



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE BIOLOGÍA DEL MEDIO AMBIENTE

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA VERTICAL
EN DEPENDENCIA DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR,
EN UN BOSQUE DE CRESTA ANDINO EN LA
RESERVA DE BIOSFERA SAN FRANCISCO**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE BIÓLOGO DEL MEDIOAMBIENTE**

AUTOR: MARCO TULIO LARA JIMÉNEZ
DIRECTOR: DR. GUSTAVO CHACÓN

CUENCA, ECUADOR

2007

AGRADECIMIENTOS

Mi especial agradecimiento a Ruetger Rollenbeck por su dirección académica y a todos quienes hacen Proyecto PREDICT, por el apoyo científico y más que todo por la amistad.

Al Dr. Gustavo Chacón por las sugerencias para mejorar el contenido.

Al Profesor Peter Fabian, por sus sugerencias y ejemplo personal.

A mis familia especialmente a mi Madre quien ha mejorado cada día algo de mi vida.

Y a ti Mareike por ayudarme con la formatización y por tus sugerencias y comentarios para hacer mejor este trabajo.

También agradezco a mis amigos Eric Malzam y Gustavo Lucero

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	II
ÍNDICE	III
ÍNDICE DE TABLAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE ANEXOS.....	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	X
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I:	
LA ARQUITECTURA VEGETAL.....	6
1.1 Importancia de la arquitectura vegetal	6
1.2 Análisis de la estructura del dosel vegetal	6
1.2.1 Métodos para caracterizar la estructura del dosel	8
1.3 Caracterización estructural mediante LAI	10
1.3.1 Medición de LAI por sensores de Transmisividad	11
1.3.2 Análisis de fracción de espacio abierto mediante sensores ópticos ...	11
1.3.2.1 Línea de sensores quantum.	12
1.3.2.2 Demon.....	14
1.3.2.3 Crownmeter.....	15
1.3.2.4 Li-Cor-LAI 2000.....	15
1.3.3 Ventajas y desventajas de los métodos ópticos.....	18
CAPÍTULO II:	
REFLECTANCIA SUPERFICIAL Y SONDEO REMOTO.....	20
2.1 Funcionalidades del software IDRISI 32	20
2.1.1 Funciones básicas.....	20
2.1.2 Métodos de clasificación.....	21
CAPÍTULO III:	
METODOLOGÍA	23
3.1 Área de Investigación.....	23
3.2 Descripción del método para describir estructura vegetal	25
3.2.1 Determinación de transectos	25
3.2.2 Mediante LAI.....	26

3.2.3	Mediante el análisis de fotografías verticales de vegetación	27
3.2.3.1	Toma de fotografías	27
3.2.4	Clasificación cluster de las fotos digitales con el programa IDRISI .	28
3.2.4.1	Preparación de fotografías en el programa Adobe Photoshop...	28
3.2.4.2	Recorte del cuadro de referencia.....	29
3.2.4.3	Análisis de fotografías en el programa IDRISI 32.....	30
3.2.5	Determinación de IAV	31
CAPÍTULO IV:		
RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS CLUSTER EN IDRISI Y		
CALCULACIONES DE IAV		
4.1	Fotografías cluster	33
4.1.1	Determinación de áreas abiertas y cerradas	43
4.1.2	Determinación de IAV	46
4.2	Lecturas de LAI.....	48
4.3	Correlaciones de las variables LAI y IAV	51
CAPÍTULO V:		
DISCUSIÓN EN BASE DE LOS RESULTADOS.....		
5.1	Sobre LAI.....	55
5.2	Sobre IAV	56
5.3	Sobre la correlación IAV y LAI.....	57
BIBLIOGRAFÍA		58
ANEXOS		61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Proporciones de áreas según el análisis cluster del transecto 1	44
Tabla 2: Proporciones de áreas según el análisis cluster del transecto 2	44
Tabla 3: Proporciones de áreas según el análisis cluster del transecto 3	44
Tabla 4: Proporciones de áreas según el análisis cluster del transecto 4	45
Tabla 5: Proporciones de áreas según el análisis cluster del transecto 5	45
Tabla 6: Proporciones de áreas según el análisis cluster del transecto 6	45
Tabla 7: Proporciones de áreas según el análisis cluster del transecto 7	46
Tabla 8: Valores de IAV para cada transecto.....	46
Tabla 9: Media de las lecturas del LAI	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Detalle del sensor óptico LI COR LAI-2000 (Welles y Norman 1991)	16
Figura 2: Ejemplo de fotografía digital analizada por IDRISI en cuatro cluster	21
Figura 3: Área de investigación (Mapa modificado tomado de Rollenbeck, archivos DFG, http://www.luenticus.org/articulos/03JyE003/ecuador.html y http://go.hrw.com/atlas/span_hm/ecuador.htm)	23
Figura 4: Descripción del fotografiado de los perfiles de vegetación	28
Figura 5: Foto ejemplo 1 y recorte del cuadro de referencia mediante Adobe Photoshop	28
Figura 6: Descomposición de la foto recortada ejemplo 1, en los canales azul, verde y rojo. Mediante Adobe Photoshop	29
Figura 7: Cuadro de comandos; preparación de fotos en Adobe Photoshop	29
Figura 8: Imagen compuesta y resultado de la clasificación a cinco cluster de la foto ejemplo 1 de la figura 6.	30
Figura 9: Cuadro de comandos para realizar un análisis cluster en IDRISI	31
Figura 10: Transecto 1 Foto 1 y resultado del análisis CLUSTER	34
Figura 11: Transecto 1 Foto 2 y resultado del análisis CLUSTER	34
Figura 12: Transecto 1 Foto 3 y resultado del análisis CLUSTER	34
Figura 13: Transecto 1 Foto 4 y resultado del análisis CLUSTER	35
Figura 14: Transecto 2 Foto 1 y resultado del análisis CLUSTER	35
Figura 15: Transecto 2 Foto 2 y resultado del análisis CLUSTER	35
Figura 16: Transecto 2 Foto 3 y resultado del análisis CLUSTER	36
Figura 17: Transecto 2 Foto 4 y resultado del análisis CLUSTER	36
Figura 18: Transecto 2 Foto 5 y resultado del análisis CLUSTER	36
Figura 19: Transecto 3 Foto 1 y resultado del análisis CLUSTER	37
Figura 20: Transecto 3 Foto 2 y resultado del análisis CLUSTER	37
Figura 21: Transecto 3 Foto 3 y resultado del análisis CLUSTER	37
Figura 22: Transecto 3 Foto 4 y resultado del análisis CLUSTER	38
Figura 23: Transecto 4 Foto 1 y resultado del análisis CLUSTER	38
Figura 24: Transecto 4 Foto 2 y resultado del análisis CLUSTER	38
Figura 25: Transecto 4 Foto 3 y resultado del análisis CLUSTER	39
Figura 26: Transecto 4 Foto 4 y resultado del análisis CLUSTER	39

Figura 27: Transecto 5 Foto 1 y resultado del análisis CLUSTER	39
Figura 28: Transecto 5 Foto 2 y resultado del análisis CLUSTER	40
Figura 29: Transecto 5 Foto 3 y resultado del análisis CLUSTER	40
Figura 30: Transecto 5 Foto 4 y resultado del análisis CLUSTER	40
Figura 31: Transecto 6 Foto 1 y resultado del análisis CLUSTER	41
Figura 32: Transecto 6 Foto 2 y resultado del análisis CLUSTER	41
Figura 33: Transecto 6 Foto 3 y resultado del análisis CLUSTER	41
Figura 34: Transecto 6 Foto 4 y resultado del análisis CLUSTER	42
Figura 35: Transecto 6 Foto 5 y resultado del análisis CLUSTER	42
Figura 36: Transecto 7 Foto 1 y resultado del análisis CLUSTER	42
Figura 37: Transecto 7 Foto 2 y resultado del análisis CLUSTER	43
Figura 38: Transecto 7 Foto 3 y resultado del análisis CLUSTER	43
Figura 39: Transecto 7 Foto 4 y resultado del análisis CLUSTER	43
Figura 40: Desviación estándar del IAV de cada transecto	47
Figura 41: Desviaciones estándar de LAI para cada transecto	47
Figura 42: Desviaciones estándar para las mediciones de LAI por cada foto	50
Figura 43: Cuadro de dispersión de valores de LAI con relación al IAV en todos los transectos	51
Figura 44: Coeficientes de correlación entre LAI y IAV para cada transecto	53
Figura 45: Coeficiente de correlación general de los valores de LAI y IAV todos los transectos	54

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Mediciones originales de LAI y su promedio para cada transecto	61
Anexo 2: Valores medios de LAI y IAV para cada transecto.....	64
Anexo 3: Tabla estadística de IAV para todos los transectos (T).....	65
Anexo 4: Tabla estadística de LAI para todos los transectos (T)	66
Anexo 5: Ejemplo de medidas de LAI en bosques tropicales	67
Anexo 6: Foto mostrando la medición de LAI con el sensor óptico LiCOR-LAI200, en uno de los transectos dentro del área de estudio	68

RESUMEN

La superficie foliar vertical, involucra múltiples aspectos en los bosques y presenta dificultad en la estimación directa. Por lo tanto se probó un método indirecto para su determinación, mediante el análisis de fotografías de perfiles verticales de vegetación con el programa *IDRISI*, en la Reserva de la Biosfera San Francisco y se correlaciono con el índice de área foliar (LAI). La fórmula matemática resultante estableció una relación directa proporcional entre LAI y superficie foliar vertical, con un coeficiente de 0,72. Así se encontró que la superficie foliar vertical, al igual que el LAI, es proporcionalmente inversa a la altitud, y es una variable significativa para la evaluación de los bosques nublados.

ABSTRACT

The vertical area is frequently involved in many aspects of the forest. Due to the difficulty of a direct measurement, an indirect method was developed to calculate the vertical area inside San Francisco Biosphere Reserve. This method involved the correlation of the vertical area obtained from the analysis of vertical vegetation photographs by the software GIS-IDRISI with the leaf area index (LAI). It resulted in a direct proportional relation between the vertical area and the LAI with a coefficient of 0.72 and indicates that the vertical area like the LAI is inverse proportional to altitude. It is further a significant variable for the evaluation of cloud-forests.

Lara Jiménez Marco Tulio

Trabajo de graduación

Director: Dr. Chacón Gustavo

Cuenca 04/04/07

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA VERTICAL EN DEPENDENCIA DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR, EN UN BOSQUE DE CRESTA ANDINO EN LA RESERVA DE BIOSFERA SAN FRANCISCO

INTRODUCCIÓN

Hay un creciente reconocimiento del rol del Bosque Nublado Tropical, que en muchos aspectos, ha manifestado su influencia directa a los ecosistemas, especialmente aquellos que originan a las cuencas hídricas (Zadroga 1981; Hamilton y King 1983; Stadtmüller y Angelo 1990); De tal forma se ha determinado, que las diferenciaciones, de las características estructurales del bosque, son responsables por las diferentes propiedades en el balance hídrico, e intercambio de energía (Shuttleworth 1989; Anhuf et al 1999; Szarzynki 2000).

Al bosque nublado de los Andes Sudamericanos, se les ha dado este nombre por la frecuente ocurrencia de niebla y lluvia, la cual da características especiales a la vegetación. Por lo tanto, ha sido importante objeto de estudio de muchos científicos, por ser considerado como el ecosistema terrestre con la más alta biodiversidad sobre la tierra. Al respecto se ha establecido, que por su tamaño los Andes del nor-este, es la región más diversa en el neo-trópico (Henderson et al, 1991).

Los Andes tropicales deberían ser considerados como un súper *hot spot*, candidato para la conservación por su excepcional total de plantas endémicas, un total 20000 especies (Myers et al. 2000: 85). Pero son particularmente los bosques nublados en los neo-trópicos que han sido identificados como *hot spot* de biodiversidad (Barthlott et al, 1996), los que están entre los menos entendidos de los ecosistemas de bosque

húmedo tropical, en cuanto a su dinámica de agua y nutrientes concierne (Whitmore 1990).

El equilibrio del bosque depende de los procesos de intercambio energético, los cuales están en relación con las características de arquitectura vegetal (Jimenez 1997). Al respecto se ha establecido que el depósito de iones minerales es apreciable con relación al tipo de estructura del dosel (Juvik y Nullets1984), (Prentice et al. 1992), (Anhuf y Rollenbeck 2000).

La estructura del bosque ayuda a definir el espectro de microclimas dentro del dosel vegetal; microclimas creados por la diferenciación de la temperatura en los estratos, en los cuales, no solo las plantas viven por si mismas, si no que hospedan también a otros organismos, siendo ellos patógenos, insectos, vida silvestre, o humana (Welles, 1990). En el campo de la meteorología, Claussen (1994) ha hecho acoplamientos importantes entre vegetación y atmósfera, referente a la capacidad de la recolección de agua en los bosques tropicales dependiendo de la estructura foliar.

La influencia de la cobertura horizontal y vertical relacionada con la entrada de agua ha sido estudiada por (Breckle et al.1999), (Anderson et al.1969). También por Schemenauer y Cereceda en Chile (1987 y 1985), en Ecuador, y Perú, (1990).

Precisamente, el área vertical del dosel de bosque nublado, presenta características que funcionan como superficie para el intercambio energético, entre vegetación y ambiente abiótico, y está estrechamente relacionada por el número de procesos de las plantas para capturar agua de la niebla, las ramas y el follaje sirven como superficie de adhesión e impacto de las gotas de agua; Además la fricción y turbulencia causada por las características estructurales de la vegetación, contribuyen a la precipitación de las gotas. Así la determinación de estos parámetros vegetales como densidad, estructura, y área vertical de follaje; es una parte necesaria para el cálculo de la entrada de agua de niebla (Rollenbeck et al, 2005). Particularmente la intercepción de agua atmosférica por la cobertura vegetal... es un aporte sustancial, haciendo del bosque nublado de cresta importante ecológica e hidrológicamente (Juvic y Nullet 1984).

En Ecuador el bosque nublado se presenta en muchos ambientes, tanto en la costa, sierra y el área Amazónica, pero poco se sabe en cuanto a la arquitectura de la

vegetación y su ambiente físico, por eso el bosque nublado en los Andes Ecuatorianos, es un lugar ideal para investigar su singular estructura, que se presenta con especies altamente adaptadas y asociadas entre sí.

El objetivo general de este estudio es, investigar las relaciones del área lateral vegetal y su estimación por un método indirecto, y así deducir una fórmula general que permita determinar área lateral vegetal en cualquier tipo de bosque dependiendo de un *LAI*. Esta es una tarea que ha surgido gracias al estímulo científico del proyecto *PREDICT*, “*Precipitation Dynamics and Chemical Properties in Tropical mountain forests of Southern Ecuador*” que traducido: Propiedades químicas y dinámica de la precipitación en el bosque montano tropical del sureste del Ecuador, el cual es financiado por La Fundación Alemán para la Investigación *DFG*, “*Deutsche Forschungsgemeinschaft*”, que desde 1997 empezó un estudio comparativo a nivel edáfico, zoológico y meteorológico en la región montañosa sur, en un transecto de bosque de cresta en la Biosfera del ecosistema San Francisco. Así el *PREDICT* está en la determinación precisa, tanto del volumen y propiedades químicas, como de la distribución del agua atmosférica.

Así para tratar de alcanzar el objetivo general, se ha planteado el desarrollo de objetivos específicos los cuales son:

- 1) Determinar factores clave en las relaciones del área vertical del bosque por unidad de superficie, mediante la prueba del método de análisis fotográfico de área vertical. Aplicado a fórmulas matemáticas ya existentes
- 2) Mejorar el método para obtener IAV, como instrumento de monitoreo de bosques, Aplicando la fórmula matemática resultante del análisis fotográfico de área vertical.
- 3) Determinar las ventajas y desventajas del uso de este método indirecto en la evaluación ecológica.

Paralelo al primer objetivo es posible en ensayos posteriores, adecuar la fórmula matemática que permita calcular, la descarga de agua de niebla por metro cuadrado de área vertical vegetal. Similar al índice de área de malla en los colectores de niebla estándar (Schemenauer y Cereceda 1994).

En este campo son importantes los estudios hechos en Canadá por Schemenauer y Walmsley (1996) para conocer el depósito seco de minerales por unidad de área, sobre la superficie vertical de dosel opuesto al viento; mediante una modelización de la copa de los árboles la que resulta un tanto artificial. No se podría aplicar método semejante a un bosque nublado con las características tan heterogéneas. Así como se lo explica en el marco teórico.

Otros autores concluyen desde sus datos que las estimaciones para calcular superficie vegetal en el trópico son difíciles y su cálculo cae en asunciones matemáticas idealizadas (Homaier et al. 1996); Algunos de estos autores, utilizando *LAI* determinado mediante fotografías hemisféricas del dosel, tal es el caso de Oesker & Dalitz (2003) que en la reserva de biosfera San Francisco; así mapean áreas con diferentes valores los cuales son relacionados con el volumen de agua atmosférica colectado bajo el dosel vegetal.

Nuestro método requiere tener medidas indirectas y confiables de *LAI*, considerado como una de las vías más reales para estimar estructura del dosel, (en tres dimensiones) (Welles, 1990, 32), de cualquier parte del bosque; lo cual significa obtener aproximaciones de área vertical y área horizontal (Goel y Norman 1990); Por lo tanto según Rollenbeck y Lara (2003), estas lecturas pueden ser comparadas con otros parámetros de medición indirecta, como las fotografías de perfiles laterales de vegetación, obteniendo una relación directa entre ambos. Así obtener datos con el más alto porcentaje de precisión posible. Ya que estudiamos un sistema abierto en el cual fluctúa información de eventos dinámicos, cambiando en la escala de tiempo de minutos a años (Kessler y Bach 1999). Pero que su comprensión esta limitada por las especialidades. El incremento de información es lo que en general es efectivo para dar respuestas y críticas sobre la dinámica del ecosistema de bosque, y a que las estadísticas muestran que, aún perdemos bosque nublado andino, sin que hayamos estudiado su existencia. Como ecosistema perfectamente diseñado por la naturaleza, para mantener las condiciones de vida necesarias.

La magnitud de la alteración antropogénica y su crucial contribución a la diversidad biológica tropical, debería ser mejor entendida si nosotros estamos para documentar la variedad de relaciones entre, diversidad biológica y funcionalidad del ecosistema de bosque (Orians et al, 1996).

Un ejemplo claro de alteración en la red hidrológica debido a la pérdida de cobertura vegetal es la cuenca del río Paute, que desde hace algunos años lleva enfrentando problemas en el abastecimiento de energía hidroeléctrica debido al estiaje que cada año se agudiza, pero gracias a la dinámica de los bosques remanentes es lo que detiene la extrema inclinación a la erosión total de los suelos

Este estudio recomienda aplicar métodos de análisis a corto plazo, que son los métodos indirectos, que permitan identificar áreas importantes para mantener el equilibrio del ecosistema. Las cuales hay que proteger y someter a un intensivo estudio. Nuestro método, puede ser usados en los análisis ecológicos rápidos y las aplicaciones de tal información estarían al beneficio de un sin número de proyectos, ya que la estructura del bosque juega un papel clave en la comprensión de todo el ecosistema. Este es un argumento para la conexión de diferentes áreas de estudio como la climatología y la biología.

CAPÍTULO I

LA ARQUITECTURA VEGETAL

1.1 Importancia de la arquitectura vegetal

“La vegetación como parte central de cualquier estudio tiene que investigarse” (Ewel y Bigelow 1996).

La información estructural del dosel vegetal es importante para la descripción de: la evaluación mecánica de la intercepción de radiación (Ross 1981), para la intercepción de la precipitación atmosférica (Norman y Campbell, 1983), la productividad de material cosechable de un bosque o plantación (de Wit 1965), evapotranspiración y diferenciación de temperatura, en perfiles de la vegetación (McNaughton y Jarvis, 1983). Recientes desarrollos en matemáticas han traído descripciones detalladas de la arquitectura vegetal más cerca de la realidad (Goel et al. 1990), (Anhuf y Rollenbeck 2000). Frecuentemente las mediciones de la estructura del dosel incluyen principios de área foliar, densidad del follaje (área del follaje por unidad de volumen del dosel), y algunas mediciones de como los elementos están orientados tales como ángulo de distribución foliar, o ángulo de inclinación principal.

A continuación se presenta la teoría recopilada para aclarar y fortalecer principios e hipótesis de estudio.

1.2 Análisis de la estructura del dosel vegetal

Esta aparente simple definición debería ser formulada en términos de preguntas, como: ¿Qué son los elementos del follaje, tales como hojas, ramas o frutos? ¿Dónde están localizados? ¿Cómo están orientados?, ¿Cuáles son sus tamaños?, la noción de organización también se debe tomar en cuenta para la respuesta, ejemplificado en la forma de mosaicos horizontales de los bosques para evitar sobre posición (Welles,

1990,31). La estructura es también dinámica cambiando en la escala de tiempo de minutos a años. (Kessler y Bach 1999). Las hojas eliotrópicas siguen la posición del sol durante el día, otras especies dejan caer sus hojas en respuesta de estrés hídrico, de luz, o cambio de estación (Kuppers 2004, información personal).

La medición y descripción de la estructura vegetal es formidable y a su vez imposible en términos de precisión, las descripciones prácticas en el presente usan herramientas estadísticas o deducciones matemáticas complejas en una sola vía, utilizando matemática deductiva basada en probabilística para evitar el trabajo directo de medir planta por planta (Welles, 1990,31). Así la teoría empírica empieza con la pregunta de posición del follaje siendo siempre respondida con una deducción de aleatoriedad, mientras que unas hojas de pasto podrían parecer poco aleatorias, otras copas de plantas o árboles en un bosque son claramente no aleatorias (Norman y Welles 1983).

Otras aproximaciones involucran el uso de un coeficiente empírico para contar el efecto de agrupamiento (Nilson 1971), y el uso de teorías no aleatorias (Norman y Jarvis, 1975; Oker-Blom y Kellmaki, 1983). La cantidad de follaje es siempre normalizada por grupo de área, o volumen de dosel.

Con el incremento de altitud en montañas tropicales, ocurren cambios en la estructura y fisiognomía del bosque, los principales cambios son un decrecimiento de la altura de las plantas y tamaño de las hojas, y de estas últimas a hacerse gruesas y duras es decir cero mórficas (Bruijnzeel y Proctor 1997). La caracterización de un bosque incluye elementos como altura de la vegetación, tamaño y arquitectura de la copa, biomasa, propiedades físicas de los elementos arbóreos como son hojas y frutos, incluyendo las epifitas musgos, líquenes y lianas, estas características presentan situaciones únicas para cada tipo de bosque las cuales son difíciles de simular.

Los factores más significativos para caracterizar un bosque son: extensión vertical y extensión horizontal de la superficie vegetal. (Welles y Norman, 1991)

1.2.1 Métodos para caracterizar la estructura del dosel

En general se pueden diferenciar dos tipos de grupos de metodologías según el enfoque, métodos con enfoque florístico y métodos con enfoque fisonómico (Beard 1973). Los primeros utilizan especies de plantas y composición por especies para describir vegetación o unidades de vegetación. Requieren de mediciones directas. Muchos de estos sistemas de clasificación han sido desarrollados para zonas templadas (Cajander 1909, Du Rietz 1930, Braun y Blanquet 1964), y estos están bien establecidos en Europa ya que se adaptan a las características de los bosques templados o estacionales; en donde existe poca diversidad, con árboles de tamaño constante, y por tanto los métodos deductivos se acoplan fácilmente.

Entonces para determinar el dosel vegetal, tal como la copa de los árboles se emplean mediciones directas o por el uso de modelos geométricos, tal como Charles-Edwards y Thornley (1973). Además otro ejemplo está la estimación de entrada hídrica desde la niebla en bosques de montaña en Canadá que fue aplicada por Schemenauer y Walmsley (1996), en este artículo se describe como los árboles se asumen cónicos con un ángulo cónico (θ) y una altura (h) el diámetro de la base es $b = 2h \tan(\theta/2)$, la sección transversal de cada copa arbórea es $\pi(b/2)^2$, considerando el área ocupada por cada copa arbórea incluyendo espacio entre árboles, que fue determinada por ser $T_H = b^2$, el choque de las gotas ocurre en la copa cónica del árbol, donde luego el volumen por unidad de área sobre la superficie vertical es C_{dv} .

$$C_{dv} = 3,6 w v \cos(\beta) \quad (1)$$

Donde:

w = contenido de agua líquida [g m^{-3}]

v = velocidad del viento [m s^{-1}]

β = inclinación del viento con respecto a la horizontal.

Los resultados en dicho estudio mostraron diferencias apreciables de volumen colectado, siendo de un 24 % menor a los obtenidos por colectores dispuestos bajo el dosel. Pero a diferencia de los bosques tropicales en los cuales existe una alta diversidad de plantas especialmente las criptógamas, estos métodos se vuelven los menos prácticos (Lara y Rollembeck, 2004), poniendo el ejemplo de Vareschi (1980) quien determina que alrededor de 80 especies diferentes de helechos viven en Europa

central mientras que Venezuela sola posee más de 1000, además se cuenta las observaciones de muchos botánicos de bosques ecuatorianos que la mayoría de estos helechos son de vida epífita. A la final la descripción directa del bosque tropical de montaña es complicada y toma mucho tiempo especialmente si se lo hace mediante un enfoque florístico. La mayoría de autores se limitan a grupos de especies representativas como es el caso de Kessler y Bach (1990) que describen bosques montanos en Bolivia. Ellos restringen su investigación particularmente a taxas que consideraban más importantes y significativas como Carecaceae, Bromeliaceae, Melastomataceae, Araceae, Acantaceae, y helechos. Estos debían tener un diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor a 5 cm. Por lo tanto plantas basculares epifitas, musgos y líquenes no eran tomados en cuenta. También Madsen y Ollgarrd (1994) llevan un estudio en el suroeste del Ecuador en el cual toman plantas mayores a 5 cm de diámetro y no incluyen epifitas basculares ni tampoco líquenes ni musgos.

Aun así todos los autores quienes comparan clasificación fisiognómicas con florísticas (Webb et al. 1970, Werger y Spragners 1982, Lux et al. 1994, Le Brocque y Buckney 1997) concluyen que sus datos dejan resultados comparables pero son más fáciles de realizar.

La investigación de la estructura vegetal puede documentar diferencias entre unidades de vegetación que podrían no ser descubiertas por métodos florísticos. Esto es claramente evidenciado por Gentry (1988) “bosques equivalentes en los tres continentes tales como Sur América, Sur Asia y África son similares en cuanto a riqueza de plantas con pocas excepciones notables, pero son marcadamente diferentes en estructura de bosque”. Daughtry y Holinger (1984) examinan la tarea y costo de las mediciones directas de la estructura arbórea, determinando que son casi imposibles para extensas áreas.

Paulsch (2000) al hacer una mención de métodos florísticos en su estudio de cobertura vegetal en la reserva de biosfera San Francisco, concluye que el estudio conlleva un gran esfuerzo; al igual que dice Welles (1990,31) en su artículo, Métodos indirectos para estimar estructura de la copa, que “los estudios directos de la estructura vegetal son tediosos, requieren de una intensa labor en áreas pequeñas y casi imposibles de hacerlo en áreas grandes e irregulares”.

Los métodos fisonómicos utilizan las estimaciones fisonómicas, arquitectura de plantas, forma de vida, y composición para describir y clasificar unidades fisonómicas. No precisan de medición directa. Varias de las técnicas que estiman parámetros de estructura vegetal, utilizan fracciones de espacio abierto. Y se define como la fracción de visión en algunas direcciones por debajo de un dosel que no es bloqueado por el follaje (Welles 1990, 33). El área fraccionada del sol salpicado es equivalente a la fracción de espacio en la dirección del sol.

Es así que los métodos indirectos se han desarrollado especialmente en la última década con la aparición de dispositivos ópticos y técnicas que vinculan matemática deductiva. Estos métodos se basan en el principio de que la estructura vegetal se puede derivar de la distribución de la luz debajo del dosel. Algunos de los métodos hasta al momento probados han resultado eficientes e incluyen: Reflectancia superficial (derivados de datos satelitales), transmisividad (perfiles de luz) y análisis de fracción de espacio abierto mediante fotografía hemisférica del cielo.

1.3 Caracterización estructural mediante LAI

LAI es tal vez el mayor parámetro usado para medir estructura siendo definido como el índice total de área por área del suelo (Welles, 1990, 32). Según su artículo, uno podría similarmente definir, índice de área de rama o de tronco. Nótese que LAI es independiente de la orientación de las hojas, en algunos doseles un LAI basado en el área total no puede ser tan útil como algunas mediciones del follaje en cada copa individual, tal como densidad de hojas (volumen de dosel por área foliar total).

El índice de área foliar ha sido usado como uno de los índices de estructura de la copa vegetal y que también tienen su grado de dificultad al hacerlo directamente. No obstante es considerado como una de las vías más reales para estimar estructura del dosel, ya que la refracción de luz que llega hasta el suelo está directamente relacionada con la densidad (tres dimensiones), y la frecuencia de espacios abiertos en la vegetación del bosque, que permite el paso de luz. El LAI se usa para relaciones con aspectos descriptivos, ecológicos o geográficos, (Prentice et al. 1992; Roberts et al. 1996; Honzák et al. 1996; Asner et al. 1996). Los avances tecnológicos incluyen dispositivos ópticos avanzados y un poco complicados pero los principios básicos son los mismos. Las experiencias obtenidas por investigadores del índice de

área foliar aportan una mejor resolución y los errores generales obtenidos son menores al 15 % (Wilson y Reeve 1957; Perry et al. 1988). Según comparaciones con medidas directas en plantaciones de alfalfa y maíz.

1.3.1 Medición de LAI por sensores de Transmisividad

Una de las consecuencias de la orientación de las hojas es cambiar la naturaleza de la radiación en la dirección que penetra. Así la orientación del follaje está siempre implicada con un coeficiente de extinción direccionalmente dependiente (Rosas 1981) o distribución de la orientación del follaje (De Wit 1965).

La radiatividad transferida y la estructura del dosel son estrechamente complementarias, la una puede ser utilizada para predecir la otra. Así, mediciones relativamente simples de radiación, pueden ser utilizadas para estimar cantidades de estructura si un modelo esta para predecir la influencia del dosel sobre la radiación, típicamente un modelo usará la información de la estructura del bosque como una entrada juntamente con propiedades irrelevantes del espectro y limita condiciones de radiación incidente, y predice algún componente del ambiente radiativo en algún lugar dentro o fuera del dosel. Detecciones indirectas de la radiatividad del dosel implican predecir una cantidad de radiación medida. Luego invirtiendo el modelo para determinar la probable estructura del dosel que causo los resultados medidos.

1.3.2 Análisis de fracción de espacio abierto mediante sensores ópticos

Una imagen de un dosel vegetal hecha con un lente esférico provee información detallada sobre la estructura de la vegetación (Anderson 1971, 1982; Bonhomme & Chartier 1972; Baldochi et al. 1985; Numann et al. 1989; Oesker 2002). Las imágenes pueden ser vistas hacia arriba a través del dosel o sobre el dosel vistas hacia abajo. En este caso se trabaja posteriormente con espectros cercanos al infrarrojo donde el follaje es más brillante que el suelo típico. Las fracciones de espacios abiertos pueden ser calculadas desde una imagen tal que por determinación de la parte del fondo expuesta (cielo o suelo) dentro de bandas o círculos sobre el centro de la fotografía; el radio de un círculo es proporcional al ángulo del cenit. Este análisis puede ser automatizado si existe suficiente de contraste entre los elementos

del follaje y el fondo, y suficiente de resolución así que los elementos del follaje permanezcan distinguibles. Imágenes tipo ojo de pescado son mejores bajo condiciones de cielo nublado, desde que el rango de brillo por del follaje es minimizado; de otro modo, una hoja brillada por el sol podría ser identificada como cielo. Como podría suceder de igual forma en las fotografías de los perfiles verticales de este estudio. De este modo surge la idea de usar fotografía en la deducción del índice de área vertical (Lara y Rollenbeck, 2000).

1.3.2.1 Línea de sensores quantum.

Son dispositivos ópticos sensibles a la radiación fotosintética mente activa y su siglas en ingles son (PAR). Norman (1988) ha propuesto una técnica para estimar LAI desde un censor quantum basado en mediciones de resultados modelo. De acuerdo con el.

$$LAI = \frac{(fb(1 - \cos \theta) - 1) \ln(E_i / E_a)}{0,72 - 0,337 fb} \quad (2)$$

Donde:

E_a = PAR incidente sobre el horizonte por encima del dosel con el sensor descubierto

E_{da} = PAR incidente sobre el horizonte por encima del dosel con el sensor cubierto

E_i = PAR incidente detrás del dosel.

θ = ángulo del cenit solar.

Fb = fracción del rayo de luz dado por:

$$Fb = \frac{(E_a - E_{da})}{E_a} \quad (3)$$

La radiación esférica del follaje es popular porque la fracción del área proyectada en cualquier dirección es siempre igual a 0,5, simplificando el coeficiente de extinción.

Pierce & Running (1988) usan una estimación de LAI mediante sensores en línea en varios bosques de coníferas bajo el cielo nublado. Ellos calculan una transmisión principal para (PAR) basados en lecturas de referencia (E_a) hechos en claros y

mediante 1600 mediciones del dosel (E_i) realizado a lo largo de 360 m de transecto, asumen un coeficiente de extinción de 0,52 basándose en las mediciones de Jarvis & Leverenz (1983) utilizando la siguiente fórmula para calcular LAI:

$$\text{LAI} = -0,52 \ln (E_a/E_i) \quad (4)$$

El mismo método de sensores quantum en línea es utilizado por Anhuf y Rollenbeck (2000) en la caracterización del bosque Zurumoni en Venezuela, el estudio se basa en la ley de Beer Lambert la cual dice que existe una relación exponencial entre el decrecimiento de la fuerza de la luz y el incremento del área foliar.

$$\frac{I_z}{I_0} = e^{-kL_z} \quad (5)$$

Donde:

L_z = LAI a un nivel z

I_z = radiación en el nivel z

I_0 = radiación atmosférica en cielo abierto.

k = coeficiente de extinción

Así hacen mediciones de la radiación de luz fotosintéticamente activa (PAR) de perfiles de vegetación cada 20 m a lo largo de seis transectos dentro del bosque los mismos que están separados a 10 m uno del otro y las mediciones de los perfiles van desde el suelo hasta el cielo abierto. Mediante una calibración del (PAR) en cada perfil al momento de la lectura con el (PAR) a cielo abierto de una estación de referencia para evitar los incrementos de luz solar durante la medición, además para evitar la influencia de la dirección de la distribución de las hojas, ellos establecen un coeficiente de extinción K , partiendo de la medición manual de la distribución vertical del área en 27 perfiles de vegetación contando número y área de hojas obteniendo así un LAI de 3,7 de allí invirtiendo la ecuación de Lambert obtienen K .

$$k = -\ln (I_{\text{ges}})/\text{LAI} \quad \text{LAI} = 3,70 \quad (6)$$

Sin duda un método muy efectivo ya que el coeficiente de extinción estaría de acorde a las características propias del bosque en cuestión, así se podría aplicar un coeficiente de extinción más cercano a un valor real.

1.3.2.2 Demon

Este es un instrumento para medir transmisión directa de emisiones de el sol, descrito por primera vez en Lang et al. (1985). Y ha sido desde entonces nombrado DEMON. El instrumento Demon mide emisión directa de radiación del sol a través de un ángulo estrecho (0,32 como en el prototipo) para eliminar radiación difusa de un 98% del hemisferio más alto. Filtros son utilizados para limitar el espectro de luz recibida a emisiones de banda cercanas a 430 nm, minimizando así efecto de dispersión por el follaje. En uso, el sensor es movido por debajo del dosel atreves de un transecto, mientras esta apuntando hacia el sol. En cada dosel alto, tal como un bosque, un operador trae el sensor mientras camina por el transecto, manteniendo apuntado al sol utilizando el dispositivo adjunto. Usado en doseles bajos, el sensor tendrá que ser montado sobre un sistema de travesía.

La colección de datos consiste de 1000 o mas lecturas de luz hechas durante un periodo de 30 segundos cuando el sensor se mueve a lo largo del transecto. La fracción de espacio abierto es compuesta en el registrador del sensor por una larga entrada de promedios de transmitancia de subgrupos de datos. Esos son, los 1000 puntos de datos que son tomados en grupos de N puntos, donde N es suficientemente grande así que la distancia recorrida por el sensor colectando N datos es al menos 10 veces las características del tamaño del follaje. El periodo de transmitancia para el subgrupo es computado usando una referencia de lecturas previas de emisión de radiaciones interrumpidas. Este procedimiento acomoda espacios abiertos naturales en el dosel (Lang & Yueqin 1986). La frecuencia de espacios es también calculada como un simple promedio lineal de transmitancia.

La fracción de espacios abiertos es una función de ángulos y es determinada por repeticiones de mediciones a en varios tiempos (ángulos solares) sobre el curso de un día y medio. Mientras el registrador de datos puede mantener un largo numero de lecturas procesadas por un número de sitios diferentes, los cálculos para el LAI final

son desarrollados externamente en una computadora. Con un software especial que puede ser adquirido en el mercado por USD 390.

1.3.2.3 Crownmeter

Van de Roest y Kopinga (1989) describen un dispositivo conocido como el Crownmeter diseñado para proveer una rápida indicación del vigor de los árboles urbanos. El indicador relativo es la transmitancia principal del dosel, medida con una estrecha vista hacia arriba (1,5 grados), el sensor muestrea por encima de los 10 Hz mientras que el usuario camina a través de un transecto por debajo y cerca a los troncos de los árboles. Lecturas a cielo abierto son tomadas antes y después de la travesía, y mediciones cerca de la periferia de los árboles no son incluidas en las principales. Los autores estiman que el rango útil de el indicador de transmitancia es de un alto porcentaje de 28 %, representando un dosel esparcido, a un bajo cerca al 0 %, representando una grueso y vigoroso dosel. Ningún intento es hecho para invertir las lecturas y obtener una densidad de follaje o LAI, sin embargo la posibilidad es mencionada. Tal procedimiento podría comúnmente requerir conteos de la luz esparcida por el follaje en la parte visible del espectro, desde que el sensor es sensible sobre esta región entera. También, conocimiento del largo del camino de la vista del sensor a través del dosel y mediciones de mas de un ángulo pueden ser necesarias, como estas características existe un prototipo que no ha sido comercializado aún.

1.3.2.4 Li-Cor-LAI 2000

El LAI 2000 analizador de dosel usa un sensor óptico tipo esférico (ojo de pescado) y mide radiación difusa simultáneamente en cinco bandas de ángulos distintas sobre el punto del cenit.

En este estudio se utilizo un LI-COR LAI-2000, el cual consiste en un sensor óptico y una caja de control fácilmente llevada por el operador, los instrumentos del sensor incorporan un ojo de pescado óptico para proyectar una imagen hemisférica dentro de cinco detectores de silicón dispuestos en anillos concéntricos. La caja de control graba los datos del sensor y desarrolla las calculaciones necesarias para determinar LAI.

También el sensor LAI-2000 cuenta con un filtro óptico que restringe la sensibilidad a las radiaciones menores a 490 nm, en orden de minimizar la contribución de radiación que ha sido esparcido por la vegetación.

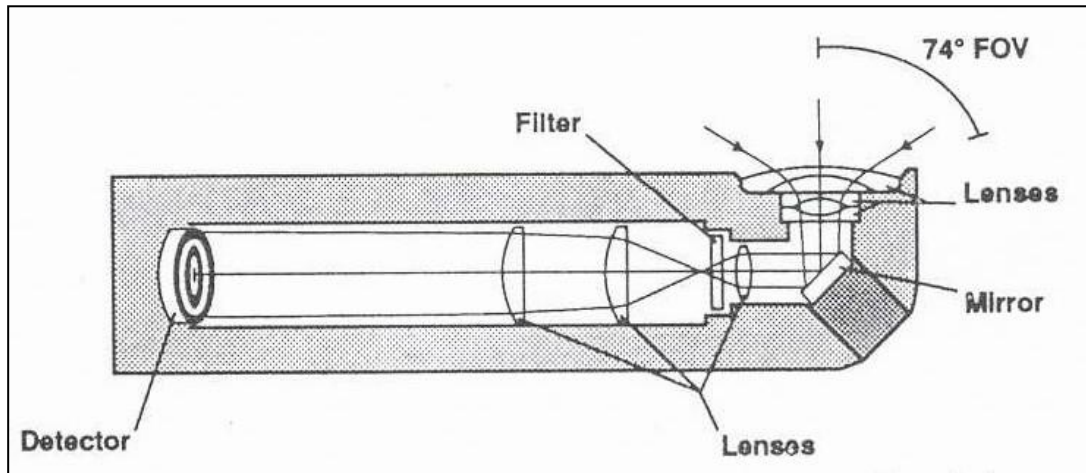


Figura 1: Detalle del sensor óptico LI COR LAI-2000 (Welles y Norman 1991)

Como un rayo de radiación pase a través de alguna distancia de la copa vegetal, hay una posibilidad certera que este será interceptado por el follaje. La probabilidad de intercepción es proporcional al ancho de recorrido, a la densidad del follaje y también es relacionada con la orientación del follaje. Si los elementos normales del dosel se encuentran perpendiculares a la dirección del rayo, las oportunidades de intercepción son calculadas mediante la formula (6) y realizadas dentro de la caja de control del LAI-2000

En la práctica, fracciones de espacios abiertos en cinco ángulos desde el cenit pueden ser medidas al hacer, mediciones de referencia sobre el dosel con el sensor apuntado hacia el cielo abierto, y una o más mediciones por debajo del dosel con el sensor apuntando hacia el cielo (ver anexo 6). Las mediciones siguientes son divididas por las mediciones de referencia en cielo abierto para obtener una estimación de la fracción del espacio abierto en los cinco ángulos. Múltiples mediciones por debajo del dosel son combinadas haciendo un promedio de logaritmos de la fracción del espacio abierto calculado, como es recomendado por Lang y Xiang (1987). Para ellos LAI no es una proporción lineal a la fracción de espacio abierto del dosel, si no que es linealmente proporcional al logaritmo de la fracción de espacio abierto del dosel. Esto significa que si múltiples determinaciones de fracción de espacio abierto son hechas para obtener una muestra espacial, estas deberían ser combinadas por un

promedio de logaritmos de fracciones de espacios abiertos, mas que el simple promedio de fracciones de espacio abierto. Esto es en hecho como el LAI 200 promedia múltiples medidas tomadas por debajo del dosel.

En la teoría se supone que si un rayo de luz pasa a través de cierta distancia de dosel vegetal, hay una cierta oportunidad de que este será interceptado por el follaje. La probabilidad de intercepción es proporcional al largo de la trayectoria, a la densidad del follaje, y está también relacionado a la orientación del follaje: Si el los elementos normales del follaje están expuestos en la dirección del rayo, las oportunidades de intercepción son mayores que si están perpendiculares a dicha dirección. Si los elementos foliares están aleatoria mente dispuestos a través de la región por la cual el rayo pasa y comparado a la dimensión superpuesta del dosel, entonces un rayo desde una dirección descrita por el ángulo cenit (θ) y ángulo acimutal (θ), tiene una probabilidad de no intercepción T determinadas como las fracciones de espacio abierto en las cinco direcciones desde el cenit, las cuales son convertidas a LAI y ángulo foliar principal en al caja de control, usando un método similar al de Lang (1987). La formula resuelta en la caja de control es la siguiente

$$\mu \text{ ó LAI} = \sum \frac{5 - \ln(T_i)}{S_i \theta} \cdot W_i \quad (7)$$

Donde:

T_i = las cinco mediciones bajo el dosel dividías para las mediciones sobre el dosel.

W_i = los valores de $\text{Sen}\theta \, d\theta$, los cuales son 0,034, 0,104, 1,160, 0,218, y 0,484 para los cinco ángulos de vista del censor de LAI-2000.

S_i = valores, normalmente $1/\text{Cos}\theta$ ó 1,008, 1,087, 1,662. y 2,670, los cuales son almacenados en la caja de control y son accesibles para el usuario.

Si el usuario edita estos a la reflexión del largo del trayecto actual visto por el sensor a través del dosel, entonces la densidad del follaje será calculado más que LAI.

Existe un k ó coeficiente de extinción basado en la relación de fracción de espacio abierto y ángulo observado por Miller (1967), y es equivalente al numero promedio de contactos por unidad de distancia de viaje que una sonda podría hacerse paso a través del dosel en el ángulo cenit (θ).

El sensor óptico puede restringir el campo de vista acimutal desde una visión total de 360 grados a 270, 180 y 90 grados respectivamente. Esto puede ser necesario en los transectos pequeños, doseles muy agrupados, o cuando el sol está brillando.

Lo mejor es cuando el sol está oscurecido por nubes para utilizar el LAI 200, debido a que las mediciones por debajo de la copa decrecerán por el esparcimiento de la luz en el follaje. También, desde que las mediciones están basadas en la diferencia de radiación difusa sobre y por debajo de un dosel, la luz directa del sol en cualquiera de los cinco anillos causará que la relativa diferencia se pierda; así, el sensor siempre deberá ser cubierto de la luz directa del sol cuando está en uso.

Para evitar que exista una diferencia de tiempo, al hacer las mediciones sobre y debajo del dosel, se dispone de dos sensores conectados a una misma caja de control, o también pueden usarse dos cajas de control por separado con su respectivo sensor, mientras que la una está fija y haciendo mediciones secuenciales en un punto fuera por encima del dosel la otra está móvil tomando mediciones puntuales, luego los dos grupos de datos pueden fusionarse para interpretar las calculaciones mediante la conexión de las dos cajas de control, o también puede utilizarse una computadora con un software que viene provisto con el instrumento.

1.3.3 Ventajas y desventajas de los métodos ópticos

Ahora consideremos algunas ventajas y desventajas según las experiencias obtenidas por otros científicos al utilizar estos instrumentos de medición indirecta para determinar estructura vegetal. El Crownmeter, el Demon y el LAI-200 referenciado por Ceptometer implican un modo de reflexión tipo hoja de sol, pero se nota que también se pueden utilizar como sensores en línea quantum. La técnica de los sensores quantum en línea será referida como P y R (Pierce y Running 1988), NORM (Norman 1988) y WALK (Walker et al. 1988). Nótese que las técnicas de P y R y NORM no involucran análisis de fracciones de espacio abierto, y son limitadas a doseles continuos con un conocido o deducido coeficiente de extinción.

NORM puede ser usado con cualquier fracción de brillo del sol, (f_b) desde cielo abierto o parcialmente cubierto.

Todas las técnicas requieren de mediciones de referencia. El DEMON requiere de una vista del sol abierta, así estas lecturas pueden ser por debajo del dosel en cualquier espacio abierto. Las lecturas de referencia sugeridas por P y R, NORM y WALK deberían ser sobre la copa.

CAPÍTULO II

REFLECTANCIA SUPERFICIAL Y SONDEO REMOTO

Sondeo remoto es el proceso de obtener información de un objeto o de una característica desde la distancia. Imágenes satelitales son a menudo utilizadas para sondeos remotos de la superficie de la tierra. Imágenes fotográficas digitales pueden ser usadas para resolver una variedad de problemas relacionados con una serie de disciplinas. Los Software tales como *IDRISI32*, *ESRI*, *Erdas*, *ErMapper*, *GRASS* son una herramienta que ayudan a manipular imágenes para mejores análisis.

2.1 Funcionalidades del software IDRISI 32

IDRISI es un programa SIG a base de píxeles (Raster-GIS). Consiste de varios módulos, para diferentes tareas. Lo que se usa es el (*user-interface*). También se puede utilizar cada modulo independiente.

Los análisis incluyen tareas como reclasificación controlada y no controlado según método (*Cluster*). Además estadística descriptiva.

Para la clasificación de imágenes el IDRISI emplea técnicas de separación ó (*clusters techniques*) para encontrar características de reflexión de patrones que luego son interpretadas por el analista el cual diferencia estos colores y asigna las patrones a objetos definidos o por definirse.

2.1.1 Funciones básicas

Opciones de importación/exportación o intercambio de archivos: encontramos muchas posibilidades para usar datos en formatos distintos al de IDRISI, ya sea en formatos de intercambio como el ASCII, o los formatos habituales de tratamiento de imagen como *.bmp ó *.jpg. También hay formatos de otras casas de software SIG como ya antes se ha mencionado. También podemos adaptar los archivos de versiones anteriores como el 2,0 que funcionaba con una estructura de información

de 16 *bits* a la nueva estructura de 32 *bits* ya empleada desde la versión IDRISI32 y también ahora con el IDRISI Kilimanjaro.

2.1.2 Métodos de clasificación

Como su nombre indica contiene los distintos métodos de clasificación supervisada o no supervisada, ya sea fuerte o débil, de las diferentes formas espectrales y sus rangos de acción detectadas en las imágenes que a la postre van a generar cada uno de los temas o categorías en los que vamos a clasificar nuestra información.

Para los análisis de fotografías laterales se utiliza la clasificación no supervisada. La clasificación no supervisada consiste en la clasificación de la imagen por métodos estadísticos, en los que se agrupan en conglomerados las distintas coberturas de la imagen. El módulo que activa la clasificación no supervisada en IDRISI es el módulo “CLUSTER”. El módulo *cluster* únicamente actúa sobre imágenes compuestas, previamente tratadas con “COMPOSIT”, recomendándose un tratamiento previo de la imagen con una saturación lineal del histograma, obteniéndose resultados ideales con una saturación entre el 1 y el 2,5 %: En el caso de la figura 5, perteneciente a una fotografía lateral de nuestro bosque, la cual se clasificó con cuatro bandas o *cluster*, cada banda representa colores aislados para las siluetas.

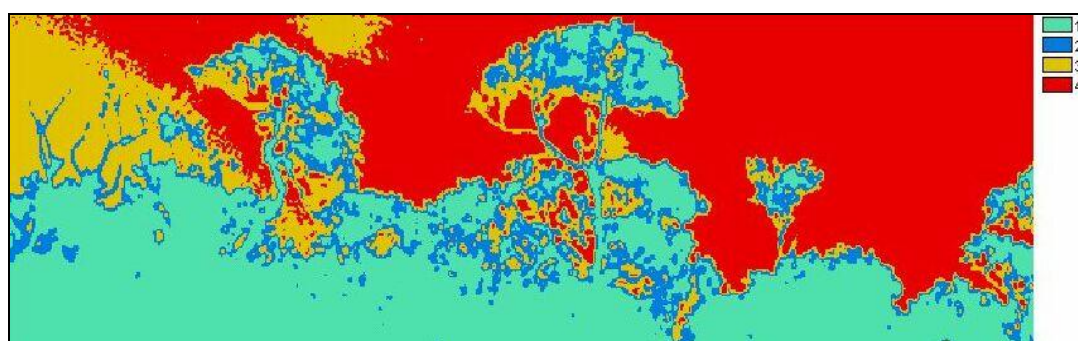


Figura 2: Ejemplo de fotografía digital analizada por IDRISI en cuatro cluster

Después del análisis se pueden hacer las siguientes preguntas: ¿Cuál de las 4 bandas diferencia mejor la vegetación? ¿Cuál de las 4 bandas crea más confusión a la hora de distinguir cubiertas?

En nuestro caso se obtienen que: La vegetación está representada por las bandas verde, azul; mientras que la banda de rojo representa el cielo abierto, el color amarillo es la banda que crea confusión. Con uno de los módulos estadísticos

(*HISTO* = histograma) que cuenta el programa, se puede calcular el porcentaje de cada color y así determinar el área de cada porción de imagen

El desarrollo de las fórmulas en las cuales el estudio se enfoca a aportar, como es el caso de la determinación de la entrada de agua atmosférica y el depósito de minerales por área de vegetación corresponden a la formula (1) aplicada por Schemenauer y Walmsley (1996). Está formula a ensayar es:

$$V_a = LWC \cdot V_v \cdot IAV$$

Donde: (V_a) volumen de agua atmosférica colectado por al vegetación

(LWC) contenido líquido de agua en la atmósfera medido en g/m^3 .

(V_v) velocidad del viento medido en m/s.

(IAV) índice de área vegetal en un metro cuadrado.

Las unidades de los resultados estarán expresadas en $g/s \cdot m^2$, que por simple deducción por la densidad del agua obtendríamos $ml/s \cdot m^2$

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En este capítulo se desarrollaran todos los métodos usados en la elaboración del estudio. Se emplean figuras y cuadros con el fin de facilitar la comprensión de la teoría. La primera parte hace una introducción del área de estudio hasta los detalles ecológicos del medio. Luego está el desarrollo del a parte teórica de campo y de laboratorio. Destacando que el laboratorio se refiere a la parte de trabajo con la computadora en el proceso de análisis de los datos.

3.1 Área de Investigación

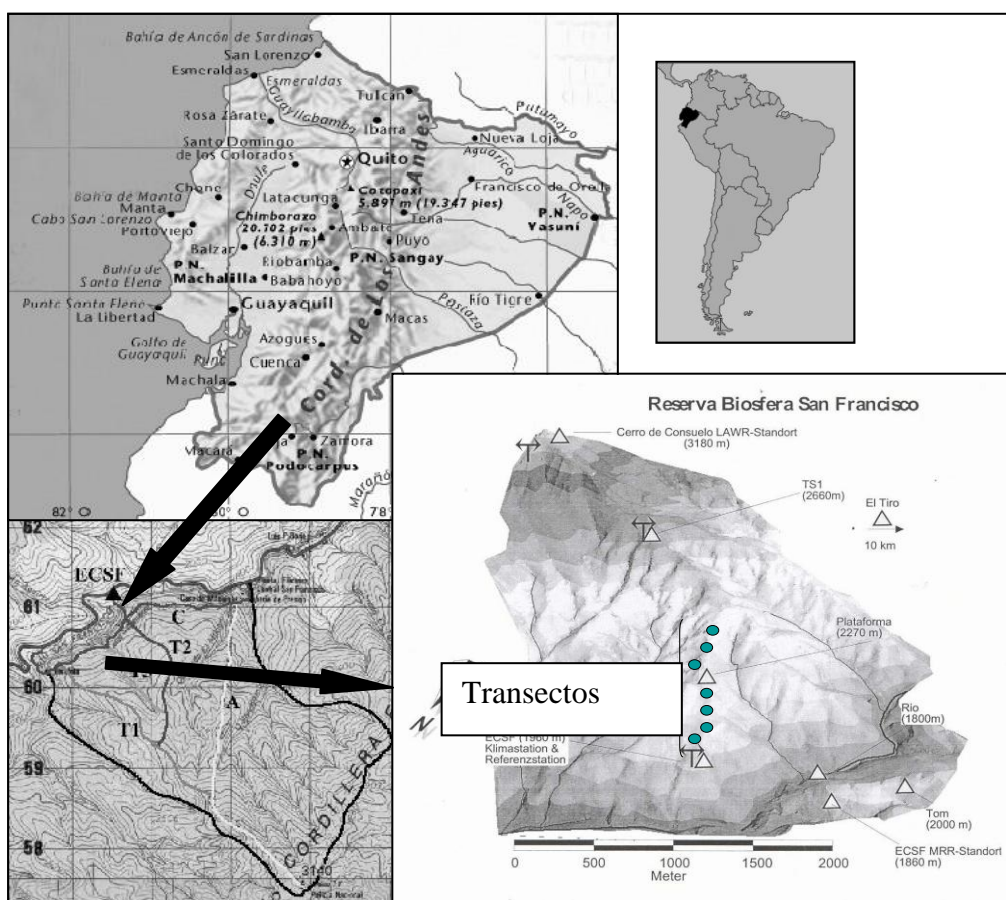


Figura 3: Área de investigación (Mapa modificado tomado de Rollenbeck, archivos DFG, <http://www.luventicus.org/articulos/03JyE003/ecuador.html> y http://go.hrw.com/atlas/span_hm/ecuador.htm)

El Ecuador está situado al nor-este del continente Sudamericano, Al país de lo puede dividir en tres regiones principales. La Costa, que se extiende a lo ancho desde los bordes del océano pacífico hasta las faldas de la cadena montañosa de los andes

La Sierra, es la franja de montañas situada en la parte central y esta se divide en tres frentes, el frente este, el frente central y el frente oeste.

El área de estudio se encuentra dentro de la Reserva de la Biosfera San Francisco, la cual está en la parte mas baja de la cordillera Sur de los Andes a $4^{\circ} 00'$ y $79^{\circ} 05'$. Posee un área total de 100 ha de bosque en diferentes grados de sucesión, junto al límite norte del Parque Nacional Podocarpus, también incluye un sistema de siete senderos o transectos (T) los cuales en total suman alrededor de 11 Km. de recorrido. Uno de los principales senderos es el transecto dos (T2), y es un sendero abierto con cierto grado de disturbio, debido a que es utilizado periódicamente por los investigadores. El T2 va desde la parte mas baja a orillas del río San Francisco a 1850 m s.n.m, hasta la cumbre del cerro del Carmen a 3100 m s.n.m.

Relieve: La zona comprende montañas y quebradas en una gradiente altitudinal desde 1800 m s.n.m hasta 3200 m s.n.m, con una inclinación de 40 a 80 %, hacia el Este a bajas alturas. La Estación Científica San Francisco esta a 30 Km. por la vía Loja - Zamora. Esta es una carretera de 2do orden accesible gran parte del año, excepto en temporada de fuertes lluvias, debido a los derrumbes ocasionales. (Paulch 2001; Archivos DFG; Lara 2004, observaciones personales)

Clima: Esta región se caracteriza por su clima el cual según la Clasificación de Koeppen (1985) es MESOTERMICO HUMEDO. Este clima es propio de la región interandina, la variabilidad de los elementos son: Temperatura anual fluctuando entre los 12 y 18 grados centígrados. Humedad relativa entre el 70 y 95 %. Los totales anuales de lluvia superan los 2000 mm. En inviernos fuertes ocasionalmente llegan hasta los 4000 mm. (Ruetger 2002, mediciones personales). La lluvia se hace presente durante todo el año, con inviernos lluviosos que van desde marzo a agosto y veranos menos lluviosos especialmente entre octubre y febrero; el paisaje tiene un aspecto boscoso y cubierto de un verdor permanente. La nubosidad fluctúa entre los 5/8 y 6/8 de cielo cubierto. Las máximas de temperatura llegan a 30° C. Las mínimas absolutas están entre los $0,2^{\circ}$ C (Blandín 1989).

Vegetación: El sector sur de la cordillera oriental, pertenece al tipo de Bosque de Neblina Montano, que típicamente se distribuye desde 1500 m hasta 2900 m s.n.m. de altitud. Este es un bosque cuyos árboles están cargados de abundantes epifitas y cuya altura del dosel está entre los 15 y 25 m. En esta franja altitudinal las epifitas, especialmente orquídeas, helechos y bromelias, son numerosas en especies e individuos. Registrándose probablemente su más alta diversidad. Los bambúes alcanzan, por ejemplo, su máxima diversidad en esta zona, donde se encuentran 45 de las 54 especies descritas para el Ecuador (Clark 1997). Algunas localidades, sin embargo, pueden encontrarse fuera de este rango altitudinal y probablemente corresponde a una mezcla de elementos que resulta en un tipo específico de bosque nublado.

En Acosta Solís (1968), se reconoce el bosque nublado en las dos estribaciones de la cordillera desde los 800 hasta los 1800 m ó 2600 m s.n.m, mientras que Harling (1979) da un rango entre 2500 hasta 3400 m s.n.m.

Correspondencia en otros sistemas. Selva Sudmesotérmica Subandina de la Cordillera Oriental, Bosque Húmedo Montano Bajo, Bosque Pluvial Montano, Bosque Nublado (Sierra, 1999)

3.2 Descripción del método para describir estructura vegetal

3.2.1 Determinación de transectos

Tanto para realizar las mediciones de LAI como para tomar las fotografías, se establecieron siete transectos de estudio. Cada uno de 10 m de longitud, los cuales se localizaron en la parte intermedia entre 2000 m s.n.m. y 2290 m s.n.m, por que son las áreas menos disturbadas y se situaron a cada 200 m de distancia el uno del otro. Según la gradiente altitudinal, el más bajo es el transecto 1 y el más alto es el transecto 7

3.2.2 Mediante LAI

La técnica básica fue tomada de Wells y Norman (1991) Esta combina mediciones de la claridad del cielo con un sensor de referencia elevado por encima de la copa de los árboles, con segundas mediciones tomadas con otro sensor por debajo de la copa arbórea (ver anexo 6).

En la práctica se transportó manualmente un sensor LI-COR. LAI-200 con su caja de control por debajo del transecto establecido. En cada transecto se realizaron cinco repeticiones con series de cinco mediciones de LAI (ver anexo 1), con el sensor apuntando hacia el cielo y siempre con dirección al Este, esto para lograr una apropiada media espacial del transecto bajo análisis. Tomando en cuenta que típicamente de 10 o menos mediciones debajo de la copa podrían ser realizadas, esto también depende de la heterogeneidad de la copa, y de cuan extensa sea el área que los datos deberían representar como se lo detalló en el marco teórico.

Se tomó también una media proporcional de la altura del dosel para caracterizar a cada transecto. Cada medición por debajo del dosel se tomó en horas de la mañana y con cielo opaco. Cada medición tomó pocos minutos, así el tiempo para determinar una medida de LAI para un transecto llevó normalmente de 15 a 20 minutos.

Para las mediciones a dosel abierto se dispuso de una plataforma elevada a seis metros de altura en un lugar abierto situado siempre entre los transectos 4 y 5, la cual está a una altura de 2270 m s.n.m., donde se instaló en segundo sensor en funcionamiento continuo con su respectiva caja de control. La caja de control se programó para tomar y grabar series de cinco mediciones cada cinco minutos de diferencia.

Las mediciones de LAI se obtuvieron luego mediante la utilización del *software* adjunto al sistema, el cual se lo corrió en un computador en las instalaciones de la Estación San Francisco. Los datos fueron tabulados y grabados en una hoja de cálculo en *Excel*, después de cada día de haber hecho las lecturas.

El LAI determinado por este método (como por cualquiera por radiación de luz interceptada) incluye todo objeto opacado, tales como troncos, frutas y ramas, Así el índice de área del follaje es una mejor descripción de lo que se ha medido. También,

el sensor no puede distinguir entre tejido vivo y tejido muerto, por lo tanto es imposible separar cobertura de área fotosintéticamente activa.

3.2.3 Mediante el análisis de fotografías verticales de vegetación

El área vertical de una porción de la copa vegetal se analizó mediante el agrupamiento de fotografías en perfiles de un metro cuadrado, en las cuales luego el observador determina y separa colores correspondientes a espacios abiertos y cerrados, los cuales son captados por las fotografías, a estos colores se los denomina clases. Mediante la sumatoria de clases de colores se puede calcular áreas de espacio abierto y de espacio cerrado existentes en el dosel visto verticalmente.

3.2.3.1 Toma de fotografías

El procedimiento se lo puede dividir en pasos específicos a seguir, los cuales se los describe a continuación.

Elección de puntos.- para ubicar los puntos donde tomar las fotografías digitales se recorrió a lo largo de cada transecto. La distancia entre cada punto vario dependiendo de las posibilidades de ubicación del cuadro de referencia y de la disponibilidad de los árboles para ser escalados y ubicar la cámara.

Ubicación del cuadro de referencia.- en el punto correspondiente elegido se elige la rama mas alta de un árbol predominante en altura y robustez, en la cual mediante una cuerda (a) se ubica el marco de referencia de un metro cuadrado a una altura media a la del total del dosel y siempre orientado en dirección al Este. El cuadro de referencia determina que siempre se tendrá la misma superficie (para el análisis posterior), independiente de la distancia horizontal entre el cuadro y la cámara fotográfica, como también independiente del *zoom* de esta.

Toma de fotografías.- en el extremo opuesto de la posición del cuadro de referencia, pero siempre con vista al Este, se elige la rama más robusta de otro árbol, en la cual mediante una cuerda apropiada (b) y con equipo necesario se escala hasta tener una altura horizontal (h) igual al cuadro de referencia. Se realiza una o dos fotografías digitales del perfil vertical de la vegetación allí existente.

Las cinco fotografías para cada transecto serán independientes del punto en donde se midió (LAI) y se las seleccionará según la mejor imagen obtenida. Las características de la fotografía ideal son que no se detecte brillo de luz reflejadas por las hojas del dosel y nitidez de la imagen. Para esto se tomó en cuenta que los factores del clima sean iguales al los de la mediciones de LAI, siendo de cielo cubierto y sin lluvia. En la figura 4 se representa todo el proceso.

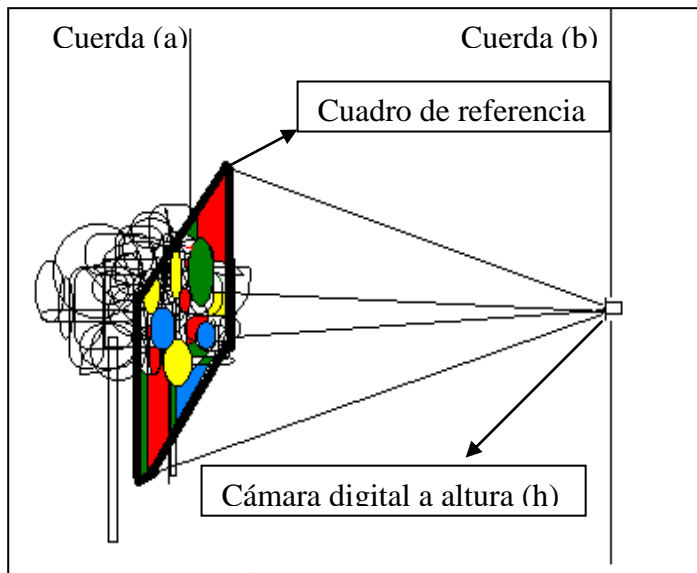


Figura 4: Descripción del fotografiado de los perfiles de vegetación

3.2.4 Clasificación cluster de las fotos digitales con el programa IDRISI

Previo a la utilización del programa las fotografías requieren del un tratamiento el cual se detalla a continuación, tomado un ejemplo para su mejor comprensión.

3.2.4.1 Preparación de fotografías en el programa *Adobe Photoshop*



Figura 5: Foto ejemplo 1 y recorte del cuadro de referencia mediante *Adobe Photoshop*

Separación de canales.- con esta nueva fotografía y seleccionando la opción “*SPLIT CHANNELS*”. Se separan tres canales de color, azul, verde y rojo, los mismos que se volverán a componer en el programa IDRISI 32.

3.2.4.2 Recorte del cuadro de referencia

Con la fotografía en el programa *photoshop*, con uno de los marcadores se perfila la vegetación enmarcada dentro del cuadro de referencia, luego con la opción “*CROP*” se recorta. Como lo muestra el ejemplo 1 de la figura 5.

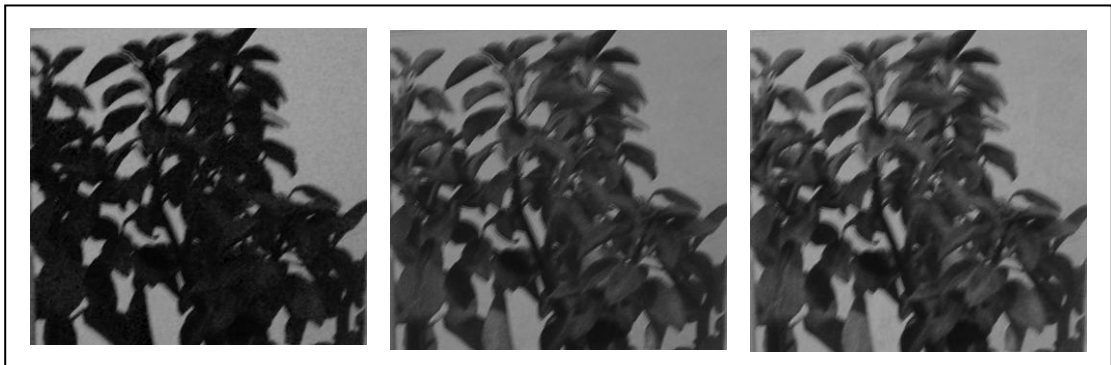


Figura 6: Descomposición de la foto recortada ejemplo 1, en los canales azul, verde y rojo. Mediante *Adobe Photoshop*

Cambio de formato.- Al momento de guardar las imágenes el programa brinda la opción de cambiar formato, como el formato normal de las fotos digitales es “*JPG*” se lo cambia y nombra con extensión “*BMP. Windows*”, “*Depth 8 bit*”. Ya que el siguiente paso con el IDRISI 32 requiere de este formato. Todo el proceso del paso 2, es detallado en la figura 7.

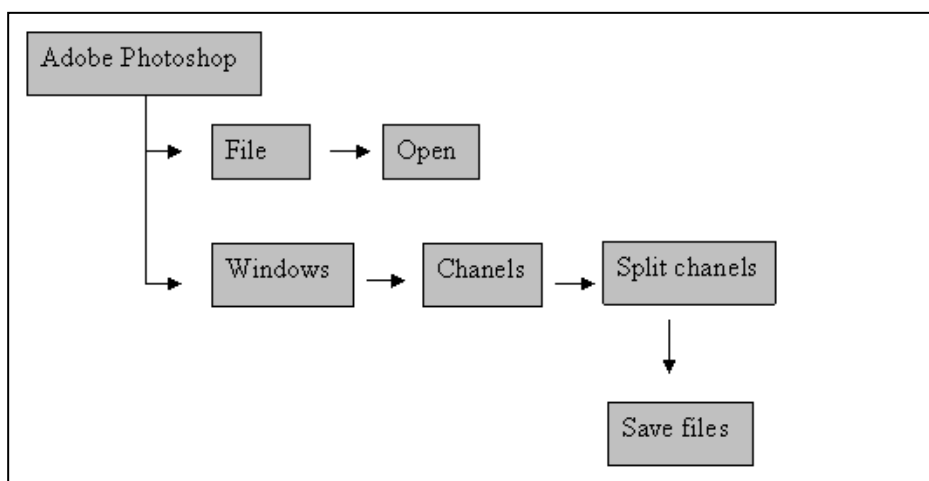


Figura 7: Cuadro de comandos; preparación de fotos en *Adobe Photoshop*

3.2.4.3 Análisis de fotografías en el programa IDRISI 32.

Importar fotografías.- con la opciones en orden correspondiente “*File – Import – Desktop Publishing Formats – BMPIDRISI.*” Se importan desde los archivos las tres fotos descompuestas en *Adobe Photoshop*, el orden de importación es azul verde y rojo y se da un nuevo nombre específico para cada una con la nueva extensión de IDRISI.

Composición de fotografía.- se realiza la composición de una nueva foto partiendo de las que se importaron, mediante las opciones “*Image - Processing – Enhancement – Composite*”. El programa dispone automáticamente el orden de composición de bandas de imagen, siendo el mismo en que fueron importados, primero banda marrón luego banda verde y último banda rojo. Se da un nombre para la foto compuesta. Se obtienen mejores resultados de composición con una saturación lineal de puntos a “8 bit”. Para esto se escoge en la opción que presenta la misma ventana “*Contrast stretch type*” – “*Linear with saturation points*” -“8 bit”.

Análisis n cluster.- con las opciones “*Image Processing – Hard Classifiers – Cluster*” se ingresa la fotografía compuesta anteriormente y se da un nombre para la imagen n cluster. Es recomendado para obtener mejores resultados en el nivel de generalización escoger la subopción “*Broad*” y para la regla del cluster se estableció un máximo número de 5 clases de agrupación. La imagen producto se muestra en cinco colores diferentes de reflexión. Los colores de agrupación o clases de agrupación como lo describe la figura 6, son: verde, celeste, amarillo, rojo y azul.



Figura 8: Imagen compuesta y resultado de la clasificación a cinco cluster de la foto ejemplo 1 de la figura 6.

Estadística de descripción.- mediante un histograma de frecuencias se calcula las frecuencias y proporciones de las clases, mediante la opción “*GIS Análisis – Statistics – Histogram*”. Se ingresa la imagen cluster y se eligen 4 clases de intervalos, que van del 1 a 5 entre el rango que va del mínimo 0 y máximo 5. La tabla estadística se guarda bajo un nombre apropiado.

La figura 9 detalla paso a paso el procedimiento con en programa IDRISI.

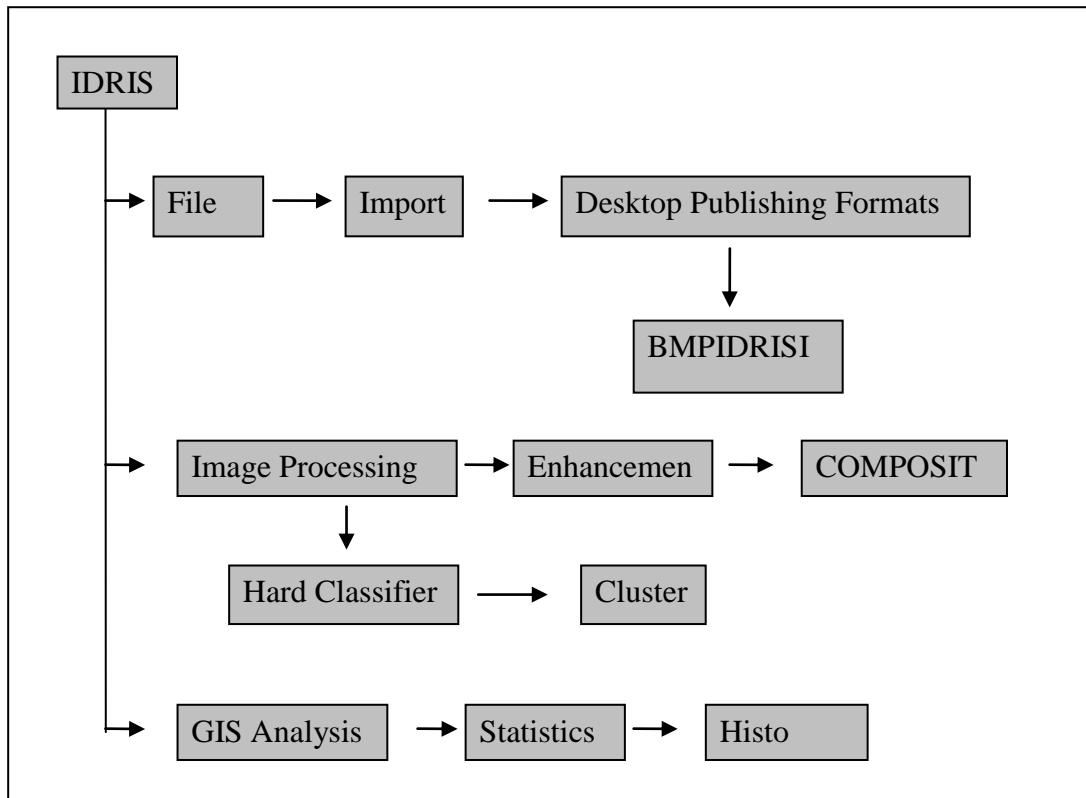


Figura 9: Cuadro de comandos para realizar un análisis cluster en IDRISI

3.2.5 Determinación de IAV

Existe una relación de proporción inversa entre la sumatoria del área abierta dividida para la sumatoria del área cerrada, esto significa que cuando el LAI es menor el área abierta es mayor. Por lo tanto para fotografía ejemplo1 de la figura 8:

Área abierta menor = LAI mayor,

Área abierta mayor = LAI menor.

Entonces el IAV estaría dado por la fórmula:

$$IAV = \frac{ac}{ab} \quad (8)$$

Donde:

a_c = sumatoria de área cerrada y a_b = sumatoria de área abierta

Si se correlaciona los datos de LAI (x) y los análisis de las fotografías de los perfiles laterales que es área vertical (y) en un gráfico, se establece la correlación mediante una línea de tendencia la cual determinara la desviación estándar. Se prevé que el área vertical será directamente proporcional con el LAI.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS CLUSTER EN IDRISI Y CALCULACIONES DE IAV

Los resultados se muestran en tres partes, en la primera se muestran las fotografías y las imágenes producto de los análisis cluster con el programa IDRISI32, así como las proporciones de áreas cerradas y abiertas estimadas para cada imagen cluster para la determinación del IAV.

Luego como segunda parte se presentan las lecturas de LAI tomadas en cada transecto, junto con medias proporcionales y desviaciones estándar de cada medición.

Por último en una tercera parte se muestra los resultados de la correlación entre de ambas variables y la obtención de la formula general para determinar IAV.

4.1 Fotografías cluster

A continuación se presentan los grupos de fotografías pertenecientes a cada transecto que fueron tomadas y analizadas mediante IDRISI, representadas por colores que indican las áreas de vegetación cerradas (ac) y las área abiertas (ab), como se describió en la metodología.

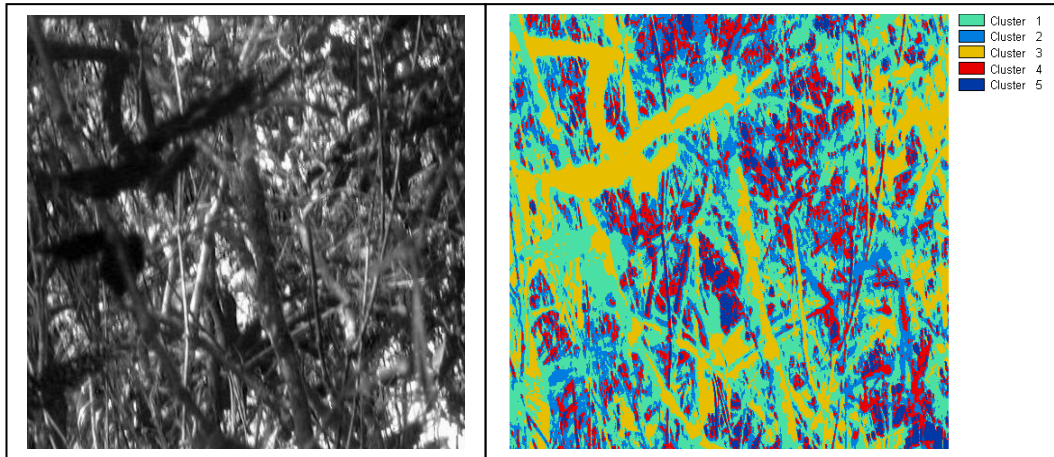


Figura 10: Transecto 1 Foto 1 y resultado del análisis CLUSTER

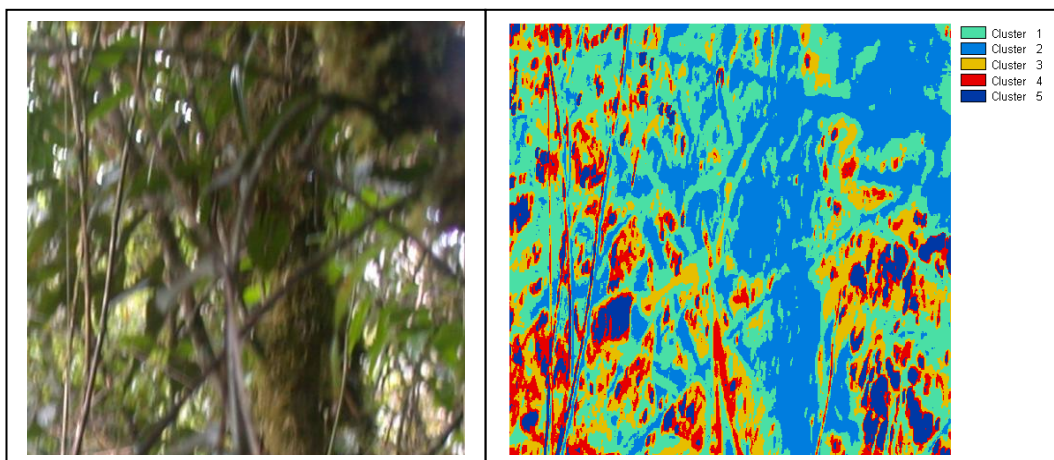


Figura 11: Transecto 1 Foto 2 y resultado del análisis CLUSTER

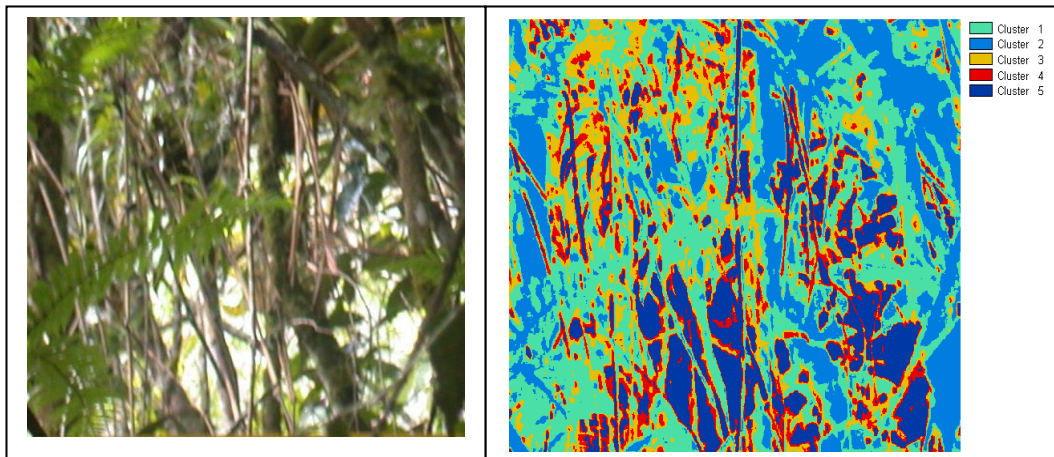


Figura 12: Transecto 1 Foto 3 y resultado del análisis CLUSTER

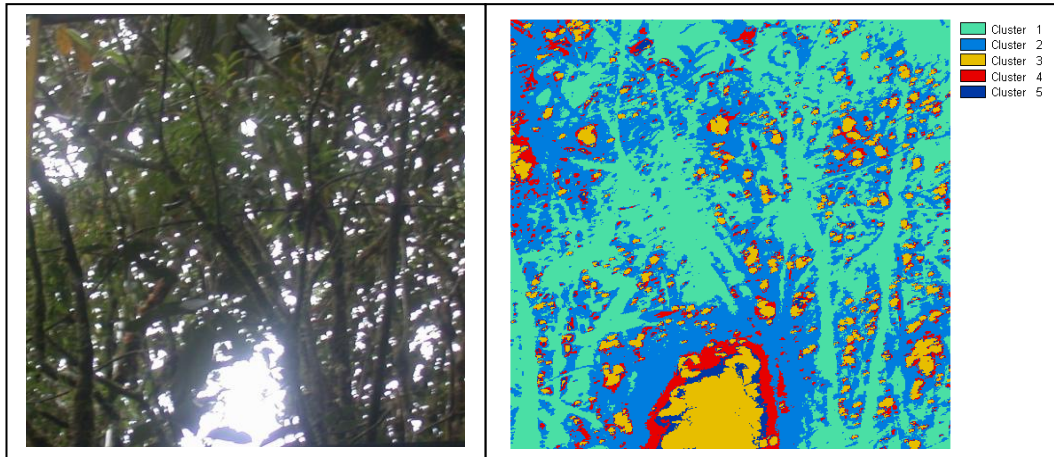


Figura 13: Transecto 1 Foto 4 y resultado del análisis CLUSTER

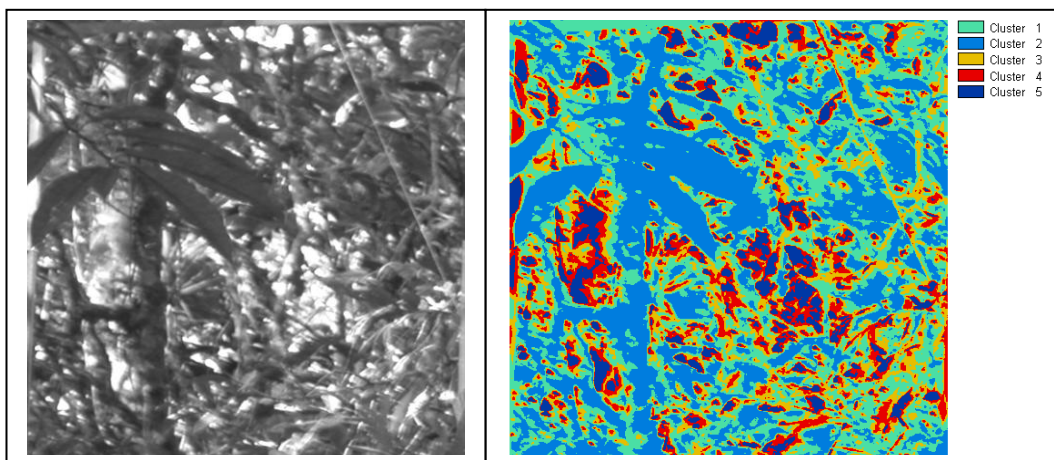


Figura 14: Transecto 2 Foto 1 y resultado del análisis CLUSTER

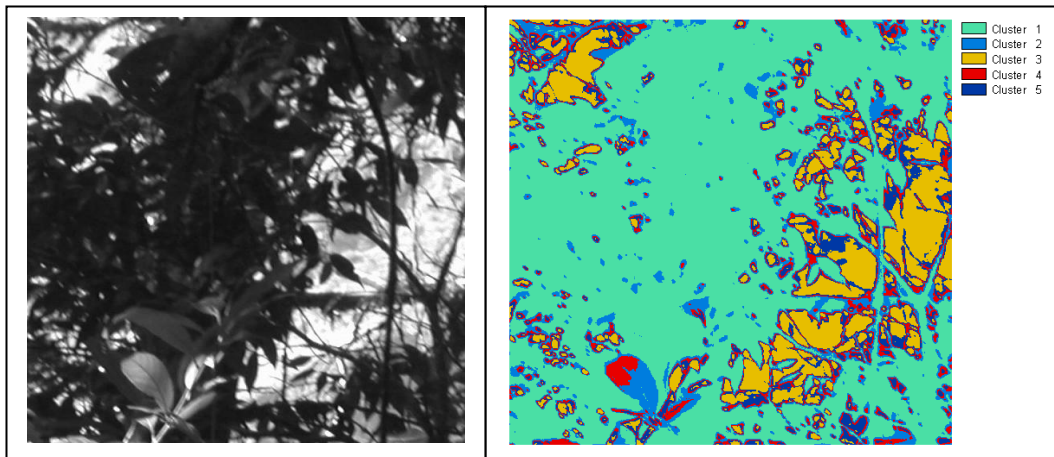


Figura 15: Transecto 2 Foto 2 y resultado del análisis CLUSTER

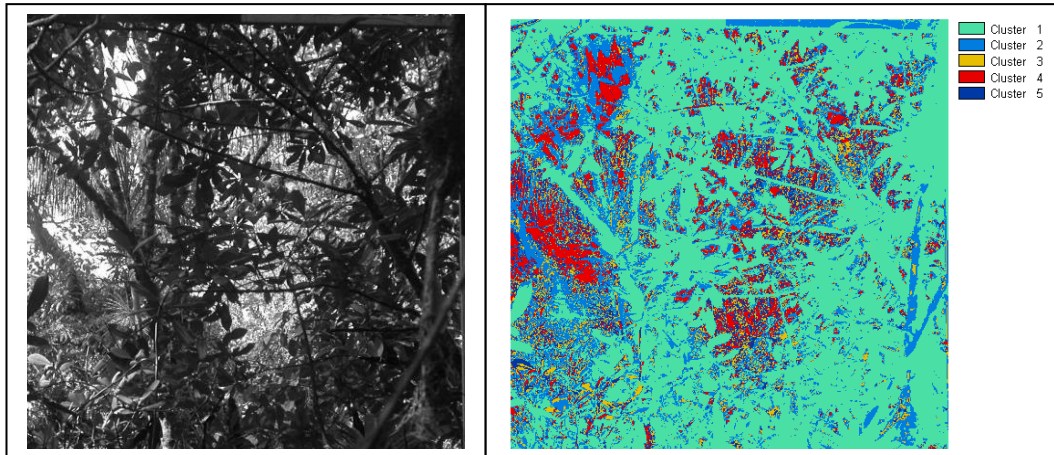


Figura 16: Transecto 2 Foto 3 y resultado del análisis CLUSTER

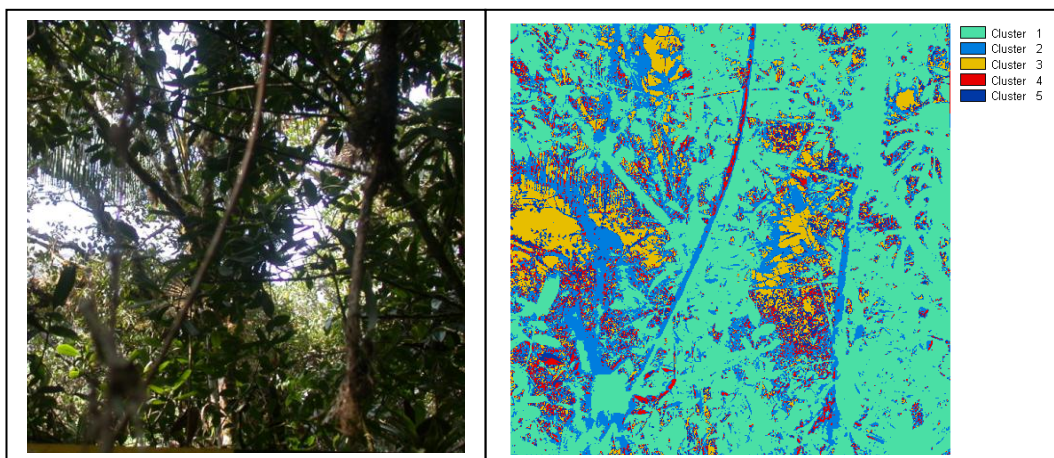


Figura 17: Transecto 2 Foto 4 y resultado del análisis CLUSTER

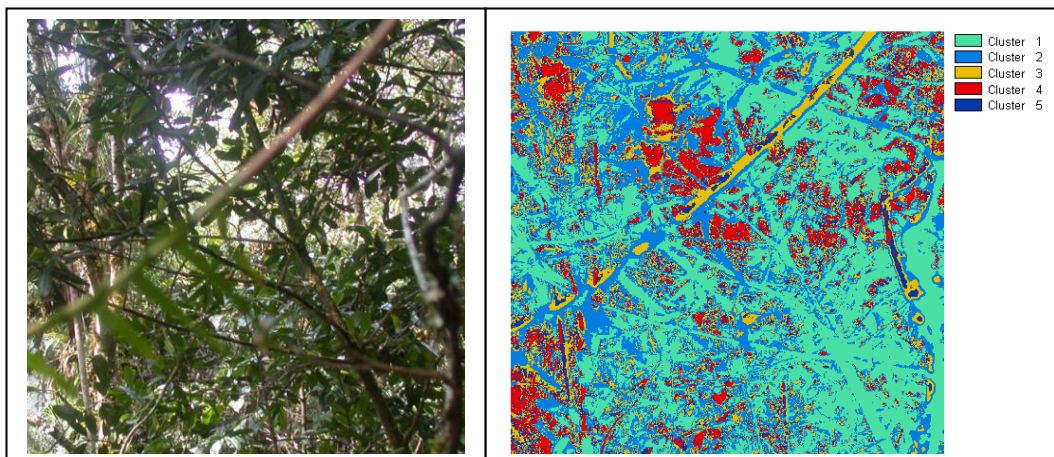


Figura 18: Transecto 2 Foto 5 y resultado del análisis CLUSTER

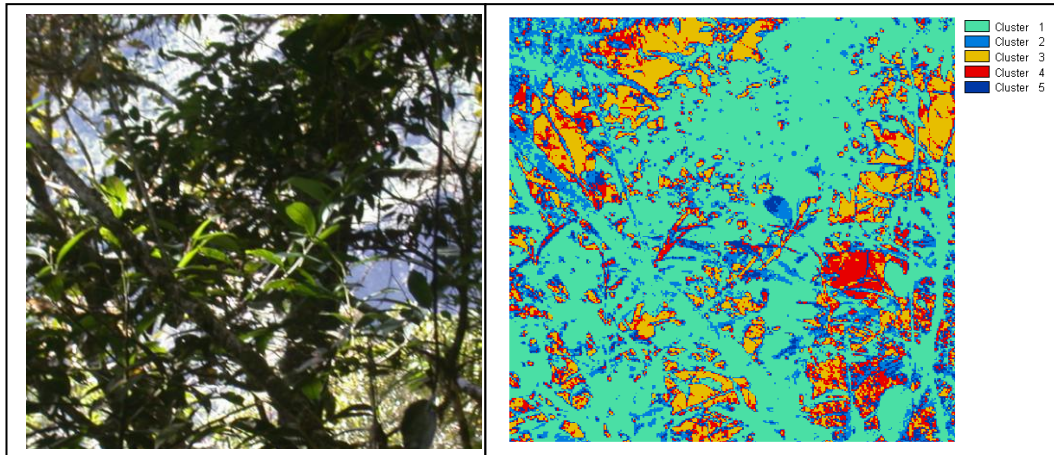


Figura 19: Transecto 3 Foto 1 y resultado del análisis CLUSTER

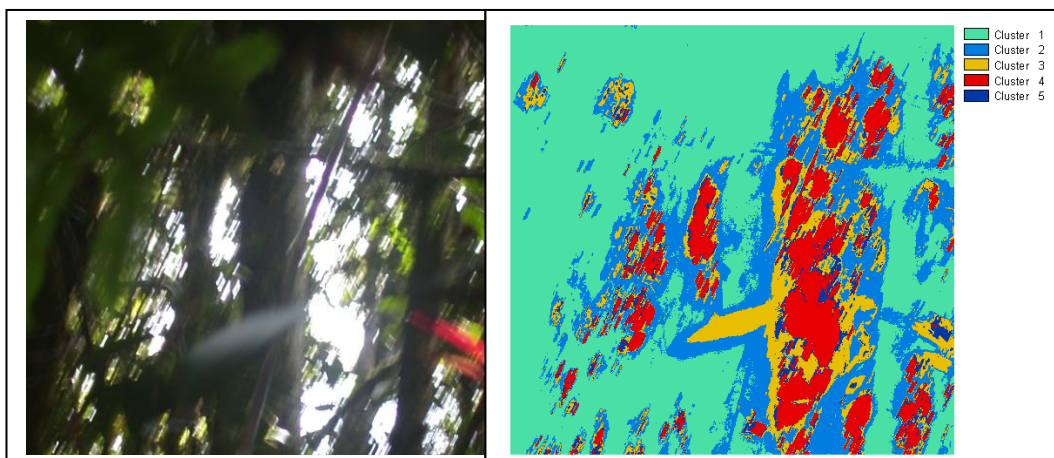


Figura 20: Transecto 3 Foto 2 y resultado del análisis CLUSTER

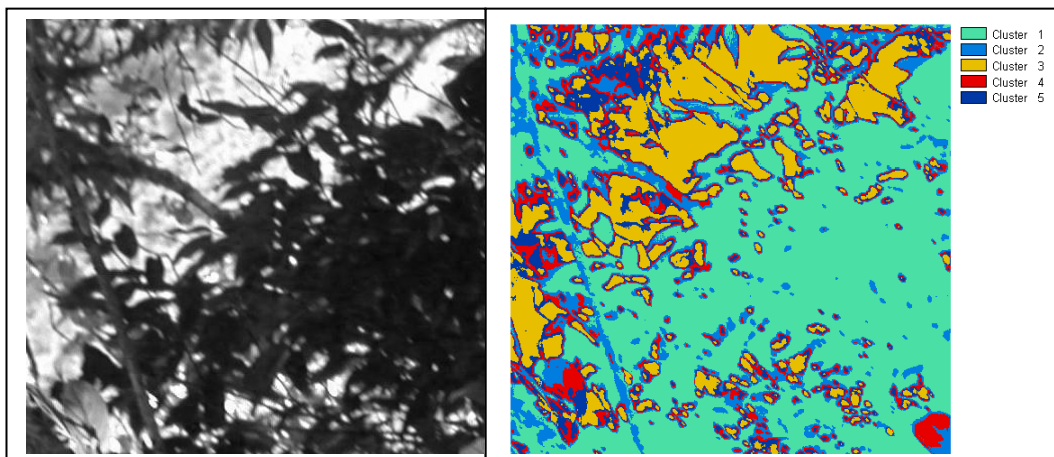


Figura 21: Transecto 3 Foto 3 y resultado del análisis CLUSTER

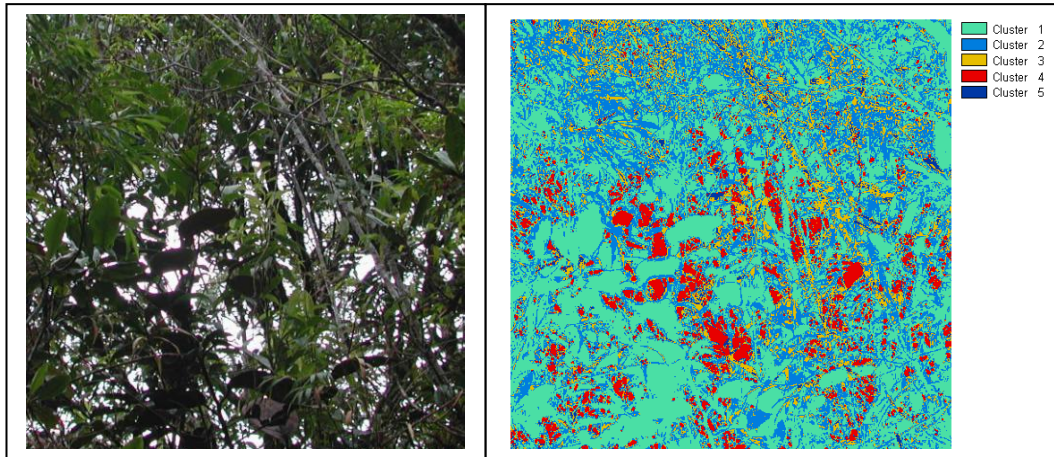


Figura 22: Transecto 3 Foto 4 y resultado del análisis CLUSTER

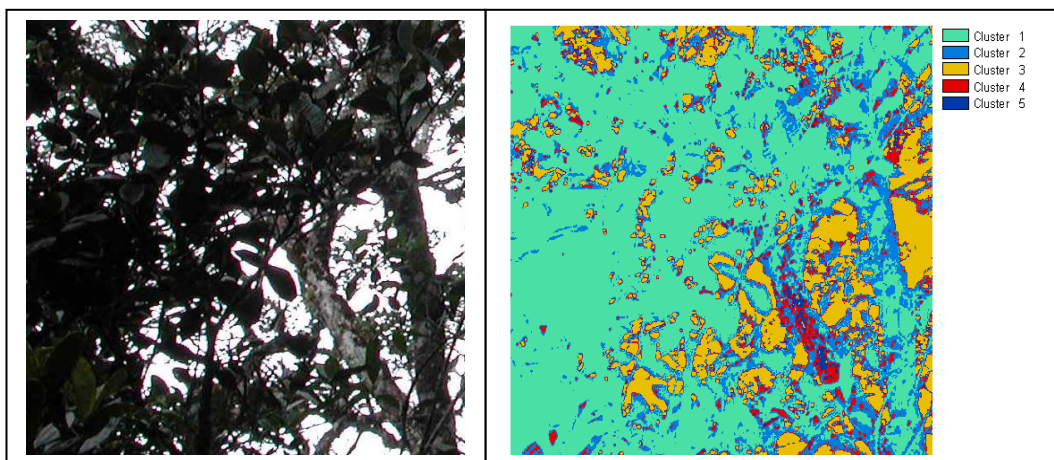


Figura 23: Transecto 4 Foto 1 y resultado del análisis CLUSTER

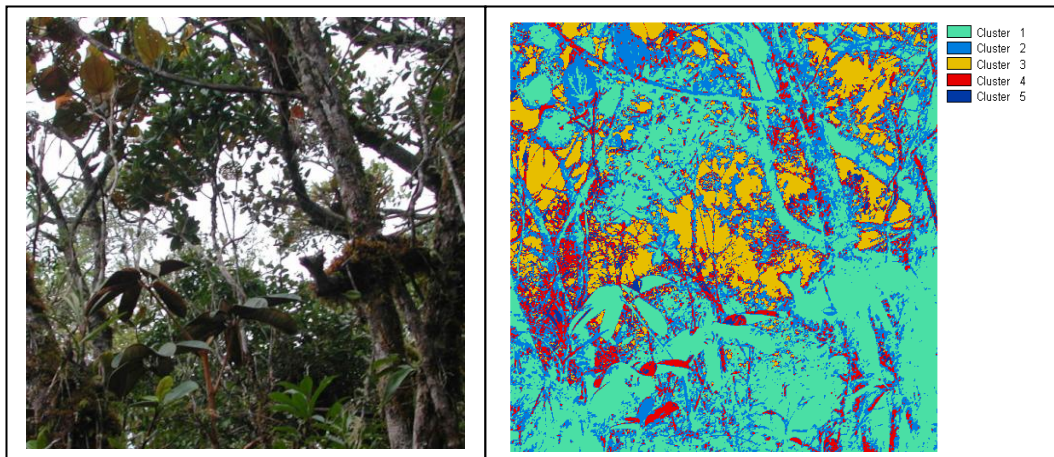


Figura 24: Transecto 4 Foto 2 y resultado del análisis CLUSTER

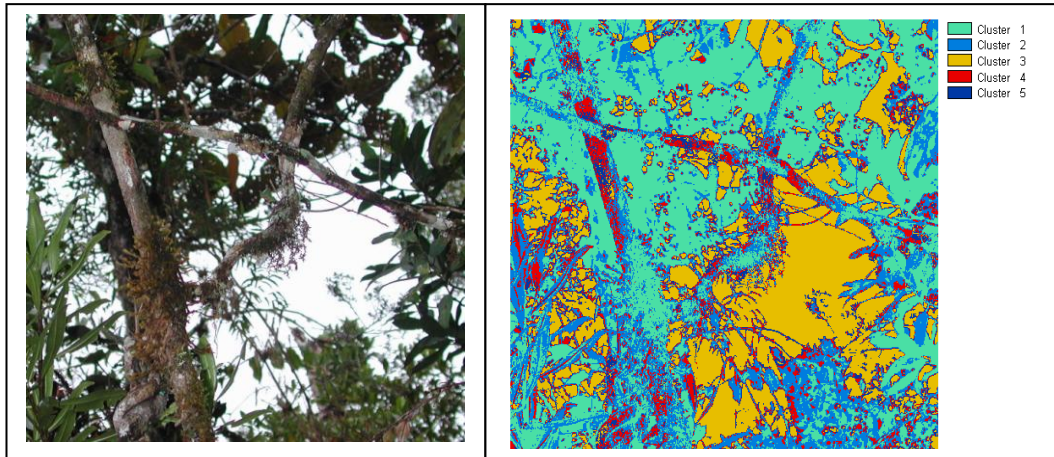


Figura 25: Transecto 4 Foto 3 y resultado del análisis CLUSTER

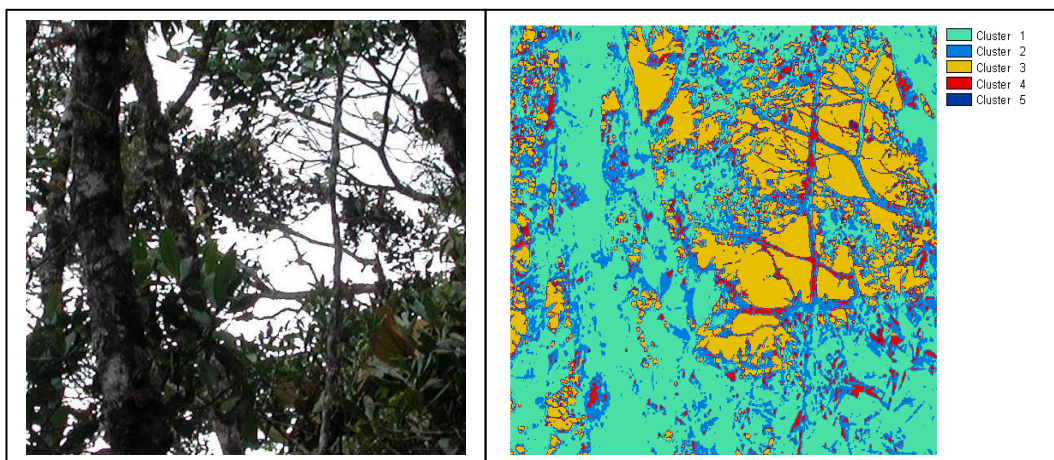


Figura 26: Transecto 4 Foto 4y resultado del análisis CLUSTER

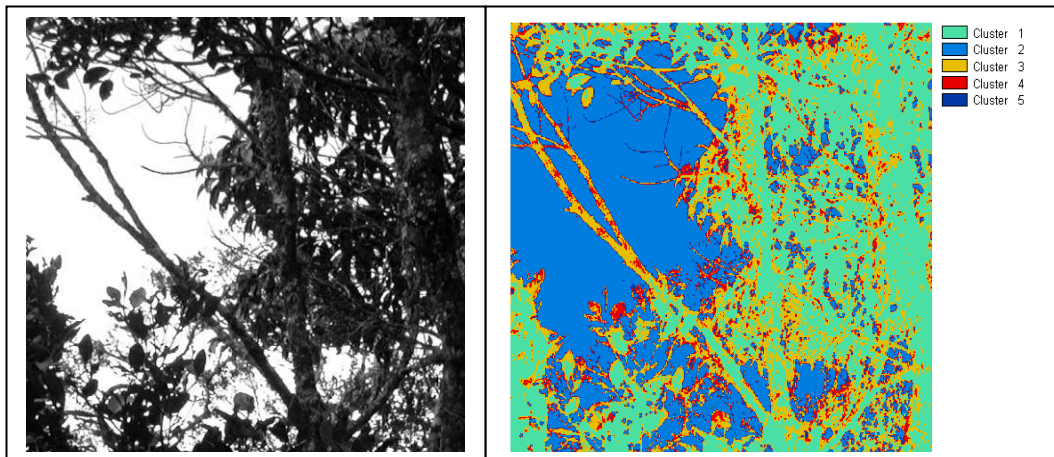


Figura 27: Transecto 5 Foto 1 y resultado del análisis CLUSTER

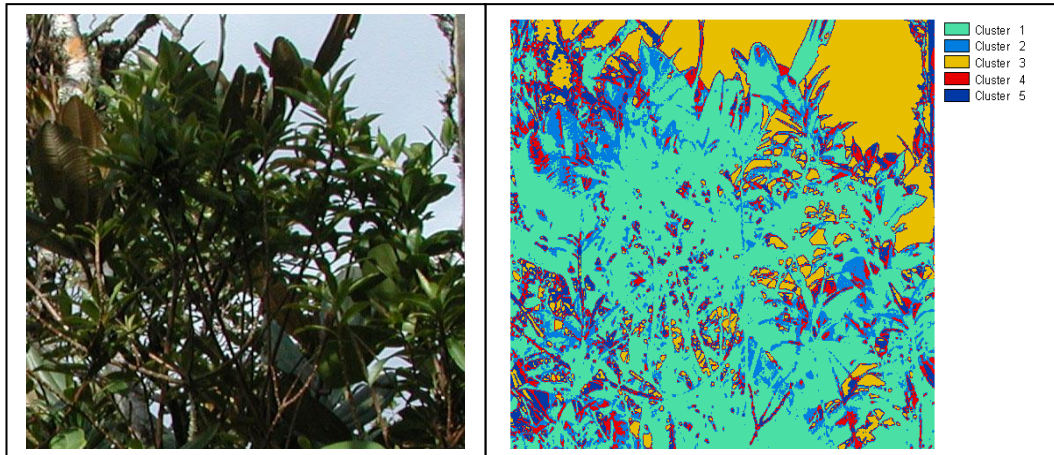


Figura 28: Transecto 5 Foto 2 y resultado del análisis CLUSTER

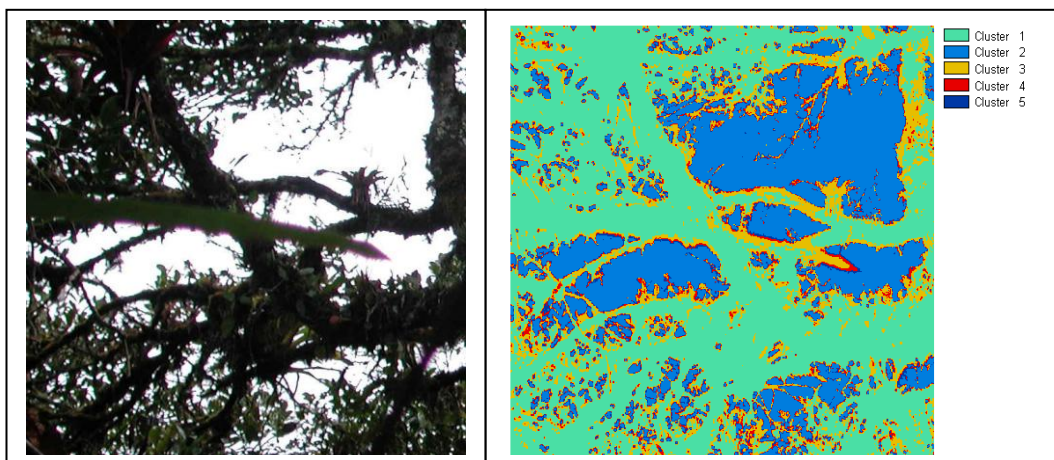


Figura 29: Transecto 5 Foto 3 y resultado del análisis CLUSTER

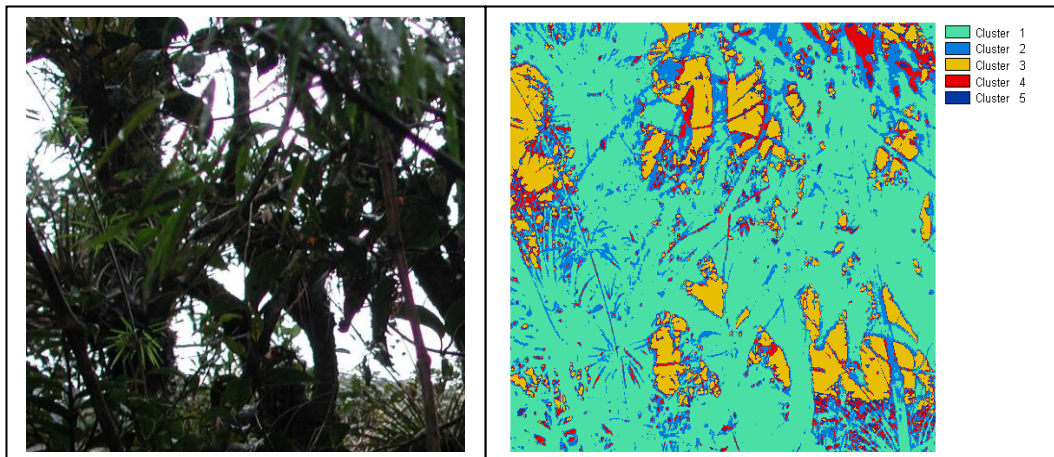


Figura 30: Transecto 5 Foto 4 y resultado del análisis CLUSTER

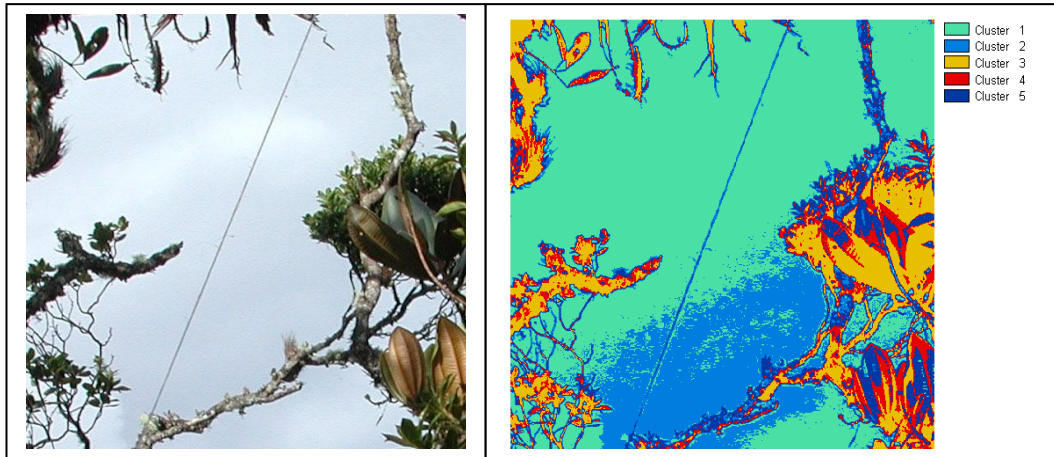


Figura 31: Transecto 6 Foto 1 y resultado del análisis CLUSTER

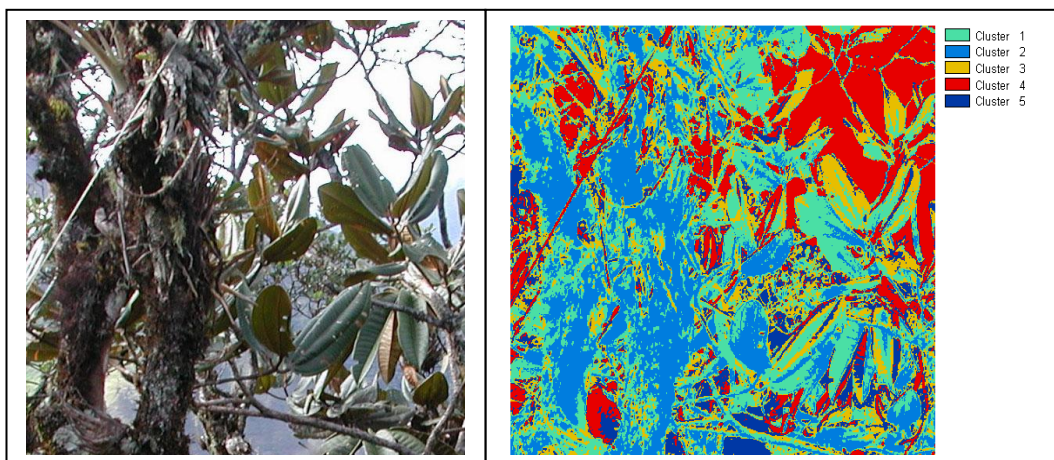


Figura 32: Transecto 6 Foto 2 y resultado del análisis CLUSTER

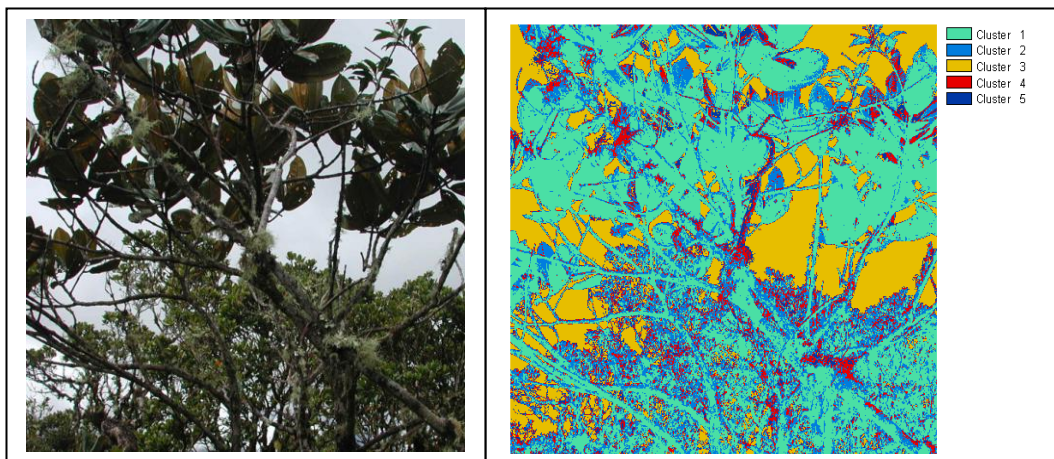


Figura 33: Transecto 6 Foto 3 y resultado del análisis CLUSTER

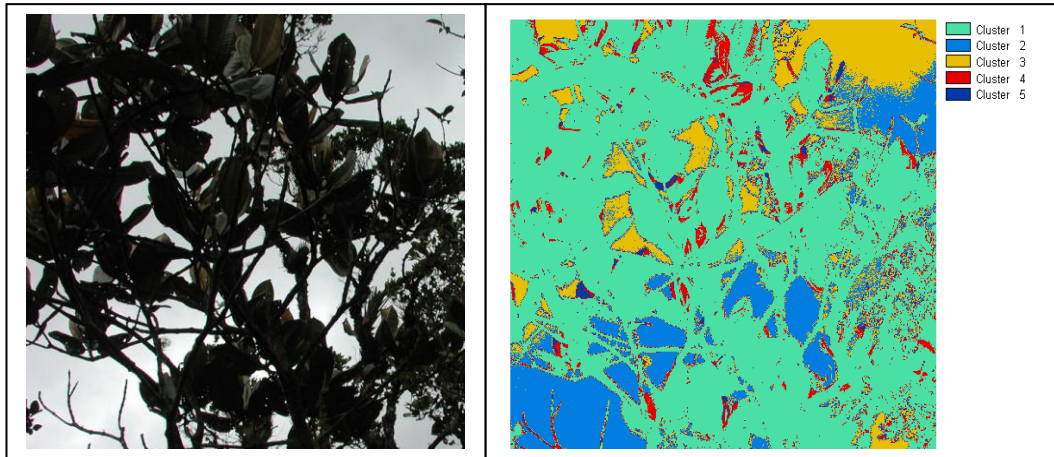


Figura 34: Transecto 6 Foto 4 y resultado del análisis CLUSTER

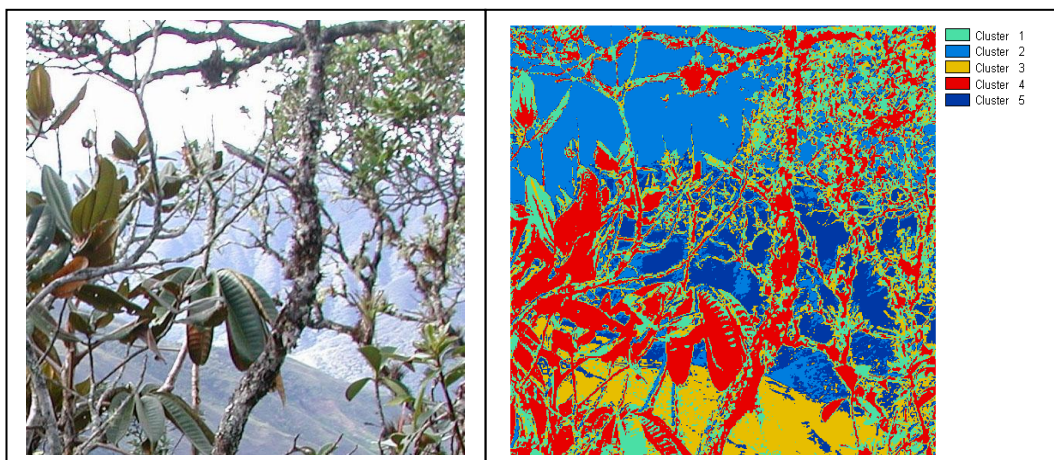


Figura 35: Transecto 6 Foto 5 y resultado del análisis CLUSTER

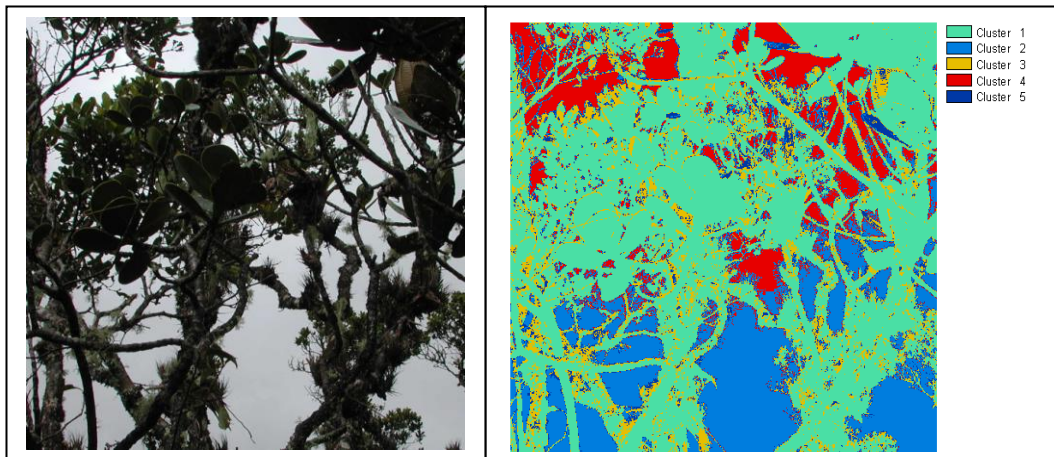


Figura 36: Transecto 7 Foto 1y resultado del análisis CLUSTER

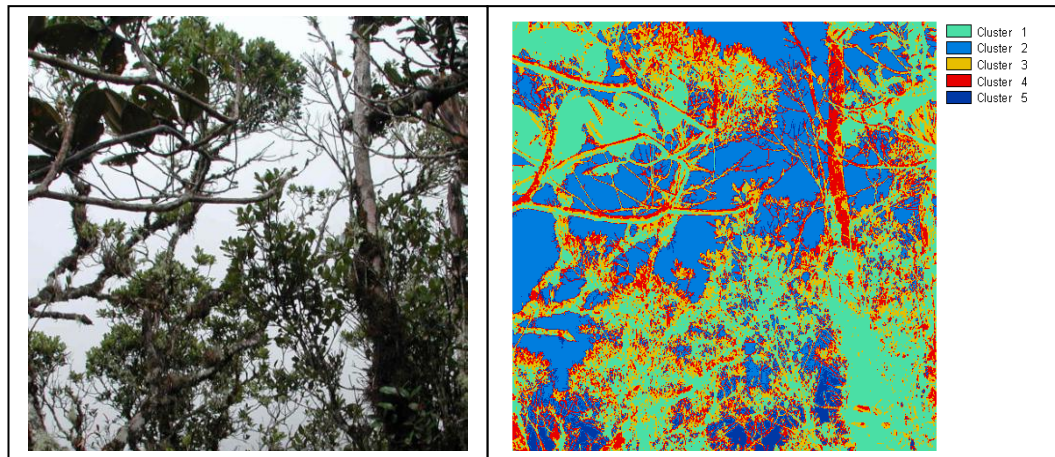


Figura 37: Transecto 7 Foto 2 y resultado del análisis CLUSTER

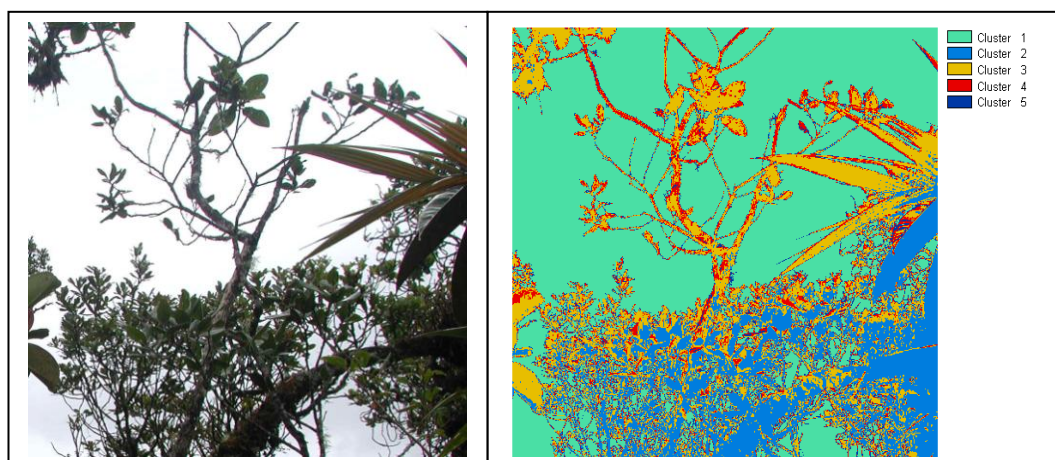


Figura 38: Transecto 7 Foto 3 y resultado del análisis CLUSTER

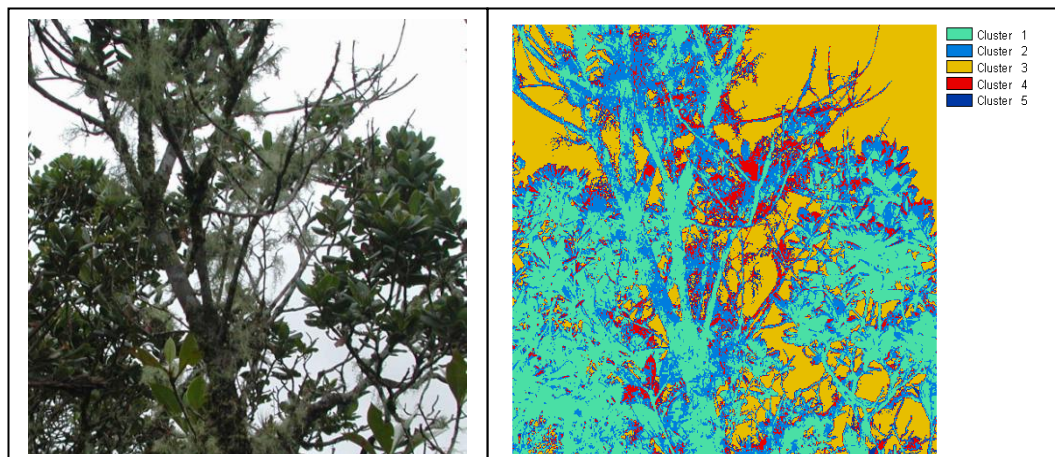


Figura 39: Transecto 7 Foto 4 y resultado del análisis CLUSTER

4.1.1 Determinación de áreas abiertas y cerradas

La información resumida en las tablas siguientes corresponde a la asignación de clases en cada fotografía para determinar área abierta (ab) y área cerrada de vegetación (ac) la cual se muestra de color **rojo**.

Tabla 1: Proporciones de áreas según el análisis cluster del transecto 1

Cluster	Color	Proporción				
		Foto 1	Foto 2	Foto 3	Foto 4	Foto 5
1	Verde	0,3808	0,3535	0,3529	0,4244	
2	Celeste	0,2183	0,2863	0,2212	0,386	
3	Amarillo	0,2034	0,1853	0,1704	0,0966	
4	Rojo	0,1229	0,1072	0,1085	0,0654	
5	azul	0,0747	0,0677	0,147	0,0276	

Tabla 2: Proporciones de áreas según el análisis cluster del transecto 2

Cluster	Color	Proporción				
		Foto 1	Foto 2	Foto 3	Foto 4	Foto 5
1	Verde	0,3261	0,6381	0,5735	0,5511	0,372
2	Celeste	0,3191	0,1107	0,2235	0,2302	0,3325
3	Amarillo	0,1639	0,1178	0,0662	0,089	0,1337
4	Rojo	0,1148	0,0659	0,0692	0,0633	0,0871
5	azul	0,0762	0,0674	0,0675	0,0664	0,0747

Tabla 3: Proporciones de áreas según el análisis cluster del transecto 3

Cluster	Color	Proporción				
		Foto 1	Foto 2	Foto 3	Foto 4	Foto 5
1	Verde	0,5262	0,5209	0,4994	0,4445	
2	Celeste	0,1519	0,2361	0,152	0,333	
3	Amarillo	0,1357	0,1025	0,1664	0,114	
4	Rojo	0,0993	0,102	0,0891	0,0708	
5	azul	0,0869	0,0385	0,093	0,0377	

Tabla 4: Proporciones de áreas según el análisis cluster del transecto 4

Cluster	Color	Proporción				
		Foto 1	Foto 2	Foto 3	Foto 4	Foto 5
1	Verde	0,5856	0,4268	0,3774	0,4655	
2	Celeste	0,1706	0,2793	0,231	0,2255	
3	Amarillo	0,1493	0,1344	0,225	0,2043	
4	Rojo	0,0605	0,114	0,0966	0,0683	
5	azul	0,034	0,0455	0,07	0,0364	

Tabla 5: Proporciones de áreas según el análisis cluster del transecto 5

Cluster	Color	Proporción				
		Foto 1	Foto 2	Foto 3	Foto 4	Foto 5
1	Verde	0,3782	0,5033	0,5143	0,6261	
2	Celeste	0,2955	0,1612	0,2494	0,1638	
3	Amarillo	0,2021	0,1558	0,1468	0,1204	
4	Rojo	0,0756	0,0962	0,0484	0,0576	
5	azul	0,0486	0,0836	0,0412	0,0321	

Tabla 6: Proporciones de áreas según el análisis cluster del transecto 6

Cluster	Color	Proporción				
		Foto 1	Foto 2	Foto 3	Foto 4	Foto 5
1	Verde	0,5302	0,2752	0,4607	0,6421	0,2188
2	Celeste	0,1969	0,2501	0,2152	0,1536	0,1862
3	Amarillo	0,1077	0,1816	0,1906	0,1227	0,1836
4	Rojo	0,074	0,165	0,087	0,0567	0,2636
5	azul	0,0913	0,1281	0,0465	0,0248	0,1479

Tabla 7: Proporciones de áreas según el análisis cluster del transecto 7

Cluster	Color	Proporción				
		Foto 1	Foto 2	Foto 3	Foto 4	Foto 5
1	Verde	0,5241	0,3175	0,518	0,3487	
2	Celeste	0,2056	0,2252	0,188	0,2503	
3	Amarillo	0,1266	0,2076	0,1815	0,2747	
4	Rojo	0,0908	0,1744	0,072	0,0839	
5	azul	0,053	0,0754	0,0405	0,0424	

4.1.2 Determinación de IAV

Los valores del IAV son obtenidos mediante la fórmula (8) respectivamente para las cinco fotografías de cada transecto. Los valores se muestran en la tabla 8

Tabla 8: Valores de IAV para cada transecto

Foto	Transec 1	Transec 2	Transec 3	Transec 4	Transec 5	Transec 6	Transec 7
1	12,4	12,1	3,3	4,5	3,5	0,4	2,4
2	13,8	7,5	8,8	6,4	5,4	2,4	2,3
3	5,8	12,5	5,0	4,7	3,0	4,3	0,9
4	9,4	10,2	4,4	3,9	5,6	2,6	2,6
5		10,5				0,9	
media	10,3 ±3,5	10 ± 2	5,4± 2,4	4,9± 1,1	4,4 ± 1,3	2,1± 1,5	2,1± 0,7

Como se observa en la figura 40, el IAV decrece con relación la altura que se incrementa sucesivamente desde el transecto 1 a 2000 m al transecto 7.a 2290 m s.n.m. Esta característica se la menciona en (Brujinzeel & Proctor 1997). Los transectos 1 y 2 que corresponden a la parte baja 2000 y 2080 m s.n.m, en donde el dosel es el más alto con una altura media de árboles entre 15 y 18 m, con presencia

estimada de epifitos del 7 %, existen agrupaciones de vegetación densa que fueron captadas por más de una fotografía. Teniendo los índices de área vertical más altos y similares, con medias de 10,3 para el transecto 1 con un incremento pequeño siendo de 10,6 para el transecto 2 respectivamente.

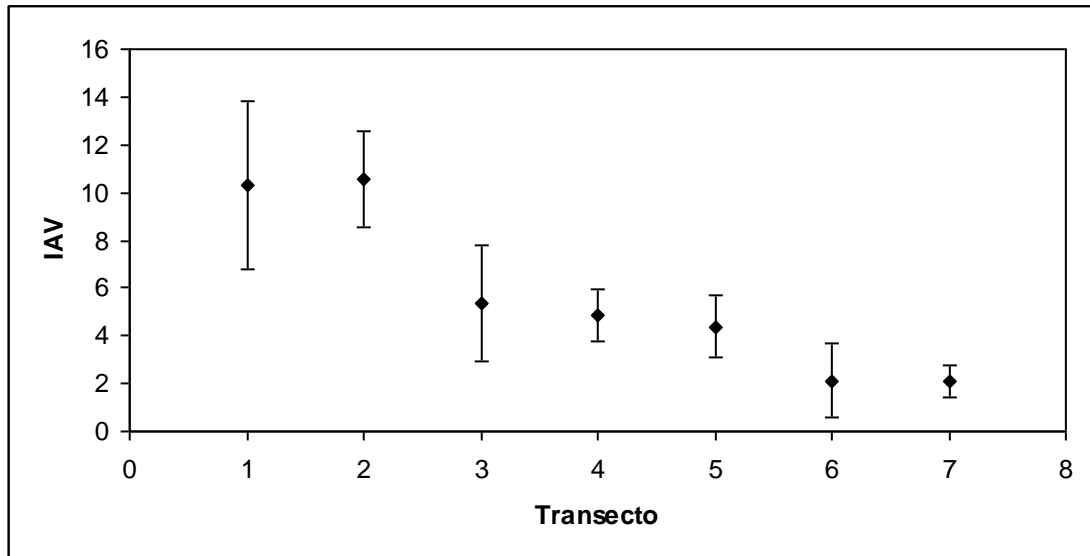


Figura 40: Desviación estándar del IAV de cada transecto

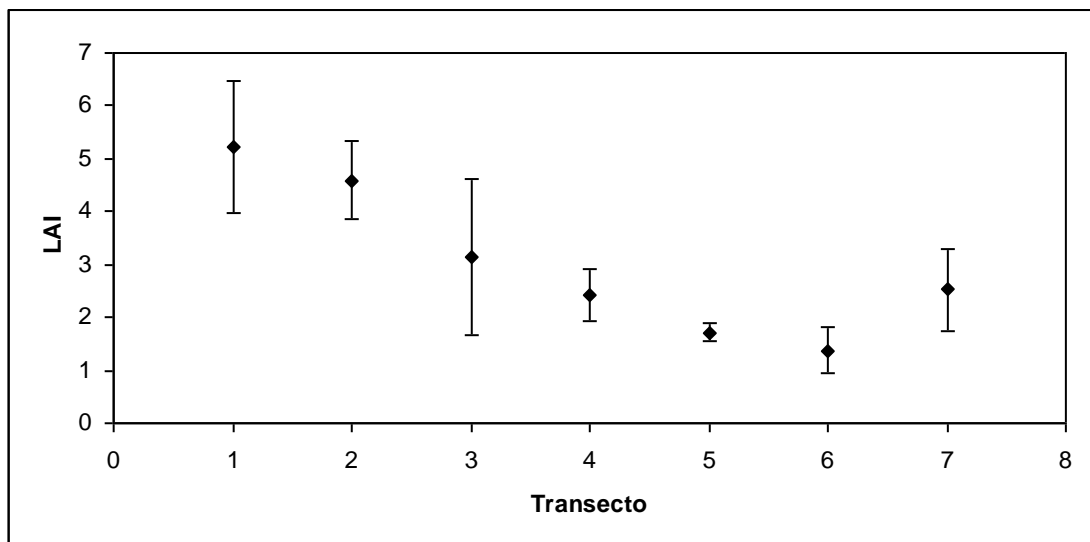


Figura 41: Desviaciones estándar de LAI para cada transecto

Estas partes del bosque demuestran ser heterogéneas en cuanto a área vertical, determinado por la desviación estándar como se ve en la tabla 8, especialmente para el transecto 1 con la más alta, con un rango de IAV entre 5,80 para la foto tres y 13,77 para la foto dos.

En el transecto 2, la foto 2 el IAV tiene un decrecimiento amplio, aunque el resto de fotografías se acercan a la media considerablemente, tiene el segundo valor más alto de desviación estándar siendo de ± 2 .

El transecto 3 que está a 2180 m s.n.m, hay una apreciable caída del IAV con una media de 5,4, especial en las fotos 1 que tiene el mínimo del rango que es de 3,26 y 8,80 para la foto 2. En el transecto 3 existe una similitud con los transectos 4 y 5 a 2210 m y 2250 m s.n.m respectivamente, en donde la altura del dosel comienza a decrecer. Aquí los árboles tienen un promedio de 12 m, además la presencia de epifitos disminuye habiendo entre 5 y 3 % del total de cobertura. Existe más homogeneidad entre espacio abiertos y cerrados, aunque en el transecto tres la desviación estándar es un poco alta en relación a los transectos 4 y 5. La desviación estándar entre estos transectos son las más bajas.

Al final los transectos 6 a 2270 m y 7 a 2290 m s.n.m, tienen un IAV más bajo y el dosel de igual forma decrece notablemente en altura, con un promedio de 9 m, y una presencia de epifitos del 3 %. Se destaca el transecto 7 con la desviación estándar más baja que es 0,7.

4.2 Lecturas de LAI

La Tabla 9 muestra las 30 lecturas de LAI promediadas por cada cinco mediciones iniciales que fueron tomadas en cada punto de un transecto con el sensor LI COR LAI-2000, en total son 146 para en todo el transecto de estudio (ver anexo 1). Tal como está descrito en la metodología.

El promedio total de LAI es de 3,03, entre un rango de 0,22 y 6,04.

Tabla 9: Media de las lecturas del LAI

Transecto	Foto 1	Foto 2	Foto 3	Foto 4	Foto 5
1	$6,6 \pm 0,3$	$5,98 \pm 0,07$	$4,0 \pm 0,6$	$4,3 \pm 1,2$	
2	$4,5 \pm 0,4$	$3,9 \pm 0,9$	$5,8 \pm 0,2$	$4,2 \pm 0,3$	$4,5 \pm 0,7$
3	$1,3 \pm 0,1$	$4,3 \pm 0,4$	$4,2 \pm 0,3$	$2,6 \pm 0,8$	\pm
4	$2,3 \pm 0,7$	$1,8 \pm 0,4$	$2,6 \pm 0,3$	$3,0 \pm 0,7$	
5	$1,6 \pm 0,5$	$2,0 \pm 1,2$	$1,7 \pm 0,5$	$1,6 \pm 0,2$	\pm
6	$0,9 \pm 0,4$	$1,2 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,2$	$1,7 \pm 0,4$	$1,9 \pm 0,4$
7	$2,2 \pm 0,3$	$3,3 \pm 0,6$	$2,2 \pm 0,3$	$3,3 \pm 0,3$	

Los promedios de LAI se muestran diferentes para cada transecto. Las desviaciones estándar son notables en los transectos 1, 3 y 7 como se muestra en la figura 41, especialmente el transecto 3 que como indica la figura 42, tiene una desviación estándar de 1,5 siendo la más alta. Debido a que para la foto 2 el LAI se incrementa notablemente con relación al resto de fotografías siendo de 4,3, y luego baja en la foto 1 con un LAI de 1,3,

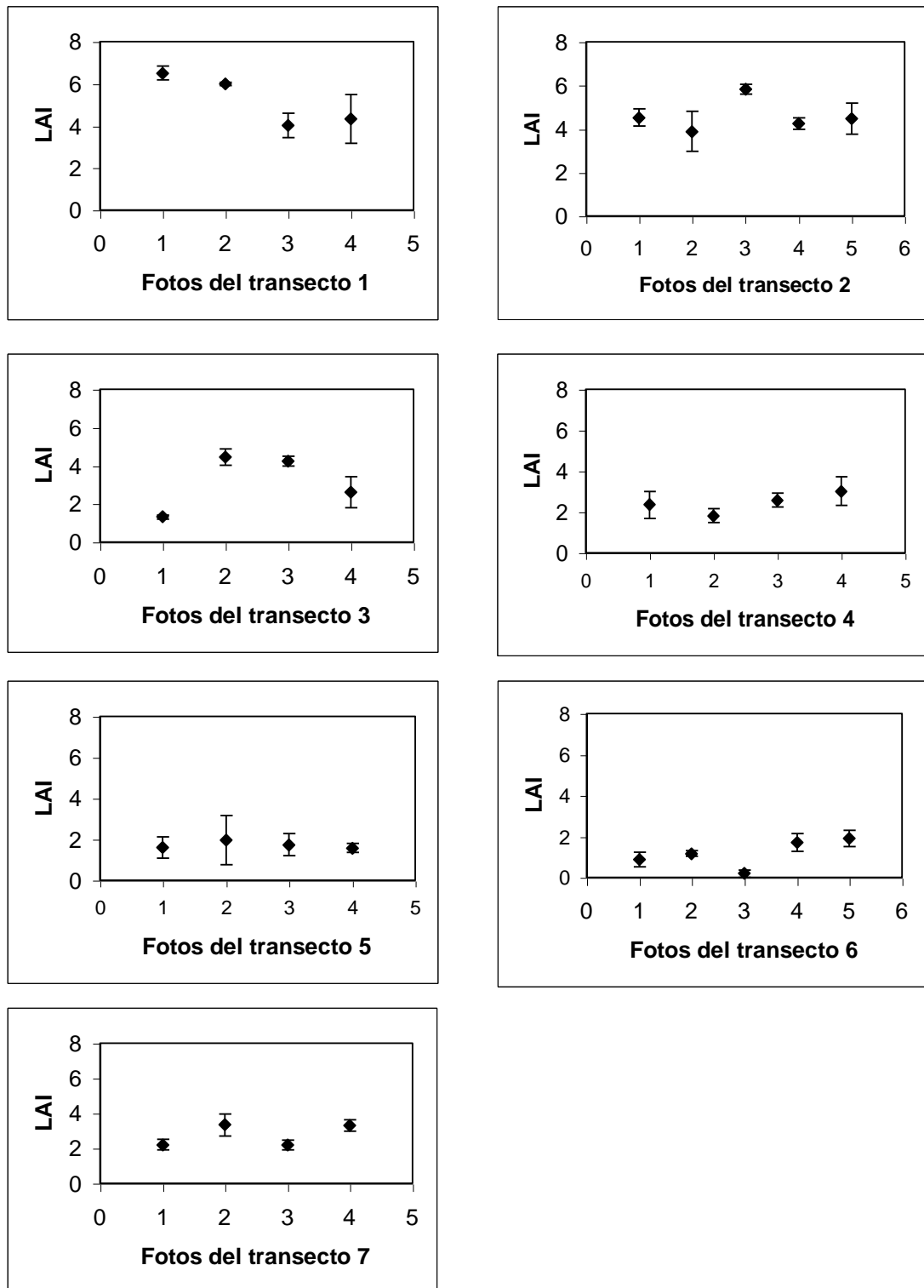


Figura 42: Desviaciones estándar para las mediciones de LAI por cada foto

Los transectos 1 y 2 tienen las lecturas de LAI más altas siendo 5,2 y 4,6 respectivamente. Así mismo se observa que el transecto 1 y 3 son muy heterogéneos como lo indica su desviación estándar en la figura 41. El transecto 5 tiene la más baja

desviación estándar siendo de 0,2 y donde las foto 5 y 1 decrecen notablemente su LAI, siendo de 1,6 como lo indica la figura 42.

La desviación estándar con respecto a la media de los valores de LAI obtenidos mediante el censor LI COR. LAI-2000 para las cinco fotografías de los siete transectos, está indicada en la tabla 9.

4.3 Correlaciones de las variables LAI y IAV

Las correlaciones entre LAI y IAV para cada transecto se describen a continuación.

Los valores en la línea de tendencia en el transecto 1 figura 44 están altamente distribuidos, a simple vista se observa que existe una heterogeneidad en las lecturas; aunque el coeficiente de correlación es el segundo más alto 0,79, se podría establecer una correlación puntual regresiva. Los valores de IAV se incrementan gradualmente con relación al LAI ver figura 43.

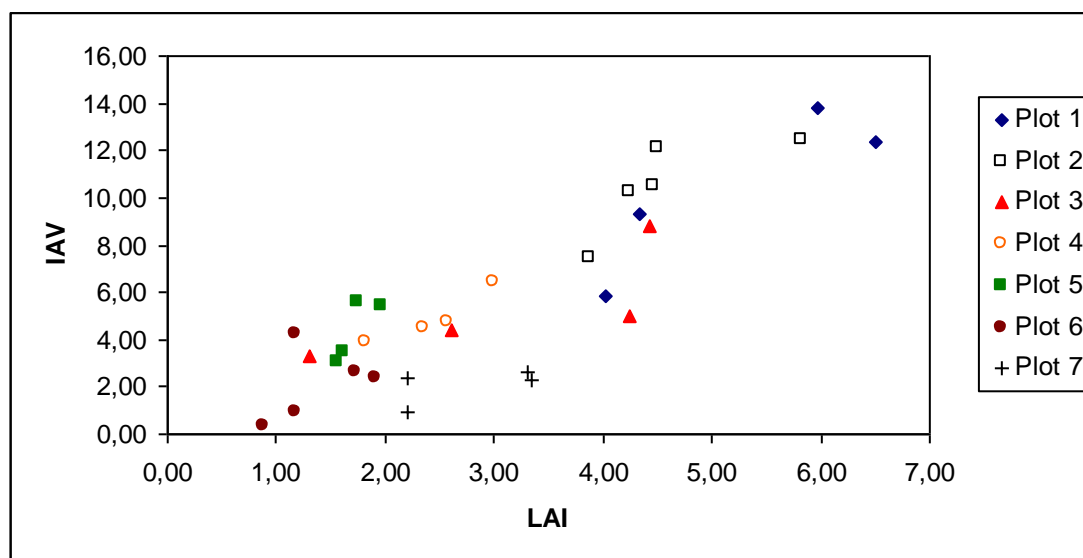


Figura 43: Cuadro de dispersión de valores de LAI con relación al IAV en todos los transectos

El transecto 2 tienen el coeficiente de correlación más bajo 0,60, si bien se observa una mejor agrupación de datos, los incrementos de IAV son muy bruscos en relación a LAI produciendo una pendiente menor en la línea de tendencia con relación al transecto 1.

Para el transecto 3 el coeficiente de correlación es 0,69. Los valores indican una heterogeneidad bien alta, la cual es observada tanto para IAV como para LAI ya que estos se disponen separados a lo largo de la línea de tendencia.

El transecto 4 es más homogéneo, los valores tanto de IAV como de LAI se disponen agrupados con un incremento lineal, además posee el coeficiente de correlación más alto que es 0,83. Este transecto tiene una formula muy similar con la formula del transecto 1 y 2 figura 44.

El transecto 5 tiene una pendiente alta y sus valores también se encuentran agrupados de tal manera que se considera un transecto bastante homogéneo, su correlación es de 0,69 y la formula se diferencia bastante a las del resto de transectos.

Aunque las mediciones para LAI en los transectos 6 y 7 se encuentran entre las mejores por tener las mas bajas desviaciones estándar, figura (8). No se establece ninguna relación entre las variables, se observa en las fotos de la figura 38 y 39 que estos transectos se encuentran en áreas de dosel más abierto, por lo que las hojas tienden a brillar confundándose como áreas abiertas lo cual produce un error en el análisis cluster.

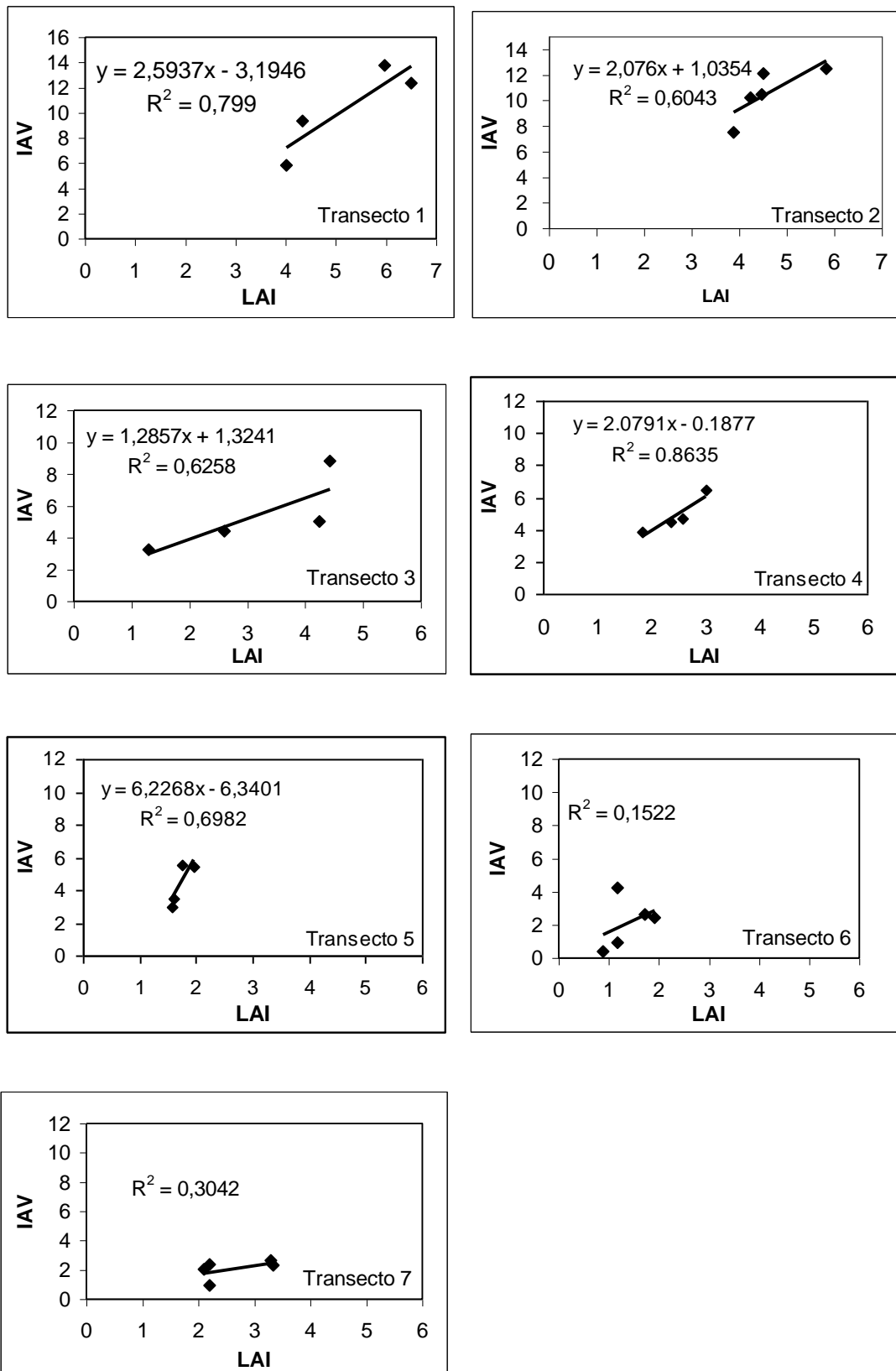


Figura 44: Coeficientes de correlación entre LAI y IAV para cada transecto

Las ecuaciones de las líneas de tendencia para los transectos 1, 2 y 4 son notablemente semejantes, existe una correlación dentro de cada transecto que es aplicable entre estos tres y que también con un poco de diferencia se podría incluir al transecto 3 y 5 por su similitud en la fórmula. De tal forma que para estos transectos existe relación entre LAI y IAV.

Analizando la dispersión de las medidas de IAV en dependencia del LAI a lo largo de todo los transectos se observa una tendencia a la correlación. La figura 45 muestra claramente un valor aceptable de coeficiente siendo de 0,76. La fórmula general para la pendiente de la línea de tendencia es:

$$IAV = 2,1 LAI - 0,8 \quad (9)$$

Remplazando los ejes se tiene la ecuación de IAV en dependencia del LAI. De esta manera se puede remplazar mediciones de LAI de cualquier parte del bosque las cuales serán proporcionales al IAV.

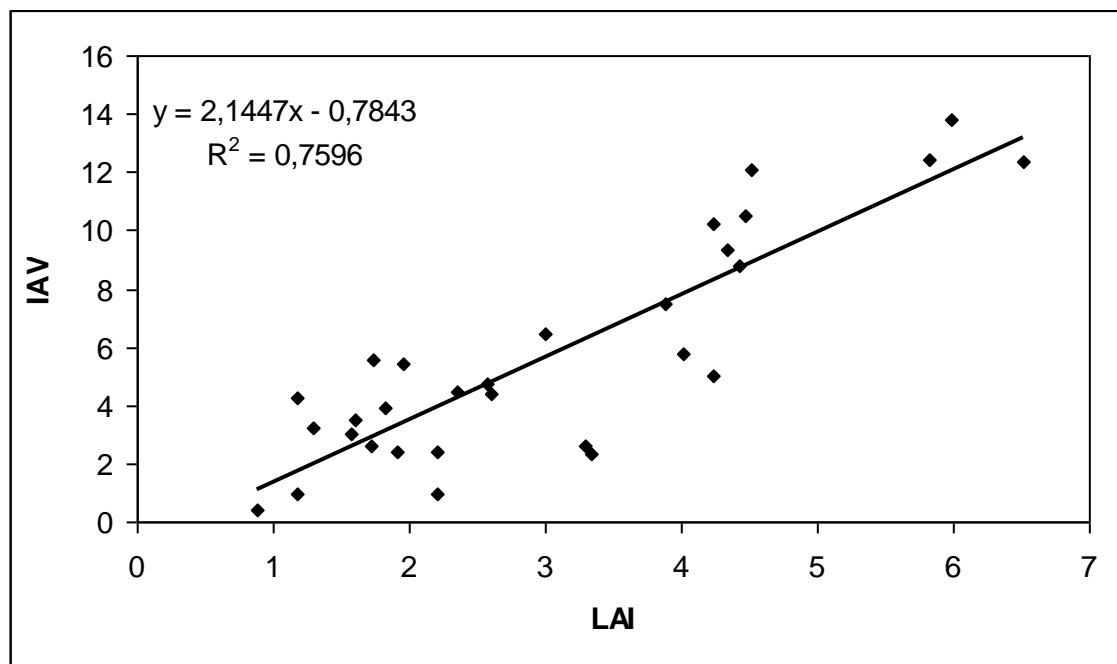


Figura 45: Coeficiente de correlación general de los valores de LAI y IAV todos los transectos

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN EN BASE DE LOS RESULTADOS

5.1 Sobre LAI

Los datos obtenidos de LAI no se podrían comparar con los mismos publicados por diferentes autores. Por ejemplo dentro del Modelo del Bioma (Prentice et al 1992) el bosque tropical posee un índice de área foliar del 9,3, Este valor es usado para todo bosque lluvioso tropical. Pero otros autores han determinado diferentes valores debido a los diferentes métodos usados y el bosque tropical de tierras bajas que es de donde provienen la mayoría de mediciones de LAI, posee diferentes características que nuestro bosque nublado de cresta andina, especialmente por la gradiente de altitudinal.

La comparación de este valor con otros obtenidos en el campo como son los bio-geofísicos, que tienen que ver con la descripción del área vertical, conlleva a acoplar modelos de la atmósfera y vegetación, considerando otros parámetros estructurales como área basal, área de la copa, e inventario de especies.

Sobre las características del cielo, El LAI-200 hace acercamientos mas precisos sin luz solar directa, desde que el brillo foliar incrementa el error en la determinación de LAI. De todas formas, si uno puede sombrear el dosel, o más con el sol en el horizonte, entonces El LAI-200 puede ser utilizado en cualquier día en cualquier lugar.

Las suposiciones validas para poder obtener información estructural son:

Sólo la radiación de luz que atraviesa es vista por el sensor detrás de la copa arbórea mientras que la luz reflejada o absorbida no.

Los elementos del follaje son irregulares en forma y tamaño.

La primera suposición es más valida bajo condiciones de cielo difuso.

Existe una relación indirecta, entre índice de área foliar y la gradiente altitudinal, corroborando lo mencionado en (Bruijnzeel y Proctor 1997). con una tendencia a bajar en dependencia al aumento de la altura, pero con excepción del transecto siete, que aumenta con relación a los transectos 4, 5 y 6

El LAI-2000 con su amplia vista requiere un gran espacio abierto para las lecturas de referencia, en el caso de que una lectura sobre dosel no pueda ser obtenida

5.2 Sobre IAV

Los colores que representan áreas abiertas o áreas cerradas dependiendo del caso, variaron debido de la luminosidad al momento de realizar la fotografía. La exposición de las hojas a la luz del día o en algunos casos al flash de la cámara, hizo necesario prescindir de una fotografía en los transectos 1,3,4,5 y 7 en los cuales debido a al brillo excesivo se confundió hojas con espacio abierto.

En el análisis individual de cada fotografía se constata que la agrupación de colores que representan área abierta y cerrada varia. Esto hace que el análisis visual sea de importancia ya que el criterio del analizador afecta directamente al error sistemático.

Las fotografías que tienen buena correlación con el LAI están en los transectos 4, 6 y 7. Estos se encuentran bajo dosel mas homogéneo de árboles maduros con una media de 18 m, por lo que no varían las lecturas entre si.

El los transectos 1, 2, 3 y 5 el decrecimiento en la luz que penetra por debajo del dosel, hace que el efecto de brillo por la orientación de las hojas disminuya, por lo tanto;

La heterogeneidad para los transectos 1, 2 y 3 es apreciable tanto por LAI como por IAV, en los gráficos (1 y 2) las desviaciones estándar de las cinco mediciones para cada transecto de ambas variables indican que los valores medios se correlacionan fluctuando entre valores mínimos y máximos similares para cada transecto.

Los incrementos bruscos de IAV en relación de LAI, como en el caso del transecto 2 se deben a las fracciones de espacio abiertos captadas por las fotografías, en dependencia del espesor vertical de la vegetación.

5.3 Sobre la correlación IAV y LAI.

La dispersión de los valores LAI y IAV en toda el área de estudio tiende a correlacionarse como se lo indica en el gráfico (4 y 5).

Comparado con el LAI medido por Anhuf-Rollenbeck (2000) para bosque tropical de 4,24 está un poco lejos, pero esta diferencia de valores puede darse debido al incremento de la gradiente altitudinal; además la clasificación del bosque nublado de montaña andina, es diferente a bosque lluvioso tropical, así se aplicaría una diferencia.

Las fotografías de IAV representan dos dimensiones en un ángulo de vista inferior al ángulo

del sensor de medición del LAI y que además determina tres dimensiones.

análisis de fotografías con lentes hemisféricos tipo de ojo de pescado se recomienda para una evaluación más concreta de la estimación de la cobertura vertical vegetal por este método. Al mismo tiempo que se igualarían de mecanismos de evolución como al del LAI.

Se corrobora una tendencia a la correlación entre LAI y altura.

Se cuestiona la hipótesis de correlación IAV e incremento de altura.

Existe un coeficiente de correlación general de 0,76, considerado bueno, pero la ecuación general para la correlación LAI e IVA se podría mejorar con el incremento de transectos para determinar una mayor amplitud de valores comparables.

Para los transectos 6 y 7 no existe ninguna correlación, debido a que se encuentran en una área donde existen muchos claros en el bosque, la vegetación es más dispersa y la altura de los árboles es baja, aumentando así el error de las mediciones tanto para LAI con el sensor óptico como por las fotografías digitales.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON, M. 1971. Radiation and crop structure. p 412-466.
- ANHUF, D. y ROLLENBECK, R. (2001): Canopy structure of the Rio Surumoni rain forest and its influence on microclimate, *Ecotropica*, Vol. 7, No.1-2.
- BURKARD, R., BUETZBERGER, P., y EUGSTER, W. 2002. Vertical fogwater flux measurements above an elevated forest canopy at the Lágeren research site, Switzerland, 98-99.
- CHEN, J., CIHLAR, J., y PENNER, M. 1998. Retrieval of boreal forest leaf area index from multiple scale remotely sensed vegetation indices. Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS), Oak Ridge National Laboratory (ORNL). <http://boreas.gsfc.nasa.gov/BOREAS/>
- GARCIA, C. 1989, análisis y estudios climatológicos en el ecuador, 218pp.
- GOEL, N., y STREBEL, D. 1984. Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies. *Agron. J.* 76:80-82.
- HERNANDES, R., et al.1991. Metodología De La Investigación.McGraw-Hill, México 505:214-216, pp.
- JORDAN, H. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50: 63-67.
- JOSEPH, E., SICKLES II., JEFFREY, W.G. 2002. Wet deposition from clouds and precipitation in tree high elevation regions of the Eastern United States, 278-288.
- JUVIK, U., y NULLET, D. [199]. Comments on " A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions",21:08-21
- KARUNAICHAMY, K., y ORTIZ R. 1995. Effects of light environment and successional status on lightfleck use by understory trees of temperate and tropical forests. *Tree Physiology* 16: 69 – 80.
- MAPA del ECUADOR, <http://go.hrw.com/atlas/span-htm/ecuador.html>, consulta en línea, consultado en 11/07/2006.
- MAPA de SUDAMERICA, <HTTP://www.luventicus.org/articulos/03JyE003/ecuador.html>, consulta en línea, consultado en 11/07/2006.
- MCNOUGHTTON, K., y JARVIS, P. 1983. Predicción de efectos de cambios de la vegetación sobre la transportación y evaporación. p. 1-14 en T.T. Kozlowsky (ed) *Water deficits and plant growth*. Vol. VII. Academic Press, NY.

- MILLER, JB. 1967. A formula for average foliage density. *Aust. J. Bot. sensing and plant ecology*. Springer Verlag, Berlin. 15: 141-144.
- OESKER, M. 2001. Räumliche Heterogenität der Kronentraufe in einem tropischen Bergregenwald. Doktorarbeit. Universität Bielefeld. Deutschland
- PARKER, G. 1995. Structure and Microclimate of forest canopies, en Lowman, M.D., y Nadkarni, N. (eds.). *Forest canopies*. San Diego. Pp. 73-106
- ROLLENBECK, R., BENDIX, J., y FABIAN, P. (2004): Spatial and temporal dynamics of atmospheric water- and nutrient inputs in tropical mountain forests of southern Ecuador. *Proceedings of the 2nd int. Conference on tropical montane cloud forests, Waimea, Hawaii (accepted)*.
- ROSS, J. 1981. *The radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Junk, The Hague.
- ROSS, J., y MYNENI, R. 1990. Photon vegetation interaction: Application in optical remote
- SCHEMENAUER, R.S., y CERECEDA, P. 1994. A proposed fog collector for use in high elevation regions. *Journal of Applied Meteorology* 33, 13-22.
- SCHRUMPF, M., GUGGENBERGER, G., SCHUBERT, C. VALAREZO, C. ZECH, W. (2001): Tropical montane rain forest soils: development and nutrient status along an altitudinal gradient in the South Ecuadorian Andes. *Die Erde*, en prensa.
- SHUTTLEWORTH, W. 1989. Micrometeorology of temperate and tropical forest. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 324: 299-334.
- SIERRA, R. 1999, propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental.
- SMITH, N., BORSTAD, G., HILL, D., y KERR R. 1991. Using high-resolution airborne spectral data to estimate forest leaf area and stand structure. *Can. J. For. Res.* 21: 27-32.
- SOIL SURVEY STAFF. (1997): *Keys to Soil Taxonomy*, 7th edition. SMSS technical monograph No. 19, Pocahontas Press, Blacksburg, Virginia, USA.
- STEINHARDT, U. (1979): Untersuchungen über den Wasser- und Nährstoffhaushalt eines andinen Wolkenwaldes in Venezuela. *Göttinger Bodenkundl.* Berlin. 56.
- SZARZYNSKI, J. 2000. Energie- und Wasserhaushalt eines amazonischen Regenwalds. *Mannheimer Geographische Arbeiten* 53.
- SZARZYNSKI, J., y ANHUF, D. [sa]. In press. Micrometeorological conditions and canopy energy exchanges of a neo-tropical rainforest (Surumoni-Crane-Project, Venezuela). *Plant Ecology*.

- TUKEY, Jr. (1970): The leaching of substances from plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 31, 305-324.
- ULRICH, B. (1983): Interactions of forest canopies with atmospheric constituents: SO₂, alkali and earth alkali cations, and chloride. En: Ulrich B. & J. Pankrath (eds.): *Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems*. D. Reidel Publishing, Dordrecht, The Netherlands, 33-45.
- VENEKLAAS, E. (1990): Nutrient fluxes in bulk precipitation and throughfall in two montane tropical rain forests, Colombia. *J. Ecol.* 78, 974-992.
- VOGELMANN, B. 1973. Fog precipitation in cloud forest of Eastern Mexico. *Bioscience* 23, 96-100.
- WELLES, J. 1990. Some indirect methods of estimating canopy structure. P 31-43 En: Norman, J & Goel N. (ed.) *Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions*. Harwood Academic Publishers GmbH, London.
- WOOD, T., y Bormann, F. 1975. Increases in foliar leaching caused by acidification of an artificial mist. *Ambio* 4:96-117.

ANEXOS

Anexo 1: Mediciones originales de LAI y su promedio para cada transecto

Transecto 1			Transecto 2			Transecto 3		
Serie	LAI	Promedio	Serie	LAI	Promedio	Serie	LAI	Promedio
serie 1	6,02	6,51	serie 1	4,04	4,512	serie 1	1,2	1,31
	6,61			4,24			1,43	
	6,86			4,45			1,35	
	6,74			4,84			1,39	
	6,31			4,99			1,17	
serie 2	6,01	5,98	serie 2	4,43	3,88	serie 2	4,16	4,43
	5,9			4,88			5,02	
	5,97			2,43			4,19	
	6,08			4,02			4,06	
	5,93			3,65			4,74	
serie 3	4,68	4,02	serie 3	5,89	5,83	serie 3	4,22	4,24
	4,29			5,85			4,15	
	3,23			5,93			4,54	
	3,64			5,46			3,87	
	4,27			6,04			4,44	
serie 4	5,11	4,34	serie 4	4,22	4,244	serie 4	2,48	2,61
	4,85			4,15			2,37	
	4,89			4,54			1,42	
	2,29			3,87			3,56	
	4,54			4,44			3,21	
			serie 5	5,15	22,37 4,474			
				4,14				
				5,32				
				3,91				
				3,85				

Transecto 4			Transecto 5			Transecto 6		
Serie	LAI	Promedio	Serie	LAI	Promedio	Serie	LAI	Promedio
serie 1	1,98	2,348	serie 1	1,2	1,61	serie 1	1,06	0,882
	2,65			1,86			0,9	
	1,5			2,39			1,35	
	2,38			1,08			0,43	
	3,23			1,5			0,67	
serie 2	2,01	1,818	serie 2	0,5	1,96	serie 2	1,37	1,168
	1,34			1			1	
	1,67			2,33			1,13	
	1,79			3,48			1,18	
	2,28			2,47			1,16	
serie 3	2,01	2,572	serie 3	1,83	1,74	serie 3	0,01	0,182
	2,55			1,93			0,2	
	2,76			0,86			0	
	2,8			1,78			0,25	
	2,74			2,29			0,45	
serie 4	3,76	3,02	serie 4	1,28	1,57	serie 4	1,41	1,72
	2,8			1,43			1,76	
	2,83			1,7			2,43	
	2,05			1,66			1,33	
	3,66			1,8			1,67	
						serie 5	2,3 2,31 1,45 1,91 1,58	1,91

Transecto 7		
Serie	LAI	Promedio
serie 1	2	2,2
	2,5	
	1,8	
	2,4	
	2,3	
serie 2	2,9	3,34
	3,8	
	4,2	
	2,8	
	3	
serie 3	2,1	2,2
	1,8	
	2,2	
	2,4	
	2,5	
serie 4	3,4	3,3
	2,9	
	3,3	
	3,8	
	3,1	

Anexo 2: Valores medios de LAI y IAV para cada transecto

LAI	IAV	Transecto	LAI	IAV	Transecto
6,51	12,38	1	1,61	3,49	5
5,98	13,77		1,96	5,42	
4,02	5,8		1,57	3,01	
4,34	9,35		1,74	5,56	
5,21	10,33	promedios	1,72	4,37	promedios
4,51	12,12	2	0,88	0,38	6
3,88	7,49		1,91	2,41	
5,83	12,46		1,18	4,25	
4,24	10,23		1,72	2,62	
4,47	10,48		1,17	0,93	
4,61	10,17	promedios	1,5	2,55	promedios
1,3	3,26	3	2,2	2,37	7
4,43	8,8		3,34	2,32	
4,24	5		2,2	0,93	
2,61	4,41		3,3	2,64	
3,15	5,37	promedios	2,76	2,07	promedios
2,35	4,46	4			
3	6,44				
2,57	4,71				
1,82	3,89				
2,44	4,88	promedios			

Anexo 3: Tabla estadística de IAV para todos los transectos (T)

	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7
valor medio	10,33	10,56	5,37	4,88	4,37	2,12	2,06
error estándar	1,77	0,88	1,20	0,55	0,65	0,68	0,30
mediana	10,87	10,48	4,71	4,59	4,46	2,41	2,32
desviación estándar	3,54	1,97	2,40	1,10	1,31	1,53	0,67
Varianza	12,51	3,90	5,76	1,21	1,71	2,33	0,44
pendiente	0,66	0,98	1,45	1,41	0,11	0,34	1,70
rango de valores	7,97	4,97	5,54	2,55	2,55	3,87	1,71
Máxima	5,80	7,49	3,26	3,89	3,01	0,38	0,93
Mínima	13,77	12,46	8,80	6,44	5,56	4,25	2,64
Suma	41,30	52,78	21,47	19,50	17,48	10,59	10,31
Número	4,00	5,00	4,00	4,00	4,00	5,00	5,00

Anexo 4: Tabla estadística de LAI para todos los transectos (T)

	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7
valor medio	5,21	4,59	3,15	2,44	1,72	1,37	2,52
error estándar	0,61	0,33	0,74	0,25	0,09	0,19	0,35
mediana	5,16	4,47	3,43	2,46	1,68	1,18	2,20
desviación estándar	1,22	0,74	1,48	0,49	0,18	0,43	0,77
varianza	1,49	0,55	2,18	0,24	0,03	0,18	0,60
pendiente	0,10	1,58	0,62	0,28	1,12	0,34	0,08
rango de valores	2,49	1,95	3,13	1,18	0,39	1,03	1,77
máxima	4,02	3,88	1,30	1,82	1,57	0,88	1,57
mínima	6,51	5,83	4,43	3,00	1,96	1,91	3,34
suma	20,85	22,93	12,58	9,74	6,88	6,86	12,61
número	4,00	5,00	4,00	4,00	4,00	5,00	5,00

Anexo 5: Ejemplo de medidas de LAI en bosques tropicales

Ubicación, tipo de vegetación	Método	LAI	Fuete / ano
Marabá, Brasil, bosque tropical de tierra baja	muestreo de área foliar de litera	5.38	Roberts <i>et al.</i> 1996
Manaos, Brasil, bosque tropical de tierra baja	muestreo de área foliar de litera	6.1	Roberts <i>et al.</i> 1996
	fotografías hemisféricas	3.9	Honzák <i>et al.</i> 1996
	sunfleck photometry	4.6	Honzák <i>et al.</i> 1996
	muestreo destructivo	5.7	Roberts <i>et al.</i> 1996
Ji-Paraná, Brazil, tropical moist forest	Transmisividad de perfil de luz	4.4	Roberts <i>et al.</i> 1996
Ji-Paraná, Brazil, tropical moist forest	litter leaf-area sampling	4.63	Roberts <i>et al.</i> 1996
Panama, tropical moist forest	destructive sampling	22.4	Honzák <i>et al.</i> 1996
North America, bosque de savana	métodos ópticos	3.5	Asner <i>et al.</i> 1998

Tomado de Anhuf, D. y Rollenbeck, R. (2001): Canopy structure of the Rio Surumoni rain forest and its influence on microclimate, *Ecotropica*, Vol. 7, No.1-2.

Anexo 6: Foto mostrando la medición de LAI con el sensor óptico LiCOR-LAI200, en uno de los transectos dentro del área de estudio

