAP (sequential maximum a posteriori).

El algoritmo SMAP explota el hecho de que pixeles vecinos en una imagen posiblemente corresponden a una misma categoría. Funciona mediante la segmentación de la imagen inicial en secciones de menor tamaño y resolución. De este modo se reducen forzosamente el número de posibles categorías existentes en un bloque y por lo tanto el número de posibles errores de clasificación. A diferencia de otros algoritmos similares, SMAP permite obtener imágenes de mayor calidad visual, debido a que los segmentos individualmente clasificados poseen una alta correspondencia en los pixeles de los bordes. Este comando automáticamente realiza un suavizado de la imagen clasificada de tal modo que el producto final sea de alta calidad visual, sin embargo, el grado de intensidad del suavizador digital está en función de la variación en los datos contenidos en una imagen en particular (a mayor variación total en los pixeles, menos intensidad tendrá el proceso del filtro de suavizado).

La imagen es segmentada en regiones definidas por ventanas de pixeles de tamaño dado por el usuario. De modo similar como en ECHO, el primer paso implica la evaluación de las firmas espectrales generadas por *i.gensigset*, contra los datos contenidos en una ventana en

particular. De este modo se descartan inmediatamente todas las categorías que no es posible que existan en una sección en particular. Finalmente se evalúan las posibilidades de correspondencia de un píxel a una u otra categoría de la firma espectral tomando en consideración la distribución espacial de estos.

Se le considera un algoritmo de clasificación espacial, porque incluye como un elemento de decisión primordial la distribución en el plano de los píxeles y su correspondencia con los píxeles vecinos, y no solamente efectúa su labor dependiendo de cercanía estadística a una nube de probabilidades como en el método de máxima similitud.

Los autores del comando *i.smap* en GRASS son:

Charles Bouman (School of Electrical Engineering, Purdue University)

Michael Shapiro (U.S. Army Construction Engineering, Purdue Research Laboratory)

(Información recopilada a partir de la salida del comando *rman i.smap* de la aplicación GRASS 5.0.0 pre 1)

Luis Coronado Chacón
v. 1.0
guaiacum@sol.racsa.co.cr

Enero de 2002