

PENETRACIÓN DE LA SEÑAL DEL SISTEMA ALS40 LiDAR AEROTRANSPORTADO EN LA COBERTURA VEGETAL PRESENTE EN LAS ISLAS: LA VICIOSA Y EL MORRO

SIGNAL PENETRATION OF AIRBONES ALS40 LiDAR SISTEM IN VEGETAL COVERAGE OF VICIOSA AND MORRO ISLANDS

Mary Luz Rengifo Buitrago¹
Milton Gabriel Puentes Galindo²

¹Grupo de Óptica y láser, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia
mrengifo@unicauca.edu.co

²Grupo de Modelado Integral de Zona Costera con Énfasis en Riesgos Ambientales y Procesos, Dirección General Marítima - Centro Control de Contaminación del Pacífico (DIMAR-CCCP), Vía El Morro, Capitanía de Puerto de Tumaco, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia.
mpuentes@dimar.mil.com

Rengifo, M. y M. Puentes. 2007. Penetración de la señal del sistema ALS40 LiDAR aerotransportado en la cobertura vegetal presente en las islas: La Viciosa y El Morro. Boletín Científica CCCP, (14): 95-108.

Recibido en septiembre de 2007; aceptado en diciembre de 2007

RESUMEN

El Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP) ha incursionado en Colombia en una de las técnicas más rápidas y precisas para la determinación de altura y posición del terreno y de objetos sobre éste. Es así como con un equipo ALS40 aerotransportado ha iniciado la toma de datos LiDAR en zonas del litoral Pacífico colombiano. El presente trabajo ilustra una metodología para determinar la capacidad de penetración del equipo en la cobertura vegetal característica en las islas La Viciosa y El Morro, con el objetivo de determinar la influencia en las cubiertas vegetales de la señal de un LiDAR aerotransportado y la cantidad de información real del suelo que se obtiene y es usada para la elaboración de modelos digitales, entre otras aplicaciones. El estudio se basó en el cálculo e interpretación del índice de penetración del LiDAR en cada tipo de vegetación identificado en la zona, a partir del número de puntos LiDAR correspondientes tanto a cobertura vegetal como a suelo, y la aplicación de un análisis estadístico que llevó a determinar un grado de penetración bajo en distintas coberturas vegetales que hacen parte del área de estudio.

PALABRAS CLAVES: LiDAR, cobertura vegetal, índice de penetración, teledetección, ALS40, La Viciosa, El Morro, litoral Pacífico colombiano.

ABSTRACT

Centro Control Contaminación del Pacífico has intruded in Colombia one of the quickest and exact techniques for the determination of height and position of the terrain, and the objects on it. It is as well as with a ALS40 system, airborne has begun the LiDAR data taking in Colombian Pacific Coast areas. The present work shows an methodology in which the capacity of penetration of the system is determined in the characteristic vegetation covering in La Viciosa and El Morro islands, with the objective of determining the influence of the vegetation covers in the signal of an airborne LiDAR and the quantity of real information of the ground that it is obtained and it is used for the elaboration of digital models. The study is based on the calculation and interpretation of the index of penetration of LiDAR in each identified type of vegetation in the area, starting from the number of points LiDAR corresponding as much to vegetation covering as to ground, and the application of a statistical analysis; that led to determine a low penetration grade in different vegetation coverings that are part of the study area.

KEY WORDS: LiDAR, vegetation cover, index of penetration, teledetection, ALS40, La Viciosa, El Morro, Colombian Pacific Coast.

INTRODUCCIÓN

El uso de nuevas tecnologías en teledetección ha revolucionado la adquisición de información de los objetos sobre la superficie terrestre, de tal forma que en la actualidad, técnicas como la fotogrametría y las imágenes satelitales ya se ven limitadas, cuando se requiere obtener una estructuración en tres dimensiones de un objeto. Problema que ha sido solucionado con la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging), que detecta y mide la altura de un objeto o superficie de interés mediante el uso de un rayo de luz láser.

El sistema LiDAR está compuesto por un escáner láser, un GPS (Global Position System) diferencial y una IMU (Inertial Measurement Unit), encargados de proporcionar datos de posición y altitud de la aeronave que lo transporta.

El equipo mide constantemente la distancia entre la aeronave que transporta el sensor y el suelo. El transmisor de luz láser emite pulsos hacia el terreno, los cuales son reflejados por los objetos y coberturas presentes; el pulso reflejado se denomina eco y vuelve a la aeronave donde es detectado por el sensor, convertido de fotones a impulsos eléctricos y colectado en un registro de alta velocidad (contador de intervalos de tiempo) (Merrick and Company, 2006)

La información del tiempo que tarda el pulso en ir hacia el terreno y regresar al detector (t) puede ser utilizada para obtener la distancia entre la aeronave y el objeto reflector mediante la ecuación (1)

$$R = C \frac{t}{2} \quad (1)$$

donde,

C es la velocidad de la luz (en el vacío)

t es expresada en ns .

Después del vuelo, los datos GPS e 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 descrita por el pulso láser en el espacio. Finalmente, la trayectoria descrita por el rayo, los giros y la posición del escáner láser obtenida a partir

de las medidas GPS, se utilizan para determinar las coordenadas WGS84 de los puntos medidos, (Gómez, Delgado y Pérez) y finalmente obtener la nube de puntos coordenados.

En los últimos años, ésta técnica 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. Algunos equipos permiten el registro de la cantidad de energía reflejada por la cubierta medida.

En Colombia se tiene registro de investigaciones con LiDAR de tipo atmosférico. 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), la primera desarrollar estudios en los que se adquieren de manera simultánea datos LiDAR y fotografías aéreas con un sistema ALS40 y cámara métrica digital, respectivamente. La información fue obtenida en dos zonas piloto, la costa Caribe y la bahía de Tumaco, como parte 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, que depende de la penetración del haz láser en la cobertura vegetal, información de apoyo que mejorará la adquisición y uso de los datos LiDAR. En este trabajo se determinará la capacidad de penetración del láser del ALS40 en la cobertura vegetal característica de las islas La Viciosa y El Morro, ubicadas en el litoral Pacífico colombiano, exactamente en el municipio de Tumaco (Nariño)

Materiales y Métodos

El proceso para determinar la capacidad de los rayos de luz láser para pasar entre los espacios de las hojas, ramas de la vegetación y tomar datos del suelo (grado de penetración LiDAR) va desde la identificación de las coberturas vegetales de la zona hasta el cálculo e interpretación del índice de penetración del LiDAR.

Parte de la información de las coberturas vegetales presentes en el casco urbano de las islas La Viciosa y El Morro se tomó de estudios anteriores realizados por el CCCP, y se complementó con un levantamiento en campo. La información espacial de los diferentes tipos de especies vegetales se estructuró por polígonos, a través del software ArcGIS en un proyecto georeferenciado en el sistema MAGNA-OESTE con elipsoide GRS80 datum WGS84, generando un shapefile con las coberturas vegetales.

Los datos LiDAR usados en el presente trabajo fueron adquiridos con un sistema ALS40 aerotransportado en un avión Cessna 402B, cuyos parámetros de calibración para Tumaco fueron (Tabla I):

Tabla I. Parámetros de calibración del avión usado en este proyecto.

Parámetro	Especificación
FOV de escaneo	30°
Altura de vuelo	1219 m
Velocidad del avión	125 nudos
Frecuencia de escaneo	29 Hz
Longitud de onda del láser	1084 nm

La adquisición de información estuvo comprometida en parte por las condiciones meteorológicas de la zona, como precipitación y nubosidad, que no permitieron muestrear la zona de estudio en un solo día, ni a una única hora.

Los datos fueron sometidos a un postprocesamiento que permitió obtener finalmente los archivos de puntos coordenados (x, y, z) (archivos .LAS) en el sistema Magna - Oeste y clasificados en tres tipos: dosel de la vegetación, suelo y

construcciones, además del valor de intensidad (cantidad de luz reflejada por la superficie) en escala de grises asociado a cada punto. El error altimétrico y planimétrico registrado fue de 15 cm.

La información LiDAR se complementó simultáneamente con fotografías aéreas digitales ortorectificadas y georeferencias con una resolución espacial de 25 cm.

Los datos LiDAR clasificados se sometieron a una reclasificación automática aplicando un filtro por retorno y un filtro de distancia al suelo con el software MARS Explorer 4.0 Pro, una posterior edición manual con apoyo de aerofotografías y comparación de alturas a través de perfiles de línea. El análisis de imágenes de intensidad reveló cambios en las superficies, los cuales no eran visibles con los datos de elevación y algunas diferencias entre materiales presentes en la zona. Por ende se obtuvo una reclasificación más detallada de los puntos.

El índice de penetración LiDAR (*LPI*) se considera el parámetro más importante en la determinación del grado de penetración del haz láser del ALS40, porque permite ver cuánto terreno es cubierto por la proyección vertical de la vegetación. El *LPI* se define como la cantidad de puntos de suelo por puntos de vegetación en un área determinada y se calculó a partir de la ecuación:

$$LPI = \frac{gij}{gij + vij} \quad (2)$$

gij es la densidad de puntos de suelo.
vij densidad de puntos de vegetación.

El *LPI* es una medida adimensional, *gij* 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 (Barilotti, Sheera y Alberti, 2006)

El *LPI* varía en un rango de 0 a 1; valores cercanos a 0 describen una vegetación densa, mientras que valores cercanos a 1 son característicos de áreas descubiertas. Para determinar éste índice se integró en Mars Explorer la información de las coberturas vegetales y los archivos de puntos LiDAR correspondientes a las clases dosel de la vegetación y suelo, de forma independiente. Luego, los puntos coordenados de cada polígono se exportaron para

hacer el respectivo conteo. El conteo de puntos de cada polígono se realizó de forma independiente, por medio de una rutina elaborada en MATLAB. Los resultados del conteo se evaluaron con la ecuación (2), para calcular el LPI de cada especie vegetal identificada en la zona.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las 35 especies características identificadas en las islas (Tabla II) fueron digitalizadas en 777 polígonos, almacenados en un archivo tipo shapefile. Cada polígono representa una cobertura vegetal.

Tabla II. Especies vegetales identificadas en la zona de estudio.

No.	Cobertura	Nombre científico	No. Polígonos
1	Acacia	<i>Acacia bracinga</i>	10
2	Aguacate	<i>Persea grattisima</i>	18
3	Almendra	<i>Prunus Amigdalus</i>	97
4	Caucho	<i>Hevea brasiliensis</i>	2
5	Cedro	<i>Cedrela spp</i>	2
6	Eureka	<i>Chrysalidocarpus lutescens Wend</i>	1
7	Ficus	<i>Ficus Benjaminia L.</i>	24
8	Guabillo	<i>Jacaranca copaia</i>	2
9	Guamo rabo de mono	<i>Inga edulis mart</i>	15
10	Guanábana	<i>Annona muricata</i>	28
11	Guayaba	<i>Psidium Guayaba</i>	28
12	Guineo	<i>Musa sapientum</i>	1
13	Icaco	<i>Chrysobalanus icaco</i>	9
14	Iguanero	<i>Avicennia germinans</i>	2
15	Limón	<i>Citrus medica linne</i>	16
16	Majagua	<i>Hibiscus tiliaceus</i>	4
17	Mangle	<i>Rizophora mangle L.</i>	30
18	Mango	<i>Mangifera indica</i>	113
19	Mano de tigre	<i>Bocconia frutescens L</i>	4
20	Maracuyá	<i>Passiflora edulis</i>	1
21	Marañón	<i>Anacarium occidentale L.</i>	2
22	Matapalo	<i>Rubiaceae</i>	4
23	Matarratón	<i>Gliricidia sepium</i>	67
24	Melón	<i>Cucumis Melo L.</i>	1
25	Naranja	<i>Citrus aurantium sub sinesis</i>	4
26	Ovo-ciruelo	<i>Spondias spp</i>	18
27	Palma africana	<i>Elaeis guineensis</i>	145
28	Palma cocotero	<i>Cocos nucifera</i>	55
29	Papaya	<i>Carica papaya L.</i>	19
30	Pastos		4
31	Pita	<i>Agave americana</i>	10
32	Plátano enano	<i>Musa cavendishii</i>	19
33	Rojos	<i>Hibiscus spp</i>	4
34	Yarumo	<i>Cecropia spp.</i>	12
35	Zapote	<i>Matisia cordata 6</i>	6

En la Figura 1 se observa que la cobertura más abundante y representativa de la zona de estudio es el mangle rojo (*Rizophora mangle L.*), vegetación típica de estuarios y zonas tropicales. Las coberturas vegetales ubicadas en zonas urbanas, alrededores de viviendas o sobre los techos de éstas fueron descartadas, ya que la vegetación se ve influenciada por factores antrópicos, esto permitió tener condiciones similares para el análisis de las especies vegetales y determinar si influyen o no las características del suelo en la respuesta del sensor usado.

Con el ALS40 se adquirieron en la zona de estudio 14340 918 puntos crudos. Después del postprocesamiento, la reclasificación y edición manual se obtuvieron para la clase dosel de la vegetación 5011 655 puntos, y para la clase suelo 5182 578 puntos, con una precisión mayor a 0.15m en altimetría y 1m en planimetría. La aplicación de los filtros y la edición manual generaron superficies más uniformes que permitieron visualizar de forma más clara los puntos de suelo bajo vegetación (Figura 2)

Las nubes de puntos (x, y, z), visualizadas por valores de altitud, dejan ver la precisión de los modelos de superficie generados tanto en zonas despejadas como en 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.

La Figura 3a representa una distribución por elevación generada con datos crudos. La escala de colores de este modelo digital se basa en los colores primarios RGB, donde los puntos de menor altura se observan en azul, una altura media en verde y mayor altura en rojo, con degradaciones entre ellos. La Figura 3b muestra el modelo digital de superficie de esta zona, generado con puntos filtrados automáticamente, editados y reclasificados manualmente. En la Figura 3c se visualiza la vegetación presente sobre el suelo. La Figura 3d representa un modelo digital de elevación de una zona de la isla de El Morro. Estos modelos son idóneos para la evaluación de curvas de nivel en el desarrollo de estudios de riesgo de inundación.

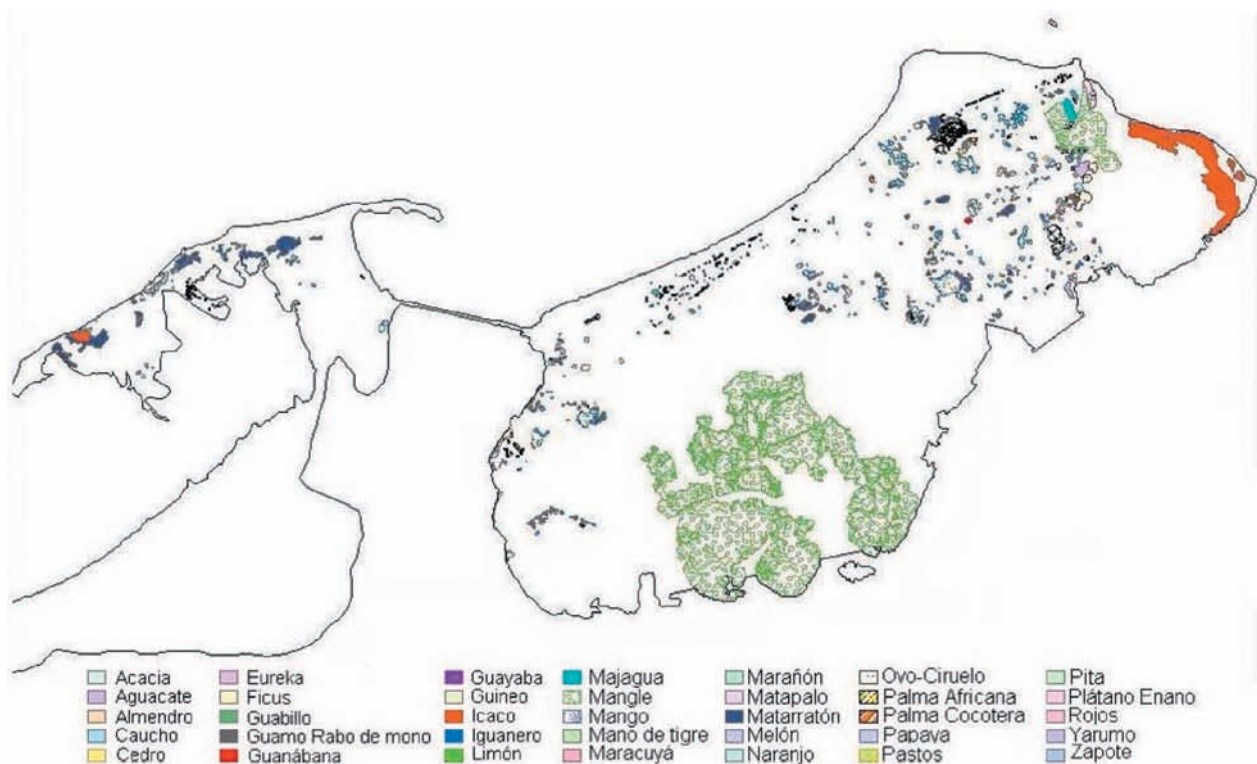


Figura 1. Coberturas vegetales digitalizadas en Tumaco.

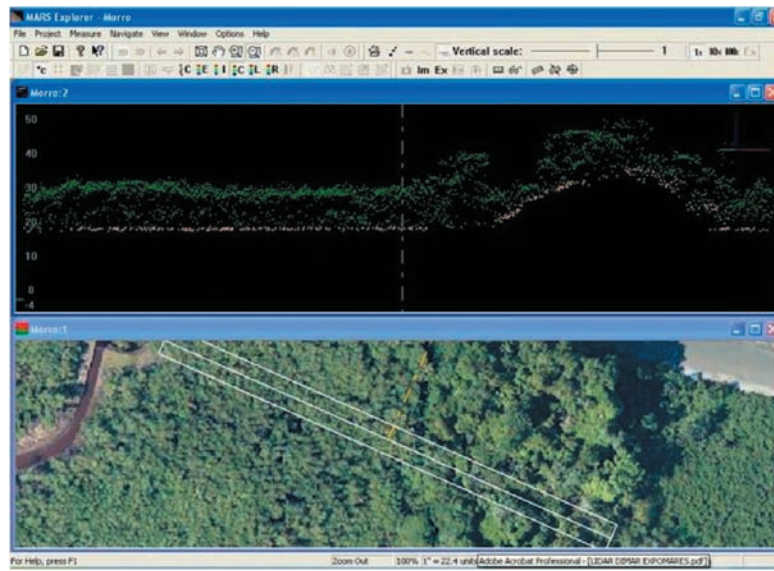
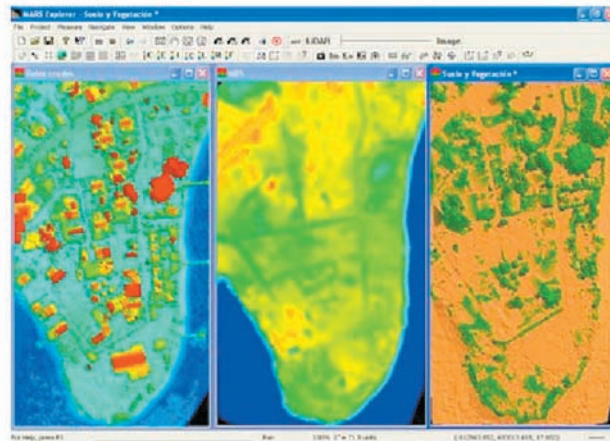


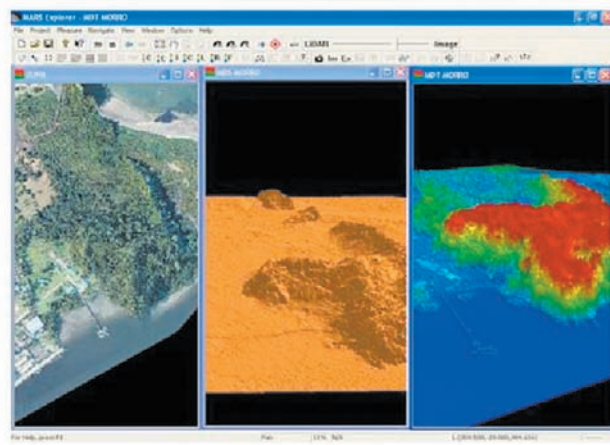
Figura 2. Perfil de línea de una zona con vegetación abundante.



a)

b)

c)



d)

Figura 3. Modelos digitales de terreno. a), b) y c) para zonas de La Viciosa. d) para zona de la isla El Morro.

Reflectividad de la vegetación

La reflectividad de cada cobertura vegetal, con relación a los pulsos de luz incidente emitidos por el transmisor láser, configurado para operar a una longitud de onda de 1084nm, se determinó a partir de los datos de intensidad de cada punto y su respectiva imagen. Los valores se encuentran representados en tonos de grises de 0 a 255; donde 0 corresponde a una absorción total de la luz incidente por la cobertura, y 255 a la máxima reflectividad.

Se encontró que dos (02) polígonos de almendro, dos (02) de ficus, uno (01) de guanábana, dos (02) de mango, uno (01) de matarratón, cinco (05) de plátano enano y uno (01) de rojos, presentaron la máxima reflectividad a la señal del ALS40. Para el caso de absorción total no se registraron cubiertas vegetales.

A excepción de los polígonos mencionados anteriormente, los demás polígonos de una misma cobertura vegetal no presentaron un único valor de intensidad. Por ello se calculó el coeficiente de variación (R), que permite medir la dispersión de los valores de intensidad de cada polígono. Un valor pequeño de R 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. Las coberturas que presentaron el coeficiente (R) bajo fueron: la pita con 6.31%, el ficus con 8.06%, la palma africana con 8.74%, el Matarratón con 9.12%, el limón con 9.29%, la acacia con 9.37% y el mangle con 9.57%.

Se realizó una división de la escala de valores de intensidad en tres rangos:

- Valores de 0 a 85 tonos de grises corresponden a baja reflectividad.
- Valores de 85 a 170 corresponden a reflectividad media.
- Valores mayores a 170 corresponden a reflectividad alta.

Teniendo en cuenta estos rangos, en la zona de estudio no existen coberturas que presentaran baja reflectividad, la mayor cantidad de polígonos se encontraron en el rango de reflectividad alta. No obstante, aparecieron polígonos de las mismas coberturas con una reflectividad media, lo que indica que no es adecuado expresar la intensidad de cada cobertura con un valor fijo.

Dado que se midió el parámetro de intensidad para agrupaciones de hojas y en algunos casos

ramas, las variaciones se presentaron posiblemente por el estado fenológico de la vegetación y el tipo de suelo que la sustenta. En la zona de estudio se tienen suelos variados como playas, tierra firme, combinaciones arena, tierra firme y sedimentos, y otros denominados rellenos.

Como lo indica la literatura, la vegetación vigorosa en el infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad (Chuvieco, 1996); para el caso analizado la respuesta de la vegetación en las islas a la longitud de onda de 1084nm así lo demuestra.

Índice de penetración del haz láser del ALS40

El LPI para cada uno de los polígonos se calculó por medio de la ecuación (2). A excepción del caucho, los polígonos de un mismo tipo de vegetación no presentaron un valor idéntico. El cálculo de la desviación estándar y los coeficientes de variación muestran que la penetración del ALS40 presentó valores pequeños para las coberturas de: $R = 36.36\%$ mano de tigre, $R = 36.37\%$ naranja, $R = 50\%$ palma cocotero, $R = 53.85\%$ acacia, $R = 59.09\%$ icaco y $R = 60\%$ mangle. Fueron menos dispersos, ofreciendo homogeneidad y mayor precisión en los resultados.

Para el caso contrario se encontró tipos de vegetación donde R superó el 100%: ciruelo $R = 141.67\%$, marañón $R = 137.5\%$, matarratón $R = 107.14\%$; guabillo, limón y pastos $R = 100\%$. Estos resultados indican que no se puede usar un LPI promedio para estas coberturas, ya que la dispersión entre los valores para cada polígono es muy grande.

Para una mejor interpretación de los resultados se crearon rangos de clasificación de los valores del LPI (Tabla III):

Tabla III. Rangos de clasificación de los valores del LPI .

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

Se encontraron 28 polígonos de 13 especies diferentes que no registraron penetración del haz láser del ALS40, 21 ubicados en El Morro y el resto en La Viciosa. Particularmente se observa en estos polígonos otros estratos de flora significativos sobre el suelo, que influyen en el registro del eco generado por esta superficie, ya que aumentan la densidad de la vegetación. También se observa que la mayoría de polígonos de los diferentes tipos de flora registran una penetración baja, para 21 especies se tiene valores de *LPI* en diferentes rangos y 14 en un solo rango (Tabla IV)

La Figura 4a muestra una cobertura de mango con un *LPI* = 0.14 (PB), los puntos verdes indican vegetación y se tiene un porcentaje de terreno

cubierto por la proyección vertical de la vegetación alto (89.7%). Son pocos los puntos reflejados por el suelo (puntos rojos) en comparación con los reflejados por el dosel de esta especie. La Figura 4b representa una cobertura de matarratón con un *LPI* = 0.49 (PM), 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. La Figura 4c es un ejemplo de una cobertura con un *LPI* alto (0.76), es una zona cubierta por pastos, donde sólo el 23% del suelo está cubierto por vegetación, esto se debe a la cantidad de espacios entre la vegetación que hacen posible el paso del haz láser del sistema y el registro de una mayor cantidad de puntos de suelo.

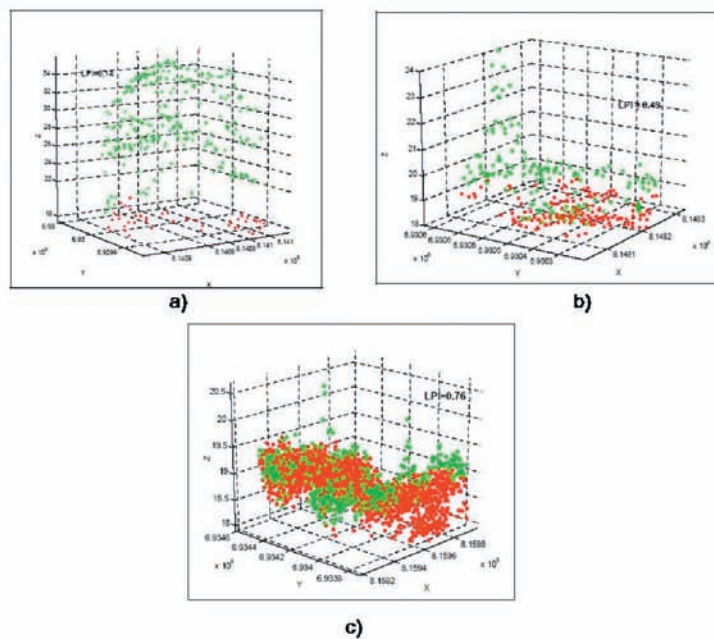


Figura 4. a) Cobertura de mango en el rango PB. b) Cobertura de matarratón en el rango PM., c) Cobertura de pastos en el rango de PA.

Debido a las variaciones en los valores del *LPI* para las especies vegetales de la zona, se buscó una dependencia de este parámetro con variables como el área cubierta por cada cobertura y la intensidad. La relación del *LPI* con las densidades de puntos, tanto de vegetación como de suelo, se analizó a partir de la ecuación (2). Para una densidad de puntos de suelo alta el *LPI* es alto y

viceversa; para el caso de la densidad de puntos de vegetación, si ésta es alta se obtiene un *LPI* bajo. Asimismo, se analizó la correlación entre el *LPI*, el área y la intensidad (ver coeficientes de correlación en la Tabla V)

Tabla IV. Número de polígonos de flora identificada en cada rango de *LPI*.

Cobertura Vegetal	No. Polígonos en PN	No. Polígonos en PB	No. polígonos en PM	No. 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		

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

Cobertura vegetal	Coeficiente de correlación LPI, área	Coeficiente de correlación LPI, intensidad
Acacia	0.28	0.43
Aguacate	0.26	- 0.12
Almendra	- 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

De igual forma que con los valores de intensidad y de *LPI*, los coeficientes de correlación se dividieron en rangos:

Tabla VI. Rangos de clasificación de los coeficientes de correlación.

Rango. R entre	Clasificación
± 0.9 y ± 1	Correlación alta
± 0.8 y ± 0.9	Correlación media
± 0.5 y ± 0.8	Correlación baja
$R < 0.5$	No hay correlación

Para las especies vegetales: caucho, guabillo, cedro, iguano, marañón y matapalo no se pudo determinar realmente si la correlación entre el *LPI* y el área es alta (Tabla V), ya que sólo se tienen dos polígonos para cada cobertura, lo que indica que no existen datos suficientes para un análisis profundo.

Se encontró una correlación alta para las especies de pasto ($R=0.99$), la cual deja ver que existe una amplia relación entre el *LPI* y el área. Correlación media para mano de tigre ($R=0.84$), y correlación baja para el majagua y los rojos. En las 21 coberturas restantes no se presentó correlación, indicando que no hay una dependencia entre las dos variables, aunque el área afecta de forma indirecta al índice de penetración a través de las densidades de puntos LiDAR.

El análisis de los coeficientes de correlación entre el *LPI* y la intensidad (ver Tabla V) promedio de la vegetación mostró correlación alta para especies vegetales con sólo dos polígonos, a diferencia del matapalo ($R=0.58$) y una alta dependencia entre éstas variables en coberturas de mano de tigre ($R=0.92$), pastos ($R=0.86$) y rojos ($R=0.81$). El resto de especies vegetales presentó correlación baja o ausencia de ésta, por lo que no se pudo establecer una dependencia entre las variables.

La agrupación de polígonos de una misma especie en un radio de 40 m permitió obtener información más precisa y homogénea, con relación a las características visuales del suelo (textura y color): suelo húmedo, seco, grama o estratos de vegetación densos. De esta forma se encontró que polígonos de un mismo grupo presentaban un

LPI similar. Los valores del *LPI* para el mangle se ubicaron dentro de un mismo rango, con variaciones muy pequeñas entre sí. Una ventaja que representa esta cobertura es la localización en un tipo de suelo específico, ya que se sitúa en franjas costeras; siendo de vital importancia, porque cumple función de barrera frente fenómenos como la erosión costera y los tsunamis.

Especies como la palma africana y el cocotero, también muestran uniformidad en cuanto a suelo. Se encontraron significativas variaciones en el valor de *LPI* para coberturas de una misma especie ubicadas en suelos con diferentes características. Lo anterior muestra la influencia que ejercen las características del suelo en el índice de penetración de la señal del ALS40 en la vegetación de las islas.

Las variaciones en el tipo de suelo producen efectos sobre la cubierta vegetal que se reflejan en el crecimiento, densidad y alteración del ciclo de desarrollo de la vegetación. Dada la forma en que se adquieren los datos del suelo, con la técnica estas variaciones se ven bastante involucradas en los resultados obtenidos. Es decir, el suelo en el que crece una especie vegetal puede afectar su crecimiento, debido a la absorción de nutrientes, y desarrollar menos follaje que en otro tipo de suelo. Otra razón por la cual el *LPI* se puede ver afectado son las características del suelo, éstas tienen que ver con la reflectividad del mismo en el infrarrojo cercano. Un factor de gran importancia es el contenido de humedad, ya que disminuye la reflectividad del suelo en esta banda del espectro electromagnético.

Es posible que las variaciones encontradas entre las coberturas de una misma especie vegetal para el *LPI*, no sólo se relacionen con los parámetros mencionados en este análisis, ya que puede ocurrir que el índice de penetración esté 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 y humedad, entre otros factores. También se ve influenciado por el tamaño, forma y densidad de las hojas de cada una de las especies analizadas, por ejemplo: las hojas para una cobertura de mango son más anchas y densas, de forma tal que no permiten un grado de penetración alta de la vegetación; a diferencia de una cobertura de pastos altos que tiene hojas mucho más delgadas y separadas entre

sí, esto se ve reflejado en un *LPI* menor para la primera especie (Figura 4a y 4c)

En los resultados no se tuvo en cuenta la hora del día en que se tomaron los datos, otro posible efecto que puede alterar los valores del índice de penetración, se puede apreciar 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, cambiando la estructura momentánea de sus hojas.

Los valores del *LPI* se digitalizaron y se agregaron al proyecto de coberturas vegetales, asociando un color a cada rango de penetración:

- * Rojo: No penetración.
- * Amarillo: Penetración baja.
- * Verde: Penetración media.
- * Turquesa: Penetración alta.
- * Azul: Penetración total.

Se obtuvo así una visualización de la zona de estudio con relación a la capacidad de penetración de la señal del ALS40 en la vegetación identificada (Figura 5)

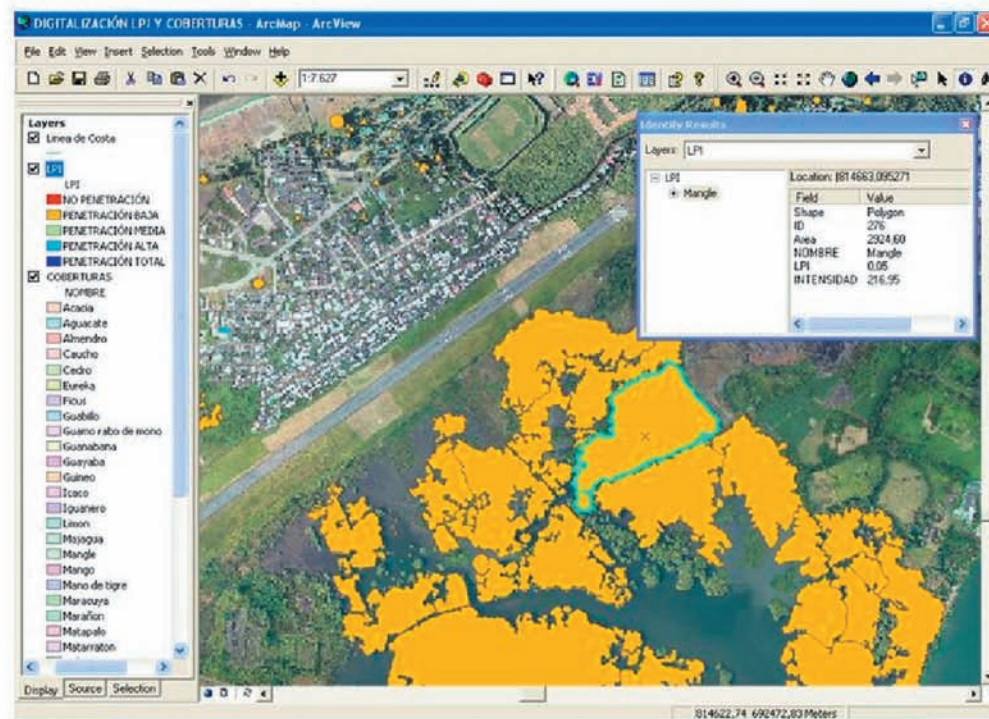


Figura 5. Digitalización y representación por colores del índice de penetración

CONCLUSIONES

El presente estudio conlleva a determinar que el grado de penetración del sistema ALS40 en la vegetación para Tumaco es variable, depende de cada especie y de las características que ésta presente. El parámetro que permite determinarlo es el índice de penetración del LiDAR (*LPI*)

Se encontró que la capacidad de penetración de la señal del láser del ALS40 en la vegetación de la zona es baja. Ésta 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 vegetal.

Además de las características de la vegetación, el *LPI* también depende de la altitud de vuelo sobre el terreno, entre mayor sea ésta más débil será la intensidad de la radiación reflejada, haciendo que la detección se convierta en un proceso más susceptible a errores debidos a efectos ambientales. Otro factor es la cantidad de datos adquiridos de una cobertura vegetal. 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 o, en su defecto, utilizar un sensor con mayor frecuencia de escaneo. Este tipo de sensores permitiría una mayor penetración de la señal en zonas cubiertas de vegetación densa.

Los valores de intensidad proporcionados por el sistema no tienen un único valor para cada tipo de vegetación, éstos se ven afectados por las características del suelo y de la vegetación misma. Un análisis más detallado del parámetro se puede realizar por medio de un LiDAR de registro de onda. Sin embargo, se encontró una aproximación del comportamiento de la reflectividad en la vegetación para la longitud de onda de 1084nm del ALS40, cuyo principio de funcionamiento corresponde a un LiDAR de retorno discreto.

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; éstas presentaron un coeficiente de variación menor y los polígonos se ubicaron en el

rango de penetración baja, con un *LPI* entre 0.01 y 0.33.

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 ambientales.

LITERATURA CITADA

Barilotti, A., T. Sheera y G. Alberti. 2006. LAI determination in forestry ecosystem by LiDAR data analysis. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry. Vienna.

Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de Teledetección Espacial. 3ª Edición. Ediciones RIALP S.A. España.

Gómez, A., J. Delgado y N. Pérez. Obtención de DTM y DSM mediante tecnología LiDAR. Aplicación al Río Ebro. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría.

Merrick and Company. 2006. [en línea] GeoSpatial Solutions: LiDAR. Medición de Distancia con Láser (LIDAR). <http://www.merrick.com/servicelines/gis/espanol>

