

ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE PENETRACIÓN DEL SISTEMA ALS40
LÍDAR AEROTRANSPORTADO EN LA COBERTURA VEGETAL PRESENTE
EN LAS ISLAS: LA VICIOSA Y EL MORRO

MARY LUZ RENGIFO BUITRAGO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS, Y DE LA EDUCACIÓN
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2007

ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE PENETRACIÓN DEL SISTEMA ALS40
LÍDAR AEROTRANSPORTADO EN LA COBERTURA VEGETAL PRESENTE
EN LAS ISLAS: LA VICIOSA Y EL MORRO

MARY LUZ RENGIFO BUITRAGO

Trabajo de grado presentado como
requisito parcial para optar al título
de Ingeniera Física

Director:

Ing. MARIO MILVER PATIÑO VELASCO

Universidad del Cauca

Codirector:

Ing. MILTON GABRIEL PUENTES

Dirección General Marítima – Centro Control Contaminación del Pacífico

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2007

NOTA DE ACEPTACIÓN

.....
.....
.....

Mg. JAURI LEON TELLEZ

Ing. RUBIEL VARGAS CAÑAS

Ing. MARIO MILVER PATIÑO

Popayán, 29 de mayo de 2007

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos a:

La Universidad del Cauca, departamento de Física, por que fueron mi casa de formación profesional, a mis profesores, por sus enseñanzas y consejos que día a día me llenaron de conocimientos y experiencias para enfrentarme a la vida.

Al Centro Control Contaminación del Pacífico, por brindarme la oportunidad de realizar esta investigación en sus instalaciones y proporcionarme los equipos y material necesario para el desarrollo del proyecto, y a todo el personal de AMIZC.

Al Ingeniero Milton Puentes, coordinador del área de SIG y Sensores Remotos del CCCP, por toda la ayuda brindada mientras estuve en Tumaco y por la orientación para el desarrollo de la investigación.

Al Ingeniero Mario Patiño, mi director de tesis, por sus asesorías y por orientación para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto.

A mis padres por su preocupación y constante apoyo y a Edwin una persona muy especial en mi vida, que siempre estuvo presente en los momentos difíciles, y que de una u otra forma me orientó para salir adelante y culminar con éxito esta etapa.

A mis amigos (A, P, F, H, L, I, D, D F, L P) por el apoyo y ánimo que siempre me han brindado, a la gente linda que conocí en Tumaco, a Adri y Clau, por aguantarme todos los días en la Casucha, por sus consejos y por todo lo que compartimos, a Jorge E, alegrarme el día a día y por pelearme en la oficina, y Jorge Armando, Julian, Ruby y Angélica por su amistad.

Y a todas aquellas personas que de forma directa o indirecta contribuyeron al buen término de este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	14
UBICACIÓN GEOGRÁFICA	14
COBERTURA VEGETAL Y USOS DEL SUELO	15
ASPECTOS METEOROLÓGICOS	19
SUELOS	20
2. CARACTERIZACIÓN DE COBERTURAS TERRESTRES A PARTIR DE LA PERCEPCIÓN REMOTA	21
ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	23
PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	25
INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA SUPERFICIE TERRESTRE	27
REFLECTIVIDAD ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN, SUELO Y AGUA	29
Comportamiento espectral de la vegetación	30

Características espectrales del suelo	33	
Comportamiento espectral del agua	33	
3. TÉCNICA LiDAR		35
PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO	36	
INTERACCIÓN CON LAS DIFERENTES COBERTURAS	40	
TIPOS DE LiDAR	42	
APLICACIONES DESARROLLADAS CON LA TÉCNICA	44	
4. SISTEMA ALS40		48
PARTES DEL SISTEMA	49	
Montaje del escáner	50	
Estante del equipo	51	
SOFTWARE DE POST PROCESO	52	
CONDICIONES AMBIENTALES	53	
REQUERIMIENTOS DE DESEMPEÑO	53	

ECUACIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL ALS	56
Parámetros físicos	57
Parámetros geométricos	59
5. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE PENETRACIÓN DEL ALS40 LiDAR AEROTRANSPORTADO	63
IDENTIFICACIÓN DE COBERTURAS VEGETALES	63
ADQUISICIÓN DE LOS DATOS LiDAR	66
PROCESAMIENTO DE DATOS LiDAR	70
DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PENETRACIÓN DEL SISTEMA LiDAR	74
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	76
ESPECIES VEGETALES	76
TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN LiDAR	80
REFLECTIVIDAD DE LAS COBERTURAS VEGETALES	83
ÍNDICE DE PENETRACIÓN DEL SISTEMA ALS40	86

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXO 1.	104

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especies florísticas presentes en la Bahía de Tumaco	16
Tabla 2. Parámetros del sistema de referencia MAGNA – OESTE	66
Tabla 3. Especificaciones del ALS40 para la toma de datos LiDAR en Tumaco	67
Tabla 4. Tipos de especies vegetales identificadas y utilizadas en el desarrollo del proyecto	79
Tabla 5. Valor de intensidad promedio para las coberturas vegetales y datos estadísticos	85
Tabla 6. Desviación estándar y coeficiente de variación para los valores del LPI	87
Tabla 7. Rangos de clasificación para el índice de penetración	88
Tabla 8. Número de polígonos de la flora identificada en cada rango de clasificación del LPI	89
Tabla 9. Coeficientes de correlación para las coberturas vegetales identificadas en la Zona	95

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación de la zona de estudio	15
Figura 2. Arbustos de mangle, zona ubicada en la isla El Morro	17
Figura 3. Espectro electromagnético	23
Figura 4. Superficies especulares y lambertianas	28
Figura 5. Firmas espectrales típicas de distintas coberturas	30
Figura 6. Partes de un sistema LiDAR aerotransportado	37
Figura 7. Visualización de datos LiDAR del aeropuerto de Tumaco en tres tipos de imágenes	40
Figura 8. Principio de operación de un LiDAR batimétrico y un LiDAR fluorescente	44
Figura 9. Forma de onda de pulsos de energía reflejados por el dosel y superficies del suelo	46
Figura 10. Esquema de trabajo con el ALS40	49
Figura 11. Partes del sistema ALS40	50

Figura 12. Comportamiento de la rata de escaneo en función del campo de visión	54
Figura 13. Comportamiento de los valores máximos de la frecuencia de pulsación para diferentes configuraciones del rango de inclinación	55
Figura 14. Precisión del ALS40 para diferentes alturas de vuelo	56
Figura 15. Elementos geométricos para el cálculo de la huella láser	60
Figura 16. Visualización de algunos parámetros geométricos de un vuelo LiDAR	61
Figura 17. Partes de la hoja de una planta	64
Figura 18. Plan de vuelo para la zona de estudio	68
Figura 19. División del área de estudio por zonas según la hora en que se tomaron los datos	69
Figura 20. En el área marcada se ve una zona aparentemente de vegetación	73
Figura 21. Perfil de línea de la zona marcada en la figura 20	73
Figura 22. Coberturas digitalizadas con la respectiva clasificación por colores	77
Figura 23. Perfil de línea de una zona de vegetación abundante (isla El Morro)	81
Figura 24. Modelos digitales de terreno	82

Figura 25. Representación tridimensional de una cobertura de mango, en el rango de PB	90
Figura 26. Representación tridimensional de una cobertura de matarratón, en el rango de PM	91
Figura 27. Representación tridimensional de una cobertura de pastos, en el rango de PA	91
Figura 28. Correlación entre el LPI y el área en m ²	94
Figura 29. Correlación entre el LPI y la intensidad promedio de la vegetación	94
Figura 30. Digitalización y representación por colores del índice de penetración	98

INTRODUCCIÓN

La teledetección es una de las técnicas más usadas para identificar y medir de forma remota las características de la atmósfera y la superficie terrestre, a partir de diferentes dispositivos, como sistemas ópticos pasivos, fotogrametría e imágenes satelitales; cada una con un propósito específico, el uso de estas tecnologías ha ido revolucionando cada vez más la adquisición de información de los objetos sobre la superficie terrestre.

En la actualidad estas técnicas se ven limitadas, ya que no permiten una estructuración en tres dimensiones del objeto bajo análisis ideales para el desarrollo de aplicaciones forestales, ecológicas y cartográficas; es aquí donde incursiona la tecnología LiDAR, acrónimo del proceso detección y medición a través de luz (*Light Detection And Ranging*), que adquiere datos de posición y altura del objeto/superficie de interés, esto se hace por medio del envío de rayos de luz láser en longitudes de onda en el rango del visible e infrarrojo cercano, hacia la superficie terrestre, mide el tiempo en el trayecto sensor – superficie – sensor, y a partir de este determina la distancia a la cual se encuentra el objeto. El sistema está compuesto por un GPS (*Global Position System*) diferencial, una IMU (*Inertial Measurement Unit*), que son los encargados de proporcionar datos de posición y actitud de la aeronave que transporta el sistema y un escáner láser. Después del pre procesamiento de ésta información, se obtienen puntos coordenados (x, y, z) dependiendo del sistema de coordenadas geográficas que se desee.

A partir de finales de los años 70 el LiDAR se empezó a usar para determinar la altura del terreno, pero para la época los equipos eran complejos y solo permitían obtener la altura directamente bajo la trayectoria del avión y no contaban con sistemas de orientación (GPS y IMU), como se tiene hoy día, situación que ha favorecido la utilización de este tipo de

sistemas en la caracterización de terrenos. En los últimos años, además de ser utilizada como una técnica alternativa a las técnicas topográficas y fotogramétricas, se ha usado para fines investigativos, en campos forestales, ambientales, dinámica y usos del suelo. Los datos LiDAR permiten describir estructuras forestales, como volúmenes de las enramadas de los bosques, distribución vertical del dosel, diversidad forestal, cantidad de biomasa sobre el suelo cubierto por vegetación, estudios de erosión y acresión costera entre otros, ubicándose como una de las técnicas aerotransportadas más precisas para adquirir información de posición de cualquier objeto sobre la superficie terrestre; además, algunos equipos permiten el registro de la cantidad de energía reflejada por la cubierta medida.

En Colombia se tiene registro de investigaciones con LiDAR, pero de tipo atmosférico y sólo hasta el año 2006 se iniciaron estudios con la técnica aerotransportada de adquisición de información de la superficie terrestre, siendo La Dirección General Marítima (DIMAR) a través del Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP), los primeros en obtener información de posición y altura con tecnología de vanguardia, más exacta, detallada y oportuna en comparación con técnicas anteriores; es así como se adquieren datos LiDAR y tomas aerofotogramétricas simultáneas (adquisición de fotografías aéreas) con un sistema ALS40 y cámara métrica digital aerotransportado, en dos zonas piloto, La Costa Caribe y La Bahía de Tumaco, para ser empleados en el desarrollo del proyecto “Estudio para determinar técnicamente la Jurisdicción de DIMAR”. Hasta el momento se han desarrollado estudios para determinar la línea de más alta marea y modelos del terreno. Un parámetro importante en estos estudios es estimar el grado de influencia que tiene la vegetación sobre los datos obtenidos, lo que depende de la penetración del haz láser en la cobertura vegetal, información de apoyo que mejorará la adquisición y uso de los datos.

Este documento se estructura de la siguiente forma, en el capítulo primero se presenta la ubicación y descripción de los factores más importantes de la zona de estudio como el tipo de cobertura vegetal presente y los usos del suelo, los aspectos meteorológicos y la clase de

suelo que lo conforma; parámetros idóneos para conocer de que forma se ve afectada la técnica en ésta zona.

El capítulo segundo trata el tema de la teledetección a nivel general, los principios físicos de la interacción de la energía con las cubiertas terrestres, y el comportamiento espectral del suelo, la vegetación y el agua, dando conceptos básicos para el entendimiento de la percepción remota.

En el capítulo tercero se puntualiza en la técnica LiDAR, sus principios físicos de funcionamiento, la interacción con las diferentes coberturas, los tipos de LiDAR y las aplicaciones desarrolladas con la tecnología.

El capítulo cuarto expone las características del sistema ALS40 usado para la toma de los datos LiDAR en La Bahía de Tumaco, las partes que lo componen, los requerimientos de desempeño y las ecuaciones para la determinación de los parámetros de funcionamiento, como la divergencia del haz láser usado, el diámetro de la huella láser, el número de puntos por área, entre otros, importantes para el buen desempeño del sistema en la adquisición de la información.

En los capítulos quinto y sexto se presentan, de una manera detallada, la metodología desarrollada para el cumplimiento de los objetivos planteados, y los resultados obtenidos que determinan la capacidad de penetración del sistema ALS40 en la zona de estudio.

I. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

UBICACIÓN GEOGRÁFICA

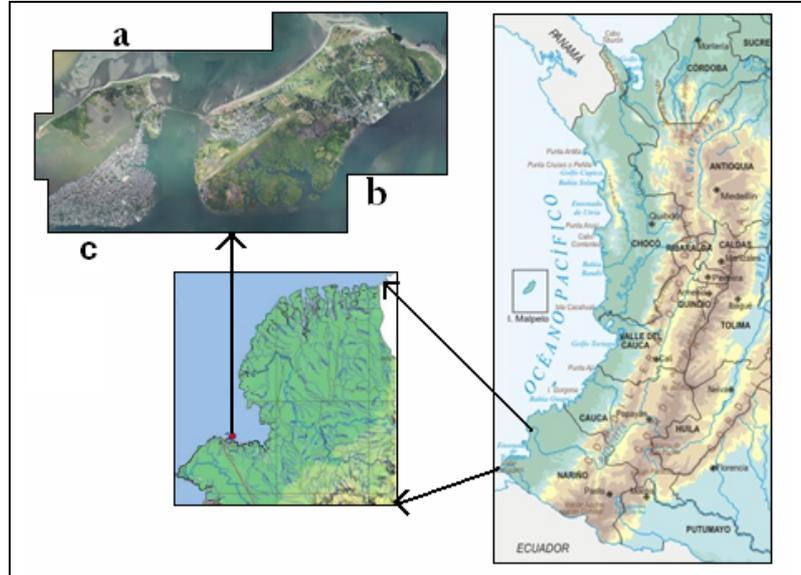
La zona de estudio se encuentra ubicada al sur de Colombia, en El Litoral Pacífico colombiano, departamento de Nariño, específicamente en la bahía de Tumaco, comprendida al sur por el archipiélago de Tumaco y al norte por Punta Cascajal en la Isla del Gallo en una longitud de 27 Km. [1]

El borde costero de ésta bahía comprende dos municipios: San Andrés de Tumaco que cubre el 75% de la zona y Francisco Pizarro con el 25% restante; constituye la mayor entrante de la costa Pacífica colombiana y está ubicada en cercanías de la frontera de Ecuador, entre las latitudes 1° 45' y 2°. 00' N y las longitudes 78° 30' y 78° 45' O. [2]

El casco urbano y la zona de expansión de El municipio de San Andrés de Tumaco están dispuestos en área continental e insular, ésta última conformada por las islas de Tumaco, La Viciosa y El Morro, unidas al continente y comunicadas entre si por los puentes de El Pindo y El Morro.

La isla La Viciosa comprende un área aproximada de 0.69Km², entre longitudes 78° 45' 36.53" W y 78° 46' 33.23" W y latitudes 1° 49' 28.07" N y 1° 48' 57.67" N; para la isla El Morro el área es de 5.20Km², localizada entre longitudes 78° 43' 43.10" W y 78° 45' 15.12" W y latitudes 1° 49' 43.75" N y 1° 48' 18.61" N. (Proyección: UTM zona 17, Datum: WGS84)

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. a) Isla La Viciosa, b) Isla El Morro, c) Isla de Tumaco



COBERTURA VEGETAL Y USOS DEL SUELO

La zona de estudio se encuentra en una región lluviosa, compuesta principalmente por bosque húmedo tropical, generalmente en el borde costero. A lo largo de la bahía se puede encontrar una exuberante y diversa vegetación; el interior por ser un territorio urbano está compuesto, en gran parte, por árboles frutales y plantas ornamentales.

La vegetación de tipo arbóreo es caracterizada por su composición florística y la estructuración de doseles densos; los dos tipos de bosques que se presentan son de llanura y de manglar. El bosque de llanura, con flora marina, puede encontrarse en playones de arena con escasa cobertura de arbustos, predominan las gramíneas y hierbas de bajo porte, distribuidos a lo largo de la franja costera en zonas no cubiertas por manglar.

En la tabla 1 se relacionan las especies florísticas predominantes en la bahía de Tumaco.

Tabla 1. Especies florísticas presentes en La Bahía de Tumaco. [2]

Nombre común	Nombre científico
Bejuco	Rhabdadenia biflora
Calabacillo arisco	Crescentia spp. O Amphitecna sp.
Sapotolongo	Pachira aquatica
Chupallas	Bromeliaceae
Icaco	Chrysobalanus icaco
Cañabrava	Gynerium sagittatum
Majagua	Hibiscus tiliaceus
Imbiande	Hibiscus spp
Pelajo	Ardisia sp
Naidi	Euterpe oleracea
Barbudo suela	Pterocarpus officinalis
Barbasco	Papilionaceae
Ranconcha cangrejal	Acrostichum aereum
Yazmandé o matapalo	Rubiaceae

El bosque de manglar es la principal asociación vegetal de la zona y está constituido por árboles entre 25 y 30 m de altura, suelen encontrarse mezclados con gramíneas, icacales y vegetación firme. La figura 2 muestra la cobertura vegetal correspondiente a bosque de manglar de baja altura, también se pueden observar las estratificaciones conformando los espesos doseles.

Figura 2. Arbustos de mangle, zona ubicada en la isla El Morro



Las coberturas vegetales y el uso del suelo registrado en la bahía de Tumaco se describen a continuación, se hace mayor énfasis en el bosque de manglar, se debe a que es la cobertura predominante en la zona. Las diferentes asociaciones boscosas se deben a diversos factores, entre ellos la variedad de suelos, la salinidad proporcionada por el agua, la humedad, además de la intervención del hombre.

- ❖ **Bosque de manglar poco intervenido:** hace referencia al bosque de manglar modificado, por efecto de la tala selectiva y aprovechamiento para carbón y leña. También se encuentran pequeñas áreas de manglar en etapa de sucesión temprana con altura variable, en algunas zonas puede ser homogénea (25 – 35 metros) o heterogénea (20 – 40 metros), se encuentran especies como *Rhizophora* spp, asociado con *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa*, *Pelliciera rhizophorae*, *Conocarpus erectus* y *Mora megistosperma*.

- ❖ **Bosque de manglar de baja altura:** como su nombre lo indica se caracteriza por tener alturas bajas, generalmente entre 4 y 12 metros, debido a las condiciones edáficas que impiden su buen desarrollo, con dominancia de las mismas especies que el anterior.
- ❖ **Bosque de manglar medianamente intervenido:** registra aprovechamientos para obtener leña, carbón y pilotes, posee una altura variable (12 – 25 metros), presenta las mismas especies del bosque de manglar de baja altura.
- ❖ **Bosque de manglar altamente intervenido:** Su altura homogénea está entre 12 y 25 metros, con intervenciones entre talas selectivas o rasas por mechones, para aprovechamientos intensivos de la madera.
- ❖ **Bosque de manglar natal:** La intervención es baja, presenta alturas de 10 a 30 metros, con dominancia de *Mora megistosperma*, asociado con especies de mangle, palmas (*Euterpe* spp) y algunas especies de bosque aluvial contiguo.
- ❖ **Cultivos de coco:** Se encuentran coberturas de cultivos de coco con presencia de manglar de porte bajo, con alturas entre 4 y 12 metros; también pueden observarse cultivos de palma africana, caña y arroz, entre otros.
- ❖ **Bosque aluvial:** Presenta una topografía plana, se ubica cercano a la costa, detrás de los bosques de mangle, con especies típicas del bosque húmedo tropical.
- ❖ **Bosque de colina:** La topografía varía de quebrada a abrupta, se ubica después del bosque de mangle o del bosque aluvial, caracterizado por poseer vegetación frondosa y heterogénea. [2]

ASPECTOS METEOROLÓGICOS

La región de Tumaco presenta condiciones climáticas de pluviosidad variable, en donde las altas temperaturas son frecuentes. Posee una humedad relativa del 88% casi constante a lo largo del año, la radiación y brillo solar tienen índices bajos.

Los valores anuales de precipitación registrados a través del tiempo muestran que el orden de precipitación es de 3066 mm, con fluctuaciones entre 1928 mm y 4206.3 mm donde los valores inferiores sugieren la presencia del Fenómeno de El Niño. La fuerte inestabilidad de masas de aire húmedas que son simultáneamente cálidas son las causantes de la intensidad y abundancia de las lluvias tropicales. El calentamiento diurno acentúa esta inestabilidad por lo que son muy frecuentes las precipitaciones en horas de la noche.

La temperatura ambiente durante época húmeda es superior o igual a 25.8 °C, a excepción del mes de enero cuyo registro es de 25.5 °C; abril y mayo son los meses que presentan mayor índice de pluviosidad y una temperatura ambiente de 26. °C, entre junio y julio hay una transición de húmedo a seco, disminuyendo paulatinamente las lluvias; agosto y noviembre conforman la época seca; diciembre y enero corresponden a una época de transición de seco a húmedo, donde las lluvias aumentan considerablemente; la temperatura ambiente disminuye y se estabiliza por debajo de los 25.7 °C entre julio y diciembre. Este comportamiento está determinado por la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical ZCIT sobre la región. Las temperaturas durante el día y la noche y entre épocas seca y húmeda tienen muy poca variación, ya que la zona se encuentra muy cerca al mar, lo cual ha originado condiciones favorables para los pobladores y el desarrollo de la agricultura. [2]

La elevada pluviosidad conjugada con el relieve abrupto hace que se presenten suelos con grados extremos de alteración, incidiendo directamente en el uso forestal

SUELOS

La bahía de Tumaco esta conformada, en general, por playas, bancos y barras pertenecientes a formas marinas que comprenden suelos derivados de materiales sedimentarios recientes, constituidos por arena, grava y cantorrodados provenientes del mar y tierra firme; éstos son suelos superficiales que se ven afectados en su profundidad por el nivel freático, sufren inundaciones regulares debido al movimiento de las mareas y presentan reacción muy ácida en todo el perfil, debido al cinturón de manglares a lo largo del litoral.

2. CARACTERIZACIÓN DE COBERTURAS TERRESTRES A PARTIR DE LA PERCEPCIÓN REMOTA

El término inglés *remote sensing* en su traducción latina es interpretado como percepción remota y constituye el marco de estudio de la teledetección, que no solo enmarcan el proceso para obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento.

La observación remota es definida como la técnica que permite obtener información a cerca de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis de datos adquiridos por un dispositivo (sensor) que no está en contacto físico con los objetos de investigación. Los datos registrados pueden ser de muchas formas que incluyen variación en distribución de fuerzas, distribución de ondas acústicas o distribución de energía electromagnética. [3]

Los sensores instalados en plataformas espaciales o aerotransportadas adquieren información sobre la superficie terrestre, asumiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial emitido por el mismo sistema (sensor¹), o por emisión propia; de esta forma, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor es también una forma de radiación electromagnética. Algunos sensores remotos comunes son la cámara fotográfica, el escáner mecánico, el sistema radar y el LiDAR.

Las tres formas de adquirir información a través de sensores remotos son: por *reflexión*, donde la energía que reflejan los objetos proviene de la luz solar, por *emisión*, la energía es emitida por los mismos objetos, o por *reflexión – emisión*, en este caso el sensor emite y luego capta la reflexión. Esto nos permite hacer una división entre *sensores remotos pasivos*, que son

¹ Se entiende como sensor, a todo el sistema, tanto el sensor como la plataforma que lo alberga, éste se encarga de captar la energía, codificarla y grabarla; en el caso de sensores activos el haz energético es emitido por el sensor.[5]

aquellos que detectan solo la radiación emitida de forma natural por los objetos debido a la interacción con un foco de energía externo al dispositivo, como la luz solar, y *sensores remotos activos*, que se caracterizan por producir artificialmente la energía para ser emitida al objeto de estudio y que este manifieste respuesta ante ella.

En cualquiera de los dos casos la energía que llega al sensor es una forma de energía electromagnética, la cual tiene un comportamiento dual, e independiente que puede ser descrita como un haz ondulatorio o como una sucesión de unidades discretas de energía. El modelo ondulatorio muestra que la radiación electromagnética se desplaza de un lugar a otro por medio de una serie de ondas armónicas y continuas, el patrón de estas ondas está compuesto por dos campos oscilantes, perpendiculares entre si y perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, el campo magnético y el campo eléctrico. En este caso la radiación electromagnética es caracterizada por la *longitud de onda* λ , que corresponde a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda, y la *frecuencia* ν que hace referencia al número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo; las dos están relacionadas de la siguiente forma:

$$v = \lambda \nu \quad (1)$$

donde $v = \frac{c}{n}$ y representa la velocidad de la luz en un medio de índice de refracción n , c corresponde a la velocidad de la luz en el vacío ($c \approx 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$).

El modelo de partículas, hace énfasis en la composición de la radiación electromagnética por partículas discretas denominadas fotones, donde la intensidad de la radiación electromagnética es directamente proporcional al número de fotones presentes y la energía contenida en éstos se relaciona con la frecuencia por medio de la constante de Planck h .

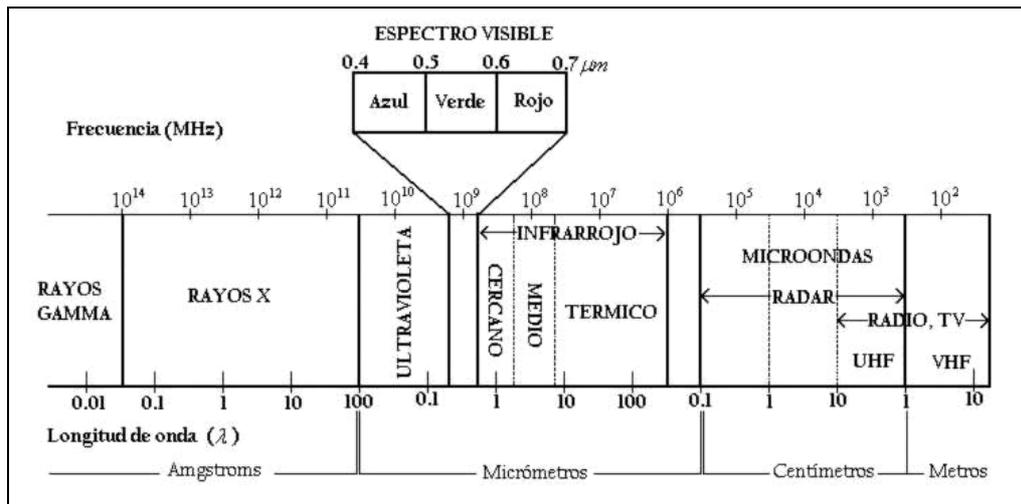
$$E = h\nu \quad \text{o} \quad E = h\frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

Donde, E es la energía del fotón en Julios (J) y $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ la constante de Planck. La ecuación (2) muestra que la cantidad de energía transportada por el fotón es directamente proporcional a su frecuencia, lo que explica porque es más difícil detectar radiaciones de frecuencias bajas.

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

En la detección remota es más común categorizar las ondas electromagnéticas por la ubicación de su longitud de onda en el *espectro electromagnético*, el cual representa un arreglo continuo, consistente y ordenado de radiación electromagnética de acuerdo a su longitud de onda, frecuencia o energía [4] que está conformado por bandas donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar.

Figura 3. Espectro electromagnético. [5]



Las regiones espectrales más destacadas en teledetección son: ultravioleta (UV), visible (VIS), infrarrojo (IR) y microondas.

- ❖ **Ultravioleta:** esta banda se encuentra entre los rayos X y la luz visible con un rango de longitud de onda de $0.01 - 0.4 \mu m$, se divide en UV lejano ($0.01 - 0.2 \mu m$), UV medio ($0.2 - 0.3 \mu m$) y UV cercano ($0.3 - 0.4 \mu m$), la radiación UV no es visible al ojo humano directamente, el sol es la fuente natural de este tipo de radiación, pero las longitudes de onda más cortas que $0.3 \mu m$ son incapaces de atravesar la atmósfera y alcanzar la superficie de la tierra, por lo que para estudios con sensores remotos el intervalo de longitud de onda que se usa es el UV cercano.
- ❖ **Visible:** es la región del espectro más usada, esta abarca de $0.4 - 0.7 \mu m$, el límite de la banda lo establece la sensibilidad del ojo humano, y coincide con las longitudes de onda donde la radiación solar es mayor; comprende tres bandas elementales azul ($0.4 - 0.5 \mu m$), verde ($0.5 - 0.6 \mu m$) y rojo ($0.6 - 0.7 \mu m$) que a su vez representan los colores primarios que percibe el sistema óptico humano a esas longitudes de onda.
- ❖ **Infrarrojo:** se divide en: *infrarrojo próximo* ($0.7 - 1.3 \mu m$), que también suele denominarse infrarrojo reflejado o fotográfico por lo que parte de él puede detectarse por medio de películas recubiertas por emulsiones especiales, su importancia radica en la discriminación de masas vegetales y concentraciones de humedad. *Infrarrojo medio* ($1.3 - 8 \mu m$) aquí se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y emisión de la superficie terrestre, esta banda es usada para estimar el contenido de humedad en la vegetación y la detección de focos de alta temperatura; *infrarrojo lejano o térmico* ($8 - 14 \mu m$) la radiación dominante en esta banda es energía calórica, que es continuamente emitida por la atmósfera y todos los objetos presentes en la superficie terrestre.

- ❖ **Microondas:** se extienden aproximadamente de $0.1 \mu m$ a $1 m$; las longitudes de onda de esta región pueden pasar a través de nubes, precipitaciones y dosel de los árboles. Hay dos tipos de sensores que pueden trabajar en esta banda, *microondas pasivo*, que detecta la radiación de microondas natural emitida por la superficie terrestre, mientras que el *radar* propaga radiación de microondas artificial a la superficie y detecta el componente reflejado.

2.2 PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Todos los objetos a temperaturas por encima del cero absoluto (0 K o -273°C) emiten continuamente radiación electromagnética, de diferente magnitud y composición espectral. La energía que un objeto radia es función de su temperatura, es decir a mayor temperatura el cuerpo radiará con más intensidad en longitudes de onda más cortas. De la ecuación (2) se puede deducir que la cantidad de energía que contiene un flujo radiante es inversamente proporcional a su longitud de onda, esta relación entre flujo de energía y longitud de onda se puede expresar por la *Ley de Planck*.

$$M_{n,\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right\}} \quad (3)$$

donde: $M_{n,\lambda}$ es la emitancia radiativa espectral de un cuerpo negro a una determinada longitud de onda λ .

h = constante de Planck ($6.26 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)

k = constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$)

c = velocidad de la luz

λ = longitud de onda

T = Temperatura absoluta de un cuerpo negro (Kelvin, K).

A partir de (3) puede calcularse la longitud de onda a la que se produce la máxima emitancia de un cuerpo negro, por medio de la *ley de desplazamiento de Wien*.

$$\lambda_{\max} = \frac{A}{T} = \frac{2898 \mu\text{mK}}{T} \quad (4)$$

Siempre que se conozca la temperatura de una determinada cobertura, es posible por medio de esta relación determinar cual es la banda más adecuada para su detección y su energía total emitida por unidad de superficie; para esta última se tiene en cuenta la *ley de Stefan – Boltzmann*.

$$M_n = \sigma T^4 \quad (5)$$

donde σ es la constante de Stefan – Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$), M_n es la emitancia radiativa.

Se puede ver entonces que la emitancia global de un objeto es función de su temperatura, y varía notablemente con pequeños incrementos en ésta.

Las anteriores expresiones se basan en el comportamiento de un cuerpo negro, por lo que se deben corregir para ser aplicadas a las superficies terrestres, esto se hace añadiendo un parámetro conocido como *emisividad*.

La *emisividad* (ε) se define como el grado de similitud entre la emitancia radiante de un objeto y la que presentaría un cuerpo negro a la misma temperatura.

$$M = \varepsilon M_n \quad (6)$$

Así, conociendo la temperatura de una cubierta u objeto y estimando su emisividad, es posible determinar la banda del espectro más idónea para su estudio.

2.3 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA SUPERFICIE TERRESTRE

Cuando la energía electromagnética incide sobre una cobertura terrestre dada, pueden ocurrir tres tipos de interacciones fundamentales, que son función de la longitud de onda λ , y que son absorción, reflexión y transmisión. Aplicando el principio de conservación de la energía, se expresa la interrelación entre la energía incidente I_0 , la energía reflejada I_R , la energía absorbida I_A y la energía transmitida I_T , mediante [3]

$$I_0(\lambda) = I_T(\lambda) + I_R(\lambda) + I_A(\lambda) \quad (7)$$

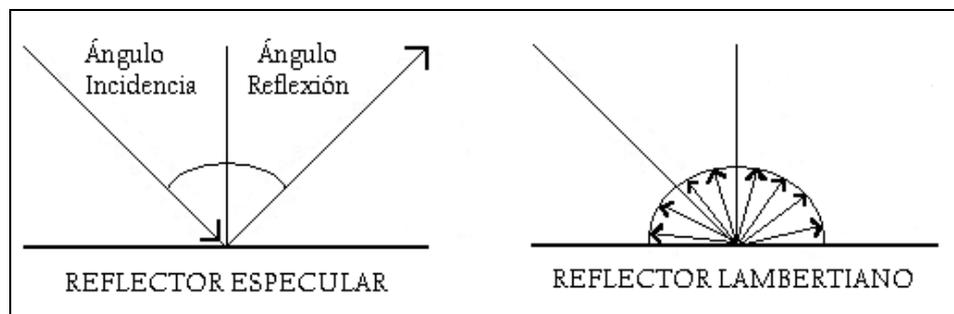
La proporción de energía reflejada, absorbida y transmitida varía dependiendo de las características de las coberturas, del tipo de vegetación que la constituye, las condiciones del suelo donde crecen, y de la longitud de onda a la que sea observada.

La energía recibida por el sensor no solo depende de la reflectividad de la cubierta, parámetros como condiciones atmosféricas, el emplazamiento ambiental de la cubierta y la geometría de la observación también son importantes.

En cuanto a las condiciones de observación, se debe tener presente que la cantidad de energía que llega al sensor depende del ángulo con que la superficie refleje la energía incidente, así como el que forman el haz incidente con la posición del sensor. La geometría de observación está ligada con la rugosidad que presenta la superficie, con relación a esto pueden distinguirse dos tipos de cubiertas, aquellas que reflejan la energía con el mismo

ángulo del flujo incidente (especulares), y aquellas que lo reflejan uniformemente en todas las direcciones (difusas o lambertianas). En el primer caso el sensor solo recibe energía reflejada del suelo si está situado en la dirección del ángulo de reflexión, siendo nula en cualquier otro caso. Si la superficie es lambertiana la radiancia es constante en cualquier ángulo de reflexión. [5]

Figura 4. Superficies especulares y lambertianas



La mayor parte de las cubiertas se comportan de forma intermedia, en función de sus características y de la longitud de onda en la que se trabaje. Si la longitud de onda es pequeña, las rugosidades del terreno tenderán a difundir mucho más la energía incidente, que si se trata de longitudes de onda mayores.

El modo peculiar con el que una determinada cubierta refleja o emite energía a distintas longitudes de onda se ha denominado como *firma o signatura espectral* y resulta la base para discriminar dicha cubierta de otras a partir de la observación remota. [6]

La reflectividad característica de las coberturas terrestres puede ser cuantificada midiendo la cantidad de la energía incidente que es reflejada en función de la longitud de onda, lo que normalmente se denomina *reflectancia o reflectividad espectral*.

$$\rho_{\lambda} = \frac{E_R(\lambda)}{E_I(\lambda)} \times 100 \quad (8)$$

$E_R(\lambda)$ = la energía de longitud de onda λ reflejada por la cobertura u objeto.

$E_I(\lambda)$ = energía de longitud de onda λ que incide sobre la cobertura u objeto.

ρ_{λ} se expresa como un porcentaje.

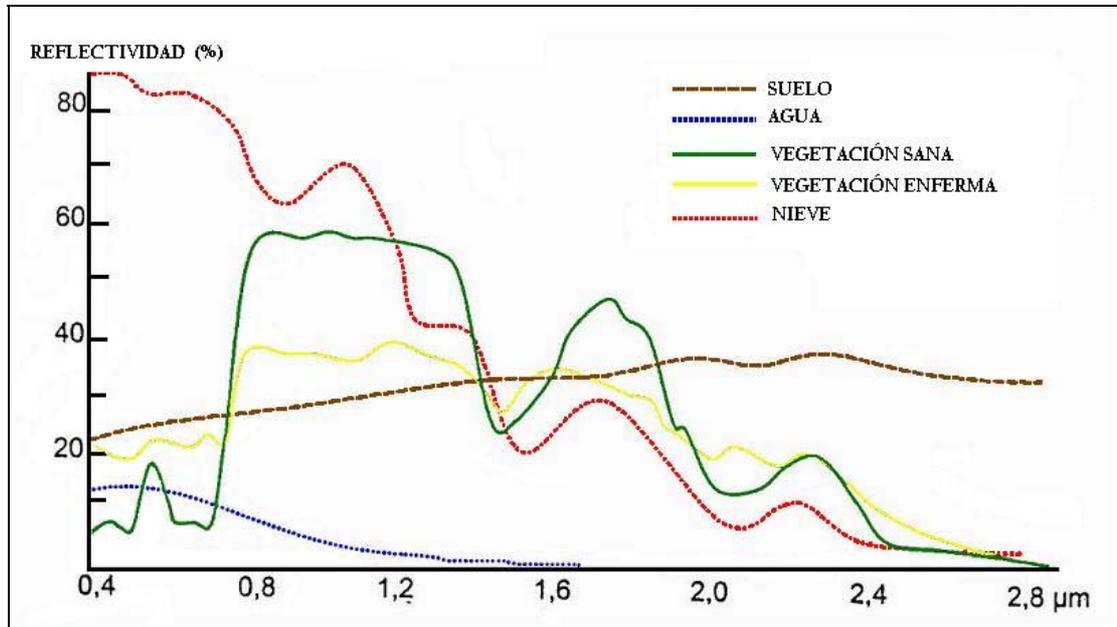
2.4. REFLECTIVIDAD ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN, SUELO Y AGUA

Cada objeto natural o sintético refleja y emite radiación electromagnética en un rango de longitud de onda característico, que depende de su composición química y estado físico.

Es así como el sensor puede registrar un valor diferente de radiancia espectral para un mismo tipo de cubierta, con la misma o similar reflectividad, si varían las condiciones de observación o de iluminación. Además, la reflectividad presenta variaciones estacionales, muy notables en el caso de cubiertas vegetales, en suma el comportamiento de una cubierta en el espectro visible está influido no solo por sus propias características, sino también por una serie de factores externos que modifican su comportamiento espectral teórico. [5]

La figura 5 muestra las curvas teóricas características de reflectancia espectral para las principales coberturas terrestres, algunas tienden a presentar una respuesta uniforme en las diferentes longitudes de onda, mientras otras ofrecen un comportamiento más selectivo. En la curva para la vegetación sana se tiene un comportamiento cromático con bajos valores de reflectividad en el espectro visible, más elevados en el infrarrojo cercano y menores en el medio.

Figura 5. Firmas espectrales típicas de distintas coberturas. [5]



2.4.1. Comportamiento espectral de la vegetación

La caracterización espectral de coberturas presenta notables dificultades debido a los factores que influyen en la radiancia final detectada, inicialmente debe considerarse la reflectividad propia de la hoja, en función de su estado fenológico, forma y contenido de humedad, por otra parte están las características morfológicas de la planta: altura, perfil, grado de cobertura del suelo que provocan modificación del comportamiento reflectivo; además, el sensor mide agrupaciones de hojas formando masas de vegetación, por lo que intervienen otros elementos, entre ellos: ángulo de elevación solar, relacionado con la proporción de sombras que detecta el sensor; el índice de área foliar (LAI) definido como la relación que existe entre el área de la hoja y el área del suelo por debajo de ellas, es una forma de expresar la densidad de las hojas presente en una cobertura, este es especialmente

sensible cuando la vegetación no cubre totalmente el suelo; y las características del suelo que sustentan la vegetación.

Con todo lo anterior se cuenta con varios estudios teóricos sobre el comportamiento espectral de la vegetación vigorosa (entre ellos: Gates et al... 1965; Knipling, 1970; Colwell, 1974; Curran, 1980; Jensen, 1983; Lusch, 1989) y sus respectivas curvas espectrales obtenidas en laboratorio. [5] De acuerdo a estos trabajos el comportamiento típico de la vegetación vigorosa muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la porción verde del espectro (alrededor de $0.55 \mu m$), mientras que en el infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo medio. [5]

Las características espectrales de la vegetación se relacionan con la acción de los pigmentos foto – sintéticos y del agua que almacenan en las hojas, la baja reflectividad en el visible se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja, como las clorofilas, xantofilas y carotenos, estos absorben en la banda situada alrededor de los $0.445 \mu m$, mientras la clorofila absorbe altamente energía en las longitudes de onda centradas alrededor de $0.45 \mu m$ y $0.67 \mu m$, denominada banda de absorción de la clorofila, entre estas partes del espectro aparece una banda intermedia alrededor de los $0.55 \mu m$ donde el efecto absorbente es menor, esto causa la aparición de un pico de reflectividad que coincide con la banda verde del espectro visible, esto causa el color con el que se perciben la vegetación vigorosa, la alta absorción de energía azul y roja por las hojas de las plantas y la alta reflexión de la energía verde.

En casos donde la planta presenta algún tipo de estrés que interrumpa el normal crecimiento y productividad, lo que puede disminuir o parar la producción de clorofila, lo que generaría una menor absorción en las bandas azul y rojo. A menudo la reflectancia roja incrementa a un punto que la planta se torna amarilla.

En el rango alrededor de 0.7 a 1.3 μm (infrarrojo próximo) la reflectividad es alta, esto se debe a que la hoja de la planta refleja del 40 al 50% de la energía incidente, la mayor parte de la energía restante es transmitida y la absorción es mínima (menor al 5%). La reflectividad en esta región se debe básicamente a la estructura celular interna de las hojas de las plantas, que es un parámetro altamente variable entre especies. En especial la capa esponjosa del mesófilo con sus cavidades de aire internas, es responsable de difundir y dispersar la mayor parte de la radiación incidente. Esta banda resulta esencial para discriminar las plantas entre especies. Así mismo, múltiples capas de hojas en el dosel de una planta proporcionan la oportunidad para transmitancia y reflectividad múltiple, de aquí que la reflectividad en el infrarrojo próximo incrementa con el número de capas de hoja en el dosel, con la reflexión máxima alcanzada alrededor de la altura de las capas de la hoja. Una reducción de la reflectividad en esta región, mostraría un deterioro en la estructura celular de la hoja.

Más allá de 1.3 μm la energía incidente en la vegetación es esencialmente absorbida o reflejada, con poca o ninguna transmitancia de energía, por lo que a partir de 1.4 μm la reflectividad de la vegetación sana se reduce drásticamente en el infrarrojo medio. En la figura 5 para la curva de vegetación sana se presentan declives de la reflectividad en 1.4 y 1.9 μm , esto debido a que el agua presente en las hojas absorbe fuertemente estas longitudes de onda, razón por la que a las longitudes de onda de esta región se les conoce como *bandas de absorción del agua*.

Las curvas teóricas de reflectividad (ver figura 5) pueden modificarse en función de la morfología de la hoja. Así las hojas aciculares tienden a presentar una mayor absorción en todas las longitudes de onda, mientras las plantas desérticas de tronco suculento reflejan una mayor radiación que otras especies mesofíticas. [7]

2.4.2. Características espectrales del suelo

Esta cobertura se ve afectada por el efecto de apantallamiento provocado por la vegetación, por lo que no es sencillo obtener información del sustrato geológico a partir de sensores remotos. Algunos de los factores que afectan la reflectividad del suelo en las bandas visible e infrarrojo cercano son: el contenido de humedad; la textura del suelo como la proporción de arena, sedimentos y arcilla; rugosidad de la superficie; presencia de óxido de hierro; y contenido de materia orgánica.

La presencia de humedad en el suelo hace que la reflectividad disminuya, este efecto es grande alrededor de 1.4, 1.9 y 2.7 μm , con mayor intensidad en las bandas de absorción del agua. Para suelos finos y apelmazados la reflectividad resulta mayor. Si el contenido de humedad del suelo está fuertemente relacionado con la textura: suelos ásperos, arenosos son usualmente escurridos y de estructura débil, lo que resulta en un bajo contenido de humedad y una reflectividad relativamente alta; los suelos arcillosos tienden a tener alta humedad, fuerte estructura y fina textura, lo que se manifiesta con baja reflectividad. En la ausencia de agua, suelos de textura áspera presentan una apariencia más oscura que los suelos de textura fina. Es así como las propiedades de reflectividad del suelo son consistentes solo entre condiciones particulares.

Otro factor que también afecta es el contenido de materia orgánica (humus), que influye en el color, ya que tiende a oscurecerlo y reducir su reflectividad alrededor de 0.7 – 0.75 μm .
[8]

2.4.3. Comportamiento espectral del agua

El agua absorbe o transmite la mayor parte de la radiación visible que recibe, su absorptividad es mayor entre mayor sea la longitud de onda. La mayor reflectividad del agua

clara se produce en el azul alrededor de $0.6 \mu m$, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano y medio, donde ya es prácticamente nula, por esta razón la frontera tierra – agua es muy nítida en esta banda.

La variabilidad del agua es más fácilmente detectable en las longitudes de onda más cortas (azul y verde), y se relaciona con su profundidad, contenido de materiales en suspensión (clorofila, arcillas y nutrientes) y rugosidad de la superficie. La turbidez del agua, relacionada con su contenido de sedimentos implica aumento de la reflectividad en todas las bandas del visible, para distintos diámetros de partícula. [9]

Incrementos en concentración de clorofila tienden a disminuir la reflectividad del agua en longitudes de onda azul, e incrementa en longitudes de onda verde, estos cambios se usan para determinar la presencia de algas. Por otro lado, los cuerpos de agua con grandes contenidos de sedimentos suspendidos provenientes de suelo erosionado tienen reflectividad más alta en el visible, ya que presentan una mayor turbidez.

La rugosidad de la superficie favorece la reflexión difusa y en consecuencia una mayor reflectividad, cuando se trata de aguas en reposo, la superficie se comporta de forma especular con valores de reflectividad variados en función de la localización del sensor.

Con relación a la profundidad del agua, se tiene que en aguas poco profundas la reflectividad aumenta, ya que se mezcla en el flujo recibido la reflectividad del fondo, por lo que la absorptividad será mayor cuanto más profunda sea la capa de agua.

3. TÉCNICA LiDAR

LiDAR (*Light Detection And Ranging*) es una técnica de detección remota activa; la cual hace mediciones básicamente de la distancia entre el sensor y la superficie o blanco, para ello envuelve el uso de pulsos de luz láser dirigidos hacia el suelo y mide el tiempo entre la emisión y el arribo de la reflexión de éste pulso (señal de retorno), el tiempo de retorno de cada pulso es procesado para calcular las distancias entre el sensor y las superficies presentes sobre el suelo, de este modo proporciona las coordenadas y el valor de intensidad de cualquier objeto que se interponga en el camino del haz láser y que refleje una cantidad de energía suficiente.

El LiDAR se deriva del RADAR (*RAdiowave Detection And Ranging*), sistema de detección por ondas de radio y microondas, estas ondas son transmitidas y un receptor escucha el eco, analizando la señal recibida (reflejada), así el objeto se puede localizar e identificar. La diferencia que existe es la longitud de onda en que trabaja el LiDAR, que corresponde a visible, e infrarrojo cercano, lo que permite una mejor resolución angular, además los pulsos cortos brindan una mejor resolución de distancias.

El uso del LiDAR para determinar elevaciones del terreno de gran precisión, data de finales de 1970. Los sistemas iniciales eran dispositivos de perfil que obtenían datos de elevación, solo directamente bajo la ruta de una aeronave. Estos sistemas láser eran complejos y no satisfacían el costo efectivo de la adquisición de datos del terreno sobre áreas grandes, su utilización era limitada ya que no se disponía de sistemas GPS, ni unidades de medición inercial aerotransportadas, para georeferenciar los datos. [3]

Las ventajas que presenta este sistema ante los métodos tradicionales de fotogrametría para mapear las características del terreno son la oportunidad de recolectar datos de laderas

escarpadas, áreas sombreadas y/o inaccesibles, zonas con nubosidad siempre y cuando se vuele por debajo del techo de las nubes, puede operar de día o de noche, además no es necesario tener en cuenta el ángulo solar para la toma de los datos.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

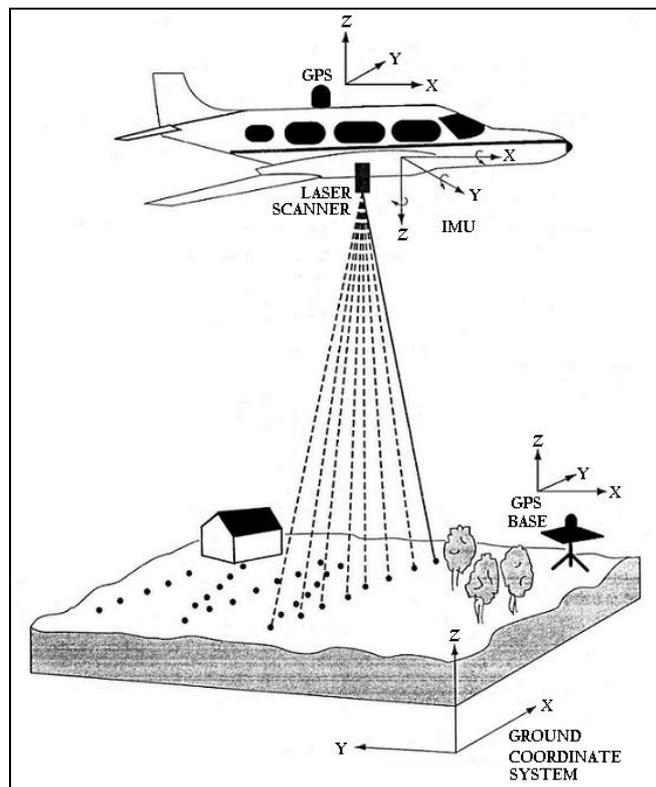
El sistema LiDAR reúne tres importantes tecnologías: a) un sistema de posicionamiento global – GPS aerotransportado acompañado de una estación GPS base, lo que conforma un GPS diferencial (DGPS). b) una unidad de medición inercial IMU. c) Un escáner láser emisor de luz (altímetro láser).

- a). DGPS: consta de un sistema GPS (*Global Position System*) base ubicado en tierra (permite hacer correcciones diferenciales) y un GPS ubicado en la aeronave, el cual se encarga de dar la posición exacta de cualquier punto sobre la tierra mediante la utilización de una constelación de satélites, midiendo la distancia entre el punto de análisis y tres o más satélites, así por medio de una triangulación calcula las coordenadas de localización, referidas a un sistema geocéntrico, el más común es el WGS84 (*World Geodetic System 1984* – Sistema Geodésico Mundial 1984). En este caso el DGPS da la posición y altura del avión en cada momento.

- b). IMU: (*Inertial Measurement Unit*): proporciona la actitud (orientación espacial) de la aeronave, es decir los giros y la trayectoria del avión. Está compuesta por tres acelerómetros y tres giróscopos dispuestos ortogonalmente en cada uno de los tres ejes de coordenadas del sistema de referencia fijo al cuerpo. Estos sensores entregan respectivamente la aceleración y velocidad angular en cada eje, las cuales son utilizadas para el cálculo numérico de la actitud (inclinación ψ , balanceo ω , dirección κ) y velocidad de la aeronave.

- c). Escáner láser: Se denomina así a todo el sistema que permite hacer el escaneo del terreno, está compuesta de un transmisor de luz láser, generalmente es un láser de estado sólido, que emite en longitudes de onda del visible e infrarrojo cercano, también hace parte de él un espejo de barrido, que es el que desvía el haz láser perpendicularmente a la trayectoria de la aeronave, así este desplazamiento lateral combinado con la trayectoria permite el barrido del terreno; y por último se tiene el detector, que es el encargado de recibir los pulsos de retorno.

Figura 6. Partes de un sistema LiDAR aerotransportado. [3]



El sistema mide de manera continua la distancia entre la aeronave que transporta el sensor y el suelo; el transmisor de luz láser produce pulsos que son desviados perpendicularmente por el espejo; para lograr un barrido del terreno, éstos pulsos emitidos hacia el terreno, son

reflejados por los diferentes objetos y coberturas presentes en él (vegetación, suelo descubierto, construcciones y agua), el pulso reflejado es denominado eco, el cual vuelve a la aeronave y es detectado y medido por el sensor, esto se logra ya que el eco es convertido de fotones a impulsos eléctricos y colectado por un registro de datos de alta velocidad (contador de intervalos de tiempo). Con la información acerca del tiempo que tarda el pulso en ir hacia el terreno y regresar al detector y asociando este parámetro con la velocidad de la luz a partir de la ecuación (9), se obtiene la distancia entre la aeronave y el objeto reflector.

$$R = c \frac{t}{2} \quad (9)$$

Donde, c = velocidad de la luz (en el vacío $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$)

t = tiempo entre el envío y recepción de un pulso (eco) medido por el contador para un punto específico. Esta dado en unidades de nanosegundos (ns).

Después del vuelo los datos GPS y los datos IMU se integran mediante un filtro Kalman para determinar la trayectoria del vuelo y los giros en cada instante. Estos elementos más el ángulo de salida que ha formado el pulso láser con respecto a la vertical (FOV), se combinan para determinar la línea imaginaria que ha descrito el pulso láser en el espacio. Finalmente la longitud del camino descrito por el rayo, los giros definidos por los sistemas inerciales, y la posición del escáner láser obtenida a partir de las medidas GPS, se utilizarán para determinar las coordenadas WGS84 de los puntos medidos, [10] y finalmente obtener la nube de puntos coordinados.

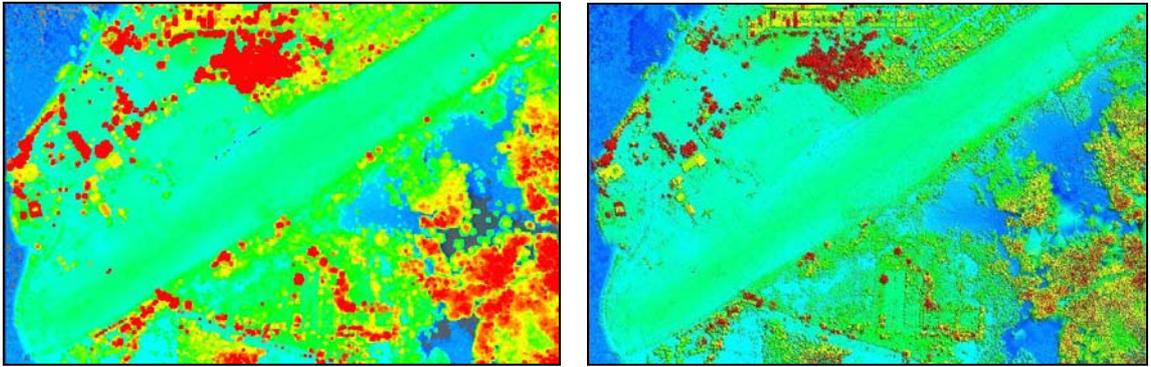
Esta nube de puntos coordinados (x, y, z) se somete a procesos de filtrado para eliminar puntos indeseados o ruido y posteriormente efectuar una clasificación y edición manual y finalmente obtener las diferentes clases dependiendo el área escaneada (vegetación, suelo, construcciones). Con esto es posible tener una imagen de elevación que puede ser

visualizada también en formato TIN (*Triangular Irregular Network*), gracias a la información altimétrica que contienen.

Además del tiempo de retorno del pulso, el sistema registra los valores de intensidad que corresponden a la cantidad de luz reflejada por cada punto sobre la superficie terrestre, que permiten generar imágenes de intensidad. Estas imágenes están formadas por una matriz de puntos, cuyas posiciones son determinadas por las coordenadas 2D georeferenciadas, y se le atribuye un valor de memoria en una escala de 256 tonos de grises.

La precisión de los datos finalmente obtenidos después de el post procesamiento es función de la altura de vuelo a al cual se tomen los puntos, del diámetro del rayo láser, de la calidad de los datos de posicionamiento e inerciales GPS/IMU y los procedimientos de post procesamiento. Si se asumen parámetros óptimos se tienen precisiones de 1 m horizontalmente y 15 cm verticalmente. [11]

Figura 7. Visualización de los datos LiDAR del aeropuerto de Tumaco en tres tipos de imágenes
a) Nube de puntos LiDAR, b) Puntos LiDAR en formato TIN, c) Imagen de intensidad.



a)

b)



c)

INTERACCIÓN CON LAS DIFERENTES COBERTURAS

Cada eco posee un valor de intensidad propio que depende de la superficie donde incide el pulso láser, todas las superficies que reflejan una cantidad de energía suficiente para ser detectada por el sistema generan una onda de retorno. Este sistema puede discriminar entre múltiples respuestas recibidas de un mismo pulso (hasta 5) permitiendo determinar las superficies intermedias en el terreno, como líneas de tensión o coberturas vegetales.

Se trabaja principalmente con tres coberturas: cuerpos de agua, superficies sólidas y vegetación.

Los cuerpos de agua en calma son considerados como superficies de gran reflectividad (reflectores especulares), lo cual hace que el rayo se pierda y no regrese al sensor porque reflejan en una sola dirección, por esto no se tiene registro de este tipo de superficies y genera manchas en los modelos digitales de terreno (MDT), para longitudes de onda en el infrarrojo cercano el rayo láser se absorbe rápidamente y no vuelve a la aeronave, por lo que no se tiene ninguna información. El comportamiento del agua en las regiones VIS e IR se puede apreciar en la figura 5.

En superficies sólidas como suelo totalmente descubierto y construcciones, el rayo se refleja sin problema y la señal de retorno es detectada por el sensor.

En las zonas cubiertas por vegetación la señal penetra parcialmente a través de la masa forestal, es decir hay un registro de multieco y se obtienen puntos a cualquier altura sobre la cubierta vegetal, que son rebotados por las ramas, hojas o tronco (primer retorno) y parte de los haces emitidos encuentran espacios entre las hojas de los árboles y logran penetrar hasta el suelo (último retorno), esto depende del diámetro del haz láser. El sistema almacena el primer y último pulso, esto permite obtener información a cerca de la posición y altura de este tipo de zonas.

El conjunto de datos que corresponden al terreno es irregular y disperso, ya que los haces láser encuentran otros objetos que no son propios del terreno, lo que implica el uso de filtros para la clasificación de la información [12].

TIPOS DE LiDAR

Los sistemas LiDAR se pueden clasificar de acuerdo al uso par el que están diseñados, entre estos se puede encontrar:

- ❖ **LiDAR topográfico:** corresponde al LiDAR aerotransportado usado para el desarrollo de este proyecto, además del uso en topografía e identificación de terrenos, también se aplica para el reconocimiento de autos, estudios forestales, de biomasa y ecológicos.

- ❖ **LiDAR atmosféricos:** son los más conocidos ya que su uso data de años antes al lidar aerotransportado. En este tipo igual que en el aerotransportado, se utiliza un láser pulsado como fuente de radiación, y la energía retrodispersada por las partículas y las moléculas presentes en la atmósfera, es recogida por un telescopio, detectada y analizada en función del tiempo de recorrido, para este caso existen cuatro tipos de LiDAR en función del mecanismo de interacción radiación – materia que se observe.
[13]
 - *LiDAR de absorción:* emite pulsos en dos longitudes de onda distintas: una en la banda de absorción de la molécula que se desee medir y la otra fuera de ella, la diferencia en intensidad de la retrodispersión de los dos haces puede ser utilizada para evaluar el perfil de concentración del gas.

 - *LiDAR de dispersión Mie:* se utiliza el fenómeno físico de dispersión elástica de radiación por parte de las partículas atmosféricas; a medida que la concentración de partículas sea mayor, más intensa será la intensidad retropropagada. Como se trata de un proceso elástico, la longitud de onda del pulso emitido y la energía recibida será la misma.

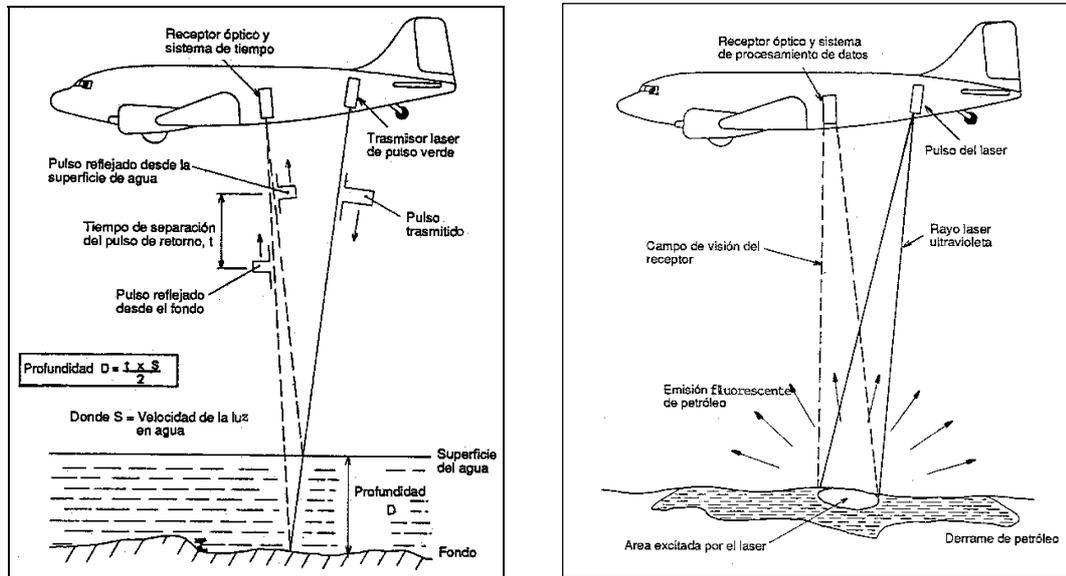
- *LiDAR de dispersión Raman*: cuando sobre una molécula incide radiación además de producirse dispersión elástica, también se produce dispersión inelástica (Raman), en que la energía del fotón dispersado es modificada, por lo que se observa un desplazamiento hacia el rojo en su longitud de onda, que dependerá de la naturaleza de la molécula; de esta forma es posible hacer análisis cuantitativo.

- *LiDAR de fluorescencia*: se sintoniza un láser a la línea de absorción de un gas atmosférico, la fluorescencia provocada en el gas es medida en el subsecuente decaimiento. Solo es útil en la alta atmósfera.

- ❖ **LiDAR batimétrico**: se usa para aplicaciones batimétricas, genera una señal azul verde y una infrarroja cercana simultáneamente. La IR cercana no penetra en el agua y es directamente reflejada por la superficie del mar y grabada por el sensor. La señal azul verde es reflejada por el fondo y llega al sensor en un tiempo posterior, la diferencia en tiempo es función de la profundidad del agua.

- ❖ **LiDAR fluorescente**: graba la luz fluorescente emitida que es inducida por la interacción de la luz azul verde emitida por láser con el objetivo. Es usado para identificar y cuantificar clorofila en el agua, también para identificar y medir el grosor de capas de aceite o petróleo en el mar.

Figura 8. Principio de operación de un LiDAR batimétrico y un LiDAR fluorescente. [14]



APLICACIONES DESARROLLADAS CON LA TÉCNICA

- ❖ **Generación de Modelos digitales de terreno:** Entre las principales aplicaciones desarrolladas con la técnica LiDAR a nivel mundial se tienen el desarrollo de modelos digitales de terreno de gran precisión, para elaboración de cartografía digital. En esta aplicación el LiDAR compete y complementa otras técnicas de captura masiva, como la fotogrametría y el radar, esto se debe a que se pueden obtener densidades de puntos de 1 punto/m² y superiores, de este modo se construyen modelos digitales de terreno (MDT) con pasos de malla del orden del metro y precisiones decimétricas. [15]

- ❖ **Estudios de riesgos de inundaciones:** La construcción de modelos digitales de terreno (MDT) de mayor precisión que con otras técnicas, permite la evaluación de cotas de inundación y curvas de nivel, para determinar las zonas de mayor riesgo y contribuir a generar el respectivo mapa de riesgos y evacuación de la zona.

- ❖ **Estudios de erosión:** por la facilidad que representa la obtención de datos con este sistema, es posible tener registro de datos anuales de zonas de estudio, los cuales son usados mediante comparación de modelos digitales de superficie, para ver la cantidad de suelo erosionado o acrecionado en determinada tasa de tiempo; además, es posible efectuar estudios en zonas costeras donde la textura de los suelos (playas y acantilados) son de difícil interpretación por medio fotogrametría y otras técnicas, de igual forma se pueden determinar desplazamientos de arena en las playas después de tormentas, o maremotos .

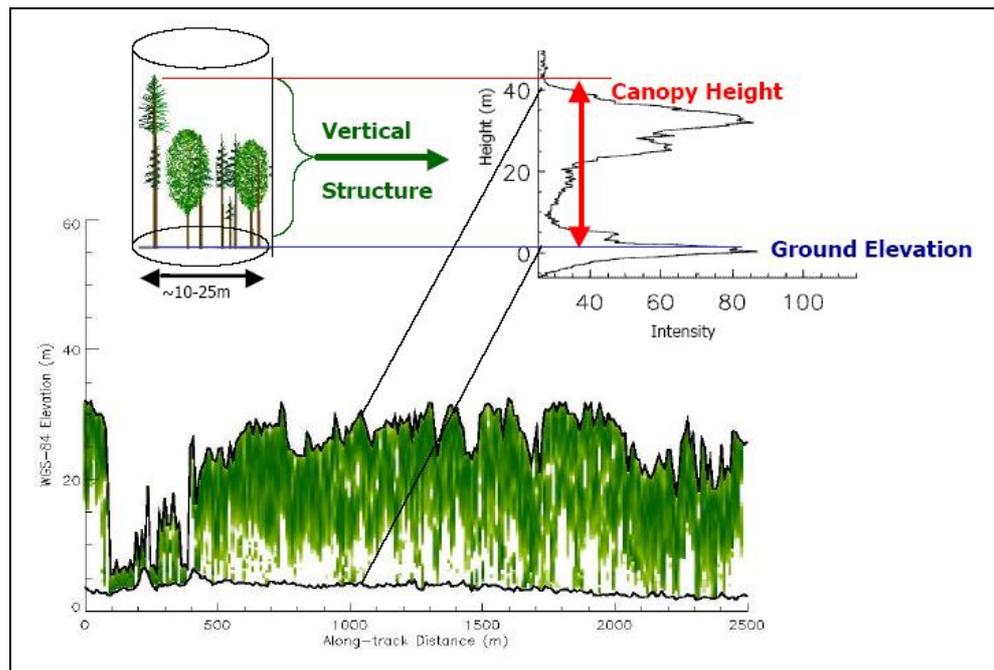
- ❖ **Estudios de vegetación:** el LiDAR es la única técnica de teledetección capaz de detectar simultáneamente el terreno y la vegetación. Es posible obtener un modelo de altura de la vegetación, calcular la altura predominante de la zona o detectar los árboles más altos.
Con altas densidades de puntos se pueden detectar de manera automática los árboles individuales y calcular los tamaños de las copas. [16]

Cuando se estudian bosques con una única especie arbórea se puede estimar el volumen de madera y el diámetro del tronco, y como se tienen rebotes a diferentes alturas es posible estudiar la estratificación de la vegetación y la biomasa.

Con este sistema es posible obtener la distribución vertical de las superficies interceptadas, que se usa para modelar perfiles de altura del dosel, y examinar la naturaleza volumétrica y estructura del dosel de áreas tropicales, este tipo de medidas

proporcionan nuevos datos para el manejo de bosques de vida salvaje y mapeo de hábitat. [17]

Figura 9. Forma de onda de pulsos de energía reflejados por el dosel y superficies del suelo. [17]



- ❖ **Modelos de ciudades:** como se obtiene gran cantidad de puntos encima de los edificios estos permiten construir un modelo de superficie aproximado al modelo de la ciudad, además de un modelo digital de elevación (MDE), los cuales son usados para estudios de visibilidad y emplazamientos de antenas de telecomunicaciones y para verificaciones catastrales. Además, permite rectificar imágenes de fotografía aérea y realizar ortofotos y vistas perspectivas.

- ❖ **Cartografía de líneas eléctricas:** para esta aplicación no existe mejor técnica que el LiDAR, aquí interesa obtener la distancia de los cables al terreno, a la vegetación y a los edificios. Con la configuración adecuada del equipo es posible obtener muchos puntos sobre los cables, se genera un MDT y luego se ajusta a un modelo de catenaria para cada cable, los puntos restantes pertenecen a la vegetación o a los edificios, así se puede calcular la distancia a los cables, lo que contribuye a la generación de mapas de líneas eléctricas, con puntos peligrosos y con las distancias mínimas de los cables a la vegetación y al suelo.

4. SISTEMA ALS40

El sistema LH Systems ALS40 (*Airborne Laser Scanner*) usado para la toma de datos LiDAR utilizados en el desarrollo del proyecto; es el primer producto de la Airborne LIDAR División de LH Systems. Esta división surgió como resultado de la adquisición de la empresa Azimuth Corporation por parte de LH Systems en mayo de 2001, es una versión rebautizada del sistema Azimuth AeroScan. [18]

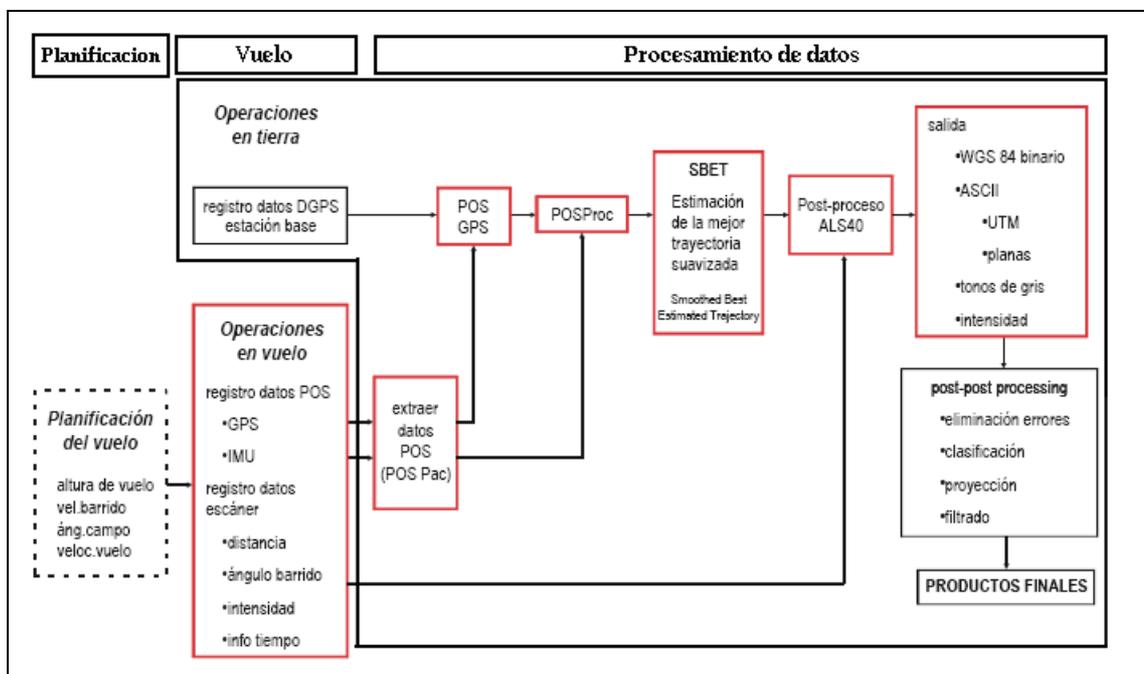
El Leica ALS40 Escáner Láser aerotransportado es un sistema diseñado para la adquisición de datos topográficos y señales de intensidad de retorno para plataformas aerotransportadas, los datos son calculados a partir de la señal de retorno del pulso láser (detecta hasta 3 señales de retorno) y el valor de intensidad registrado a lo largo del vuelo, combinando los datos de posición y altitud derivados del GPS aerotransportado y los subsistemas inerciales. El ALS40 entra en la categoría de instrumentos aerotransportados conocidos como LiDAR.

El ALS40 incluye todo el software post proceso necesario para mostrar la latitud, longitud, y elevación de los datos registrados, además de la latitud, longitud y elevación de los valores de intensidad, el software esta diseñado para procesar datos de salida en una amplia variedad de configuraciones.

La posición del suelo para cada punto del pulso láser impactado se determina midiendo la localización, (latitud, longitud, altitud), la posición o actuación (giro, grado de inclinación, cabeceo) de la aeronave, la distancia al suelo desde la plataforma y el ángulo de escaneo respecto al fuselaje del aeronave.

La toma de datos con el ALS40 puede dividirse en etapas cada una con determinados parámetros de desarrollo, obtener finalmente el archivo de puntos coordinados requiere de un amplio proceso (ver figura 10), que involucra desde la planeación de la misión LiDAR hasta el procesamiento de los datos.

Figura 10. Esquema de trabajo con el ALS40, los cuadros rojos corresponden a procesos realizados directamente por el sistema. [18]



PARTES DEL SISTEMA

El sistema está integrado con un altímetro, un Applanix POS/AVIMU, Unidad de Medición Inercial (IMU), un sistema GPS, y un computador portátil de control, que provee la plataforma de despliegue para operar la interfaz software, además de otros subsistemas.

Las partes físicas que se distinguen en el montaje total del equipo son:

Figura II. Partes del sistema ALS40. a). Escáner Láser. b). Estante del equipo. c). Computador portátil de control. [19]



Montaje del escáner

Corresponde al montaje del altímetro, éste produce movimientos controlados del transmisor receptor del punto del objetivo, por la actuación del galvanómetro del espejo de escaneo. El punto señalado por la salida del láser es medido por un codificador óptico de alta precisión. A su vez está compuesto por los siguientes dispositivos.

- ❖ **Transmisor láser:** produce pulsos de salida usando un cristal Nd:YVO⁴ bombeado por diodo láser. También contiene un 0.5% del haz de muestreo óptico, un obturador/2 posiciones del atenuador, un expansor del haz/colimador y un prisma de compensación (offset) a la salida del láser que hace que esta quede en el borde de la apertura del receptor de la huella.
El Nd:YVO₄ – *Neodymium doped Yttrium Vanadate* bombeado con diodo láser, conforma un láser de estado sólido, el cual posee una alta ganancia, bajo umbral, alta eficiencia, y coeficientes de absorción altos. Puede configurarse para operar en modo continuo (CW) y pulsado, a longitudes de onda de 1064 nm y 1342nm, y con generación de 2da armónica a 532 nm.
- ❖ **Receptor:** recoge el muestreo de pulsos láser de salida y detecta los pulsos láser reflejados por el terreno bajo la aeronave.
- ❖ **Espejo de barrido:** los sistemas estándar son expedidos con espejos de barrido de baja inercia/alta velocidad, optimizados para campos de visión hasta 75° a altitudes de 3000 m, se usa para desviar el haz láser perpendicularmente a la trayectoria del avión y permitir el barrido transversal del terreno.
- ❖ **Tarjeta de interfaz:** permite instalar directamente el escáner a la aeronave ya equipado para aceptar sistemas Leica, LH Systems, Wild, u otro montaje de estabilización de la cámara. [19]

Estante del equipo

El estante del equipo contiene el montaje electrónico responsable de la coordinación del subsistema, la medición de los datos crudos y el registro de datos. Sus partes principales se enuncian a continuación.

- ❖ **Sistema de control:** controla la operación del láser, mide la distancia al suelo por medio del intervalo de tiempo que tarda el haz en llegar al suelo y reflejar, genera señales eléctricas necesarias para manejar el escáner óptico, lee el codificador de ángulo de escaneo, la información del GPS y les da formato para grabarlos sobre un registro de datos de alta velocidad.
- ❖ **Sistema de posición y orientación de la aeronave (POS):** provee y marca la elección principal de la información de localización y posición usando el receptor GPS y la IMU de alta precisión y un procesador integral con almacenamiento flash.
- ❖ **Controlador del galvanómetro:** proporciona el manejo activo del galvanómetro en el montaje del escáner, comparando la señal de posición del escáner suministrada por el sistema de control con la posición actual del galvanómetro.
- ❖ **Registro de datos:** almacena en un disco duro extraíble los resultados del sistema de control, incluyendo distancia, e información de posición del escáner, para ser procesada después.
- ❖ **Fuente de poder del láser:** suministra energía condicionada, controla y bombea energía óptica a la cabeza del láser. [19]

SOFTWARE DE POST PROCESO

El software de post – proceso suaviza los datos del sistema de posición y orientación, agrupa el POS y los archivos de registro de datos en un archivo maestro y lo procesa en el sistema de coordenadas WGS84 (*World Geodetic System 1984 – Sistema Geodésico Mundial 1984*).

Toma los datos crudos registrados durante el vuelo como la latitud, longitud y elevación de los puntos del suelo, incluyendo valores de intensidad. Por defecto los resultados están en un formato compacto binario en coordenadas WGS8.

Este software proporciona resultados en el formato de archivo LAS, que suministra máxima flexibilidad y un formato único de cabecera adaptable que ofrece la velocidad de la implementación binaria. [19]

CONDICIONES AMBIENTALES

Como tal el ALS40 es capaz de operar mientras esta sometido a variaciones de temperatura, humedad y altitud, experimentadas en vuelo; además las superficies expuestas durante el vuelo son aptas para funcionar en presencia de precipitación y polvo.

Todas las condiciones de desempeño se cumplen durante o después de la exposición a temperatura entre 0° C y 35° C; rango de humedad del 10 al 90%, sin condensación; altitud máxima 3048 m; en presencia de lluvia, arena o polvo, aunque esto puede generar desgaste y afectar la precisión; y viento hasta de 200 nudos.

REQUERIMIENTOS DE DESEMPEÑO

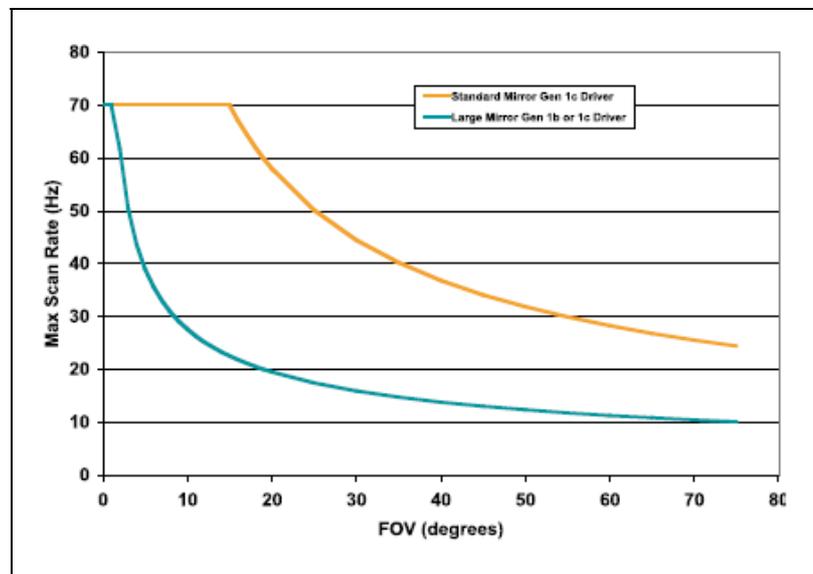
Se tienen los siguientes requerimientos, los cuales se escogen de acuerdo al área de estudio y las características técnicas requeridas.

- ❖ **Campo de visión (FOV – *Field Of View*):** expresa el ángulo exacto de visión que es detectado en cada pauta de visión del sistema, se relaciona con la superficie real que abarca éste. El FOV es ajustable en el rango de 10 – 75 grados. Los datos de referencia en cuanto al suelo despejado aplican a un máximo de 45 grados FOV.

- ❖ **Frecuencia de escaneo:** La frecuencia máxima de escaneo disminuye en función del incremento del FOV. Se puede seleccionar entre 0 a 75 Hz en incrementos de 0.1 Hz. La frecuencia máxima de escaneo aproximada está definida como:

$$\text{Frecuencia escaneo [Hz]} = 412.33 \times \text{FOV en grados}^{-0.6548} \quad (10)$$

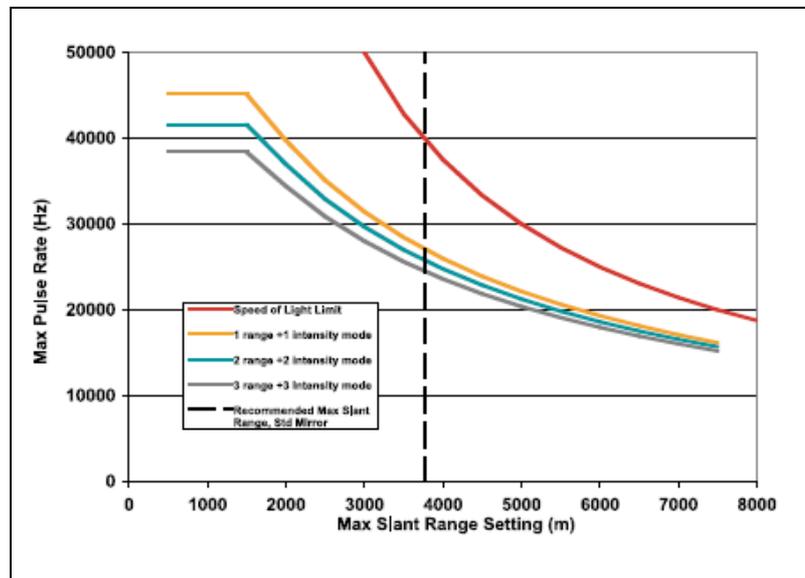
Figura 12 Comportamiento de la rata de escaneo en función del campo de visión. [19]



- ❖ **Patrón de escaneo:** el sistema proporciona un patrón de escaneo sinusoidal en un plano nominalmente ortogonal al eje longitudinal de la aeronave, centrado alrededor del nadir.
- ❖ **Frecuencia de pulsos:** En la figura 13 se observa que la máxima frecuencia de pulsos asequible por el sistema para un modo dado y un rango de compuerta máximo es el

punto donde se traza la línea vertical hacia arriba desde el eje X en el rango máximo de inclinación fijado y cortando la línea coloreada para el modo particular escogido. Cuando el sistema es puesto a un rango máximo por mucho tiempo, puede suceder que: 1). las frecuencias máximas de pulsos asequibles sean inferiores y 2). Las diferencias entre las frecuencias máximas de pulsos en varios modos sean menores. [19]

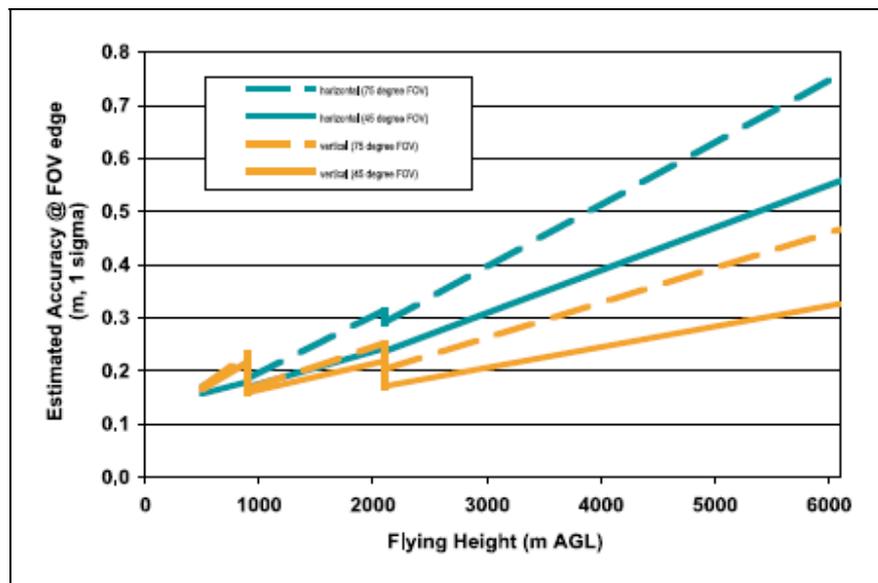
Figura 13 Comportamiento de los valores máximos de la frecuencia de pulsación para diferentes configuraciones del rango de inclinación. [19]



- ❖ **Retorno Múltiple de intensidad:** el sistema puede ser equipado con la opción de retorno múltiple de intensidad, la cantidad de energía reflejada por los diferentes estratos del terreno es medida en adición a la distancia medida por la tarjeta de conteo. El equipo puede determinar la intensidad hasta de tres retornos. Las características principales de la serie de pulsos de retorno (periodo y amplitud) son registradas, en lugar de una forma de onda totalmente digitalizada.

- ❖ **Modo de operación múltiple:** dependiendo de la altura, se puede seleccionar el número del rango de retornos y las medidas de intensidad asociadas. En terrenos de vegetación escasa se puede optar por un único retorno con el valor de intensidad asociado, modo 1+1. En áreas donde hay probabilidad de encontrar retornos múltiples se seleccionan los modos 2+2 o 3+3.
- ❖ **Precisión:** los datos procesados tienen una precisión lateral de 0.3 metros y vertical de 0.2 metros para blancos en campo lleno con reflectividad difusa del 10%, o mayor con visibilidad atmosférica de 23.5Km o mejor. [19]

Figura 14. Precisión del ALS40 para diferentes alturas de vuelo y ángulos de visión. [19]



ECUACIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ALS

Se debe tener especial cuidado en la planificación de la misión, parámetros como la divergencia del haz láser, la elección del modo de retorno, el FOV, el algoritmo de post procesamiento usado, entre otros, afectan la precisión de la información derivada de los datos LiDAR: es así como se deben establecer parámetros geométricos para la operación del sensor antes del vuelo, de acuerdo con las características del terreno a escanear y teniendo en cuenta los factores que pueden influir en la toma de los datos.

Parámetros físicos. [20]

❖ *Precisión de la distancia entre el sensor y el objeto:* está dada a partir de

$$\sigma_R \sim \frac{c}{2} t_{rise} \frac{\sqrt{B_{pulse}}}{P_{R_{peak}}} \quad (11)$$

Donde: c = velocidad de la luz, t_{rise} (ns) = tiempo de subida del pulso, B_{pulse} (Hz) = ancho de banda del ruido de entrada, $P_{R_{peak}}$ (W) = potencia óptica recibida.

Este parámetro involucra muchas variables por lo que existe una ecuación más completa que tiene en cuenta también el error del ángulo de solapamiento:

$$\sigma_R^2 = \left(\frac{F}{PE} \right) \sigma_w^2 + \frac{9}{4} \left(\frac{\sigma_w}{\Delta t} \right) \left(\frac{\sigma_w^2}{2^{2NB}} \right) + \left(\frac{\Delta t^2}{12} \right) + \left(h \frac{\tan(\theta + i) \sigma_\theta}{\cos(\theta + i)} \right)^2 \quad (12)$$

F = factor de ruido del detector, PE = número de señales fotoelectrónicas en el receptor del pulso, σ_w =rms del ancho del pulso recibido, NB =número de bits en el muestreo digitalizado, h = altura sobre el suelo, θ =ángulo de señalamiento respecto al nadir (ángulo de escaneo láser), i =inclinación de la superficie, $\theta + i$ = ángulo de incidencia, σ_θ = rms del error de señalamiento, Δt (ns)=resolución del tiempo medido.

❖ *Potencia registrada por el receptor*: para el cálculo de este parámetro se asume que la huella láser cubre completamente el área del objeto (target).

$$\text{Área iluminada} \quad A_I = \frac{\pi}{4} (D + R\gamma)^2 \quad (13)$$

D (cm)=apertura del láser, R (m)=Distancia entre el sensor y el objeto, γ (mrad)=divergencia del haz láser (IFOV)

$$\text{Densidad de potencia dentro del área iluminada} \quad \Phi_{tar} = \frac{P_T}{A_I} M \quad (14)$$

P_T (W)=potencia transmitida, M = transmisión atmosférica (valores entre 0 y 1) depende de la cantidad de absorción y dispersión de la luz para las condiciones atmosféricas dadas.

$$\text{Potencia total reflejada} \quad P_{refl} = \frac{\rho}{\pi} \Phi_{tar} A_{tar} \quad (15)$$

$$\text{Área del objeto} \quad A_{tar} = \frac{\pi D_{tar}^2}{4} \quad (16)$$

ρ = reflectividad del objetivo, varía entre 0 y 1, o 0% a 100%, depende del color del objeto la composición y longitud de onda del láser, en superficies difusas generalmente varía del 3% al 95%.

D_{tar} (m)=diámetro del objeto

$$\text{Potencia registrada por el receptor} \quad P_r = P_{refl} M \frac{A_r}{R^2} \quad (17)$$

A_r (m²)=área del receptor óptico

Reemplazando las ecuaciones (14), (15) y (16) en (17) y asumiendo $A_r = A_{tar}$

$$P_r = \rho \frac{M^2 A_r}{\pi R^2} P_T \quad (18)$$

Esta ecuación puede ser usada con la energía por pulso transmitida y recibida en lugar de la potencia. Además muestra que para obtener una buena señal con alturas de vuelo grandes, la potencia del transmisor y las dimensiones del receptor óptico se deben aumentar y disminuir la divergencia del haz láser.

❖ *Resolución vertical* (separación mínima entre los objetos a los largo del camino del pulso)

$$R_{\min} = c \frac{t_{\min}}{2} \quad (19)$$

t_{\min} (ns) = diferencia de tiempo mínima entre dos ecos recibidos.

Parámetros geométricos [20]

❖ *Divergencia mínima del haz láser*: es limitada por la difracción del rayo.

$$IFOV = 2.44 \frac{\lambda}{D} = \gamma \quad (20)$$

Donde λ (nm) = longitud de onda del láser y D (cm) = apertura del láser

❖ *Diámetro de la huella láser*:

$$A_L = h\gamma \quad (21)$$

h (m) = altura media de vuelo sobre el terreno y γ (rad) = divergencia del rayo láser

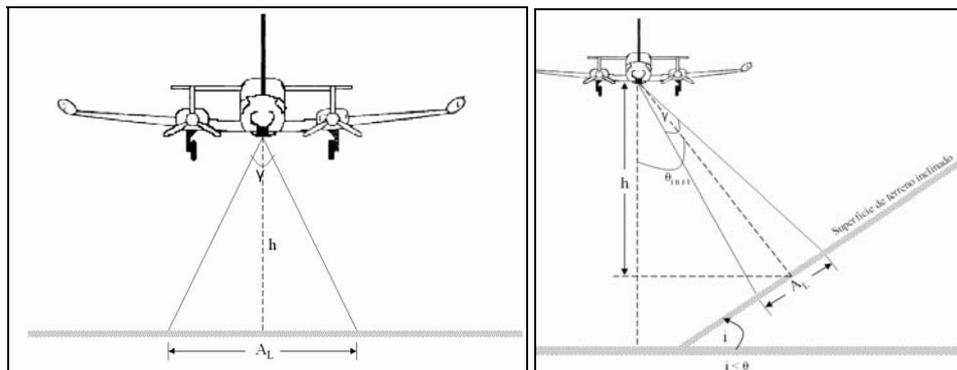
Para terrenos con pendientes o inclinaciones marcadas:

$$A_L = \frac{2ah \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{\cos\left(\theta_{inst} - \frac{\gamma}{2}\right)} \quad (22)$$

$a = [\cos e + \sin e \tan(e + \gamma/2)]$ y $e = \theta_{inst} + i$, θ_{inst} = ángulo de escaneo instantáneo toma valores entre $(0, +\theta/2)$, $\theta_{inst} + i$ = ángulo de inclinación de la superficie

El tamaño de la huella láser está relacionada por la penetración del haz láser a través de los espacios entre las hojas de los árboles, es así como una huella más pequeña puede pasar mejor entre estos espacios.

Figura 15. Elementos geométricos para el cálculo de la huella láser. [21]



❖ Ancho del barrido (Swath width – SW)

$$SW = 2h \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (23)$$

θ (grados) = ángulo de escaneo del láser (FOV)

❖ Número de puntos por línea escaneada: es independiente de la altura de vuelo y el SW

$$N = \frac{F}{f_{sc}} \quad (24)$$

F (kHz)=frecuencia de pulsación (tasa de repetición del pulso), f_{sc} (Hz)=frecuencia de barrido (número de líneas escaneadas por segundo)

- ❖ *Espaciamiento de puntos lateral*: corresponde a la distancia entre las líneas de escaneo, y es independiente de la altura de vuelo. [21]

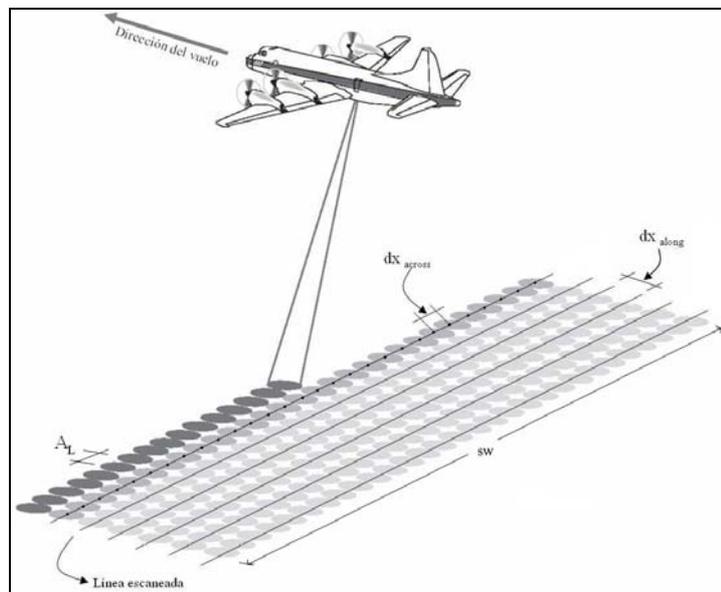
$$dx_{along} = \frac{v}{f_{sc}} \quad (25)$$

v ($m\ s^{-1}$)-velocidad de vuelo

- ❖ *Espaciamiento de puntos perpendicular a la línea de escaneo*: se asume igual distancia entre los puntos de la línea de escaneo y terreno plano.

$$dx_{across} = \frac{SW}{N} \quad (26)$$

Figura 16. Visualización de algunos parámetros geométricos. [21]



- ❖ *Número de fajas de barrido n requeridas para cubrir el área de estudio: es tal que*

$$n - 1 \geq \frac{W - SW}{SW \left(1 - \frac{q}{100} \right)} \quad (27)$$

W (km) = ancho del área rectangular de estudio, q (%) = solapamiento entre fajas.

- ❖ *Área cubierta*

$$A = SWvT_s \left[(n - 1) \left(1 - \frac{q}{100} \right) + 1 \right] \quad (28)$$

T_s (h) = tiempo de vuelo neto por faja

- ❖ *Densidad de puntos por unidad de área: se expresa en (puntos m⁻²)*

$$d = \frac{FnT_s}{A} \quad (29)$$

5. DETERMINACIÓN DEL GRADO DE PENETRACIÓN DEL ALS40 LiDAR AEROTRANSPORTADO

El grado de penetración del LiDAR corresponde a la capacidad del sistema para pasar entre los espacios de las hojas, ramas de la vegetación y tomar datos del suelo; el proceso para determinarlo va desde la identificación de las coberturas vegetales de la zona, hasta el cálculo e interpretación del índice de penetración del LiDAR.

IDENTIFICACIÓN DE COBERTURAS VEGETALES

Para determinar el índice de penetración del sistema LiDAR (LPI) es necesario delimitar las zonas exactas donde se va a calcular éste parámetro, por lo cual es indispensable la identificación y ubicación de la cobertura vegetal, ya que esto proporcionará un mejor análisis y cálculos más precisos del LPI para cada tipo de vegetación.

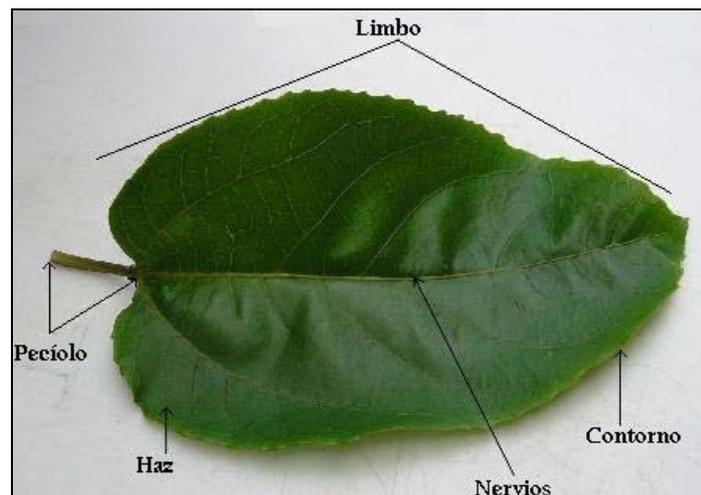
La identificación de las coberturas vegetales presentes en el casco urbano de las islas La Viciosa y El Morro se efectuó con un reconocimiento en campo en el mes de diciembre de 2005, desarrollado por el CCCP en el proyecto “Identificación y clasificación de la flora en las islas de La Viciosa y El Morro”, éste se basa en la clasificación taxonómica por morfología y características específicas del taxón de la planta, y la ubicación espacial (coordenadas geográficas) de las mismas, registradas con GPS.

La caracterización de las plantas se basa en el registro de frutos, flores y descripción completa de la hoja según:

- ❖ Nervadura de la hoja, paralela, pinada o palmada (distribución de los nervios que componen el tejido vascular de la hoja).
- ❖ Filotaxis o disposición de las hojas sobre el tallo.
- ❖ Ausencia o presencia de pecíolo (parte que une la lámina de una hoja a su base foliar o al tallo)
- ❖ Margen o contorno.
- ❖ Forma del limbo (parte ancha de la hoja)

La información registrada en el proyecto arriba mencionado se complementa con un levantamiento en campo realizado a partir de reconocimiento visual y fotográfico, en este caso no se uso equipo GPS para la localización espacial de las especies vegetales, la orientación en la zona de vegetación no identificada se generó por medio de líneas de trabajo trazadas sobre un aerofotografía de la isla El Morro tomada en las campañas LiDAR.

Figura 17. Partes de la hoja de una planta



La información espacial de los diferentes tipos de especies se estructuró a partir de la generación de polígonos en las coordenadas correspondientes a cada planta a través de un software especializado para la generación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como lo es el módulo ArcMap de ArcGIS, que permite visualizar, crear, editar y consultar mapas. El proceso se basa en la vectorización de las especies vegetales, usando como herramienta guía una fotografía aérea ortorectificada de la isla El Morro y La Viciosa en formato ECW, que fue tomada en la campaña LiDAR con una resolución espacial de 25 cm, también se crearon atributos al *layer* (capa) generado, se calculó el área de los polígonos y se realizó una clasificación por colores, con el fin de tener un parámetro de distinción para cada tipo de cobertura. Esta información fue almacenada en un archivo de extensión *.shp*, que es un formato vectorial *shapefile* de almacenamiento digital, que guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos.

Se efectuó la georeferenciación con el módulo Arctoolbox (de ArcGIS) para unificar la información temática y llevarla al sistema de referencia oficial de Colombia, el MAGNA (Marco Geocéntrico Nacional de Referencia) que es la red básica de puntos GPS de Colombia referida a SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas), por el sistema al cual es referido se conoce comúnmente como MAGNA – SIRGAS.

Los datos LiDAR tomados en Colombia para DIMAR se manejan en el sistema coordinado MAGNA – SIRGAS OESTE; los parámetros para la proyección de este sistema se pueden observar en la tabla 2. Fueron tomados de las propiedades de la imagen ECW de La Bahía de Tumaco.

Tabla 2. Parámetros del sistema de referencia MAGNA – OESTE

Proyección	Transverse Mercator (TM)
Falso Este	1000000
Falso Norte	1000000
Meridiano Central	-77.07750792
Factor de escala del meridiano central	1.00000000
Latitud de origen de proyecciones	4.59620042
Unidad lineal	Metro (1)
Elipsoide	GRS80
Datum	WGS84

ADQUISICIÓN DE LOS DATOS LiDAR

Los datos LiDAR adquiridos por DIMAR para desarrollo del proyecto “Determinación técnica de la Jurisdicción de la Dirección General Marítima” por los centros de investigación CCCP y CIOH (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrológicas), fueron tomados por el equipo de Merrick con un sistema ALS40 aerotransportado en un avión Cessna 402B. La misión desarrollada para cubrir el área de estudio incluyó seis líneas de vuelo paralelas y para calibración, una línea de vuelo transversal.

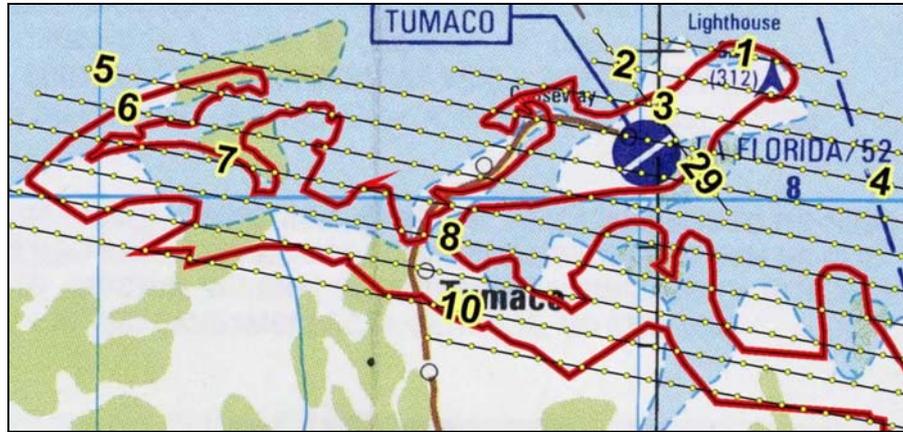
Los parámetros de calibración del sistema aerotransportado de levantamiento topográfico con láser basado en plataforma ALS40 y del plan de vuelo se encuentran en la tabla 3. De éstos parámetros dependen la densidad y espaciado de los puntos de elevación

Tabla 3. Especificaciones del ALS40 para la toma de datos LiDAR en Tumaco

Configuración del escáner	
Parámetro	Especificación
FOV de escaneo	30°
Altura nominal de vuelo	1219 m
Velocidad del avión	125 nudos = 231.52 Km/h
Frecuencia de pulsación del láser	40 kHz
Apertura del receptor	75°
Frecuencia de escaneo	29 Hz
Longitud de onda	1084 nm
Modo de intensidad	3
Patrón de escaneo	
Ancho de barrido total (SW)	653.26 m
Espaciamiento de puntos lateral	2.22 m
Espaciamiento de puntos perpendicular a la línea de escaneo	1.51 m
Diámetro de la huella láser	0.43 m
Densidad de puntos promedio	0.95 ptos/m ²
Área/puntos promedio	1.05 m ²
Inclinación máxima	1313.77 m
Margen de solapamiento	27.27 %
Rango de cobertura (basado en la línea máxima de espaciamento)	109.98 km ² /hora

La zona fue explorada por 6 líneas de vuelo paralelas (línea 1, 2, 3, 4, 5, 6) y para efectos de calibración 1 línea transversal (línea 29). (Figura 18, tomada del plan de vuelo efectuado por Merrick)

Figura 18. Plan de vuelo para la zona de estudio.



La adquisición de los datos LiDAR se vio comprometida en gran parte por las condiciones meteorológicas de la zona, como precipitación y nubosidad que no permitieron vuelos constantes; sin embargo, los datos para las islas La Viciosa y El Morro fueron tomados en tres días; la hora del día en que se registraron los datos se divide en tres regiones teniendo en cuenta la hora en que se tomaron las fajas de barrido que cubren cada una de las tres zonas, así los datos LiDAR que corresponde a la zona 1. tomados entre las 3:27 y 5:00 PM, los puntos de la zona 2 entre las 10:25 y 10:55 AM y los de la zona 3 entre las 4:30 y 5:00 (ver figura 19).

La información tomada con el sistema ALS40 fue sometida a un preprocesamiento por parte del personal de Merrick, que consistió, de forma general, en la determinación de la altura de cada objeto presente en la superficie, el cálculo de las orientaciones del sensor mediante la información del sistema GPS y la IMU, y a partir de esto, la generación de archivos de puntos coordinados y una clasificación de los datos LiDAR.

Los datos LiDAR y el valor de intensidad de cada punto reflejado por el suelo, fueron entregados en archivos tipo ASCII y LAS proyectados en el sistema de referencia MAGNA – OESTE. El LAS es el formato original de puntos LiDAR el cual contiene datos binarios

compuestos por un bloque de cabecera público que reúne los datos genéricos como el número de puntos y la información de coordenadas, un registro de las extensiones de la variable donde se tiene el tipo de variables de los datos incluyendo la información de proyección, metadatos y datos de aplicaciones de usuario y los datos de los puntos tales como la intensidad, número de retornos, clasificación, entre otros. El error altimétrico y planimétrico registrado con los parámetros usados fue de 15cm.

Cabe resaltar que esta información se complementa con fotografías aéreas digitales ortorectificadas y georeferenciadas, de resolución espacial de 25cm, tomadas en las campañas LiDAR realizadas.

Figura 19. División del área de estudio por zonas según la hora en que se tomaron los datos



PROCESAMIENTO DE DATOS LiDAR

A los datos LiDAR entregados en los archivos .LAS y ASCII como datos crudos, y clasificados en dosel de la vegetación, suelo y construcciones (*canopy*, *ground* y *building*) se les perpetró una minuciosa revisión con apoyo de las fotografías aéreas digitales, en el software de procesamiento LiDAR llamado MARS Explorer versión 4.0 Pro, con lo que se encontraron algunos puntos en clasificaciones incorrectas, ejemplos de esto son: kioscos en las playas, rocas, automóviles, construcciones, zonas de arena y líneas eléctricas en clase *canopy*, construcciones en clase *ground*; esto hizo necesario la aplicación de filtros para llevar a la clase correspondiente los puntos en clases erradas, además de una edición manual que permitió una reclasificación más detallada de los puntos, para la cual se usaron los módulos de filtrado y edición del software de tratamiento de datos LiDAR

El paquete de filtros de Mars provee algoritmos para la clasificación de puntos LiDAR, que pueden ser aplicados a los archivos .LAS en forma de funciones individuales o en un filtro macro, de forma general éstos filtros llevan a una clase específica el conjunto de puntos encontrados en el criterio de la función de filtrado.

Mars permite la aplicación de 14 filtros a las nubes de puntos LiDAR, en éste estudio se hace uso solo de dos que se explican a continuación.

- ❖ **Filtro por retorno.** Con éste filtro se encuentran puntos que tienen un valor de retorno común en un área dada; un punto es reclasificado si el valor de retorno y los valores de retorno de los puntos cercanos coincide con el parámetro de referencia específico dentro del radio de búsqueda dado, ignorando diferencias en altura (z). [22]

Para la aplicación de este filtro se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- a) Radio de búsqueda o la distancia bajo consideración para la búsqueda de puntos con un valor de retorno dado, en este caso el radio de búsqueda no se fijó en valor, sino que se realizó por medio de la selección del área a filtrar.
- b) Valor de retorno o lista de especificaciones de retorno. Los retornos no son justamente primer retorno, segundo retorno, el sistema identifica cuantos retornos del disparo láser fueron registrados, por ejemplo: primer retorno de 3 retornos. El filtro presenta las siguientes opciones:
 - Todos: escoge todos los posibles valores de retorno incluyendo los desconocidos.
 - Único: encuentra solo el primero de algún número de retornos.
 - Último: últimos retornos de algún número de retorno.
 - Medio: retornos que no son ni el primero ni el último.
 - Desconocidos: aquellos puntos LiDAR que no poseen un valor de retorno.

Para el desarrollo de esta investigación sólo se requería la información del primer y último retorno, por lo que se escogieron los parámetros primero y último, así los puntos encontrados con el valor de retorno primero son llevados a la clase *canopy* (dosel de la vegetación o vegetación) y los del valor de retorno último a la clase *ground* (suelo).

- ❖ **Filtro de distancia al suelo.** Selecciona los puntos que están dentro de la distancia al suelo de referencia para la superficie de puntos, es decir la altura promedio del suelo en la zona de estudio. Dentro del sistema de coordenadas de los datos este valor se encuentra en un rango de 16 m a 17 m, para llevar los datos correspondientes a suelo a la clase *ground* se ingresó este rango como diferencia mínima y máxima de distancia;

para los otros casos, como las confusiones entre líneas eléctricas con vegetación alta, también se ingresó la altura promedio de estos objetos en cada área involucrada para que el filtro los discriminara de la vegetación; tratándose de construcciones clasificadas como *canopy* se encontró que en ciertos casos tenían alturas iguales a la vegetación, por lo que la aplicación de éste filtro no fue adecuado y requirió el uso de la inspección visual y la reclasificación por edición manual

- ❖ **Reclasificación y edición manual.** la aplicación de los filtros anteriores fue complementada con la reclasificación y edición manual de los puntos que seguían en clases erradas, como es el caso de construcciones, líneas eléctricas y vegetación; con esta función se permite clasificar los puntos seleccionados a la clase que se designe, por lo tanto los puntos LiDAR se clasificaron a partir de la inspección visual, usando como herramienta las aerofotografías digitales y comparación de alturas. El proceso se efectuó a través de la elaboración de perfiles de línea en las zonas que presentaban errores de clasificación, por lo que se obtuvo una visualización y diferenciación más clara de la distribución por alturas de los puntos a clasificar.

Las figuras 20 y 21, muestran un ejemplo de las confusiones presentadas entre objetos sobre el suelo, en la figura 20 se muestra un área donde a simple vista solo hay vegetación, cuando se combina la fotografía aérea con los datos LiDAR se puede ver que hay una construcción. El perfil de línea confirma la presencia de una casa junto a un árbol y revela la diferencia de alturas.

Además de los perfiles de línea, se generaron modelos digitales de elevación (MDE) con los datos LiDAR para revisar los puntos, visualizándolos en forma tridimensional y se usaron para la clasificación de líneas eléctricas, construcciones y vegetación.

Las imágenes de intensidad fueron usadas como ayuda para filtrar construcciones, ya que revelaron cambios en las superficies no visibles con los datos de elevación y permitieron distinguir diferencias entre materiales presentes en la zona.

Figura 20. En el área marcada se ve una zona aparentemente de vegetación

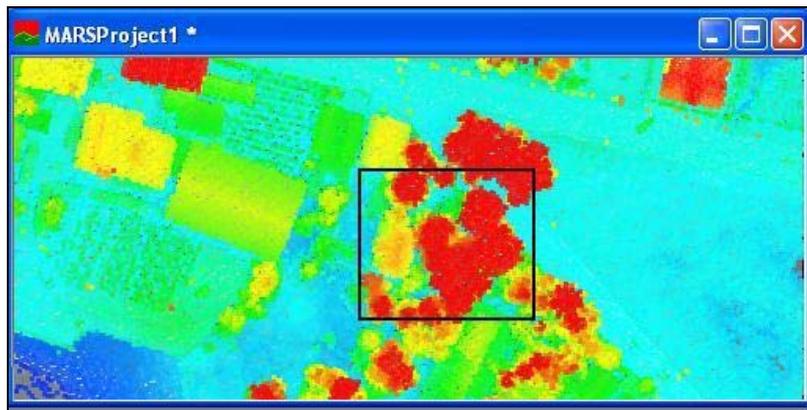
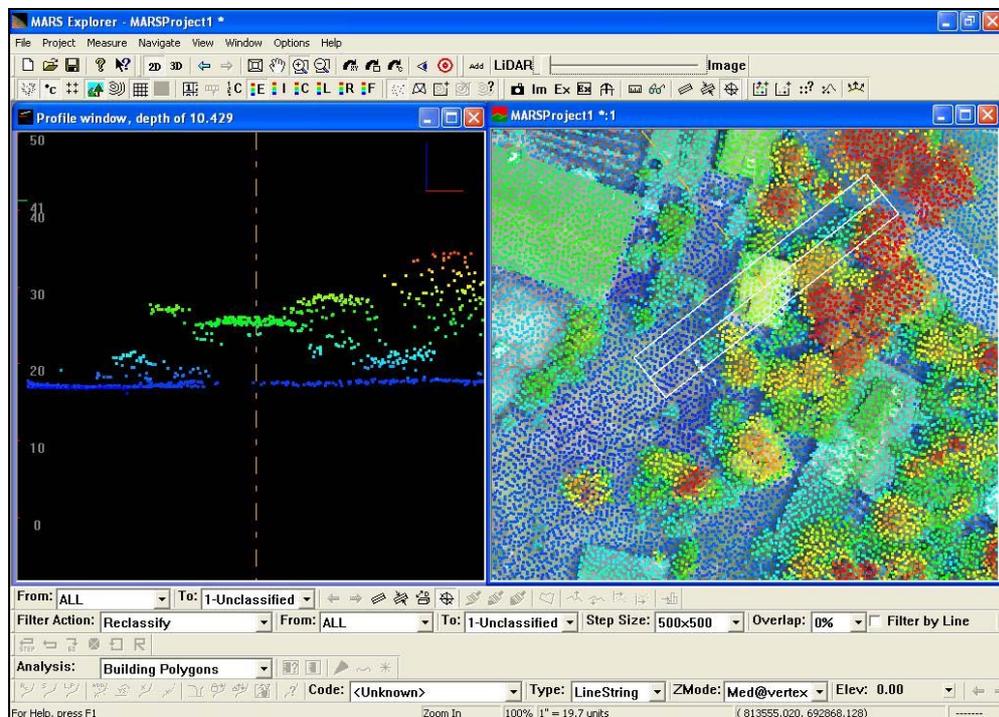


Figura 21. Perfil de línea de la zona marcada en la figura 20



DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PENETRACIÓN DEL SISTEMA LiDAR

El índice de penetración del LiDAR (LPI), es el parámetro más importante en la determinación del grado de penetración del LiDAR, ya que permite ver cuanto terreno es cubierto por la proyección vertical de la vegetación. El cálculo de éste índice requiere conocer con exactitud el número de puntos correspondientes a vegetación y la cantidad de puntos registrados de suelo, en el área ocupada por la vegetación.

El LPI se define como la cantidad de puntos de suelo por puntos de vegetación, en un área determinada:

$$LPI = \frac{g_{ij}}{g_{ij} + v_{ij}} \quad (30)$$

Donde g_{ij} es la densidad de puntos de suelo y v_{ij} la densidad de puntos de vegetación. El LPI es una medida adimensional, g_{ij} en el denominador permite normalizar las variaciones locales de la densidad de muestreo debido al solapamiento de las fajas y variaciones en la velocidad de la aeronave. [23]

El LPI varía en un rango de 0 a 1, los valores cercanos a cero describen una vegetación densa y los valores cercanos a 1 son característicos de áreas descubiertas.

Existen al menos tres posibilidades para definir el LPI:

1. Utilizando sólo los datos del primer eco.
2. Usando sólo los datos del último eco.
3. Haciendo uso de ambos ecos simultáneamente.

La opción uno no es muy adecuada ya que la mayor parte de los primeros ecos se producen por contacto con las partes más elevadas de la vegetación y el número de puntos del primer eco que alcanzan el suelo es pequeño.

En Mars se integró toda la información obtenida, a partir de la creación de un proyecto donde se cargaron los archivos de puntos ya filtrados, reclasificados y editados manualmente de las clases, *canopy* y *ground*, que son las requeridas para calcular éste índice, sobre estos datos se adicionó un *shapefile* de las coberturas vegetales, por consiguiente se logró visualizar la nube de puntos correspondiente a cada tipo de vegetación (digitalizada por polígonos). Los puntos LiDAR de cada polígono se exportaron en archivos de texto, lo que permitió hacer el conteo de éstos.

El conteo de puntos en la clase *ground* y *canopy* de cada polígono se realizó de forma independiente, por medio de una rutina elaborada en MATLAB, puesto que se trataba de grandes cantidades de puntos. Los resultados obtenidos se introducen en la ecuación (30) y se calcula el LPI para cada especie vegetal identificada en la zona.

Los valores del LPI se adicionaron al *shapefile* de las coberturas vegetales en el software ArcMap y se creó un nuevo *layer* con esta información, además se clasificaron en cinco rangos y se asignó un color a cada uno, para lograr así una mejor interpretación y análisis de estos resultados.

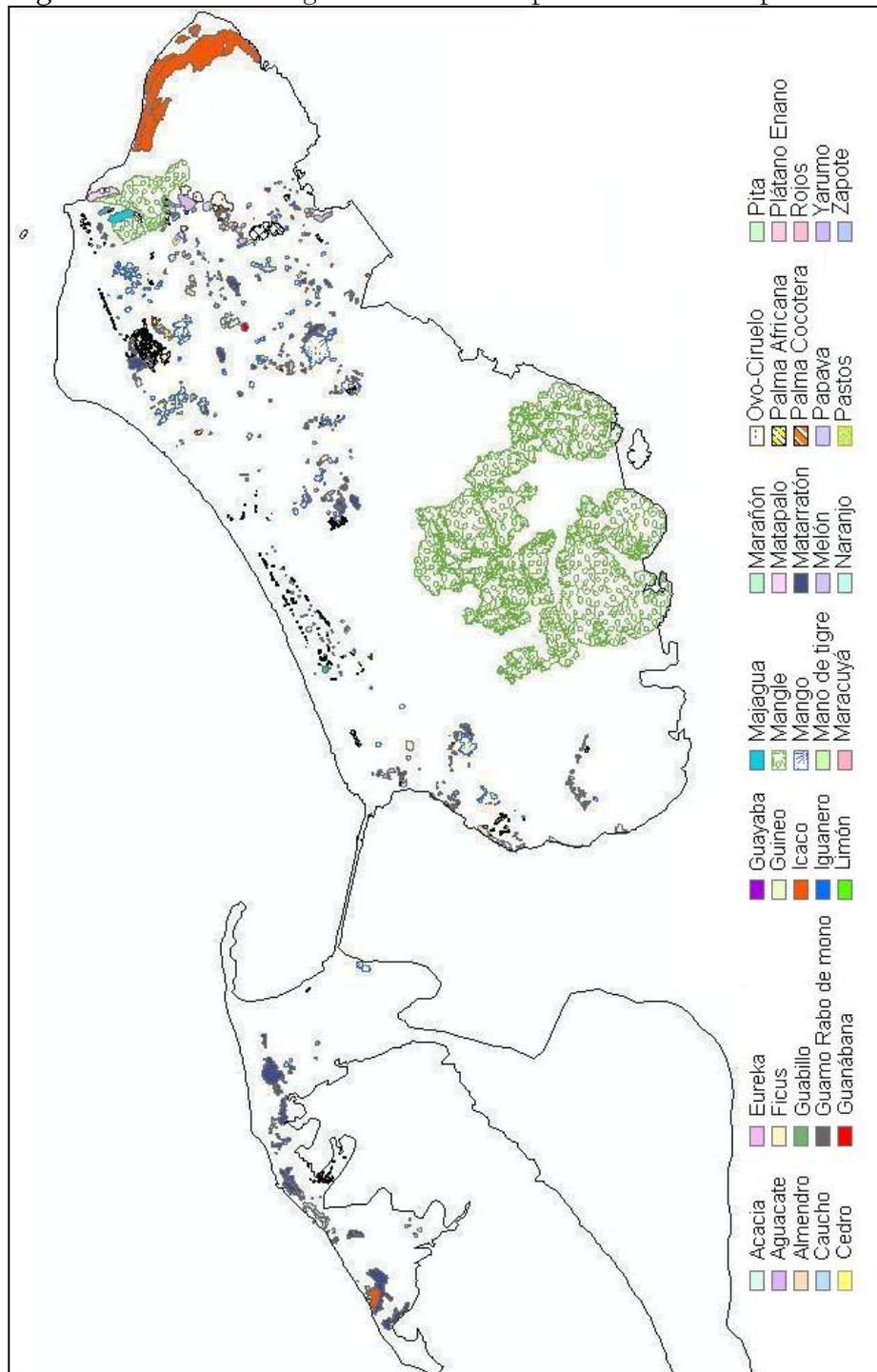
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. ESPECIES VEGETALES

Se encontraron 46 tipos de plantas entre árboles, arbustos, pastos y vegetación estuarina. El proyecto “Identificación y clasificación de la flora en las islas de La Viciosa y El Morro” presenta 38 especies, de las cuales solo se emplearon 28, las otras se descartaron puesto que ocupaban áreas muy pequeñas o existían muy pocos ejemplares, en total se trabajó con 35 tipos de vegetación, las 7 especies restantes (caucho, guabillo, iguanero, majagua, mano de tigre, pastos y matapalo) fueron identificadas en el levantamiento en campo realizado con el fin de identificar la vegetación en las áreas no abarcadas por el proyecto mencionado.

Como resultado de la digitalización de las 35 especies vegetales identificadas, se tiene un *shapefile* proyectado en MAGNA – OESTE con 777 polígonos vectorizados, donde cada uno representa una cobertura vegetal; la clasificación por colores realizada permite una diferenciación entre cada especie, los atributos asociados a cada especie son: un número identificador de polígono (ID) usado como guía al exportar los datos LiDAR, tipo de cuadro de lista polígono, polilínea, punto (*shape*), nombre común de la especie (NOMBRE) y área de cada polígono en metros cuadrados (ÁREA). De esta forma, la estructuración de las coberturas vegetales permitió tener una información más puntual de la ubicación y área cubierta por cada tipo de vegetación y el archivo tipo *shapefile* facilitó la fusión con los datos LiDAR en Mars.

Figura 22. Coberturas digitalizadas con la respectiva clasificación por colores



Algunas zonas de difícil acceso no fueron identificadas, pero las 35 especies encontradas representan la vegetación de las dos islas. Se puede observar que la cobertura más abundante y representativa es el mangle rojo (*Rizophora mangle*), vegetación típica de estuarios y zonas tropicales.

Las coberturas vegetales, en zonas muy urbanas, en alrededores de viviendas, o sobre los techos de éstas fueron descartadas, ya que la vegetación se ve influenciada por factores antrópicos, un ejemplo de esto es la absorción de nutrientes. De esta forma se busca tener condiciones aproximadamente similares para las especies vegetales bajo análisis, y determinar si influyen o no las características del suelo en la respuesta del sensor usado.

Tabla 4. Relación número de polígonos por tipo de especies identificadas.

Cobertura	Nombre científico	# Polígonos
Acacia	Acacia bracinga	10
Aguacate	Persea grattisima	18
Almendro	Prunus Amigdalus	97
Caucho	Hevea brasiliensis	2
Cedro	Cedrela spp	2
Eureka	Chrysalidocarpus lutescens Wend	1
Ficus	Ficus Benjamina L.	24
Guabillo	Jacaranca copaia	2
Guamo rabo de mono	Inga edulis mart	15
Guanábana	Annona muricata	28
Guayaba	Psidium Guayaba	28
Guineo	Musa sapientum	1
Icaco	Chrysobalanus icaco	9
Iguanero	Avicennia germinans	2
Limón	Citrus medica linne	16
Majagua	Hibiscus tiliaceus	4
Mangle	Rizophora mangle L.	30
Mango	Mangifera indica	113
Mano de tigre	Bocconia frutescens L	4
Maracuyá	Passiflora edulis	1
Marañón	Anacarium occidentale L.	2
Matapalo	Rubiaceae	4
Matarratón	Gliricidia sepium	67
Melón	Cucumis Melo L.	1
Naranja	Citrus aurantium sub sinesis	4
Ovo - Ciruelo	Spondias spp	18
Palma Africana	Elaeis guineensis	145
Palma Cocotero	Cocos nucifera	55
Papaya	Carica papaya L.	19
Pastos		4
Pita	Agave americana	10
Plátano enano	Musa cavendishii	19
Rojos	Hibiscus spp	4
Yarumo	Cecropia spp.	12
Zapote	Matisia cordata	6

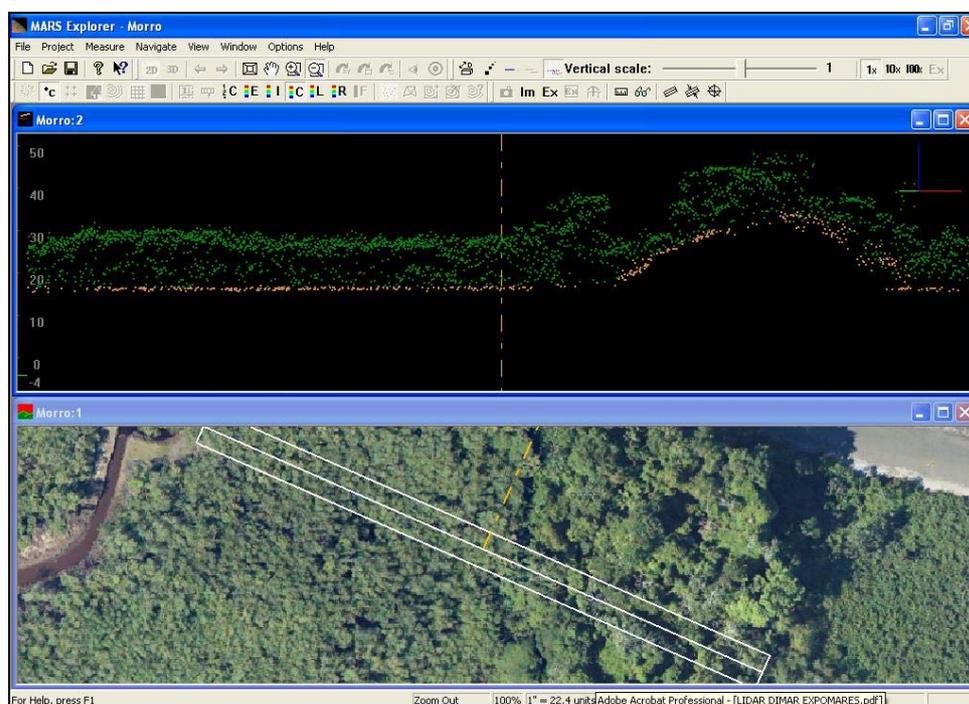
6.2. TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN LiDAR

A partir de los vuelos LiDAR realizados en el mes de febrero de 2006 en la zona de estudio se adquirieron 14'340.918 puntos crudos. Después del preprocesamiento efectuado por Merrick y el filtrado, reclasificación y edición manual realizados se obtuvieron para la clase vegetación (*canopy*) 5'011.655 puntos y para la clase suelo (*ground*) 5'182.578 puntos.

De acuerdo a análisis hechos por el CCCP, se determina que la precisión de los datos tomados con el ALS40, se encuentra dentro de los valores permitidos, mayor a 0.15 m en altimetría y 1 m en planimetría.

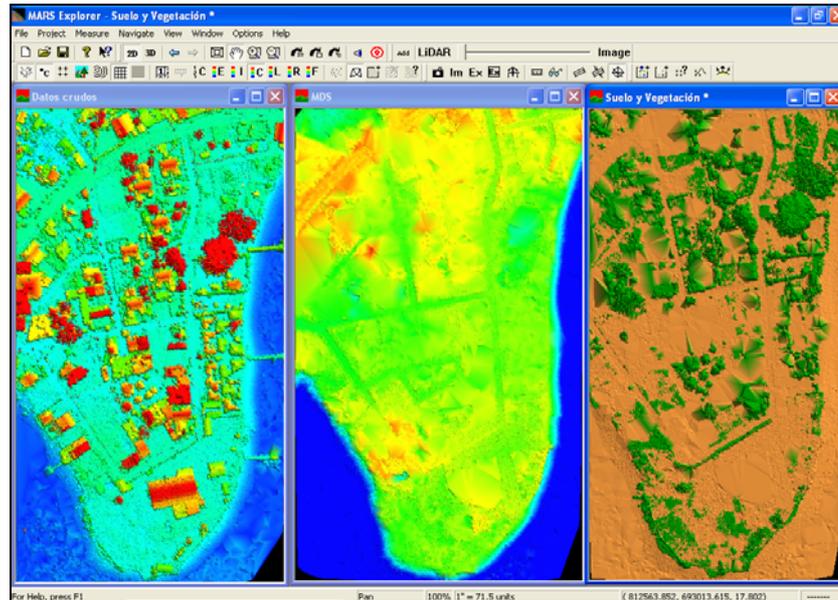
Con la aplicación de los filtros y la edición manual se generaron superficies más uniformes y se visualizaron de forma más clara los puntos de suelo bajo vegetación (ver figura 23). Las nubes de puntos (x, y, z) convertidas en una malla regular de valores de altitud, dejan ver la precisión de los modelos de superficie, tanto en zonas despejadas como en zonas de vegetación densa, trabajo que no brinda muy buenos resultados con técnicas fotogramétricas ya que no se cuenta con valores de altura y no es posible tener información del suelo bajo vegetación. Esto muestra que los datos son aptos para determinar el índice de penetración.

Figura 23. Perfil de línea de una zona de vegetación abundante (isla El Morro)



En la figura 24 a). Se presenta una distribución por elevación, generada con los datos crudos para un área de la isla la viciosa; la escala de colores de este modelo digital de terreno se basa en los colores primarios (RGB), los puntos de menor altura se observan en azul, una altura media en verde y los de mayor altura en rojo, con degradaciones entre ellos. La figura b) muestra el modelo digital de superficie (MDS) de esta zona formado con los puntos obtenidos después del proceso de filtrado y edición manual. c) es la misma zona, pero en ella se puede visualizar la vegetación presente sobre el suelo. La parte d) presenta un modelo digital de elevación de una zona de la isla El Morro. Estos modelos, más el modelo de elevaciones, son idóneos para la evaluación de curvas de nivel en el desarrollo de estudios de riesgo de inundación.

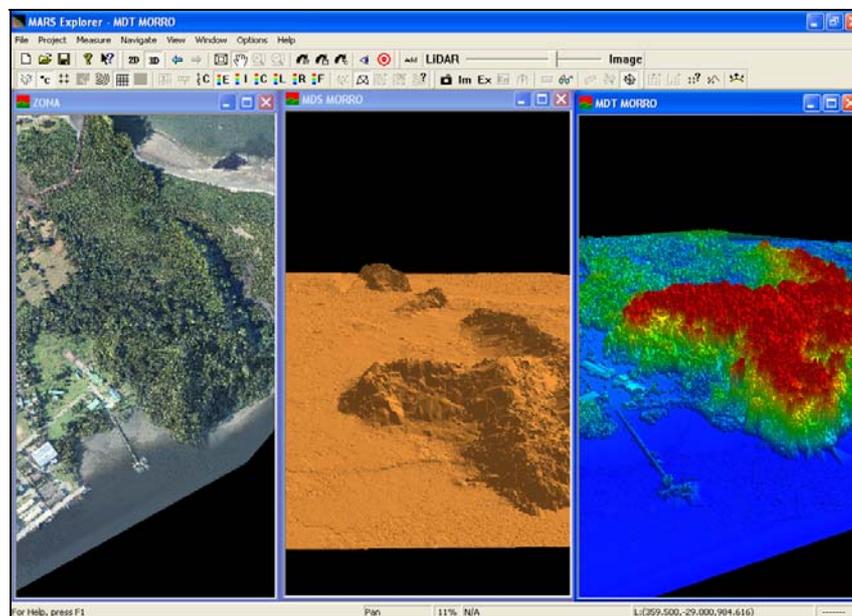
Figura 24. Modelos digitales de terreno. a), b) y c) para zonas de la isla La Viciosa. d) para la isla El Morro



a).

b)

c)



d)

6.3. REFLECTIVIDAD DE LAS COBERTURAS VEGETALES

La reflectividad de cada cobertura vegetal identificada en las islas La Viciosa y El Morro, con relación a los pulsos de luz incidente emitidos por el transmisor láser Nd: YVO⁴ y configurado para operar a una longitud de onda de 1084 nm, fue determinada a partir de los datos de intensidad de cada punto y su respectiva imagen; los valores están representados en tonos de grises de 0 a 255, donde 255 es la máxima reflectividad y 0 absorción total de la luz incidente.

Se encontró que dos polígonos de almendro, dos de ficus, uno de guanábana, dos de mango, uno de matarratón, cinco de plátano enano, y uno de rojos son los únicos que registran máximo valor de intensidad (255) y por ende máxima reflectividad; por otra parte no se encontraron coberturas que presentaran absorción total.

Se esperaba que para un sólo polígono de cualquier especie vegetal los valores de intensidad fueran poco dispersos, ya que solo se trabaja con puntos LiDAR correspondientes a la clase vegetación (*canopy*); sin embargo, como se puede observar en la tabla A1 (ver anexo), no ocurre esto; a excepción de los polígonos mencionados arriba, los demás no poseen un único valor de intensidad. Por medio del coeficiente de variación, el cual expresa la desviación estándar como un porcentaje de la media, se muestra que tan dispersos son los valores de intensidad para cada polígono; un coeficiente de variación pequeño indica una dispersión baja, por lo tanto medidas más óptimas y una respuesta más homogénea de la cobertura vegetal frente a la longitud de onda incidente, así pues las coberturas que presentan mejores resultados, teniendo en cuenta la cantidad de polígonos involucrados, son la pita con un coeficiente de variación de 6,31%, el ficus con 8,06%, la palma africana con 8,74%, el matarratón 9,12%, limón 9,29% , la acacia 9,37% y el mangle 9,57%, que es una de las especies predominantes en El Litoral Pacífico colombiano.

Aunque los resultados registrados en la tabla 5, muestran desviaciones estándar bajas y coeficientes de variación relativamente pequeños, no es conveniente dar un valor absoluto de intensidad, pero se puede expresar en rangos de reflectividad; valores en tonos de grises de 0 a 85 corresponden a baja reflectividad, entre 85 y 170 reflectividad media, y mayores a 170 corresponden a reflectividad alta.

Teniendo en cuenta estos rangos, no hay coberturas con baja reflectividad y la mayoría de los polígonos se encuentran en el rango de reflectividad alta, no obstante aparecen polígonos de las mismas coberturas con una reflectividad media, lo que ratifica que no es adecuado expresar la intensidad de cada cobertura en un valor fijo.

Dado que se está midiendo el parámetro de intensidad para agrupaciones de hojas y en algunos casos hasta ramas, las variaciones se presentan posiblemente en gran parte por el estado fenológico de la vegetación y el tipo de suelo sobre el que se encuentra, dadas las características de la zona de estudio, se tienen suelos variados como playas, tierra firme, combinaciones arena, tierra firme y sedimentos, y otras que han sido modificadas, y se denominan como rellenos. Se aclara que las especies vegetales para las cuales solo se tiene un polígono, no se incluyen en el análisis ya que no es posible efectuarles un análisis estadístico.

Con todo lo anterior y como lo muestra la literatura, la reflectividad de la vegetación es alta en la banda del infrarrojo cercano y para el caso analizado, la respuesta de la vegetación presente en las islas a la longitud de onda de 1084nm así lo demuestra.

Tabla 5. Valor de intensidad promedio para las coberturas vegetales y datos estadísticos

I = valor de intensidad

COBERTURA VEGETAL	# POLÍGONOS	I PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)
Acacia	10	220,18	20,63	9,37
Aguacate	18	201,03	21,65	10,77
Almendro	97	211,98	24,18	11,41
Caucho	2	174,28	10,61	6,09
Cedro	2	182,19	28,51	15,65
Ficus	24	226,76	18,28	8,06
Guabillo	2	185,43	36,85	19,87
Guamo rabo de mono	15	185,76	22,58	12,15
Guanábana	28	213,45	21,59	10,11
Guayaba	28	213,17	26,68	12,52
Icaco	9	241,54	21,19	8,77
Iguanero	2	187,93	22,47	11,96
Limón	16	226,64	21,05	9,29
Majagua	4	205,33	32,06	15,62
Mangle	30	197,63	18,91	9,57
Mango	113	213,58	25,05	11,73
Mano de tigre	4	229,04	12,82	5,60
Marañón	2	229,28	12,42	5,42
Matapalo	4	219,18	23,78	10,85
Matarratón	67	215,84	19,69	9,12
Naranja	4	227,07	38,88	17,12
Ovo - Ciruelo	18	188,08	21,41	11,39
Palma Africana	145	220,19	19,25	8,74
Palma cocotero	55	206,39	22,04	10,68
Papaya	19	205,29	22,91	11,16
Pastos	4	216,30	40,98	18,94
Pita	10	219,26	13,85	6,31
Plátano enano	19	227,80	27,76	12,19
Rojos	4	235,54	20,58	8,74
Yarumo	12	181,34	19,37	10,68
Zapote	6	214,65	27,29	12,72

6.4. ÍNDICE DE PENETRACIÓN DEL SISTEMA ALS40

La tabla A1 (ver anexo) contiene los valores del índice de penetración del sistema ALS40 obtenidos por medio de la ecuación (30) para cada una de las coberturas vegetales.

El primer análisis del LPI fue realizado para coberturas de una forma puntual e individual, para tener solo los puntos de zonas cubiertas por vegetación, un ejemplo son los cultivos de palma, para estos se observa espacios libres de follaje, para evitar resultados errados en este parámetro, se sectorizaron las palmas de tal forma que se abarcara la parte correspondiente solo a la flora.

De forma similar a los valores de intensidad, se observa que el LPI para los polígonos de un mismo tipo de vegetación no tiene un valor idéntico, a excepción del caucho. La desviación estándar y los coeficientes de variación para las vectorizaciones de cada tipo de vegetación muestran que la penetración del ALS40 presenta mejores resultados para mano de tigre con un coeficiente de variación de 36,36%, naranjo 36,37%, palma cocotero 50%, acacia 53,85%, icaco 59,09% y mangle 60%, debido a que manifiestan valores de LPI menos dispersos, lo que ofrece homogeneidad y mayor precisión en los resultados.

Para el caso contrario se encuentran los siguientes tipos de vegetación, cuyo coeficiente de variación supera el 100%, ciruelo 141,67%, marañón 137,5%, matarratón 107,14%, y guabillo, limón y pastos con 100%; indicando que no se puede usar un LPI promedio para éstas coberturas ya que la dispersión entre los valores para cada polígono es muy grande.

Tabla 6. Desviación estándar y coeficiente de variación para los valores del LPI

TIPO DE VEGETACIÓN	# POLÍGONOS	LPI PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)
Acacia	10	0,13	0,07	53,85
Aguacate	18	0,08	0,05	62,50
Almendro	97	0,14	0,11	78,57
Caucho	2	0,05	0,00	0,00
Cedro	2	0,20	0,14	70,00
Ficus	24	0,14	0,11	78,57
Guabillo	2	0,06	0,06	100,00
Guamo rabo de mono	15	0,12	0,10	75,00
Guanábana	28	0,21	0,15	71,43
Guayaba	28	0,22	0,20	90,91
Icaco	9	0,22	0,13	59,09
Iguanero	2	0,11	0,04	36,36
Limón	16	0,15	0,15	100,00
Majagua	4	0,15	0,10	66,67
Mangle	30	0,05	0,03	60,00
Mango	113	0,13	0,09	69,23
Mano de tigre	4	0,22	0,08	36,36
Marañón	2	0,08	0,11	137,50
Matapalo	4	0,09	0,04	111,11
Matarratón	67	0,14	0,15	107,14
Naranja	4	0,30	0,11	36,67
Ovo – Ciruelo	18	0,12	0,17	141,67
Palma Africana	145	0,23	0,15	65,22
Palma cocotero	55	0,24	0,12	50,00
Papaya	19	0,16	0,13	81,25
Pastos	4	0,32	0,32	100,00
Pita	10	0,11	0,09	81,82
Plátano enano	19	0,19	0,18	94,74
Rojos	4	0,29	0,18	62,07
Yarumo	12	0,15	0,11	73,33
Zapote	6	0,10	0,08	80,00

Para una mejor interpretación de los resultados obtenidos se crearon rangos de clasificación de los valores del LPI para el ALS40 en la vegetación identificada en las islas.

Tabla 7. Rangos de clasificación para el índice de penetración

Rango LPI	Clasificación
0	No penetración del haz láser (NP)
0.01– 0.33	Penetración baja del haz láser (PB)
0.33 – 0.66	Penetración media del haz láser (PM)
0.66 – 0.95	Penetración alta del haz láser (PA)
0.95 – 1	Penetración total del haz láser (PT)

Se encontraron 28 polígonos de 13 especies vegetales diferentes, donde no hubo penetración del sistema, 21 ubicados en El Morro y el resto en La Viciosa; no están sobre zonas de rellenos, pero en la mayoría si existen otros estratos de flora significativos sobre el suelo, que influyen en el registro de los puntos correspondientes al eco generado por esta superficie ya que aumentan la densidad de la vegetación.

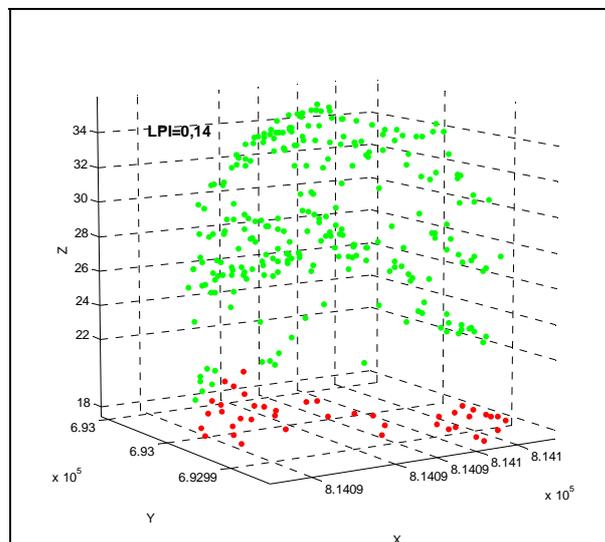
También se observa que el ALS 40 no presenta una penetración alta para las coberturas vegetales presentes en la zona de estudio, que nos indicaría terrenos prácticamente descubiertos, la mayoría de polígonos de los diferentes tipos de flora registran una penetración baja, para 21 especies se tienen valores de LPI en diferentes rangos, y 14 en un solo rango (tabla 8).

Tabla 8. Número de polígonos de la flora identificada en cada rango de clasificación del LPI

Cobertura Vegetal	# Polígonos en PN	# Polígonos en PB	# Polígonos en PM	# polígonos en PA
Acacia		10		
Aguacate	3	14		
Almendro	4	78	8	
Caucho		2		
Cedro		2		
Eureka		1		
Ficus	1	20	3	
Guabillo		2		
Guamo rabo de mono		14	1	
Guanábana	1	20	7	
Guayaba	2	19	5	1
Guíneo		1		
Icaco		8	1	
Iguanero		2		
Limón	2	13	1	
Majagua		4		
Mangle		29		
Mango	3	104	4	
Mano de tigre		3	1	
Maracuyá		1		
Marañón	1	1		
Matapalo	1	3		
Matarratón	1	59	5	1
Melón		1		
Naranja		3	1	
Ovo - Ciruelo		17		1
Palma Africana	4	106	33	2
Palma Cocotero	2	39	14	
Papaya	1	16	2	
Pastos		3		1
Pita		10		
Plátano enano	2	14	3	
Rojos		2	2	
Yarumo		12		
Zapote		6		

En la figura 25 se puede ver una cobertura de mango (polígono 334), con un LPI de 0,14 (penetración baja), muestra una vegetación densa (puntos verdes) y un porcentaje de terreno cubierto por la proyección vertical de la vegetación alto 89,7%, son pocos los puntos reflejados por suelo (puntos rojos) en comparación con los reflejados por el dosel de ésta especie.

Figura 25. Representación tridimensional de una cobertura de mango, en el rango de PB



La figura 26 representa una cobertura de matarratón (polígono 452) con un LPI en el rango de penetración media 0,49, se observa una mayor cantidad de puntos de suelo entre puntos de vegetación, el 50,6% del terreno es cubierto por el dosel de la vegetación.

Un ejemplo de cobertura para la cual el ALS40 presenta una penetración alta LPI (0.76) es una zona cubierta por pastos (polígono 723) donde solo el 23% es cubierto por la vegetación, la figura 27 deja ver que existen muchos espacios entre la vegetación, lo que hace posible el paso del haz láser del sistema y por ende el registro de una mayor cantidad de puntos de suelo (puntos rojos).

Figura 26. Representación tridimensional de una cobertura de matarratón, en el rango de PM

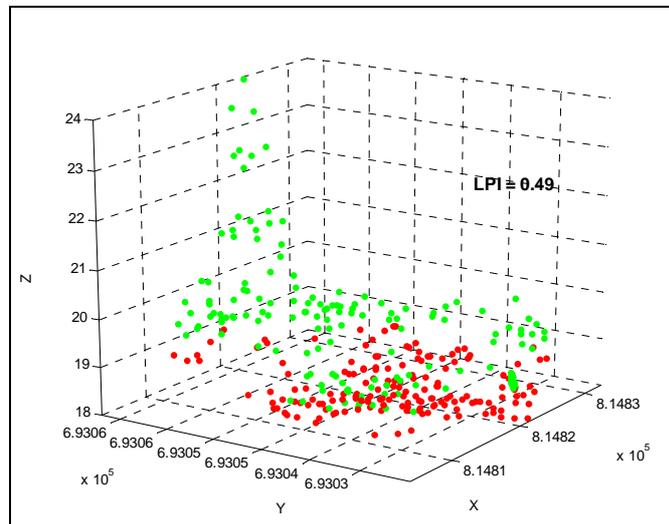
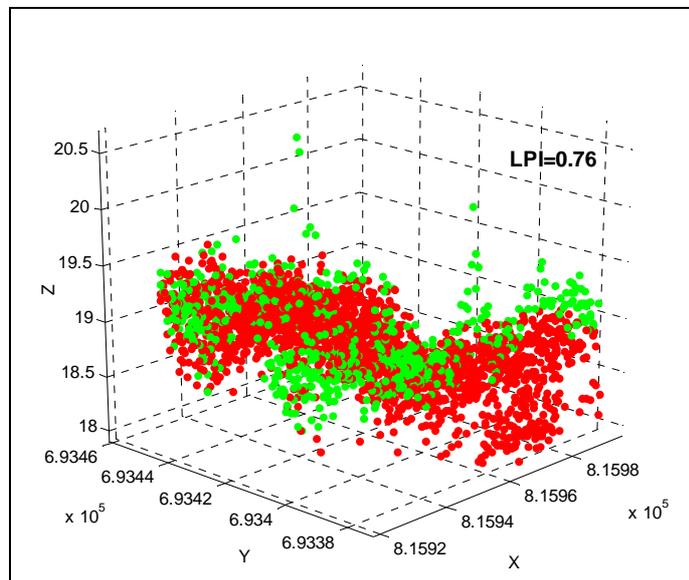


Figura 27. Representación tridimensional de una cobertura de pastos, en el rango de PA



Por las variaciones observadas en los valores del LPI para las especies vegetales de la zona de estudio se hace necesario ver si existe una dependencia del LPI con variables como el área y la intensidad. La relación del LPI con las densidades de puntos tanto de vegetación como del suelo se puede analizar a partir de la ecuación (30). Para una densidad de puntos de suelo alta, el LPI será alto y viceversa, y en el caso de la densidad de puntos de vegetación, si esta es alta, se obtendrá un LPI bajo.

Así mismo se analizó la correlación entre el LPI y parámetros como el área y la intensidad. Los coeficientes de correlación (R) se registran en la tabla 9; estos se dividen en rangos para una mejor interpretación, R entre $\pm 0,9$ y ± 1 correlación alta, R de $\pm 0,8$ a $\pm 0,9$ correlación media, R entre $\pm 0,5$ y $\pm 0,8$ correlación baja, R menor que $0,5$ no hay correlación.

De acuerdo con los rangos anteriores se encuentra que el LPI y el área para coberturas como el caucho y el guabillo presenta una correlación alta e inversa; el cedro, iguanero marañón, matapalo, correlación alta y directa, pero solo se tienen dos polígonos para cada cobertura, por lo que no existen los datos suficientes para un análisis profundo que permita determinar si realmente la correlación entre las dos variables, para estos tipos de cobertura vegetal, es alta como lo indica el coeficiente.

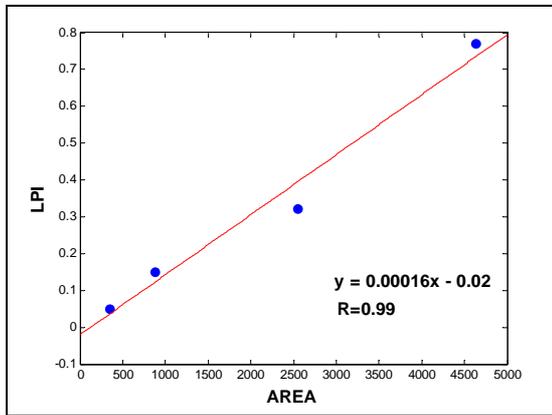
La relación entre el LPI y el área es grande para las especies de pasto ($R=0,99$), lo que corresponde a una correlación alta, mientras que para mano de tigre ($R=0,84$) muestra una correlación media. En tipos de flora como el majagua y los rojos se presenta una correlación baja.

Las 21 coberturas vegetales restantes no presentan una correlación (tabla 9) o se puede decir que no existe una dependencia entre las dos variables, aunque el área afecta de una forma indirecta al índice de penetración a través de las densidades de puntos.

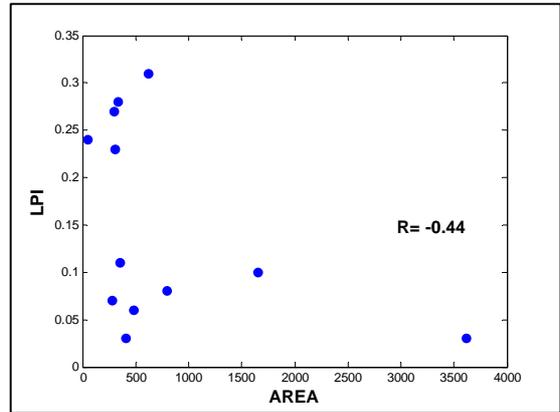
Analizando los coeficientes de correlación entre el LPI y la intensidad promedio de la vegetación, se encuentra al igual que en el análisis de correlación entre el LPI y el área, que especies vegetales para las cuales solo hay dos polígonos muestran una correlación alta, a diferencia de el matapalo ($R=0,58$) que presenta una correlación baja. Las coberturas de mano de tigre donde R es igual a $0,92$, pastos R igual a $0,86$ y rojos R igual a $0,81$ indican que existe una dependencia entre las variables en estudio.

En el resto de especies vegetales la correlación es baja o no presentan correlación por lo que no se puede establecer una dependencia entre las variables. Los valores de correlación para las coberturas analizadas se presentan en la tabla 9.

Figura 28. Correlación entre el LPI y el área en m² para las coberturas de: a) pasto y b) Yarumo

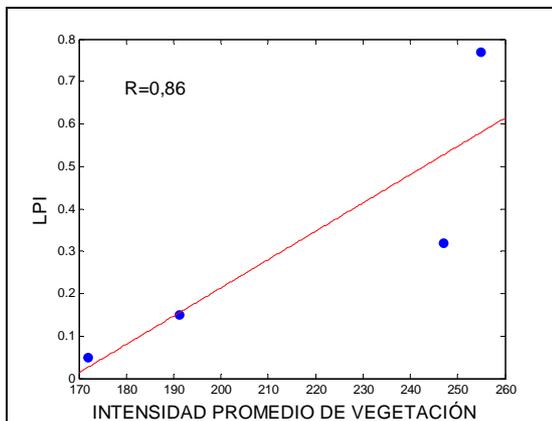


a)

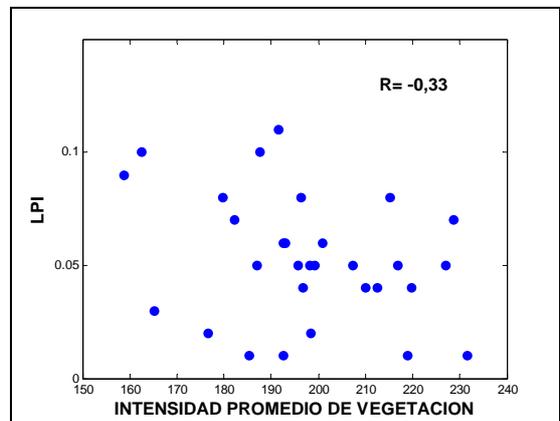


b)

Figura 29. Correlación entre el LPI y la intensidad promedio de la vegetación para las coberturas de: a) pasto y b) mangle



a)



b)

Tabla 9. Coeficientes de correlación para las coberturas vegetales identificadas en la zona.

COBERTURA VEGETAL	COEFICIENTE CORRELACIÓN LPI, ÁREA	COEFICIENTE CORRELACIÓN LPI, INTENSIDAD
Acacia	0,28	0,43
Aguacate	0,26	- 0,12
Almendro	- 0,14	0,09
Caucho	- 1	1
Cedro	1	1
Ficus	- 0,37	- 0,36
Guabillo	- 1	- 1
Guamo rabo de mono	- 0,30	0,26
Guanábana	- 0,31	- 0,13
Guayaba	- 0,13	0,11
Icaco	0,01	0,72
Iguanero	1	1
Limón	- 0,27	- 0,35
Majagua	- 0,54	- 0,57
Mangle	0,31	- 0,33
Mango	- 0,16	- 0,17
Mano de tigre	0,84	- 0,92
Marañón	1	1
Matapalo	1	- 0,58
Matarratón	- 0,10	0,46
Naranja	0,10	0,61
Ovo - Ciruelo	- 0,20	0,29
Palma Africana	- 0,26	0,07
Palma cocotero	- 0,20	- 0,07
Papaya	- 0,14	0,34
Pastos	0,99	0,86
Pita	- 0,13	0,59
Plátano enano	- 0,07	- 0,08
Rojos	- 0,74	0,81
Yarumo	- 0,44	- 0,38
Zapote	- 0,31	0,35

Por otro lado se agruparon polígonos de una misma especie dentro de un radio de búsqueda de 40m para tener información más precisa y homogeneidad con relación a las características visuales del suelo que las sustentan, es decir si es suelo húmedo, suelo seco, grama, o estratos de vegetación densos. Las especies caucho, cedro, guabillo, iguanero, maracuyá, marañón, melón, naranjo y rojos no entraron en la asociación por encontrarse muy dispersos y superar el radio de búsqueda.

Se encontró que polígonos de un mismo grupo presentaban un LPI similar, en especial para el mangle, los valores de índice de penetración se ubicaron dentro de un mismo rango y con variaciones pequeñas entre ellos, una ventaja que presenta esta cobertura es la localización en un tipo de suelo determinado, como lo es el suelo húmedo, ya que normalmente se sitúan en las franjas costeras, y es de vital importancia en dichas zonas porque cumple función de barrera ante fenómenos como erosión y Tsunamis. La palma africana y cocotero, también muestran uniformidad en cuanto a suelo, sin embargo para las demás coberturas donde se encuentran polígonos en suelos con diferentes características visuales se ven relativas variaciones en el valor del LPI.

A partir de los datos calculados, se observa la influencia que ejercen las características del suelo en el índice de penetración del sistema ALS40 en las coberturas vegetales de las islas La Viciosa y el Morro; en primer lugar la variaciones en el tipo de suelo producen efectos sobre la cubierta vegetal que se ven reflejados en el crecimiento, densidad y alteración del ciclo fenológico, que dada la forma en que se adquieren los datos para esta superficie con la técnica LiDAR, se ven bastante involucrados en los resultados obtenidos, por ejemplo el suelo sobre el que se encuentre una especie de determinada vegetación puede afectar su crecimiento, debido a la absorción de nutrientes y desarrollar menos follaje que la misma especie en otro tipo de suelo. Otra razón por la cual el LPI se puede ver influenciado por las características del suelo tiene que ver con la reflectividad del mismo en el infrarrojo

cercano, un factor de gran importancia es el contenido de humedad, ya que este disminuye la reflectividad del suelo en esta banda del espectro electromagnético.

Es posible que las variaciones encontradas entre coberturas de la misma especie vegetal para el índice de penetración, no solo se relacionen con los parámetros mencionados a lo largo de éste análisis, ya que puede ocurrir que el índice de penetración del LiDAR se encuentre ligado con la edad de la vegetación, una misma especie presentaría diferentes LPI según su estado de desarrollo, que a su vez depende del emplazamiento, exposición al sol, humedad, entre otros factores.

Para los resultados obtenidos no se tuvo en cuenta la hora del día en que se tomaron los datos; sin embargo es otro posible efecto que puede alterar los valores del índice de penetración, el cual se puede ver reflejado en el cambio de rigidez de la hoja ante las condiciones ambientales, un ejemplo son las plantas que al ser irradiadas con luz solar muy fuerte toman un aspecto de vegetación marchita, por lo tanto cambia la estructura momentánea de las hojas.

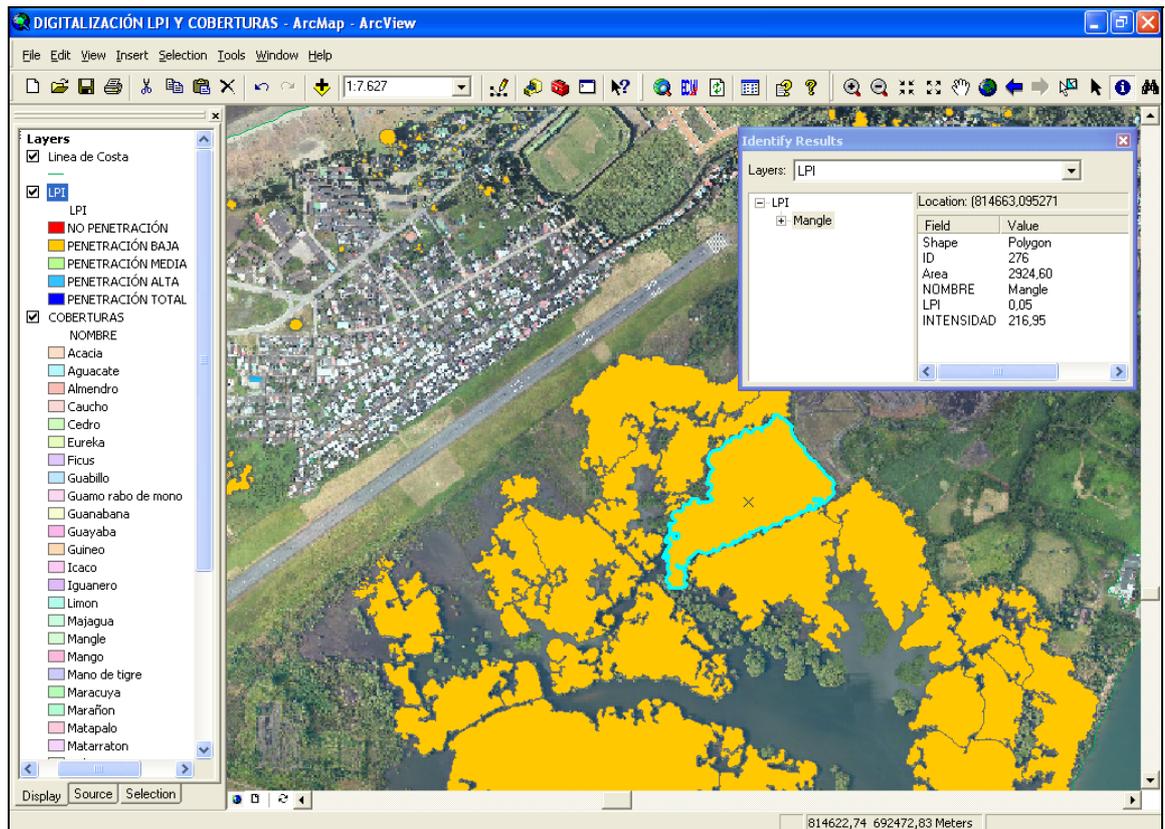
Para realizar un análisis del comportamiento de la vegetación con relación a esta variable y ver como influye sobre el LPI se requiere un registro de datos LiDAR a diferentes horas del día para una misma zona y una verificación en campo.

Finalmente los valores de LPI se digitalizaron y se agregaron al proyecto en ArcMap, también se agregó como atributo el valor de intensidad para la vegetación, los colores correspondientes a los rangos de clasificación usados son:

- Rojo: no penetración.
- Amarillo: penetración baja.
- Verde: penetración media.
- Turquesa: penetración alta.
- Azul: penetración total.

De tal forma que se puede tener una visualización de la zona de estudio con relación a la capacidad de penetración del sistema ALS40 en la vegetación identificada.

Figura 30. Digitalización y representación por colores del índice de penetración



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio conlleva a determinar que el grado de penetración del sistema ALS40 en cubiertas vegetales es variable, depende de cada especie y de las características que esta presente. El parámetro que permite determinar este grado de penetración es el Índice de Penetración del LiDAR (LPI). Teniendo en cuenta que una penetración alta indica suelo prácticamente descubierto, se encuentra que la capacidad de penetración es baja tendiendo a media, pero en términos generales es buena y puede ser mejorada a partir de ajustes en la calibración del sistema y consideraciones respecto a la zona de levantamiento. Aún así la técnica LiDAR aplicada es de las más precisas para la adquisición de información altimétrica y planimétrica del terreno, y conviene hacer un estudio particular para cada cobertura, teniendo en cuenta todas las posibles variables que lo puedan afectar, sobre todo la etapa de desarrollo de la vegetación.

Además de las características de la vegetación, el LPI también depende de la altitud de vuelo sobre el terreno, puesto que entre mayor sea ésta más débil será la intensidad de la radiación reflejada, por lo que la detección se convertirá en un proceso más susceptible a errores debido a efectos ambientales por la baja intensidad de la señal. Otro factor es la cantidad de datos adquiridos de una cobertura vegetal determina, por lo que se recomienda para futuros proyectos en la toma de datos LiDAR reducir la altura de vuelo y obtener una mayor cantidad de puntos en zonas de vegetación densa.

Los resultados muestran que al igual que el índice de penetración, los valores de intensidad en tonos de grises proporcionados por el sistema no tienen un único valor para cada tipo de vegetación y ésta también se ve afectada por las características del suelo y de la vegetación misma. Un análisis más detallado de éste parámetro se puede desarrollar por medio de un LiDAR de registro de onda, que es más usado en investigaciones forestales. Sin embargo, se

encontró una aproximación del comportamiento de la reflectividad en la vegetación presente en la zona para la longitud de onda de 1084nm del ALS40, cuyo principio de funcionamiento corresponde a un LiDAR de retorno discreto.

No es adecuado generar un catálogo de datos con los índices de penetración por especies vegetales, ya que los valores del LPI son variables entre un mismo tipo de vegetación y se evidencia dependencia de este índice de las características de la vegetación y del entorno, lo que no permite definir un valor de referencia individual de índice de penetración de este sistema LiDAR, en cada especie vegetal a partir de los datos obtenidos, que pueda ser usado en otras zonas como un valor de referencia. Las coberturas para las cuales se puede tener un grado de penetración promedio en las islas La Viciosa y el Morro son la acacia, el mangle, y el yarumo, que presentaron un coeficiente de variación menor y todos los polígonos se ubicaron en el rango de clasificación de penetración baja.

La capacidad de penetración del ALS40 y los factores que la afectan, además de la información generada, servirá de apoyo para usar de forma más adecuada este tipo de datos y mejorar la adquisición de los mismos, además abre un camino en las investigaciones del CCCP que conlleven al entendimiento de la interacción de la vegetación con este sensor y permitan el desarrollo de estudios forestales, ecológicos y ambientes.

Teniendo en cuenta el análisis realizado, se recomienda desarrollar un estudio completo del comportamiento de la vegetación frente al sistema ALS40, que involucre factores ambientales como la hora del día, la etapa de desarrollo de cada tipo de vegetación, contenido de humedad, tipo de suelo y condiciones meteorológicas con pruebas de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. CALERO, L. (1995): El municipio de Tumaco y su medio ambiente. Revista: La Cuenca del Pacífico y su Fuerza Naval. Año VII. No. 14. Editorial Fuerza Naval del Pacífico. 14 p.
- [2]. Centro Control Contaminación del Pacífico – CCCP, (2003): Aportes al entendimiento de la Bahía de Tumaco. Entorno Oceanográfico, Costero y de Riesgos. Editorial DIMAR. Bogotá, 168 p.
- [3]. LILLESAND, T. KIEFER, R., (2000): Remote Sensing and Image Interpretation. 4ª Edición. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- [4]. THOMAS, E. GRAYDON, L. (1992): Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation. 5ª Edición.
- [5]. CHUVIECO, E., (1996): Fundamentos de Teledetección Espacial. 3ª Edición. Ediciones RIALP S.A. España.
- [6]. SLATER, P.N, (1980): Remote Sensing, Optics and Optical Systems. Adison – Wesley Pub. Co. En CHUVIECO, E.1996. Fundamentos de Teledetección Espacial. 3ª Edición. Ediciones RIALP S.A. España.
- [7]. GATES, D.M., KEEGAN, H.J., SCHLETER, J. C. y WEIDNER, V. R., (1965): Spectral properties of plants, Applied Optics, vol 4, pp. 11 – 20. En CHUVIECO, E., (1996). Fundamentos de Teledetección Espacial. 3ª Edición. Ediciones RIALP S.A. España.

- [8]. CURRAN, P., FOODY, G., KONDRATYEV, K., KOZODEROV, W., Y FECHENKO, P. (1990): Remote Sensing of soil and vegetation in the USSR, Taylor and Francis, London.
- [9]. BHARGAVA, D.S. y MARIAM, D.W. (1991): Spectral reflectance relationships to turbidity generated by different clay materials. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol 56, pp. 225-229. En CHUVIECO, E., (1996). Fundamentos de Teledetección Espacial. 3ª Edición. Ediciones RIALP S.A. España.
- [10]. GÓMEZ, A., DELGADO, J. y PEREZ, N. Obtención de DTM y DSM mediante tecnología LIDAR. Aplicación al Río Ebro. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría.
- [11]. MERRICK AND COMPANY [en línea] GeoSpatial Solutions: LIDAR. Medición de Distancia con Láser (LIDAR). < <http://www.merrick.com/servicelines/gis/espanol> >
- [12]. RIBEIRO, M., ZANDONÁ, D., MÜLLER, M., BAUNGARTEN, A. y FELSKY, C. (2005): Precisión del LIDAR en mapeamiento de florestas densas. ISPRS – International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- [13]. BRIZ, S. (2001): Tesis doctoral: Teledetección infrarroja de gases atmosféricos mediante espectrorradiometría FTIR. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de ciencias físicas, Madrid.
- [14]. DOCUMENTOS DE LA FAO. Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías Marinas.

- [15]. RUIZ, A. KORNUS, W. (2003): Experiencias y aplicaciones del lidar. V Semana Geomática, 11.2.03-14.2.03, Barcelona.
- [16]. HYYPPÄ J., INKINEN, M. (1999): Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. Photogrammetric Journal of Finland 1999; 16(2):27-47.
- [17]. DUBAYAH, R., DRAKE, J. (2000): Lidar Remote Sensing for Forestry Applications. Journal of forestry, 98: 44 – 46.
- [18]. FRICKER, P. GERVAIX, F. ROTH, R. LLORENS, P. DELGADO, J. CARDENAL, J. 2002. Utilización de sensores aerotransportados para la generación de MDT y ortofotografías: LH ADS40 Y LH ALS40. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Santander, España.
- [19]. Leica GeoSystems, GIS & Mapping Division. 2002. ALS40 Airborne Laser Scanner. Atlanta, USA.
- [20]. BALTSAVIAS, E.P. (1999): Airborne laser scanning: basic relations and formulas. ISPRS Journal of photogrammetry & Remote Sensing 54 199 – 214.
- [21]. DIMAR (2005): Procedimiento técnico para la generación de la base cartográfica digital. División de litorales y áreas marinas.
- [22]. MERRICK & COMPANY. (2004): MARS Tutorial.
- [23]. BARILOTTI, A. SHEERA, T. ALBERTI, G. (2006): LAI determination in forestry ecosystem by LiDAR data analysis. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry. Vienna.

ANEXO I.

Tabla A1. Coberturas vegetales por polígonos y su respectivo LPI y valor de intensidad
I: Intensidad, PROM.: Promedio, STD: Desviación estándar, PTOS: Puntos, VEG: vegetación.

ID	TIPO VEGETACIÓN	ÁREA (m ²)	I PROM.	STD I	COEF. VAR. I	# PTOS SUELO	# PTOS VEG.	LPI
1	Acacia	87,83	223,44	73,28	32,80	2	153	0,01
2	Acacia	488,22	244,65	35,85	14,65	123	741	0,14
3	Acacia	981,45	219,33	73,44	33,49	85	587	0,13
4	Acacia	113,85	195,46	95,41	48,81	19	252	0,07
5	Acacia	2071,15	200,32	89,17	44,51	237	1505	0,14
6	Acacia	46,81	198,67	83,82	42,19	10	245	0,04
7	Acacia	754,39	218,71	76,27	34,87	111	399	0,22
8	Acacia	38,63	205,91	76,37	37,09	4	23	0,15
9	Acacia	84,92	252,03	16,84	6,68	13	65	0,17
10	Acacia	132,13	243,27	37,59	15,45	15	70	0,18
11	Aguacate	163,11	196,89	90,12	45,77	46	642	0,07
12	Aguacate	19,26	210,42	84,30	40,06	0	50	0,00
13	Aguacate	27,67	204,86	81,51	39,79	3	63	0,05
14	Aguacate	60,91	226,07	74,65	33,02	15	123	0,11
15	Aguacate	527,76	197,62	93,03	47,07	258	1890	0,12
16	Aguacate	312,78	192,28	95,98	49,92	84	546	0,13
17	Aguacate	308,29	166,07	99,58	59,96	78	588	0,12
18	Aguacate	142,8	203,53	90,75	44,59	9	116	0,07
19	Aguacate	104,14	217,88	74,46	34,17	2	288	0,01
20	Aguacate	116,62	220,61	77,25	35,02	10	61	0,14
21	Aguacate	44,84	221,7	75,63	34,11	0	79	0,00
22	Aguacate	265,97	221,79	74,45	33,57	16	915	0,02
23	Aguacate	100,09	219,62	70,87	32,27	28	155	0,15
24	Aguacate	79,77	143,49	98,41	68,59	43	396	0,10
25	Aguacate	519,5	194,11	95,73	49,32	34	393	0,08
26	Aguacate	68,28	202,07	91,16	45,11	5	42	0,11
27	Aguacate	28,56	175,25	103,18	58,87	0	16	0,00
28	Aguacate	39,45	204,32	84,29	41,26	11	63	0,15
29	Almendra	46,12	239,63	61,50	25,67	11	16	0,41
30	Almendra	148,8	204,44	77,23	37,78	20	113	0,15
31	Almendra	29,71	232,25	43,21	18,61	6	8	0,43
32	Almendra	111,17	206,33	85,85	41,61	23	74	0,24
33	Almendra	34,45	205,1	85,46	41,67	5	182	0,03
34	Almendra	129,71	184,41	91,23	49,47	16	98	0,14
35	Almendra	336,52	225,5	68,88	30,55	100	793	0,11
36	Almendra	34,62	239,04	47,55	19,89	37	48	0,44

37	Almendro	148,84	216,18	76,97	35,61	25	78	0,24
38	Almendro	43,17	233,5	55,93	23,95	11	123	0,08
39	Almendro	27,58	255	0,00	0,00	4	39	0,09
40	Almendro	45,21	179,76	100,05	55,66	37	40	0,48
41	Almendro	615,89	242,22	41,52	17,14	153	243	0,39
42	Almendro	143,98	248,97	28,89	11,60	3	438	0,01
43	Almendro	119,62	239,38	49,76	20,79	25	53	0,32
44	Almendro	55,34	217,09	77,94	35,90	4	33	0,11
45	Almendro	23,65	244,54	33,74	13,80	3	13	0,19
46	Almendro	23,46	229,66	59,44	25,88	9	29	0,24
47	Almendro	31,03	228,84	63,05	27,55	5	44	0,10
48	Almendro	43,38	239,53	49,25	20,56	6	88	0,06
49	Almendro	47,25	189,27	87,75	46,36	6	37	0,14
50	Almendro	38,39	226,79	60,08	26,49	4	24	0,14
51	Almendro	143,24	236,68	54,79	23,15	21	205	0,09
52	Almendro	55,4	201,14	83,63	41,58	0	36	0,00
53	Almendro	50,58	218,35	74,05	33,91	11	118	0,09
54	Almendro	91,59	205,43	85,21	41,48	36	154	0,19
55	Almendro	79,44	222,48	66,74	30,00	53	124	0,30
56	Almendro	521,94	233,87	55,40	23,69	20	322	0,06
57	Almendro	1342,15	236,43	52,36	22,15	53	842	0,06
58	Almendro	262,36	212,1	85,28	40,21	47	130	0,27
59	Almendro	95,68	217,19	79,59	36,64	11	202	0,05
60	Almendro	297,04	191,59	92,83	48,45	84	934	0,08
61	Almendro	133,95	236,39	48,99	20,73	15	307	0,05
62	Almendro	239,34	223,14	73,61	32,99	66	442	0,13
63	Almendro	141,22	198,2	92,44	46,64	36	234	0,13
64	Almendro	232,24	208,49	88,22	42,31	5	638	0,01
65	Almendro	68,16	217,09	79,80	36,76	0	104	0,00
66	Almendro	321,5	210,95	79,91	37,88	133	411	0,24
67	Almendro	56,96	231,2	63,45	27,44	7	164	0,04
68	Almendro	45,99	219,21	76,83	35,05	15	24	0,38
69	Almendro	25,36	248,19	20,35	8,20	0	16	0,00
70	Almendro	59,06	210,33	78,96	37,54	2	257	0,01
71	Almendro	68,89	195,43	99,51	50,92	13	46	0,22
72	Almendro	29,19	255	0,00	0,00	1	13	0,07
73	Almendro	182,8	194,56	97,12	49,92	61	369	0,14
74	Almendro	101,48	245,93	30,28	12,31	13	54	0,19
75	Almendro	93,65	184,73	93,37	50,54	20	324	0,06
76	Almendro	159,23	219,84	72,66	33,05	46	262	0,15
77	Almendro	113,26	175,38	99,78	56,89	48	592	0,08
78	Almendro	193,96	213,49	78,71	36,87	137	232	0,37

79	Almendro	19,08	250,5	15,59	6,22	1	12	0,08
80	Almendro	67,18	211,52	75,77	35,82	7	42	0,14
81	Almendro	1357,79	176,08	96,07	54,56	263	2440	0,10
82	Almendro	74,28	222,38	70,50	31,70	8	50	0,14
83	Almendro	124,12	240,91	43,23	17,95	44	236	0,16
84	Almendro	366	188,22	97,69	51,90	31	1083	0,03
85	Almendro	897,04	194,78	90,77	46,60	418	1734	0,19
86	Almendro	223,16	211,16	80,71	38,22	13	153	0,08
87	Almendro	423,07	198,97	87,62	44,04	10	314	0,03
88	Almendro	475,6	188,89	96,37	51,02	6	929	0,01
89	Almendro	464,35	209,74	87,93	41,92	23	1841	0,01
90	Almendro	113,35	215,05	78,45	36,48	22	306	0,07
91	Almendro	753,75	199,5	88,67	44,45	93	1500	0,06
92	Almendro	56,84	237,19	48,34	20,38	7	31	0,18
93	Almendro	90,31	163,58	95,29	58,25	24	57	0,30
94	Almendro	323,36	206,33	82,66	40,06	54	1165	0,04
95	Almendro	228,47	194,29	94,24	48,51	15	895	0,02
96	Almendro	96,33	187,26	93,70	50,04	8	58	0,12
97	Almendro	71,79	180,34	99,51	55,18	8	54	0,13
98	Almendro	102,52	181,35	95,65	52,74	41	505	0,08
99	Almendro	182,56	167,64	101,02	60,26	1	183	0,01
100	Almendro	56,86	225,8	65,70	29,10	4	100	0,04
101	Almendro	232,44	205,99	85,26	41,39	1	178	0,01
102	Almendro	759,9	222,13	71,79	32,32	14	473	0,03
103	Almendro	161,64	172,56	101,33	58,72	19	133	0,13
104	Almendro	112,14	196,46	94,15	47,92	32	168	0,16
105	Almendro	206,73	221,28	69,91	31,59	27	122	0,18
106	Almendro	31,65	247,79	31,43	12,68	0	19	0,00
107	Almendro	239,08	219,24	75,16	34,28	114	542	0,17
108	Almendro	266,46	203,96	82,90	40,65	73	490	0,13
109	Almendro	124,63	243,55	43,85	18,01	15	274	0,05
110	Almendro	19,34	232,38	52,35	22,53	12	16	0,43
111	Almendro	52,49	215,33	64,01	29,73	25	61	0,29
112	Almendro	80,06	172,23	99,75	57,91	11	64	0,15
113	Almendro	24,27	154,15	101,03	65,54	4	20	0,17
114	Almendro	63,57	154,71	98,17	63,45	38	305	0,11
115	Almendro	127,2	179,43	98,79	55,06	49	343	0,13
116	Almendro	67,38	233,86	55,91	23,91	17	42	0,29
117	Almendro	172,46	213,14	77,11	36,18	32	301	0,10
118	Almendro	258,81	219,04	70,65	32,25	17	153	0,10
119	Almendro	187,49	201,91	91,08	45,11	3	403	0,01
120	Almendro	347,97	174,78	99,11	56,70	18	552	0,03

121	Almendra	51,07	222,98	76,03	34,10	11	86	0,11
122	Almendra	80,12	193,75	98,34	50,76	9	68	0,12
123	Almendra	200,41	228,98	68,93	30,10	56	743	0,07
124	Almendra	786,82	165,35	101,24	61,23	127	643	0,16
125	Almendra	869,48	224,94	66,48	29,55	309	1443	0,18
126	Caucha	1223,48	166,77	105,17	63,06	170	3069	0,05
127	Caucha	812,67	181,78	97,05	53,39	38	684	0,05
128	Cedro	141,27	162,03	103,96	64,16	38	324	0,10
129	Cedro	591,73	202,35	88,78	43,87	215	501	0,30
130	Eureka	18,93	253,34	7,25	2,86	4	32	0,11
131	Ficus	544,16	224,03	70,14	31,31	15	357	0,04
132	Ficus	31,51	240,88	50,79	21,09	14	76	0,16
133	Ficus	1158,79	241,86	45,77	18,92	62	1488	0,04
134	Ficus	60,73	245,77	42,27	17,20	9	121	0,07
135	Ficus	391,11	235,17	56,84	24,17	9	502	0,02
136	Ficus	8,76	255	0,00	0,00	3	18	0,14
137	Ficus	18,77	223,95	63,83	28,50	12	19	0,39
138	Ficus	115,03	236,02	52,65	22,31	38	322	0,11
139	Ficus	32,63	240,29	60,63	25,23	7	17	0,29
140	Ficus	57,33	227,56	57,40	25,22	3	32	0,09
141	Ficus	22,77	255	0,00	0,00	1	13	0,07
142	Ficus	1163,12	199,29	87,65	43,98	392	2553	0,13
143	Ficus	354,9	201,26	87,69	43,57	98	1015	0,09
144	Ficus	170,16	232,01	70,08	30,20	40	150	0,21
145	Ficus	186,58	215,84	74,09	34,33	19	104	0,15
146	Ficus	211,47	217,12	76,28	35,13	18	287	0,06
147	Ficus	30,63	225,57	65,31	28,95	12	37	0,24
148	Ficus	84,7	204,15	85,44	41,85	88	141	0,38
149	Ficus	72	193,95	88,77	45,77	73	133	0,35
150	Ficus	82,45	229,13	68,33	29,82	11	178	0,06
151	Ficus	33,97	224,92	66,42	29,53	16	151	0,10
152	Ficus	466,11	237,39	56,73	23,90	0	279	0,00
153	Ficus	60,07	244,85	41,30	16,87	4	34	0,11
154	Ficus	98,89	191,2	94,94	49,65	51	283	0,15
155	Guabillo	893,85	211,48	72,82	34,43	9	601	0,01
156	Guabillo	530,88	159,37	99,39	62,37	59	540	0,10
157	Guamo	96,07	202,2	92,94	45,97	6	65	0,08
158	Guamo	151,65	147,31	106,38	72,22	64	488	0,12
159	Guamo	189,7	221,81	75,50	34,04	51	344	0,13
160	Guamo	261,1	204,04	91,80	44,99	15	166	0,08
161	Guamo	356,24	193,11	91,49	47,37	49	781	0,06
162	Guamo	510,6	177,31	100,33	56,59	241	1163	0,17

163	Guamo	63,84	201,93	86,99	43,08	19	27	0,41
164	Guamo	167,64	210,33	87,35	41,53	7	100	0,07
165	Guamo	213,96	182,79	96,39	52,73	96	571	0,14
166	Guamo	46,67	201,24	97,62	48,51	3	33	0,08
167	Guamo	539,75	152,89	104,43	68,30	167	1736	0,09
168	Guamo	290,66	156,19	110,52	70,76	12	628	0,02
169	Guamo	501,8	163,52	101,03	61,79	62	1907	0,03
170	Guamo	239,91	191,54	86,20	45,00	138	588	0,19
171	Guamo	181,96	180,17	99,29	55,11	40	556	0,07
172	Guanábana	68,61	239,81	38,74	16,15	16	26	0,38
173	Guanábana	34,84	213,58	71,52	33,49	12	19	0,39
174	Guanábana	34,57	243,59	41,36	16,98	11	140	0,07
175	Guanábana	44,31	233,65	60,48	25,89	12	63	0,16
176	Guanábana	19,04	255	0,00	0,00	0	12	0,00
177	Guanábana	167,97	188,53	95,28	50,54	9	401	0,02
178	Guanábana	33,28	227,74	66,13	29,04	15	115	0,12
179	Guanábana	29,37	160,56	98,10	61,10	15	16	0,48
180	Guanábana	27,71	185,94	98,60	53,03	8	17	0,32
181	Guanábana	16,87	229,78	47,06	20,48	6	9	0,40
182	Guanábana	37,79	184,88	98,25	53,15	18	264	0,06
183	Guanábana	77,04	211,75	80,72	38,12	67	113	0,37
184	Guanábana	601,3	209,66	81,05	38,66	200	1019	0,16
185	Guanábana	81,82	226,84	60,11	26,50	69	74	0,48
186	Guanábana	105,75	226,1	64,84	28,68	12	171	0,07
187	Guanábana	117,33	230,51	62,18	26,98	13	184	0,07
188	Guanábana	89,07	198,76	81,54	41,02	21	46	0,31
189	Guanábana	33,87	203,75	56,09	27,53	5	20	0,20
190	Guanábana	121,17	193,1	91,15	47,20	14	204	0,06
191	Guanábana	103,69	219,54	73,04	33,27	15	146	0,09
192	Guanábana	554,98	204,29	86,39	42,29	53	345	0,13
193	Guanábana	43,99	231,96	60,24	25,97	8	28	0,22
194	Guanábana	105,03	206,55	79,15	38,32	29	56	0,34
195	Guanábana	86,79	195,21	94,78	48,55	14	61	0,19
196	Guanábana	894,22	198,71	93,25	46,93	23	743	0,03
197	Guanábana	202,46	211,32	79,48	37,61	54	145	0,27
198	Guanábana	27,68	242,42	43,59	17,98	5	12	0,29
199	Guanábana	189,75	203,09	86,38	42,53	50	129	0,28
200	Guayaba	76,64	231,12	60,94	26,37	50	111	0,31
201	Guayaba	61,04	240,12	46,78	19,48	6	112	0,05
202	Guayaba	20,04	221,23	65,13	29,44	3	48	0,06
203	Guayaba	45,66	223,94	65,33	29,17	21	64	0,25
204	Guayaba	42,44	196,25	82,88	42,23	39	61	0,39

205	Guayaba	124,88	154,01	89,90	58,38	116	176	0,40
206	Guayaba	48,98	242,37	39,18	16,17	24	52	0,32
207	Guayaba	62,97	243,58	35,23	14,46	17	38	0,31
208	Guayaba	71,92	222,62	70,97	31,88	8	42	0,16
209	Guayaba	365,85	193,2	87,30	45,19	142	162	0,47
210	Guayaba	49,35	216,88	59,92	27,63	27	133	0,17
211	Guayaba	22,42	163,44	97,37	59,58	17	36	0,32
212	Guayaba	33,14	190,52	101,19	53,11	14	44	0,24
213	Guayaba	35,55	238,05	50,37	21,16	3	22	0,12
214	Guayaba	63,56	214,73	73,73	34,34	21	183	0,10
215	Guayaba	399,72	199,5	94,78	47,51	15	828	0,02
216	Guayaba	299,5	203,56	85,33	41,92	33	621	0,05
217	Guayaba	45,5	179,24	99,96	55,77	0	103	0,00
218	Guayaba	42,46	162,52	106,23	65,36	1	100	0,01
219	Guayaba	166,78	228,52	68,06	29,78	17	99	0,15
220	Guayaba	42,12	255	0,00	0,00	23	4	0,85
221	Guayaba	57,41	235,16	46,31	19,69	0	55	0,00
222	Guayaba	32,2	186,85	88,15	47,18	9	13	0,41
223	Guayaba	134,47	231,1	61,03	26,41	51	337	0,13
224	Guayaba	27,31	230,36	57,37	24,90	23	68	0,25
225	Guayaba	117,58	220,33	74,34	33,74	6	248	0,02
226	Guayaba	54,83	235,06	53,57	22,79	39	48	0,45
227	Guayaba	155,8	209,38	85,24	40,71	8	320	0,02
228	Guineo	405,49	237,43	45,25	19,06	72	187	0,28
229	Icaco	50966,39	250,13	28,45	11,38	12939	50398	0,20
230	Icaco	124,63	188,36	95,66	50,79	3	87	0,03
231	Icaco	4003,16	250,24	28,08	11,22	628	1951	0,24
232	Icaco	2799,68	250,18	27,94	11,17	496	1349	0,27
233	Icaco	1708,14	254,66	5,87	2,30	797	2621	0,23
234	Icaco	1195,88	254,81	4,00	1,57	207	451	0,31
235	Icaco	5783,08	252,67	15,96	6,31	1721	2013	0,46
236	Icaco	1238,02	239,07	51,38	21,49	170	693	0,20
237	Icaco	3041,46	233,7	60,47	25,88	265	5820	0,04
238	Iguanero	224,86	172,04	96,44	56,05	19	206	0,08
239	Iguanero	238,84	203,82	89,09	43,71	29	199	0,13
240	Limón	68,89	245,9	37,68	15,32	5	42	0,11
241	Limón	65,95	229,66	64,29	28,00	8	35	0,19
242	Limón	23,62	228,47	69,80	30,55	9	36	0,20
243	Limón	18	218,11	78,57	36,02	0	64	0,00
244	Limón	33,34	252,7	10,29	4,07	0	20	0,00
245	Limón	104,02	169,83	100,98	59,46	46	296	0,13
246	Limón	293,34	234,18	56,93	24,31	14	191	0,07

247	Limón	19,34	215,89	82,08	38,02	2	9	0,18
248	Limón	27,57	203,71	88,04	43,22	11	7	0,61
249	Limón	12,7	242,75	54,78	22,57	6	20	0,23
250	Limón	29,78	239,67	43,26	18,05	7	142	0,05
251	Limón	41,94	220,84	76,90	34,82	9	25	0,26
252	Limón	187,76	241,17	43,86	18,18	18	102	0,15
253	Limón	148,42	234,47	57,48	24,51	20	251	0,07
254	Limón	22,59	203,92	84,54	41,46	16	157	0,09
255	Limón	157,75	244,92	41,82	17,07	6	445	0,01
256	Majagua	730,66	196,43	93,60	47,65	64	544	0,11
257	Majagua	154,08	179,44	96,00	53,50	43	101	0,30
258	Majagua	3881,29	193,32	86,57	44,78	934	9326	0,09
259	Majagua	908,18	252,13	18,41	7,30	144	1494	0,09
260	Mangle	46052,54	158,78	95,21	59,96	6325	60473	0,09
261	Mangle	10350,29	162,51	91,39	56,24	1952	17980	0,10
262	Mangle	23561,76	196,39	82,21	41,86	3382	38125	0,08
263	Mangle	4721,82	165,33	88,14	53,31	274	7703	0,03
264	Mangle	4471,33	185,3	89,21	48,14	45	3189	0,01
265	Mangle	653,19	192,53	83,05	43,14	6	790	0,01
266	Mangle	734	218,9	63,56	29,03	25	2098	0,01
267	Mangle	22208,38	193,08	87,00	45,06	3540	52908	0,06
268	Mangle	12084,27	212,59	76,98	36,21	1092	25225	0,04
269	Mangle	10122,92	219,78	69,52	31,63	773	16980	0,04
270	Mangle	3684,29	228,65	58,57	25,62	188	2479	0,07
271	Mangle	8407,84	199,16	83,74	42,05	317	5977	0,05
272	Mangle	2924,6	191,53	86,21	45,01	245	2044	0,11
273	Mangle	8782,11	198,27	85,73	43,24	303	6409	0,05
274	Mangle	27767,56	215,32	73,62	34,19	3935	48516	0,08
275	Mangle	36226,71	227,07	60,30	26,56	2480	46790	0,05
276	Mangle	42013,1	216,95	63,04	29,06	3680	77197	0,05
277	Mangle	19340,65	179,75	83,70	46,56	2855	34986	0,08
278	Mangle	33575,27	187,54	81,52	43,47	4445	39900	0,10
279	Mangle	29301,08	192,54	84,71	44,00	4278	69455	0,06
280	Mangle	73428,42	200,87	81,74	40,69	9828	161861	0,06
281	Mangle	164929,7	182,22	89,68	49,21	28958	408532	0,07
282	Mangle	6244,58	176,69	94,85	53,68	474	19674	0,02
283	Mangle	24599,99	196,81	81,72	41,52	3037	70891	0,04
284	Mangle	14055,65	207,31	75,40	36,37	1518	27156	0,05
285	Mangle	2616,53	231,66	48,36	20,87	84	6815	0,01
286	Mangle	13043,56	195,79	81,10	41,42	1686	35013	0,05
287	Mangle	14448,91	210,11	72,22	34,37	934	23225	0,04
288	Mangle	16098,14	187	87,12	46,59	2263	43914	0,05

289	Mangle	2566,14	198,39	79,42	40,03	156	6796	0,02
290	Mango	49,02	247,61	36,30	14,66	18	77	0,19
291	Mango	49,25	248,73	28,93	11,63	0	113	0,00
292	Mango	75,03	246,68	38,31	15,53	17	184	0,08
293	Mango	64,35	245,36	36,90	15,04	9	106	0,08
294	Mango	104,53	242,87	45,43	18,71	18	163	0,10
295	Mango	151,96	210,48	83,24	39,55	30	113	0,21
296	Mango	62,31	252,34	24,43	9,68	15	91	0,14
297	Mango	37,5	255	0,00	0,00	5	61	0,08
298	Mango	51,26	247,83	33,08	13,35	12	72	0,14
299	Mango	115,44	226,68	70,96	31,30	14	88	0,14
300	Mango	67,62	220,9	72,28	32,72	8	51	0,14
301	Mango	257,96	216,89	77,75	35,85	22	185	0,11
302	Mango	330,99	223,84	72,74	32,50	48	256	0,16
303	Mango	122,75	234,48	59,04	25,18	7	85	0,08
304	Mango	560,67	229,03	65,77	28,72	80	394	0,17
305	Mango	247,54	205,66	88,03	42,80	46	194	0,19
306	Mango	238,22	226,88	67,44	29,72	59	171	0,26
307	Mango	516,2	216,25	81,65	37,76	60	420	0,13
308	Mango	34,99	217,25	73,71	33,93	6	56	0,10
309	Mango	42,74	242,31	47,90	19,77	16	68	0,19
310	Mango	38,02	245,09	39,48	16,11	4	64	0,06
311	Mango	71,38	234,35	57,88	24,70	16	171	0,09
312	Mango	1191,42	202,81	88,23	43,51	187	974	0,16
313	Mango	351,54	202,41	87,39	43,17	24	617	0,04
314	Mango	628,25	204,38	87,38	42,75	62	1495	0,04
315	Mango	55,15	218,92	73,98	33,80	5	36	0,12
316	Mango	78,06	204	82,58	40,48	4	46	0,08
317	Mango	53,28	190,88	87,09	45,63	10	33	0,23
318	Mango	1475,67	200,73	89,38	44,52	62	1037	0,06
319	Mango	77,58	235,88	57,23	24,26	2	50	0,04
320	Mango	268,86	206,87	81,97	39,63	156	587	0,21
321	Mango	178,47	204,8	81,85	39,97	80	92	0,47
322	Mango	215,19	201,98	89,66	44,39	1	148	0,01
323	Mango	367,29	236,91	51,67	21,81	27	561	0,05
324	Mango	327,78	214,21	77,91	36,37	52	589	0,08
325	Mango	73,57	236,32	57,67	24,41	16	142	0,10
326	Mango	52,79	243,75	41,42	16,99	12	83	0,13
327	Mango	494,37	186,55	99,96	53,59	20	387	0,05
328	Mango	155,24	197,56	89,81	45,46	87	301	0,22
329	Mango	395,06	179,33	96,32	53,71	68	321	0,17
330	Mango	194,57	218,19	80,59	36,94	16	122	0,12

331	Mango	34,32	227,09	65,06	28,65	11	58	0,16
332	Mango	96,48	233,53	59,36	25,42	22	176	0,11
333	Mango	21,38	235,93	39,43	16,71	0	14	0,00
334	Mango	119,67	194,8	95,60	49,08	42	256	0,14
335	Mango	387,27	213,69	81,17	37,98	68	595	0,10
336	Mango	96,82	229,76	54,17	23,58	23	50	0,32
337	Mango	148,37	189,61	89,77	47,35	62	561	0,10
338	Mango	404,69	228,92	68,41	29,88	30	286	0,09
339	Mango	227,92	242,42	45,45	18,75	28	146	0,16
340	Mango	195,85	214,23	76,84	35,87	69	275	0,20
341	Mango	335,58	212,68	82,56	38,82	97	796	0,11
342	Mango	28,62	232,62	60,20	25,88	17	69	0,20
343	Mango	395,77	220,8	74,36	33,68	15	277	0,05
344	Mango	134,13	205,2	82,43	40,17	6	89	0,06
345	Mango	211,84	178,57	93,88	52,57	113	815	0,12
346	Mango	383,12	189	93,49	49,47	76	338	0,18
347	Mango	602,5	172,55	94,89	54,99	325	2438	0,12
348	Mango	1114,59	192,67	91,61	47,55	101	837	0,11
349	Mango	4945,85	214,86	80,58	37,50	1574	11265	0,12
350	Mango	2317,25	208,9	83,20	39,83	578	4942	0,10
351	Mango	376,18	186,53	95,99	51,46	93	712	0,12
352	Mango	195,05	225,79	70,33	31,15	35	486	0,07
353	Mango	11056,93	204,37	87,92	43,02	484	28692	0,02
354	Mango	118,97	238,55	56,62	23,73	4	154	0,03
355	Mango	730,9	210,31	84,21	40,04	125	1737	0,07
356	Mango	419,08	159,83	104,09	65,13	14	350	0,04
357	Mango	1364,97	202,35	88,16	43,57	200	858	0,19
358	Mango	114,03	211,27	80,10	37,92	31	258	0,11
359	Mango	39,3	228,04	62,12	27,24	1	23	0,04
360	Mango	62,83	192,24	76,74	39,92	27	42	0,39
361	Mango	196,44	214,45	82,24	38,35	1	134	0,01
362	Mango	31,43	194,48	97,14	49,95	6	21	0,22
363	Mango	148,88	180,79	98,00	54,21	27	92	0,23
364	Mango	67,97	234,15	42,86	18,31	10	27	0,27
365	Mango	38,54	225,71	75,57	33,48	9	21	0,30
366	Mango	486,46	207,64	89,52	43,11	34	364	0,09
367	Mango	454,47	196,1	91,70	46,76	111	980	0,10
368	Mango	1001,79	207,93	85,05	40,91	144	3292	0,04
369	Mango	315,42	171,01	103,37	60,45	23	244	0,09
370	Mango	572,48	223,98	67,89	30,31	63	750	0,08
371	Mango	31,06	240,92	44,91	18,64	5	66	0,07
372	Mango	377,29	203,24	88,16	43,38	7	289	0,02

373	Mango	104,89	241,76	49,05	20,29	17	50	0,25
374	Mango	127,95	183,38	95,05	51,83	5	103	0,05
375	Mango	452,09	202,68	81,66	40,29	104	317	0,25
376	Mango	166,54	223,77	67,61	30,22	12	120	0,09
377	Mango	4754,5	194,95	90,32	46,33	1334	15752	0,08
378	Mango	53,76	250,95	20,32	8,10	15	102	0,13
379	Mango	29,61	155,45	97,88	62,97	7	11	0,39
380	Mango	21,11	255	0,00	0,00	3	7	0,30
381	Mango	93,05	201,65	89,44	44,35	0	77	0,00
382	Mango	1093,94	218,6	74,20	33,94	105	670	0,14
383	Mango	53,69	191,6	99,41	51,89	2	30	0,06
384	Mango	52,75	110,46	106,35	96,27	15	28	0,35
385	Mango	1092,11	210	84,78	40,37	215	3099	0,06
386	Mango	809,2	206,85	87,63	42,36	247	2576	0,09
387	Mango	246,5	196,66	94,88	48,25	85	592	0,13
388	Mango	303,73	208	86,98	41,82	73	895	0,08
389	Mango	195,97	130,89	101,29	77,38	61	594	0,09
390	Mango	304,52	229,35	65,19	28,42	25	205	0,11
391	Mango	466,06	223,84	73,13	32,67	20	1015	0,02
392	Mango	299,33	223,17	71,30	31,95	7	487	0,01
393	Mango	800,29	233,01	62,81	26,96	57	545	0,09
394	Mango	633,84	203,52	90,38	44,41	22	508	0,04
395	Mango	116,11	223,91	70,61	31,54	8	76	0,10
396	Mango	97,24	205,92	92,17	44,76	16	60	0,21
397	Mango	66,71	245,53	41,77	17,01	11	145	0,07
398	Mango	191,12	175,7	91,94	52,33	109	357	0,23
399	Mango	622,91	192	92,11	47,98	272	1128	0,19
400	Mango	1180,78	207,92	85,85	41,29	394	2280	0,15
401	Mango	150,42	216,78	78,03	36,00	29	304	0,09
402	Mango	483,69	250,9	25,34	10,10	284	1054	0,21
403	Mano de Tigre	86,31	212,29	71,38	33,63	23	45	0,34
404	Mano de Tigre	59,25	236,73	50,97	21,53	33	163	0,17
405	Mano de Tigre	40,42	226,07	74,38	32,90	26	110	0,19
406	Mano de Tigre	26	241,07	38,98	16,17	16	76	0,17
407	Maracuyá	11,9	255	0,00	0,00	1	19	0,05
408	Marañón	39,07	238,06	45,78	19,23	20	104	0,16
409	Marañón	21,42	220,5	80,35	36,44	0	16	0,00
410	Matapalo	85,16	250,59	25,22	10,06	8	128	0,06
411	Matapalo	414,29	220,3	79,22	35,96	23	279	0,08
412	Matapalo	195,26	212,41	83,95	39,52	4	884	0,00
413	Matapalo	3352,91	193,43	93,10	48,13	1975	6791	0,23
414	Matarratón	340,81	213,02	79,25	37,20	15	218	0,06

415	Matarratón	349,65	212,7	82,67	38,87	6	322	0,02
416	Matarratón	108	234,84	58,06	24,72	5	64	0,07
417	Matarratón	239,91	218,46	74,92	34,29	17	1110	0,02
418	Matarratón	280,94	190,8	91,82	48,12	35	853	0,04
419	Matarratón	125,47	213,48	79,35	37,17	42	301	0,12
420	Matarratón	683,02	217,34	77,05	35,45	36	463	0,07
421	Matarratón	308,51	196,37	91,58	46,63	23	1278	0,02
422	Matarratón	176,97	214,11	77,63	36,26	10	102	0,09
423	Matarratón	26,03	223,94	64,54	28,82	24	34	0,41
424	Matarratón	79,3	236,41	57,99	24,53	17	199	0,08
425	Matarratón	834,1	219,05	73,60	33,60	252	1536	0,14
426	Matarratón	93,64	201	79,75	39,68	18	60	0,23
427	Matarratón	271,31	246,89	33,50	13,57	103	57	0,64
428	Matarratón	1656,57	236,9	53,98	22,79	112	988	0,10
429	Matarratón	512,41	191,66	92,31	48,16	65	372	0,15
430	Matarratón	704,12	233,23	56,60	24,27	56	419	0,12
431	Matarratón	6958,67	216,45	78,66	36,34	498	4443	0,10
432	Matarratón	365,28	206,17	90,32	43,81	41	270	0,13
433	Matarratón	3682,52	245,56	39,57	16,12	149	5657	0,03
434	Matarratón	635,66	187,25	95,26	50,87	162	1237	0,12
435	Matarratón	567,27	200,83	91,38	45,50	37	407	0,08
436	Matarratón	3433,9	199,35	88,14	44,21	237	2482	0,09
437	Matarratón	601,02	207,69	81,90	39,44	369	1188	0,24
438	Matarratón	153,77	196,69	94,21	47,90	37	788	0,04
439	Matarratón	109,42	206,3	79,59	38,58	19	71	0,21
440	Matarratón	1700,08	196,19	91,85	46,82	228	1283	0,15
441	Matarratón	2328,36	237,52	53,48	22,52	210	1365	0,13
442	Matarratón	602,35	173,58	99,10	57,09	126	1866	0,06
443	Matarratón	195,89	230,08	66,33	28,83	17	116	0,13
444	Matarratón	243,42	227,11	68,93	30,35	27	414	0,06
445	Matarratón	201,91	197,93	89,98	45,46	27	341	0,07
446	Matarratón	381,4	196,72	92,83	47,19	5	321	0,02
447	Matarratón	2552,4	228,56	66,38	29,04	195	5367	0,04
448	Matarratón	244,49	235,93	54,31	23,02	43	132	0,25
449	Matarratón	31,26	210,57	70,84	33,64	7	14	0,33
450	Matarratón	352,73	169,93	101,99	60,02	22	949	0,02
451	Matarratón	325,37	199,12	70,67	35,49	43	169	0,20
452	Matarratón	504,41	254,27	5,80	2,28	161	165	0,49
453	Matarratón	59,35	233,59	51,74	22,15	6	32	0,16
454	Matarratón	251,8	174,38	100,19	57,45	15	200	0,07
455	Matarratón	446,67	205,56	84,48	41,10	70	727	0,09
456	Matarratón	7344,09	237,96	53,66	22,55	113	13342	0,01

457	Matarratón	1052,19	214,94	79,56	37,02	98	3249	0,03
458	Matarratón	1145,14	206,28	83,94	40,69	218	2270	0,09
459	Matarratón	685,83	209,65	83,83	39,98	12	995	0,01
460	Matarratón	830,06	237,39	48,77	20,54	162	387	0,30
461	Matarratón	109,93	251,81	16,28	6,46	47	25	0,65
462	Matarratón	2581,22	226,3	67,95	30,02	323	1451	0,18
463	Matarratón	457,48	216,5	74,96	34,62	127	576	0,18
464	Matarratón	611,32	206,77	85,16	41,19	32	1015	0,03
465	Matarratón	68,73	239,98	51,57	21,49	13	115	0,10
466	Matarratón	226,04	204,44	89,91	43,98	53	691	0,07
467	Matarratón	1357,79	218,32	77,14	35,33	98	4022	0,02
468	Matarratón	2010,88	226,09	66,50	29,41	385	1512	0,20
469	Matarratón	1746	255	0,00	0,00	1704	612	0,74
470	Matarratón	94,08	221,43	67,48	30,48	5	56	0,08
471	Matarratón	117,76	197,6	87,51	44,29	17	214	0,07
472	Matarratón	390	216,34	74,83	34,59	116	739	0,14
473	Matarratón	513,12	207,46	85,13	41,03	44	1336	0,03
474	Matarratón	2087,23	232,67	59,92	25,76	310	3947	0,07
475	Matarratón	500,19	231,44	59,82	25,85	204	574	0,26
476	Matarratón	513,83	238,06	49,18	20,66	31	394	0,07
477	Matarratón	69,39	230,85	61,94	26,83	0	46	0,00
478	Matarratón	268,55	183,26	95,93	52,35	16	222	0,07
479	Matarratón	281,18	195,05	91,94	47,14	28	236	0,11
480	Matarratón	339,39	217,99	74,89	34,36	9	224	0,04
481	Melón	208,02	198,12	94,32	47,61	18	678	0,03
482	Naranjo	16,71	243,48	42,99	17,66	9	27	0,25
483	Naranjo	23,36	246,27	24,97	10,14	12	30	0,29
484	Naranjo	79,59	249,64	26,80	10,74	21	25	0,46
485	Naranjo	107,5	168,87	98,07	58,07	25	95	0,21
486	Ovo-Ciruelo	106,22	171,93	102,74	59,76	54	331	0,14
487	Ovo-Ciruelo	152,4	204,86	84,68	41,34	10	350	0,03
488	Ovo-Ciruelo	745,55	198,14	92,98	46,93	58	597	0,09
489	Ovo-Ciruelo	496,25	169,97	102,73	60,44	261	1685	0,13
490	Ovo-Ciruelo	136,72	197,66	83,74	42,37	30	250	0,11
491	Ovo-Ciruelo	73,09	186,53	92,59	49,64	8	130	0,06
492	Ovo-Ciruelo	455	210,65	79,68	37,83	278	1524	0,15
493	Ovo-Ciruelo	94,75	222,85	48,84	21,92	49	13	0,79
494	Ovo-Ciruelo	292,49	204,91	88,43	43,16	32	219	0,13
495	Ovo-Ciruelo	197,52	186,88	95,06	50,87	24	606	0,04
496	Ovo-Ciruelo	500,63	164,07	103,12	62,85	16	1395	0,01
497	Ovo-Ciruelo	4263,7	173,64	99,27	57,17	843	11697	0,07
498	Ovo-Ciruelo	1446,43	204,88	87,87	42,89	42	2924	0,01

499	Ovo-Ciruelo	1404,4	197,76	87,82	44,41	56	4287	0,01
500	Ovo-Ciruelo	219,15	172,91	103,43	59,81	28	198	0,12
501	Ovo-Ciruelo	242,65	208,99	86,37	41,33	10	178	0,05
502	Ovo-Ciruelo	374,49	136,64	101,43	74,24	227	1032	0,18
503	Ovo-Ciruelo	303,12	172,23	103,12	59,87	82	857	0,09
504	Palma Africana	70,32	220,73	64,26	29,11	19	26	0,42
505	Palma Africana	28,53	196,31	89,94	45,81	13	91	0,13
506	Palma Africana	25,33	225,32	57,70	25,61	6	40	0,13
507	Palma Africana	28,89	202,9	87,00	42,88	23	39	0,37
508	Palma Africana	54,49	221,24	71,66	32,39	20	76	0,21
509	Palma Africana	36,57	203,14	92,37	45,47	23	36	0,39
510	Palma Africana	47,7	222,53	78,85	35,43	12	49	0,20
511	Palma Africana	29,03	199,1	81,30	40,83	16	29	0,36
512	Palma Africana	42,63	239,05	41,86	17,51	23	42	0,35
513	Palma Africana	46,33	237,78	45,46	19,12	27	59	0,31
514	Palma Africana	72,67	213,2	76,89	36,07	34	90	0,27
515	Palma Africana	65,43	222,31	69,25	31,15	40	96	0,29
516	Palma Africana	225,26	243,03	48,47	19,94	44	414	0,10
517	Palma Africana	77,32	219,31	72,41	33,02	29	36	0,45
518	Palma Africana	36,29	228,3	67,33	29,49	1	23	0,04
519	Palma Africana	161,57	217,71	75,91	34,87	41	87	0,32
520	Palma Africana	162,73	222,09	61,87	27,86	31	81	0,28
521	Palma Africana	96,6	228,12	64,47	28,26	2	67	0,03
522	Palma Africana	252,18	231,3	52,98	22,91	44	125	0,26
523	Palma Africana	19,23	206,53	86,78	42,02	35	85	0,29
524	Palma Africana	92,43	209,45	77,30	36,91	30	64	0,32
525	Palma Africana	37,49	220,04	70,59	32,08	9	26	0,26
526	Palma Africana	46,93	222,53	70,52	31,69	20	15	0,57
527	Palma Africana	105,36	202,98	81,40	40,10	50	266	0,16
528	Palma Africana	28,93	191,38	81,92	42,80	24	37	0,39
529	Palma Africana	34,65	216,94	65,99	30,42	29	48	0,38
530	Palma Africana	24,08	181,63	92,25	50,79	24	42	0,36
531	Palma Africana	71,16	227,22	65,93	29,02	43	121	0,26
532	Palma Africana	46,05	239,96	46,82	19,51	8	23	0,26
533	Palma Africana	161,21	200,34	82,10	40,98	45	88	0,34
534	Palma Africana	142,01	210,33	77,38	36,79	47	51	0,48
535	Palma Africana	38,19	212,64	83,19	39,12	7	14	0,33
536	Palma Africana	115,19	183,64	89,98	49,00	66	267	0,20
537	Palma Africana	37,64	218,79	73,44	33,57	23	83	0,22
538	Palma Africana	22,53	211	76,50	36,26	6	12	0,33
539	Palma Africana	79,91	222,68	60,73	27,27	34	42	0,45
540	Palma Africana	17,29	198,33	60,99	30,75	5	9	0,36

541	Palma Africana	7,14	211,83	54,03	25,51	3	6	0,33
542	Palma Africana	40,15	171,24	96,87	56,57	8	21	0,28
543	Palma Africana	54,48	205,46	83,90	40,83	30	159	0,16
544	Palma Africana	35,94	227,82	61,94	27,19	11	153	0,07
545	Palma Africana	37,88	220,84	79,53	36,01	9	19	0,32
546	Palma Africana	51,92	207,79	82,37	39,64	28	145	0,16
547	Palma Africana	83,41	210,34	83,42	39,66	57	149	0,28
548	Palma Africana	82,23	207,96	84,53	40,65	49	97	0,34
549	Palma Africana	186,48	224,04	69,75	31,13	4	112	0,03
550	Palma Africana	104,07	227,9	51,42	22,56	11	62	0,15
551	Palma Africana	75,23	233,89	57,99	24,80	24	131	0,15
552	Palma Africana	358,69	221,82	72,14	32,52	47	195	0,19
553	Palma Africana	30,59	187,18	97,54	52,11	6	17	0,26
554	Palma Africana	1548,89	215,44	72,84	33,81	172	1422	0,11
555	Palma Africana	102,26	216,94	69,66	32,11	17	132	0,11
556	Palma Africana	161,26	188,13	94,03	49,99	16	120	0,12
557	Palma Africana	42,61	245,3	39,20	15,98	2	23	0,08
558	Palma Africana	23,47	206,97	69,52	33,59	20	29	0,41
559	Palma Africana	25,85	195,14	83,04	42,55	7	43	0,14
560	Palma Africana	19,61	228,54	62,19	27,21	4	13	0,24
561	Palma Africana	75,01	190,33	77,06	40,49	19	36	0,35
562	Palma Africana	142,71	196,96	77,28	39,24	39	69	0,36
563	Palma Africana	35,68	196,44	86,93	44,25	13	18	0,42
564	Palma Africana	51,73	207,93	73,05	35,13	19	29	0,40
565	Palma Africana	20,02	246,4	27,20	11,04	4	10	0,29
566	Palma Africana	46,52	219,24	68,78	31,37	13	88	0,13
567	Palma Africana	37,5	234,93	58,92	25,08	19	46	0,29
568	Palma Africana	45,89	247,69	30,60	12,35	15	58	0,21
569	Palma Africana	50,57	224,75	63,97	28,46	35	56	0,38
570	Palma Africana	79,16	201,72	89,16	44,20	41	86	0,32
571	Palma Africana	48,22	227,95	57,12	25,06	18	63	0,22
572	Palma Africana	37,13	179,89	82,08	45,63	31	44	0,41
573	Palma Africana	308,42	204,98	83,90	40,93	123	907	0,12
574	Palma Africana	71,53	192,35	86,37	44,90	28	158	0,15
575	Palma Africana	658,4	214,79	77,37	36,02	57	413	0,12
576	Palma Africana	1501,12	215,64	75,39	34,96	136	919	0,13
577	Palma Africana	417,66	188,12	96,03	51,05	77	315	0,20
578	Palma Africana	101,82	188,34	97,04	51,52	36	304	0,11
579	Palma Africana	42,53	212,59	68,74	32,33	0	27	0,00
580	Palma Africana	47,12	198,12	76,80	38,76	2	33	0,06
581	Palma Africana	154,98	220,44	68,74	31,18	10	315	0,03
582	Palma Africana	84,22	234,78	55,68	23,72	0	160	0,00

583	Palma Africana	8,57	255	0,00	0,00	3	3	0,50
584	Palma Africana	6,38	231,33	40,99	17,72	1	3	0,25
585	Palma Africana	3,9	255	0,00	0,00	1	2	0,33
586	Palma Africana	6,74	255	0,00	0,00	2	2	0,50
587	Palma Africana	6,25	255	0,00	0,00	3	1	0,75
588	Palma Africana	5,49	255	0,00	0,00	0	2	0,00
589	Palma Africana	37,69	245,09	32,87	13,41	14	11	0,56
590	Palma Africana	4,36	255	0,00	0,00	2	1	0,67
591	Palma Africana	8,64	250	8,66	3,46	4	3	0,57
592	Palma Africana	11,29	255	0,00	0,00	5	3	0,63
593	Palma Africana	55,16	236,92	57,00	24,06	11	26	0,30
594	Palma Africana	243,11	224,38	69,10	30,80	19	140	0,12
595	Palma Africana	169,49	228,96	61,95	27,06	23	91	0,20
596	Palma Africana	48,6	250,68	18,72	7,47	3	28	0,10
597	Palma Africana	87,86	244,32	44,08	18,04	13	41	0,24
598	Palma Africana	14,94	255	0,00	0,00	2	9	0,18
599	Palma Africana	1023,72	215	74,95	34,86	87	1529	0,05
600	Palma Africana	349,8	232,74	53,71	23,07	51	180	0,22
601	Palma Africana	546,74	218,53	72,75	33,29	30	371	0,07
602	Palma Africana	23,84	238,67	43,29	18,14	0	15	0,00
603	Palma Africana	260,62	239,92	45,11	18,80	22	146	0,13
604	Palma Africana	26,38	255	0,00	0,00	5	12	0,29
605	Palma Africana	129,43	228,13	62,80	27,53	15	72	0,17
606	Palma Africana	115,79	237,04	52,24	22,04	9	67	0,12
607	Palma Africana	267,29	219,12	70,97	32,39	23	175	0,12
608	Palma Africana	195,43	225,72	61,92	27,43	16	124	0,11
609	Palma Africana	210,69	209,11	81,86	39,15	17	140	0,11
610	Palma Africana	1172	218,27	72,48	33,21	130	739	0,15
611	Palma Africana	291,82	216,96	79,41	36,60	23	178	0,11
612	Palma Africana	41,16	236,8	45,73	19,31	4	25	0,14
613	Palma Africana	252,7	237,99	49,53	20,81	16	154	0,09
614	Palma Africana	149,61	198,28	89,66	45,22	21	370	0,05
615	Palma Africana	322,63	211,6	77,71	36,73	43	186	0,19
616	Palma Africana	113,39	235,27	45,94	19,53	13	64	0,17
617	Palma Africana	353,55	212,07	81,93	38,63	55	192	0,22
618	Palma Africana	122,79	217,35	76,66	35,27	13	69	0,16
619	Palma Africana	262,2	224,86	63,90	28,42	31	156	0,17
620	Palma Africana	720,64	213,36	77,23	36,20	56	456	0,11
621	Palma Africana	235,34	233,61	53,08	22,72	31	129	0,19
622	Palma Africana	336,13	213,54	76,26	35,71	28	226	0,11
623	Palma Africana	51,46	189,97	90,00	47,37	6	37	0,14
624	Palma Africana	78,2	180,42	96,33	53,39	9	50	0,15

625	Palma Africana	58,83	217,08	72,81	33,54	9	39	0,19
626	Palma Africana	92,92	204,92	85,86	41,90	7	52	0,12
627	Palma Africana	85,11	204,07	79,08	38,75	5	40	0,11
628	Palma Africana	19,38	255	0,00	0,00	3	11	0,21
629	Palma Africana	39,1	186,98	87,92	47,02	18	63	0,22
630	Palma Africana	28,97	232,78	62,23	26,73	19	54	0,26
631	Palma Africana	106,46	217,34	72,67	33,44	21	56	0,27
632	Palma Africana	56,66	187,03	90,73	48,51	14	32	0,30
633	Palma Africana	43,83	244,38	26,18	10,71	7	21	0,25
634	Palma Africana	54,43	239,71	39,08	16,30	4	28	0,13
635	Palma Africana	56,42	241,56	50,19	20,78	1	32	0,03
636	Palma Africana	46,99	227,4	68,03	29,92	27	59	0,31
637	Palma Africana	62,08	228,57	59,45	26,01	6	35	0,15
638	Palma Africana	75,52	228,83	64,01	27,97	7	46	0,13
639	Palma Africana	76,79	221,92	72,60	32,71	9	48	0,16
640	Palma Africana	85,54	188,44	96,75	51,34	4	73	0,05
641	Palma Africana	53,53	228,2	61,14	26,79	6	251	0,02
642	Palma Africana	37,86	232,86	53,14	22,82	8	128	0,06
643	Palma Africana	25,93	240,55	37,85	15,73	5	69	0,07
644	Palma Africana	64,52	229,21	56,81	24,79	10	140	0,07
645	Palma Africana	70,37	230,97	57,86	25,05	20	147	0,12
646	Palma Africana	120,56	218,48	69,59	31,85	35	196	0,15
647	Palma Africana	26,04	220,7	54,19	24,55	15	27	0,36
648	Palma Africana	34,51	221	68,63	31,05	8	14	0,36
649	Palma Cocotero	891,56	198,16	85,79	43,30	154	606	0,20
650	Palma Cocotero	88,04	183,85	95,90	52,16	21	62	0,25
651	Palma Cocotero	19,54	202,2	77,97	38,56	7	11	0,39
652	Palma Cocotero	18,58	219,33	62,86	28,66	4	6	0,40
653	Palma Cocotero	125,57	204	83,51	40,94	62	47	0,57
654	Palma Cocotero	122,5	202,44	83,65	41,32	30	68	0,31
655	Palma Cocotero	33,14	160,33	98,58	61,48	12	15	0,44
656	Palma Cocotero	35,68	195,15	88,51	45,36	12	20	0,38
657	Palma Cocotero	14,1	175,33	105,31	60,06	2	9	0,18
658	Palma Cocotero	129,36	217,77	69,59	31,96	67	357	0,16
659	Palma Cocotero	97,07	231,74	52,63	22,71	34	232	0,13
660	Palma Cocotero	43,19	220,43	71,81	32,58	35	81	0,30
661	Palma Cocotero	162,06	213,9	71,18	33,28	66	428	0,13
662	Palma Cocotero	54,95	233,63	56,13	24,03	11	117	0,09
663	Palma Cocotero	37,63	210,22	75,51	35,92	24	56	0,30
664	Palma Cocotero	105,33	183,04	87,18	47,63	74	192	0,28
665	Palma Cocotero	31,96	217,1	75,31	34,69	27	52	0,34
666	Palma Cocotero	15,28	240,82	54,23	22,52	9	17	0,35

667	Palma Cocotero	12,28	229,18	68,39	29,84	8	11	0,42
668	Palma Cocotero	24,86	223,27	58,05	26,00	16	37	0,30
669	Palma Cocotero	21,65	196,68	74,96	38,12	18	34	0,35
670	Palma Cocotero	71,15	198,76	78,39	39,44	41	108	0,28
671	Palma Cocotero	275,65	207,49	80,41	38,76	115	472	0,20
672	Palma Cocotero	16,95	235,7	36,89	15,65	1	10	0,09
673	Palma Cocotero	618,47	205,48	81,90	39,86	215	1620	0,12
674	Palma Cocotero	54,2	184,63	75,38	40,83	37	79	0,32
675	Palma Cocotero	36,25	255	0,00	0,00	0	24	0,00
676	Palma Cocotero	50,88	253,93	6,87	2,71	10	39	0,20
677	Palma Cocotero	16,46	218,71	82,64	37,79	7	24	0,23
678	Palma Cocotero	916,35	199,28	82,38	41,34	461	2533	0,15
679	Palma Cocotero	21,54	253,6	4,43	1,75	5	10	0,33
680	Palma Cocotero	25,78	237,06	49,06	20,69	3	16	0,16
681	Palma Cocotero	63,82	214,61	71,99	33,55	12	36	0,25
682	Palma Cocotero	22,49	214,4	57,93	27,02	5	10	0,33
683	Palma Cocotero	33,83	181,28	105,47	58,18	4	25	0,14
684	Palma Cocotero	66,3	220,08	67,13	30,50	13	117	0,10
685	Palma Cocotero	117,56	217,89	71,21	32,68	42	228	0,16
686	Palma Cocotero	92,92	213,75	68,33	31,97	47	147	0,24
687	Palma Cocotero	20,61	214,43	68,23	31,82	12	30	0,29
688	Palma Cocotero	19,99	204,21	69,75	34,16	12	35	0,26
689	Palma Cocotero	24,19	160,58	89,92	56,00	0	59	0,00
690	Palma Cocotero	15,01	185,53	83,97	45,26	2	30	0,06
691	Palma Cocotero	54,8	166,12	97,44	58,66	8	33	0,20
692	Palma Cocotero	18,05	200,69	87,73	43,72	2	13	0,13
693	Palma Cocotero	21,8	209,93	77,40	36,87	5	14	0,26
694	Palma Cocotero	46,41	215,73	73,49	34,06	12	22	0,35
695	Palma Cocotero	57,56	203,06	90,00	44,32	19	159	0,11
696	Palma Cocotero	143,72	187,1	90,28	48,25	68	349	0,16
697	Palma Cocotero	125,5	192,27	91,04	47,35	31	270	0,10
698	Palma Cocotero	87,48	182,69	88,46	48,42	34	175	0,16
699	Palma Cocotero	59,42	183,69	94,16	51,26	31	26	0,54
700	Palma Cocotero	47,41	178,53	90,98	50,96	36	101	0,26
701	Palma Cocotero	39,63	189,79	86,23	45,43	34	58	0,37
702	Palma Cocotero	25,61	210,31	79,36	37,74	11	39	0,22
703	Palma Cocotero	287,18	196,76	88,71	45,09	128	762	0,14
704	Papaya	49,08	185,37	97,03	52,35	2	41	0,05
705	Papaya	71,3	199,48	80,11	40,16	16	296	0,05
706	Papaya	72,64	204,6	81,15	39,66	58	118	0,33
707	Papaya	24,42	213,03	83,37	39,14	3	62	0,05
708	Papaya	160,98	201,09	93,76	46,63	67	414	0,14

709	Papaya	300,61	221,56	69,98	31,59	57	154	0,27
710	Papaya	43,13	195,36	77,18	39,50	6	22	0,21
711	Papaya	23,84	220,23	85,58	38,86	2	13	0,13
712	Papaya	294,64	182,85	99,95	54,66	12	244	0,05
713	Papaya	259,43	197,22	91,30	46,29	24	527	0,04
714	Papaya	69,25	223,31	72,45	32,44	41	110	0,27
715	Papaya	14,21	209,13	93,15	44,54	1	8	0,11
716	Papaya	41,64	220,95	83,87	37,96	15	20	0,43
717	Papaya	16,62	240,17	36,33	15,13	5	6	0,45
718	Papaya	28,82	130,54	114,13	87,43	5	26	0,16
719	Papaya	29,33	216,53	74,43	34,37	3	15	0,17
720	Papaya	8,69	218,86	95,63	43,69	0	7	0,00
721	Papaya	34,19	205,55	97,19	47,28	4	20	0,17
722	Papaya	93,8	214,62	81,25	37,86	3	162	0,02
723	Pastos	4632,33	254,93	1,73	0,68	2114	649	0,77
724	Pastos	2551,67	247,1	38,38	15,53	1559	3291	0,32
725	Pastos	352,33	171,92	98,67	57,39	17	356	0,05
726	Pastos	879,94	191,27	87,75	45,88	116	645	0,15
727	Pita	62,03	210,04	72,74	34,63	9	119	0,07
728	Pita	336,49	221,39	73,26	33,09	129	464	0,22
729	Pita	361,9	226,02	66,83	29,57	24	240	0,09
730	Pita	362,56	192,22	89,95	46,79	62	1883	0,03
731	Pita	114,47	219,62	65,78	29,95	15	528	0,03
732	Pita	183,07	240,61	45,59	18,95	87	217	0,29
733	Pita	339,52	231,27	59,27	25,63	69	527	0,12
734	Pita	607,8	216,48	75,92	35,07	135	1083	0,11
735	Pita	655,9	206,4	84,70	41,04	135	1572	0,08
736	Pita	448,5	228,5	65,82	28,81	43	1012	0,04
737	Plátano	30,36	219,82	72,27	32,88	8	44	0,15
738	Plátano	7,1	251,08	24,17	9,63	3	39	0,07
739	Plátano	37,7	240,29	49,34	20,53	14	48	0,23
740	Plátano	362,67	209,47	81,78	39,04	55	189	0,23
741	Plátano	368,1	198,35	92,62	46,70	41	255	0,14
742	Plátano	293,95	228,84	62,52	27,32	32	178	0,15
743	Plátano	26,41	252,84	17,25	6,82	20	64	0,24
744	Plátano	12,13	255	0,00	0,00	3	3	0,50
745	Plátano	23,6	255	0,00	0,00	10	87	0,10
746	Plátano	7,83	255	0,00	0,00	1	3	0,25
747	Plátano	8,95	246,56	25,33	10,28	1	8	0,11
748	Plátano	6,17	229,6	56,80	24,74	0	5	0,00
749	Plátano	10,71	255	0,00	0,00	4	4	0,50
750	Plátano	7,81	168,67	85,51	50,70	5	3	0,63

751	Plátano	3,86	255	0,00	0,00	0	2	0,00
752	Plátano	35,57	208,41	75,40	36,18	14	87	0,14
753	Plátano	24,26	175,33	90,18	51,43	8	64	0,11
754	Plátano	29,96	204,92	81,79	39,91	7	121	0,05
755	Plátano	48,94	218,93	68,87	31,46	7	152	0,04
756	Rojos	895,77	226,84	67,87	29,92	126	1452	0,08
757	Rojos	95,22	249,62	31,27	12,53	63	73	0,46
758	Rojos	27,79	255	0,00	0,00	6	8	0,43
759	Rojos	29,88	210,69	76,91	36,51	4	16	0,20
760	Yarumo	1652,02	162,47	99,87	61,47	557	4964	0,10
761	Yarumo	54,84	155,24	95,98	61,83	42	130	0,24
762	Yarumo	619,84	165,84	102,92	62,06	449	1023	0,31
763	Yarumo	798,99	211,21	83,83	39,69	46	558	0,08
764	Yarumo	356,77	172,52	99,08	57,43	176	1431	0,11
765	Yarumo	479,63	221,45	73,85	33,35	44	644	0,06
766	Yarumo	338,28	183,49	97,30	53,03	92	242	0,28
767	Yarumo	283,52	181,07	97,94	54,09	105	1488	0,07
768	Yarumo	295,14	187,33	92,80	49,54	188	496	0,27
769	Yarumo	3618,27	171,51	101,14	58,97	391	12729	0,03
770	Yarumo	412,02	190,14	93,98	49,43	11	344	0,03
771	Yarumo	305,15	173,8	99,59	57,30	55	189	0,23
772	Zapote	22,23	247,74	42,36	17,10	9	34	0,21
773	Zapote	219,45	172,52	96,57	55,98	15	1074	0,01
774	Zapote	116,14	229,31	66,48	28,99	9	192	0,04
775	Zapote	124,54	229,17	65,46	28,57	11	200	0,05
776	Zapote	108,79	193,95	92,85	47,87	54	230	0,19
777	Zapote	552,21	215,24	78,86	36,64	73	759	0,09