

CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA
PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACION

ESCUELA DE POSGRADO

**IDENTIFICACION DE TIPOS DE BOSQUES PRIMARIOS EN
LA ZONA NORTE DE COSTA RICA**

POR

MELIBEA GALLO

CATIE

Turrialba, Costa Rica
1999

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO**

RECIBIDO
1999

**IDENTIFICACIÓN DE TIPOS DE BOSQUES PRIMARIOS
EN LA ZONA NORTE DE COSTA RICA**

Tesis sometida a la consideración de la Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza y como requisito parcial para optar por el grado de:

Magister Scientiae

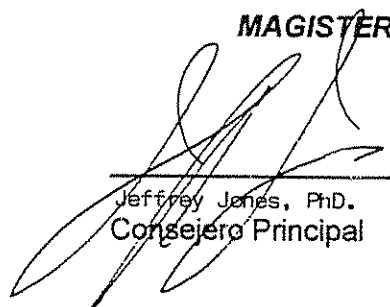
Por ✓
Melibea Gallo

Turrialba, Costa Rica
1999

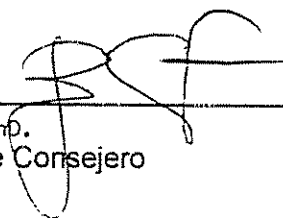
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por la Dirección del Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

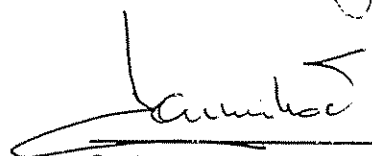
FIRMANTES:



Jeffrey Jones, PhD.
Consejero Principal



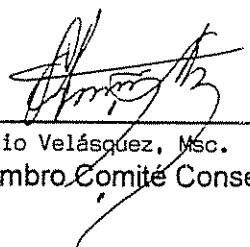
Bryan Finegan, PhD.
Miembro Comité Consejero



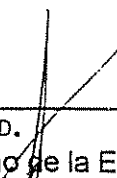
Daniel Marmillod, PhD.
Miembro Comité Consejero



Diego Delgado, Msc.
Miembro Comité Consejero



Sergio Velásquez, Msc.
Miembro Comité Consejero



Gilberto Páez, PhD.
Director y Decano de la Escuela de Posgrado



Melibea Gallo
Candidato

Agradecimientos

A Jeffrey Jones, Daniel Marmillod, Bryan Finegan, Sergio Velásquez y Diego Delgado, por su gran contribución para que esta tesis se desarrollara con éxito

A las instituciones que colaboraron aportando datos para este estudio: Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central (FUNDECOR), Comisión de Desarrollo Forestal de San Carlos (CODEFORSA), Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Fundación Neotrópica y el Área de Conservación Tortuguero (MINAE). Especialmente a Germán Obando (FUNDECOR) y a Mauricio Sánchez (CODEFORSA) por el tiempo y el esfuerzo que me brindaron para la recolección de datos

A Lucio Pedroni y al personal del Laboratorio de SIG de CATIE por su aporte de conocimientos y su apoyo durante estos dos años

A La Fundación Chadileuvú, y el Gobierno de la provincia de La Pampa, Argentina por el apoyo financiero brindado para realizar mis estudios de maestría

A Carla por los buenos momentos vividos, gracias compa!

A Eugenia, Beto, Marinés, Naikoa, Mario, Nata, Jorge, Luciana, Rosina y Eliana por el cariño grande y los buenos ratos juntos

A mis padres y hermanas por la fuerza brindada desde lejos

A Gio por... todo.

Contenido

1. Introducción	1
2. Revisión de literatura	3
2.1. Fitosociología de los bosques	3
2.2. Identificación de bosques tropicales a través de sensores remotos	5
3. Materiales y métodos	8
3.1. Area de estudio	8
3.2. Caracterización fitosociológica de los bosques	11
3.2.1. Recolección de datos	11
3.2.2. Preparación de datos	11
3.2.2.1. Datos de inventario	11
3.2.2.2. Datos de PPM	13
3.2.3. Análisis fitosociológico	15
3.3. Identificación de bosques a través de sensores remotos	18
3.3.1. Datos de referencia	18
3.3.2. Procesamiento de imágenes	19
3.3.2.1. Generación de capas de información utilizadas en la clasificación	19
3.3.2.2. Metodologías de selección de sitios de entrenamiento	19
3.3.2.3. Clasificación	21
3.3.2.4. Evaluación de la clasificación	22
3.3.2.5. Presentación de resultados	22

4. Resultados y Discusión	
4.1. Caracterización fitosociológica de los bosques	24
4.1.1. Resultados	24
4.1.1.1. Bosque del piso premontano	29
4.1.1.2. Bosques de tierras bajas	29
4.1.1.2.1. Bosques del sector Este del gradiente de precipitación	29
4.1.1.2.1.1. Suelos inundables	29
4.1.1.2.1.2. Suelos no inundables	30
4.1.1.2.2. Bosques del sector Oeste del gradiente de precipitación	32
4.1.1.2.2.1. Suelos no inundables	32
4.1.2. Discusión	39
4.1.2.1. Influencia de la altitud	39
4.1.2.2. Influencia de la posición en el gradiente de precipitación	39
4.1.2.3. Influencia del tipo de suelo y la geomorfología	40
4.1.2.4. Delimitación de bosques: escala de paisaje y escala local	41
4.2. Identificación de bosques a través de sensores remotos	42
4.2.1. Clases de bosques	42
4.2.2. Separabilidad de firmas espectrales	43
4.2.3. Clasificación	44
4.2.4. Discusión	52
4.2.5. Consideraciones finales	55
5. Conclusiones y recomendaciones	58
6. Bibliografía	60

Resumen

Para el manejo y la conservación de los bosques a escala regional es necesario caracterizar tipos de bosques por su composición y contar con información acerca de su distribución en el área. A pesar de esto, la heterogeneidad de los bosques tropicales y su alta diversidad han constituido serias limitantes para la identificación de tipos de bosques al nivel regional.

En este trabajo se caracterizaron e identificaron los tipos de bosques primarios que se desarrollan en la zona norte de Costa Rica. Se utilizaron datos de campo detallados (de inventarios forestales y parcelas permanentes de muestreo, colectados por diferentes instituciones de la región) y datos de sensores remotos (imágenes Landsat TM). En una primera etapa se identificaron los bosques de la región, por su composición florística usando los datos de inventarios forestales y parcelas permanentes de muestreo. Esto se realizó mediante un análisis fitosociológico, en el que la agrupación en tipos de bosque se basó en el índice de valor de importancia (IVI) de las especies presentes en la muestra. En una segunda etapa, se identificaron los tipos de bosques encontrados a partir de imágenes Landsat TM. Para ello se clasificó la imagen utilizando cuatro metodologías diferentes (dos clasificaciones supervisadas y dos clasificaciones mixtas), con el objetivo de comparar sus resultados.

Se encontraron siete tipos de bosques posibles de diferenciar por su composición florística: Bosque de *Prioria*, Bosque de *Carapa* – *Pentaclethra* - *Pterocarpus*, Bosque de *Pentaclethra* – *Carapa* - *Apeiba*, Bosque de *Pentaclethra* – *Vochysia ferruginea*, Bosque de *Dialium* – *Dipteryx* - *Pentaclethra*, Bosque de *Vochysia ferruginea* - *Qualea*, y Bosque de *Billia*.

Estos siete tipos de bosques fueron utilizados en el análisis de datos satelitales. Debido a la baja separabilidad espectral entre algunos de ellos, se los agrupó en cuatro clases, teniendo en cuenta semejanzas florísticas.

Se utilizaron cuatro metodologías de clasificación, que surgieron de la combinación de dos técnicas de selección de firmas espectrales (selección por crecimiento de polígonos para la clasificación supervisada, y agrupamiento guiado, para la clasificación mixta) y la inclusión o no inclusión de datos auxiliares en el proceso de clasificación (clasificación con datos de elevación y clasificación sin datos de elevación).

La metodología con mayor precisión fue la clasificación supervisada con la inclusión de datos de elevación. Las mayores confusiones se dan entre bosques que tienen características espectrales similares y cuyos rangos de elevación se traslapan.

La incorporación de datos auxiliares aumenta en gran medida la precisión de la clasificación, tanto en la clasificación supervisada como en la mixta. Cuando se excluyen los datos auxiliares las precisiones globales disminuyen significativamente.

Los resultados de este estudio indican que es posible diferenciar tipos de bosques con base en la composición florística sólo si se cuenta con datos detallados a nivel de campo. Datos que están siendo generados en forma continua por instituciones que se dedican al manejo de bosques en la región. Así mismo se muestra que estos bosques pueden ser identificados si se utilizan datos auxiliares de elevación en la clasificación. Este trabajo pone en evidencia que es posible integrar la investigación realizada al nivel de campo con aquella de sensores remotos, a manera de obtener resultados que puedan ser aplicados al manejo de bosques tropicales a escala regional.

Palabras clave

Tipos de bosques, bosques primarios, clasificación, composición florística, fitosociología, sensores remotos, paisaje, imágenes Landsat TM, Región Huetar Norte, Región Huetar Atlántica.

Summary

The characterization of forest types and this distribution is a necessary step for forest management and conservation on a regional scale. Tropical forest heterogeneity and high biodiversity limit the identification of forest types at this scale.

In this study we work on characterization and identification of primary forest types in the northern zone of Costa Rica. We use detailed field data (from forest inventories and permanent sample plots, that were collected in different regional institutions), and remote sensing imagery (Landsat TM). Using data from forest inventories and permanent sample plots, we identify the forest type through its floristic composition. To group the data into different forest type we use specie's IVI in a phytosociological analysis.

The forest types identified through the phytosociological study were used in the classification of Landsat TM imagery. Four different classifications were done (two supervised classifications and two mixed classifications), and this results were compared. Seven forest types with different floristic composition were found: *Prioria* forest, *Carapa – Pentaclethra – Pterocarpus* forest, *Pentaclethra – Carapa – Apeiba* forest, *Pentaclethra – Vochysia ferruginea* forest, *Dialium – Dipteryx – Pentaclethra* forest, *Vochysia ferruginea – Pentaclethra* forest, and *Billia* forest.

These forest types were used in the classification of satellite imagery, and were grouped in four forest classes, because of the low spectral separability between forest types. This groups were made considering the floristic composition of forest types.

Four classification techniques were applied, two of them using pixel growing selection based on the training sites, the other two using guided clustering techniques. These techniques were combined with the use of ancillary elevation data or non-use of ancillary elevation data during the classification process. Supervised classification with inclusion of ancillary elevation data during the classification produced the most accurate results. Most of the confusion take place between classes with similar spectral responses, and between those with similar elevations positions. The ancillary data incorporation produced an increment in the classification accuracy, as did the supervised classification and the mixed classification. When the ancillary data were excluded the accuracy decrease significantly.

The results of this study shows that forest type discrimination is possible if detailed field data is used. This type of data are generated constantly by institutions related with forest management. Also, the classification could be improved using ancillary data during the classification. Field investigation and satellite imagery work could be integrated, as in the present study, to contribute to regional forest management.

Indice de cuadros

Cuadro 1.	Metodologías y clasificaciones realizadas	21
Cuadro 2.	Tipos de bosques encontrados y número de sitios en que se encontraron	24
Cuadro 3.	Características de los sitios con datos de inventario	26
Cuadro 4.	Características de los sitios con datos de PPM	26
Cuadro 5.	Tipos de suelo para cada tipo de bosque	27
Cuadro 6.	Clases de bosque en relación con tipos de bosque	42
Cuadro 7.	Separabilidad de firmas espectrales para metodologías de crecimiento de polígonos	43
Cuadro 8.	Separabilidad de firmas espectrales para metodologías de Agrupamiento guiado	43
Cuadro 9.	Matriz de confusión para metodología CP-MED	49
Cuadro 10.	Matriz de confusión para metodología CP	49
Cuadro 11.	Matriz de confusión para metodología AG-MED	50
Cuadro 12.	Matriz de confusión para metodología AG	50
Cuadro 13.	Pruebas pareadas entre valores Kappa	51
Cuadro 14.	Áreas por clase de bosque	51

Indice de figuras

Figura 1.	Ubicación del área de estudio, y su cobertura boscosa	10
Figura 2.	Distribución de los sitios en el área de estudio	14
Figura 3.	Esquema representativo de una tabla de trabajo fitosociológica	16
Figura 4.	Area de estudio seleccionada sobre la imagen Landsat TM	18
Figura 5.	Esquema de los pasos seguidos en las metodologías utilizadas	23
Figura 6.	Distribución de los tipos de bosques a nivel de paisaje	25
Figura 7.	Esquema de los tipos de bosques identificados	28
Figura 8.	Porcentaje del IVI para las primeras 6 especies de los bosques de <i>Carapa – Pentaclethra – Pterocarpus</i> .	34
Figura 9.	Porcentaje del IVI para las primeras 6 especies de los bosques de <i>Pentaclethra – Carapa - Apeiba</i> .	35
Figura 10.	Porcentaje del IVI para las primeras 6 especies de los bosques de <i>Pentaclethra – Vochysia ferruginea</i> .	36
Figura 11.	Porcentaje del IVI para las primeras 6 especies de los bosques de <i>Dialium – Dipteryx - Pentaclethra</i> .	37
Figura 12.	Porcentaje del IVI para las primeras 6 especies de los bosques de <i>Vochysia ferruginea - Qualea</i> .	38
Figura 13.	Imagen filtrada de los resultados de la clasificación para la Metodología CP-MED	45
Figura 14.	Imagen filtrada de los resultados de la clasificación para la Metodología CP	46
Figura 15.	Imagen filtrada de los resultados de la clasificación para la Metodología AG-MED	47
Figura 16.	Imagen filtrada de los resultados de la clasificación para la Metodología AG	48
Figura 17.	Areas protegidas presentes en cada tipo de bosque	56
Figura 18.	Areas protegidas presentes en cada clase de bosque	57

Indice de Anexos

- Anexo 1.** Tablas de vegetación para las 10 primeras especies por tipo de bosque
- Anexo 2.** Dendrograma para los tipos de bosque
- Anexo 3.** Cuadro de la vegetación
- Anexo 4.** Listado de nombres comunes de las especies más importantes
- Anexo 5.** Formulas utilizadas
- Anexo 6.** Glosario

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques naturales cumplen un papel de gran relevancia tanto en la conservación de la biodiversidad como en el desarrollo sostenible. En Costa Rica, las áreas que no se encuentran bajo protección, han sufrido en los últimos 50 años, un fuerte proceso de deforestación. Los bosques primarios se eliminaron con el fin de ganar nuevos terrenos para la producción agropecuaria y en la actualidad, persisten sólo 200000 ha de bosques primarios productivos en todo el país (Müller y Solís 1997). De esta tendencia a la desaparición de bosques, y la consecuente pérdida de biodiversidad surge la necesidad de realizar evaluaciones y monitoreo del estado de los bosques. En este sentido, se ha indicado que la biodiversidad debe ser estudiada y monitoreada en sus distintos niveles de organización, y en múltiples escalas temporales y espaciales (Noss 1990).

Del mismo modo, el manejo sustentable y la conservación requieren de acciones en todos los niveles de organización, entre ellas la evaluación y el manejo de la biodiversidad al nivel de ecosistemas. Para esto es necesario contar con información sobre los ecosistemas que se quieren conservar y manejar. Finegan *et al.* (en prensa) indican que la información disponible, para quienes manejan los bosques, acerca de la biodiversidad al nivel de ecosistemas, en algunos casos es inexistente. Esta es una de las razones por las cuales es importante el desarrollo de investigaciones cuyos objetivos involucren el estudio de los ecosistemas tropicales al nivel regional.

Para alcanzar estos objetivos, se requiere, en primer lugar, diferenciar tipos de bosques al nivel de paisaje, y así adquirir conocimiento de los recursos disponibles para el manejo. A partir de la identificación de los bosques según su composición, es posible determinar su distribución al nivel regional, y de este modo, evaluar su estado actual o sus posibles cambios en el tiempo. La caracterización de los tipos de bosques, surge entonces como una etapa en la caracterización de la biodiversidad al nivel de ecosistema.

Una buena forma de aproximarse a la sistematización las comunidades vegetales, entre ellas los tipos de bosques es la *clasificación*. Esta se basa en asignar entidades a grupos de acuerdo con las características comunes que presenten dichas entidades (Gauch 1983, citado por Teran 1997). Una buena *clasificación* puede ser una herramienta práctica para comparar la distribución de especies y comunidades, su relación con factores ambientales, y otros atributos que se presentan en un continuo de variación (Schulze y Whitacre 1999).

Luego de caracterizada la vegetación es importante conocer la distribución de los tipos de bosques en la región de estudio. Un modo de cumplir con este propósito es la utilización de sensores remotos (*teledetección*¹). Muchas veces, la información recolectada a partir de sensores remotos no puede de ser obtenida mediante otra fuente. Además, en la mayoría de los casos, al nivel

regional, coleccionar los datos a través de sensores remotos permite obtener resultados más rápidos y a un menor costo que si el estudio fuera realizado en el campo (Howard, 1991).

Aún con la existencia de una herramienta como la *teledetección*, la diferenciación de tipos de bosques ha sido difícil de realizar en áreas con una alta diversidad (Brondizio *et al.* 1996). A pesar de ello, diversos autores sugieren que la *clasificación* de tipos de bosque puede realizarse con una buena *precisión*, utilizando imágenes Landsat TM y combinándolas con *datos auxiliares* tomados en el campo, referentes a suelos, topografía, clima, composición y estructura del bosque (Hutchinson 1982, Sader *et al.* 1990, Tuomisto *et al.* 1994, Maselli *et al.* 1995, Moran *et al.* 1996, Brondizio *et al.* 1996).

La identificación precisa de tipos de bosques contribuye al conocimiento de la diversidad al nivel de ecosistemas y los recursos de que se dispone a lo largo de toda la región. Esto posibilita monitorear y planificar el uso y conservación del recurso bosque al nivel regional. Los objetivos de este estudio fueron:

1. Identificar a partir de datos de campo los tipos de bosques presentes en la región de estudio
2. Caracterizar florísticamente las comunidades boscosas identificadas
3. Explicar su distribución geográfica y relación con algunos parámetros ambientales
4. Comparar cuatro metodologías de clasificación de imágenes satelitales para la identificación de los tipos de bosques encontrados anteriormente:
 - clasificación supervisada utilizando los datos de imágenes Landsat TM
 - clasificación supervisada utilizando los datos de imágenes Landsat TM y *datos auxiliares*
 - clasificación mixta (*agrupamiento guiado*) utilizando los datos de imágenes Landsat TM
 - clasificación mixta (*agrupamiento guiado*) utilizando los datos de imágenes Landsat TM y *datos auxiliares*
5. Determinar la precisión de la clasificación para cada una de las metodologías probadas y realizar comparaciones entre ellas para poder determinar cuál es la metodología con mayor precisión.
6. Generar mapas y caracterizar la distribución de los tipos de bosques para la Zona Norte de Costa Rica.

La información generada a partir de esta investigación es una contribución a la caracterización de la Zona Norte de Costa Rica ya que responde a preguntas como: ¿Que tipos de bosques primarios existen en la región?, ¿cuáles pueden ser detectados a partir de sensores remotos? y ¿cuál es su distribución?. Las respuestas a estos interrogantes pueden constituirse en la base para futuros estudios y proyectos de planificación tanto para el uso como para la conservación de los bosques al nivel regional.

¹ En cursivas se indican las palabras que se encuentran descritas en el glosario (Anexo 6).

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Fitosociología de los bosques

El manejo sostenible y la conservación requieren de acciones en todos los niveles de organización, entre ellas la evaluación y el manejo de la biodiversidad al nivel de ecosistemas. La caracterización de los tipos de bosques, surge como una etapa en la caracterización de la biodiversidad al nivel de ecosistema y requiere una clasificación de las comunidades vegetales (Noss 1987). Una vez que los tipos de bosques han sido clasificados es posible determinar su distribución al nivel regional. Reconocer e interpretar la distribución espacial de los bosques es fundamental para conservar su gran diversidad (Clark 1998).

Existen dos hipótesis con relación a cómo se distribuye la vegetación. La hipótesis del "continuum" establece que la vegetación cambia gradualmente (McIntosh 1967, citado por Matteucci y Colma 1982). Según esta hipótesis, cualquier clasificación de tipos de bosques es subjetiva, ya que las comunidades vegetales no poseen límites espaciales ni temporales definidos. Esto se debe en primer lugar, a que las especies vegetales pueden vivir en una amplia gama de hábitats, en segundo lugar, a que sus abundancias varían dentro de esta gama de hábitats: y por último, a que su distribución en dichos hábitats es fuertemente individualista (Finegan *et al.*, en prensa).

Por otro lado, según la hipótesis "organísmica", la vegetación esta compuesta por unidades discretas bien diferenciadas o integradas que pueden ser combinadas para formar clases abstractas o tipos que reflejan las entidades naturales del mundo real (asociaciones) (Braun Blanquet 1979, McIntosh 1967, citado por Matteucci y Colma 1982). Según este punto de vista las especies no responden individualmente a los gradientes ambientales sino que lo hacen en grupos mas o menos constantes.

Si bien no hay acuerdo respecto a cual de las hipótesis se ajusta más la realidad, y aun cuando las comunidades vegetales no posean límites definidos, una buena clasificación puede ser una herramienta práctica para comparar la distribución de especies y comunidades, su relación con factores ambientales, y otros atributos que se presentan en un continuo de variación (Schulze y Whitacre 1999).

Se dispone de dos procedimientos para estructurar los datos con el fin de simplificarlos: la clasificación y la ordenación. La clasificación se basa en el agrupamiento de muestras o de especies que tienen características en común. La ordenación dispone las muestras o las especies a lo largo de ejes de variación continua (Matteucci y Colma 1982).

Desde un punto de vista práctico el tipo de análisis que se elija dependerá del objetivo del estudio. Cuando este es cartografiar o describir la vegetación, la clasificación resulta más adecuada. Si el objetivo es determinar relaciones entre la vegetación y el ambiente, la ordenación a menudo simplifica las interpretaciones (Matteucci y Colma 1982).

La clasificación puede basarse en características de estructura y composición de la vegetación. Si además se agrega un listado de las especies que las integran se obtiene una descripción más completa, pero no exhaustiva. Si lo que interesa es una definición detallada de la vegetación habría que recurrir a escalas tan reducidas que resultaría un enfoque impracticable (Gómez 1986).

La vegetación de Costa Rica ha sido clasificada por diversos autores siguiendo diferentes esquemas para la caracterización de las comunidades vegetales (Werkle 1909, Standley 1936, Pittier 1957, Holdridge 1978, Thomas 1990, citados por Gómez 1986, y por Fournier 1993). Todos estos sistemas muestran ciertas similitudes y en términos generales sugieren la existencia de pisos altitudinales de vegetación, condicionados principalmente por la temperatura. Dentro de cada uno de estos pisos se reconocen a su vez unidades de vegetación con base en diferencias de precipitación promedio anual, características edáficas, topográficas y diversas variables ambientales locales (Fournier 1993). Uno de estos casos es la clasificación en zonas de vida propuesta por Holdridge (1971).

Por otra parte, Gómez (1986) realiza una clasificación de la vegetación de Costa Rica basada en la combinación de listados de especies obtenidos en diferentes puntos de muestreo, con parámetros ambientales. Establece correlaciones entre combinaciones de especies y combinaciones de factores ambientales y a partir de ellas delinea las distribuciones geográficas de los tipos de vegetación.

Desde un punto de partida diferente y para mencionar un caso en el cual la base de la clasificación se da sobre un criterio enfocado al manejo forestal, se ha propuesto una clasificación de la vegetación para el Área de Conservación de la Cordillera Volcánica Central basada en la presencia de especies comercialmente importantes en los pisos altitudinales (Aguilar y Muñoz, 1994).

De este modo la definición de límites para la caracterización de los tipos de vegetación es una necesidad práctica que puede ser abordada desde distintos enfoques, lo que incluye tener en cuenta las variaciones ambientales a pequeña y gran escala. Las variaciones a pequeña escala se presentan a distancias de cientos de metros (nivel local), mientras que las variaciones a gran escala comprenden desde algunos kilómetros (nivel paisaje) hasta cientos de kilómetros de distancia (nivel regional) (Tuomisto 1995).

Un ejemplo de la variación presente a nivel de regional es provisto por estudios realizados en la

Amazonía, donde se identificaron bosques que crecen en zonas pantanosas y que son dominados por pocas especies de palmas y bosques que se desarrollan en suelos arenosos e infértiles dominados por especies arbóreas de baja altura y diámetro (Tuomisto *et al.* 1995).

A nivel local Clark (1998) concluye que la mayor parte de la heterogeneidad encontrada en la composición florística para los bosques de la Estación Biológica La Selva, está asociada a la variación local en los tipos de suelo y la topografía.

Por último, y debido a la importancia que poseen los estudios al nivel de ecosistemas, para el manejo y la conservación de la biodiversidad, las investigaciones referentes a tipos de bosques deberán tener en cuenta las variaciones ambientales que condicionan su desarrollo y las diferentes escalas en que estas se presentan, para obtener así resultados que puedan ser aplicables en la evaluación y el seguimiento de los ecosistemas al nivel regional.

2.2. Identificación de bosques tropicales a través de sensores remotos

El manejo y conservación de la biodiversidad deben ser abordados desde diferentes escalas temporales y espaciales y en distintos niveles de organización (Noss 1990). Para grandes escalas espaciales, la diversidad de ecosistemas es una medida adecuada de la biodiversidad, y puede ser definida a través del número, variedad y arreglo espacial de los tipos de bosques (Finegan *et al.*, en prensa). Así, dentro de la gran categoría de bosque tropical húmedo, se pueden reconocer muchos tipos de bosques que varían en términos de composición de especies y estructura. A pesar de esto, muchas investigaciones de bosques tropicales al nivel regional tratan a estos diversos tipos de bosques como una masa homogénea.

En la planificación del manejo y la conservación de los recursos forestales al nivel regional es necesario saber qué tipos de bosques existen, y cuál es su distribución en la región. Finegan *et al.* (en prensa) indican que el manejo forestal debería basarse en la comprensión de las diferencias entre tipos de bosques en términos de productividad, diversidad y resiliencia de los ecosistemas. Así mismo, desde el punto de vista de la biodiversidad, el manejo basado en la conservación de muestras representativas de ecosistemas naturales o semi-naturales no solo permite la conservación al nivel de ecosistemas sino que es una de las estrategias más efectivas para la conservación al nivel de especies.

La utilización de imágenes de satélite tiene un alto potencial para contribuir en estudios sobre la distribución de bosques al nivel regional. Muchas veces, la información recolectada a partir de sensores remotos no puede ser obtenida mediante otra fuente. Además, en la mayoría de los

casos, coleccionar los datos a través de sensores remotos permite obtener resultados más rápidos y a un menor costo que si el estudio fuera realizado en el campo (Howard, 1991).

Muchas de las investigaciones de *teledetección* en ecosistemas tropicales se han enfocado en la distinción de zonas con y sin cobertura boscosa. Este tipo de investigación ha dejado de lado la alta diversidad de tipos de bosques que se pueden encontrar en los trópicos y la capacidad que tienen algunos sensores remotos de proveer información ecológica de mayor utilidad (Hill y Foody 1994, Tuomisto *et al.* 1994).

Aún con la existencia de una herramienta como la *teledetección*, la diferenciación de tipos de bosques ha sido difícil de realizar en áreas con una alta diversidad. Cada tipo de bosque tiene una respuesta espectral, que depende de características del bosque como su densidad, estructura y composición. Esta respuesta espectral es la información en que se basa la diferenciación de coberturas en las imágenes. Más aún, se asume que esta respuesta espectral es suficiente para distinguir una cobertura de otra utilizando técnicas estadísticas de *clasificación* (Hutchinson 1982). Pero en muchos casos se ha visto que no es suficiente, sobre todo en las regiones tropicales, donde la diversidad biológica es alta (García y Álvarez 1994, Tuomisto *et al.* 1994, Brondizio *et al.* 1996).

Para abordar esta problemática, muchos autores (Sader *et al.* 1990, García y Álvarez 1994, Moran *et al.* 1996, Tuomisto *et al.* 1994, Brondizio *et al.* 1996, Pedroni y Velásquez 1998) indican que la identificación de tipos de bosques en regiones tropicales y a través de sensores remotos, puede realizarse con una alta precisión, si se dispone de datos de campo detallados, que sirvan como base para la clasificación. De este modo, se propone que los datos provenientes de sensores remotos se asocien a *sistemas de información geográfica (SIG)*, a fin de integrarlos con los *datos auxiliares* de campo y lograr una mejor clasificación.

Si las variables que se usan como *datos auxiliares* tienen alguna influencia sobre la distribución espacial de las categorías que se quieren clasificar, se espera la clasificación mejore al incluirlos. Por lo tanto, la incorporación de información relevante en la clasificación de imágenes puede aumentar la posibilidad de discriminación de coberturas con características espectrales similares o iguales (Maselli *et al.* 1995).

Investigaciones en bosques templados que han utilizado *datos auxiliares* de elevación, pendiente, exposición y tipo de suelo, han obtenido mejoras significativas en la discriminación entre la mayoría de las coberturas clasificadas y aumentos en la precisión de la misma (Janssen *et al.* 1990, Maselli *et al.* 1995, Skidmore *et al.* 1987, Sugarbaker *et al.* 1980 citado por Skidmore *et al.* 1987).

Existen tres metodologías para introducir los *datos auxiliares* en el proceso de clasificación, entre ellas se encuentra combinar las *bandas espectrales* originales con *datos auxiliares*, de modo que la clasificación no sólo se realiza con las *bandas* de Landsat TM sino con *n bandas* tanto espectrales como de *datos auxiliares* (Hutchinson 1982).

Otra metodología que puede aumentar la precisión de la clasificación y la capacidad de discriminar coberturas es el *agrupamiento guiado* (del inglés "guided clustering"). Esta es una metodología mixta, ya que combina tanto la clasificación no supervisada como la supervisada y que apunta a que se puedan tener en cuenta las diferencias espectrales presentes dentro de los *sitios de entrenamiento* de una misma cobertura (Bauer *et al.* 1994; Stewart y Lillesand 1995).

Hay que tener en cuenta, además que algunos autores indican que la clasificación puede ser mejorada si en lugar de utilizarse las *bandas* TM de la imagen se utilizan índices resultantes de la combinación de *bandas*. Entre ellos figuran los índices de brillo, verdor y humedad de *Tasseled Cap*. Estos índices capturan la mayor parte de la variabilidad espectral de las *bandas* TM y han sido eficientes en la discriminación de vegetación (Cohen *et al.* 1995, Helmer 1998). Lo mismo se ha dicho del índice resultante del cociente entre algunas *bandas*, entre ellas el TM4/TM3 (Bahuer 1994).

Por último, los datos de referencia que normalmente se utilizan en las clasificaciones de imágenes de satélite, no son datos de campo detallados, colectados en áreas grandes de muestreo. Por esto, estudios con datos de referencia detallados realizados en áreas amplias, podrían mejorar la calidad de la clasificación. Para ello en este estudio se contó con datos detallados de campo sobre los que se identificaron tipos de bosque a nivel de paisaje a través de un estudio fitosociológico.

En síntesis, la discriminación de tipos de bosques húmedos tropicales, es una necesidad en las áreas de manejo y conservación de estos bosques. Diferentes metodologías para el estudio de la vegetación tropical a partir de sensores remotos deben aún ser exploradas y explotadas para cubrir estas necesidades.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Area de estudio

La investigación se llevó a cabo en la Región Huetar Norte y la parte norte de la Región Huetar Atlántica de Costa Rica. El área de estudio comprende aproximadamente el 20% de Costa Rica, extendiéndose desde la Cordillera Volcánica Central y de Guanacaste hasta la frontera con Nicaragua hacia el norte y hasta el Atlántico hacia el este, entre 11° 9' 14" Latitud Norte y 10° 0' 23 " Latitud Sur y entre 83° 18' 29" Longitud Este y 84° 58' 51" Longitud Oeste.

El área de estudio, se encuentra bajo la influencia de las condiciones climáticas del Atlántico, y en su mayor parte presenta un clima tropical lluvioso (principalmente en las zonas bajas). La precipitación promedio anual es de 3000 a 4000 mm y la temperatura promedio anual es de 25°C (COSEFORMA 1995).

Se presenta en el área un gradiente de precipitación, esta disminuye de este a oeste, desde máximos de 5500 a mínimos de 3000 mm anuales. Las partes más lluviosas se presentan en las llanuras de Tortuguero, con un promedio anual de entre 4000 y 5500 mm. Las regiones de mayor altitud s.n.m. en el área de estudio presentan niveles de precipitación anual entre 4000 y 4500 mm. En la parte central del área de estudio la precipitación promedio está entre los 3500 y 4000 mm anuales (Instituto Meteorológico Nacional 1975). La menor precipitación se presenta en la parte noroeste, lo que coincide además con la presencia de un mayor número de meses donde las lluvias son menos abundantes (2 a 3 meses). En el resto del área de estudio en cambio, solo un mes presenta niveles menores de precipitación.

Los suelos del área de estudio corresponden principalmente a los siguientes órdenes (Sánchez 1981, USDA 1996):

- Histosoles y Entisoles en las partes bajas e inundables de la costa atlántica
- Inceptisoles desde las zonas más altas del área de estudio hasta el extremo noroeste de la misma
- Ultisoles se presentan entremezclados con los Inceptisoles, aunque no se dan en las zonas más altas del área de estudio.

En general se puede decir que partes bajas cercanas a la costa atlántica presentan suelos de drenaje más pobre, mientras que el resto del área de estudio tiene suelos de drenaje moderado o bueno, que se desarrolla sobre un relieve ondulado. Hay que destacar también que en la parte noroeste del área se presentan suelos donde la cantidad de arcilla es mayor (Sánchez 1981, USDA 1996)

Con relación a la geomorfología del área, las zonas bajas del Atlántico se presentan sobre aluviones del cuaternario. Las partes más altas del área de estudio corresponden a la categoría de edificios volcánicos. Desde el centro al noroeste existe un bloque que se presenta sobre depósitos de lahares y coladas de lodo y otro de rocas volcánicas del terciario (Nuhn 1968).

Según datos del COSEFORMA (1995) los bosques primarios en la zona norte se encuentran en bloques dispersos, concentrados en la región norte y ocupando menos de una cuarta parte del área (Figura 1).

Area de estudio



Cobertura boscosa del Area de Estudio

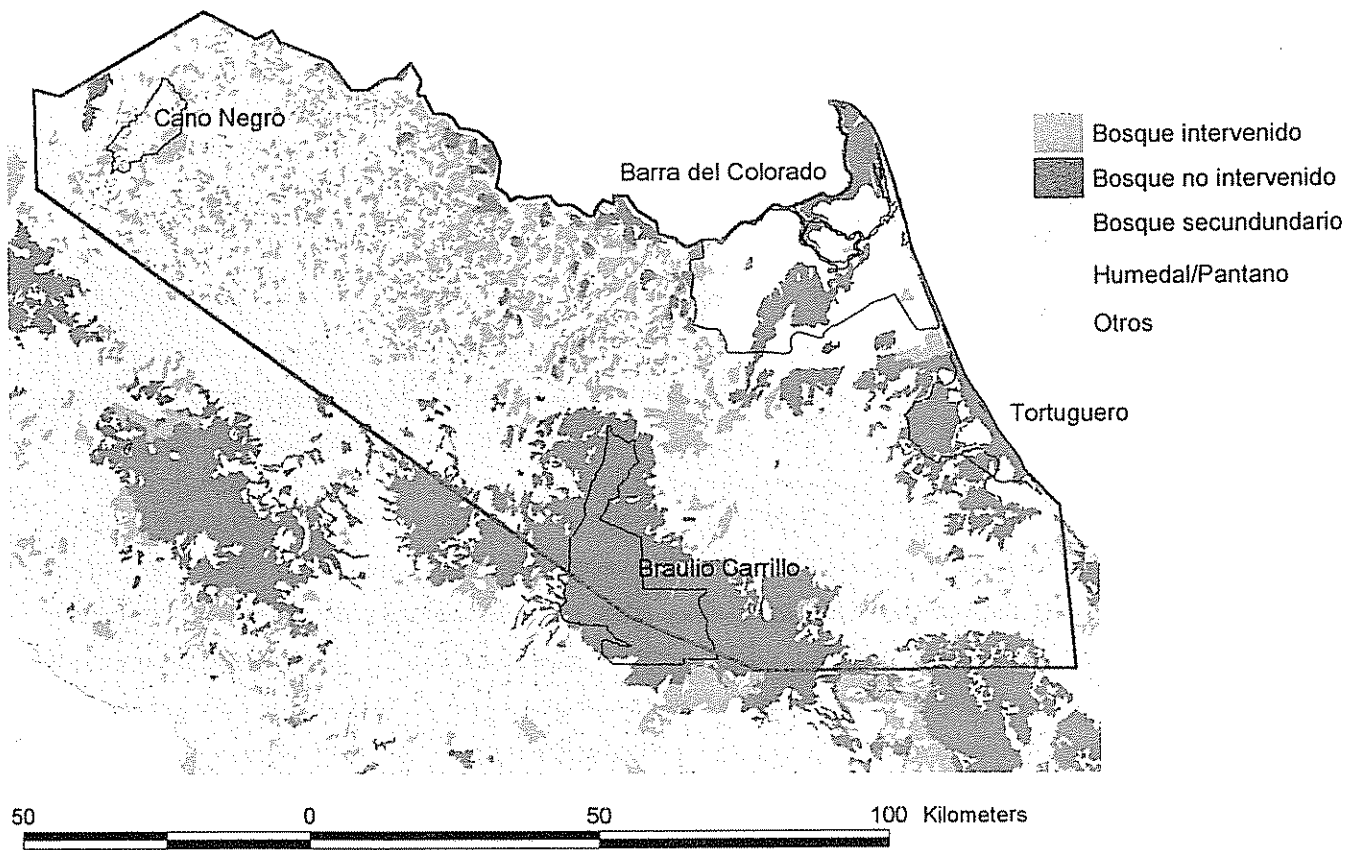


Figura 1: Ubicacion del area de estudio (arriba)
Detalle de la cobertura boscosa y las areas proegidas en la zona de estudio (abajo)



3.2. Caracterización fitosociológica de los bosques

3.2.1. Recolección de datos

Los datos fueron provistos por instituciones involucradas con el manejo de los bosques en la zona de estudio: Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central (FUNDECOR), Comisión de Desarrollo Forestal de San Carlos (CODEFORSA), Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Fundación Neotrópica y el Área de Conservación Tortuguero (MINAE).

El estudio se realizó a partir de dos tipos de datos: datos de inventarios forestales realizados en fincas privadas con fines de establecer planes generales de manejo, y datos de parcelas permanentes de muestreo (PPM) establecidas con objetivos de investigación. En todos los casos se contó con la ubicación geográfica del sitio. Los datos provenientes de inventarios y PPM se analizaron en forma separada, y posteriormente se compararon los resultados.

3.2.2. Preparación de datos

3.2.2.1. Datos de inventario

Cada inventario se realiza en líneas paralelas entre sí ubicadas a una distancia de entre 50 y 100 m., y se procura que estén orientadas de tal modo que atraviesen todo el mosaico del bosque. Sobre estas líneas se delimitan parcelas de forma aleatoria o sistemática, dentro de las cuales se identifican y registran las especies de árboles ≥ 30 cm DAP, estas parcelas tienen una dimensión de 30 x 100 m (0.3 ha). Los inventarios no fueron considerados como las unidades de muestreo, sino que las parcelas de cada inventario se agruparon de manera que existieran entre 5 y 9 parcelas por grupo. Estos grupos fueron tomados como unidades de muestreo.

Aquellos inventarios que no contaron con al menos 5 parcelas se eliminaron, por no cubrir el área mínima esperada teniendo en cuenta las consideraciones que se detallan a continuación. Para que el estudio de vegetación sea representativo de la comunidad vegetal, cada unidad de muestreo debe abarcar un área suficiente de manera que las especies más importantes de la comunidad alcancen a expresar su peso en relación con las demás especies de manera correcta, es decir en nuestro caso, que alcancen un valor del IVI que se mantenga estable con un aumento en la superficie de la muestra. En este estudio se consideró un área mínima de 1.5 ha (5 parcelas).

Para bosques tropicales de tierras bajas el conjunto de árboles con más 30 cm de DAP alcanza aproximadamente 100 individuos por ha. (Rollet 1974, Lamprecht 1990, Nalvarte *et al.* 1993); se espera que en 1.5 ha (5 parcelas) se encuentren aproximadamente 150 individuos; un número que estimamos suficiente para que las más abundantes de las 199 especies presentes en la muestra,

logran estabilizar su peso relativo.

Por otra parte, en bosques tropicales a medida que aumenta el área inventariada aumenta el número de especies registradas (Nalvarte *et al.* 1993). Es por ello que el área máxima se estableció en 2.7 ha, considerando que las unidades muestrales mayores a 2.7 ha, podrían presentar un número significativamente mayor de especies que las haría imposibles de comparar con las unidades de muestreo menores, por lo tanto el número máximo de parcelas incluidas en cada unidad de muestreo fue de 9.

Antes de realizar el análisis se debe evaluar la coherencia o estabilidad de la muestra (Wildi y Orlóci 1996). Se calculó la mediana de los datos y se obtuvo un valor de 78 individuos por ha., un resultado menor a lo indicado por otras fuentes (Rollet 1974, Lamprecht 1990, Nalvarte *et al.* 1993). Posteriormente se tuvieron en cuenta los siguientes criterios para excluir de la muestra inicial de 176 sitios aquellos que no cumplieran con las siguientes características:

- *Número de individuos por hectárea:* se estableció como criterio de exclusión de unidades de muestreo que el número mínimo de individuos por ha estuviera por encima de 2/3 de la mediana del número de individuos por ha calculado para sitios del presente estudio (este valor fue de 51).
- *Número de individuos por clases diamétricas por hectárea:* del mismo modo, se calculó el número de individuos que representó 2/3 de la mediana de la muestra para las siguientes clases diamétricas: 30 - 49 cm de DAP, y de 50 cm de DAP en adelante. Estos valores fueron: 32 y 19 respectivamente (con medianas de 48 y 28 para las clases diamétricas respectivas). Los inventarios que presentaron valores inferiores se excluyeron de la muestra.
- *Número absoluto de individuos por unidad de muestreo:* a partir de los valores mínimos de 2/3 de la mediana se calcularon los valores absolutos mínimos por unidad de muestreo. En el caso del total de individuos fue de 75.90, para la clase diamétrica 30-49 cm el mínimo considerado fue de 47.52 individuos, y para la clase 50 cm en adelante el número mínimo de individuos fue de 28.40. Aquellas unidades de muestreo que no presentaran estos valores absolutos mínimos de individuos fueron excluidas.
- *Número de individuos en la categoría especie desconocida:* Se excluyeron de la muestra las unidades muestrales que presentaron mas de un 10% del IVI en la categoría especie desconocida.
- *Datos atípicos:* Se calculó el coeficiente de Van der Maarel que expresa la similitud entre dos unidades de muestreo con valores que van de 0 a 1 (Wildi y Orlóci 1996) y se eliminaron aquellos sitios que presentaron una similitud menor de 0.42 con el sitio más semejante.

Además de analizar la coherencia de las unidades de muestreo, se trabajó con el listado de especies. Las especies presentes en la muestra fueron identificadas por sus nombres comunes (Anexo 4), y se contó con listados de las correspondencias entre estos nombres comunes y los nombres científicos. Estos listados fueron realizados en todos los casos por dendrólogos reconocidos.

Se realizó un análisis de homogeneidad de los listados de especies de las diferentes fuentes. Cuando en las diferentes fuentes se encontró el mismo nombre común identificado con el mismo género pero para distintas especies, se agruparon todas estas especies como una sola especie y se la denominó con el nombre del género. El total de especies presentes en la muestra fue de 199, 39 de las cuales fueron "grupos" de especies denominados con el género.

Posteriormente, se construyó una matriz primaria de valores de IVI^2 de las especies, en cuyas filas se ubicaron las especies y en sus columnas los sitios. A partir de esta matriz se obtuvieron estadísticas de las especies y sitios para identificar especies con baja frecuencia. Estas especies no brindan información para la clasificación porque sólo están presentes en pocas unidades muestrales. Así se eliminaron las especies con frecuencia 3.

Resumiendo, de las 176 unidades muestrales con que se contó inicialmente, se excluyeron 80 y se trabajó con un total de 96. Estas 96 unidades muestrales representaron una área total muestreada de 4110 ha y su distribución se presenta en la Figura 2. Además, del total de 199 especies iniciales, se utilizaron las 130 que estuvieron presentes por lo menos en 4 unidades muestrales.

3.2.2.2. Datos de PPM

En las PPM se miden individuos con $DAP \geq 10$ cm, en áreas cuadradas de 1 ha. En este caso cada PPM fue tomada como una unidad de muestreo. A diferencia de lo realizado para los datos de inventario, aquí el único criterio de exclusión fue la presencia de unidades muestrales consideradas como datos atípicos, para lo cual se utilizó como parámetro un coeficiente de similitud de Van der Maarel menor a 0.40.

Se trabajó con un total de 21 sitios con PPM con un área muestreada de 21 ha y su distribución se muestra en la Figura 2.

Se eliminaron las especies que se presentaron en menos de 3 unidades muestrales, por lo que de las 438 iniciales sólo se trabajó con 332 especies, de 138 géneros.

² Se tomó el Índice de Valor de Importancia Simplificado: $IVIS = (Dominancia\% + Abundancia\%)$ también conocido como índice de valor de cobertura

Sitios con Inventarios



Sitios con PPM

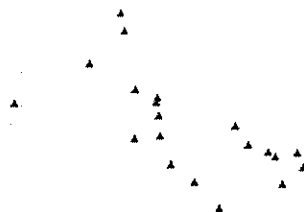


Figura 2: Distribución de los sitios en el área de estudio.

3.2.3. Análisis fitosociológico

Se realizó una clasificación usando un análisis multivariado en el programa MULVA (Wildi y Orlóci 1996). Esta clasificación fue interpretada florísticamente en una tabla de trabajo fitosociológica.

Este procedimiento tiene la ventaja de describir la vegetación como un complejo de tipos de vegetación con todos los detalles del conjunto de datos, también presenta las relaciones sitio-especies ordenadas de manera que facilitan la interpretación entre ellas y las relaciones con el ambiente (Wildi y Orlóci 1996).

Para la construcción de la tabla de trabajo fitosociológica se siguen los siguientes procedimientos generales (Wildi y Orlóci 1996) (Figura 3):

- Análisis que permitieron obtener un arreglo de sitios y especies de manera tal que los grupos que son más ricos en especies ocurrieron en la diagonal de la tabla.
- Detección de aquellas especies (discriminantes o diferenciales) que poseen una mayor capacidad para discriminar entre tipos de vegetación. Así, el número de especies se redujo, ya que estas especies diferenciales fueron las seleccionadas para el análisis.

Los pasos seguidos en el análisis fitosociológico (para todo sitio x y especie y) fueron (Wildi y Orlóci 1996):

1. Entre unidades muestrales se construyó una matriz de semejanza, con el índice de semejanza producto cruzado centrado:

$$r(x, y) = \sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}$$

2. Estas unidades muestrales se agruparon usando el algoritmo de mínima varianza donde la decisión de unir dos grupos (j y k) se basa en la suma de cuadrados entre dos grupos:

$$Q_{xy} = \frac{n_j * n_k}{n_j + n_k} \delta_{jk} \quad \text{donde: } \sqrt{\delta_{jk}} \text{ es la distancia euclídeana.}$$

3. Entre las especies de la muestra se construyó una matriz de semejanza, usando la función

$$\text{distancia euclídeana } \delta(x, y) = \sqrt{\sum x^2 - 2\sum xy + \sum y^2}$$

4. Se realizó un análisis de conglomerados utilizando el algoritmo de agrupación completa (Anderberg 1973, citado por Wildi y Orlóci 1996).

5. Por último se construyó la tabla fitosociológica. En primer lugar se reordenaron los grupos internamente, tanto a las especies como a los sitios. Se realizó, posteriormente una clasificación de Jancey para valores-F. Esta se hizo sobre las especies.

$$F = \frac{V_b}{V_w} \quad \text{donde: } V_b \text{ es la varianza entre grupos y } V_w \text{ es la varianza dentro de grupos.}$$

Valores-F altos indican buena correspondencia entre las especies y los sitios, los valores bajos indican una baja correspondencia. Así se seleccionan las especies con mayor poder de resolución, es decir, las especies con mayor valor-F fueron las especies discriminantes o diferenciales.

6. Por último se interpretaron los resultados del análisis para la definición de una comunidad caracterizada por su composición.

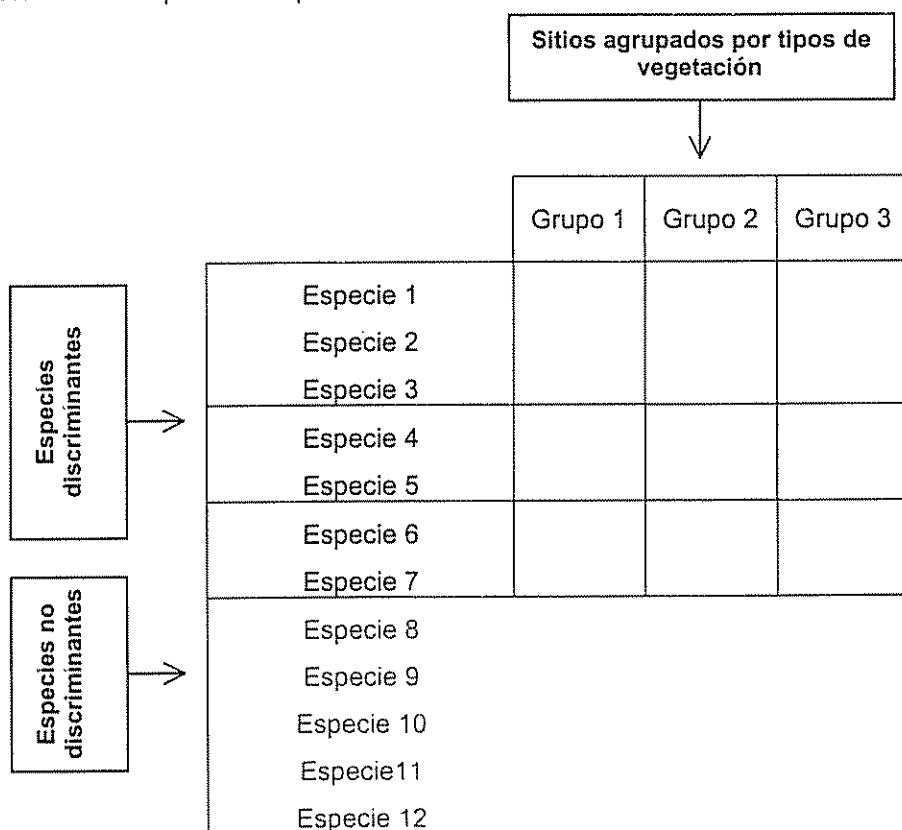


Figura 3: Esquema representativo de una tabla de trabajo fitosociológica.

Luego se identificaron los tipos de bosques. Como último paso, se interpretaron los resultados de los análisis, tanto para PPM como para inventarios, y se describieron los tipos de bosques. De esta manera, se nombraron los bosques con los nombres científicos de las especies que, sin ser necesariamente dominantes ni las de mayor abundancia, caracterizan una determinada comunidad, debido a que su presencia las distingue del resto de tipos de bosque.

Cada uno de los tipos de bosques encontrados se describió en una tabla de vegetación con valores de abundancia, dominancia, e IVI para las diez primeras especies en orden de importancia. Los bosques también se describieron en las tablas de trabajo fitosociológicas resultantes del análisis, en estas, a diferencia de las anteriores se puede ver la presencia de grupos de especies que caracterizan a cada tipo de bosque.

La caracterización de los tipos de bosques se realizó en dos niveles. A partir de los datos de inventarios, se caracterizaron tipos de bosques a nivel de paisaje. A través del análisis de PPM se caracterizaron tipos de bosque a escala local, que en este estudio se describen como variaciones locales de los tipos de bosque a nivel de paisaje.

Por otra parte, la distribución de los bosques se estableció mediante la construcción de mapas con la ubicación geográfica de las áreas con inventarios. Se *digitalizaron* los polígonos de estas áreas y se establecieron los límites de distribución hipotética de los tipos de bosques a partir del arreglo espacial de las mismas. Es decir, se delinearon las áreas hipotéticamente cubiertas por cada tipo de bosque de manera que cada polígono abarcara todos los sitios que presentaron dicho bosque.

Para relacionar los tipos de bosques encontrados con factores ambientales, se dispuso de mapas de suelos (realizado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería), de precipitación y número de meses donde la precipitación (datos de Instituto Meteorológico Nacional), y de un modelo de elevación digital (elaborado por L. Pedroni).

Estas capas de información se superpusieron con la capa de ubicación de los sitios y se calcularon para cada tipo de bosque y para cada tipo de fuente:

- El tamaño de las áreas efectivamente muestreadas
- El tamaño promedio de los sitios
- Las elevaciones promedio, mínima y máxima
- Los tipos de suelo y origen geológico
- La precipitación promedio
- El número de meses de menor pluviosidad.

3.3. Identificación de bosques a través de sensores remotos

3.3.1. Datos de referencia

Para realizar este estudio se utilizaron datos provenientes de diferentes fuentes:

- imagen Landsat TM (Laboratorio SIG de CATIE, Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central -FUNDECOR-),
- modelo de elevación digital (datos de Instituto Geográfico Nacional y Laboratorio SIG de CATIE, procesamiento por Pedroni, L.)
- mapa de tipos de suelo (Laboratorio SIG de CATIE)
- máscara de áreas de no bosques (Pedroni, L).
- información de campo con relación a los tipos de bosques presentes en el área de estudio: se utilizaron todos los sitios del estudio fitosociológico, y debido a que los mismos no representan una muestra aleatoria, el presente trabajo debe ser considerado como estudio de caso.

Para cada uno de los 96 sitios utilizados en el análisis fitosociológico, se digitalizó el polígono con base en los mapas que se adjuntan en los planes de manejo sobre hojas cartográficas (proyección Lambert Norte, escala 1: 50000).

A partir de estos mapas se creó una cobertura *digitalizando* los polígonos de sitios, relacionada a una base de datos con la información referente al tipo de bosque, tipo de suelo y elevación de la finca. La

cobertura de sitios se sobrepuso a la imagen Landsat TM y se determinó y cortó de la imagen completa, la extensión del área de estudio en función de la ubicación de las fincas (Figura 4). Una vez delimitada y extraída el área de estudio, se eliminaron todas aquellas zonas que no tuvieran bosques, utilizando para ello una máscara de las áreas de no bosque, realizada a partir de una clasificación anterior.

Todos los procedimientos y el análisis se realizaron en ARC Info, ARC View, ERDAS Imagine e IDRISI.

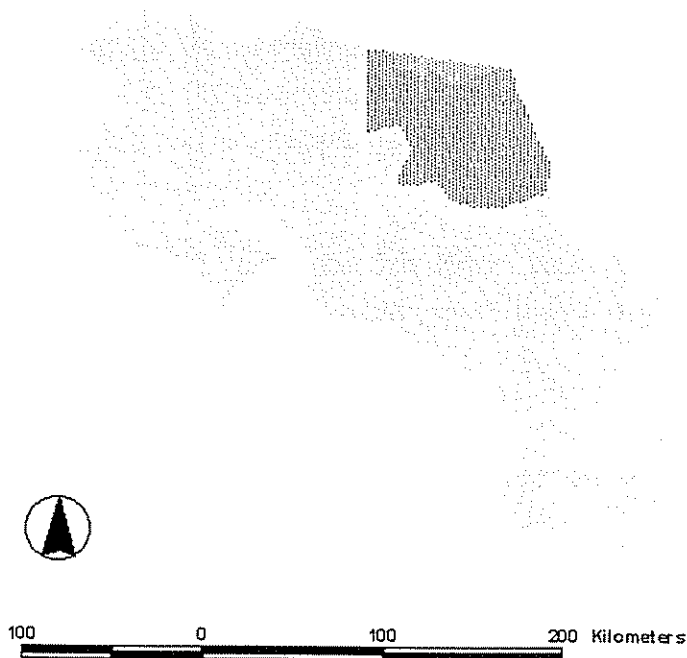


Figura 4: Área de estudio seleccionada sobre la imagen Landsat TM.

3.3.2. Procesamiento de imágenes

3.3.2.1. Generación de las capas de información utilizadas en la clasificación

Se utilizó una imagen Landsat TM, de marzo de 1996, con una resolución espacial de 28.5 X 28.5m y 6 *bandas espectrales* (TM1 a TM5 y TM7). Se realizó un análisis de *componentes principales*, para descartar aquella información espectral que fuera redundante, y se utilizaron los primeros dos *componentes principales* que explicaron un 97.2% de la variación (Anexo 5).

Además se realizó una transformación *Tasseled Cap*, para obtener las capas de brillo, verdor y humedad que fueron utilizadas en la clasificación (Anexo 5). Estudios anteriores (Chuvieco 1990, Cohen *et al.* 1995, Helmer 1998) indican que el índice de humedad puede contribuir en la discriminación de las coberturas forestales, y no se ve afectado por la topografía. Los índices de brillo y el verdor capturan la mayor parte la variación espectral restante asociada con otras condiciones de los bosques, pero tienen la desventaja de ser afectados por las variaciones en la topografía (Cohen y Spies 1992, citado por Cohen *et al.* 1995).

También se utilizó el cociente entre dos de las *bandas*: TM4/TM3, que intensifica las características del dosel de bosque (Bauer *et al.* 1994). Para dos de las metodologías de *clasificación* se usó como capa de información el modelo de elevación digital (MED), con valores reclasificados entre 0 y 255.

A partir de estas capas de información se construyeron dos imágenes:

- Imagen 1: conteniendo siete capas de información: el primer y segundo componente principal (PCA1, PCA2), los índices: brillo, verdor, humedad, y el coeficiente de dos *bandas* TM4/TM3 y el MED que fue utilizado para aplicar las metodologías donde la *clasificación* se realiza incluyendo *datos auxiliares*.
- Imagen 2: conteniendo las mismas capas que la Imagen 1 pero excluyendo la información del MED, se usó en las metodologías donde la *clasificación* se hizo sin *datos auxiliares*.

3.3.2.2. Metodologías de selección de sitios de entrenamiento

Se utilizaron dos metodologías para la selección de los *sitios de entrenamiento* (Figura 5):

A. *Firmas espectrales* dentro de los polígonos de fincas

Los sitios con datos de bosque se presentan en áreas de 43 ha en promedio, dentro de las cuales la variabilidad espectral puede ser alta, debido a su gran tamaño. Por ello, para cada sitio en cada tipo de bosque se generó un conjunto de áreas de interés utilizando las herramientas de crecimiento de

firmas. Para ello se puso como límite máximo de crecimiento de la *firma* 250 *pixeles* y como distancia euclídeana máxima 15. Este tipo de selección de polígonos de *firmas* se aplicó en las metodologías CP-MED y CP (Cuadro 1).

De este modo se pretende captar la variabilidad espectral de porciones de bosques con una composición de especies conocida. Estas porciones de bosques, a nivel de campo, representan un conjunto de especies, donde en general, la probabilidad de encontrar dos individuos de la misma especie uno al lado de otro es muy baja. Por esta razón los *pixeles* tomados como *firmas* no representan un conjunto de individuos de la misma especie, sino por el contrario, representan un conjunto de individuos de especies distintas, que conforman un tipo de bosque definido.

Luego de seleccionadas las *firmas*, se realizaron evaluaciones de la *separabilidad* de las *firmas* y de la contribución de cada una de las capas de información a dicha *separabilidad*. La *separabilidad* es una medida de la diferencia espectral que existe entre *firmas* que corresponden a diferentes categorías.

Una manera de evaluar la *separabilidad* de los *sitios de entrenamiento* es realizar una *clasificación* de los mismos. Se clasifican así, sólo los *pixeles* correspondientes a los *sitios de entrenamiento*, para determinar el porcentaje de *pixeles* que son asignados a la categoría adecuada. Pueden existir dos tipos de errores: a) que un *pixel* sea asignado a una clase a la que no pertenece (error por comisión) b) que un *pixel* no sea asignado a la categoría que pertenece (error por omisión) (Lillesand y Keifer 1994). Esto se calcula en una *matriz de confusión* (Anexo 5).

Por último, se calcularon las matrices de error y se definió que aquellas *firmas* que presentaran un 70% de los *pixeles* clasificados correctamente serían consideradas como *firmas* con "buena" *separabilidad*. Por el contrario las *firmas* con menos del 70% de los *pixeles* clasificados correctamente de tomaron como *firmas* de "mala" *separabilidad* y fueron excluidas del archivo de *firmas* y no se tomaron en cuenta en la *clasificación*.

B. Metodología de agrupamiento guiado

Las especies que caracterizan los tipos de bosques pueden presentarse en un amplio rango de condiciones ambientales. Teniendo en cuenta que una misma especie creciendo en condiciones ambientales diferentes puede presentar características espectrales distintas (Stewart y Lillesand 1995), esta metodología esta enfocada a tratar con la variabilidad espectral que en algunos casos presentan los *sitios de entrenamiento* de una misma clase de bosques.

Asi mismo, la resolución de los datos de sensores remotos es mucho mayor que la de los sitios donde se levantaron los datos de inventario. La mínima unidad inventariada a 15 *pixeles* en la imagen (1.5 ha). Si existen variaciones espectrales en estas unidades mínimas, puede esperarse que la

metodología de *agrupamiento guiado* las capté.

Este método de selección se aplicó en las metodologías AG – DEM y AG (Cuadro 1). Para la extracción de polígonos de *firmas* de cada tipo de bosque se siguió la metodología propuesta por Bauer *et al.* (1994).

En primer lugar se digitalizaron los *sitios de entrenamiento* de cada tipo de bosque, y se obtuvieron archivos de polígonos de entrenamiento individuales por tipo de bosque. Luego, se creó una máscara de la imagen, para obtener una imagen de entrenamiento conteniendo únicamente los *pixeles* correspondientes a las *firmas* de cada cobertura, es decir tantas imágenes como clases de bosques.

En cada una de las imágenes de entrenamiento, se realizaron clasificaciones no supervisadas en un proceso iterativo, para obtener *firmas* de las subclases dentro de cada clase de bosque. Esto se llevó a cabo hasta que los valores de divergencia transformada para todas las combinaciones excedieran 1500. El estadístico de divergencia transformada computa los valores en una escala de 0 a 2000. Un valor de 2000 indica una muy buena separación entre clases, valores entre 1900 y 1700 indican buena separación entre clases y valores entre 1700 y 1500 indican una separación aceptable entre clases. Por debajo de 1500 la separación es pobre (Jensen 1996) (Anexo 5).

Por último, se reunieron las *firmas* generadas en un solo archivo. Su *separabilidad* se calculó a partir de los valores de divergencia transformada para todas las combinaciones de *firmas*. En este caso se consideró que una *firma* tenía “buena” *separabilidad* cuando contó con valores de divergencia transformada entre 200 y 1500. Mientras que las *firmas* que tuvieron valores menores fueron consideradas de “mala” *separabilidad*. A partir de estos valores se determinó cuales *sitios de entrenamiento* debían ser eliminados o unidos a otros, este proceso fue realizado hasta que todos los valores de divergencia transformada superaran 1500.

3.3.2.3. Clasificación

Se realizaron clasificaciones supervisadas utilizando cada uno de los archivos de *firmas* elaborados en cada una de las metodologías utilizadas (Cuadro 1).

Cuadro 1: Metodologías y clasificaciones realizadas.

Nombre	Metodología de selección de <i>firmas</i>	<i>Datos auxiliares</i>
CP-MED	Crecimiento de polígonos	MED
CP	Crecimiento de polígonos	No
AG – MED	<i>Agrupamiento guiado</i>	MED
AG	<i>Agrupamiento guiado</i>	No

Para ello se utilizó el algoritmo de *máxima verosimilitud* (Anexo 5). Este algoritmo se basa en la probabilidad de que cada *pixel* pertenezca a una clase particular, y asume que las probabilidades son iguales para cada clase y que los valores de los *pixeles* de la imagen se distribuyen normalmente (Chuvieco 1990, Jensen 1996).

3.3.2.4. Evaluación de la precisión

Los estadísticos utilizados para calcular la *precisión* fueron, matrices de error y coeficientes *Kappa* (Anexo 5) (Congalton 1991, Jensen 1992, Lillesand y Keifer 1995). Estas medidas se calcularon para cada una de las metodologías aplicadas.

La diagonal de una *matriz de confusión* expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (el mapa y la realidad), mientras los marginales suponen errores de asignación. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la confiabilidad global del mapa. Los errores por comisión y por omisión se calculan a partir de los residuales de columna y fila respectivamente (Chuvieco 1990).

El estadístico *Kappa* mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar por el azar, es decir, mide el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la *clasificación*, prescindiendo del causado por factores aleatorios (Chuvieco 1990).

Además, las precisiones generales obtenidas en las dos metodologías se compararon utilizando los estadísticos *Kappa* ya que es posible realizar una prueba de significancia pareado entre dos valores *Kappa* independientes utilizando la curva normal para determinar si las dos matrices de error son significativamente diferentes (Congalton *et al.* 1983). De este modo se calcularon para todas las combinaciones posibles de pares de estadísticos *Kappa* los valores estandarizados para la diferencia de medias (*Z*) y se compararon con los valores esperados de la tabla normal. Cuando los valores *Z* calculados excedieron los valores *Z* esperados para un nivel de probabilidad del 99% se consideró que existieron diferencias significativas entre las metodologías comparadas.

Debido a la necesidad de utilizar todos los datos de referencia disponibles como *sitios de entrenamiento* para la *clasificación*, las precisiones generadas en este estudio se calcularon a partir de los mismos *sitios de entrenamiento*, lo que implica que la precisión puede ser sobrestimada.

3.3.2.5. Presentación de los resultados

Es común que los resultados de una *clasificación* muestren un alto grado de fragmentación. Esto se debe a dos factores: por un lado, a que la mayor parte de los criterios de asignación no tienen en cuenta la pertenencia de *pixeles* vecinos, y por otro lado a la propia complejidad del paisaje,

directamente relacionada a la aparición de *pixeles* de borde que son los responsables de la discontinuidad visible en el mapa (Chuvieco 1990).

Se aplicaron *filtros* de mayoría para suavizar las imágenes clasificadas, minimizando la influencia de *pixeles* aislados y mal clasificados. Este tipo de *filtro* asigna al pixel central la categoría que cuente con la mitad mas uno de los *pixeles* vecinos, en el caso de que ninguna categoría supere ese valor, el pixel central mantiene su valor original (Chuvieco 1990).

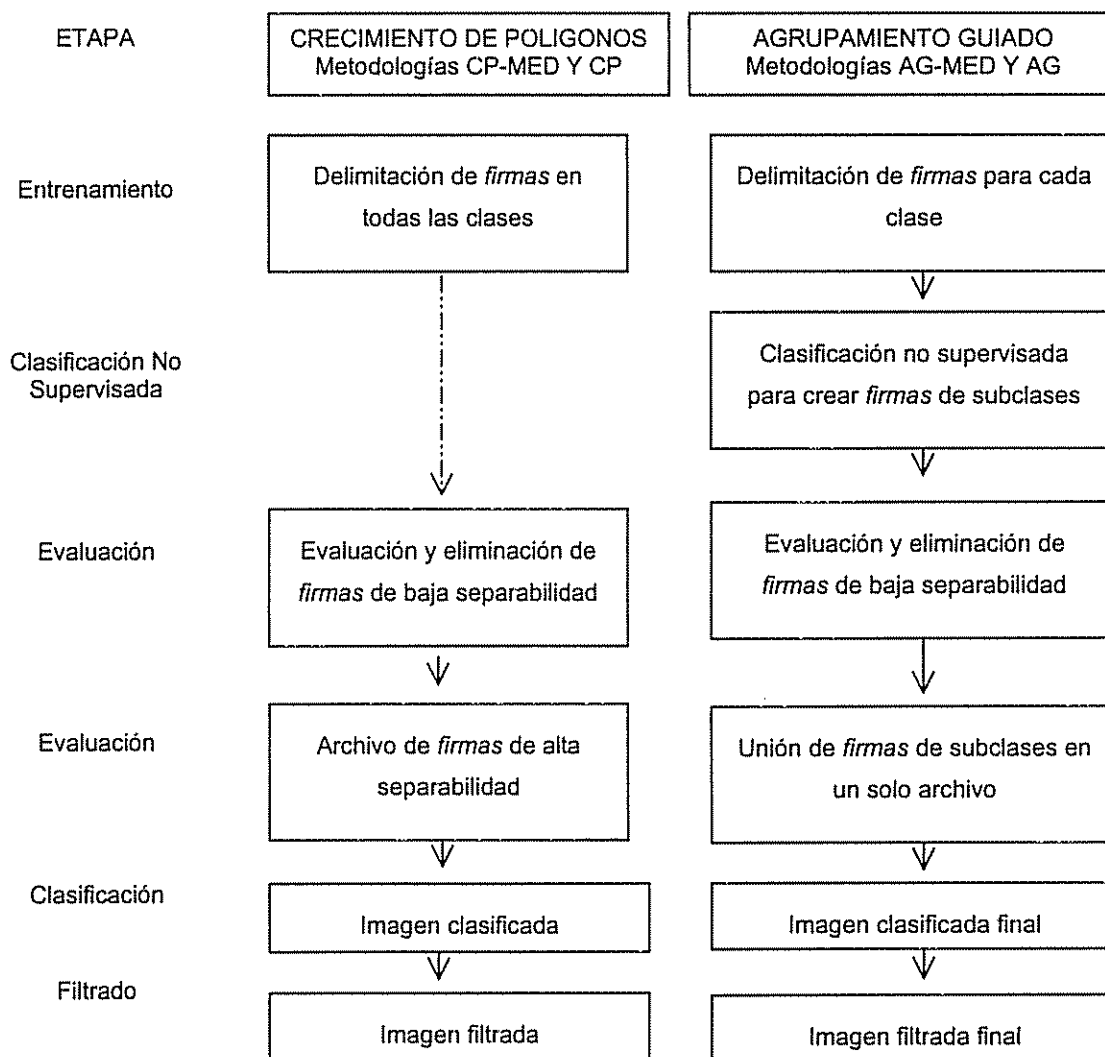


Figura 5: Esquema de los pasos seguidos en las distintas metodologías utilizadas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización fitosociológica de los bosques

4.1.1. Resultados

Se describieron 7 diferentes tipos de bosques a nivel de paisaje a partir de los datos de inventarios. A nivel local, y en el análisis de PPM, se encontraron también 7 tipos de bosques, 5 de los cuales con los de inventario (Cuadro 2). Los Bosques de *Prioria*, y *Billia* no se encontraron en el análisis de PPM. Así mismo los bosques de *Pentaclethra* y de *Dialium* no se encontraron en los datos de inventario.

Cuadro 2: Tipos de bosques encontrados en cada uno de los análisis, y número de sitios en que se encontraron. La categoría "otros bosques", son bosques que por contar con un número de sitios en que se presentó menor de 7 no fueron considerados como "Tipos de bosques" y no fueron descritos.

Tipo de Bosque	Número de sitios en Inventarios	Número de sitios en PPM
Bosque de <i>Prioria</i>	12	-
Bosque de <i>Carapa</i> – <i>Pentaclethra</i> – <i>Pterocarpus</i>	8	4
Bosque de <i>Pentaclethra</i> – <i>Carapa</i> - <i>Apeiba</i>	18	4
Bosque de <i>Pentaclethra</i> – <i>Vochysia ferruginea</i>	12	1
Bosque de <i>Pentaclethra</i>	-	3
Bosque de <i>Dialium</i> – <i>Dipteryx</i> - <i>Pentaclethra</i>	14	2
Bosque de <i>Vochysia ferruginea</i> - <i>Qualea</i>	9	4
Bosque de <i>Dialium</i>	-	3
Bosque de <i>Billia</i>	10	-
Otros bosques no descritos	13	-
Total	96	21

Estos tipos de bosques se describieron en tablas de vegetación para las primeras diez especies en orden de importancia (Anexo 1). Además la relaciones de semejanza entre los grupos de bosques diferenciados puede observarse en un dendrograma (Anexo 2) y los grupos de especies que caracterizan a cada tipo de bosque a nivel de paisaje, se indican en una tabla de trabajo fitosociológica (Anexo 3). Por otra parte los resultados para explicar la relación entre los tipos de bosques y las características ambientales se muestran en las Cuadros 3, 4 y 5.

La distribución de los tipos de bosques a nivel de paisaje se presenta en la Figura 6. Las áreas representan la zona que incluye los sitios de cada tipo de bosque, pero no indica la presencia de estos bosques en toda el área, ya que los fragmentos de bosques remanentes se encuentran dispersos.



Figura 6: Distribución de los tipos de bosques a nivel de paisaje. Se muestran las áreas que abarcan todos los sitios pertenecientes a cada tipo de bosque.



Teniendo en cuenta que la identificación primaria de tipos de bosques en este estudio se realizó a partir de los datos de inventario, y que el área promedio en que se levantaron los mismos fue de 43 ha. las caracterizaciones que se presentan a continuación deben ser interpretadas a escala de paisaje. Es decir en una escala mayor a la abarcada por la PPM (1 ha). De este modo la información a escala local, provista por el análisis de PPM permite enriquecer las descripciones realizadas para los tipos de bosques a nivel de paisaje.

En la Figura 7 se presenta un esquema resultante del análisis de la relación entre los tipos de bosques y los factores ambientales considerados. A partir de este esquema se definirán posteriormente los 7 tipos de bosques en términos de las especies que presentan la mayor abundancia, dominancia e IVI, su ubicación, altitudes y tipo de suelo en que se presentan.

Cuadro 3: Características de los sitios con registros de inventario, por tipo de bosque.

Tipo de Bosque	Area total (ha)	Area prom. (ha)	Elev. prom. (m)	Elev. Mín (m)	Elev. Máx. (m)	Rango de Precip. promedio	Meses de menor precip.
B. Pioria	659	55	25	2	71	4000 – 5500	1
B. Carapa Pentaclethra Pterocarpus	272	34	48	1	123	4000 – 5500	1
B. Pentaclethra Carapa Apeiba	419	23	160	55	350	3000 – 4500	1 – 2
B. Pentaclethra Vochysia ferruginea	446	37	111	25	304	3500 – 4500	1
B. Dialium Dipteryx Pentaclethra	1127	81	111	82	177	3000 – 3500	2 – 3
B. Vochysia ferruginea Qualea	701	78	132	45	249	3000 – 4000	1 – 2
B. Billia	487	27	523	398	870	3500 - 4000	1
Total	4110	43	158	1	870		

Cuadro 4: Características de los sitios con registros de PPM, por tipo de bosque.

Tipo de Bosque	Area total (ha)	Area prom. (ha)	Elev. prom. (m)	Elev. mín. (m)	Elev. Máx. (m)	Rango de Precip. Promedio	Meses de menor precip.
B. Carapa Pentaclethra Pterocarpus	4	1	50	50	50	4000 – 5500	1
B. Pentaclethra Carapa Apeiba	4	1	50	50	50	3000 – 4500	1 – 2
B. Pentaclethra Vochysia ferruginea	1	1	200	200	200	3500 – 4500	1
B. Pentaclethra	3	1	210	50	300	4000 – 4500	1
B. Dialium Dipteryx Pentaclethra	2	1	50	50	50	3000 – 3500	2 – 3
B. Vochysia ferruginea Qualea	4	1	56	50	75	3000 – 4000	1 – 2
B. Dialium	3	1	100	50	150	3000 – 3500	3
Total	21	1	102	50	300		

Cuadro 5: Tipos de suelo sobre los que se desarrollan los bosques descritos.

Orden de suelo	Suborden	Suelo	B. Prioria	B. Carapa Pentaclethra Pterocarpus	B. Pentaclethra Vochysia ferruginea	B. Carapa Apeiba Pentaclethra	B. Dialium Dipteryx Pentaclethra	B. Vochysia ferruginea Qualea	B. Billia
Histosoles	Hemists	Hemic troposaprist		X					
Entisoles	Aquepts	Typic tropaquept	X	X					
Inceptisoles	Tropepts	Typic dystropept			X				X
Inceptisoles	Tropepts	Typic humitropept		X			X	X	X
Ultisoles	Humults	Typic tropohumult							X
Ultisoles	Humults	Typic haplohumult			X			X	
Ultisoles	Udults	Typic hapludult					X		
Inceptisoles	Andepts	Typic dystrandept							X

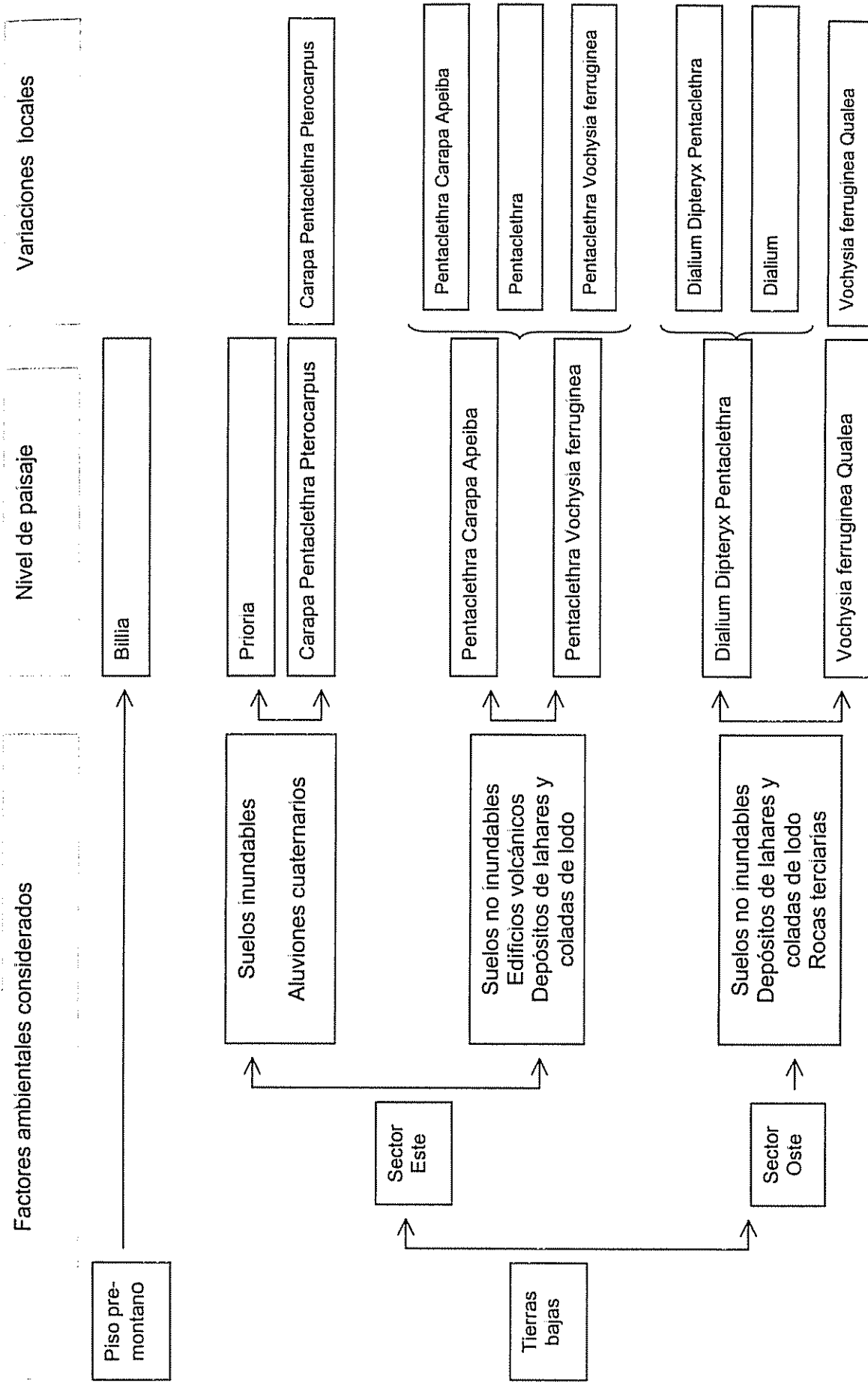


Figura 7: Esquema de los tipos de bosques identificados a partir de datos de inventario y las variaciones locales identificada a partir de datos de PPM, con relación a la altitud, la precipitación y el tipo de suelos y origen geológico, donde se presentan.

4.1.1.1. Bosque del piso premontano

Bosque de *Billia*

Este tipo de bosque se ubica entre los 400 y 900 m.s.n.m., en el área de la Cordillera Volcánica Central (Figura 6). Se presenta sobre suelos derivados de materiales volcánicos, presentes en relieve montañoso (orden: Inceptisoles, suborden: Andepts). Según su origen geológico corresponden a la categoría de edificios volcánicos.

La especie característica es *Billia colombiana* que acumula un 24 % del IVI total. Las 9 especies siguientes en importancia son: *Inga* spp., *Carapa guianensis*, *Pouteria* spp., *Minquartia guianensis*, *Virola* spp., *Pentaclethra macroloba*, *Vochysia ferruginea*, *Ilex skutchii* y *Apeiba membranacea*.

Una característica de este tipo de bosque es que *Pentaclethra macroloba* esta ausente del total de especies en 6 de los 10 sitios analizados, mientras que en los bosques restantes *Pentaclethra macroloba* es una especie que se presenta en todos los sitios.

4.1.1.2. Bosques de tierras bajas

4.1.1.2.1. Bosques en el sector Este del gradiente pluvial

4.1.1.2.1.1. Suelos inundables, de aluviones cuaternarios

Bosque de *Prioria*

Se encontró ocupando un rango de elevación entre los 0 y 50 m.s.n.m. Los sitios inventariados se ubican en el sector noreste del área de estudio, sobre la costa del Atlántico (Figura 6). Se desarrolla sobre suelos aluviales muy mal drenados, con régimen ácuico de humedad, poco desarrollados (orden: Entisoles, suborden: Aquentes).

Este tipo de bosque esta definido por la dominancia de *Prioria copaifera* que acumula un 26% del IVI y *Pentaclethra macroloba* que acumula un 23 % del IVI. Las acompañan: *Sloanea* spp., *Luehea seemannii*, *Grias cauliflora*, *Guatteria alata*, *Hernandia didymantha*, *Inga* spp., *Pterocarpus* spp. y *Carapa guianensis*.

Bosque de Carapa – *Pentaclethra* - *Pterocarpus*

Al igual que el tipo de bosque anterior, este se presenta entre 0 y 50 m.s.n.m en las regiones costeras del Atlántico (Figura 6). Se encuentra tanto en suelos poco desarrollados y mal drenados (orden: Entisoles, suborden: Aquents), como en suelos con alto contenido orgánico inundados la mayor parte del año (orden: Histosoles, suborden: Hemists).

Aquí, el 65 % del IVI se concentra en tres especies dominantes: *Pentaclethra macroloba*, *Carapa guianensis* y *Pterocarpus* spp. Es en este tipo de bosque donde se da la mayor abundancia y dominancia de *Carapa guianensis* (18% del IVI) y *Pentaclethra macroloba* (37% del IVI). Entre las restantes especies de importancia se encuentran: *Hernandia didymantha*, *Apeiba membranacea*, *Luehea seemannii*, *Tabebuia rosea*, *Hyeronima oblonga*, *Inga* spp. y *Vitex cooperi*.

Tomando en cuenta, la información a nivel local que resulta del análisis de PPM, se pueden agregar a esta descripción las siguientes especies: *Psychotria panamensis*, *Prioria copaifera*, *Astrocaryum alatum*, *Iriartea deltoidea* y *Virola koschnyi* (Figura 8).

4.1.1.2.1.2. Suelos no inundables de edificios volcánicos o de depósitos de lahares y coladas de lodo

Bosque de *Pentaclethra* – *Carapa* - *Apeiba*

Este bosque se presenta en un rango comprendido entre los 50 y 350 m.s.n.m. Los sitios se distribuyen en la parte central del área de estudio, desde el pie de la Cordillera Volcánica Central hasta los límites con Nicaragua en el Norte (Figura 6). Se presentan en suelos residuales de relieve ondulado en tierras altas, con alto contenido en materia orgánica (orden: Ultisoles, suborden: Humults), en algunos casos sobre suelos con buen drenaje, erosionados y de textura gruesa (orden: Inceptisoles, suborden: Tropepts), en otros casos sobre suelos aluvionales moderadamente drenados (orden: Inceptisoles, suborden: Tropepts).

Aquí *Pentaclethra macroloba* es la especie que abarca el 35% del IVI. Las restantes especies de mayor importancia son: *Inga* spp., *Pouteria* spp., *Carapa guianensis*, *Apeiba membranacea*, *Goethalsia meiantha*, *Cespedesia macrophylla*, *Virola* spp., *Guarea* spp., *Pourouma bicolor*. Considerando los resultados obtenidos a nivel local, estas especies son acompañadas por *Iriartea deltoidea*, *Brosimum lactescens*, *Socratea durissima*, *Dialium guianense*, *Welfia georgii*, *Protium ravenii* y *Casearia arborea* (Figura 9).

Bosque de *Pentaclethra* – *Vochysia ferruginea*

Se presenta entre los 25 y 300 m.s.n.m. Su distribución se extiende, al igual que el anterior tipo de bosque desde los pies de la cordillera hasta el Río San Juan en el Norte (Figura 6). Ocupa suelos residuales de relieve ondulados de tierras altas y con altos en materia orgánica (ordenes: Ultisoles e Inceptisoles, subórdenes: Humults y Tropepts). Puede presentarse en áreas que geológicamente corresponden tanto a depósitos lahares y coladas de lodo, como a edificios volcánicos.

Las especies que lo distinguen son *Pentaclethra maculoba* y *Vochysia ferruginea* que juntos agrupan un 31% del IVI. A estas dos especies las acompañan en orden de importancia: *Pouteria* spp., *Chrysophyllum* spp., *Couma macrocarpa*, *Inga* spp., *Carapa guianensis*, *Dipteryx panamensis*, *Virola* spp... Si se incluye la información a menor escala provista por las PPM el listado se amplía a: *Ferdinandusa panamensis*, *Welfia georgii*, *Protium ravenii*, *Laetia procera*, *Dendropanax arboreus*, *Maclobium costaricense*, *Tetragastris panamensis*, *Pourouma bicolor* y *Minuartia guianensis* (Figura 10).

Variación Local: *Pentaclethra*

En el análisis de PPM se distingue un tipo de bosque a escala local que se presenta en la parte central del área de estudio, en un rango de altitud que va desde los 50 a los 300 m.

Está caracterizado por las siguientes especies: *Pentaclethra maculoba*, *Protium ravenii*, *Micropholis crotonoides*, *Socratea durissima*, *Tapirira guianensis*, *Brosimum guianense*, *Maranthes panamensis*, *Pouteria campechiana*, *Virola sebifera* y *Quararibea ochrocalyx*. Aquí *Pentaclethra maculoba* es el que posee mayor dominancia acumulando un 21% del IVI total.

Se distingue por la presencia de: *Micropholis crotonoides*, *Brosimum guianensis*, *Maranthes panamensis*, *Pouteria campechiana*, *Iriartea deltoidea*, *Pourouma bicolor*, *Pouteria* spp., *Protium* spp., *Brosimum latescens*, *Ocotea* spp. y *Licania affinis*, especies que comprenden un 12% del IVI total (Figura 10).

4.1.1.2.2. Bosques en el sector Oeste del gradiente pluvial

4.1.1.2.2.1. Suelos no inundables de depósitos de lahares y coladas de lodo o de rocas terciarias

Bosque de *Dialium* – *Dipteryx* - *Pentaclethra*

Se presentan entre los 80 y 200 m.s.n.m. en los sitios ubicados al norte del área de estudio, hacia la frontera con Nicaragua (Figura 6). Se desarrolla en terrenos ondulados, desarrollados sobre terrazas erosionadas antiguas. Son profundos y bien drenados, con alto contenido de arcilla (orden: Ultisoles, suborden: Udults). También se presenta en suelos residuales en relieve ondulado, profundos de textura gruesa, bien drenados y muy erosionados (orden: Inceptisoles, suborden: Tropepts).

Las especies más importantes son: *Dialium guianense*, *Dipteryx panamensis*, *Pentaclethra macroloba*, y *Vochysia ferruginea*. Estas acumulan un 36% del IVI, del cual a *Pentaclethra macroloba* le corresponde el 16%.

Las restantes especies más importantes son: *Virola* spp., *Carapa guianensis*, *Tetragastris panamensis*, *Vatairea lundellii*, *Chrysophyllum* spp. y *Brosimum alicastrum*. A nivel local los resultados de las PPM muestran que pueden acompañar a estos bosques *Apeiba membranacea*, *Welfia georgii*, *Pouteria* spp. y *Chimarrhis latifolia* (Figura 11).

Variación Local: *Dialium*

Esta es una variación local de los bosques de *Dialium* – *Dipteryx* – *Pentaclethra*, correspondiendo a los sitios ubicados en la parte noroeste del área de estudio con elevaciones entre 50 y 150 m.s.n.m. Se presenta en suelos aluviales moderadamente drenados (orden: Inceptisoles, suborden: Tropepts), y en suelos residuales en relieve ondulado en tierras altas, profundos y bien drenados (orden: Inceptisoles, suborden: Tropepts).

Las primeras especies en importancia son: *Dialium guianense*, *Apeiba membranacea*, *Iriartea deltoidea*, *Pourouma bicolor*, *Colubrina spinosa*, *Goethalsia meiantha*, *Sclerolobium costaricense*, *Virola koschnyi*, *Brosimum alicastrum*, *Carapa guianensis* y *Welfia georgii*, que acumulan un 25 % del IVI (Figura 11)

Bosque de *Vochysia ferruginea* - *Qualea*

Se presenta entre los 45 y 250 m.s.n.m. y al igual que el anterior se distribuye en el noroeste del área de estudio (Figura 6). Su distribución coincide con las del bosque de *Dialium* – *Dipteryx* – *Pentaclethra*. Se da sobre suelos residuales de relieve ondulado en tierras altas con alto contenido de materia orgánica (orden: Ultisoles, suborden: Humults), y sobre suelos profundos de textura gruesa y bien drenados (orden: Inceptisoles, suborden: Tropepts). Geológicamente corresponde a las categorías de: rocas volcánicas variadas del terciario, y a depósitos de lahares y coladas de lodo.

También comparte con este muchas de las especies, aunque la diferencia se presenta en la baja abundancia de *Pentaclethra macroloba* que es la especie mas importante en el tipo de bosque anterior. Así mismo, en este bosque se distingue la presencia del *Qualea paraensis*, que no es frecuente en el anterior.

Las especies de mayor importancia son las siguientes: *Vochysia ferruginea*, *Qualea paraensis*, *Coccoloba tuerckheimii*, *Dipteryx panamensis*, *Tetragastris panamensis*, *Chrysophyllum* spp., *Dialium guianensis* y *Billia colombiana*. A nivel local podemos agregar a esta descripción las siguientes especies: *Welfia georgii*, *Vochysia allenii*, *Ferdinandusa panamensis*, *Prestoea decurrens* y *Henrietta odorata* (Figura 12).

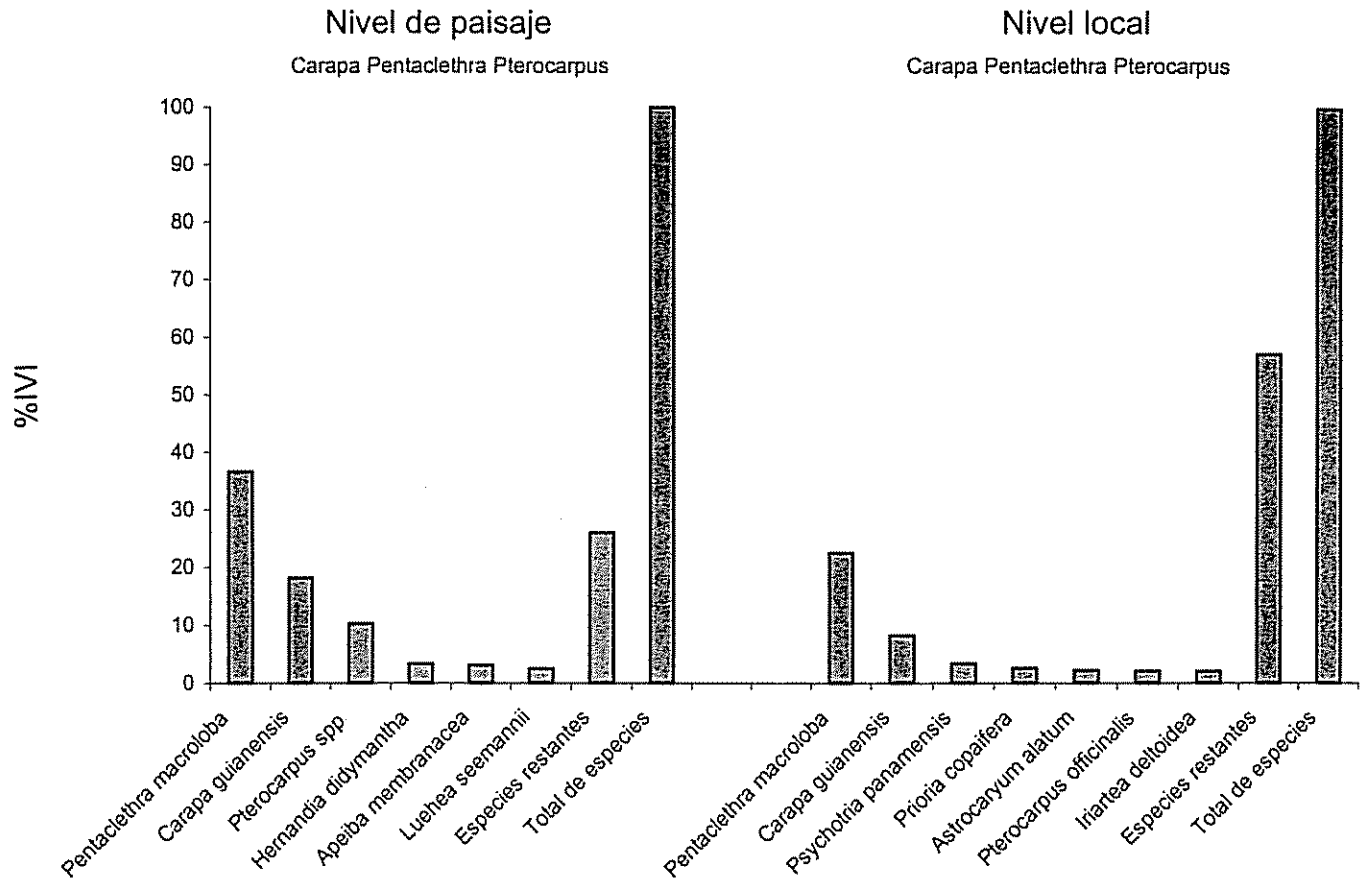


Figura 8: Porcentaje del IVI que poseen las 6 primeras especies del bosque: *Carapa - Pentaclethra - Pterocarpus*, a nivel de paisaje (individuos DAP \geq 30 cm) y a nivel local (individuos DAP \geq 10 cm).

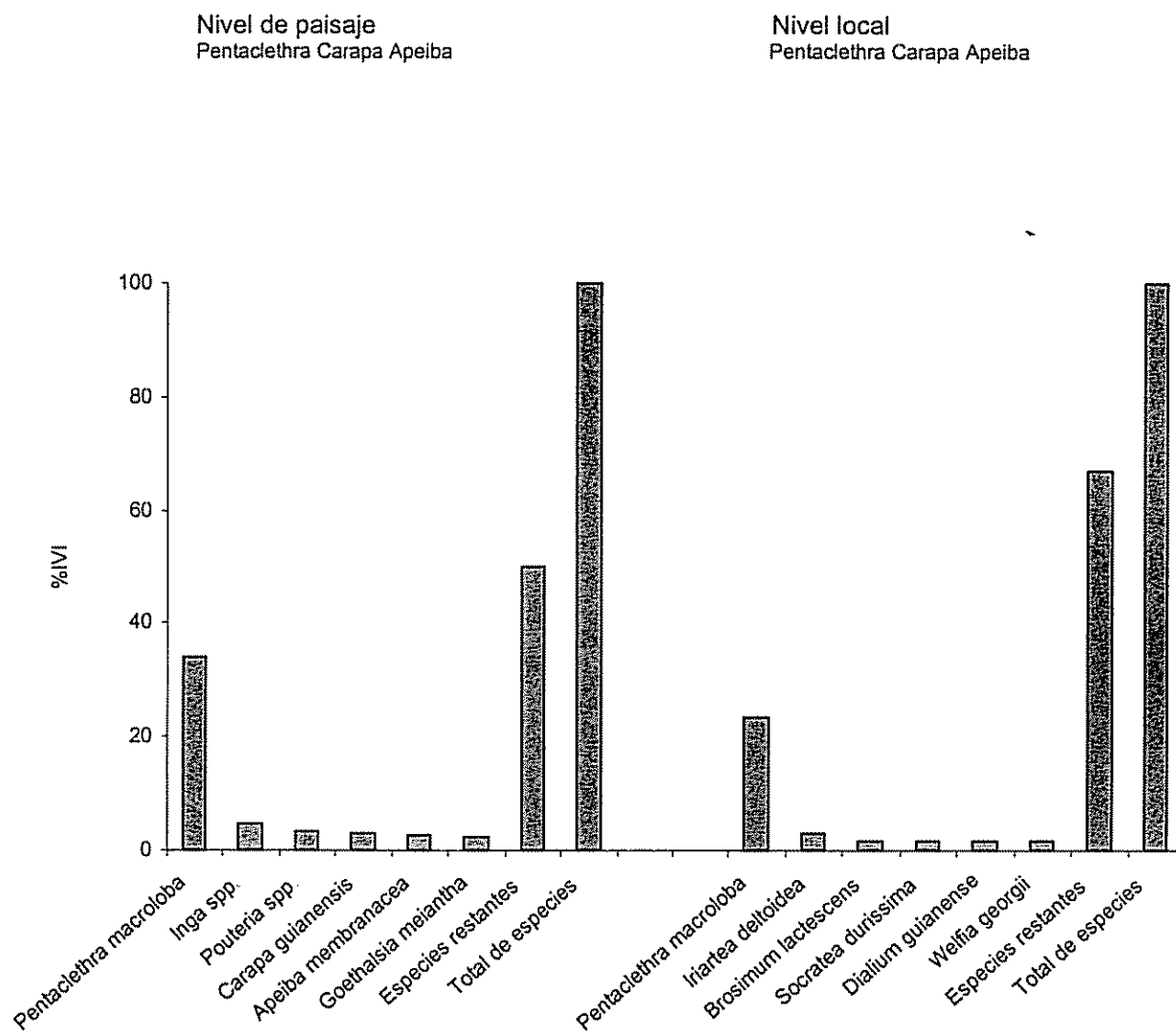


Figura 9: Porcentaje del IVI que poseen las 6 primeras especies del bosque: Pentaclethra - Carapa - Apeiba, a nivel de paisaje (individuos DAP \geq 30 cm) y a nivel local (individuos DAP \geq 10 cm).

Nivel de paisaje
 Pentaclethra Vochysia ferruginea

Nivel local
 Pentaclethra Vochysia ferruginea

Nivel local
 Pentaclethra

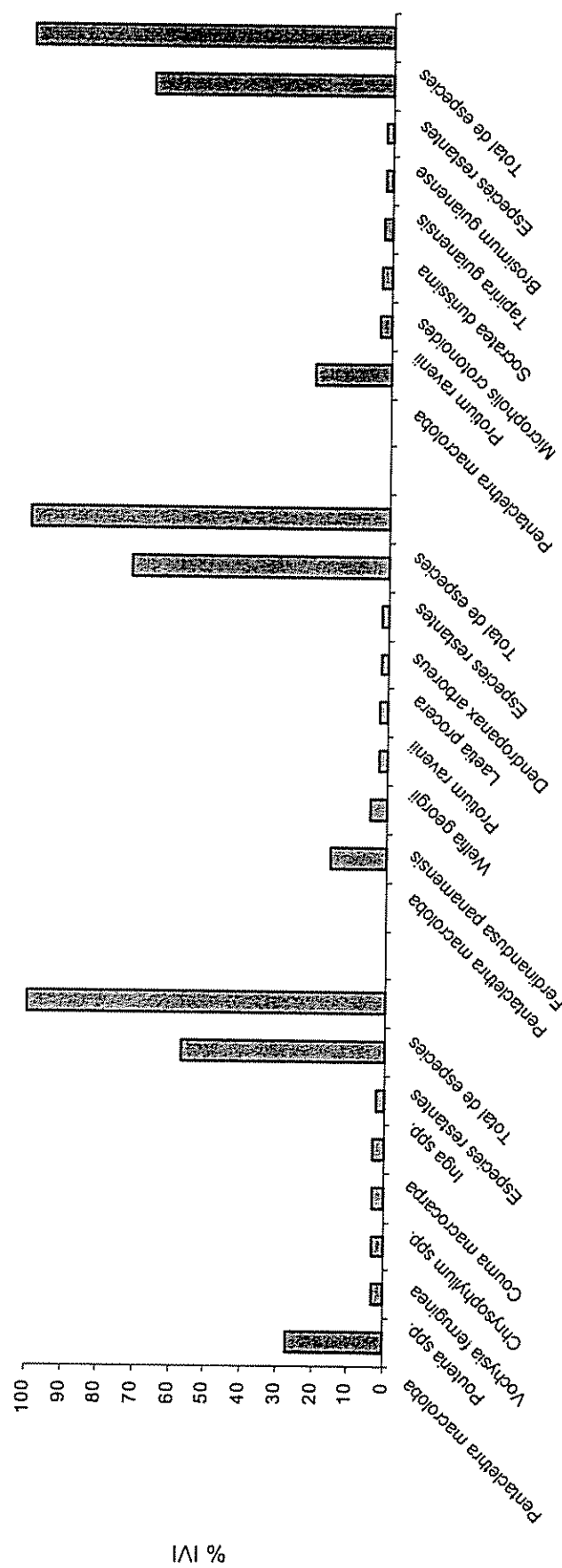


Figura 10: Porcentaje del IVI que poseen las 6 primeras especies del bosque: Pentaclethra – Vochysia ferruginea, a nivel de paisaje (individuos DAP ≥ 30 cm) y a nivel local (individuos DAP ≥ 10 cm).

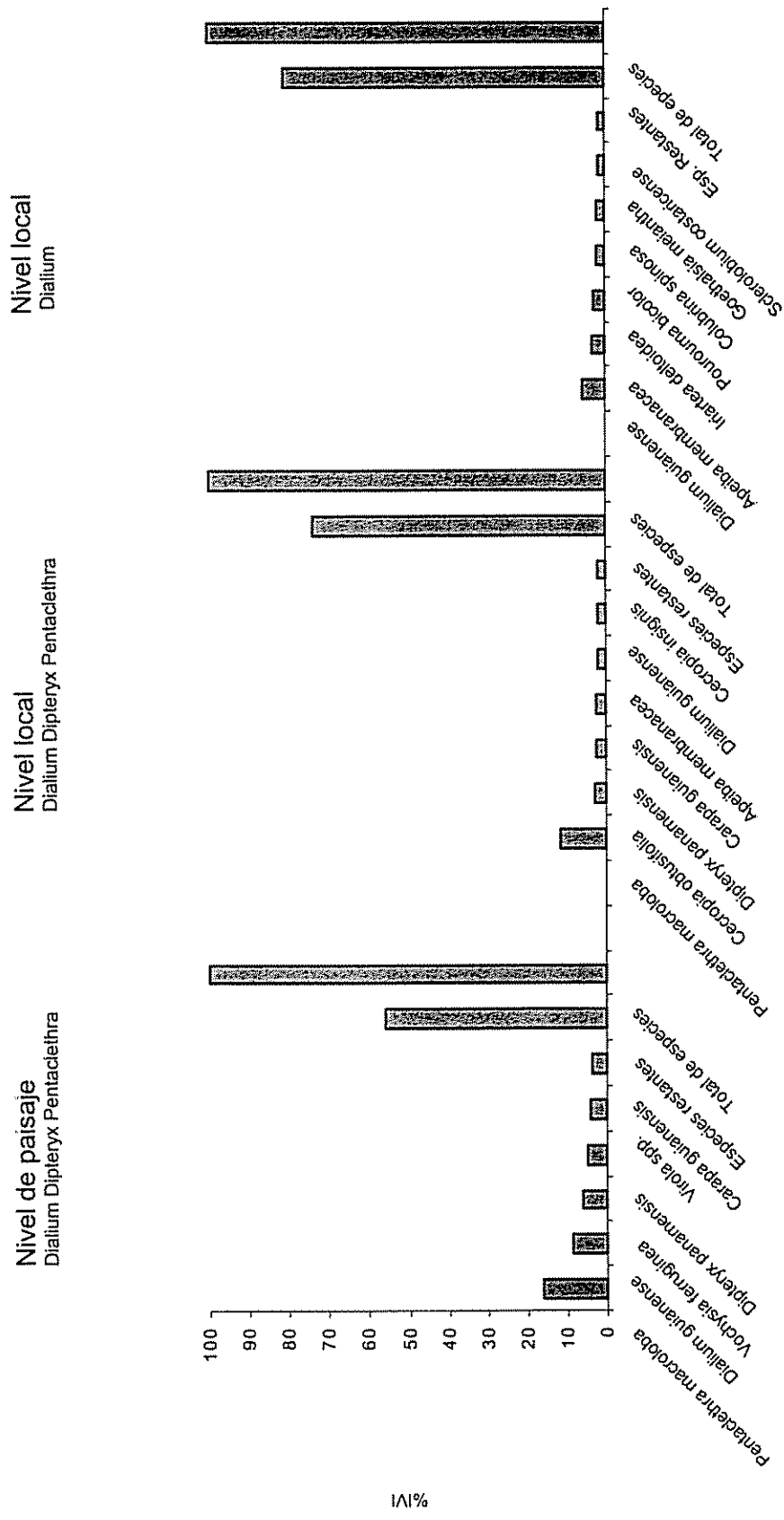


Figura 11: Porcentaje del IVI que poseen las 6 primeras especies del bosque: Dialium – Dipterix – Pentaclethra, a nivel de paisaje (individuos DAP \geq 30 cm) y a nivel local (individuos DAP \geq 10 cm).

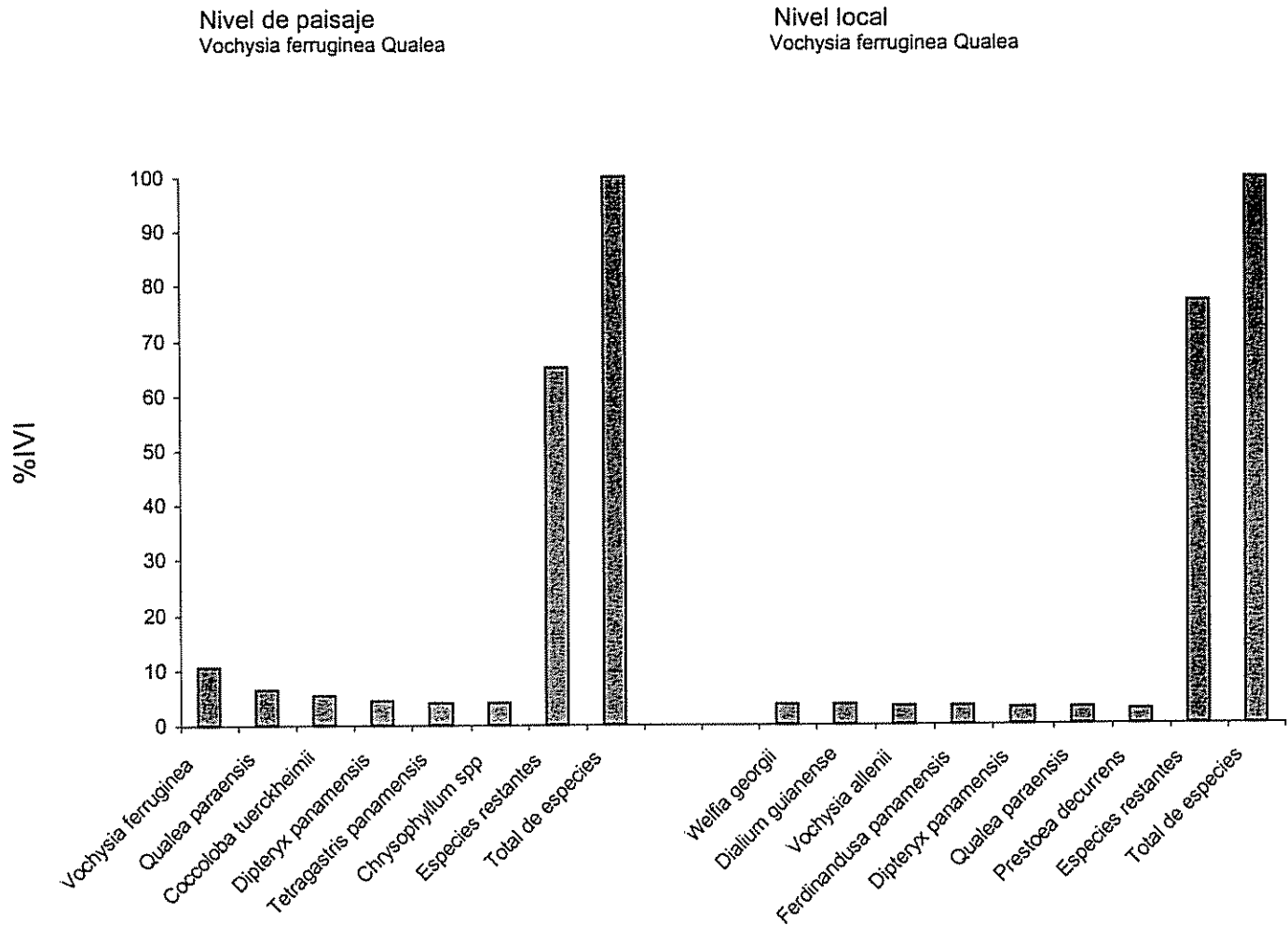


Figura 12: Porcentaje del IVI que poseen las 6 primeras especies del bosque: Vochysia ferruginea – Qualea a nivel de paisaje (individuos DAP \geq 30 cm) y a nivel local (individuos DAP \geq 10 cm).

4.1.2. Discusión

Estudios florísticos de diferentes bosques tropicales del mundo muestran el carácter complejo y variable de estas comunidades. Estos sugieren que a escalas mayores el clima y la biogeografía son los factores principales que influyen en la composición de especies (Peralta *et al.* 1987). A menor escala, elementos ecológicos de segundo orden tienen una influencia importante sobre la composición y estructura de los bosques. Entre estos se encuentran: la topografía, el tipo de suelo, el patrón de distribución de la precipitación, la nubosidad, los vientos etc.

En el esquema presentado en este estudio para agrupar los bosques según las características ambientales donde estos se desarrollan (Figura 7), tienen tres niveles de diferenciación: la altitud, posición en el gradiente de la precipitación y las características del suelo-geomorfología.

4.1.2.1. Influencia de la altitud

El Bosque de *Billia* es el que se presenta en los sitios a mayor altura del área de estudio, y no se encuentra definido anteriormente en la literatura. Presenta especies tanto de bosques de zonas bajas como de bosques en zonas más altas. Este es el caso de *Billia colombiana* que es abundante en zonas de Bosque Húmedo Premontano, entre 300 y 2000 m.s.n.m (Holdridge 1987, Di Stéfano *et al.* 1995, Lieberman 1996), y de especies como *Pentaclethra macroloba* se presenta en bosques de tierras bajas. Por esto es posible que este tipo de bosque sea un bosque transicional entre los bosques de bajura y altura y refleje la variación en la composición de las especies a lo largo del gradiente de altitud.

4.1.2.2. Influencia de la posición respecto al gradiente de precipitación

Los seis tipos de bosques restantes se encuentran en tierras bajas. Los Bosques de *Dialium* – *Dipteryx* – *Pentaclethra*, de *Vochysia ferruginea* – *Qualea* no se encuentran definidos en la literatura anterior, lo mismo ocurre con el bosque de *Dialium* definido a escala local. Estos conforman un grupo donde la presencia del grupo de especies: *Dipteryx panamensis*, *Dialium guianense*, *Vochysia ferruginea*, *Couma macrocarpa*, *Chrysophyllum* spp., *Tetragastris panamensis* y *Elaeoluma glabrescens* los caracteriza. Todos ellos están presentes en el sector ubicado más hacia el noroeste del área de estudio. Su ocurrencia podría estar relacionada con su posición geográfica, la menor pluviosidad, o una mayor duración de la época en que la precipitación es relativamente menor.

En todos los bosques de zonas bajas *Pentaclethra macroloba* es una especie presente siempre entre las primeras 10 en orden de importancia, pero su abundancia varía entre los distintos tipos de bosques. En los bosques del noroeste *Pentaclethra macroloba* nunca supera el 15 % del IVI,

mientras que en los bosques de las zonas central y noreste siempre esta por encima de este valor, llegando hasta valores de 68 % del IVI.

4.1.2.3. Influencia del tipo de suelo y geomorfología

El tercer nivel de diferenciación utilizado en este estudio fue el suelo. El tipo de suelo, y en particular características como textura y profundidad, pueden explicar una parte importante de la variación entre tipos de bosques (Clark *et al.* 1995). La cantidad de oxígeno disponible para las plantas en el suelo, disminuye a medida que aumenta la cantidad de agua en el mismo.

Las plantas son sensibles a estas variaciones, lo que explicaría las diferencias en las especies que componen los bosques de los sitios con suelos inundables, con aquellos bosques que no se inundan. Estudios realizados en la amazonia peruana, indican que la distribución y abundancia de palmas esta relacionada con la cantidad de agua en el suelo, y los materiales que lo componen (Scarriot *et al.* 1989, Kahn y Mejia 1991, Clark 1998). En relación con las especies arbóreas, las pocas especies que dominan en las zonas inundables son escasas en las áreas no inundables.

Este es el caso de los bosques de zonas bajas, y donde la precipitación es mayor. Los bosques en áreas inundables, se presentan especies como *Prioria copaifera* y *Pterocarpus officinalis* que sólo se dan en este tipo de bosques. Así mismo, en los bosques que se inundan, el numero de especies arbóreas es menor (Lieberman *et al.* 1985). En este estudio se vio que los bosques en áreas inundables concentran el 50% del IVI en dos especies arbóreas, este es el caso de *Prioria copaifera*-*Pentaclethra maculosa*, y *Carapa guianensis*-*Pentaclethra maculosa*.

Los bosques de las zonas bajas y que crecen sobre suelos inundables, han sido descritos en estudios anteriores. En la Zona Atlántico Norte, Nuhn y Pérez (1967) indican que en las zonas bajas donde las condiciones climáticas son semejantes, básicamente se presentan los mismos tipos de vegetación; su diferencia estriba solamente en la mayor o menor abundancia de algunas especies. Se indica que los principales cambios en la vegetación se deben a la profundidad de la capa freática, la velocidad de escorrentía, el drenaje y las propiedades de los suelos.

Se encontraron semejanzas de composición con los Bosques de *Prioria* descritos por Nuhn y Pérez (1967) y posteriormente por Myers (1981) para la zona de Tortuguero. En estos se indica que las especies dominantes son *Pentaclethra maculosa* y *Prioria copaifera* entremezcladas con palmas. Se presentan en su mayoría en las márgenes de los ríos o en las quebradas donde el agua escurre rápidamente.

El Bosque de *Carapa* – *Pentaclethra* – *Pterocarpus* encontrado en este estudio, ha sido definido anteriormente por Holdridge (1971), Myers (1981), Gomez (1986), Peralta *et al.* (1987), y por Hartshorn y Hammel (1994). Los autores indican la existencia de un bosque de pantano con

palmas donde *Pentaclethra macroloba*, *Carapa guianensis* y *Pterocarpus officinalis* son especies dominantes, y se presentan sobre suelos mal drenados. Además, definen variaciones en la distribución de especies, las que parecen estar ligadas al microrelieve. Por otra parte, indican que la mayoría de las especies que ocurren en los bosques inundados, también se encuentran en los bosques mejor drenados, pero en densidades mucho menores.

Siguiendo con los bosques de zonas bajas, en las regiones no inundables del área de estudio se encuentran los bosques de *Pentaclethra – Carapa – Apeiba* y *Pentaclethra – Vochysia ferruginea*. Ambos han sido descritos anteriormente. El primero se describe en la Estación Biológica La Selva (Bethe 1976, citado por Hartshorn y Hammel 1994, Peralta *et al.* 1987, Lieberman *et al.* 1996, Clark 1998) y en uno de los estratos altitudinales definidos en un estudio realizado en el Área de Conservación de la Cordillera Volcánica (Aguilar y Muñoz 1994).

En el caso del Bosque *Pentaclethra – Vochysia ferruginea* encontrado en el presente estudio, se hallan descripciones comparables realizadas por Holdridge (1971), González y Chaves (1994), Davis (1997) y Aguilar y Muñoz (1994).

4.1.2.4. *Delimitación de bosques: escala de paisaje y escala local*

En este estudio se caracterizaron tipos de bosques en dos escalas: escala de paisaje y escala local, cinco de los tipos de bosques a nivel de paisaje presentan una alta correspondencia con lo que se llamó en este estudio variaciones locales de los tipos de bosques, que fueron definidas a partir del análisis de PPM. En dichos casos se utilizó la información a escala local para enriquecer las descripciones a nivel de paisaje, principalmente porque la información de PPM incluye individuos de clases diamétricas menores (10-30 DAP), y no sólo se miden especies arbóreas, sino también especies de palmas. Por otra parte, se encontraron dos variaciones locales que si bien presentan una similitud aparente con alguno de los tipos de bosques definidos a nivel de paisaje, estas semejanzas son menos claras. Este es el caso de los bosques de *Pentaclethra* y *Dialium*, que fueron descritos independientemente en este estudio.

La diferenciación entre tipos de bosques a nivel de paisaje y a escala local, reside principalmente en el tamaño de las áreas muestreadas en los datos de inventario y los de PPM. Pero también hay que tener en cuenta que los datos de inventarios son recolectados en transectos que deben estar ubicados abarcando el gradiente ambiental que se presente en el sitio. Las PPM en cambio, deberían ubicarse de manera de no abarcar gradientes ambientales. Esto produce el efecto de que los datos de inventarios contienen información que engloba variaciones ambientales presentes a escala local. Al contrario las PPM muestran sólo una realidad local. De este modo, los estudios realizados a partir de datos de inventarios y de PPM captan variaciones de composición presentes a diferentes escalas.

4.2. Identificación de bosques a través de sensores remotos

4.2.1. Clases de bosques

Los siete tipos de bosques encontrados a nivel de paisaje y posibles de diferenciar por su composición florística, fueron agrupados en 4 clases, ya que en un análisis preliminar de las características espectrales de la imagen se determinó que algunos tipos de bosques que no presentaban diferencias espectrales entre ellos. Las clases fueron formadas teniendo en cuenta la composición de los bosques, se unieron los tipos de bosques con mayor similitud florística. (Cuadro 6).

Cuadro 6: Clases de bosques identificadas que corresponden a una agrupación de los tipos de bosques. Se presenta el número de sitios, el área con datos de campo y rango de elevaciones en que se presenta cada clase.

Clase de bosque	Tipos de bosques definidos para la clase	Num. sitios	Area (ha)	Elev. Mín. (m)	Elev. Máx. (m)
Clase 1	B. <i>Billia</i>	7	487	400	870
Clase 2	B. <i>Pentaclethra - Vochysia ferruginea</i> B. <i>Pentaclethra - Carapa - Apeiba</i>	18	865	25	350
Clase 3	B. <i>Dialium - Dipteryx - Pentaclethra</i> B. <i>Vochysia ferruginea - Qualea</i>	15	1828	45	250
Clase 4	B. <i>Prioria</i> B. <i>Carapa - Pentaclethra - Pterocarpus</i>	13	931	1	120

4.2.2. Separabilidad de *firmas espectrales*

En los Cuadros 7 y 8 se presentan los resultados de la *separabilidad* promedio de *firmas espectrales* para las metodologías utilizadas en este estudio, se indican el número de *firmas* tomadas y el número de *firmas* que resultaron con valores de *separabilidad* definidos como "buenos".

Cuadro 7: *Separabilidad de firmas espectrales* para las diferentes metodologías de crecimiento de polígonos utilizadas.

	CP-MED			CP		
	N° <i>firmas</i> Inicial	Baja separ.	N° <i>firmas</i> Final	N° <i>firmas</i> Inicial	Baja separ.	N° <i>firma</i> Final
Clase 1	19	0	19	19	5	14
Clase 2	31	6	25	31	22	9
Clase 3	42	11	31	42	14	28
Clase 4	23	2	21	23	11	12

Cuadro 8: *Separabilidad de firmas espectrales* para las diferentes metodologías de agrupamiento guiado utilizadas.

	AG - MED			AG		
	N° <i>firmas</i> Inicial	Baja separ.	N° <i>firmas</i> Final	N° <i>firmas</i> Inicial	Baja separ.	N° <i>firmas</i> Final
Clase 1	35	2	33	40	21	19
Clase 2	38	15	23	80	69	11
Clase 3	4	0	4	30	18	12
Clase 4	16	7	9	70	51	19

El bosque que presentó la mayor *separabilidad* espectral en todas las metodologías utilizadas fue el bosque de la clase 1 que corresponde al Bosque de *Billia*, el que siempre obtuvo valores de "buena" *separabilidad* (muy superiores a 70% o 1500 en las matrices de error y en las tablas de divergencia transformada respectivamente). Los bosques que presentaron la menor *separabilidad* espectral fueron los de las clases 2 y 3.

Se evaluó cuáles de las *bandas* de las imágenes utilizadas explicaban en mayor medida la *separabilidad*. Para las metodologías en las que se trabajó con el MED este explicó la mayor parte de la *separabilidad* de las *firmas*, seguido por el brillo y el verdor. En el caso de las metodologías en las que no se aplicó el MED las *bandas* que contribuyeron en mayor medida a la *separabilidad* de las *firmas* fueron el brillo y el verdor.

4.2.3. Clasificación

Los resultados de la *clasificación* para las metodologías de crecimiento de polígonos se presentan en la Figura 13 y 14 ³, y en las Figuras 15 y 16 se presentan los resultados de la *clasificación* para la metodología de *agrupamiento guiado*. Para ambas metodologías la inclusión de *datos auxiliares* de elevación mejora la *clasificación* (Figuras 13 y 15).

En cambio, si se realiza un examen visual las imágenes clasificadas sin *datos auxiliares* (Figuras 14 y 16) se puede ver que estas presentan una gran heterogeneidad y fragmentación. El único tipo de bosque con una *separabilidad* espectral mayor que las restantes clases es el de la clase 1 que posee características espectrales distintivas.

³ En todos los casos las imágenes que se muestran en las figuras son las imágenes clasificadas a las que se le aplicó un *filtro* con fines de presentación. La descripción de los resultados y los cálculos de error no se refieren a estas imágenes filtradas sino a las imágenes resultantes de la clasificación.

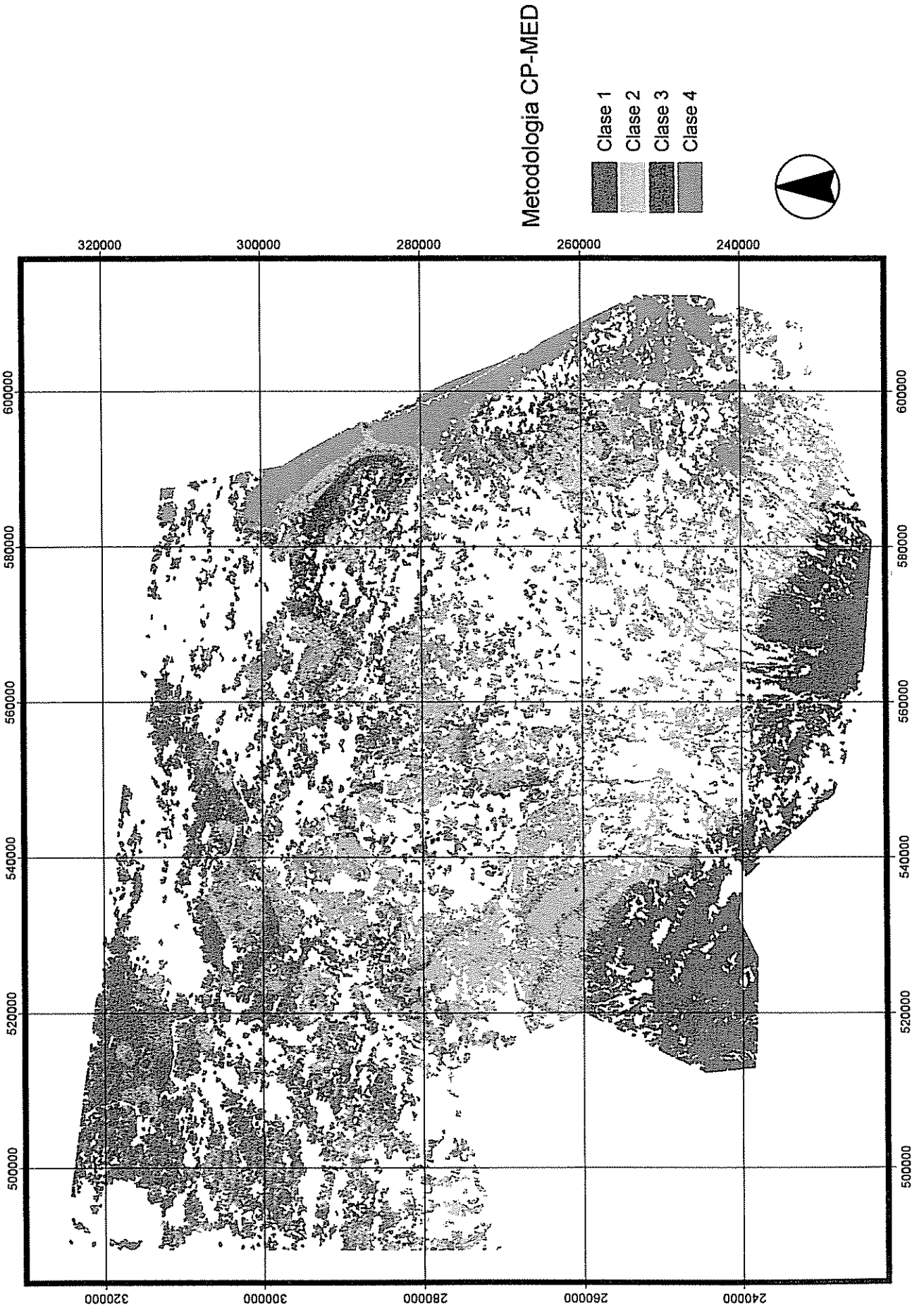


Figura 13: Imagen filtrada de los resultados de la clasificación CP-MED (crecimiento de polígonos, con inclusión de datos de elevación)

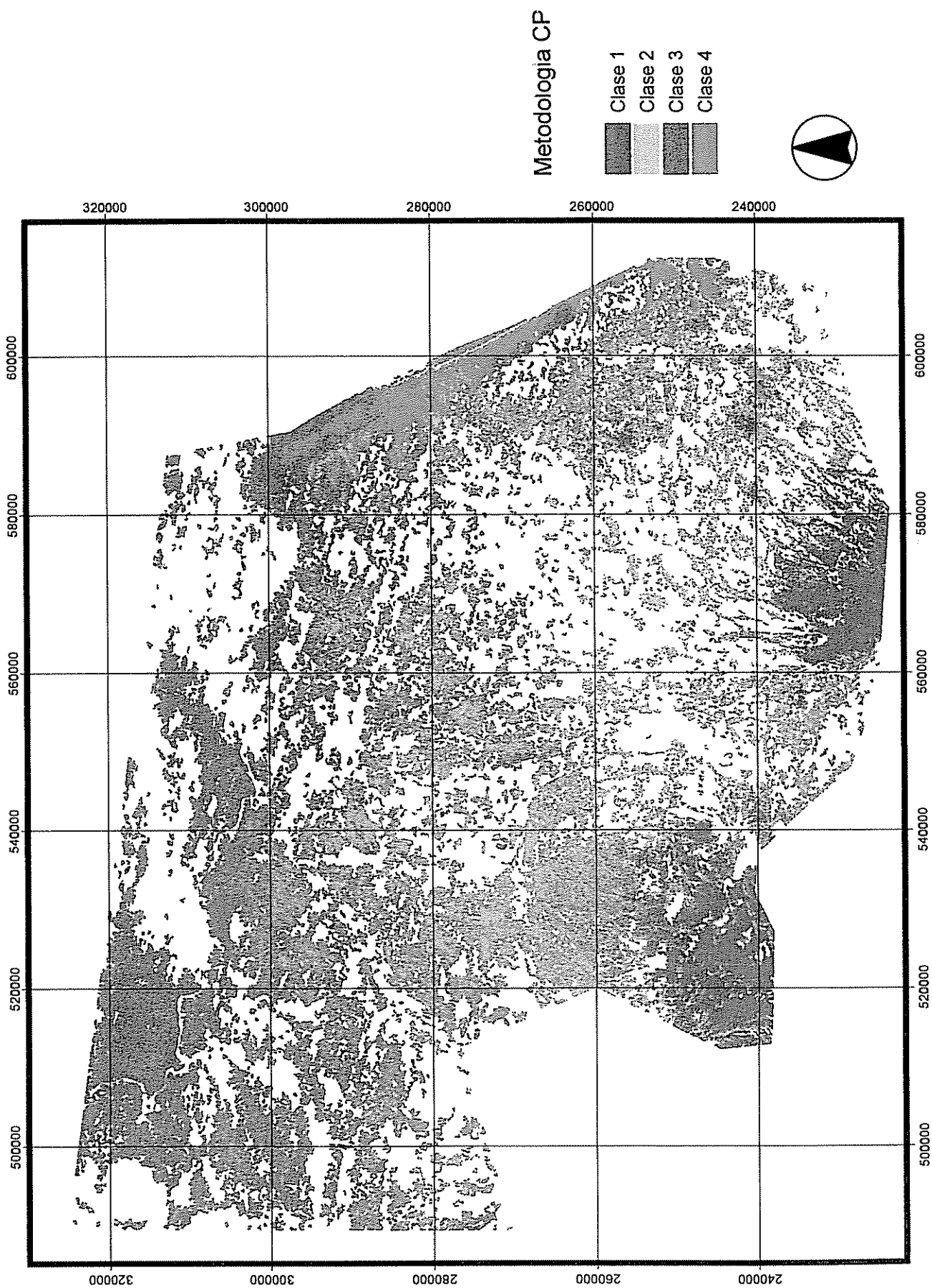


Figura 14: Imagen filtrada de los resultados de la clasificación CP
(crecimiento de polígonos)

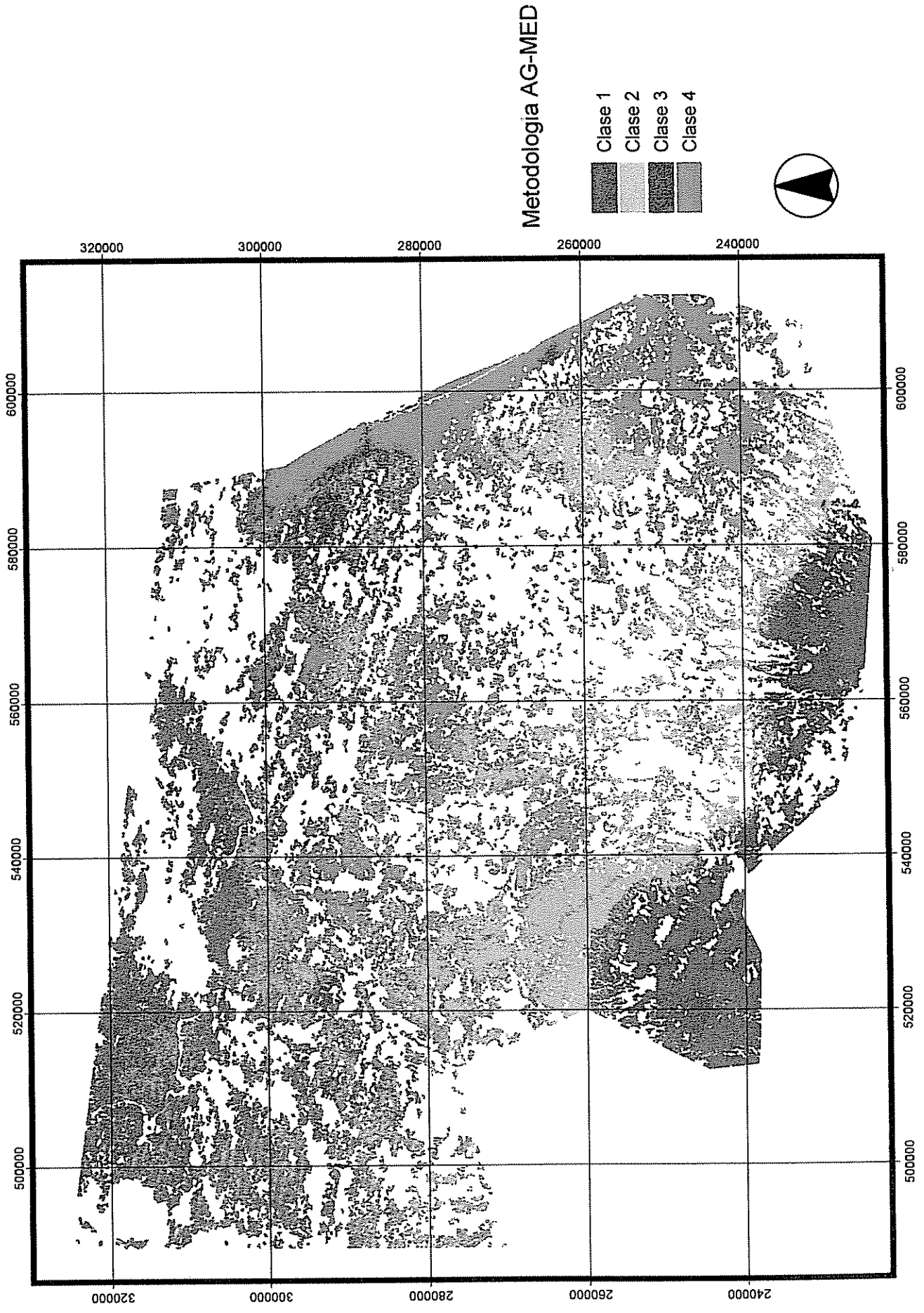


Figura 15: Imagen filtrada de los resultados de la clasificación AG-MED (agrupamiento guiado, con inclusión de datos de elevación)

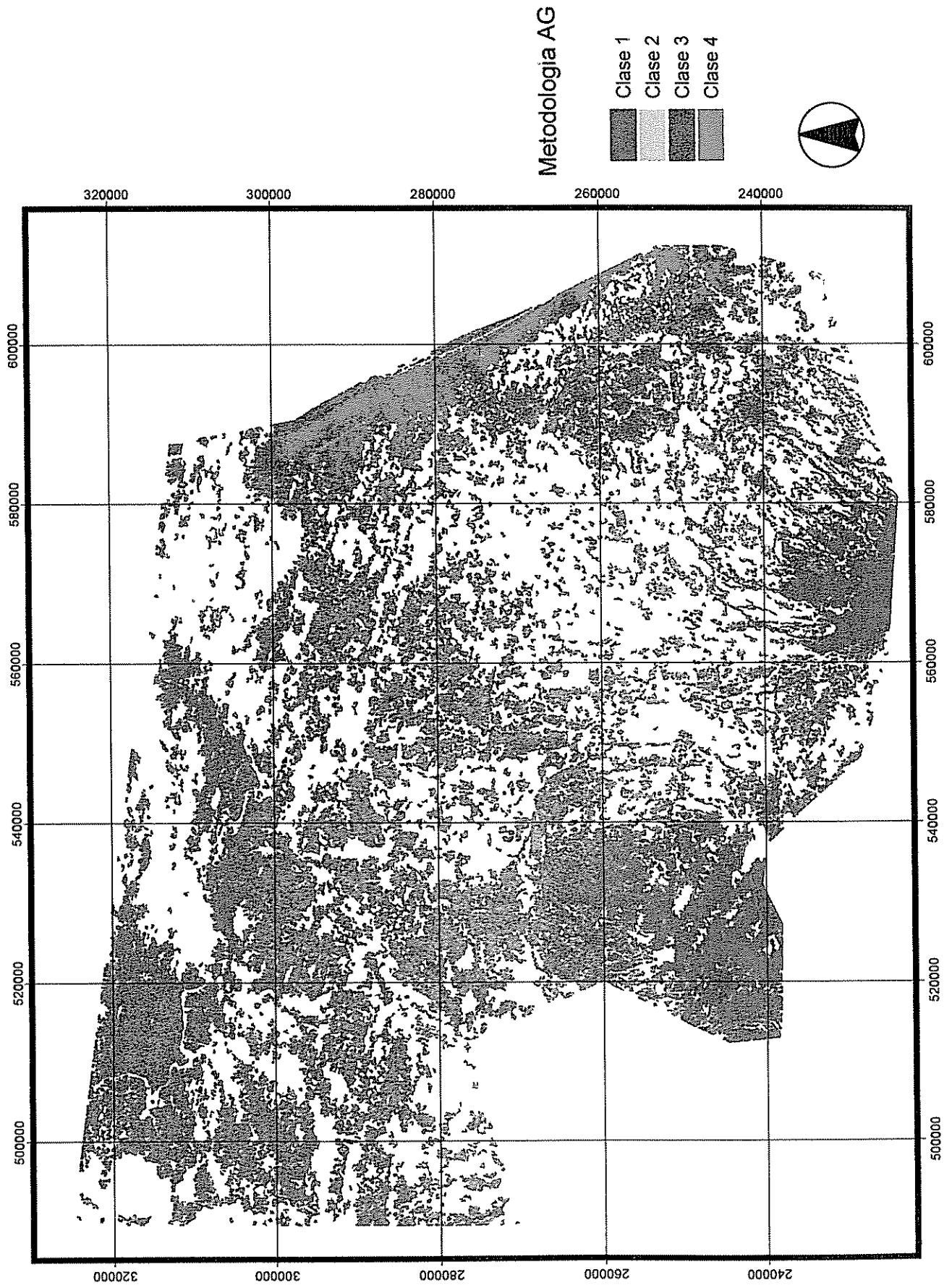


Figura 16: Imagen filtrada de los resultados de la clasificación AG (agrupamiento guiado)

En los Cuadros 9 a 12 se muestran las matrices de errores y los valores de *Kappa* calculados para las cuatro metodologías aplicadas. Hay que tener en cuenta que estos resultados pueden ser sobreestimados debido a que se utilizaron los *sitios de entrenamiento* para la construcción de la *matriz de confusión*

Cuadro 9: *Matriz de confusión* para la metodología CP-MED. E.O: error por Omisión. E.C.: error por Comisión. P.G, es la *precisión global* calculada a partir de la *matriz de confusión*. K.G es el valor del estadístico *Kappa*.

		Número de <i>pixeles</i> clasificados					
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Total	E.C
Número de <i>pixeles</i> de referencia	Clase 1	2356	30	6		2392	0.0151
	Clase 2	9	3273	710	152	4144	0.2102
	Clase 3	3	184	4194	45	4426	0.0524
	Clase 4		364	24	2892	3280	0.1183
	Total	2368	3851	4934	3089	14242	
E.O		0.0051	0.1501	0.1500	0.0638		
P.G		0.8928					
K.G		0.8481					

Cuadro 10: *Matriz de confusión* para la metodología CP. E.O: error por Omisión. E.C.: error por Comisión. P.G, es la *precisión global* calculada a partir de la *matriz de confusión*. K.G es el valor del estadístico *Kappa*.

		Número de <i>pixeles</i> clasificados					
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Total	E.C
Número de <i>pixeles</i> de referencia	Clase 1	1848	273	8	58	2187	0.1550
	Clase 2	427	2532	885	519	4363	0.4197
	Clase 3	6	452	3705	267	4430	0.1637
	Clase 4	87	594	336	2245	3262	0.3118
	Total	2368	3851	4934	3089	14242	
E.O		0.2196	0.3425	0.2491	0.2732		
P.G		0.7253					
K.G		0.6101					

Cuadro 11: *Matriz de confusión* para la metodología AG - MED. E.O: error por Omisión. E.C.: error por Comisión. P.G, es la *precisión global* calculada a partir de la *matriz de confusión*. K.G es el valor del estadístico *Kappa*.

		Número de <i>pixeles</i> clasificados					
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Total	E.C
Número de <i>pixeles</i> de referencia	Clase 1	2273	136	12	186	2607	0.1281
	Clase 2	95	2431	1176	87	3789	0.3584
	Clase 3		509	3643	83	4235	0.1398
	Clase 4		775	103	2733	3611	0.2431
	Total	2368	3851	4934	3089	14242	
E.O		0.0401	0.3687	0.2617	0.1152		
P.G		0.7780					
K.G		0.6859					

Cuadro 12: *Matriz de confusión* para la metodología AG. E.O: error por Omisión. E.C.: error por Comisión. P.G, es la *precisión global* calculada a partir de la *matriz de confusión*. K.G es el valor del estadístico *Kappa*.

		Número de <i>pixeles</i> clasificados					
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Total	E.C
Número de <i>pixeles</i> de referencia	Clase 1	1937	605	501	497	3540	0.4528
	Clase 2	188	1107	689	203	2187	0.4938
	Clase 3	136	1331	2758	515	4740	0.4181
	Clase 4	107	808	986	1874	3775	0.5036
	Total	2368	3851	4934	3089	14242	
E.O		0.1820	0.7125	0.4410	0.3933		
P.G		0.5390					
K.G		0.3507					

La Metodología de Crecimiento de Polígonos con uso del MED es la que presenta los valores de *precisión* mayores (89% de *precisión global*). En general se puede afirmar que para todas las metodologías los menores errores se presentan en la clase de bosque 1, Bosque de *Billia*. Este bosque tiene una composición florística muy diferente del resto de los bosques y se presenta en un rango de altura mayor. Ambas características son las que pueden estar explicando su *separabilidad* tanto espectral como de elevación.

Las otras tres clases de bosques presentan especies en común y se dan en rangos de altura muy similares (Cuadro 6). En todas las metodologías, la clase 2 es la que presenta los mayores errores. Las clases que se confunden en mayor medida son la 2 y la 3, que pueden presentar características espectrales muy similares, debido a su composición florística semejante.

Los resultados de las pruebas pareadas de diferencias entre los valores *Kappa* de las

metodologías muestran que para un 99% de confianza, existen diferencias estadísticas⁵¹ significativas entre todas las metodologías de *clasificación* (Cuadro 13). En otras palabras, con un 99% de probabilidad se puede decir que la metodología que presenta los valores de *precisión* más altos es la CP-MED seguida por la AG-MED, la CP y por último la AG.

Se ve entonces que la inclusión del MED aumenta en un 17.8% la *precisión global* en el caso de las metodologías con selección de *firmas* por crecimiento de polígonos y un 23.9% en el caso del *agrupamiento guiado* (Cuadro 13).

Cuadro 13: Resultados de las pruebas pareadas entre los valores *Kappa* para las cuatro metodologías de *clasificación*. K es el valor de *Kappa*, σ^2 es la varianza de *Kappa*, Z es el estadístico de comparación de medias, S: indica que la diferencia es significativa.

Metodología	Precisión global	K	σ^2
CP - MED	0.8928	0.842	0.0000130
CP	0.7253	0.636	0.0000251
AG - MED	0.7780	0.686	0.0000226
AG	0.5390	0.351	0.0000314

Pares		Z	99%
CP - MED	CP	3.33	S
CP - MED	AG - MED	2.62	S
CP - MED	CP	7.38	S
CP	AG - MED	-3.06	S
CP	CP	3.80	S
AG - MED	CP	4.56	S

Se calcularon, por último, las áreas ocupadas para cada clase de bosque en la región, para los dos metodologías que presentaron los mejores resultados (CP-MED y AG-MED) (Cuadro14). Como se puede ver tanto la clase 2 y la clase 3 ocupan la mayor parte de los bosques del área de estudio.

Cuadro 14: Area ocupada por cada clase de bosques identificada. Se muestran los resultados para las metodologías de crecimiento de polígonos y *agrupamiento guiado* ambas incluyendo datos de elevación, y las diferencias entre ambas.

CLASE	Area (ha) CP-DEM	Porcentaje	Area (ha) AG-DEM	Porcentaje	Diferencia (ha)	Diferencia (%)
Clase 1	42453	18	46002	19	3550	1
Clase 2	86214	36	74637	31	11577	5
Clase 3	82628	34	80588	34	2040	1
Clase 4	28969	12	39035	16	10067	4

4.2.4. Discusión

A partir de los resultados de este estudio se puede ver que es posible identificar en la zona de estudio, algunos tipos de bosques tropicales a partir de imágenes Landsat TM, sólo si se cuenta con datos de campo detallados, y si se incorporan *datos auxiliares* de elevación. En este estudio la mayor *precisión global* en la *clasificación* de las coberturas boscosas, fue de 89%. Aunque no es una *precisión* baja, este dato podría ser menor si se considera que para el cálculo de la *precisión* se utilizaron los *sitios de entrenamiento*. Así mismo, hay que tener en cuenta que la máscara de bosques utilizada puede estar incluyendo bosques secundarios maduros, y plantaciones. Estas son fuentes de error que no pudieron controlarse en el presente estudio.

Una de las mayores limitantes para la identificación de los siete tipos de bosques fue que algunas clases de bosques ocuparon rangos espectrales muy similares. La falta de *separabilidad* espectral puede deberse a que la composición y estructura de los bosques puede presentar una alta variación en distancias cortas. En este estudio, cada pixel de la imagen representa la respuesta espectral de entre 1 y 3 copas de arboles que con una alta probabilidad son de especies diferentes. Esto los hace difíciles de diferenciar si no se incluye otro tipo de información durante la *clasificación*.

En estudios anteriores se ha mostrado que las clasificaciones de imágenes Landsat TM pueden presentar buenos resultados en áreas más homogéneas que los bosques. Se indica que la *clasificación* basada únicamente en la variabilidad espectral de los datos no es adecuada cuando se trata de bosques tropicales, ya que los valores de reflectancia de *pixeles* contiguos pueden ser muy diferentes y como consecuencia se produce un mosaico de clases en lugar de límites claros entre las coberturas del suelo (Tuomisto *et al.* 1994, Brondizio *et al.* 1996). Se señala que esto puede deberse a tres razones: en primer lugar al relieve del terreno que en los climas húmedos producen cambios considerables en el drenaje y por lo tanto en el tipo de vegetación que se desarrolla; en segundo lugar los claros en los bosques son frecuentes el bosque puede ser visto como un mosaico complejo de parches de bosques de diferentes edades; y por último la rugosidad del dosel debida a la presencia de árboles emergentes puede afectar de modo diferente los valores de reflectancia de los *pixeles* individuales (Tuomisto *et al.* 1994).

La *separabilidad* espectral de tipos de bosques en la amazonía peruana, fue evaluada para imágenes Landsat TM, y se encontró que utilizando sólo la información espectral, los 12 tipos de bosques definidos presentaban una superposición espectral significativa. Sólo pudieron diferenciarse aquellos bosques que presentaron diferencias estructurales marcadas, ya que la respuesta espectral estuvo en función de la estructura del bosque, en particular de la altura, continuidad del dosel, y la densidad de arboles (Hill y Floody 1994). En el mismo sentido, la estructura de la vegetación, principalmente la densidad y la estratificación fueron los factores que ejercieron mayor influencia en las respuestas

espectrales de cada clase de bosque, en un estudio realizado en la amazonía brasileña (Paradella *et al.* 1994).

Por otra parte, en muchas aplicaciones de imágenes Landsat TM para la *clasificación* de bosques tropicales se ha indicado que es difícil distinguir entre bosques primarios de bosques secundarios en etapas sucesionales avanzadas (Sader *et al.* 1991, Moran *et al.* 1994). Esta puede ser una de las posibles fuentes que aumentaría el error de las clasificaciones obtenidas en este estudio, ya que las áreas excluidas fueron sólo áreas de no-bosque.

La capacidad de discriminar entre bosques similares espectralmente aumentó cuando se agregaron *datos auxiliares*. Esto constituye una ventaja, pero está determinada en primer medida por la disponibilidad de los *datos auxiliares* (Skidmore 1989, Maselli *et al.* 1995). Dentro de los *datos auxiliares*, los datos topográficos son relativamente constantes a través del tiempo, de manera que, una vez obtenidos, pueden ser usados en múltiples aplicaciones (Skidmore 1989). Además es de esperar que exista gran relación entre la distribución de la vegetación y su posición topográfica (Kahn y Mejía 1991, Warner *et al.* 1994, Clark *et al.* 1995, Lieberman *et al.* 1996, Clark 1998). En este estudio la adición de la capa con el MED aumentó la *precisión* de la *clasificación*, pero cuando fue utilizada en la metodología de Crecimiento de Polígonos produjo resultados que dan peso casi exclusivamente a los rangos de altitud en que se presentaron los datos de campo. Al contrario, en el caso de la metodología de *Agrupamiento Guiado*, el peso relativo de los datos de elevación fue menor. Finalmente se debe agregar que, Hutchinson (1982) hace referencia a que la simple adición de *datos auxiliares* como una *banda* más en la *clasificación* no es siempre recomendable porque los resultados no pueden ser predichos de manera consistente.

Debido a que la metodología de *agrupamiento guiado* permite que la variabilidad espectral presente dentro de cada tipo de bosque se exprese y pueda ser tomada en cuenta en la *clasificación*, la inclusión de datos de elevación puede tener menos peso en ésta que en la metodología supervisada (CP -MED).

Por otra parte, si se analizan las áreas totales y porcentuales obtenidas para las metodologías de clasificación con mejores precisiones (CP-MED y AG-MED) se puede ver que no hay marcadas diferencias en las áreas que son clasificadas para cada clase. Las mayores diferencias se presentan en la clase 2 y la clase 4, donde las diferencias en área clasificada son de 5 y 4% respectivamente. Esto nos indica que cuando se incluye en modelo de elevación digital, las diferencias entre metodologías no son altas si se toma en cuenta la variable área clasificada por tipo de bosque.

Además, si se tiene en cuenta la distribución de las clases de bosques, se puede observar que no se presentan diferencias importantes en el patrón general de distribución de las mismas. De este modo, se puede ver que en líneas generales para todas las metodologías, los bosques de la Clase 1 donde

la dominancia de *Billia sp.* es característica, se presentan en las zonas más altas del área de estudio sobre las laderas de la Cordillera Volcánica Central, lo que coincide con lo esperado debido a que esta especie es característica de los bosques presentes en altitudes mayores (Holdridge 1987, Di Stéfano *et al.* 1995). Los bosques de la Clase 4 (aquellos con dominancia de *Prioria* y aquellos donde *Carapa* – *Pentaclethra* – *Pterocarpus* dominan), se ubican en mayor medida en la costa Atlántica. Estos bosques se presentan sobre suelos inundables (Nuhn y Pérez 1967, Holdridge 1971, Gómez 1986, Myers 1987), por lo que su distribución coincide con lo esperado. Los bosques que representan las clases 2 y 3 se distribuyen en la parte central y oeste del área de estudio. Desde los pies de la Cordillera Volcánica Central, hasta las zonas bajas en el Atlántico y en los límites del río San Juan. Estos son los bosques que presentan mayores similitudes espectrales, y por lo tanto los que fueron más difíciles de clasificar.

En otras clasificaciones realizadas en Costa Rica no se distingue entre tipos de bosques húmedos primarios, sino que sólo hacen referencia a la discriminación entre bosques primarios y secundarios (Leclerc 1996, Puig 1996, Helmer 1998). Leclerc (1996), encuentra para Costa Rica, a partir de una *clasificación* realizada con una imagen Landsat TM, 18 clases de cobertura con una *precisión* del 77%. Entre ellas dos clases de bosques maduros:

Clase 1: bosque denso siempre verde, con un dosel de más de 30 m. de altura

Clase 2: bosque denso siempre verde, con alturas de dosel de entre 15 y 30 m. dominados por *Quercus sp.*

Indica además, que entre las clases de bosques los errores de *clasificación* aparecen en las dos clases de bosques maduros, las clases de bosques secundarios (en sus diferentes fases de desarrollo), las plantaciones forestales y los cultivos perennes; a partir de lo cual concluye que los bosques de Costa Rica son difíciles de clasificar sólo con base en su respuesta espectral. Esta conclusión también es reflejada por los trabajos realizados por Puig (1996) en un área pequeña en los alrededores de La Virgen de Puerto Viejo de Sarapiquí. El autor concluye que las estimaciones realizadas poseen marcadas confusiones por lo que la cuantificación de superficies de diferentes tipos de bosques secundarios podrían conducir a resultados sobre o subvalorados. Este problema de la presencia de grandes errores de *clasificación* cuando esta es realizada sólo a partir de la respuesta espectral puede ser corregido, como se mencionó anteriormente, por medio de la utilización de *datos auxiliares* integrados a un SIG. Por esto es necesario seguir desarrollando y mejorando metodologías como las analizadas en este estudio.

4.2.5. Consideraciones finales

En este estudio se demostró que existen diferentes tipos de bosques en la zona Norte Central y Atlántica de Costa Rica, y que en algunos casos pueden distinguirse usando imágenes Landsat TM. Las cuatro clases de bosques identificadas a partir de sensores remotos responden las principales fuentes de variación analizadas: altitud, posición respecto al gradiente de precipitación y tipo de suelo. Los bosques de la Clase 1 pertenecen a las partes más altas del área de estudio y corresponden a los Bosque de *Billia*. De las restantes clases presentes en las zonas bajas, la Clase 3, donde la dominancia de *Pentaclethra maculosa* es menor, se desarrolla en las áreas al oeste del gradiente de precipitación. Esta corresponde a los Bosques de *Dialium – Dipteryx – Pentaclethra* y Bosques de *Vochysia ferruginea – Qualea*, donde la presencia de *Dialium* es característica.

Las Clases 2 y 4 se desarrollan sobre suelos diferentes. La Clase 4, que corresponde a los bosques inundables de *Prioria* y de *Carapa – Pentaclethra – Pterocarpus*, se da en la costa atlántica. Mientras que la Clase 2 se presentan en suelos mejor drenados, y se caracteriza por una mayor dominancia de *Pentaclethra maculosa*. Pertenecen a esta clase los Bosques de *Pentaclethra – Carapa – Apeiba* y de *Pentaclethra – Vochysia ferruginea*.

Los bosques de la Clase 2 y 3, son los que se presentan más fragmentados, ya que se dan en áreas donde la mayor parte de la cobertura corresponde a zonas agrícolas. Lo contrario ocurre para las Clases 1 y 4, donde la fragmentación es escasa. Así mismo se puede ver que los bosques de la Clase 1 y de la Clase 4, son los que poseen una mayor superficie protegida (Figuras 17 y 18). El Parque Nacional Braulio Carrillo posee un sector importante en la Clase 1, mientras que el Parque Nacional Tortuguero y la Reserva de Vida Silvestre Barra del Colorado, abarcan una gran parte de lo que ha sido identificado como la clase de bosques inundables (Clase 4). Por el contrario los bosques de las clases más fragmentadas, son los que tienen una superficie menor en áreas protegidas. A la clase 3 pertenece la Reserva de Vida Silvestre Caño, y esta reserva comprende áreas de humedales. Para la Clase 2 encontramos únicamente el sector norte del Parque Nacional Braulio Carrillo y el sector oeste de la Reserva de Vida Silvestre Barra del Colorado (Figuras 17 y 18).

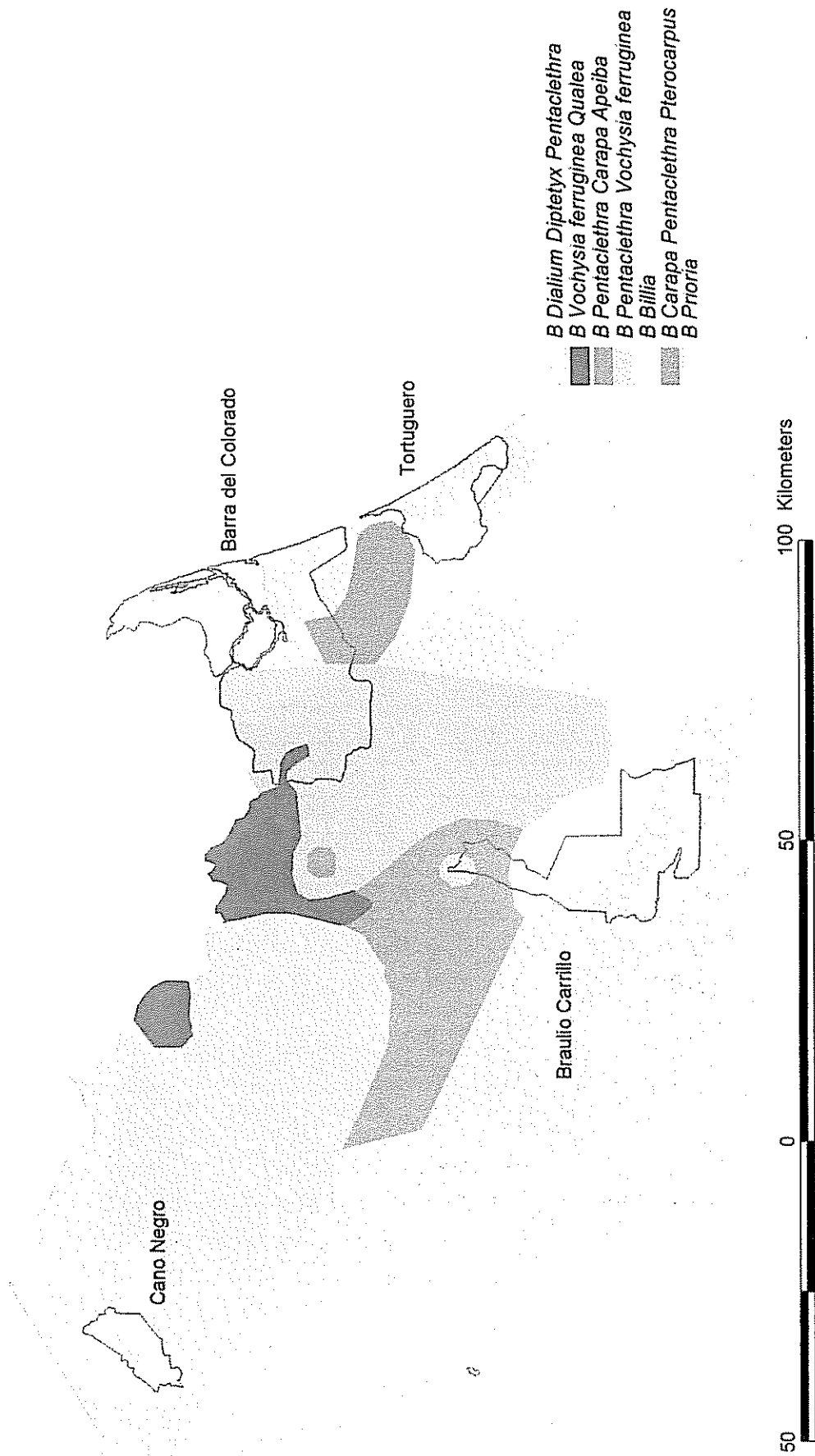


Figura 17: Areas protegidas presentes en cada tipo de bosque a nivel de paisaje.

Tipos de bosques en areas protegidas

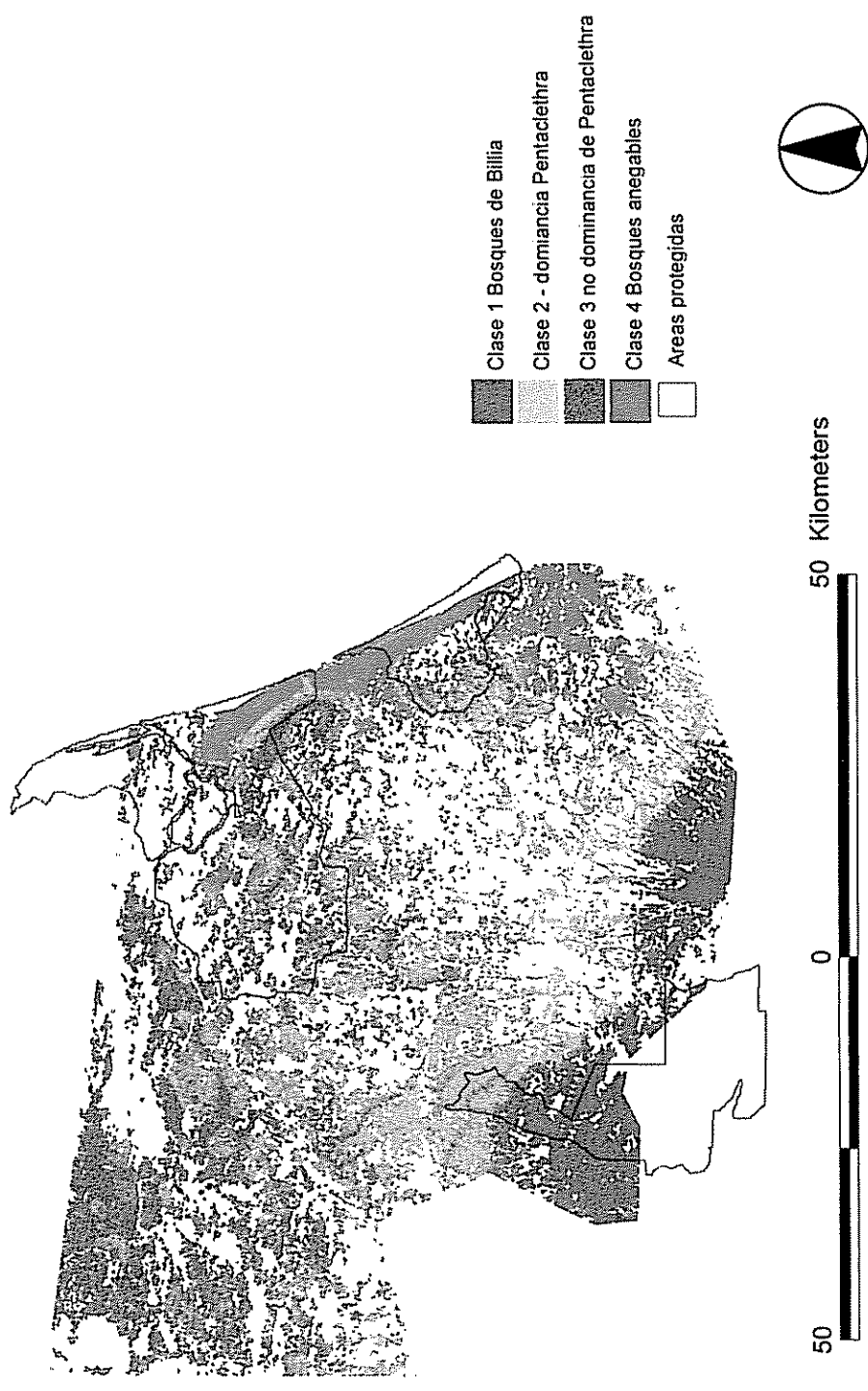


Figura 18: Areas protegidas presentes en cada una de las clases de bosques identificadas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La caracterización de los bosques de la Zona Norte Central y Atlántica mostró la existencia de siete tipos de bosques, distinguibles por su composición florística, a nivel de paisaje.
- Existe una clara relación entre los tipos de bosques definidos y el estrato altitudinal en el cual se presentan. Lo mismo ocurre si se toma en cuenta en drenaje de los suelos sobre los cuales se desarrollan (suelos inundables o suelos no inundables).
- La distribución geográfica de los tipos de bosques no se traslapa geográficamente, con la única excepción de los bosques de *Pentaclethra – Carapa – Apeiba* y *Pentaclethra – Vochysia ferruginea* que entremezclan su distribución geográfica.
- En relación con las diferentes fuentes de datos utilizadas hay que destacar que los datos de inventarios cubrieron más ampliamente el área de estudio. La red de PPM con que se trabajó no cubrió todos los tipos de bosques definidos a partir de los datos de inventario. A pesar de ello, el análisis de PPM condujo a la diferenciación de dos tipos de bosques que no son visibles en el análisis de inventario. Esto puede ser consecuencia de las diferencias en el conjunto de individuos analizados y en la superficie de la unidad de muestreo de las PPM.
- En el mismo sentido, la variación de la composición a lo largo de gradientes ambientales podría ser una de las fuentes de diferencias entre los resultados obtenidos a partir de PPM e inventarios. Las PPM son cuadradas abarcando 1 ha., los inventarios en cambio, reflejan la vegetación presente a lo largo de parcelas ubicadas en sitios con un tamaño promedio de 43 ha y que están ubicadas de tal manera que abarcan el gradiente ambiental principal del área. Es decir, los resultados de los datos de inventario incluyen variaciones de la vegetación presentes a una escala mayor que los datos de PPM.
- Si existiera una red de parcelas tan amplia como la de inventarios, podrían realizarse estudios en una escala que permita diferenciar tipos de bosques teniendo en cuenta variaciones ambientales menores. A pesar de que no se realizó este tipo de análisis a menor escala, los resultados del presente estudio pueden servir como una primera aproximación al conocimiento de la variabilidad de los bosques húmedos en el país.
- Es posible diferenciar tipos de bosques con base en la composición florística, al nivel regional. Aquí se demuestra que esta caracterización puede realizarse a partir de información existente, si se hace una selección de los sitios utilizando parámetros de exclusión como los aplicados en este estudio. Los resultados de este estudio contribuyen al conocimiento de los bosques presentes en la zona norte de Costa Rica, y puede constituirse en una herramienta para el manejo y

conservación de los recursos forestales a nivel regional.

- La información espectral de imágenes Landsat TM no es suficiente para diferenciar tipo de bosques tropicales. Sólo puede realizarse una *clasificación* de tipos de bosques diferenciados con base en su composición florística, si se cuenta con información detallada de campo, y si se dispone de *datos auxiliares* que ayuden en la diferenciación de bosques que poseen características espectrales similares. Incluso contando con información de campo detallada y *datos auxiliares*, las clases de bosques de tierras bajas de las zonas no inundables altos errores de *clasificación*.
- Existen dos clases de bosques (2 y 3) que se presentan más fragmentadas y que tienen, además una menor superficie protegida. Esta información debería tenerse en cuenta tanto en la planificación para la conservación de muestras representativas de ecosistemas, como en la planificación para el manejo de los bosques a nivel de paisaje.
- Información de bosques secundarios y plantaciones, incluida en la fase de entrenamiento (incluir *firmas* de dichas coberturas), o en la elaboración de una máscara que excluya tanto las áreas sin bosque como las áreas donde se presentan bosques secundarios maduros y plantaciones, mejoraría los resultados de estudios como el presente.
- Se recomienda probar diferentes metodologías para la introducción de datos de elevación. Así mismo, es importante incluir además de este tipo de datos, otros como las características del suelo, que puedan estar fuertemente relacionadas con la presencia de diferentes tipos de bosques. Otras metodologías de introducción de *datos auxiliares*, que no fueron probadas en este estudio y que podría producir mejores resultados, son: la modificación de las probabilidades a priori durante la *clasificación*, la estratificación y la asignación post-*clasificación*.
- Los estudios a partir de sensores remotos están sujetos al avance y desarrollo de nuevas tecnologías, que en este ámbito son continuos. Los estudios como el presentado aquí deben y pueden aumentar su calidad si aprovechan los avances tanto la resolución de los datos de sensores remotos, como en las técnicas de análisis y generación de mapas.
- Los datos de sensores remotos no pueden reemplazar el trabajo al nivel de campo pero si complementarlo o reducirlo. En este trabajo se pone en evidencia que es posible integrar la investigación realizada al nivel de campo con aquella de sensores remotos, de manera de obtener resultados que puedan ser aplicados al manejo de los bosques tropicales a escala regional.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, L.; Muñoz, G. 1994. Determinación de diámetros mínimos de corta y selección de árboles para planes de manejo en la vertiente norte y atlántica del Area de Conservación de la Cordillera Volcánica Central. Práctica de especialidad. Cartago, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 60p.
- Bauer, M. E.; Burk, T. E.; Ek, A. R.; Coppin, P. R.; Lime, S. D.; Walsh, T. A.; Walters, D. K. 1994. Satellite inventory of Minnesota forest resources. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 60 (3): 287-298.
- Braun Blanquet, J. 1979. Fitosociología: base para el estudio de las comunidades vegetales. España, Blume Ediciones. 820p.
- Brondizio, E.; Morán, E.; Mausel, P.; Wu, Y. 1996. Land cover in the Amazon estuary: linking of the thematic mapper with botanical and historical data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 62 (8): 921-929.
- Clark, D. A. 1994. Plan demography. *In* Mc Dale, L. A.; Bawa, K. S.; Hespeneide, H. A.; Hartshorn G. S. Eds. 1994 *La Selva: ecology and natural history of neotropical rain forest*. Chicago, The University of Chicago Press p. 90-105.
- Clark, D. 1998. Deciphering landscape mosaics of neotropical tree: GIS and systematic sampling provide new views of tropical rainforest diversity. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 85: 18-33.
- Clark, D. A.; Clark, D.B.; Sandoval, R.M.; Castro M.V. 1995. Edaphic and human effects on landscape-scale distributions of tropical rain forest palms. *Ecology* 76(8): 2581-2594. ✓
- Cohen, W. B.; Spies, T. A.; Fiorella, M. 1995. Estimating the age and structure of forest in a multi-ownership landscape of Western Oregon, U.S.A. *International Journal of Remote Sensing* 16 (4): 721-746. ✓
- Congalton R., G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 37: 35-46.
- Congalton R., G.; Oderwald R., G.; Mead R., A. 1983. Assesing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 49(12): 1671-1678.
- COSEFORMA 1995. Inventario forestal de la Región Huetar Norte. 2 ed. San José, Costa Rica, GTZ. 27p.
- Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de la teledetección espacial. Madrid, España, Ediciones Rialp. 453p.
- Davis, S. D.; Heywood, V. H.; Herrera Mac Bryde, O.; Villa-Lobos, L.; Hamilton, A. C. Eds. 1997. *Centres of plant biodiversity: a guide and strategy for the conservation*. vol.3: The Americas. Cambridge, IUCN. 562p.

- Di Stéfano, J. F.; Brenes, G. L.; Mora, V. 1995. Composición florística y estructura de un bosque primario del piso premontano pluvial, en San Ramón, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 43(1-3): 67-73.
- ERDAS 1997. ERDAS Field Guide USA. 656p.
- Finegan, B.; Palacios, W.; Zamora, N. En prensa *In: A. Franc et al. (eds.) Indicators for sustainable forest management. Ecosystem-level forest biodiversity and its evaluation by criteria and indicators.* CABI y IUFRO.
- Finegan, B.; Delgado, D.; Zamora, N. 1999. Ecosystem Biodiversity in lowland tropical forest of Central America: characterisation and applications to land management. *In Semana Científica* (4, 1999, Turrialba, Costa Rica). Logros de la investigación para el nuevo milenio. Turrialba, Costa Rica, CATIE. p. 360-364 (Serie Técnica. Informe técnico n°5).
- Fournier, L.A. 1993. La vegetación de Costa Rica: su diversidad, estado actual de conservación y su potencial para el desarrollo de Costa Rica. *In Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales* (9, 1993 San José, Costa Rica) La agricultura de hoy para la Costa Rica del mañana. San José, Costa Rica, Colegio de Ingenieros Agrónomos v.1, p. 1-21.
- García, M.C.; Alvarez, R. 1994. TM digital processing of tropical forest region in southeastern Mexico. *International Journal of Remote Sensing* 15 (8): 1611 – 1632.
- Gillespie, M. K.; Howard, D. C.; Ness, M. J.; Fuller, R. M. 1996. Linking satellite and field survey data, through the use of GIS, as implemented in Great Britain in the countryside survey 1990 project. *Environmental Monitoring and Assessment* 39: 385-398.
- Gómez, L.D. 1986. Vegetación de Costa Rica. San José, Costa Rica, EUNED. 323 p.
- González, E.; Chavez, J. E. 1994. Estructura y composición de un bosque húmedo tropical explotado en la región norte de Costa Rica. *Yvyrareta* 5 (5): 57-59.
- Hartshorn, G.S.; Hammel, B. E. 1994. Vegetation types and floristic patterns. *In Mc Dale, L.A., Bawa, K. S., Hespeneide, H. A.; Hartshorn, G. S. Eds. 1994 La Selva: ecology and natural history of neotropical rain forest.* Chicago, The University of Chicago Press p.71-89.
- Helmer, E.H. 1998. Identificación del uso de la tierra y etapas sucesivas de los bosques en las reservas forestales de Río Los Santos y Río Macho. *In Reunión de Expertos en Conservación del Bosque en Costa Rica* (1997, Heredia, Costa Rica). Memoria. San José, C. R., Academia Nacional de Ciencias p.109-116.
- Hill, R. A.; Foody, G.M. 1994. Separability of tropical rain-forest types in the Tambopata – Candamo Reserved Zone, Peru. *International Journal of Remote Sensing* 15 (13) 2687 – 2693.
- Holdridge, L.R. 1987. Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica, IICA. 216p. (Libros y Materiales Educativos n° 83).
- Holdridge, L.R.; Grenke, W.C.; Hatheway, W.H.; Liang, T.; Tosi, J.A. 1971. Forest environments in tropical life zones: a pilot study. Oxford, USA, Pergamont Press. 747 p.
- Howard, J. A. 1991. Remote sensing of forest resources: theory and application. London, Chapman & Hall. 420p.

- Hudson, W. D.; Ramm, C.W. 1987. Correct formulation of the *Kappa* coefficient agreement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 53 (4): 421-422.
- Hutchinson, C.F. 1982. Techniques for combining Landsat and ancillary data for digital classification improvement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 48 (1): 123-130.
- Instituto meteorológico Nacional 1975. Mapa de Isoyetas Anuales. Ministerio de Ambiente y Energía, San Jose, CR. Esc. 1: 50.000.
- Janssen, L.F.; Jaarsma, M. N.; van der Linder, E. T. M. 1990. Integrating data with remote sensing for land-cover classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 56(11): 1503-1506.
- Jensen, J. R. 1996. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. USA, Prentice & Hall. 315p.
- Kahn, F.; Mejia, K. 1991. The palm communities of two "Terra Firme" forests in Peruvian amazonia. *Principes* 35 (1):22-26.
- Lamprecht, H. 1990. *Silvicultura en los trópicos*. Alemania, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). 335p.
- Leclerc, G. 1996. Tropical forest assessment in Central Costa Rica using Landsat Thematic Mapper imagery. *Tropical Ecosystem Environment Observations by Satellites Contract N° EN9406951V*.
- Lieberman, D.; Lieberman, M.; Peralta, R.; Hartshorn G. S. 1996. Tropical forest structure and composition on a large scale altitudinal gradient in Costa Rica. *Journal of Ecology* 84: 137-152. ✓
- Lillesand, T.M.; Keifer, R.W. 1994. *Remote sensing and image interpretation*. USA, J. Willey. 750p.
- Maselli, F.; Conese, C.; De Filippis T.; Romani M. 1995. Integration of ancillary data into a maximum-likelihood classifier with nonparametric priors. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 50 (2): 2-11.
- Matteucci, S. D.; Colma, A. 1982. *Metodología para el estudio de la vegetación*. USA, OEA. 163 p.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (sin fecha) Mapa de Suelos. San Jose, CR. Esc. 1: 50.000
- Moran, E. F.; Packer, A.; Brondizio, E.; Tucker, J. 1996. Restoration of vegetation cover in the eastern Amazon. *Ecological Economics* 18: 41-54.
- Müller, E.; Solís, M. 1997. Estudio de caso: Los bosques secundarios en Costa Rica. *In Taller Internacional sobre el Estado Actual y Potencial de Manejo y Desarrollo del Bosque Secundario Tropical en América Latina (1997, Pucallpa, Perú)*. Bosques secundarios como recurso para el desarrollo rural y la conservación ambiental en los trópicos de América Latina. CIFOR Occasional Paper n° 13p.149-157.
- Myers R. L. 1981. *The ecology of low diversity palm swamps near Tortuguero, Costa Rica*. University Microfilms International. 299p. ✓

- Navarte, W. A.; Kroll, B. S.; Lombardi, I. I. 1993. Plan maestro: unidad modelo de manejo y producción forestal Dantas. Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias Forestales. 148p.
- Noss, R. F. 1987. From plant communities to landscapes in conservation inventories: a look at The Nature Conservancy (USA). *Biological Conservation* 41: 11-37.
- Noss, R. F. 1990. Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. *Conservation Biology* 4(4): 355 – 364.
- Nuhn, H.; Pérez R. 1967. Estudio geográfico regional: Zona Atlántico Norte de Costa Rica. San José, Costa Rica, Instituto de Tierras y Colonización. 360p.
- Nuhn, H. 1968. Geología de Costa Rica. San José, CR. Esc. 1:700.000.
- Paradella, W. R.; Silva, M. F. F. da; Rosa, N. de A.; Kushigbor, C. A. 1994. A geobotanical approach to the tropical rain forest environment of the Carajás mineral province (Amazon Region, Brazil), based on digital TM-Landsat and DEM data. *International Journal of Remote Sensing* 15 (8): 1633-1648.
- Peralta, R.; Hartshorn, G. S.; Lieberman, D.; Lieberman, M. 1987. Reseña de estudios a largo plazo sobre composición florística y dinámica del bosque tropical en La Selva, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 35(1): 23-39.
- Pedroni, L.; Velásquez, S. 1998. Medición y diagnóstico de la cobertura boscosa: ¿qué tan útiles son las imágenes de satélite en nuestro medio? *In: Reunión de Expertos en Conservación del Bosque en Costa Rica (1997, Heredia, Costa Rica). Memoria. San José, C. R., Academia Nacional de Ciencias. p.85-99.*
- Puig, C.J. 1996. Identificación de fases de desarrollo de bosques secundarios húmedos tropicales de tierras bajas en Costa Rica, mediante análisis digital de imágenes de sensores remotos. Tesis Mag Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 49p.
- Rollet, B. 1974. L'architecture des forêts denses humides sempervirentes de plaine. Francia, Centre Technique Forestier Tropical. 298p.
- Rosenfield, G.H.; Fitzpatrick-Lins, K. 1986. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52 (2): 223-227.
- Sánchez, P. A. 1981. Suelos del trópico: características y manejo. San José, Costa Rica, IICA. 660p.
- Sader, S.A.; Stone, T.; Joyce, A.T. 1990. Remote sensing of tropical forest: An overview of research and applications using non-photographic sensors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 56 (10): 1343-1351.
- Scariot, A. O.; Olivera, T.; Lleras, E. 1989. Species richness, density and distribution of palms in an eastern amazonian seasonally forest. *Principes* 33 (4): 172-179.
- Schulze, M. D.; Whitacre, D. F. 1999. A classification and ordination of the tree community of Tikal National Park, Petén, Guatemala. *Bulletin of the Florida Museum of Natural History* 41(3): 169-297.

- Skidmore, A. K. 1989. An expert system classifies eucalypt forest types using thematic mapper data and a digital terrain model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 55 (10): 1449-1464.
- Skidmore, A. K.; Wood, G.B.; Shepherd, K.R. 1987. Remotely sensed digital data in forestry: a review. *Australian Forestry* 50(1): 40-53.
- Stewart, S. J.; Lillesand, T. M. 1995. Stratification of Landsat Thematic Mapper data, based on regional landscape patterns, to improve land-cover classification accuracy of large study areas (en línea). Consultado 10 marzo 1999. Disponible en: <http://srvdwimdn.er.usgs.gov/nawga/pubs/jana>
- Terán, J.R. 1997. Diseño de una red de parcelas permanentes con propósitos de manejo forestal en un bosque húmedo templado de Chuquisaca, Bolivia. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 123p.
- Tuomisto, H.; Linna, A.; Kalliola, R. 1994. Use of digitally processed satellite images in studies of tropical rain forest vegetation. *International Journal of Remote Sensing* 15 (8): 1595-1610.
- Tuomisto, H.; Ruokolainen, K.; Kalliola, R.; Linna, A.; Danjoy, W.; Rodríguez Z. 1995. Dissecting amazonian biodiversity. *Science* 296: 63 – 66.
- USDA 1996. Keys to soil taxonomy. Washington, DC. 644 p.
- Warner, T. A.; Levandowski, D. W.; Bell, R.; Cetin, H. 1994. Rule-based geobotanical classification of topographic, aeromagnetic, and remotely sensed vegetation community data. *Remote Sensing of Environment* 50: 41-55.
- Webb, E. L.; Peralta, R. 1998. Tree community diversity of lowland swamp forest in Northeast Costa Rica, and changes associated with controlled selective logging. *Biodiversity and Conservation* 7: 565-583.
- Wildi, O.; Orlóci, L. 1996. Numerical exploration of community patterns. Amsterdam, SPB Academic Publishing 171p.

Anexo 1

Listados de las primeras 10 especies que se encontraron para cada tipo de bosque. En las tablas se indican: Abundancia, Dominancia y Frecuencia absolutas; Abundancia relativa, Abundancia relativa acumulada, Dominancia relativa, Dominancia relativa acumulada, Frecuencia relativa, Suma de IVI, Porcentaje del IVI y Porcentaje acumulado del IVI (en ese orden). Así mismo se indican los totales de estas variables considerando todas las especies presentes, y los subtotales para las diez primeras.

Resultados obtenidos a partir de datos de inventario:

Cuadro 1: Primeras 10 especies para el Bosque de Prioria, para datos de inventario.

Especies	A	D	F	AR	ARAc.	DR	DR Ac.	FR	SumaIVI	%IVI	%IVI Ac.
<i>Prioria copaifera</i>	20.81	7.12	87.88	26.93	57.84	36.91	36.91	13.06	76.90	25.63	25.63
<i>Pentaclethra maculoba</i>	23.89	4.63	95.45	30.92	30.92	24.02	60.93	14.19	69.12	23.04	48.67
<i>Pterocarpus</i> spp.	6.06	1.39	50.00	7.84	65.69	7.23	75.70	7.43	22.50	7.50	56.18
<i>Carapa guianensis</i>	4.55	1.46	37.88	5.88	78.17	7.55	68.47	5.63	19.06	6.35	62.53
<i>Sloanea</i> spp.	5.10	0.98	36.36	6.60	72.29	5.10	80.80	5.41	17.11	5.70	68.23
<i>Luehea seemannii</i>	1.01	0.69	22.73	1.31	85.36	3.56	84.36	3.38	8.25	2.75	70.98
<i>Grias cauliflora</i>	1.82	0.18	27.27	2.35	80.52	0.92	91.13	4.05	7.33	2.44	73.42
<i>Guatteria alata</i>	1.47	0.24	24.24	1.90	82.42	1.26	86.94	3.60	6.76	2.25	75.68
<i>Hernandia didymantha</i>	1.26	0.24	24.24	1.63	84.05	1.23	88.17	3.60	6.46	2.16	77.83
<i>Inga</i> spp.	0.91	0.14	22.73	1.18	87.84	0.74	94.42	3.38	5.29	1.76	79.60
Sutotal primeras 10	67	17	429	87		89		64	239	80	
Total	77	19	673	100		100		100	300	100	

Cuadro 2: Primeras 10 especies para el Bosque de Carapa – *Pentaclethra* – *Pterocarpus* para datos de inventario.

Especie	A	D	F	AR	AR Ac.	DR	DR Ac.	FR	SumIVI	%IVI	%IVI Ac.
<i>Pentaclethra maculoba</i>	33.33	6.52	100	48.78	48.78	45.52	45.52	15.55	109.85	36.62	36.62
<i>Carapa guianensis</i>	13.05	3.12	87.93	19.09	67.87	21.83	67.35	13.67	54.59	18.20	54.81
<i>Pterocarpus</i> spp.	6.32	1.44	74.14	9.25	77.12	10.09	77.44	11.53	30.87	10.29	65.10
<i>Hernandia didymantha</i>	1.61	0.30	36.21	2.36	79.48	2.09	84.66	5.63	10.07	3.36	68.46
<i>Apeiba membranacea</i>	1.26	0.39	31.03	1.85	81.33	2.72	80.15	4.83	9.39	3.13	71.59
<i>Luehea seemannii</i>	1.09	0.35	22.41	1.60	82.93	2.42	82.57	3.49	7.50	2.50	74.09
<i>Tabebuia rosea</i>	0.98	0.24	25.86	1.43	84.36	1.64	86.30	4.02	7.09	2.36	76.46
<i>Hyeronima oblonga</i>	0.46	0.18	13.79	0.67	87.47	1.28	87.58	2.15	4.10	1.37	77.82
<i>Inga</i> spp.	0.58	0.05	17.24	0.84	85.20	0.38	95.13	2.68	3.90	1.30	79.12
<i>Vitex cooperi</i>	0.58	0.16	12.07	0.84	86.04	1.10	88.69	1.88	3.82	1.27	80.40
Sutotal primeras 10	59	13	421	87		89		65	241	80	
Total	68	14	643	100		100		100	300	100	

Cuadro 3: Primeras 10 especies para el Bosque de Pentaclethra – Carapa – Apeiba, para datos de inventario.

Especie	A	D	F	AR	AR Ac.	DR	DR Ac.	FR	SumaIVI	%IVI	%IVI Ac.
Pentaclethra macroloba	37.47	8.70	94.17	44.38	44.38	48.16	48.16	9.70	102.23	34.08	34.08
Inga spp.	3.61	0.62	61.67	4.28	48.65	3.45	51.61	6.35	14.08	4.69	38.77
Pouteria spp.	2.42	0.41	46.67	2.86	55.66	2.27	56.79	4.81	9.94	3.31	42.08
Carapa guianensis	1.89	0.53	41.67	2.24	60.63	2.91	54.53	4.29	9.44	3.15	45.23
Apeiba membranacea	1.61	0.40	35.00	1.91	64.47	2.19	61.18	3.61	7.70	2.57	47.80
Goethalsia meiantha	2.31	0.39	26.67	2.73	58.39	2.17	63.35	2.75	7.65	2.55	50.35
Cespedesia macrophylla	3.50	0.40	12.50	4.15	52.80	2.19	58.99	1.29	7.63	2.54	52.89
Virola spp.	1.64	0.34	35.00	1.94	62.57	1.90	65.25	3.61	7.44	2.48	55.37
Guarea spp.	1.28	0.24	25.83	1.51	67.67	1.34	69.90	2.66	5.52	1.84	57.21
Pourouma bicolor	1.42	0.19	24.17	1.68	66.15	1.07	73.50	2.49	5.24	1.75	58.96
Subtotal primeras 10	57	12	403	68		68		42	177	59	
Total	84	18	971	100		100		100	300	100	

Cuadro 4: Primeras 10 especies para el Bosque de Pentaclethra – Vochysia ferruginea, para datos de inventario.

Especie	A	D	F	AR	AR Ac.	DR	DR Ac.	FR	SumaIVI	%IVI	%IVI Ac.
Pentaclethra macroloba	33.17	5.73	88.75	37.09	37.09	37.20	37.20	7.66	81.96	27.32	27.32
Pouteria spp.	3.25	0.50	38.75	3.64	40.73	3.22	44.57	3.34	10.20	3.40	30.72
Vochysia ferruginea	2.58	0.64	35.00	2.89	49.63	4.14	41.35	3.02	10.05	3.35	34.07
Chrysophyllum spp.	2.71	0.37	45.00	3.03	43.76	2.38	55.33	3.88	9.29	3.10	37.17
Couma macrocarpa	2.67	0.44	37.50	2.98	46.74	2.83	50.45	3.24	9.05	3.02	40.18
Inga spp.	2.04	0.26	36.25	2.28	51.91	1.67	60.72	3.13	7.09	2.36	42.54
Carapa guianensis	1.63	0.39	30.00	1.82	53.73	2.51	52.96	2.59	6.92	2.31	44.85
Dipteryx panamensis	1.04	0.47	22.50	1.17	62.21	3.05	47.62	1.94	6.15	2.05	46.90
Virola spp.	1.50	0.22	30.00	1.68	55.41	1.42	62.14	2.59	5.68	1.89	48.79
Protium spp.	1.46	0.19	28.75	1.63	57.04	1.22	66.04	2.48	5.34	1.78	50.57
Subtotal primera 10	52	9	393	58		60		34	152	51	
Total	89	15	1159	100		100		100	300	100	

Cuadro 5: Primeras 10 especies para el Bosque de Dialium – Dipteryx - Pentaclethra, para datos de inventario.

Especie	A	D	F	AR	AR Ac.	DR	DR Ac.	FR	SumaIVI	%IVI	%IVI Ac.
Pentaclethra macroloba	17.80	2.60	82.90	22.90	22.90	19.40	19.40	6.30	48.60	16.20	16.20
Dialium guianense	7.30	1.60	78.00	9.30	32.20	11.50	30.90	6.00	26.80	8.90	25.10
Vochysia ferruginea	5.00	1.00	61.00	6.40	38.60	7.70	38.60	4.70	18.70	6.20	31.40
Dipteryx panamensis	2.80	1.00	51.20	3.60	46.70	7.20	45.70	3.90	14.70	4.90	36.30
Virola spp.	3.50	0.50	56.10	4.50	43.10	3.60	58.00	4.30	12.40	4.10	40.40
Carapa guianensis	2.30	0.70	45.10	2.90	52.60	4.80	50.50	3.40	11.20	3.70	44.10
Tetragastris panamensis	2.30	0.40	40.20	3.00	49.70	3.10	61.10	3.10	9.10	3.00	47.10
Vatairea lundellii	1.40	0.50	26.80	1.80	60.70	3.80	54.40	2.00	7.70	2.60	49.70
Chrysophyllum spp.	1.80	0.20	35.40	2.30	54.90	1.60	62.70	2.70	6.70	2.20	51.90
Brosimum alicastrum	1.70	0.20	35.40	2.10	57.10	1.40	67.20	2.70	6.20	2.10	54.00
Subtotal primeras 10	46	9	512	59		64		39	162	54	
Total	78	14	1311	100		100		100	300	100	

Cuadro 6: Primeras 10 especies para el Bosque de Vochisia ferruginea - Qualea, para datos de inventario.

Especie	A	D	F	AR	AR Ac.	DR	DR Ac.	FR	SumaIVI	%IVI	%IVI Ac.
Vochisia ferruginea	10.05	2.34	77.61	11.30	11.30	14.27	14.27	6.08	31.65	10.55	10.55
Qualea paraensis	5.67	1.22	67.16	6.38	24.11	7.41	21.68	5.26	19.05	6.35	16.90
Coccoloba tuerckheimii	5.72	0.81	62.69	6.43	17.73	4.95	33.80	4.91	16.30	5.43	22.33
Dipteryx panamensis	2.49	1.18	46.27	2.80	55.82	7.17	28.84	3.63	13.59	4.53	26.86
Tetragastris panamensis	3.78	0.68	52.24	4.25	33.28	4.14	51.74	4.09	12.49	4.16	31.02
Chrysophyllum spp.	4.38	0.53	52.24	4.92	29.03	3.20	54.94	4.09	12.21	4.07	35.09
Dialium guianense	3.43	0.78	37.31	3.86	37.14	4.78	38.57	2.92	11.56	3.85	38.95
Carapa guianensis	3.04	0.72	47.76	3.41	40.55	4.37	47.60	3.74	11.53	3.84	42.79
Billia colombiana	2.59	0.76	38.81	2.91	53.02	4.65	43.23	3.04	10.60	3.53	46.32
Elaeoluma glabrescens	2.94	0.40	35.82	3.30	43.85	2.44	60.37	2.81	8.55	2.85	49.17
Sbttotal primeras 10	44	9	518	50		57		41	148	49	
Total	89	16	1276	100		100		100	300	100	

Cuadro 7: Primeras 10 especies para el Bosque de Billia, para datos de inventario.

Especie	A	D	F	AR	AR Ac.	DR	DR Ac.	FR	SumaIVI	%IVI	%IVI Ac.
Inga spp.	8.72	1.40	83.08	11.69	11.69	8.40	17.15	6.81	26.91	8.97	8.97
Billia colombiana	7.49	1.46	61.54	10.04	21.73	8.75	8.75	5.04	23.84	7.95	16.91
Carapa guianensis	4.46	1.35	63.08	5.98	27.72	8.10	25.26	5.17	19.26	6.42	23.33
Pouteria spp.	2.77	0.63	52.31	3.71	31.43	3.78	37.43	4.29	11.78	3.93	27.26
Minuartia guianensis	2.72	0.53	47.69	3.65	35.08	3.15	40.58	3.91	10.71	3.57	30.83
Virola spp.	2.62	0.45	41.54	3.51	38.58	2.69	46.42	3.41	9.60	3.20	34.03
Pentaclethra macroloba	2.62	0.72	13.85	3.51	42.09	4.31	29.57	1.14	8.96	2.99	37.01
Vochisia ferruginea	1.59	0.68	32.31	2.13	54.61	4.08	33.65	2.65	8.86	2.95	39.97
Ilex skutchii	2.10	0.38	36.92	2.82	47.94	2.27	55.92	3.03	8.11	2.70	42.67
Apeiba membranacea	1.59	0.40	40.00	2.13	52.48	2.39	51.38	3.28	7.80	2.60	45.27
Subtotal primeras 10	37	8	472	49		48		39	136	45	
Total	75	17	1220	100		100		100	300	100	

Resultados obtenidos para datos de PPM:

Cuadro 8: Primeras 10 especies para el Bosque de Carapa – Pentaclethra – Pterocarpus, para los datos de PPM.

Especie	A	D	F	AR	AR Ac.	DR	DR Ac.	FR	SumaIVI	%IVI	%IVI Ac.
Pentaclethra macroloba	86.50	15.30	100	24.38	24.38	41.70	41.70	1.44	67.52	22.51	22.51
Carapa guianensis	37.75	4.61	100	10.64	35.02	12.56	54.25	1.44	24.64	8.21	30.72
Psychotria panamensis	21.50	1.13	75	6.06	41.09	3.08	69.11	1.08	10.22	3.41	34.12
Prioria copaifera	10.00	1.60	50	2.82	54.05	4.37	58.62	0.72	7.91	2.64	36.76
Astrocaryum alatum	19.75	0.29	25	5.57	46.65	0.79	81.83	0.36	6.71	2.24	39.00
Pterocarpus officinalis	4.75	1.56	50	1.34	60.40	4.25	62.88	0.72	6.31	2.10	41.10
Iriartea deltoidea	16.25	0.46	25	4.58	51.23	1.24	78.11	0.36	6.18	2.06	43.16
Apeiba membranacea	3.75	1.08	100	1.06	65.05	2.93	72.04	1.44	5.43	1.81	44.97
Luehea seemanii	1.75	1.16	75	0.49	73.64	3.16	66.04	1.08	4.74	1.58	46.55
Socratea durissima	10.00	0.14	100	2.82	56.87	0.39	89.34	1.44	4.65	1.55	48.10
Subtotal primeras 10	212	27	700	60		74		10	144	48	
Total	355	37	6950	100		100		100	300	100	

Cuadro 9: Primeras 10 especies para el Bosque de Pentaclethra – Carapa - Apeiba, para los datos de PPM.

Especie	A	D	F	AR	AR Ac.	DR	DR Ac.	FR	SUMAIVI	%IVI	%IVI Ac.
Pentaclethra macroloba	86.40	12.82	100	22.23	22.23	47.49	47.49	1.12	70.84	23.61	23.61
Iriartea deltoidea	22.60	0.56	80	5.82	28.05	2.06	57.87	0.89	8.77	2.92	26.54
Brosimum lactescens	6.40	0.72	100	1.65	42.10	2.67	53.73	1.12	5.43	1.81	28.35
Socratea durissima	14.00	0.21	80	3.60	31.65	0.79	68.90	0.89	5.29	1.76	30.11
Dialium guianense	4.60	0.96	20	1.18	50.64	3.57	51.06	0.22	4.98	1.66	31.77
Welfia georgii	12.00	0.25	80	3.09	34.74	0.92	67.27	0.89	4.90	1.63	33.40
Goethalsia meiantha	7.00	0.56	80	1.80	38.65	2.08	55.81	0.89	4.78	1.59	34.99
Dendropanax arboreus	6.00	0.34	80	1.54	45.24	1.27	62.17	0.89	3.71	1.24	36.23
Apeiba membranacea	5.00	0.34	100	1.29	49.46	1.25	63.43	1.12	3.65	1.22	37.45
Protium ravenii	6.20	0.25	100	1.60	43.70	0.94	66.35	1.12	3.65	1.22	38.66
Subtotal primeras 10	170	17	820	44		63		9	116	39	
Total	389	27	8960	100		100		100	300	100	

Cuadro 10: Primeras 10 especies para el Bosque de Pentaclethra – Vochysia ferruginea, para los datos de PPM.

Especie	A	D	F	AR	AR Ac.	DR	DR Ac.	FR	SumaIVI	%IVI	%IVI Ac.
Pentaclethra macroloba	72.67	7.57	100	13.68	13.68	31.85	31.85	0.93	46.46	15.49	15.49
Ferdinandusa panamensis	49.33	0.83	100	9.29	22.96	3.48	35.34	0.93	13.69	4.57	20.05
Welfia georgii	21.67	0.42	100	4.08	27.04	1.76	50.42	0.93	6.76	2.25	22.30
Protium ravenii	20.00	0.42	100	3.76	30.80	1.75	52.18	0.93	6.44	2.15	24.45
Laetia procera	13.33	0.51	100	2.51	35.95	2.13	46.88	0.93	5.56	1.85	26.31
Dendropanax arboreus	11.67	0.54	100	2.20	45.23	2.26	42.52	0.93	5.38	1.79	28.10
Maclobium costaricense	12.33	0.53	33.33	2.32	40.72	2.23	44.75	0.31	4.86	1.62	29.72
Tetragastris panamensis	6.00	0.59	100	1.13	61.17	2.49	37.82	0.93	4.54	1.51	31.23
Pourouma bicolor	10.00	0.41	100	1.88	49.12	1.72	53.90	0.93	4.53	1.51	32.74
Minquartia guianensis	10.67	0.36	100	2.01	47.24	1.51	60.21	0.93	4.44	1.48	34.22
Subtotal primeras 10	228	12	933	43		51		9	103	34	
Total	531	24	10800	100		100		100	300	100	

Cuadro 11: Primeras 10 especies para el Bosque de Dialium – Dipteryx - Pentacethra, para los datos de PPM.

Especie	A	D	F	AR	AR Ac.	DR	DR Ac.	FR	SumaIVI	%IVI	%IVI Ac.
<i>Pentaclethra macroloba</i>	62.17	5.66	100	13.38	13.38	20.19	20.19	1.33	34.89	11.63	11.63
<i>Cecropia obtusifolia</i>	25.33	0.54	100	5.45	18.83	1.94	43.27	1.33	8.72	2.91	14.54
<i>Dipteryx panamensis</i>	3.00	1.51	100	0.65	75.75	5.37	25.56	1.33	7.35	2.45	16.98
<i>Carapa guianensis</i>	10.17	0.98	100	2.19	36.12	3.48	36.60	1.33	7.00	2.33	19.32
<i>Apeiba membranacea</i>	4.67	1.14	100	1.00	63.45	4.07	29.63	1.33	6.40	2.14	21.45
<i>Dialium guianense</i>	7.17	0.98	100	1.54	47.56	3.49	33.12	1.33	6.36	2.12	23.57
<i>Cecropia insignis</i>	14.67	0.47	100	3.16	29.30	1.69	50.48	1.33	6.18	2.06	25.63
<i>Welfia georgii</i>	18.83	0.40	50	4.05	22.88	1.43	56.48	0.66	6.15	2.05	27.68
<i>Trichilia quadrijuga</i>	15.17	0.36	100	3.26	26.15	1.27	60.43	1.33	5.87	1.96	29.63
<i>Pouteria spp.</i>	10.50	0.50	100	2.26	33.93	1.78	48.78	1.33	5.37	1.79	31.42
Subtotal primeras 10	172	13	950	37		45		13	94	31	
Total	465	28	7533	100		100		100	300	100	

Cuadro 12: Primeras 10 especies para el Bosque de Vochysia ferruginea - Qualea, para los datos de PPM.

Especie	A	D	F	AR	AR Ac.	DR	DR Ac.	FR	SumaIVI	%IVI	%IVI Ac.
<i>Welfia georgii</i>	37.75	0.71	100	7.29	7	3.04	34	0.88	11.20	3.73	4
<i>Dialium guianense</i>	15.75	1.67	100	3.04	30	7.17	14	0.88	11.09	3.70	7
<i>Vochysia allenii</i>	14.75	1.54	75	2.85	32	6.59	21	0.66	10.09	3.37	11
<i>Ferdinandusa panamensis</i>	33.75	0.59	100	6.52	14	2.55	47	0.88	9.94	3.31	14
<i>Dipteryx panamensis</i>	6.25	1.71	100	1.21	53	7.31	7	0.88	9.39	3.13	17
<i>Qualea paraensis</i>	14.50	1.31	100	2.80	35	5.63	27	0.88	9.30	3.10	20
<i>Prestoea decurrens</i>	31.75	0.38	100	6.13	20	1.62	51	0.88	8.62	2.88	23
<i>Pentaclethra macroloba</i>	17.50	0.94	75	3.38	23	4.03	31	0.66	8.07	2.69	26
<i>Couma macrocarpa</i>	10.75	0.55	75	2.08	42	2.35	49	0.66	5.09	1.70	28
<i>Henriettea odorata</i>	14.50	0.31	100	2.80	38	1.31	60	0.88	4.99	1.66	29
Subtotal primeras 10	197	10	925	38		42		8	88	29	
Total	518	23.35		100		100		100	300	100	

3

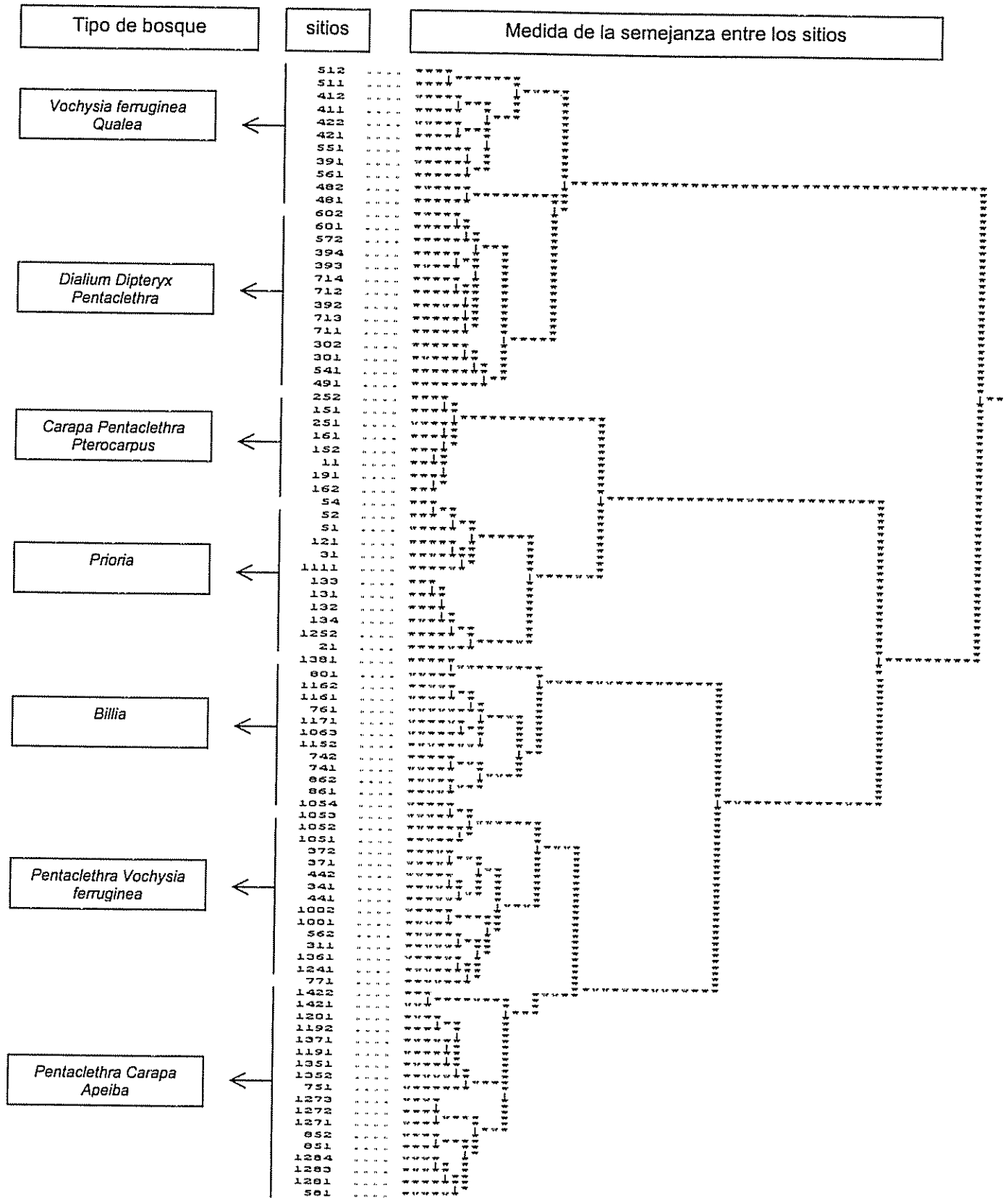
Cuadro 13: Primeras 10 especies para el Bosque de Dialium, para los datos de PPM.

Especie	A	D	F	AR	AR Ac.	DR	DR Ac.	FR	SumaIVI	%IVI	%IVI Ac.
<i>Dialium guianense</i>	13.00	3.18	100	3.67	13.63	12.84	12.84	0.89	17.39	5.80	5.80
<i>Apeiba membranacea</i>	4.33	1.82	100	1.22	36.84	7.34	20.18	0.89	9.45	3.15	8.95
<i>Iriarteia deltoidea</i>	20.67	0.44	66	5.83	5.83	1.79	41.37	0.59	8.21	2.74	11.68
<i>Pourouma bicolor</i>	8.33	0.69	100	2.35	21.90	2.77	32.36	0.89	6.01	2.00	13.69
<i>Colubrina spinosa</i>	14.67	0.23	100	4.14	9.96	0.93	63.32	0.89	5.95	1.98	15.67
<i>Goethalsia meiantha</i>	6.00	0.67	100	1.69	27.91	2.72	35.08	0.89	5.30	1.77	17.43
<i>Sclerolobium costaricense</i>	4.00	0.76	66.67	1.13	40.42	3.09	26.75	0.59	4.80	1.60	19.04
<i>Virola koschnyi</i>	3.67	0.70	100	1.03	44.83	2.84	29.58	0.89	4.76	1.59	20.62
<i>Brosimum alicastrum</i>	2.33	0.86	66.67	0.66	53.76	3.48	23.66	0.59	4.73	1.58	22.20
<i>Carapa guianensis</i>	5.33	0.63	66.67	1.50	32.61	2.54	37.61	0.59	4.63	1.54	23.74
Subtotal primeras 10	82	10	867	23		40		8	71	24	
Total	355	25	11300	100		100		100	300	100	

Cuadro 14: Primeras 10 especies para el Bosque de Pentaclethra, para los datos de PPM.

Especies	A	D	F	AR	AR AC.	DR	DR Ac.	FR	SumaIVI	%IVI	%IVI Ac.
<i>Pentaclethra macroloba</i>	118.25	11.33	100	23.62	23.62	39.06	39.06	1.26	63.93	21.31	21.31
<i>Protium ravenii</i>	28.75	0.83	100	5.74	29.36	2.88	50.89	1.26	9.88	3.29	24.60
<i>Micropholis crotonoides</i>	9.00	1.66	100	1.80	44.83	5.73	44.79	1.26	8.78	2.93	27.53
<i>Socratea durissima</i>	25.00	0.37	100	4.99	34.35	1.29	64.44	1.26	7.54	2.51	30.04
<i>Tapirira guianensis</i>	6.25	0.94	100	1.25	53.57	3.22	48.01	1.26	5.73	1.91	31.95
<i>Brosimum guianense</i>	12.50	0.43	100	2.50	36.85	1.48	59.00	1.26	5.23	1.74	33.70
<i>Maranthes panamensis</i>	8.00	0.75	75	1.60	48.18	2.59	53.47	0.94	5.13	1.71	35.41
<i>Pouteria campechiana</i>	5.50	0.64	75	1.10	55.92	2.21	55.68	0.94	4.25	1.42	36.82
<i>Virola sebifera</i>	7.50	0.40	100	1.50	49.68	1.38	61.84	1.26	4.14	1.38	38.20
<i>Quararibea ochrocalyx</i>	10.75	0.17	100	2.15	38.99	0.59	77.94	1.26	3.99	1.33	39.53
<i>Iriartea deltoidea</i>	10.00	0.20	100	2.00	43.04	0.70	74.08	1.26	3.95	1.32	40.85
Subtotal primeras 10	242	18	1050	48		61		13	123	41	
Total	501	29	7950	100		100		100	300	100	

Anexo 2



Dendrograma resultado del análisis de conglomerados para los datos de Inventario.

Anexo 3

Tabla de trabajo fitosociológica para el análisis a nivel de paisaje utilizando datos de inventarios forestales. Representa un arreglo de sitios y especies de manera tal que los grupos que son mas ricos en especies ocurren en la diagonal de la tabla de vegetación.

Algunos de los tipos de bosques presenten en la tabla no han sido descritos en los resultados debido a su baja representatividad en la muestra. Sólo se presentan aquellos que ocurrieron al menos en 5 sitios diferentes.

Anexo 4

Listado de los nombres comunes de las especies de mayor abundancia para todos los tipos de bosques.

Especies de mayor abundancia	Nombre común
<i>Apeiba membranacea</i>	PEINE DE MICO
<i>Billia colombiana</i>	CUCARACHO
<i>Brosimum alicastrum</i>	OJOCHE
<i>Carapa guianensis</i>	CAOBILLA
<i>Cespedesia macrophylla</i>	ESPAVEL AMARILLO
<i>Chrysophyllum</i> spp.	CAIMITO
<i>Coccoloba tuerckheimii</i>	PIEDRA
<i>Couma macrocarpa</i>	LECHE DE VACA
<i>Dialium guianense</i>	TAMARINDO
<i>Dipteryx panamensis</i>	ALMENDRO
<i>Elaeoluma glabrescens</i>	CAREY
<i>Goethalsia meiantha</i>	GUACIMO
<i>Grias cauliflora</i>	TABACON
<i>Guarea</i> spp.	POCORA
<i>Hermandia didymantha</i>	ZOPILOTE
<i>Hyeronima oblonga</i>	PILON
<i>Ilex skutchii</i>	PLOMILLO
<i>Inga</i> spp.	GUABO
<i>Luehea seemannii</i>	GUACIMO COLORADO
<i>Minquartia guianensis</i>	MANU
<i>Pentaclethra macroloba</i>	GAVILAN
<i>Pourouma bicolor</i>	CHUMICO
<i>Pouteria</i> spp.	MADROÑO
<i>Prioria copaifera</i>	CATIVO
<i>Protium</i> spp.	ALCANFOR
<i>Pterocarpus</i> spp.	SANGRILLO
<i>Qualea paraensis</i>	ARENO
<i>Sloanea</i> spp.	TERCIOPELO
<i>Tabebuia rosea</i>	ROBLE SABANA
<i>Tetragastris panamensis</i>	CANFIN
<i>Vatairea lundellii</i>	COCOBOLO
<i>Virola</i> spp.	FRUTA DORADA
<i>Vitex cooperi</i>	MANU PLATANO
<i>Vochysia ferruginea</i>	BOTARRAMA

Anexo 5

Formulas utilizadas

1. Análisis de componentes principales

Debido a que las diferentes bandas de una imagen se encuentran correlacionadas, se realizó un análisis de componentes principales, para utilizar sólo aquella información que no fuera redundante. Este análisis redistribuye la variación presente entre las bandas mediante un proceso de referenciación espectral de los datos respecto a unos nuevos ejes.

En el análisis, a partir de una matriz de varianza – covarianza, se extraen los autovalores para cada uno de los componentes. Los autovalores expresan la longitud de cada uno de los nuevos componentes y en última instancia, la proporción de información original que retienen. El análisis de componentes principales produce tantos componentes como bandas originales, si bien el autovalor va disminuyendo progresivamente, del primero a los últimos, porque pretende maximizar sucesivamente la varianza extraída en el análisis (Chuvieco 1990).

Luego se calculan los autovectores que indican la ponderación que debe aplicarse a cada una de las bandas originales para obtener un nuevo componente principal. A partir de los autovectores puede calcularse la matriz de correlación entre los componentes principales y las bandas de la imagen. Con esta matriz se obtiene la imagen de componentes principales.

Para conocer el porcentaje de varianza explicado por cada uno de los componentes se utilizó la siguiente fórmula (Chuvieco 1990):

$$\%p = \frac{\text{autovalor } lp * 100}{\sum \text{autovalores } lp}$$

donde: %p es el porcentaje de varianza total explicada por el componente p
 \sum autovalores lp es la suma de todos los autovalores.

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos en el presente estudio en relación al porcentaje de variabilidad explicado por cada componente principal:

	Autovalor lp	%p	%p_acum
Comp 1	9894.89	80.64	80.64
Comp 2	2030.35	16.55	97.18
Comp 3	237.62	1.94	99.12
Comp 4	88.42	0.72	99.84
Comp 5	16.28	0.13	99.97
Comp 6	3.46	0.03	100.00
Suma	12271.03	100.00	

2. Tasseled cap

Se realizó una nueva imagen a partir de la función tasseled cap, que produce una rotación de los ejes espectrales de la imagen de manera que quedan alineados con la respuesta general que tiende a dar tres grandes grupos de cubierta: suelo desnudo, vegetación y zonas húmedas. De manera que en la nueva imagen se presentan (Lillesand y Keifer 1987, Chuvieco 1990):

- Capa 1 (rojo) BRILLO: una suma ponderada de todas las bandas, definida en la dirección de la principal variación en la reflectancia del suelo.
- Capa 2 (verde) VERDOR: es un contraste entre el rojo cercano y las bandas del espectro visible y tiene una fuerte relación la cantidad de vegetación verde.
- Capa 3 (azul) HUMEDAD: se relaciona con la humedad del dosel y el suelo.

El algoritmo utilizado se basa en los siguientes coeficientes para Landsat TM (ERDAS 1997):

	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
BRILLO	0.2909	0.2493	0.4806	0.5568	0.4438	0.1706
VERDOR	-0.2728	-0.2174	-0.5508	0.7221	0.0733	-0.1648
HUMEDAD	0.1446	0.1761	0.3322	0.3396	-0.6210	-0.4186

3. Modelo de Elevación Digital

Un MED constituye una representación simplificada del relieve, es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud en la superficie del terreno. Este tipo de datos se expresan como una serie de puntos con coordenadas X,Y y valores Z de elevación, Para crear un MED una malla es sobrepuesta a una capa de curvas de nivel y la elevación es leída en cada intersección de la malla. Estas medidas de elevación constituyen el modelo de MED.

4. Índice de divergencia transformada

La separabilidad es una medida estadística de la distancia entre dos firmas espectrales, cuanto mayor sea el valor de divergencia, mayor será la separabilidad entre clases. Puede ser calculada para cualquier combinación de bandas que sea utilizada en la clasificación, abriendo la posibilidad de descartar aquellas bandas que no inciden en la separabilidad de las firmas.

La divergencia transformada es una medida de separabilidad y se calcula de la siguiente manera:

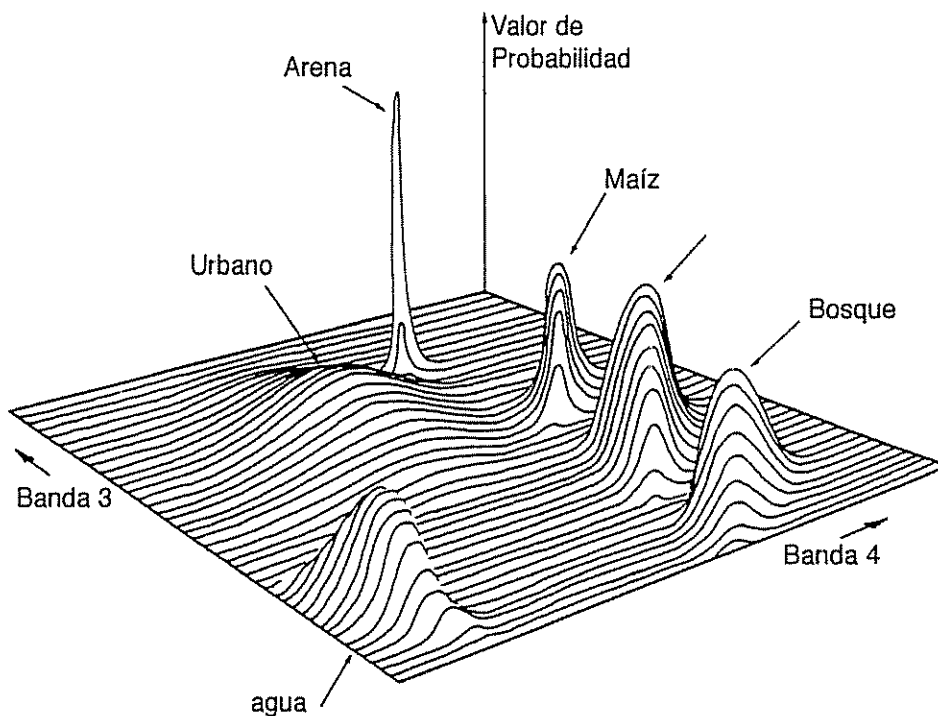
$$D_{ij} = \frac{1}{2} \text{Tr}[(V_i - V_j)(V_i^{-1} - V_j^{-1})] + \frac{1}{2} \text{Tr}[(V_i^{-1} + V_j^{-1})(M_i + M_j)(M_i + M_j)']$$

$$DT_{ij} = c(1 - \exp(-D_{ij})/8)$$

donde D_{ij} indica la medida de la divergencia entre las categorías i y j ; Tr se refiere a la suma de los elementos de la diagonal de la matriz indicada entre corchetes, V_i y V_j son las matrices de varianza-covarianza de las categorías i y j , M_i y M_j son los vectores de medias correspondientes a las mismas categorías y bandas, T indica la matriz transpuesta de la indicada entre corchetes, y D_{ij} es el valor de divergencia transformada.

5. Clasificador de Máxima Verosimilitud

Es un criterio estadístico de clasificación digital de imágenes, por el cual se asigna cada pixel de la imagen a la categoría para la cual posee mayor probabilidad de pertenencia como se muestra en la figura que se presenta a continuación:



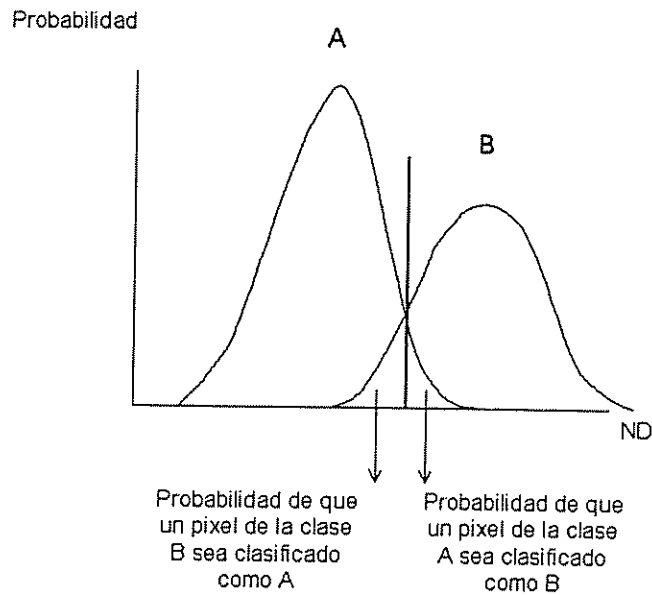
El algoritmo decide que el pixel X corresponde a la clase c si y solo si:

$$p_c \geq p_i \quad \text{donde } i=1,2,3,\dots,n \text{ clases posibles}$$

$$p_c = \left\{ -0.5 \log_e [\det(V_c)] \right\} - \left[0.5 (X - M_c)^T V_c^{-1} (X - M_c) \right]$$

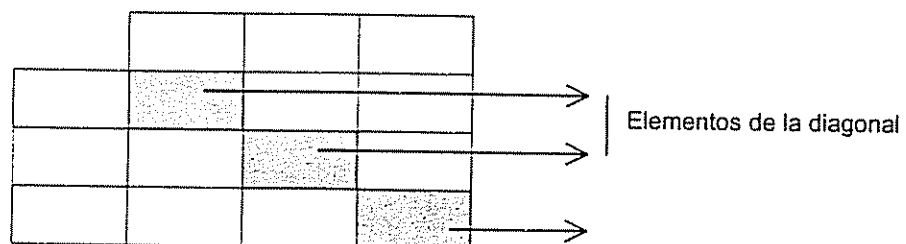
donde $\det(V_c)$ es el determinante de la matriz de covarianza V_c . Para asignar un pixel a una clase el algoritmo calcula los valores de p_c para cada una de las clases.

En aquellos casos en donde dos categorías traslapan sus distribuciones de probabilidad, pueden cometerse dos tipos de errores, con sus probabilidades asociadas. Existe la probabilidad de asignar un píxel a la categoría A cuando este en realidad pertenece a la categoría B, y viceversa:



6. Matriz de confusión

Es una de las medidas más comunes para expresar la precisión de la clasificación. Estas matrices miden, categoría por categoría, la relación entre datos de referencia (realidad del terreno) y los resultados de la clasificación. Son matrices cuadradas, con un número de columnas y filas igual al número de categorías de las que se quiere obtener la precisión. Las columnas representan la realidad del terreno, mientras que las filas corresponden a los datos clasificados:



La precisión global de la clasificación puede calcularse relacionando los elementos de la diagonal con

el total de datos de referencia:

$$Pg = \frac{\sum X_{ii}}{\sum \sum X_{ij}} \times 100$$

Los errores por omisión y por comisión pueden calcularse a partir de los marginales de filas y columnas respectivamente. En el caso de las filas, los marginales indican el número de píxeles que, perteneciendo a una determinada categoría, no fueron incluidos en ella. Estos errores por omisión se calculan como:

$$Eo = \frac{X_{i.} - X_{ii}}{X_{i.}} \text{ donde } X_{i.} \text{ Es el marginal de fila de } i \text{ y } X_{ii} \text{ la diagonal de dicha fila.}$$

De igual forma, los marginales de columnas expresan los errores por comisión, es decir los píxeles que se incluyeron en una determinada categoría perteneciendo a otra en la realidad del terreno:

$$Ec = \frac{X_{.i} - X_{ii}}{X_{.i}} \text{ donde } X_{.i} \text{ indica el marginal de la columna } i \text{ y } X_{ii} \text{ la diagonal de columna } i$$

Los errores por omisión y comisión expresan dos enfoques del mismo problema. Los primeros se refieren a una definición imperfecta de la categoría. Los segundos, a una delimitación excesivamente amplia (Lillesand y Keifer 1987, Chuvieco 1990, Congalton 1991).

7. Análisis categórico multivariado: estadístico Kappa y Pruebas pareadas de diferencias de valores Kappa

Dentro de una Matriz de confusión resulta de gran interés analizar las relaciones múltiples entre las distintas categorías. Uno de los índices más empleados en este sentido, es el estadístico Kappa que mide si la clasificación ha discriminado las categorías de interés con precisión significativamente mayor a las que se hubiera obtenido con una asignación aleatoria (Chuvieco 1990, Congalton 1991, Rosenfield y Fitzpatrick-Lins 1986). La fórmula para el cálculo de Kappa es la siguiente (Cohen 1960, citado por Hudson y Ramm 1987):

$$K = \frac{N \sum X_{ii} - \sum X_{i.} \times X_{.i}}{N^2 - \sum X_{i.} \times X_{.i}}$$

en donde X_{ij} indica el acuerdo observado y $X_{i.} \times X_{.i}$ (producto de marginales) el acuerdo esperado, lo que permite estimar si el acuerdo observado se aleja o no significativamente del acuerdo esperado por el azar (Chuvieco 1990).

Puede considerarse que los valores de Kappa se distribuyen normalmente, por lo que se pueden señalar niveles de significación con el objeto de contrastar cuando dos o mas clasificaciones difieren entre si significativamente para un determinado nivel de probabilidad (Congalton *et al.* 1983).

Para ello es necesario calcular la varianza de los valores Kappa, que viene dada por la siguiente fórmula:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \left(\frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)^2} \right) + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2 - \theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4 - 4\theta_2)^2}{(1-\theta_2)^4}$$

donde:

$$\theta_1 = \sum X_{ii} / N$$

$$\theta_2 = \sum X_{i.} X_{.i} / N^2$$

$$\theta_3 = \sum X_{ii}(X_{i.} + X_{.i}) / N^2$$

$$\theta_4 = \sum \sum X_{ij}(X_{j.} + X_{.i})^2 / N^3$$

Anexo 6

Glosario

Agrupamiento guiado (guided clustering): metodología mixta de clasificación digital de imágenes. Combina la clasificación no supervisada en una primera fase, con la clasificación supervisada en una segunda fase. Su objetivo es poder distinguir subclases espectrales dentro de las clases que se quieren distinguir en la clasificación.

Banda (espectral): se refiere a una selección de longitudes de onda con comportamientos electromagnéticos similares.

Clasificación (digital): proceso por el que se asigna un pixel de una imagen multi-espectral a una de las categorías de la leyenda, generalmente sobre la base de similitudes entre los valores numéricos que las definen.

Componentes principales: es una técnica de tratamiento estadístico que permite condensar una serie de variables en un menor número sobre la base de sus correlaciones mutuas.

Datos auxiliares: medidas y observaciones acerca de los objetos, áreas o fenómenos que serán captados por algún medio de teledetección.

Digitalización: el concepto refiere a cualquier conversión de un documento analógico (fotografía aérea o mapa convencional) en formato numérico.

Filtros digitales: se trata de matrices de coeficientes numéricos que permiten atenuar o acentuar (según su finalidad y estructura) los valores radiométricos presentes en los datos originales.

Firmas espectrales o sitios de entrenamiento: es la expresión de un objeto sobre una imagen que nos permite reconocerlo. Las firmas espectrales están afectadas por las características del objeto que origina su interacción con la energía electromagnética, y son distintas según las longitudes de onda.

Kappa: mide la diferencia entre el acuerdo mapa – realidad observada y el que cabría esperar simplemente por el azar.

Matriz de confusión: es una matriz en donde las filas representan la realidad observada en el terreno y en las columnas se ubica el tipo de cobertura resultante de la clasificación, de

modo que se pueden calcular las proporciones de puntos que han sido clasificados correctamente.

Máxima verosimilitud: es un criterio estadístico de clasificación digital de imágenes, por el cual se asigna cada pixel de la imágenes a la categoría para la cual posee mayor probabilidad de pertenencia.

Pixel: derivado del inglés "picture element", es el elemento pictórico más pequeño de las imágenes que es susceptible de ser procesado.

Precisión: es una estimación de la exactitud alcanzada por el mapa producido a partir de la clasificación

Precisión Global: expresa la confiabilidad global del mapa. Se calcula a partir de la matriz de confusión, y representa la relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total de puntos evaluados para el cálculo de la precisión.

Sitios de entrenamiento o firmas espectrales: es la expresión de un objeto sobre una imagen que nos permite reconocerlo. Las firmas espectrales están afectadas por las características del objeto que origina su interacción con la energía electromagnética, y son distintas según las longitudes de onda.

Sistemas de información geográfica (SIG): conjunto de programas que permiten almacenar, modificar y relacionar cualquier tipo de información espacial.

Separabilidad: capacidad de discriminar, a partir de la información de la imagen, dos o más clases o coberturas que se quieren diferenciar en la clasificación.

Teledetección: es la técnica que permite obtener información sobre un objeto , área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación

Tasseled cap: es una transformación numérica que se realiza sobre los datos originales de la imagen con el fin de obtener unas nuevas bandas que permiten realzar algunos rasgos de interés en la imagen. Estos son: el brillo (que refleja los cambios en la reflectividad total en la imagen), el verdor (que indica el contraste entre las bandas visibles y el infrarrojo cercano) y la humedad (que se relaciona con la cantidad de humedad del suelo y la vegetación).