



Ministerio de Medio Ambiente
y Recursos Naturales

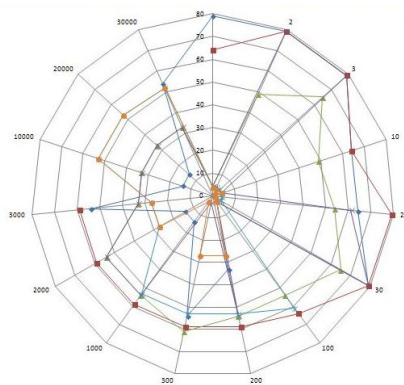


MASTER TESIS

CORINE Land Cover en LIDAR

Aspirando a:

**Master of Science in
Geographical Information Science & Systems**



Presentado por:

Carlos Magaña (103505)

Tutora:

MSc. Victoria Achatz

Revisado por:

Prof. Dr. Josef Strobl

Dr. Gudrum Wallentin

Berlín, 15 junio de 2015.

Agradecimiento

A todo aquel que cada día,
Hace intentos remotos por obtener un visado,
Cruzar un muro,
Navegar un mar,
Volar en la oscuridad,
Caminar en el desierto,
Colgarse de un tren,
Migrar por un niño;
Convalidar algún tipo de formación
O simplemente y muy lejos de sí;
Resistir un día más...
Y a todo aquel
Que tiende la mano,
Muy dentro de sí,
En un intento que responde a otros intentos más,
Para perpetuar la existencia de la creatividad humana.

Junio de 2015.

Abstracto

A partir de los geodatos LIDAR con longitud de onda de 1064nm e imágenes RGB capturadas en forma simultánea por los vuelos para la obtención de geodatos LIDAR realizados en 2014 por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y para las zonas en donde la reflexión de la seca tiene predominancia, se utilizó información capturada en la estación seca. Posteriormente se realiza una clasificación que tienen como objetivo abstraer los geodatos y llevarlos hacia la nomenclatura CORINE Land Cover adaptada a El Salvador. Esto se logra habiendo desarrollado una metodología que considera, las dimensiones de altura e intensidad de los geodatos LIDAR y a partir de lo anterior, se realizan reclasificaciones en intervalos de altura de los objetos en la cobertura del suelo en clases decimales especiales (1,10,100,1000,10000); con el objeto de crear estratos fácilmente identificables y se generan clases a partir del Raster con el valor digital de intensidad(1,2,3) que previamente es sometido a un filtro focal (*Nearest Neighbor*) en un recuadro de 6x6 celdas. El procedimiento anterior se realiza con el objeto de generar los factores que participan en la función del producto modular que es llamado en este trabajo: *Valor de Cobertura (VC)*, el cual mediante un arreglo matemático especial decimal, tiene un valor único que es descifrable y su interpretación es favorable para la identificación de objetos CORINE, contando con el conocimiento oportuno de los objetos de cobertura presentes en una determinada región. Las regiones utilizadas en el análisis corresponden a la clasificación que realizó *Lauer(1956)* de las zonas vegetales y agrarias de El Salvador, delimitadas por alturas sobre nivel del mar(*Tierra caliente 0-800 msnm, Tierra Templada 800-1800 msnm y Tierra Fría 1800-2800 msnm*). Tanto las muestras de este trabajo, como su validación responden a esta clasificación de vegetación y sumados a estas coberturas, se han identificado otros objetos de cobertura de orden artificial que están presentes actualmente en la nomenclatura CORINE, adaptada a Centroamérica. La calidad temática en los resultados generales es de 91% y se calcula utilizando los puntos de muestra visitados, además de la corroboración en las imágenes RGB. El ajuste e interpretación del *valor de cobertura VC*, son la base fundamental para el trabajo futuro, en donde las asignaciones por combinación de los factores envueltos por zona, hacen las veces de datos de entrenamiento (*Training Data*), los cuales conducen a la predicción y substracción de clases para los geodatos de toda la región en donde las zonas muestra tienen validez en el marco definido para la presencia de objetos, en un modelo simulado (*Supervised Learning Machine*) que puede semi-automatizarse.

Resumen

PARTE I

En los primeros cuatro capítulos se aborda el contexto en el cual se obtienen y caracterizan los geodatos LIDAR, deduciendo el marco diferenciable entre uso y cobertura de suelos en el cual se desarrolla la nomenclatura CORINE Land Cover; así como una descripción detallada de la tecnológica LIDAR en sus diferentes sistemas y aplicaciones; para luego detallar los fundamentos físicos teóricos que participan en la interacción de la luz emitida y percibida por un sensor activo que emite pulsos laser para conformar un sistema LIDAR.

PARTE II

En la segunda parte de este trabajo, a partir del **capítulo 5**, se contextualiza la caracterización de Wilhelm Lauer (1956), en el entorno CORINE adaptado a Centroamérica. El **Capítulo 6** retoma la física de la reflexión en superficies en forma de intensidad para complementar el entendimiento de la aplicación de esta tecnología.

PARTE III

En la tercera parte se describe primeramente la metodología en el **capítulo 7**; destinando los parámetros LIDAR que intervienen para una clasificación CORINE (LIDAR en CORINE). Finalmente la aplicación de esta metodología da a luz resultados, su discusión y conclusiones se encuentran en el **capítulo 8**, una clasificación CORINE a partir de geodatos LIDAR (CORINE en LIDAR).

Siglas Utilizadas

CORINE	Coordination of Information on the Environment
ESA	El Salvador
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
AMSS	Area Metropolitana de San Salvador
LIDAR	Light detection and Ranging
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
SQL	Structure Query Language
TC	Technical Consortium
ISO	International Organization for Standardization
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
IDWG	Interdepartmental Working Group
LUP	Land Use Planning
CLC	CORINE Land Cover
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ALS	Airborne Laserscanning System
EOS	Earth Observing System
RADAR	Radio Detection And Ranging
LADAR	Laser Detection and Ranging
DIAL	Diferencial de absorción LIDAR
EPA	Environment Protection Agency's
BELINDA	Broad Emission Lidar with Narrowband Determination of Absorption
ALADIN	Atmospheric Laser Doppler Lidar
GLAS	Geoscience Laser Altimeter System
LAWS	Laser Atmospheric Wind Sounder
NASDA	National Space Development Agency of Japan
ATLID	Atmospheric LIDAR
ELISE	Experiment LIDAR in Space experiment
GLAS	Geoscience LASER altimeter
CLS	(Cloud LIDAR System)
LASE	LIDAR Atmospheric Sensing Experiment
LASA	LIDAR Atmospheric Sounder and Altimeter
LADAR	Laser Detection and Ranging
LIBS	Laser induced breakdown spectroscopy
CMP	Continuous Multipulse
DEM	Digital Elevation Model
CALIOP	Cloud-Aerosol LIDAR with Orthogonal Polarization
ALTM	Airborne Laser Terrain Mapping
GSFC	Goddard Space Flight Center ⁵

ANSI	American National Standards Institute
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASPRS	The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing)
WDP	Wave Form Data Packets
FVP	Fundamental Vertical precision
DEM	Digital Elevation Model
DSM	Digital Superficial Model
FGDC	Federal Geographic Data Committee
GSD	Ground Sample Distance
MASER	Light Amplification by Stimulated emission of radiation
CCD	Charged Coupled Device
LED	Light-emitting diodes
TEM	Transverse Electric and Magnetic Waves
SNR	signal to noise
PDL	Polarization Diversity Lidar
HAP	High Average Power
CPA	Chirped Pulse Amplification
VC	Valor de Cobertura
PPA	Point Pattern Analyst

INDICE

Abstracto.....	pág. 2
Resumen.....	pág. 3
Siglas Utilizadas.....	pág. 5
Índice.....	pág. 7
Listado de Elementos.....	pág. 12
Capítulo 1 Introducción.....	pág. 20
Antecedentes.....	pág. 21
1.2 Objetivo.....	pág. 22
1.3 Ubicación de los Datos Muestra.....	pág. 22
1.4 Metodología.....	pág. 22
 Capítulo 2 Land Cover y CORINE Land Cover.....	 pág. 24
2.1 Land (Suelo)	pág. 24
2.2 Objetos del Suelo.....	pág. 24
2.3 Land Cover.....	pág. 26
2.4 Land Cover y Land Use.....	pág. 26
2.5 Corine Land Cover.....	pág. 26
2.6 Clasificación	pág. 28
2.7 Nomenclatura CORINE Land Cover.....	pág. 29
 Capitulo 3 LIDAR.....	 pág. 30
3.1 Remote Sensing (Teledetección).....	pág. 30
3.2-LIDAR.....	pág. 30
3.3-Desarrollo de LIDAR.....	pág. 31

3.4-Sistemas de LIDAR.....	pág. 32
3.5-Tipos de técnicas LIDAR.....	pág. 34
3.5.1-Elastic Backscatter LIDAR.....	pág. 34
3.5.2-Diferencial de absorción LIDAR (DIAL).....	pág. 34
3.5.3-Raman LIDAR.....	pág. 34
3.5.4-The Doppel LIDAR Wind Sensor	pág. 36
3.5.5-Resonance Scattering LIDAR o Resonancia Fluorescente.....	pág. 37
3.6-Plataformas de captura de datos.....	pág. 37
3.6.1-Spaceborne Lidar System.....	pág. 38
3.6.2-Airborne Lidar System (ALS)	pág. 39
3.7-Algunos Sistemas ALS y SLS.....	pág. 41
3.7.1-The LIDAR Atmospheric Sounder and Altimeter (LASA)	pág. 41
3.7.2-LADAR y LIBS.....	pág. 42
3.7.3-CALIPSO.....	pág. 42
3.7.3.1-Transmisor.....	pág. 43
3.7.3.2-Receptor.....	pág. 43
3.7.3.3-Resolución y Calibración.....	pág. 43
3.7.5- Sistema de captura de datos de prueba: GEMINI.....	pág. 44
3.7.5-Airborne Laser Terrain Mapping (ALTM).....	pág. 44
3.7.6-Terra Mobil	pág. 45
3.8-Características de los geodatos LIDAR.....	pág. 46
3.8.1-Formato LAS.....	pág. 46
3.8.2-Especificaciones de captura.....	pág. 47
3.8.2.1 Plataforma de Colección de datos.	pág. 47

3.8.2.2 Sensor.....	pág. 47
3.8.3 Requerimientos del sensor.....	pág. 47
3.8.4-Especificaciones de los datos de muestra.....	pág. 48

Capitulo 4 Bases Físicas de la tecnología LIDAR.....pág. 50

4.1-Espectro Electromagnético Luz Visible.....	pág. 51
4.2-Radiación Electromagnética.....	pág. 52
4.3-Interacciones de Emisión y Absorción plateadas por Einstein.....	pág. 53
4.4-Emisión estimulada.....	pág. 53
4.5-Radiometría y LIDAR.....	pág. 54
4.5.1-Polaridad y LIDAR.....	pág. 55
4.5.2-Interacciones en la radiometría.....	pág. 57
4.5.2-Reflexión y Refracción.....	pág. 57
4.5.3-Dispersión.....	pág. 58
4.5.4-Poder de resolución.....	pág. 59
4.6-Coherencia.....	pág. 60
4.7-Intensidad en la Refracción o Irradiancia.....	pág. 61
4.7.1-Intensidad pulsos de retorno LIDAR.....	pág. 61
4.8-LASER.....	pág. 63
4.8.1-Sistemas de Estimulación.....	pág. 64
4.8.1.1-Sistema de dos Niveles.....	pág. 65
4.8.1.2-Sistema de tres Niveles y cuatro Niveles.....	pág. 66
4.8.2-Resonadores.....	pág. 67
4.8.3-Pulsos o Q-Switching.....	pág. 68
4.8.4-Laser en estado solido.....	pág. 70
4.8.4-El LASER Nd:YAG.....	pág. 72

4.8.5-Detección.....	pág. 73
4.8.5-Interacciones del LASER Y LIDAR.....	pág. 73
4.8.5.1-Elastic Backscatter Lidar.....	pág. 74
4.8.5.2-High Spectral Resolucion Lidar(HSRL).....	pág. 75
4.8.5.3-Interacción especial BELINDA (Broadband Emission Lldar with Narrowband Determination of Absorption).....	pág. 76
4.8.5.3.1-Transmisión y Recepción BELINDA.....	pág. 77

Capítulo 5 Land Cover y Clasificación

Corine Land Cover en El Salvador.....	pág. 78
5.1-CORINE Land Cover en El Salvador.....	pág. 78
5.2-Land Cover en El Salvador.....	pág. 81
5.2.1-La Tierra Caliente.....	pág. 83
5.2.2-La Tierra Templada.....	pág. 85
5.2.3-La Tierra Fría.....	pág. 85
5.3-Geodatos LIDAR Muestra.....	pág. 86
5.3.1-Coberturas vegetales presentes Datos Muestra.....	pág. 87
5.3.1.1-Coberturas de Lauer en CORINE para La Tierra Caliente hasta 800 msnm.....	pág. 87
5.3.1.2-Coberturas para La Tierra Templada hasta 1800 msnm.....	pág. 88
5.3.1.3- Coberturas para La Tierra Fría desde 1800 msnm.....	pág. 88
5.3.2-Otras Coberturas presentes en los Datos Muestra.....	pág. 89

Capítulo 6 Reflexión de Superficies e intensidad.....pág. 91

6.1-Reflexión.....	pág. 91
6.2-Superficies relevantes para Land Cover y curvas espectrales de reflectividad (Spectral Signatures)	pág. 92

6.3 Divergencia y Retornos de la muestra de geodatos LIDAR.....	pág. 93
6.4 Consideraciones para interpretar el valor de intensidad.....	pág. 94
<i>6.4.1 Relación con el poder de resolución y la Reflectancia.....</i>	<i>pág. 95</i>
6.5 “State of the Art ” de la aplicación de la intensidad para detección de coberturas diversas.....	pág. 97

Capítulo 7 Metodología: LIDAR en CORINE Land

Cover.....	pág. 99
7.1 Objetivo.....	pág. 99
7.2 Metodología.....	pág. 99
7.3 Visitas de campo.....	pág. 100
7.4 Definición de rangos de Altura.....	pág. 100
<i>7.4.1 Alturas de objetos CORINE para cada zona.....</i>	<i>pág. 101</i>
7.5 Aspectos a considerar.....	pág. 102
<i>7.5.1 Condiciones Necesarias para desarrollar el modelo.....</i>	<i>pág. 102</i>
7.6 Modelo Espacial.....	pág. 103

Capítulo 8 Análisis Espacial: CORINE en LIDARpág. 105

8.1 Zonas de Análisis Espacial.....	pág. 105
8.2 Definición de Rangos de intensidad.....	pág. 106
8.3 Análisis Espacial.....	pág. 107
8.3.1-Reclasificaciones de Variables.....	pág. 108
<i>8.3.1.1-Reclasificación de Intensidad (Multiplicando).....</i>	<i>pág. 108</i>
<i>8.3.1.2-Reclasificación de alturas (Multiplicador).....</i>	<i>pág. 110</i>
<i>8.3.2- Workflow.....</i>	<i>pág. 111</i>
8.4-Discusión de resultados (Producto).....	pág. 112
<i>8.4.1 Interpretación.....</i>	<i>pág. 112</i>

8.4.2 Variaciones y Ajustes.....	pág. 113
8.4.3 Automatización y Potencialidades.....	pág. 116
8.4.4 Presentación y Análisis de Resultados.....	pág. 117
8.4.4.1 Zona 1 en la Tierra Caliente baja(0-100msnm).....	pág. 117
8.4.4.2 Zona 2 en la Tierra Caliente (0-100msnm).....	pág. 118
8.4.4.3 Zona 3 en la Tierra Caliente media (100-500msnm).....	pág. 119
8.4.4.4 Zona 4 Tierra Caliente media (100-500msnm).....	pág. 120
8.4.4.5 Zona 5 Tierra Templada media (800-1800msnm).....	pág. 121
8.4.5-Validación Temática.....	pág. 122
8.5-Conclusiones y trabajo futuro.....	pág. 124
Bibliografía.....	pág. 126
ANEXOS	pág. 129
ANEXO 1. Unidades Radiométricas.....	pág. 129
ANEXO 2a. Codificación global del formato LAS.....	pág. 129
ANEXO 2b. Propiedades del Formato.....	pág. 130
ANEXO 3. Fase en relación al tiempo inicial de pulsos.....	pág. 131
ANEXO 4. Parámetros de dispersión para diferentes emisiones de LASERS fabricados con materiales típicos.....	pág. 131
ANEXO 5. Especificaciones Técnicas de la cámara hiperespectral utilizada.....	pág. 132
ANEXO 6. Modelo de Integración en la clasificación de MARN para la cartografía vectorial de “Uso de Suelos”	pág. 132
ANEXO 7. Detalle de las especies de madera presentes en el bosque húmedo y en el bosque seco.....	pág. 133
ANEXO 8. Ficha de validación utilizada para cada una de las zonas en estudio.....	pág. 134
ANEXO 9. Tipos de Reflexión de onda.....	pág. 135
ANEXO 10. Esquema y Ecuación de calibración.....	pág. 136

Listado de Elementos

Código	Nombre	Fuente	Sección MT
T1	Land Cover and Land use	(European Communities, 2001)	2.4
F1	Países CORINE Land Cover	("European Commission")	2.5
F2	Relación leyenda-nomenclatura	(European Communities, 2001)	2.6
T2	Nomenclatura CORINE Land Cover	(European Communities, 2001)	2.7
F3	Cronología NASA-LIDAR	(Byer et al., 1984)	2.3
F4	Set up LIDAR	(Weitkamp, 2005)	3.4
T3	Especificaciones DIAL	(Weitkamp, 2005)	3.5.2
T4	BELINDA vrs. DIAL	(Weitkamp, 2005)	3.5.2
T5	LIDAR Ratios	(Weitkamp, 2005)	3.5.3
T6	Especificaciones GLAS	(Weitkamp, 2005)	3.6.1
T7	Especificaciones de LASA	(Byer et al., 1984)	3.7.1
T8	Especificaciones CALIPSO	(Weitkamp, 2005)	3.7.3.2
T9	Especificaciones GEMINI	("GEMINI - Optech - PDF Catalogue Technical Documentation Brochure," 2014)	3.7.4
T10	Especificaciones TERAMOBIL	(Weitkamp, 2005)	3.7.6
T11ab	Formato LAS Y características	(The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing,	3.8.1

	adicionales	2009)	
T12	Pre-clasificación LIDAR Land Cover	(The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, 2009)	3.8.3
F5	Espectro Electromagnético	(Halliday & Resnick, 2011)	4
F6	Sensibilidad Ojo	(Halliday & Resnick, 2011)	4.1
E1	Ecuación de onda	(Chang, 2005)	4.1
F7	Diagrama transmisión ondas	(Halliday & Resnick, 2011)	4.1
F8	Cuerpo Negro	(Eichhorn, 2013)	4.1
G1	Temperaturas y longitud de onda	(Eichhorn, 2013)	4.1
E3	Radiación de Boltzmann	(Halliday & Resnick, 2011)	4.2
G2	Espectro solar	http://commons.wikimedia.org/wiki/File: :Solar_Spectrum.png	4.2
F9	Interacción absorción	(Eichhorn, 2013)	4.3
E4	Relación de absorción	(Eichhorn, 2013)	4.4
F10	Interacción estimulada	(Eichhorn, 2013)	4.3
F11	Parámetros Radiométricos	(Träger, 2007)	4.5
F12 ab	Campo (a)eléctrico y magnético (b)dispersión	(Halliday & Resnick, 2011)	4.5.1
F13	Reflexión parcial polarizada	(Halliday & Resnick, 2011)	4.5.1
E5	Ecuación de refracción	(Halliday & Resnick, 2011)	4.5.2
G3	Reflectancia	http://es.wikipedia.org/wiki/Reflectivida d#mediaviewer/File:Image-Metal- reflectance_es.svg	4.5.2
F13	Difracción	(Halliday & Resnick, 2011)	4.5.1
E6	Relaciones de dispersión	(Halliday & Resnick, 2011)	4.5.3
E7	Poder de resolución en una reflexión	(Halliday & Resnick, 2011)	4.5.4
E8	Aproximación a ordenamiento reticular	(Halliday & Resnick, 2011)	4.5.4
G4	Intensidad /ángulo incidente(fase)	(Chang, 2005)	4.5.4
E9	Ecuación de Fase	(Chang, 2005)	4.6
E10	Intensidad luz	(Halliday & Resnick, 2011)	4.7
E11	Intensidad Absorbida	(Byer et al., 1984)	4.7
E12	Intensidad reflectada	(Chang, 2005)	4.7
G5	Intensidad/Inciden cia	(Halliday & Resnick, 2011)	4.7.1
G6	Intensidad, coherencia de	(Halliday & Resnick, 2011)	4.7.1

	fuentes y fase		
E13	Ecuación de estimulación	(Eichhorn, 2013)	4.8
F15	Haces polarizados	(Träger, 2007)	4.8
F16	Esquema de Bombeo en dos niveles	(Chang, 2005)	4.8.1
E14	Ecuación de bombeo	(Eichhorn, 2013)	4.8.1.1
F17	Niveles de bombeo LASER	(Eichhorn, 2013)	4.8.1.2
E15	Ecuación de bombeo Nivel 3	(Eichhorn, 2013)	4.8.1.2
F18	Curva rendimiento	(Eichhorn, 2013)	4.8.1.2
F19	Sistema de Quasi 3 Niveles	(Eichhorn, 2013)	4.8.1.2
E16	Matriz de bombeo para N niveles	(Eichhorn, 2013)	4.8.2
F20ab	Sensibilidad de nuevos patrones	(Eichhorn, 2013)	4.8.1.2
G7	Picos de resonancia	(Chang, 2005)	4.8.2
F21	Esquema de un modulador en funcionamiento	(Eichhorn, 2013)	4.8.3
G8	Ganancias de amplificación	(Chang, 2005)	4.8.3
G9	Rango operacional de LASERs en estado solido	(Träger, 2007)	4.8.3
G10	LASERs en estado sólido	(Eichhorn, 2013)	4.8.4
F22	Crecimiento LASER	(Eichhorn, 2013)	4.8.4
G10	Combinación de materiales	(Eichhorn, 2013)	4.8.4
E17	Ecuación LIDAR básica	(Weitkamp, 2005)	4.8.5
G11	Gráficos de absorción y emisión	(Träger, 2007)	4.8.5
E18	Relación de Backscatter	(Weitkamp, 2005)	4.8.5.1
E19	Ecuación LIDAR HSRL	(Weitkamp, 2005)	4.8.5.2
G12	Retrodispersión y Absorción en BELINDA	(Weitkamp, 2005)	4.8.5.3
T13	Cuadro comparativo BELINDA DIAL	(Weitkamp, 2005)	4.8.5.3.1
T14	Propiedades de partículas	(Weitkamp, 2005)	4.8.5.3.1
T15	Nomenclatura de CORINE Land Cover para El Salvador.	(MARN, 2002)	5.1
F23	Ecosistemas de ESA con las zonas de trabajo señaladas.	(World Institute for Conservation and Environment, 2011)	
T17	Zonas geográficas de	(Lauer, 1956)	5.2

	Lauer(1956)		
F24	Perfil de los cambios de vegetación con la elevación	(Lauer, 1956)	5.2
T18	Vegetación en la zonificación de Lauer.	(Lauer, 1956)	5.2
F25	Caracterización vegetal de Lauer(1954) en la zona de la bahía de Jiquilisco.	(Lauer, 1956)	5.2.1
T19	Categorías identificadas en la tierra caliente.	Creación propia en base a Lauer y CORINE Land Cover.	5.3.1.1
F26	Coberturas predominantes para los datos de muestra en la tierra Caliente	Fotos propias	5.3.1.1
T20	Categorías identificadas en la tierra templada.	Creación propia en base a Lauer y CORINE Land Cover.	5.3.1.2
F27	Coberturas predominantes para los datos de muestra en la tierra Templada	Fotos propias	5.3.1.2
T21	Categorías identificadas en la tierra fría.	Creación propia en base a Lauer y CORINE Land Cover.	5.3.1.3
F28	Coberturas predominantes para los datos de muestra en la tierra Fría	Fotos propias	5.3.1.3
T22	Otras Categorías identificadas.	Creación propia en base a CORINE Land Cover.	5.3.1
F29	Otras coberturas Identificadas.	Fotos propias	5.3.1
G13	Radicales de cuerpos negros en el medio ambiente.	(Chang, 2005)	6.1

F30	Esquema de Rugosidad	(Chang, 2005)	6.2
G14	Firma espectral de vegetación, suelo y agua.	(Weng, 2010)	6.2
F30	Divergencia del haz para el footprint.	(Baltsavias ,2014)	6.3
G15	Retornos discretos	(Baltsavias, 2014)	6.3
G16	Relación de la Reflectancia e intensidad.	("Resonant saturable absorber mirror - RSAM information,")	6.4.1
T23	Reflectancia a 900nm	(Song, 2002)	6.4.1
G17	Reflectancia a 1064nm	Creación propia en base a múltiples registros de reflectancia de materiales a 1064nm.	6.4.1
T24	Algunos estudios realizados sobre Intensidad LIDAR.	Fuentes en Tabla	6.5
T25	Muestra de Puntos de validación, adquiridos en campo.	Puntos de verificación tomados en campo	7.3
F18	Corredor de Manglares	Imagen de intensidad Lidar de la zona 2 (San Juan del Gozo) en la tierra Caliente	7.4
T27	Tipos de coberturas identificables para cada zona Lauer	Tierra Caliente, Tierra Templada y Tierra Fría. Identificación propia en CORINE.	7.4.1
F31	Restaurante flotante	Imagen de intensidad Lidar de la zona 1 (La puntilla, La Herradura) en la tierra Caliente.	7.5
F32	Esquema metodológico para la clasificación en CORINE Land Cover	Creación propia a partir de la metodología.	7.6
T28	Zonas de muestra	Imágenes de Google Earth y creación propia	8.1
F33	Definición de objetos en la imagen de intensidad	Imagen RGB de MARN y creación propia a partir de datos LIDAR de MARN	8.2

F37	Raster de Valor de cobertura VC para la zona 1	Creación propia a partir de datos LIDAR de MARN	8.3
T29	Reclasificación de intensidad para las tierras.	Creación propia.	8.3.1.1
T30	Reclasificación de altura en escala decimal.	Creación propia	8.3.1.2
G18	Workflow del análisis espacial	Creación propia	8.4.2
G19	Reclasificación de valores de cobertura a CORINE.	Creación propia	8.4.1
T31	Tabla de ajuste para la zona 1	Creación propia	8.3.2
G20	Códigos CORINE y Valores de Cobertura	Creación Propia	8.3.2
F38	Variaciones de clase CORINE	Creación propia	8.3.2
F39	Potencialidades del ajuste	Creación propia	8.3.3
F40	Clasificación CORINE (zona 1)	Creación propia a partir de datos LIDAR de MARN	8.4.4.1
T32	Tabla de ajuste para la zona 1	Creación propia	8.4.4.1
F41	Clasificación CORINE (zona 2)	Creación propia a partir de datos RGB y LIDAR de MARN	8.4.4.2
T33	Tabla de ajuste para la zona 2	Creación propia	8.4.4.2
F42	Objetos de zona 2	Creación propia	8.4.4.2
F43	Clasificación CORINE (zona 3)	Creación propia a partir de datos RGB y LIDAR de MARN	8.4.4.3
T34	Tabla de ajuste para la zona 3	Creación propia	8.4.4.3
F44	Objetos de zona 3	Creación propia	8.4.4.3
F45	Clasificación CORINE (zona 4)	Creación propia a partir de datos RGB y LIDAR de MARN	8.4.4.4
T35	Tabla de ajuste para la zona 4	Creación propia	8.4.4.4
F46	Objetos de zona 4	Creación propia	8.4.4.4
F47	Clasificación CORINE (zona 5)	Creación propia a partir de datos RGB y LIDAR de MARN	8.4.4.5
T36	Tabla de ajuste para la zona 5	Creación propia	8.4.4.5
F48	Objetos de zona 5	Creación propia	8.4.4.5
T37	Control de calidad temático.	Creación propia	8.4.5
F49	Bosque dulce y techos de paja.	Creación propia a partir de datos RGB de MARN	8.4.5
F50	Ajuste de Mango	Creación propia a partir de datos RGB de MARN	8.4.5
F51	Bosque de Galería y	Creación propia a partir de datos RGB de	8.4.5

	Almendo de río.	MARN	
F52	Suelo desnudo de polvo y ciprés.	Creación propia a partir de datos RGB de MARN	8.4.5
F52	Cartografía de Lauer y CORINE en LIDAR	(Lauer, 1956) y creación propia	8.4.5
A1	Unidades Radiométricas	(Träger, 2007)	ANEXO
A2 ab	LAS(codificación y propiedades)	(The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, 2009)	ANEXO
A3	Tiempo Pulsos	(Träger, 2007)	ANEXO
A4	Parámetros dispersión LASER	(Träger, 2007)	ANEXO
A5	Especificaciones de cámara hiperespectral	("Phase One & Mamiya/Leaf Digital Solutions," 2014)	ANEXO
A6	Modelo de Integración en la clasificación de MARN para la cartografía vectorial de "Uso de Suelos"	(MARN, 2002)	ANEXO
A7	Detalle de las especies de madera presentes en el bosque húmedo y en el bosque seco.	(Lauer, 1956)	ANEXO
A8	Ficha de trabajo de campo en El Salvador. Febrero-Marzo 2015	Creación propia	ANEXO
A9	Tipos de reflexión de onda	(Baltasvias, 2014)	ANEXO
A10	Esquema y ecuación de calibración	(Kaasalainen, 2011)	ANEXO

Capítulo 1

INTRODUCCION

La cobertura de la superficie de la tierra es diversa y es posible representarla a través de una cartografía conformada por una serie de polígonos que delimitan áreas con diferente clasificación. A manera de ejemplo una posible cobertura es representada por un polígono con la clasificación de zona urbana o asentamiento (ciudades, pueblos, caseríos y cantones); mientras otro podría representar y tener el atributo de agua (esteros, lagos, pantanos, aguas estancadas y ríos). Estas clasificaciones y agrupamientos de entidades en clases responden a diferentes convenciones, visiones y objetivos de estudio; en el presente trabajo la convención que se tomara en cuenta es la adaptación para Centroamérica de la metodología *CORINE Land Cover*¹.

El ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN) decide en 2014, obtener una colección de datos actualizada de la superficie del planeta y adicionalmente de su cobertura, así como datos adicionales de interés que se pueden obtener con la tecnología de captura utilizada, en este caso la LIDAR². Todo ello para contar con más insumos de análisis para apoyar los programas de interés nacional tales como: programa de energía, gestión de riesgos y al centro nacional de registros a través de la cobertura de suelos para una posterior clasificación *CORINE Land Cover* a nivel nacional³. Para esta colección de datos, el trabajo lógico y paralelo es establecer las metodologías que acompañaran el procesamiento y la extracción de los datos para los diferentes objetivos, es ante esa misiva donde este trabajo subyace.

¹ CORINE es el acrónimo de “*Coordination of Information on the Environment*”. Convención en Europa para la cobertura de los suelos en superficie del planeta, en el presente trabajo se destina el capítulo 1 para aclarar esta metodología y a su vez la adaptación que existe para Centro América se revisa en el capítulo 4. Land cover es Cobertura del suelo y se utilizara como sinónimo a lo largo de este trabajo.

² LIDAR (Light detection and Ranging) Detección de luz y medición indirecta. En el capítulo 2 y 3 de este trabajo se aborda con detalle la aplicación y el funcionamiento de esta tecnología. El “Ranging” es una medición indirecta derivada de otro parámetro distinto a la distancia, en el caso LIDAR, conocida la velocidad de expansión de onda, el parámetro para evaluar la distancia, es el tiempo.

³ Entrevista con Giovanni Molina gerente de Sistemas de Información Espacial en MARN.

1.1 Antecedentes

El primer experimento LIDAR fue realizado con un LASER(Light amplification by Stimulated Emission of Radiation) de ruby en los años 60 y a finales de esa década se intento interactuar y medir la presencia de sodio en la atmosfera; a finales de los 70 se determinó que el camino viable más probable para poder realizar esa detección, era la utilización de LASERs de Nd:YAG y CO₂, (Byer, Robert L. et al., 1984); a la luz de los resultados,el segundo camino fue el más acertado.

Antes de realizar una clasificación es necesario contar con los datos que se van a clasificar y estos datos tienen naturalmente, características o parámetros a través de los cuales es posible establecer normativas que destinan a los mismos en una clase A o en una clase B. Estos *geodatos*⁴ pueden ser registrados o levantados con diferentes métodos y técnicas; una fuente primaria de datos es la verificación humana de datos en campo apoyada por instrumentos de medición, tal es el caso del *GPS*⁵. Como fuente adicional se han utilizado fotografías aéreas con la posterior interpretación visual humana, formas semiautomáticas de clasificación de las coberturas de suelos mediante imágenes de satélite y las propiedades de sus *bandas*⁶, en donde existen formas automáticas de clasificación a partir de algoritmos que interpretan los datos capturados con una técnica específica.

En este último caso se encuentran los geodatos que se utilizaran como insumo de clasificación para una clasificación de coberturas de suelos CORINE Land Cover. Estos geodatos provienen de una fuente de captura LIDAR en una plataforma de vehículo aéreo con una clasificación predefinida por un algoritmo o automática, posteriormente estos geodatos son sometidos a un control de calidad supervisado por humanos, para evaluar errores, incertezas y algunas excepciones, este último proceso de revisión y control no descarta el carácter automático del proceso.

⁴ Se introduce el término *geodato* haciendo énfasis en la presencia de coordenadas geográficas para cada registro de atributos

⁵GPS (Global position Systems) Los sistemas de Posicionamiento global son aparatos electrónicos capaces de interceptar señales satelitales. A partir de estas señales (generalmente provienen de tres satélites diferentes) y a través de procedimientos matemáticos, se realiza una triangulación con la cual es posible determinar las coordenadas de ubicación del aparato.

⁶ La Banda de una imagen de Satélite es una fotografía en un rango determinado de valores de longitud de onda. Esta imagen que se visualiza y se encuentra en el espectro de un tono es conocida como Imagen Pancromática.

1.2 Objetivo

El objetivo de este trabajo es establecer un método semi-automáticos mediante las características (parámetros) de los geodatos LIDAR y establecer paralelos específicos entre la cobertura asignada automáticamente y el rango de posibles coberturas en las zonas que contienen a los datos de prueba para apoyar el proceso de actualización de cobertura de uso de suelos en la clasificación CORINE Land Cover adaptada a Centroamérica. Los geodatos LIDAR están dados en puntos, deviniendo la imagen de intensidad y sus Rasters derivados DEM⁷ y DSM⁸; por lo tanto no pueden definir por si mismos áreas o polígonos; en primera instancia los datos servirán para validar la cartografía de usos de suelo⁹ y detectar las zonas en donde existen modificaciones a partir de procedimientos de consulta espacial¹⁰, en un segundo plano y ajeno a este trabajo es posible plantearse la definición de procedimientos de interpolación, revisión de topologías¹¹ y otros geoprocursos como la generalización¹² que permitan definir polígonos cerrados y en una superficie continua para la obtención de un mapa vectorial de coberturas del suelo (MARN, 2013).

1.3 Ubicación de los Datos Muestra

Como zonas muestra en este estudio se han tomado tres nubes de puntos representativas para las zonas que Wilhelm Lauer(1956) define como: La Tierra Fría (1800-2800 msnm), La Tierra templada (800-1800 msnm) y Tierra Caliente (0-800 msnm) (Lauer, 1956). En cada una de las zonas existe un dominio de coberturas, dicho dominio será útil para poder precisar en donde desemboca el delta de características y los paralelos que tiene el pre-asignamiento de cada uno de los puntos en la nube de puntos de cada zona.

1.4 Metodología

La metodología para definir estos procesos incluirá el análisis exhaustivo de las características de los geodatos LIDAR y la reclasificación oportuna respetando la naturaleza de los datos; es decir utilizando la clasificación inicial como base de detalle. A partir de la delimitación de características se determinara a través de cuales características o parámetros es posible resolver en un algoritmo que defina la pertenencia de clase en la Nomenclatura CORINE Land Cover y poder determinar cómo realizar el asignamiento de

⁷ DEM es un modelo de elevación digital, del inglés "Data Elevation Model"

⁸ DSM es un modelo digital de superficie, del inglés "Data Surface Model"

⁹ La diferencia entre Usos de Suelo (Land Use) y Coberturas del suelo (Land Cover) se atenderá en el capítulo 2. Como premisa la cartografía de usos de suelo existente en El Salvador atiende en realidad al tema de Coberturas de suelo. Land Use es uso del suelo y se utilizara también como sinónimo a lo largo de este trabajo.

¹⁰ Las consultas espaciales tienen la estructura SQL(Statements). Adicionalmente se puede disponer de algunos comandos que hacen accesibles las situaciones que denotan los predicadores espaciales.

¹¹ Conjunto de reglas que establece la relación de las geometrías en el espacio

¹² Procedimiento cartográfico automático para suavizar la cantidad de vértices en un polígono

clase o la extracción de los geodatos en operaciones de álgebra de mapas, filtro focal, clasificación y reclasificación; así como de selecciones (SQL Statemments) y selecciones espaciales para la validación con las ubicaciones obtenidas y verificadas in situ. Finalmente se extraerán las clases CORINE de la imagen clasificada y se confrontarán a los datos de verificación en un control de calidad temático basado en la norma de calidad ISO 19115 establecida por el consorcio TC211¹³. Los geodatos de comparación son obtenidos y verificados en campo. Otros geodatos solicitados oportunamente a MARN pueden servir de apoyo. La verificación se realiza a través de una colección de puntos muestra clasificados en la nomenclatura CORINE obtenidos en campo y de estos se parte para calcular un coeficiente de calidad temática versus la clasificación obtenida en el geoprocesamiento.

Como fortaleza técnica y formando parte de un trabajo futuro de post-procesamiento, una vez se cuente con información vectorizada, es posible almacenar y organizar las características, la clasificación y un componente histórico que registre las diferentes coberturas que han existido en la zonas de muestra en los tres periodos relevantes: indígena, colonial y post colonial(Lauer, 1956). Todo ello en una *geodatabase* que incluye los geodatos que provienen de los geodatos LIDAR; el cual se ha definido como *workspace* y funciona como universo de consulta para la asignación preliminar de la clasificación CORINE Land Cover, extrayendo una imagen *Raster* producto, como resultado del geoprocesamiento y prediciendo las clases respectivas en una substracción(Stephens, 2014).

Para lograr esto último se definen procesos de asignación específicos y se concluye si en el caso ideal es posible automatizarlos, mediante la modelación utilizando *softwares* que permiten clasificación supervisada ¹⁴o en un código de programación en un lenguaje específico. El alcance de este trabajo pretende organizar y simplificar estos procesos, para solidificar una base para la creación de herramientas que faciliten la extracción de información. Automatizar estos procesos es un objetivo futuro de este trabajo y deberá consolidar e incluir por su naturaleza generadora de geoinformación; la definición de los métodos de interpolación apropiados para definir las áreas que corresponden a una cobertura específica en la Nomenclatura CORINE Land Cover y de esta manera generar insumos base para producir en un trabajo futuro las cartografías de coberturas de suelo actualizadas a partir de datos LIDAR.

¹³ Consorcio técnico que vela por la calidad de la información geográfica, habiendo definido la norma ISO 19115

¹⁴ Arreglos computacionales y estadísticos que permiten crear modelos de predicción a partir de la predicción en función de la combinación de variables. Stephens(2014), presenta algunos métodos.

Capítulo 2

Land Cover y CORINE Land Cover

2.1 Land (Suelo)

El suelo de acuerdo a la FAO¹⁵ en un concepto propuesto en 1994, es una área delimitable sobre o bajo la superficie de la tierra que contiene atributos de la biosfera, incluyendo aquellos que dependen de condiciones climáticas y que se presentan variables tales como los cuerpos de agua y las formas de vida que se manifiestan en esta área delimitada; así como la actividad humana ((IDWG-LUP) in (European Communities, 2001, pág. 11)).

2.2 Objetos del Suelo

De acuerdo al “Manual de conceptos para el uso y la cobertura del suelo”(European Communities, 2001) se define un objeto como aquel en donde de manera evidente es posible asignar una asignación de categoría.

Sin embargo puede existen 3 casos de objetos mixtos a definir antes de asignar una clasificación.

2.2.1 Casos de Objetos Mixtos

Los *Objetos Yuxtapuestos(a)* son aquellos que están Yuxtapuestos y para poder definir una clase se requiere necesariamente de hacer un estimado estadístico evaluando la mayor presencia en un área, pese a que algunas nomenclaturas intentan resolver el problema creando clases mixtas. Los *Objetos Superpuestos (b)* son aquellos que en la tercera dimensión crean una cobertura que discrimina a otras que se encuentran por debajo de esta. Cuando se cuentan con datos se establecen jerarquías para establecer una cobertura dominante. En el caso de este trabajo por la naturaleza de los geodatos de prueba (LIDAR) es posible contar con información tridimensional en las diferentes capas de coberturas en zonas con intersticios, por ejemplo arboledas y a partir de esta información es posible encontrar una clasificación sin hacer uso de una clase dominante. Por último los *Objetos Temporales Mixtos(c)* son aquellos que presentan una variabilidad que depende del periodo de observación; tal es el caso de los cultivos y muchas veces se asigna la clase en base al valor comercial, si esta no aplica se utilizan las clases que tienen más presencia en el año.

¹⁵ FAO(Food and Agriculture Organization of The United Nations), en español “Organización mundial de Alimentos”



(a)



(b)



(c)

F0. Objetos Mixtos(a) Un gigante conacaste blanco se entrelaza con un ciprés en un cultivo de café en el parque ecológico el Espino, a primera instancia debe depurarse la mayor presencia en esta cobertura. (b) Se requiere depurar entre un bosque de galería y un asentamiento a la orilla del estero de Jaltepeque (c) Un cultivo de maíz en la Libertad en verano en forma de materia orgánica seca propicia un terreno de matorral desértico.

2.3 Land Cover

Land Cover es un término que describe lo que existe en la superficie de la tierra; tanto lo natural, como lo que ha sido elaborado por el ser humano, incluida esta la topografía, el manto vegetal y agua superficial y mantos (Giri, 2012). Entre las diferentes coberturas posibles se encuentran las edificaciones humanas, las tierras agrícolas y recursos forestales

2.4 Land Cover y Land Use

El uso de suelos (Land Use) está relacionado al fin con el cual se mantiene la tierra en un estado o es manipulada para cumplir ese fin (Giri, 2012); por lo tanto su estudio requiere el análisis de estados del suelo en el tiempo, basado en la aplicación de técnicas de monitoreo, detección de cambio y una reglamentación bien definida.

Para entrelazar los términos de uso de suelos (Land Cover) y cobertura de suelos (Land Use), es necesario establecer que el primero es un estado del suelo; mientras el segundo tiene relación con el uso que se le da a ese estado. De acuerdo a ((Stott, A. & Haines Young, R. 1996; Alun, J. & Clark, J. 1997; Baulies, X.I. & Szejwach, G. 1997) en (European Communities, 2001)) este estado puede cambiar y presentar dos propiedades: Conversión (siendo una transfiguración de estado no permanente) y Modificación (siendo un cambio de estado). Una manera para diferenciar las dos clasificaciones es que la cobertura responde a la pregunta: ¿qué hay en un suelo S? Mientras el uso responde a la pregunta: ¿Cómo se maneja dicho suelo S?

	t1	t2	t3	t4
LAND COVER	TREES (Chestnut trees)	TREES (Chestnut trees)	TREES (Chestnut trees)	TREES (Chestnut trees)
LAND USE	Forestry use (Timber)	Agricultural use (Chestnut production)	Agricultural use (Grazing area)	Forestry use

T1. Los suelos t1-t4 en una clasificación comparativa de cobertura y uso.

Este trabajo se enfoca en una caracterización de datos para poder predecir el estado actual (Land Cover) a partir de las características de geodatos LIDAR en las zonas de prueba que han sido delimitadas en El Salvador. Para entender y tener orientación en la predicción de estados o en la identificación de un conjunto de características que no responden a patrones registrados y que pueden estar presentes en los geodatos de prueba, es posible recurrir a una serie de propiedades que describen los procesos de cambio de estado del suelo.

Estos procesos tomados de (European Communities, 2001) son los siguientes:

- a) *Intensificación*: Representa la transición de un estado de baja intensidad a alta intensidad, ya sea en el uso o en la cobertura. Por ejemplo suelo semi-natural a suelo arable.
- b) *Extensificación*: Representa la transición de un estado de alta intensidad a baja intensidad, ya sea en el uso o en la cobertura. Por ejemplo suelo grama a suelo semi-natural.
- c) *Aforestación*: Representa a la regeneración natural o por plantaje de árboles.
- d) *Deforestación*: Representa el agotamiento de presencia arbórea.
- e) *Desarrollo*: el proceso de transformar el suelo abierto en urbano, industrial o de transporte.
- f) *Reclamación*: el proceso de regenerar el suelo abierto en zonas con antecedentes urbano, industrial o de transporte.

Estas propiedades representan la transición de un estado a otro, categorizar si el uso cambia o no, depende del caso pero no es una condición necesaria. Así, un suelo de gramajes que ha cambiado de estado de cobertura a suelo semi-natural puede tener un mismo uso: recreación. Mientras un proceso de intensificación cambia de uso desde la recreación al uso de cultivo permanente; tal es el caso de un suelo de grama a suelo arable. La mención de estos procesos en este trabajo y la condición de estado (Conversión o Modificación) deben contribuir a la identificación de estados de cobertura de suelos (Land Cover) y estas características del suelo en la zona de muestra, serán retomadas al momento de analizar los geodatos LIDAR en el capítulo 5 de este trabajo.

Con el entendimiento de los procesos involucrados en los estados del suelo, la información del histórica/actual necesaria y el acceso a los geodatos LIDAR; es posible realizar una predicción acertada acerca del estado actual de un suelo S y de los suelos colindantes o vecinos de S que será abordada en el **capítulo 7**. Seguido de una verificación presencial como parte de los procedimientos de un control de calidad que será abordado en el **capítulo 8**.

2.5 Corine Land Cover

El programa CORINE¹⁶ Land Cover (CLC) de la Unión europea contiene los lineamientos de trabajo y convenciones para armonizar las clasificaciones de Coberturas y Usos de suelo que provienen de métodos de levantamiento uniformes; entre las especificaciones pueden mencionarse las siguientes: una resolución de 250m, los cuerpos de agua lineales son representados con líneas de 100m, las superficies reconocibles de 25 Ha. y la delimitación proviene de las imágenes de satélite georeferenciadas de Landsat ¹⁷4-5. El proyecto es liderado por la agencia europea ambiental (EEA) y

¹⁶ Es posible encontrar los datos del programa en <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data>

¹⁷ Landsat es el programa de captura satelital de la NASA(National Aeronautics and Space Administration) <http://landsat.gsfc.nasa.gov>

la ortorectificación es controlada con imágenes provenientes de Landsat 7 (Keil and Strunz, 2002). El producto final es una cartografía en escala 1:100000 con 44 tipos de coberturas. (Meinel & Hennersdorf in (Keil and Strunz, 2002))



F1. Delimitación de países participantes de Corine Land Cover en Europa.

2.6 Clasificación

Para Corine Land Cover se ha adoptado como *Clasificación* la estructura de información que organiza los objetos U en sub-clases de U, las subclases comparten características especiales y el estatus de miembro de la clase U debe ser identificable ((Sutcliffe, 1993) in (European Communities, 2001)). En una clasificación de esta naturaleza jerárquica, el objetivo es que cada entidad en un nivel determinado este representada en la clase de una entidad que se ha ramificado a partir de ciertas características en común.

Para poder identificarse los objetos miembros de la subclase de U, deberán tener una nomenclatura, la cual tiene un identificador a su clase y el objetivo de este ordenamiento es la recreación de una participación del universo que pueda representar en una nomenclatura a cada entidad u objeto existente. (((Duprat 1972) in (European Communities, 2001)). Esta determinación se regula con una coherente aplicación de clases para que no sea posible que la agregación de lugar a una falsa identificación de clase; es por ello que las sub categorías deben encontrarse en una clase que las represente ((Wyatt 1997) in (European Communities, 2001)).

Objects	Legend	Nomenclature

F2. Relación de Leyenda y Nomenclatura para diferentes Objetos. (European Communities, 2001). La Leyenda puede representar más de un tipo si se existe un objeto que presente más de una sub clase U y el identificador debe hacer la relación de clase para cada Nomenclatura presente en el objeto.

2.7 Nomenclatura CORINE Land Cover

Detectar los cambios de cobertura es un objetivo muy importante para poder definir criterios del uso y las consecuencias del mismo (Loveland and Belward, 1997 in ((Giri, 2012))); tal es el caso de la de la identificación de zonas desertificadas como la fijación de bases para el análisis de las emisiones en determinada región. Para poder darle seguimiento a una región es necesario clasificarla, codificarla y establecer las características que ha tenido en periodos específicos.

Las categorías definidas en la metodología Corine Land Cover para Europa son 44. A manera de ejemplo en Alemania han sido utilizadas 36.(Keil and Strunz, 2002). Se ha realizado una adaptación para Centroamérica y posteriormente se han delimitado los usos para el caso puntual: El Salvador que será revisada en el **capítulo 5**.

Level 1	Level 2	Level 3
1. Artificial surfaces	1.1. Urban fabric 1.2. Industrial, commercial and transport units 1.3. Mines, dumps and construction sites 1.4. Artificial non-agricultural vegetated areas	1.1.1. Continuous urban fabric 1.1.2. Discontinuous urban fabric 1.2.1. Industrial or commercial units 1.2.2. Road and rail networks and associated land 1.2.3. Sea ports 1.2.4. Airport 1.3.1. Mineral extraction site 1.3.2. Dump 1.3.3. Construction site 1.4.1. Green urban areas 1.4.2. Sport and leisure facilities
2. Agricultural areas	2.1. Arable land 2.2. Permanent crops 2.3. Pastures 2.4. Heterogeneous agricultural areas	2.1.1. Non irrigated arable land 2.1.2. Permanently irrigated land 2.1.3. Rice fields 2.2.1. Vineyards 2.2.2. Fruit trees and berries plantations 2.2.3. Olives groves 2.3.1. Pastures 2.4.1. Annual crops associated with permanent crops 2.4.2. Complex cultivation patterns 2.4.3. Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation 2.4.4. Agro-forestries areas
3. Forest and semi natural areas	3.1. Forests 3.2. Scrub and/or herbaceous vegetation associations 3.3. Open spaces with little or no vegetation	3.1.1. Broad leaved-forest 3.1.2. Coniferous forest 3.1.3. Mixed forest 3.2.1. Natural grassland 3.2.2. Moors and heathlands 3.2.3. Sclerophyllous vegetation 3.2.4. Transitional woodland-scrub 3.3.1. Beaches, dunes, sand 3.3.2. Bare rocks 3.3.3. Sparsely vegetated areas 3.3.4. Burnt areas 3.3.5. Glacier and permanent snow-fields
4. Wetlands	4.1. Inland wetlands 4.2. Coastal wetlands	4.1.1. Inland marshes 4.1.2. Peat bogs 4.2.1. Salt marshes 4.2.2. Salines 4.2.3. Intertidal flats
5. Water bodies	5.1. Continental waters 5.2. Marine waters	5.1.1. Stream courses 5.1.2. Water bodies 5.2.1. Coastal lagoons 5.2.2. Estuaries 5.2.3. Sea and ocean

T2. Nomenclatura CORINE Land Cover tomado de (vanda perdigao,Alexandero Annoni, 1997). Los criterios de aplicación se pueden encontrar en http://www.igeo.pt/gdr/pdf/CLC2006_nomenclature_addendum.pdf.

Capítulo 3

LIDAR

3.1 Remote Sensing (Teledetección)

Es la técnica que se encarga de adquirir información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos por dispositivos que no están en contacto con los objetos. Para ejemplificar de manera clara se tiene el caso del ojo humano que adquiere impulsos de la luz y el tímpano que censa las ondas sonoras(Lillesand and Kiefer, 2008).

Son diversas técnicas las que se pueden incluir el *Remote Sensing*, tales como la fotogrametría por ejemplo que ocupaba medios ópticos para la extracción de información o el tratamiento digital de imágenes de satélite, este trabajo se centra en la tecnología LIDAR y específicamente en la capturada a partir de los sistemas ALS(*Airborne Laser Scanning*); en donde los geodatos son obtenidos desde un equipo de emisión y recepción instalado en un vehículo aéreo, para el caso de este trabajo se sobrevoló ESA en un avión, en este capítulo se detalla en la **sección 3.6** las plataformas de operación de los sistemas LIDAR, luego de detallar en la **sección 3.5** el desarrollo de las aplicaciones de los sistemas como tal.

3.2-LIDAR

En el caso del acrónimo LIDAR que deviene en “Light Detection and Ranging” (detección de luz y medición remota), es una técnica activa de Teledetección; es decir que se realiza a través de un emisor de pulsos LASER con características específicas y un sensor capaz de registrar las propiedades de la luz, una vez que los pulsos se han reflejado, midiendo el tiempo de retorno. Un ejemplo de aplicación usual es la pistola de medición de velocidades que usan los policías de tránsito.(Lillesand and Kiefer, 2008).

Esta técnica es similar a un RADAR¹⁸, pero en este caso el transmisor de microondas es reemplazado por pulsos de luz LASER y mediante la misma, es posible detectar objetivos; mediante la interpretación de los parámetros recibidos en la retrodispersión de la luz a través de un telescopio óptico, además de la obtención del tiempo de captura a partir del eco en una partición de tiempo infinitesimal a la emisión. Mediante técnicas más avanzadas de interferometría, es posible conocer más información del retorno y de la estructura del electrón y del estado de la onda de acuerdo al orbital desde donde este fue emitido.(Träger, 2007).

¹⁸ RADAR(Radio Detection And Ranging) es el predecesor del LIDAR emitiendo y capturando ondas de radio.

3.3-Desarrollo de LIDAR

El uso de sensores activos se inicio a principios de los 70 a través de imágenes de RADAR y scatterometers¹⁹ (difusores de ondas) con los cuales se pudo identificar ruinas debajo de la arena en el Sahara. El éxito más grande de estos sistemas fue determinar con gran exactitud los cuerpos de agua. (Liu and Jones, 1984). Sin embargo en los años 30 fueron realizados los primeros intentos en la medición de la densidad del aire en perfiles determinados por la intensidad de difusión; a partir de reflectores y esta intensidad era visualizada por telescopios. Más tarde en 1938 se utilizaron por primera vez pulsos de luz generados por chispas electrostáticas y lámparas flash; con el cálculo del tiempo de la emisión de la luz y la detección de la señal se identificó la altura de las nubes. El desarrollo posterior llegó con el invento del LASER²⁰ en los años 60.(Sassen, 2005).

La NASA en los años 70 determinó que las observaciones LIDAR de la atmosfera y superficies ofrecían un potencial de aplicación y desarrollo científico grande. El desarrollo de esta tecnología se inició lógicamente en el laboratorio, la segunda fase se desarrollo en un ambiente de laboratorio Aerotransportado (Airborne), por ejemplo el Galileo II (NASA CV-990), la tercera utiliza vuelos autónomos y luego a partir de los 90 estaba planeada la era aeronáutica (Spaceborne) LIDAR.(Liu and Jones, 1984)

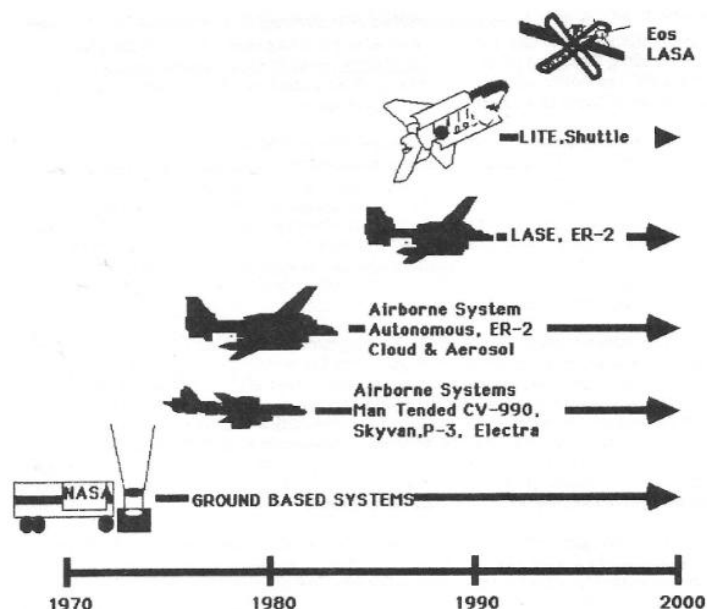


Figure 1. Chronology of NASA's program for the development of spaceborne lidar systems.

¹⁹ Scatter es la difusión y los Scatterometers son los aparatos que emiten las ondas de RADAR.

²⁰ LASER (light amplification by stimulated emission of radiation). La amplificación de luz por radiación estimulada será revisada en el capítulo 4.

De acuerdo a Lillestad (2008) estos sistemas inician a finales de los 70 y proporcionaban únicamente datos de elevación y eran aerotransportados sin llegar a constituir un sistema ALS (Airborne Laserscanning System)²¹ pero sin contar con un GPS o un sistema IMU (Inertial Measurement Unit) que proporcionase una referencia inercial.

El primer sistema LIDAR en una plataforma, fue empleado en un experimento de retrodispersión (backscattering) en una nube incoherente ²²en forma de aerosol en 1979; mientras las aplicaciones para el diferencial de absorción LIDAR, para medir el vapor de agua estaban previstas para el año de 1987 y la incorporación de este desarrollo en el Earth Observing System²³(EOS) estaba planeado para mediados de los 90(Liu and Jones, 1984).

Actualmente (2015) es posible interactuar a través de la dispersión, con la superficie de la tierra a 100 km de altura y con las variables de estado básicas atmosféricas, tales como temperatura, presión, humedad y viento; así como tomar mediciones de presencia de gases, aerosol y nubes. Es usado para distinguir gotas de agua de cristales de hielo, contribuye a tener más conocimiento de las condiciones climáticas, transporte intercontinental de contaminación, arena del desierto; entre otras aplicaciones, es posible identificar los constituyentes de la atmósfera desde el espacio. Los sistemas LIDAR han estado relacionados con el desarrollo LASER y sus parámetros, que a menudo no se proporcionan por en los productos comerciales(longitudes de onda, espesor del pulso, forma del rayo, coherencia espectral); así como en el desarrollo de herramientas de para el procesamiento de grandes cantidades de datos(Wandinger, 2005) y en los métodos de análisis de las características de los mismos para diversas finalidades, siendo la identificación de coberturas de suelo el objetivo de este trabajo.

3.4-Sistemas de LIDAR

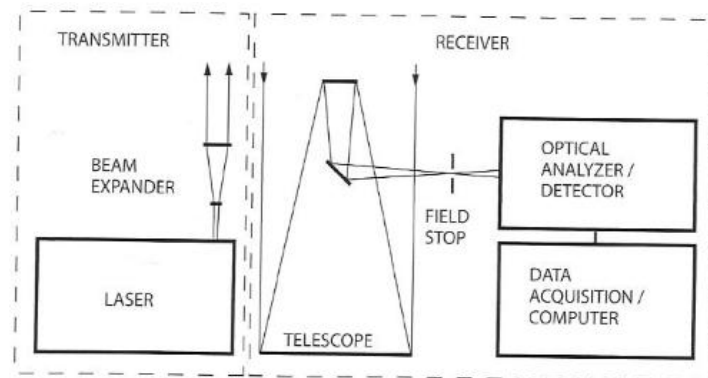
De acuerdo a Wandinger(2005) en principio un sistema LIDAR está constituido por un transmisor y un receptor. El transmisor emite pulsos de luz con espaciamiento o frecuencia de alrededor 100 nanosegundos y el ajuste de las propiedades específicas del *Laser*. El receptor o telescopio captura la retrodispersión y las técnicas de ajuste del rayo son diversas dependiendo de la aplicación.

²¹ ALS se detalla más adelante en este capítulo

²² En el capítulo 4 se abordan los conceptos de rayo de luz coherente e incoherente

²³ Sistema de Observación de la Tierra

Un sistema LIDAR está constituido por un transmisor de LASER, un receptor telescópico, un detector de señales y una computadora de almacenamiento-procesamiento para la evaluación de los datos; los sistemas pueden ser fijos o estar instalados en un vehículo terrestre(camión), en una plataforma aérea o en un satélite y el rango de resolución se ajusta a las necesidades del sistema.(Träger, 2007)



F4. Esquema de componentes involucrados en una captura de datos LIDAR.

La intensidad de las señales de retorno se calcula con el tiempo transmisión-captura y es almacenado en un computador. Las ondas de aplicación LIDAR varían entre 250 nm hasta 11 μm , producidas en la actualidad por LASERs de Nd:YAG²⁴ que emite radiación infraroja en una longitud de onda de 1064 μm , con la posibilidad de variar la frecuencia de manera proporcional, así como bombear fuentes secundarias. La gran mayoría de sistemas LIDAR utiliza telescopios de espejo, los lentes son utilizados para pequeños receptores. (Wandinger, 2005).

Es posible señalar que los sistemas LIDAR que capturan las ondas de retrodispersión de luz pueden asemejarse en la recepción a un RADAR²⁵, los llamados sistemas de Radar Laser o detección y medición remota, LADAR²⁶. (Building and Fire Research Laboratory and Manufacturing Engineering Laboratory, 2004) mientras los que capturan el espectro de la luz reflejada se asemejan a los sensores de una cámara digital. Los tipos de LIDAR serán detallados más adelante en este capítulo y los principios de funcionamiento y descripción de componentes de un LASER serán descritos en el **capítulo 4**.

Cabe destacar que en un sistema LIDAR, el pulso es sometido a un expansor, el cual permite que el área de contacto del rayo sea mayor, mientras el telescopio que recibe la retrodispersión es proveído usualmente de un direccionador del rayo que es detectado por un foto-multiplicador de bandas cercanas. La detección es filtrada y el efecto de la luz solar es bloqueado por medio de filtros que proveen en al mayor medida el rango de ondas de interés.(Träger, 2007)

²⁴ El cristal Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet; Nd:Y3Al5O12) pertenece al grupo de LASERs generados por material en estado sólido, es conocido como *Alexandrite*.

²⁶ LADAR(Laser Detection and Ranging).

3.5-Tipos de técnicas LIDAR

3.5.1-Elastic backscatter LIDAR

El primer experimento LIDAR, fue realizado para la detección de aerosol en el desierto del Sahara en un experimento *downlooking* con un LASER de Nd:YAG que operaba emitiendo 1 pulso cada 3.5 segundos; dando como resultado alrededor de 5000 perfiles; mientras el primer *uplooking* fue a bordo del vehículo aéreo NASA P-3 con el dispositivo SAM II para obtener datos de los impactos estratosféricos de erupciones volcánicas Mt. St. Helens, El Chichón y Pinatubo, además de hacer mediciones de puestas del sol y estudios del *Polar Vortex* (ciclón polar). (Theopold et al., 2005)

La forma clásica del LIDAR, consiste en aplicar un LASER con una única longitud de onda y luego realizar la medición a través de un receptor de la radiación o señales de retrodispersión, cabe destacar que estas señales mantienen constante la longitud de onda. Como ejemplo este tipo de LIDAR proporciona información de localización y presencia de Aerosol. El *Rayleigh Scattering* está definido como la reflexión elástica en partículas más pequeñas que la longitud de onda en cuestión, la intensidad de este se encuentra en orden la longitud de onda λ^{-4} y la señales de retrodispersión son de onda corta. Cuanto depende la longitud de onda de la intensidad en la dispersión, es una función del radio de la partícula; siendo esto último aplicable para las diversas posibilidades del tamaño de partícula en comparación con la longitud de onda, los diferentes tamaños de partículas tienen que ver con la forma en la cual se da la retrodispersión hasta hacer posible el efecto de *Multiple Scattering*.²⁷(Wandinger, 2005).

3.5.2-Diferencial de absorción LIDAR (DIAL)

En 1980 se realizaron las primeras mediciones de Ozono en un *downlooking* ubicado en un vehículo espacial como parte EPA (Environment Protection Agency's). El sistema desarrollado era capaz de desarrollar mediciones en *uplooking* y *downlooking* con dos LASERs bombeados secuencialmente en doble frecuencia en UV (Ultravioleta). El Objetivo es que un Laser es absorbido en 288.2nm en la troposfera y a 301nm en la estratosfera. Las longitudes de onda residuales de 590 a 620nm y de 1064nm son utilizadas para mediciones de aerosol y nubes.(Theopold et al., 2005)

Este tipo de LIDAR sirve para descomponer los gases de la atmosfera; obteniendo a partir de la emisión de 2 longitudes de onda en un determinada banda de absorción de gases. Una es absorbida más fuertemente que la otra y a partir de este fenómeno es posible determinar un diferencial para una partícula determinada. Entre los gases se encuentran O₃,NO₂,NO,N₂O,SO₂,CH₄,HCl,NH₄ y vapor de agua principalmente.(Wandinger, 2005)

²⁷ *Multiple Scattering* o dispersión múltiple es abordado en el capítulo

Table 13.1. Parameters of the NASA Langley airborne UV DIAL system (Courtesy of E.V. Browell, NASA LaRC)

Lasers:	Continuum Model ND 6000 flashlamp-pumped Nd:YAG, Model 9030 dye lasers		
Pulse repetition frequency/Hz	30		
Pulse length/ns	8–12		
Pulse energy/mJ at: 1.06 μ m	250–350		
600 nm	50–70		
290/300 nm	30		
Wavelength separation for ozone/nm	10		
Dimensions ($l \times w \times h$ in m)	$5.699 \times 1.016 \times 1.092$		
Weight/kilograms	1739		
Power requirements/kW	30		
Receiver:	Wavelength Regions		
	289–300 nm	572–600 nm	1064 nm
Area of receiver/m ²	0.086	0.086	0.086
Receiver efficiency to detector/%	31	40	31
Detector quantum efficiency/%	26 (PMT)	8 (PMT)	40 (APD)
Total receiver photon efficiency/%	6.5	3.2	12.4
Receiver field of view (selectable)/mrad	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5

T3. Especificaciones de un sistema de detección DIAL

Basados en el principio de la técnica DIAL, es posible equipar al sensor con dos pares de filtros y que activen la resonancia en los wings. Esta modificación es conocida como la técnica *Broad Emission Lidar with Narrowband Determination of Absorption*(BELINDA)²⁸ considera una difusión elástica y es capaz de mostrar la otra cara de DIAL, utilizando sustancias fotoquímicas activas para simular el fotociclo y poder predecir presencia de gases e incendios; ya que aumenta la sensibilidad de longitudes de ondas que en otros casos se ven interferidas por las reflexiones predominantes.(Theopold et al., 2005).

Con la diferenciación de energías, es posible identificar con BELINDA la dinámica de flujos de energía de un proceso de interacción de un LASER desde su transmisión hasta su recepción, a partir del análisis de la luz censada una vez interactuó con la materia en estudio.

Table 14.1. Comparison of main characteristics of the BELINDA with those of a usual DIAL setup

Property	BELINDA	DIAL
Aerosol correction	Not mandatory	Required
Data evaluation where $O(z) \leq 1$ [†]	No restriction	Difficult
Sensitivity to ASE*	Low	High
On/off pulse delay Δt	Not applicable	$200 \mu s \leq \Delta t \leq 1 \text{ ms}$
Number of laser(s)	1	2, or 1 with switching
Number of optical axes	2 (laser + telescope)	3 (2 lasers + telescope)
Usable laser power	7%	100%
Laser spectral requirements[‡]		
Bandwidth (HWHM)	0.200/0.100 cm^{-1}	0.013/0.005 cm^{-1}
Line center accuracy	0.020/0.010 cm^{-1}	0.005/0.002 cm^{-1}

[†] $O(z)$: overlap integral, *ASE: amplified spontaneous emission, [‡]for 1% systematic error on water vapor/temperature

T4. Tabla Comparativa de los Sistemas BELINDA vrs. DIAL.

²⁸ BELINDA emisión LIDAR con banda cercana de absorción

3.5.3-Raman LIDAR

El sistema Raman LaRC 532 y 1064nm fue desarrollado por la NASA GSFC con el objetivo de hacer mediciones de Metano(CH₄) en la estratosfera baja; el sistema además demostró su capacidad para hacer mediciones de vapor de agua en un radio de 70km medido desde un vehículo aéreo a una altura de 40km. El potencial del *Goddard Space Flight Center* (GSFC) DIAL para medir Ozono (O₃) se debe a un LASER constituido por clorídeo de Xenón (XeCl) y este sistema compuesto es llamado *Airborne Raman Ozone*. (Theopold et al., 2005)

Es un proceso inelástico de dispersión en donde se ven modificadas las propiedades de la *energía vibracional-rotacional*²⁹ que implica un cambio de frecuencia y un cambio de temperatura en las moléculas debido a que los niveles de energía de las moléculas que se rigen por las leyes de *Boltzmann*³⁰, han modificado su estado energético luego de haber tomado contacto la radiación. Esta técnica se utiliza mucho para identificar gases en la atmosfera y es ampliamente utilizada para medir el vapor de agua en la troposfera (Wandinger, 2005).

Esta técnica se puede utilizar después de la erupción del Pinatubo (Filipinas) en 1991 y mostro que hasta en las alturas de estratosfera (hasta 50 km de altura) para identificar el volumen de partículas(Ansmann, and Müller, 2005).

Table 4.2. Typical lidar ratios for different aerosol types at 532 nm wavelength determined with a Raman lidar

Marine particles [22, 30]	20–35 sr
Saharan dust [31]	50–80 sr
Less absorbing urban particles [22, 30]	35–70 sr
Absorbing particles from biomass burning [30, 32]	70–100 sr

T5. Promedios de absorción para diferentes tipos de aerosol en un sistema de detección con Raman LIDAR.

3.5.4-The Doppel LIDAR Wind Sensor

Es utilizado para identificar las manifestaciones de movimientos atmosféricos (Turbulencia y viento), se utiliza a partir de la radiación LASER en una frecuencia única coherente y la retrodispersión es una radiación coherente conteniendo la información de movimiento de las partículas. (Wandinger, 2005)

Para ser tener más calidad en la medición, se han hecho cálculos de cambios gran movimiento, estos LASERs operan a 10.6μm de longitud de onda (Liu and Jones, 1984).

²⁹ La energía vibracional-rotacional está relacionada a las propiedades de excitación de la materia cuando se aumenta su temperatura por alguna de las formas de transferencias de calor y absorbe energía; para los efectos de este trabajo, esta energía es liberada en forma de radiación.

³⁰ Las ley de Boltzmann calculan el calor transferido a un objeto sometido a radiación termal (Halliday & Resnick, 2011).

Actualmente las líneas de desarrollo están direccionándose hacia esta aplicación, por ejemplo la ESA, ha desarrollado el instrumento ALADIN(*Atmospheric Laser Doppler Lidar*) que fue puesto en órbita en 2007, el cual mide la dispersión asociada al efecto del viento, midiendo a partir de la longitud de onda triplica a 355nm, las dos bandas que tiene la frecuencia de salida; así como otras detecciones similares al instrumento DIAL en relación al entendimiento de la química atmosférica(ciclo del carbón, circulación global y viento de tropósfera) ,el clima y los procesos involucrados en el sistema del planeta tierra. (Theopold et al., 2005).

3.5.5-Resonance Scattering LIDAR o Resonancia Fluorescente

En 1983 se realizó la primera resonancia fluorescente con el objetivo de identificar el sodio (Na). Más tarde se realizaron estudios de atmósfera en el pacífico ecuatorial por parte de la Universidad de Illinois y posteriormente en 1998 se utilizó para identificar hierro(Fe) en Okinawa,Japón. (Theopold et al., 2005).

La Resonancia fluorescente se encarga de provocar interacciones de radiación entre las alturas de 80 y 110 km, en donde identificara átomos metálicos (Na,K,Ca,Ca⁺,Li,Fe) en la atmósfera. Es llamado *Fluorescente* porque se obtiene de la transmisión que se da debido a la transferencia de energía por radiación, aumentando la temperatura de las partículas haciendo visible en una reemisión de luz que ocurre en longitudes de onda largas. (Wandinger, 2005).

3.6-Plataformas de captura de datos

Las primeras plataformas de base fija fueron desarrolladas a principios de los años 60 y a finales de esa década se hicieron las primeras capturas en pequeños vehículos aéreos. A finales de los 70 ya se contaba con la capacidad de realizar capturas mediciones de gran escala y en gran altitud a 20km. Un transbordador espacial se equipó en 1994 para realizar un vuelo de 11 horas y en enero 2003 se puso en órbita el GLAS (Geoscience Laser Altimeter System). (Theopold et al., 2005).

Todo este desarrollo desde el principio de los 60 fue realizado con el objeto de medir diferentes fenómenos atmosféricos incluyendo el las propiedades de retroreflexión molecular y del aerosol de la atmósfera, ondas atmosféricas, velocidades del viento. Las técnicas a implementar, teniendo énfasis la retro reflexión elástica, RAMAN, resonancia fluorescente y DIAL; debían montarse en diversas plataformas, la NASA y la agencia europea espacial (ESA) han trabajado arduamente para el desarrollo de los vehículos espaciales y en LASER avanzados(Browell, 1984).

Estos dispositivos pueden estar ubicados en una estación fija en la tierra o pueden desplazarse en otro vehículo espacial, aéreo o terrestre. En el caso de las aplicaciones de teledetección de objetos o coberturas terrestres, la captura se realiza a gran escala y los

dispositivos están ubicados en un avión o helicóptero que realiza en sus líneas de vuelo una emisión constante de los pulsos y recepción de señales.

3.6.1-Spaceborne Lidar System

El énfasis de aplicación de los sistemas LIDAR transportados con vehículos espaciales en la tropósfera; así como en la ionósfera, radica en que esas zonas son de estudio son de suma importancia en las telecomunicaciones y que no es posible estudiarlas con detalle con técnicas pasivas de *remote sensing*. En la NASA los sistemas LIDAR fueron incorporados en su propio laboratorio en el Lidar Proposals for Spacelab en junio de 1976 y se consolidaron: el Atmospheric LIDAR Working Group(NASA Sp-433,1979) y el General Electric Shuttle LIDAR System Definition Study(NASA CR-3303,1980). En los planes futuros de la conferencia de la NASA celebrada en Stanford en octubre de 1984: *Tunable Solid State Lasers for Remote sensing*, se concebían intervenciones a gran escala para el estudio del clima, la química atmosférica y la predicción climática.(Browell, 1984).

En los 70 y 80 se estudio arduamente por parte del EOS y otras agencias como la ESA y la NASDA³¹ la capacidad de instalar sistemas LIDAR en vehículos a bordo. Se desarrollo el sistema LASA³² por parte de la NASA y LAWS³³(LASER Atmospheric Wind Sounder) que se desarrollo por el equipo de la NASDA. Todos estas implementaciones han llevado a la conclusión que LIDAR ofrece una mejor resolución de la distribución vertical de nubes, aerosoles y gases como el ozono e información detallada de presión y temperatura de la atmosfera; en la tecnología actual LIDAR tiene grandes capacidades, también diurnas, para encontrar información de muchos otros parámetros involucrados en los procesos que gobiernan el funcionamiento de la tierra. El programa EOS contemplo una serie de plataformas polares de baja inclinación entre los 90 y a la primera década de 2000. (Theopold et al., 2005)

Muchos otros proyectos están o han sido puestos en marcha de acuerdo a McCormick(2005):

- a) LASA por parte de EOS
- b) ATLID (Atmospheric LIDAR) por parte de ESA
- c) LAWS por parte de la NASDA
- d) ELISE(Experiment LIDAR in Space Experiment) por parte NASDA
- e) GLAS (Geoscience LASER Altimeter) por parte de EOS.

31 NASDA(National Space Development Agency of Japan)

³² Se detalla más adelante en este capitulo

³³ la sonda atmosférica de viento

Table 13.2. System parameters for the spaceborne GLAS lidar (Courtesy of S.P. Palm.)

Parameter	532-nm Channel	1064-nm Channel
Orbit altitude	600 km	600 km
Laser energy	36 mJ	73 mJ
Laser divergence	110 μ rad	110 μ rad
Laser repetition rate	40 Hz	40 Hz
Effective telescope diameter	0.95 m	0.95 m
Receiver field of view	160 μ rad	475 μ rad
Detector quantum efficiency	70%	35%
Detector dark current	3.0×10^{-16} A	50×10^{-12} A
RMS detector noise	0.0	20×10^{-12} A
Electrical bandwidth	1.953×10^6 Hz	1.953×10^6 Hz
Optical filter bandwidth	0.030 nm	1.00 nm
Total optical transmission	30%	55%

T6. Especificaciones de un sistema GLAS con dos bandas en fase.

Otros desarrollos fueron realizados a parte de la enumeración anterior y en proyectos dirigidos por diferentes agencias espaciales en el mundo; gracias al control de los principios que rigen los diversos tipos de aplicaciones LIDAR, el control automático y el desarrollo en la construcción de LASERs. Se mencionan los detalles a continuación a groso modo y tomando gran valor para este trabajo las especificaciones de los diferentes dispositivos; ya que estas son fundamentales para el correcto análisis de los geodatos capturados y sus especificaciones que se abordaran al final del **capítulo 4**. El sistema CALIPSO³⁴ que se detalla a continuación es integrador de varios elementos de *Remote Sensing*. Los sensores activos funcionan muy bien al lado de los tradicionales pasivos.(Theopold et al., 2005) Por ello se vuelve relevante describir un sistema compuesto a bordo de un Spaceborne Lidar System(SLS).

3.6.2-Airborne Lidar System (ALS)

Los sistemas LIDAR en vehículos aerotransportados son utilizados para medir parámetros desde la tropósfera hacia la mesosfera y fueron desarrollados por la NASA en el LaRC (Langley Research Center). Adicionalmente se utilizaron para medir Ozono, agua y aerosol presentes en la atmosfera; mediante el uso de sistemas DIAL que operan con frecuencias entre 600 y 1064 nm.(Browell, 1984).

El alcance de las mediciones se amplió grandemente con los sistemas ALS luego del éxito grande en su aplicación entre los años 60 y 70; cuando S.Harvey voló a borda del un avión T-33 sobre Williamsburg(VA,USA).

³⁴ Cloud Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization. El fenómeno de la polarización LIDAR se abordara en el capítulo 4.

El desarrollo y puesta a prueba de estos sistemas tenía el objeto de acuerdo a ((McCornick (1967),Lawrence(1968),Johnson(1971) McCornick(1979) en (Theopold et al., 2005)):

- a) La detección de turbulencia en el aire.
- b) El primer *downlooking* ³⁵ fue realizado en 1969 con el objeto de medir el aerosol de la tropósfera en un experimento oceanográfico y meteorológico en Barbados.
- c) El *uplooking* fue realizado con un *sistema elástico* de doble longitud de onda construido por LaRC para medir aerosol estratosférico en octubre de 1979.
- d) El experimento clave fue realizado a bordo del SAM II en la misión SAGE³⁶ que tenía por objeto obtener información de aerosol y gas en la estratosfera.

El primer LIDAR de gran altura fue el CLS (Cloud LIDAR System) a bordo de un avión WB-57 en 1979 , mientras el primer DIAL a bordo fue el utilizado para el *uplooking* en el sistema LaRC en 1982 aplicado en Punta Arenas (Chile) para tomar datos del agujero en el Ozono, se ha utilizado Resonancia fluorescente para medir el sodio(Na) de la mesosfera desde 1983, mientras el primer DIAL a gran altura fue en un aerotransportado ER2 como parte del sistema LASE(Lidar Atmospheric Sensing Experiment) . En la actualidad se han incorporado diversas técnicas como medidas de polarización y de múltiple longitud de onda; rangos de repetición elevados y LASERs de gran eficiencia, por ejemplo el ajustable de *Alexandrite* y se ha avanzado en la materia hasta poder medir composiciones de las partículas volcánicas, el polvo del Sahara y los elementos que componen las nubes estratosféricas con sistemas DIAL a bordo. (Theopold et al., 2005).

Los sistemas de eco enfocados fijamente en objetivos sólidos son una con pulsos LASER desde un ALS deben funcionar en muchas frecuencias para determinar la distancia con gran exactitud. La modulación de frecuencias es compatible con la alternación de fase para definir certeramente la retroreflexión y proporcionar resultados topográficos de gran exactitud; siendo la batimetría la detección de aguas superficiales una posibilidad de aplicación (Träger, 2007).

³⁵ *Downlooking* es una captura hacia una altura inferior y el *Upooking* hacia una altura superior

³⁶ Stratospheric Aerosol and Gas Experiment(SAGE)

3.7-Algunos Sistemas ALS y SLS

3.7.1-The LIDAR Atmospheric Sounder and Altimeter (LASA)³⁷ ha tenido por objeto la medición de la distribución de la cantidad de vapor de agua en la atmosfera y el seguimiento de los grandes transportes de agua en el ciclo hidrológico con datos menores a 1 km de resolución. Sin embargo estas mediciones que utilizan microondas y ondas infrarrojas no presentan una resolución vertical adecuada(Liu and Jones, 1984), en el sistema en órbita LASA sugería La NASA en 1984 el DIAL como una manera de solventar el problema de la resolución vertical con dos ondas a 0.723 μm y 0.94 μm , así como las que operan a 10.6 μm de longitud de onda.

El instrumento LASA con estas adaptaciones tiene una exactitud de 10 cm. y su aplicación más grande se visualizaba en la detección del cambio en masas de hielo o capas nieve.

Además de ser el encargado de tomar mediciones topográficas en regiones de difícil acceso y de medir el las range-resolved (alturas provenientes de los retornos)por ejemplo para la determinación de las alturas del canope y la superficie de la tierra.(Liu and Jones, 1984).

Table 1. Earth Observing System Instruments - Data Collection and Imaging/Sounding Packages ¹			
Instrument	Measurement	Spatial Resolution	Coverage
Automated Data Collection & Location System (ADCLS)	Data relay and Location	Location to 1 km for buoys and 1 m for ice sheet	global, twice daily
SISP - Surface Imaging & Sounding Package			
Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS)	Atmos. and Surface Imaging 0.4 - 2.2 μm , 3 - 5 μm , and 8 - 14 μm	1 km ² pixels	global, every 2 days
High Resolution Imaging Spectrometer (HIRIS)	Surface imaging 0.4 - 2.2 μm	30 m x 30 m pixels	pointable to specific targets 50 km swath
High Resolution Multifrequency Microwave Radiometer (HMWR)	1 - 94 GHz passive imaging	1 km at 36.5 GHz	global, every 2 days
Lidar Atmospheric Sounder and Altimeter (LASA)	Visible and near-ir range resolved backscatter	vert. res. 1 km, sfc. topography 3 m, retro- ranging 3 cm	global, sounding daily, topography 5 y; retro-ranging every 6 months

T7. Especificaciones de un sistema de detección LASA

³⁷ Instrumento LIDAR Parte del EOS

3.7.2-LADAR y LIBS

La tecnología LADAR (Laser Detection and Ranging) está basada en la excitación desde otro componente de fibra óptica. Este fenómeno depende críticamente del fenómeno de la polarización de ondas orientadas como las ondas de la fibra o del LASER. (Building and Fire Research Laboratory and Manufacturing Engineering Laboratory, 2004). La gran ventaja de este sistema es la capacidad de generar una imagen al mismo tiempo que se está determinando la distancia, lo anterior proporciona a su vez generar modelos 3D de gran fidelidad y un rango de reconocimiento mayor que otras tecnologías, un factor importante de seguridad industrial en las nuevas tecnologías es que se utilizan LASERs para minimizar efectos en daños visuales(tradicionalmente de $1.55\ \mu\text{m}$ o $1.57\ \mu\text{m}$), tienen la ventaja de ser blind systems por lo que pueden ser utilizados de noche("Laser Radar/LIDAR/LADAR and Eye-safe Lasers | Sensors Unlimited," 2014).

Son llamados "Laser Detection" porque capturan luz polarizada producto de una emisión basada en la excitación de los átomos, sin embargo no se está generando emisión LASER sino ondas polarizadas con las propiedades del LASER original. En contraparte los sistemas LIBS(*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*) utilizan pulsos de LASER enfocados a una superficie, la cual es sometida a calor y desencadena pulsos LASER, este método propicia el análisis de para mediciones elementales que en la espectroscopia de emisión en donde ocurre vaporización por el calentamiento térmico y tiene una relación directa con el manejo de plasma en la materia y en el desarrollo de la manipulación de impurezas controladas por espectroscopia.(Träger, 2007).

3.7.3-CALIPSO

Con el objeto de acercarse a predicciones del cambio climático se toman mediciones de las nubes y el aerosol desde la misión CALIPSO como parte de los proyectos ejecutándose actualmente por parte del EOS. Este sistema es acertado para atender los errores e incertezas puesto que usa tres canales de LIDAR y tres canales de infrarrojo, además de estar equipado con una cámara en un miembro de la formación de satélites: Proteus, Aqua, CloudSat, AURA y Parosol. Tienen énfasis en capturar información atmosférica, entre esta información datos de radioactividad de gran injerencia en los avances en el estudio de cambio climático. (McCormick, 2005).

La combinación de instrumentos y las partes que operan de manera autónoma de la formación de acuerdo a McCormick(2005) contiene:

- a) *Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization*(CALIOP)
- b) The imaging Infrared Radiometer(IIR)
- c) Wide Field Camara(WFC)

3.7.3.1-Transmisor

Utiliza un Laser en estado sólido bombeado por Nd:YAG operando en frecuencias polarizadas de pulsos de luz a 1064nm y 532nm. Los pulsos son reemplazados (switch) y producidos de manera simultánea, cada pulso requiere 110mJ de energía y la frecuencia de repetición es de 20.2Hz. Solo un LASER opera en un momento determinado y la reducción angular divergente consigue un rayo de 96 metros de radio en la superficie de la tierra.

3.7.3.2-Receptor

Es un telescopio de 1m de diámetro de Berilio, con espejo primario y secundario, una cobertura de carbon que impide la directa iluminación solar similar al utilizado en el proyecto GLAS en 2003. Además de contener un *Shutter*³⁸ y un despolarizador que calibra la longitud del canal perpendicular de 532nm y con filtros de interferencia se logra el suficiente bloqueo solar para el canal de 1064nm . Cada canal tiene digitalizadores duales de 22-bit.

Table 13.3. System parameters for the CALIPSO space-craft mission to be launched in 2005. The characteristics for the lidar (CALIOP), wide field camera (WFC), and the Imaging Infrared Radiometer (IIR) are shown (Courtesy of D.M. Winker.)

Characteristic	Value	
CALIOP		
Wavelengths (μm)	0.532 and 1.064	
Pulse energy (mJ)	110 at each λ	
Polarization	0.532 $\parallel$ and $\perp$	
Resolution at alt. (km)	ΔZ (m)	ΔH (km)
0-8	30	0.33
8-20	60	1
20-30	80	1.67
30-40	300	5
WFC		
Wavelength (μm)	0.645	
$\Delta\lambda$ (μm)	0.05	
IFOV (km)	0.125	
Swath (km)	61	
IIR		
Wavelengths (μm)	8.65, 10.6, 12.0	
$\Delta\lambda$ (μm)	0.6 to 1.0	
IFOV (km)	1	
Swath (km)	64	

T8. Especificaciones de un sistema de detección CALIPSO.

3.7.3.3-Resolución y Calibración

La resolución vertical es de 30m y 333m horizontal con las especificaciones de transmisión y recepción anteriormente descritas y la retrodifusión es capturada desde la superficie hasta 40 km de altura.

³⁸ Obturador

Se realiza con datos normalizados de la señal de retorno a alturas entre 30km y 35km. Y el canal de 1064nm es calibrado con la dispersión total del canal de 532 nm utilizando zonas con nubes *cirrus*³⁹.

3.7.4-Sistema de captura de datos de prueba: GEMINI

Es un sistema comercial de captura ALS, es desarrollado por la empresa *Optech* que trabaja a un rango de repetición LASER de 167 kHz, utilizando la tecnología de multi-pulsos continuos (CMP) y capacitado para operar en la convencional doble frecuencia de pulsos únicos. Los modelos DEM (Digital Elevation Model) que este sistema genera son interoperables con Google Earth, contando con un sistema de pre-procesamiento con opción para realizar una rectificación automática, es opcional integrar una cámara hiperespectral⁴⁰ y equipos receptores de forma de onda para dotar al formato de mayor robustez de información. (“GEMINI - Optech - PDF Catalogue | Technical Documentation | Brochure,” 2014)

Parameter	Specification
Operational envelope ¹	150-4000 m AGL, nominal
Laser wavelength	1064 nm
Horizontal accuracy ²	1/5, 500 x altitude (m AGL)
Elevation accuracy ²	<5-35 cm; 1 σ
Effective laser repetition rate	Programmable, 33-167 kHz
Position and orientation system	POS AV™ AP50 (OEM); 220-channel dual frequency GPS/GNSS/Galileo/L-Band receiver
Scan width (FOV)	Programmable; 0-50°
Scan frequency	Programmable; 0-70 Hz
Sensor scan product	1000 maximum
Beam divergence	Dual divergence: 0.25 mrad (1/e) and 0.8 mrad (1/e), nominal
Roll compensation	Programmable; $\pm 5^\circ$ at full FOV
Range capture	Up to 4 range measurements, including 1 st , 2 nd , 3 rd , and last returns
Intensity capture	Up to 4 intensity returns for each pulse, including last (12 bit)
Video camera	Internal video camera (NTSC or PAL)
Image capture	Compatible with full Optech camera line (optional)
Full waveform capture	12-bit IWD-2 Intelligent Waveform Digitizer (optional)
Data storage	Removable solid state disk SSD (SATA II)
Power requirements	28 V; 900 W; 35 A (peak)
Dimensions and weight	Sensor: 260 mm (w) x 190 mm (l) x 570 mm (h); 23 kg Control rack: 650 mm (w) x 590 mm (l) x 530 mm (h); 53 kg
Operating temperature	-10°C to +35°C (with insulating jacket)
Relative humidity	0 - 95% non-condensing

T9. Especificaciones de un sistema de transmisión y recepción GEMINI.

3.8-Airborne Laser Terrain Mapping (ALTM)

Los sistemas terrestres montados en un remolque y altímetros de alta resolución son tan buenos que el rango producido por el eco de las copas de los árboles se puede resolver desde el eco del suelo. De esta manera es posible obtener datos de biomasa en junglas y zonas inaccesible; entre otras aplicaciones forestales. (Träger, 2007)

³⁹ Nube blanca y ligera compuesta por filamentos o barbas de hielo. Definición de WordReference (<http://www.wordreference.com/definicion/cirro>)

⁴⁰ En el anexo 5 se encuentran las especificaciones de la cámara integrada y utilizada paralelamente en la recolección de los geodatos de prueba de este trabajo.

3.8.1-Terra-Mobil

Este sistema funciona con el desarrollo de la Chirped Pulse Amplification⁴¹ (CPA) que en 1985 pudo producir pulsos LASERs ultrarrápidos con una intensidad en el orden de 10^{20} W/cm² con una propagación no lineal aun en medios no lineales como es el caso del atmosférico con gases presurizados. El Terra Mobil (Terrawatt laser in a mobile system) Fue lanzado en 1999 y consiste en un femtosecond(fs)-42terrawatt(TW) LASER y su capacidad de detección multiespectral integrado en un *Container* climatizado que permite mediciones horizontales y verticales, opera con generadores de diesel y se enfría con agua. Funciona con pulsos intermitentes secuenciales, TW-fs amplificados (chirped-pulse amplificación) y un laser Nd:YAG de 1J de energía cada 10Hz. No presenta una propagación lineal por lo que su intensidad no decrece con facilidad y es luz blanca que puede viajar a alta intensidad y alturas altas y con rangos variados de operación para trazar longitudes de cientos de metros. (Theopold et al., 2005).

Table 14.2. Technical data of Teramobile lidar

Laser:		
Pulse duration	60 fs FWHM	
Pulse energy	330 mJ	
Peak power	5.5 TW	
Pulse-to-pulse stability	2% RMS	
Bandwidth	16 nm FWHM	
Beam transmitter telescope:		
Input pulse diameter	50 mm	
Output pulse diameter	150 mm	
Focal length	Adjustable, 10 m – ∞	
Receiver telescope primary mirrors:		∞
Number	2	
Viewing directions	Vertical and horizontal	
Diameter	400 mm	ntal
Receiver telescope secondary mirror:		
Number	1, switchable	

T10. Especificaciones de un sistema de detección TERRAMOBIL

⁴¹ En español: Pulsos intermitentes amplificados

⁴² Lasers de pulso ultra corto de materiales no lineales y con efectos de pequeño campo eléctrico no lineal.(Träger, 2007)

3.8- Características de los geodatos LIDAR

3.8.1- Formato LAS

El Formato LAS es un formato público de intercambio de datos que presenta una nube tridimensional como alternativa al manejo del genérico ASCII (American Standard Code for Information Interchange) ("LASer (LAS) File Format Exchange Activities," n.d.). Este formato fue el solicitado en los términos de referencia por parte del contratista, en este caso el MARN ("MARN inicia mapeo aéreo de elevación digital de todo El Salvador," 2014) para los datos muestra que se utilizaran en este trabajo.

El formato LAS ha sido desarrollado para almacenar puntos LIDAR, siendo un formato interoperable con diferentes fabricantes de tecnologías y software, el lineamiento de su desarrollo es contar con un formato unificado conforme a 1999 ANSI (American National Standards Institute) C Language Specification ANSI/ISO/IEC 9899:1999 ("C99") por parte de la ASPRS (The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing) y la versión 1.3 tiene la habilidad de incluir en los pulsos de retorno más información sobre la onda y su forma, para el análisis y almacenamiento de ondas transversales, esta información se puede almacenar en un archivo externo y el manejo de codificación es sintéticamente generado en relación a los retornos.

La información de forma de onda es incluida en las columnas de los puntos LIDAR, los retornos pueden caracterizarse independientes de estas características, se pueden almacenar información de forma de onda desde 2 hasta 32 bit, es posible contar con un WDP (Wave Form Data Packets) en donde la configuración digital proporciona un rango de operación de 0 a 255 longitud de variable y es posible comprimir esta información aunque no está incluida en el paquete LAS v1.3. (The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, 2009).

Table 4.1 – LAS Format Definition

PUBLIC HEADER BLOCK
VARIABLE LENGTH RECORDS
POINT DATA RECORDS

Table 4.2 – LAS Format Definition Containing Waveform Data

PUBLIC HEADER BLOCK
VARIABLE LENGTH RECORDS INCLUDING WAVEFORM PACKET DESCRIPTORS (up to 255)
POINT DATA RECORDS
EXTENDED VARIABLE LENGTH RECORD (WAVEFORM DATA PACKETS)

T11. En la (a) se observa la Definición de Formato de LAS y en la (b) las características adicionales propias del paquete WDP de la v1.3.

3.8.2-Especificaciones de captura

Las siguientes especificaciones han sido tomadas de los términos de referencia que emitió el MARN para solicitar el servicio de levantamiento de geodatos LIDAR.(Ministerio de medio ambiente y recursos naturales, 2013)

3.8.2.1 Plataforma de Colección de datos.

La Plataforma de colección cuenta con un estabilizador automático (Cámara y Sensor LIDAR) con una ventana Fotogramétrica con un sistema estabilizador para choques, un sistema GPS De Doble frecuencia ($\geq 1\text{Hz}$), sincronizado con la cámara para registro de eventos. El almacenamiento definido para un (Data Logging) $\geq 200\text{Hz}$ con un Drift $<0.1^\circ/\text{Time}$.

El GPS del aeroplano tiene las siguientes características:

- a) Mantiene una distancia a la estación de base menor a 50km
- b) La referencia es la red geodésica permanente de IGCN⁴³ de El Salvador y las estaciones autorizadas por parte del MARN
- c) Precisión de la Trayectoria de Post-proceso: RMSE $\leq 10\text{cm}$ (X-Y-Z)
- d) Para la aerotriangulación se considera el OFFSET de la antena como una referencia relativa.

La precisión vertical fundamental o Fundamental Vertical precisión (FVP) La precisión vertical fundamental (FVP) es la siguiente: AccuracyZ $\leq \pm 25.4\text{cm}$, a un intervalo de confianza del 95% ($1.96 \times \text{RMSEz}$).

3.8.2.2 Sensor

El sensor tiene la capacidad de aceptar como mínimo 4 retornos discretos en el caso se presenten para cada pulso LASER, con una discriminación vertical $\leq 4\text{m}$ y en cada retorno la resolución radiométrica $\geq 8\text{-bits}$, una frecuencia máxima de escaneo $\geq 70\text{Hz}$ y una frecuencia máxima del pulso $\geq 45\text{kHz}$.

3.8.3 Requerimientos del sensor

La dirección del vuelo es de recorrido simple (Single-Swath), con un nominal post-spacing⁴⁴(NPS) de 1er-Retorno Nominal de 2.0 metros y no mayor a los 2.8 metros. El ángulo de escaneo no debe exceder a los 40 grados del Total del FOV (± 20 grados desde la directriz). Las direcciones de vuelo son: Este-Oeste / Oeste-este. La ejecución debe realizarse bajo las siguientes directrices ambientales("MARN inicia mapeo aéreo de elevación digital de todo El Salvador," n.d.):

- a) Libre de bruma y nubes entre el aeroplano y la tierra.
- b) Libre de niebla y/o humo entre el aeroplano y la tierra.

⁴³ Instituto Geográfico y censos nacionales

⁴⁴ Post-espaciamento nominal

c) Las Planicies de inundación/humedales deben ser capturados sobre su flujo base y fuera de la presencia de superficie de inundación significativa debido a eventos.

3.8.4-Especificaciones de los datos de muestra

Los geodatos LIDAR obtenidos se mantienen en cumplimiento del formato LAS v 1.3 y clasificados en *Tiles*. A partir de estos se cuenta con los siguientes productos que son los insumos base y el punto de partida para el análisis en el **capítulo 7 y 8**:

a) Modelo de Elevación Digital (DEM) de suelo desnudo con 1.5 metros de resolución y Modelo de Elevación Digital de Superficie (DSM), 1.5 metros de resolución

b) Imagen de Intensidad, de 1.5 metros de resolución

La densidad no supera los 1.4 m de separación porque los datos son representativos para la densidad de bosque en la región. Esto equivale a un 0.5 puntos por metro cuadrado (ppsm) y a una densidad de 0.7 m. (2 ppsm).

En un sistema LIDAR las tecnologías incluidas toman en cuenta una colector imágenes digitales de 4 bandas (Azul, Verde, Roja e Infrarroja cercana, B-G-R-NIR) a una Distancia en Tierra (Ground Sample Distance(GSD)) de 40 cms. Estas imágenes cumplen los requisitos descritos en la sección 3.8.2.1.

Clasificación de puntos.	
Código	Descripción
0	Sin clasificar: Creado, nunca evaluado.
1	Sin clasificar: Evaluado; No Identificado o no asignado a clase
2	Tierra, suelo desnudo
3	Vegetación Baja (0 – 0.3m)
4	Vegetación media (0.3 – 2m) (puede también ser usado para toda vegetación)
5	Vegetación Alta (2m >)
6	Edificios, estructuras (Edificios, casas, cobertizos, silos etc.)
7	Ruido Bajo / Alto (Espurios)
8	Puntos clave del modelo (Reservado solamente para "puntos claves")
9	Agua (Cualquier punto sobre agua)
10	Puente (Cualquier puente o paso con elevación, no incluye relleno de carreteras sobre alcantarillas)
11	Puntos Retenidos (Sinónimo de Ignorados")
12-15	No usados
16-27	Puntos de exceso en la pasada, clasificados con códigos 0-11, +16.
28-31	No usados

T12. En la Tabla se observan la pre-clasificación en "tiles" de Land Cover procesado en la captura en base a los datos recolectados de intensidad.

El formato de los datos de muestra tiene un mecanismo robusto de georeferencia que fue desarrollado para GEOTIFF pese a que LAS no es un formato RASTER cada punto contiene su propia información de posición absoluta, se han utilizado los modelos The GeoKeyDirectoryTag (34735), GeoDoubleParamsTag (34736), and GeoASCIIParamsTag (34737); aunque es requerido únicamente el GeoKeyDirectoryTag, los otros están presentes dependiendo del entorno de aplicación de los datos.(The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, 2009)

Los metadatos de los geodatos LIDAR están disponibles en formato XML cumpliendo con el estándar del FGDC(Federal Geographic Data Committee).("The Federal Geographic Data Committee — Federal Geographic Data Committee," 2014).

Table 4.7 – Point Data Record Format 0

Item	Format	Size	Required
X	long	4 bytes	*
Y	long	4 bytes	*
Z	long	4 bytes	*
Intensity	unsigned short	2 bytes	
Return Number	3 bits (bits 0, 1, 2)	3 bits	*
Number of Returns (given pulse)	3 bits (bits 3, 4, 5)	3 bits	*
Scan Direction Flag	1 bit (bit 6)	1 bit	*
Edge of Flight Line	1 bit (bit 7)	1 bit	*
Classification	unsigned char	1 byte	*
Scan Angle Rank (-90 to +90) – Left side	char	1 byte	*
User Data	unsigned char	1 byte	
Point Source ID	unsigned short	2 bytes	*

GPS Time	double	8 bytes	*
Red	unsigned short	2 bytes	*
Green	unsigned short	2 bytes	*
Blue	unsigned short	2 bytes	*

Wave Packet Descriptor Index	Unsigned char	1 byte	*
Byte offset to waveform data	Unsigned long long	8 bytes	*
Waveform packet size in bytes	Unsigned long	4 bytes	*
Return Point Waveform Location	float	4 bytes	*
X(t)	float	4 bytes	*
Y(t)	float	4 bytes	*
Z(t)	float	4 bytes	*

T13. En la Tabla (a) se observa el formato básico del formato LAS v.1.3; tal como se menciona en el apartado anterior, este formato puede ser enriquecido con información del tiempo GPS(b), información de bandas RGB(b) y con información propia de WDP(c).

Capítulo 4

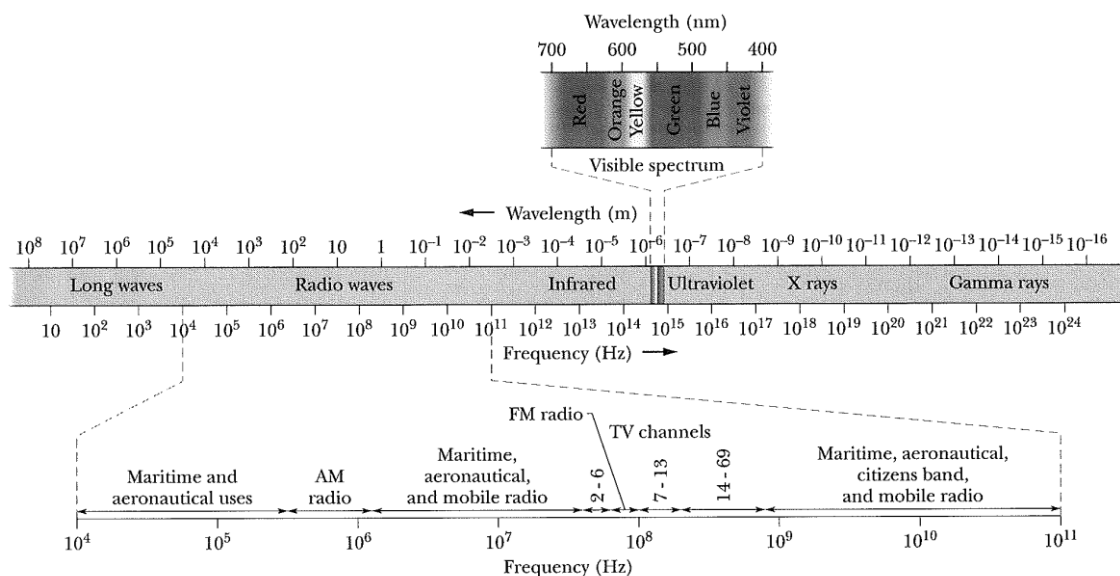
Bases Físicas de la tecnología LIDAR

En el presente capítulo se describen los principios físicos de los elementos que forman parte en una interacción LIDAR pese a que existen numeras aplicaciones en el tratamiento de la radiación de un LASER; en lo relacionado al scattering y backscattering.

Las formas de interacción de un LASER se dan en difracción (Scattering), reflexión, reflexión de rejilla y hologramas. (Chang, 2005). La primera interacción es donde se centra este capítulo; desde un enfoque descriptivo aborda los fenómenos, propiedades y ajustes necesarios para controlar las técnicas que se han mencionado en el capítulo anterior.

Para tener un mejor entendimiento de los geodatos muestra de este trabajo y de las especificaciones técnicas de los aparatos con los cuales fueron capturados estos datos. Cabe destacar que los sistemas LIDAR integran varias tecnologías y plataformas, tal fue el caso de CALIPSO en el **capítulo 3** y dependiendo del caso de aplicación, diferentes sensores también pasivos; por lo que se revisaran paralelamente algunos conceptos de espectroscopia fundamentales para el entendimiento del Remote Sensing a través de imágenes.

En el caso particular de este trabajo la captura fue realizada con una cámara XX, un transmisor X y un receptor o telescopio Y. Al final de este capítulo se desglosan bajo la premisa de esta descripción física las especificaciones técnicas del aparato y los parámetros involucrados en los geodatos capturados.



F5. Espectro electromagnético con detalle del rango de frecuencias visibles entre 400nm y 700nm.

4.1-Espectro Electromagnético Luz Visible

La luz compuesta por fotones y las ondas que viajan a la velocidad de la luz son conceptos duales. Las propiedades de estas ondas, particularmente *la longitud de onda*, que es una distancia lineal entre la cual un fotón regresa a su misma posición de trayectoria en la onda, define los diferentes rangos en los cuales se manifiesta la luz y estos rangos se han organizado en el espectro electromagnético; siendo *la frecuencia*, la cantidad de veces que se repite una onda de luz por unidad de tiempo y siendo un factor directamente proporcional a la longitud de onda. (Halliday & Resnick, 2011). De acuerdo a Träger(2005) el espectro visible se encuentra entre las frecuencias comprendidas entre 380nm y 760nm.

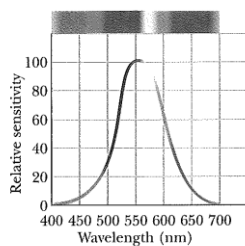
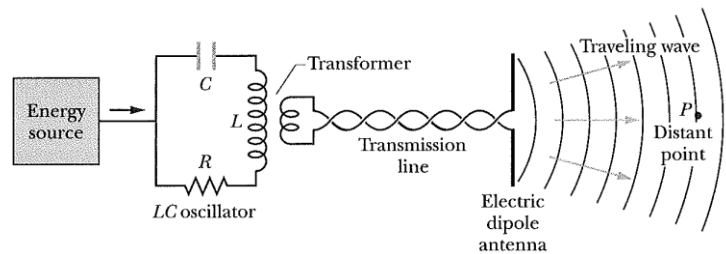


Fig. 33-2 The relative sensitivity of the average human eye to electromagnetic waves at different wavelengths. This portion of the electromagnetic spectrum to which the eye is sensitive is called *visible light*.



F6. Longitudes de onda y relativa visibilidad entre longitudes de onda de 400nm y 700nm.

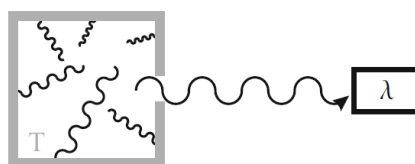
F6. Se muestra un proceso de transmisión de ondas.

En la actualidad es posible saber que los *Quantos* llamados Fotones pueden describirse con la energía que puede emitirse o absorberse en diferenciales de cantidad de energía y no de manera continua se expresa con la siguiente ecuación:

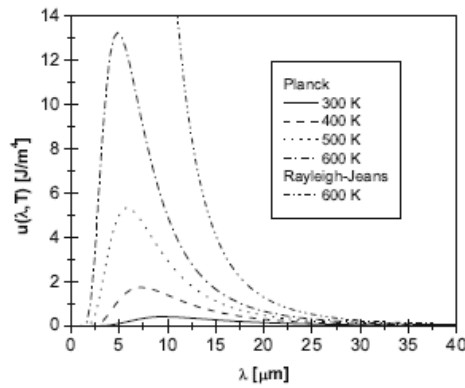
$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

E1. Ecuación de onda. Constante de Plank(h), velocidad de la luz en el vacío(c), Longitud de onda(λ) y frecuencia(ν)

Anterior a la física cuántica existía una modelación La distribución de temperaturas en una superficie de las emisiones totales de un idealizado cuerpo negro



F7. Emisión de un cuerpo negro que está siendo sometido a una determinada temperatura (T), a una frecuencia (λ).



G2. Variación de la potencia por unidad de área (intensidad) y la frecuencia (λ) de la radiación emitida por un cuerpo negro que está sometido a diferentes temperaturas.

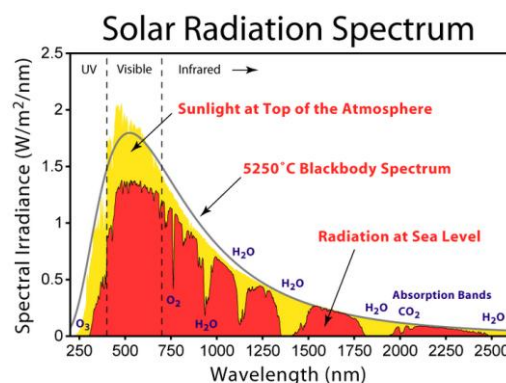
4.2-Radiación Electromagnética

En este apartado se aborda la radiación como una propiedad de la luz que puede refractarse o dispersarse, pudiendo llegar a manifestarse en forma de calor en el cuerpo que interactúa con la misma, dependiendo del tipo de radiación y del tipo de cuerpo. La forma de transferencia de calor o de energía que se no se da por una interacción que no requiere medio físico es la radiación termal y Boltzmann describió esa energía emitida con la siguiente ecuación(Halliday & Resnick, 2011).

$$P_{\text{rad}} = \sigma \epsilon A T^4$$

E3. Ecuación de la potencia de la radiación para un cuerpo con una emisividad (ϵ), en un área(A) y a una temperatura (T); utilizando la constante de Boltzmann.

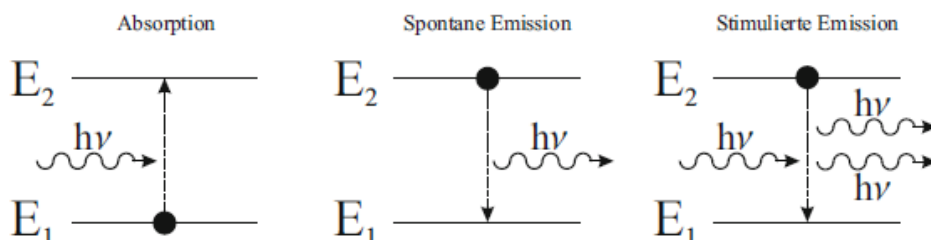
La luz visible es la interacción del ojo (sensor humano) con los fotones que se encuentran en el rango de *longitudes de onda* perceptible. Mientras los fotones en otras longitudes de onda que no son visibles pero, son parte del espectro y desencadenan otros fenómenos en la materia al interactuar. El estudio de la radiación y sus fenómenos es bastante amplio; teniendo relación con el experimento de generación de LASER que en 1960 desarrollo T.H. Maiman para contribuir a ampliar el horizonte de la física moderna(Eichhorn, 2013)



G3. En la Irradiancia solar se pueden observar las diferentes emisiones que se encuentran fuera del rango d la luz visible.

4.3-Interacciones de Emisión y Absorción plateadas por Einstein

De acuerdo a Eichhorn (2013) y apegado a la física cuántica desarrollada por Einstein, existen tres tipos de interacciones fundamentales para que se dé un cambio en el estado energético de un fotón.



F9. Esquema de los diferentes fenómenos cuánticos involucrados en el cambio de estado energético de un fotón.

La **Emisión Espontanea** Son estados casuales para el retorno al nivel energético de pre absorción y suelen manifestarse con incoherencias y se manifiestan con fluorescencia. El cambio de nivel de un fotón de un estado de energía a otro superior es llamado **Absorción**. Este fenómeno ocurre en todos los medios y se puede interpretar como un equilibrio térmico y para medir la tasa de intensidad del comportamiento de la materia como *cuerpo negro*⁴⁵. Los cambios de energía significan un cambio en la energía de las partículas atómicas y el estado de retorno puede ser inducido por otro tipo de radiación, como la emisión que recibe la materia estimulada que absorbe de estos modos los protones para una transición de estado energético. Estas fases con ruido, que pueden ser generados por osciladores LASER, generan el mínimo espesor de salida para que se dé la emisión, los amplificadores complementan el ruido para modificar la intensidad relativa. (Chang, 2005)

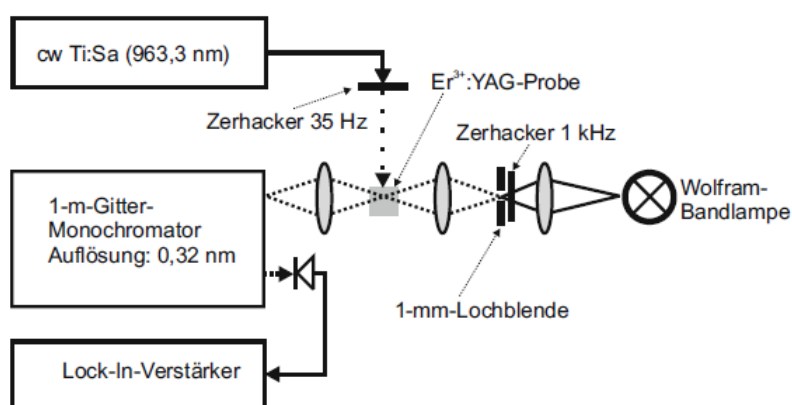
4.4-Emisión estimulada

Es el paso de estados de resonancia con el cual se genera que un fotón regrese a su estado de menor energía anterior. Los fotones pueden encontrar este estado respondiendo a las características fundamentales de un bosón⁴⁶.

Para que se dé una emisión de ondas estimulada es posible a través de la inyección o bombeo de radiación a una determinada longitud de onda que sea capaz de estimular el estado fluorescente de un material propenso a la estimulación. Un ejemplo productivo para el caso es la prueba de Er3 YAG:

⁴⁵ Emite toda la radiación que recibe

⁴⁶ Una de las partículas fundamentales de la materia



F10. En el diagrama se observa como un YAG es bombeado por un Ti:Saphir-Laser y su fluorescencia es detectada por un espectrómetro modulado, posteriormente la absorción es medida con una lámpara de Wolfram que detecta las bandas⁴⁷.

En este tipo de emisión es el principio con el cual se incentivan a ciertos materiales para emitir su fluorescencia. La lámpara puede interpretar los efectos de la absorción a través del cambio de la intensidad relativa. Esta absorción se calcula con la siguiente ecuación demostrada en Eichhorn (2013).

$$\sigma_a(\lambda) = -\frac{1}{LN_1} \ln \frac{I_t(\lambda)}{I_{0,t}(\lambda)}$$

E4. Relación de absorción a partir del cambio de intensidad inicial (I_0) y la intensidad de retorno (I_t).

4.5-Radiometría y LIDAR

Una vez aceptado la dualidad onda –corpúsculo, para poder medir la luz y tener un esquema del funcionamiento de la luz y sus interacciones, es necesario contar con parámetros que muestren las propiedades fundamentales como la longitud de onda λ , frecuencia ν , estado de polarización, las propiedades de emisión en un de un cuerpo negro, entre otras; así como las unidades radiométricas como energía potencia para describir el comportamientos de la onda o del fotón. Los cuatro parámetros de interpretación más importantes son: la intensidad (luz emitida por unidad de tiempo), El flujo de luz transmitida en una dirección (potencia), la iluminancia (cantidad de luz por unidad de área) y la luminancia que mide la claridad de una superficie. (Träger, 2007)

En el caso particular de los parámetros involucrados en la tecnología LIDAR, es importante tomar en cuenta diferentes parámetros tales como las relaciones *signal to noise*(SNR),el diámetro de coherencia, el promedio de *speckle*⁴⁸,promedio de pulsos múltiples y la

⁴⁷ En alemán lámpara de bandas *Wolframlampe*

⁴⁸ Patrón de interferencia por variaciones de intensidad

viabilidad transmisora de una sola frecuencia.(Menzies, 1984). En el presente capitulo se detallan las bases físicas para poder interpretar en el **capítulo 6** los parámetros involucrados en el sistema de captura involucrado en los datos muestra de este trabajo.

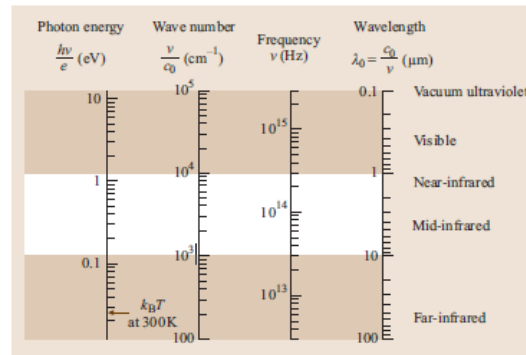


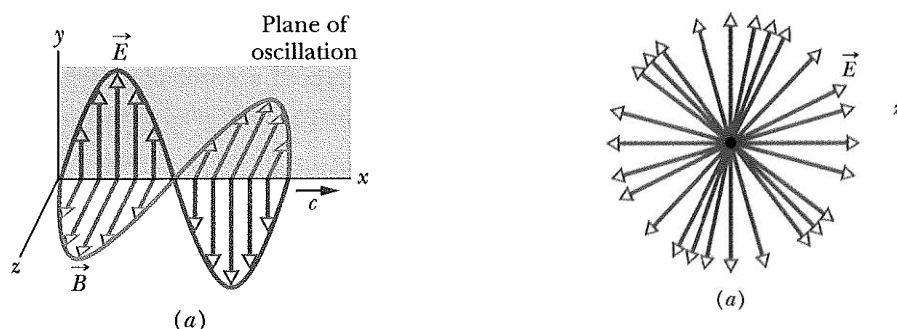
Fig. 1.1 Chart showing the wavelengths, frequencies, wave number and photon energies of electromagnetic radiation of interest in optics (After [1.17])

F11. Detalle de Parámetros radiométricos para la interpretación de algunas radiaciones.

4.5.1-Polaridad y LIDAR

Se dice que la luz esta polarizada cuando su difusión orientada en una misma dirección y sentido como un vector, las ondas electromagnéticas están polarizadas sin sus vectores se encuentran en el mismo plano de oscilación, las ondas de luz que provienen de fuentes normales no están polarizadas (despolarizadas) o polarización aleatoria. Mientras la polaridad en la reflexión deberá ocurrir cuando se da una emisión perpendicular a la incidente grados (Halliday & Resnick, 2011) o solamente cambiando el sentido pero en la misma dirección en el caso el ángulo incidente sea de 90 grados, siendo la superficie perpendicular a al plano de oscilación y a la reflexión de la onda electromagnética. Para ello se requieren superficies ondas incidentes que no se difracten y materiales de coeficiente Reflectancia alta. Para el caso de luz incoherente⁴⁹, se hace la relación que muchas ondas de luz están estocásticamente distribuidas y el ángulo de reflexión varia en el tiempo y no hay una dirección predeterminada, en la practica la reflexión luz está parcialmente polarizada(Träger, 2007) y esta condición está basada en las propiedades de las superficies que interactúan en el sistema LIDAR, este fenómeno que será abordado en el **capítulo 6** y tiene relación con las propiedades del los material de esta superficie.

⁴⁹ Entendida hasta ahora como luz no polarizada en la sección 4.6(Coherencia) se abordan otros aspectos.



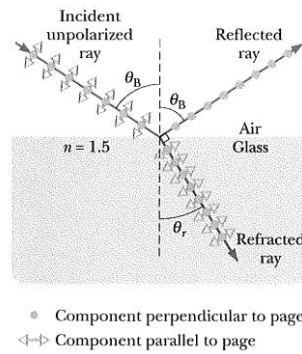
F12. En la figura(a) se observa la perpendicularidad de el campo eléctrico (vector E) y el campo magnético (vector B), la oscilación de E se da en el mismo plano. En la figura (b) se representa una dispersión de luz no polarizada en donde cada línea del campo eléctrico contenedora de un fotón toma direcciones variables.

Para que se dé la Polaridad los planos de transmisión son ortogonales, este fenómeno se demostró por Newton y Huygens; demostrándose que la participación de un medio refractor no tenía injerencia en el fenómeno, mas sin embargo no se estableció una relación directa entre los participantes en esta polarización parcial; la refracción y reflexión ortogonal. Como la orientación se puede ajustar para generar ondas polarizadas circulares o elípticas; el fenómeno de la polarización es un agente clave en la detección LIDAR. Mediante el conocimiento de la variante angular en el receptor de este componente perpendicular propio del fenómeno de la polaridad ortogonal, ante una determinada longitud de onda LIDAR en una transmisión, es posible deducir de manera aproximada el comportamiento de la materia en la cual se refractó la onda. Este proceso se conoce como despolarización y es aplicado para diferentes medios atmosféricos: moléculas, aerosoles, contenido de vapor de agua en las nubes, nubes de cirro y precipitación. Los sensores utilizados en estos casos capturan señales y la inclinación infinitesimal en el receptor es conocida como radio de despolarización, el cual es muy útil en la aplicación de los sistemas mencionados en el **capítulo 3**; tales como DIAL Y *Raman* LIDAR. Un ejemplo de aplicación es el Polarization Diversity Lidar (PDL)⁵⁰ que es un sistema móvil con un laser Nd:YAG dual a 10Hz y con longitudes de onda de $1.06\mu\text{m}$ y $5.32\mu\text{m}$. Todavía existen dudas si la despolarización puede contribuir de manera sustancial a tener mayor conocimiento de las partículas atmosféricas mas allá de que en nubes y aerosol, lo que ofrece es un potencial de calibración para LIDARs espectroscópicos⁵¹ capturando la dispersión múltiple inclusive errores⁵² a través de polarizadores incluidos en el sistema. (Menzies, 1984).

⁵⁰ Sistema LIDAR de polarización diversa

⁵¹ Sensores a través de un Espectrómetro que es un artefacto que descompone la luz.

⁵² En este contexto dispersiones en otras frecuencias y dispersiones no polarizadas.



F13. La polaridad parcial establece que ante un rayo incidente en un medio refractante, se generan componentes vectoriales (refractada y reflejada) perpendiculares. El rayo reflejado esta polarizado.

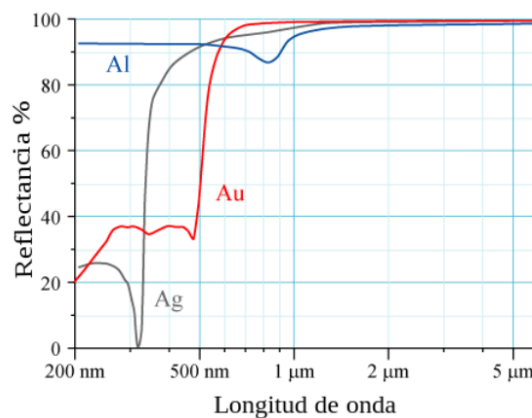
4.5.2-Interacciones en la radiometría

4.5.2-Reflexión y Refracción

La Reflexión es el rayo de luz resultante de la interacción con un medio, en el caso que este medio sea casi transparente se da *la refracción*; la manera de calcular la dirección de refracción es similar a la reflexión que dependerá de la orientación de incidencia y adicionalmente de las propiedades de los medios en cuestión con su respectiva constante N.

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1$$

E5. Ecuación de refracción e incidencia que involucra cada constante de medio N.



G3. En la grafica se observa la Reflectancia (índice de luz reflejada) para longitudes de onda en materiales diferentes (Ag, Al, Au). Para determinarla se toma en cuenta la dirección incidente y reflejada; así como la longitud de onda incidente.

La *difracción* de la luz es un fenómeno que deja en evidencia patrones de luz que tienen una mínima y una máxima intensidad. Entre estas existen zonas oscuras en las cuales se ha dado el fenómeno de cancelación de ondas o interferencia destructiva. En teoría las ondas planas tienen una extensión infinita que se puede analizar con el espectro angular de Fresnel-Kirchhoff y este fenómeno tiene relación con la polarización de la luz (Träger, 2007) y por lo tanto con la cantidad de luz detectada en relación a la emitida en un sistema LIDAR .

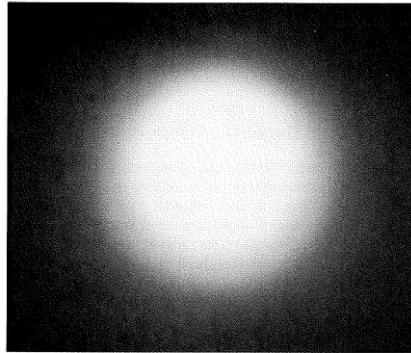


Fig. 36-43 Problem 34. The corona around the Moon is a composite of the diffraction patterns of airborne water drops. (Pekka Parvianen/Photo Researchers)

F14. Fenómeno de difracción que genera zonas de intensidad en forma de aura.

4.5.3-Dispersión

En longitudes de onda cercanas las ondas no solo se difractan en varias longitudes de onda (conformación de zonas de corona) sino también se dispersan en forma reticular, en la separación que se detalla con la ecuación de dispersión.

$$D = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \quad (\text{dispersion defined}). \quad D = \frac{m}{d \cos \theta} \quad (\text{dispersion of a grating}).$$

E6. La dispersión está relacionada a las características una emisión y su emisión vecina. La separación angular entre las mismas y su respectiva longitud de onda. Cuando existe un arreglo reticular se utilizan las propiedades de separación del arreglo (m).

En este caso el delta angular es la separación angular entre dos longitudes de ondas diferentes, representadas en el delta de longitudes de onda, mientras D, es la mayor

distancia entre dos emisiones. En el caso reticular el ángulo de dispersión es dado y fijo. Para la separación de rejilla las distancias están dadas por una separación muy pequeña de d , trabajando en un orden m , grande.

4.5.4-Poder de resolución

Es la propiedad que permite que dos líneas que están lo más cerca posible de longitudes de onda conocida, se puedan distinguir, se mide con el coeficiente R (*Resolving Power*).

$$R = \frac{\lambda_{avg}}{\Delta\lambda} \quad (\text{resolving power defined}), \quad R = Nm \quad (\text{resolving power of a grating}).$$

E7. El Resolving Power se calcula con los promedios de longitud de onda sobre una emisión específica y en el caso de un arreglo reticular se utiliza la propiedad de separación del arreglo (m).

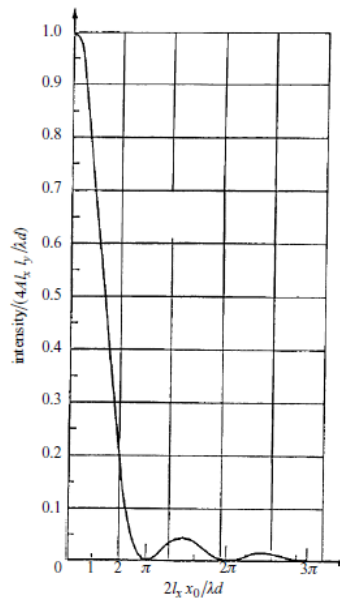
$$d(\cos \theta) \Delta\theta = m \Delta\lambda$$

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta}.$$

E9. Para ángulos pequeños es posible aproximar la ecuación de distancia de dispersión definida con reticular.

La polaridad en la reflexión de la dispersión es indiferente a si el rayo reflectante esta polarizado como un lámpara o un LASER no polarizado como la luz proveniente de un bombillo. La reflexión de la luz es totalmente polarizada cuando es perpendicular al plano de incidencia. El vidrio, agua y otros materiales dieléctricos⁵³ propician la polaridad de reflexión parcial y los componentes paralelos al plano de incidencia de un rayo son refractados por ejemplo en el vidrio. Para eliminar esta ésta refracción horizontal los lentes en vidrios polarizados son montados con su polarización en dirección vertical.

⁵³ Materiales que se alinean a un campo eléctrico externo y presentan por si mismos momentos dipolares; existen sustancias en las cuales se añaden materiales dieléctricos para inducir ese alineamiento y existen sustancias que pese a no presentar momentos dipolares pueden alinearse. (Halliday & Resnick, 2011). Estas propiedades se retomaran en el capítulo 6 de este trabajo.



G4. Ejemplo de variación de intensidad en función de la fase.

4.6-Coherencia

Las variaciones de fase o de la posición de dos fotones; así como variaciones de longitud de onda y frecuencia al hacer coincidir dos rayos de luz u ondas en una trayectoria son llamadas *interferencias*. Partiendo de este término conocido se puede indicar que la coherencia es la coincidencia de esta fase sin que los efectos de longitud y onda hagan una interferencia o incoherencia relevante llamada interferencia destructiva, sino más bien que tenga otros efectos como por ejemplo el cambio de longitud de onda de la reflexión en una proporción en una interferencia constructiva o coherencia parcial.

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta,$$

E9. Ecuación del ángulo de fase involucrando el ángulo de incidencia.

La coherencia de un Laser es una condición especial de coherencia completa en donde luz monocromática o aproximadamente monocromática es colocada en condición de fase. (Halliday & Resnick, 2011) , el LASER es descrito más adelante en este capítulo. Esto contrasta con las lámparas incandescentes que funcionan en la temperatura de resonancia o fluorescencia (2400° Kelvin); produciendo una luz incoherente(Träger, 2007).

En el caso LIDAR, la coherencia para la transmisión de un LASER tiene relación con el arreglo para la definición de la banda de operación, si el pulso es directo y filtrado antes de ser orientado por el foto detector es un sistema coherente; mientras si este está redirigido por y consolidado por medio de un *Beam Splitter*(partición de pulso) antes de ser orientado por el fotodetector, es un sistema incoherente. Estas variantes se pueden identificar en el siguiente diagrama de funcionamiento de Menzies(1984).

La coherencia LIDAR se practica en el infrarrojo y los sistemas directos responden al campo total de radiación, mientras el límite de banda espectral se determina con interferómetros o filtros dispersivos adicionales. Los LASER de materiales Nd:YAG han hecho posible el uso de la transmisión coherente con longitudes de onda corta, por ejemplo en la detección CO2 con longitudes de onda entre 9-12μm(R.T.Menzies, 1984).

4.7-Intensidad en la Refracción o Irradiancia

La intensidad es una medida de potencia por unidad de área en donde se calcula la energía de radiación otorgada a una superficie, la cual dependiendo de las propiedades del material absorbente parte de esta radiación y emitirá el resto.

$$I = \frac{\text{power}}{\text{area}} = \frac{\text{energy/time}}{\text{area}}$$

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

$$I(\theta) = I_m \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2.$$

E10. Intensidad de la luz.

E11. Intensidad absorbida

E12. Intensidad reflectada

4.7.1-Intensidad pulsos de retorno LIDAR

Es una representación de la magnitud del pulso de retorno, es un valor que es específico y opcional en cada sistema, en el caso de estar disponible de tomarse en cuenta. (The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, 2009)

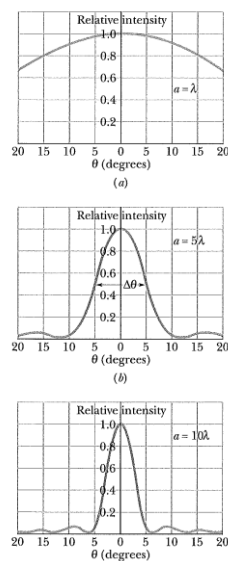
De acuerdo a es una propiedad medible que se asocia al decaimiento de intensidad de una onda de luz, a partir de la interacción de los fotones con la materia se genera una transferencia de energía y la intensidad de retorno es un valor menor a la intensidad emitida. (Weitkamp, 2005)

Esta intensidad es una representación de la energía resultante del balance energético en la interacción, puesto que una energía es absorbida por la superficie de contacto, mientras otra parte es transmitida; tal es el caso de los retornos múltiples y la medición de intensidad ocurre para la resultante de energía que es utilizada para la reflexión medida por el sensor.

La tecnología LIDAR permite obtener un dato de intensidad muy particular de esta tecnología; ya que pondera la fuerza de retorno del pulso laser en relación a la reflectividad, dicha propiedad está vinculada a la amplitud de este pulso y a su intensidad retrodispersa, la reflectividad se encuentra en el infrarrojo cercano. (“ArcGIS Help 10.1 - Crear imágenes de intensidad a partir de LIDAR en ArcGIS,” 2014)

Esta intensidad LIDAR es más exacta y se define en función de las siguientes características (“Intensity - LiDAR News,” 2014)

- a) Intensidad enviada (potencia/unidad área)
- b) Distancia del objetivo
- c) Atenuación del rayo por efectos atmosféricos
- d) Reflectancia del objetivo(en la longitud de onda de la muestra)
- e) Angulo incidente en la superficie de interacción
- f) Tamaño de receptor(telescopio) en la apertura
- g) Eficiencia de la captura de luz en el receptor óptico.
- h) Peculiaridades características de la superficie de contacto

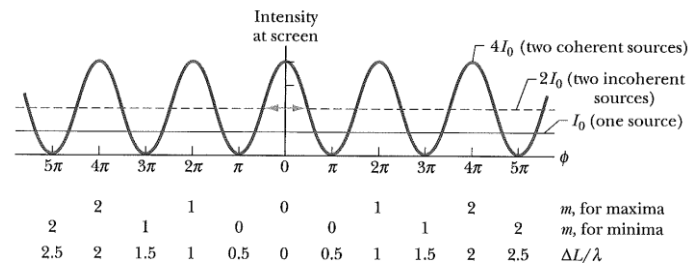


G5. Los gráficos ante determinadas longitudes de onda. Muestran la variación de la intensidad relativa en la reflexión en función de los ángulos de incidencia considerando la misma fase de encuentro con la superficie.

Sobre el ángulo incidente (e) es importante destacar que dependerá no solamente de la inclinación de la superficie de contacto LIDAR, sino también de la condición de *fase*⁵⁴ de la

⁵⁴ La Fase es el vector de posición en coordenadas polares en una trayectoria sinusoidal como la de la luz.

onda electromagnética, esta fase puede generar variaciones en la intensidad de la retrodispersión en dos puntos pese a que conformaran una superficie S, con el mismo ángulo de inclinación con respecto a una horizontal.



G6. Influencia de la condición de coherencia de la fuente y del ángulo de fase en la intensidad.

Las características relevantes para la dispersión LIDAR en el medio de, de retrodispersión (reflectante) (h)y de refracción en otras superficies de contacto con el LASER involucrado en la tecnología LIDAR; tales como propiedades de la superficie de contacto se abordaran en el **capítulo 6** de este trabajo.

4.8-LASER

El acrónimo de LASER(Light Amplification by Stimulated emission of radiation) se puede interpretar de manera más productiva luego de haber desarrollado este capítulo hasta esta sección. El LASER es una luz amplificada, intensa altamente coherente y altamente direccionada o polarizada. Las tres características mínimas que debe presentar un sistema de emisión LASER son: un medio de amplificación o ganancia, una fuente de bombeo para generar la estimulación energética y espejos que a través de la óptica y el vaivén del rayo, hacen función de *resonadores*. Originalmente se estableció la base teórica del MASER (Light Amplification by Stimulated emission of radiation). (Träger, 2007)

Los principios del LASER fueron planteados por Einstein en 1917 y llevados a su realización por Maiman en un laser de Ruby(Cr^{3+} : Al_2O_3) en 1960. La amplificación fue realizada a través de la retrodispersión tomando en cuenta que el índice de refracción material estimulado o bombeado debe ser mayor que el estimulador.(Eichhorn, 2013a) De acuerdo a los conceptos radiométricos que se han desarrollado en el presente trabajo, la consecuencia de esta estimulación debe ser una luz coherente, es decir que los fotones en un momento determinado se encuentran en la misma condición de fase y se caracteriza por ser tener aproximadamente la misma longitud de onda hasta que las variaciones sean depreciables para generar interferencia sobre todo destructiva (monocromática), y los pulsos están polarizados. Cabe mencionar que los sistemas LIDAR que se mencionaron en el **capítulo 3**;

tal como RAMAN, que utiliza simultáneamente pulsos de luz LASER ajustados en dos frecuencias (532nm y 1064nm), utilizan la virtud de la interferencia constructiva con longitudes de onda proporcionales en este caso encuentran su razón a la mitad.

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{h\nu_{21}}{k_B T}}$$

E13. Relación de la transmisión de energía de radiación entre dos medios, el emisor y el medio estimulado.

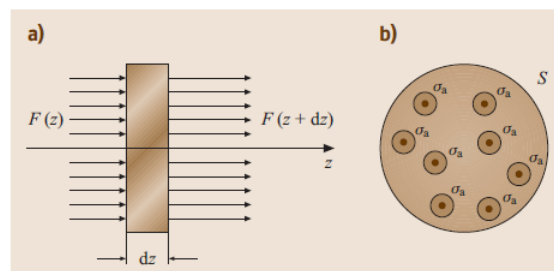


Fig. 11.3a,b Coherent amplification of an EM wave. **(a)** Photon flux-balance diagram in an infinitesimal section dz of the amplifier. **(b)** Physical meaning of the transition cross section

F15. Sección transversal de haces de luz polarizados.

4.8.1-Sistemas de Estimulación

De acuerdo a Träger(2007) En un LASER se dan tres fenómenos fundamentales cuando una onda electromagnética interactúa.

La **emisión espontánea** (1) se da cuando dos niveles de energía de un determinado material que se encuentran en un nivel básico y el medio se donde encuentran esta en un nivel superior. Si un átomo cambia de estado y se excita, este decae súbitamente al estado básico y es emitida una onda electromagnética. El proceso lleva implícita una emisión radioactiva en donde la dirección, estado de polarización y la fase de la emisión son incoherentes si se compara con la población de ondas emitidas; en caso de no existir una emisión la energía interna puede disiparse en forma de vibración en el interior de un cristal. En La **emisión estimulada** (2) se da cuando existe una diferencia de estados entre los niveles, se da una estimulación para generar radiación electromagnética en donde la emisión estimulada tendrá características similares a la onda de radiación incidente, tal es el caso de la frecuencia ν , con la misma dirección de propág.ación, estado de polarización y fase. Por lo tanto es un fenómeno afín a la tecnología LASER en comparación con otras fuentes, por ejemplo LEDs(Light-emitting diodes). Finalmente La **absorción** (3) es la ausencia de perturbaciones, colisiones entre átomos o fotones; existe una probabilidad que este se mantenga estable y la energía de transición llamada fotón de la onda incidente es destruida.

Para que se dé la estimulación en un arreglo generador de LASER, es necesario establecer un proceso de bombeo, el cual es un comportamiento de equilibrio térmico en donde la absorción óptica a manera de inversión depositada se distribuye entre los niveles E_1 y E_2 .

En el momento en el cual domina la absorción sobre la emisión estimulada los procesos se compensan mutuamente y el medio se vuelve transparente, por ello y para evitar saturación, se plantean sistemas de niveles escalables.

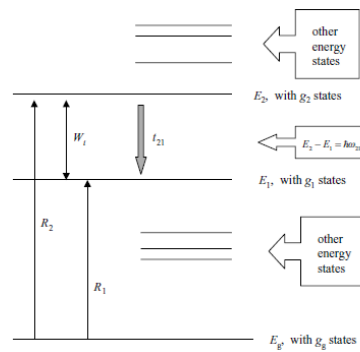


Figure 6.1. Pumping process in a material with many energy levels. This is a typical pumping scheme for a four-level laser. The four levels consist of the pump energy levels, the upper laser level E_2 , the lower laser level E_1 and the ground level E_g . The rate at which the population of E_2 is increased is R_2 . R_2 includes processes in which population from the ground state E_g is pumped to other energy states above E_2 , called the pump energy levels, and then the population in those states is relaxed from pump energy levels to E_2 . R_1 is the rate at which the population of E_1 is increased. Populations of the energy levels below E_1 usually have no effect on pumping.

F16. Esquema básico de generación de un LASER por medio de bombeo energético entre dos medios con diferentes propiedades.

Existen diferentes arreglos de Laser en diferentes niveles y arreglos los cuales se describen a continuación en Eichhorn (2013):

4.8.1.1-Sistema de dos Niveles

Este se realiza a través de bombeo óptico y la absorción que propicia un estado estacionario de emisión. Ambos medios tenderán en un bombeo infinito a que los índices de refracción tengan el mismo peso, pero este efecto negativo es solamente óptico y en la mecánica cuántica se dan otros procesos de bombeo químicos, cargas y cambios de nivel energético, lo cual genera un sistema de bombeo que mantiene su potencial de bombeo.

$$\Rightarrow \frac{N_2}{N_1} = \frac{B_{12}u(\nu)}{B_{12}u(\nu) + A_{21}} < 1 \quad \forall \quad u(\nu) > 0 .$$

E14. Ecuación de transferencia de energía radiante entre dos medios o de potencial de bombeo.

4.8.1.2-Sistema de tres Niveles y cuatro Niveles

Para atenuar los efectos que pueden propiciar que el bombeo cese debido a la emisión espontanea, que puede hacer que N_2 sean menor que N_1 . Se plantea el sistema de tres niveles. Para lograr este sistema se debe evitar la emisión estimulada en la onda de bombeo. Esto se logra si la emisión estimulada se lleva hasta el nivel más bajo con otra longitud de onda tal como ocurre en el caso de la absorción en la onda bombeada.

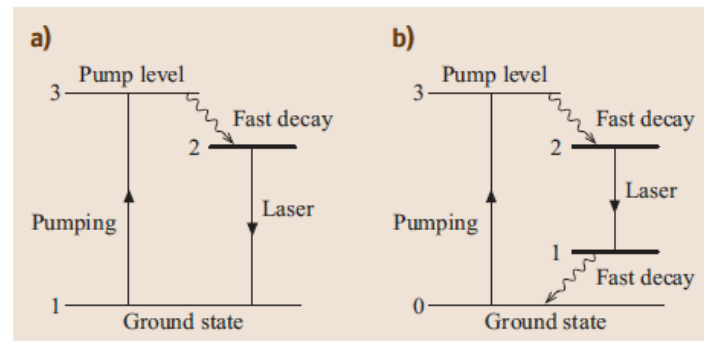


Fig. 11.4a,b Schematic of the energy-level diagram for (a) a three-level laser, and (b) a four-level laser

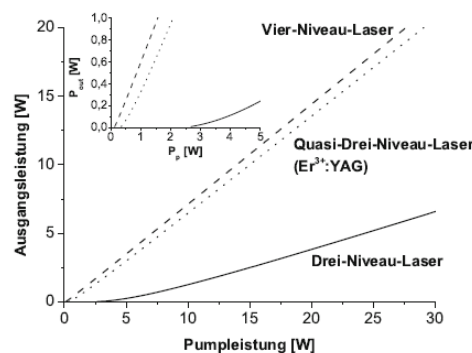
F17. Sistemas de niveles de bombeo LASER.

El mismo procedimiento es aplicado para un cuarto nivel haciendo un cambio adicional en la longitud de onda, para los efectos de este trabajo se muestra solamente la ecuación para un nivel sistema de tres niveles.

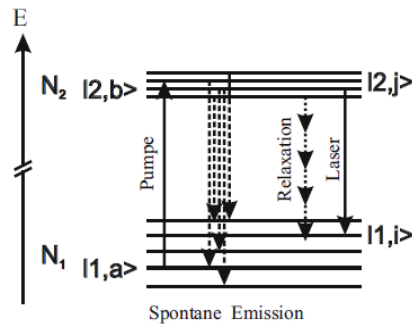
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{W_p + W_{21}}{A_{21} + W_{21}} > 1 \quad \text{für} \quad W_p > \frac{1}{\tau_2}$$

E15. Sistemas de niveles de bombeo LASER.

Existen otros arreglos como el sistema de Quasi tres niveles en donde se bombea mínimamente la emisión espontanea para originar la diferencia de longitud de onda, algunos materiales son propicios para este fenómeno por ejemplo. Nd^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} oder Ho^{3+} .



F18. Curva de rendimiento de bombeo en diferentes materiales.



F19. Esquema de bombeo llamado Quasi 3 niveles.

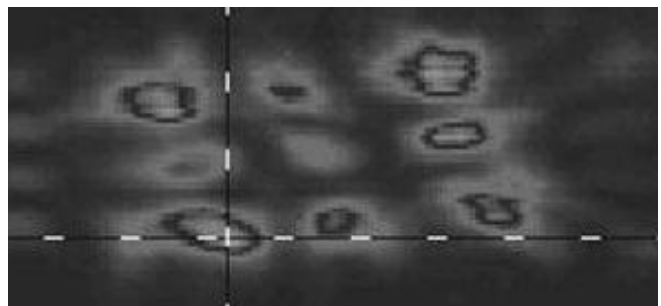
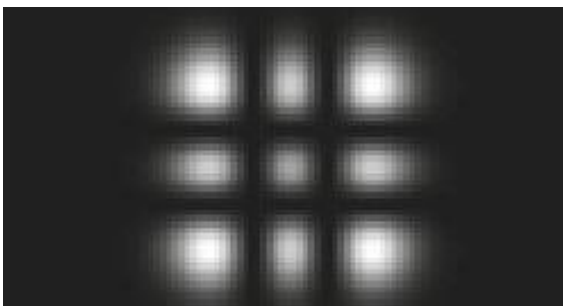
Para que la amplificación G sea efectiva y se de la emisión espontanea, existen condiciones necesarias tales como un espejo de desviación que tenga una alta reflectividad, además de incorporarle un resonador óptico al sistema que tenga una reflectividad menor a la que tiene el estimulador para poder presentar las condiciones de longitud de onda.

4.8.2-Resonadores

Para que se dé la difusión de la luz es necesario utilizar **Resonadores**, los más evidentes son los lineales de espejos con los cuales se reenfoca un volumen resonante en una forma esférica. Los Resonadores pueden hacer las veces de juegos sin fin de lentes utilizando las propiedades geométricas de la concavidad. Matemáticamente el arreglo de espejos para multiplicar la cantidad de rayos se representa por un arreglo de matrices. Como ejemplo de este fenómeno se puede recordar el incendio de papel con una lupa a través de la cual se multiplican la cantidad ondas que interactúan manifestándose en calor en el papel.(Eichhorn, 2013).

$$M_S = M_N \cdot M_{N-1} \cdot \dots \cdot M_1 = \prod_{i=1}^{\overleftarrow{N}} M_i$$

E16. Matriz de bombeo para n niveles.



F20 En la figura(a) se observa un nuevo patrón de emisiones LASER. Un sensor TEM es capaz de medir la intensidad de dicho patrón.

Nuevos patrones se han desarrollado con los materiales modernos, en la figura un LASER Cr²⁺: ZNSE al cual se le ha medido la intensidad. La figura derecha muestra la sensibilidad de un sensor de ondas TEM⁵⁵ (transverse electric and magnetic waves) para capturar la intensidad similar al telescopio de un sistema LIDAR, esta analogía permite analizar si la radiación LASER fue difractada, deflectada o reflectada por medio de retículas, hologramas o componentes ópticos de apertura finita. (Chang, 2005).

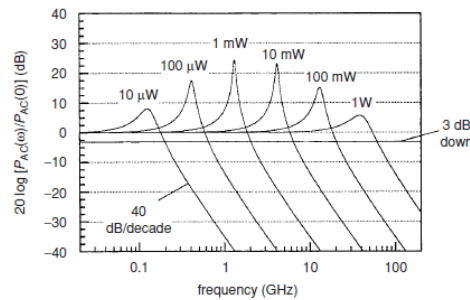
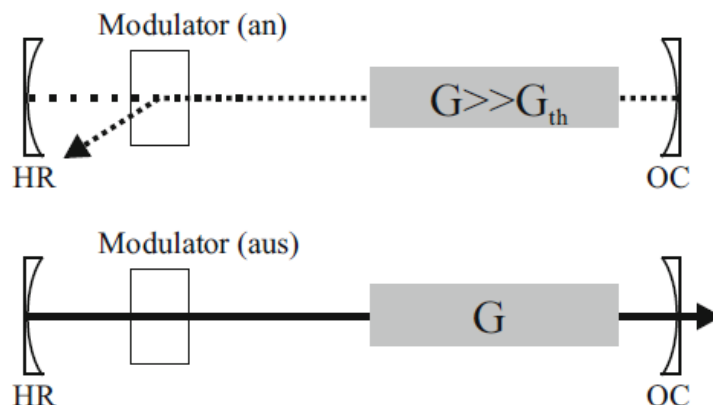


Figure 7.8. Frequency response of an idealized diode laser at various output power levels. The resonance peak and the damping of the resonance depend on the output power level. The resonance effect limits the highest frequency at which a diode laser can be modulated directly by current without serious distortion. Details about the active region and laser cavity are given in ref. [6], from which this figure is taken, with copyright permission from John Wiley and Sons.

G7. Picos de resonancia para diferentes frecuencias en un diodo idealizado.

4.8.3-Pulsos o Q-Switching

Son longitudes de onda generadas a partir de la modulación del resonador dependiendo de la fase en la cual se encuentra el bombeo de resonancia. Mientras el modulador se encuentra en posición se generaran pulso en una longitud de onda diferente. El modulador funciona como un condensador que propicia el cambio de las propiedades de los pulsos modulados en una fase de tiempo. (Eichhorn, 2013a)



F21. Esquemas de las posiciones de encendido y apagado un modulador.

⁵⁵ Las interacciones de radiación LASER se aproximan a ondas TEM cuando la dimensión de los aparatos es mucho más grande que la longitud de onda (Chang, 2005)

Para incrementar la pulsación se utiliza la técnica de amplificación de pulsos intermitentes, la generación de estos pulsos de alta energía que al principio se encuentran alrededor de 80 MHz y en el orden de los nano-Joules de energía, van a pasar en una rejilla no paralela a un estado de amplificación aumentado en un factor de 3000, lo cual tiene injerencia en la disminución de la capacidad de propagación los pulsos. Los pulsos de entrada son amplificados a través de un polarizador de resonadores internos. Los materiales de LASERs Ti:Safair que se ven reforzados con un par de prismas para compensar la dispersión interna en una polarización perpendicular que es lograda por el segundo. Finalmente el pulso de alta energía es comprimido a pulsos cortos, para que la rejilla no dañe el rayo se debe generar un diámetro de rayo agrandado, con el cual sea requerida una mayor apertura de rejilla. (Eichhorn, 2013a). Controlar la estabilidad de esta ganancia G es difícil y por ello la amplificación debe ocurrir en una rango cercano de longitudes de onda, por ello se aumenta el ruido ⁵⁶para no tener que filtrar todas la emisiones espontaneas amplificadas, adicionalmente debido a que en la interacción ya existe un aumento de ruido y porque existe interferencia la señal y la le emisión espontanea, con el fin de evitar el retorno en la reflexión se puede tener una distancia corta de propagación para el emisor LASER con la reflexión reducida.(Chang, 2005)

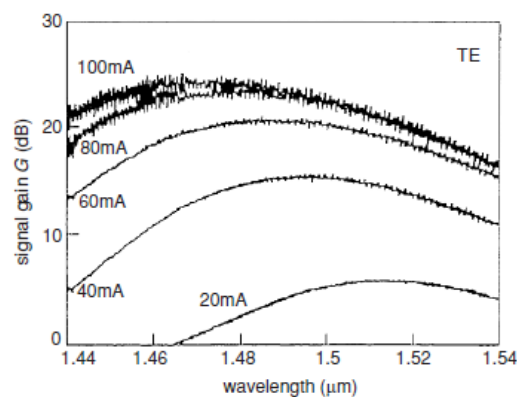


Figure 7.9. Amplifier gain versus signal strength for several current levels applied to a semiconductor amplifier. The figure is taken from ref. [11], with copyright permission from Kluwer.

G8. Ganancias de amplificación en la señal.

⁵⁶ Interferencia

4.8.4-Laser en estado solido

En respuesta a las interrogantes de los LASERs mencionados en los diferentes sistemas descritos en el **capítulo 3**, este trabajo describe el material en estado sólido con el cual se generan los pulsos de luz coherente y polarizada estimulada con resonancia, con el objeto de tener una idea de las propiedades involucradas en la emisión de los rayos que posteriormente interactúan con la materia y hasta donde tienen injerencia los materiales en cierto rango de longitudes de onda, si estos son ajustables y a su vez si es posible realizar Q-switching con los mismos para plantearse encontrar resultantes de reflexiones diferentes para el mismo punto P en cualquiera de los retornos que permite la tecnología LIDAR. (Eichhorn, 2013).

El LASER de tipo Slab (por ejemplo Nd:glas,Nd:YAG)es fabricado con una sección transversal rectangular y en condiciones ideales es bombeado y enfriado a través de dos secciones opuestas paralelas, de esta manera se genera una propagación zig-zag. Este arreglo Slab de baja conductividad de calor, hace que opere como un oscilador y amplificador de baja distorsión para Q-Swtching; haciendo posible la generación de pulsos ultra cortos. (Liu and Jones, 1984)

Los metales de transición son materiales de la tercera, cuarta y quinta columna de la tabla periódica. Mientras de la tercera columna se comportan como iones de transición (Fe,Ti al Cu)estables para un entorno cristalino estos iones-metales de transición son ajustables para generar radiación en un rango espectral amplio que generalmente se da desde la frecuencia visible ,el infrarrojo cercano y el medio(desplazándose entre 650nm y 4500nm) ; sobre todo en LASERs Ti3+ especialmente (Ti3+:Al2O3), Cr3Cr4+ ,Cr2+, Co2+ y Ni2+.

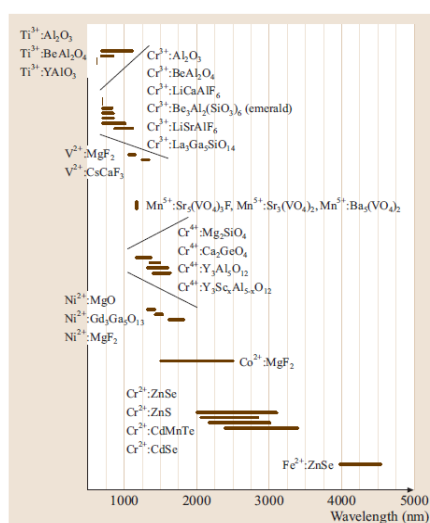
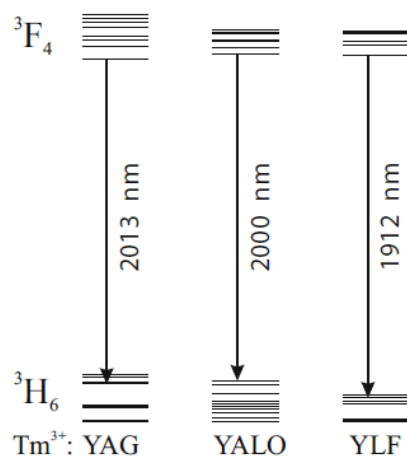


Fig. 11.77 Overview of tunable solid-state lasers based on transition-metal-ion-doped crystals

G9. Rango operacional de LASERs en estado solido

Existen diferentes arreglos relacionados a la escalabilidad de los sistemas para poder encontrar el *High Average Power*(HAP); la cual está dada por el rendimiento o la intensidad por unidad de área bombeada, ante determinada potencia(Brown, 2005). Esta capacidad HAP, depende de los materiales huéspedes y sus propiedades (conductividad térmica, esfuerzo limite, coeficiente de expansión, radio de Poisson, modulo de Young's entre otros.) presentes en un Slab.

En los diagramas siguientes delimitan los componentes y el Workflow del sistema; así como el comportamiento HAP (que es un rendimiento y no una eficiencia) para diferentes arreglos en Slab.

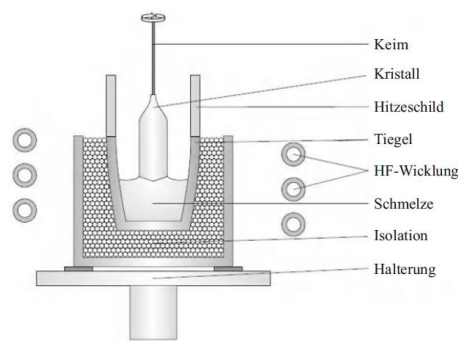


G10. Materiales usuales de LASERs en estado solido

En el esquema es posible ver longitudes de onda de operación par diferentes combinaciones de material huésped para el Tm3+.

En general pueden existir dos materiales de materiales huéspedes y dos materiales de iones activos, para un cristal y un vidrio; así como para otros escasos materiales de la tierra y de transición. En capa *4f* en de las orbitas atómicas es donde se da la actividad LASER en el estado electrónico del ion, mientras se protege con los electrones externos *5s* y *5p* en el caso de cristales. En el espectro de los iones escasos en los cristales terráqueos son diferentes las líneas de transición de niveles fuertes. El cristal se vuelve adecuado para la generación de pulsos ultra cortos y emisiones variadas debido a la distribución no homogénea en el espectro de la distribución de emisiones (Eichhorn, 2013).

Para hacer crecer los cristales LASER se aplica el método de Czochralski.



F22. Esquema del método de crecimiento cristalográfico de Czochralski

En el caso del cristal YAG, Ytiro-Aluminio-Granat ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) que es una mezcla de los escasos óxidos del planeta, se le anade Óxido de Neodimio que determina la cristalización que el material de concentración por ejemplo Iridio, el cual se derretirse a una temperatura alta, es enfriado con agua externa por inducción. Pocas veces se genera un monocristal, sino más bien muy despacio se posibilita el crecimiento del cristal. (Eichhorn, 2013a)

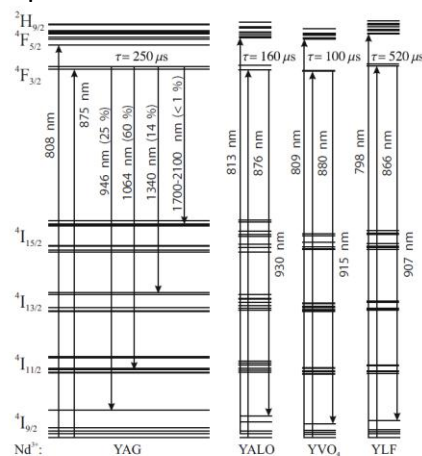


Abb. 5.5 Energieschema der Nd^{3+} -Ionen in verschiedenen Wirtsmaterialien und der wichtigste Pump- und Laserübergang.

G11. Combinación de Iones con diferentes materiales y las características del rango de emisión para cada tipo.

4.8.4-El LASER Nd:YAG

El Nd:YAG, un material que por sus propiedades físicas y químicas, ha sido muy utilizado en desde hace 40 años en el mercado LASER de estado sólido. Este material no solo presenta propiedades de operación adecuadas sino también tienen un desempeño en el crecimiento de cristal. Tiene resistencia al daño pues su punto de fusión es alto sin perder la conductividad, por lo que se puede estabilizar la disipación en el crecimiento de la cristalización. El arreglo geométrico *Slab* presenta pocos problemas de distorsión térmica y sus efectos en el rayo (Bruni, 1984).

4.8.5-Detección

Luego de que Hertz pudo generar radiación electromagnética en forma de luz visible a través una inducción de alto voltaje en 1886, se hicieron numerosos intentos para explicar o medir dichos efectos. En 1899 Thomson realizó un experimento de fluorescencia con luz ultravioleta, la cual hacía que se emitieran electrones en una placa de metal, generando para 1902 el estudio de Lenard de las diferentes intensidades emitidas. Finalmente en 1905 Einstein determinó que existe una frecuencia mínima de luz para la cual un material emite electrones y esto fue llamado el “Photoelectric effect”. Bajo este principio funcionan los **detectores fotovoltaicos** en donde se genera un potencial a través de una región activa que detecta los diferentes tipos de carga foto generada y los **detectores foto-emisivos** que capturan el efecto fotoeléctrico de manera externa; mientras los **detectores térmicos** utilizan la energía de la luz absorbida para generar ese potencial. En un principio la captura de la imagen o **fotografía** se desarrolló en base a una química reactiva a las ondas de absorción en un microcristal. La traducción era la reacción química reflejada en el material, en la actualidad la traducción de una captura de ondas se refleja en la generación de corriente en un **equipo de transferencia de carga** que luego pueden almacenarse y someterse a un procesamiento digital. (Träger, 2007).

Como ejemplo se pueden mencionar los arreglos de dos detecciones en un sistema Raman, uno que captura la onda de luz fluorescente con una fibra óptica y la imagen se es intensificada en el telescopio, por medio de un espectrómetro se despliega en un intensificador de imagen CCD⁵⁷, el cual es utilizado en cámaras convencionales. En este tipo de arreglos el objetivo es hacer una partición del rayo para capturar las bandas individuales a través de filtros que también pueden ajustarse a las condiciones de iluminación de fondo. Con este sistema es posible detectar señales de clorofila para identificar la Reflectancia de vegetación y a su vez la absorción incrementa el nivel de pigmentación para tener un monitoreo con más información. Esta aplicación está siendo muy utilizada para el monitoreo por sensores satelitales (LANDSAT, SPOT Y ENVISAT) para una evaluación de Land Cover. (Träger, 2007). Es común encontrar los histogramas que describen las firmas espectrales de una colección de geodatos y en el caso LIDAR es posible graficar no solo con la representación cuantitativa sino también con la cualitativa en la representación numérica de la característica llamada intensidad.

4.8.5-Interacciones del LASER Y LIDAR

La ecuación general LIDAR sirve para calcular el *power* en un medio distribuido, esta señal de poder es adquirida por un foto-detector en donde t es el tiempo de duración del pulso y P_0 está vinculado al coeficiente de retrodispersión en un rango r en una frecuencia determinada λ . El área que recibe en este medio es A , c está relacionado a la velocidad de

⁵⁷ CCD (Charged Coupled Device) es el principio de un arreglo de píxeles para generar cargas en un determinado tiempo que puedan ser digitalizadas y almacenadas. (Träger, 2007)

la luz en el vacío; mientras n es la eficiencia óptica de la superficie. Los términos encerrados en la integral están relacionados al espesor óptico integrado (profundidad de interacción de la superficie) que actúan como fuentes de extinción. (Menzies, 1984). Esta extinción es una disipación de energía transmitida, absorbida y reflejada que son los elementos clave para realizar un balance en un intercambio de energía de esta naturaleza.

$$P(r) = P_0 \eta \left(\frac{A}{r^2} \right) O(r) \left(\frac{ct}{2} \right) \beta(r) \exp \left[-2 \int_0^r \alpha(r') dr' \right]$$

E17. Ecuación general LIDAR

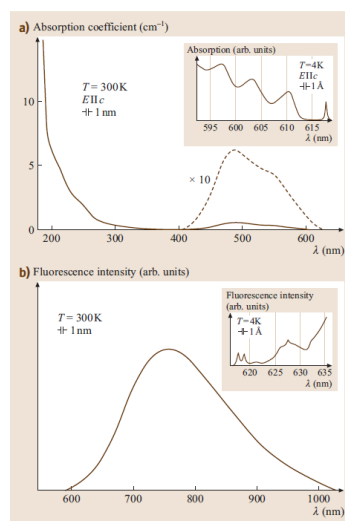


Fig. 11.80a,b Absorption (a) and emission (b) spectra at room temperature and at 4 K of Ti:sapphire. (After [11.948])

G11. Gráficos de absorción y emisión para una señal determinada.

4.8.5.1-Elastic Backscatter Lidar

Tal como se menciona en la **sección 3.5.1** una interacción elástica espera que se mantengan constantes los valores de longitud de onda y existe una idea concreta de los valores de intensidad esperados en un orden de longitudes de onda (**λ-4**). En el caso de interacciones con partículas tiene injerencia en el valor de intensidad el radio de la misma.

$$P(R) = \frac{E_0 \eta_L}{R^2} O(R) \beta(R) \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r) dr \right].$$

E18. Ecuación de Power LIDAR para calcular la retrodispersión elástica. El Power está en función del radio de partícula R para cada una de las partículas con las cuales mantuvo la interacción y la exponencial considera la reducción por las pérdidas en el proceso.

4.8.5.2-High Spectral Resolution Lidar(HSRL)

Es posible combinar la retrodispersión en dos imágenes con espacial y temporal resolución y con esta doble frecuencia se encuentra con el azaroso movimiento térmico. Así las partículas que se mueven a 300m/s producen movimientos de rebote a una frecuencia de 1GHz mientras bajas velocidades (viento y turbulencia) promediadas a 1-10m/s producen frecuencias de rebote de 3-30 MHz. Al poder censar los diferentes tipos de manifestaciones en un estrecho margen de opciones es posible minimizar el ruido ⁵⁸(distorsión) provocado por bloque lumínico del sol. (Brown, 2005). Con esta información es posible establecer patrones del comportamiento de ciertas partículas relacionado a la dispersión que ocurre a temperaturas variadas, la representación de este comportamiento permite a su vez identificar los promedios presentes de las mismas en un tiempo similar aproximado al mismo espacio muestral.

Como ejemplo de esta resolución se tiene la *Conversión de Onda Raman vía SRS(Stimulated Raman Scattering)*. Esta técnica tiene numerosas aplicaciones para condensación, diagnostico de plasma e investigación molecular en la femto-química. El efecto Raman es un proceso inelástico en donde se involucran las múltiples vibraciones moleculares, atómicas y iónicas que generan un scatter inelástico con una amplitud ,estado de polarización y fase cambiado de las ondas aumenta las coherentes de los aportes y anti-aportes de longitud de onda (stoke and anti-stoke). (Träger, 2007). Cuando un fotón interactúa con el medio y se refleja con menos energía y mayor longitud de onda que el estado inicial y el medio incidido se queda en un estado de excitación; cuando el medio estaba excitado se da el efecto contrario y es el fotón disperso el que deja el medio con más energía que cuando llego, con una longitud de onda menor (proceso anti-stoke⁵⁹). La técnica Raman está disponible teóricamente con cualquier fuente de LASER bombeado para *remote sensing* (F.J. Bruni, 1984).

La HSRL se apoya en las propiedades elásticas, las cuales hacen que se mantenga la energía del pulso en la interacción y estableciendo una escala basándose en la energía vibracional-rotacional de las partículas. Es posible realizar a través de filtros⁶⁰ y la separación de *bandas(channels)* sin perder la medición de la retrodispersión total, una medición estrecha del promedio de partículas presentes en un sistema LIDAR. Raman opera de noche (solar blind Lidar) con longitudes de onda por debajo de los 300nm. No es apropiado utilizar este sistema en zonas de alta absorción de radiación por parte del Ozono mas allá de la tropósfera; pero con filtros adecuados para una resolución temporal y espacial adecuada

⁵⁸ Está relacionado a la modificación de la onda. Un caso es la disipación de la misma (Träger, 2007)

⁵⁹ Para 1984 no había sido muy explotado y no es objeto de estudio en este trabajo.

⁶⁰ Ansmann(2005) menciona como ejemplo el uso de filtros de vapor de agua

puede operar de día como el sistema Rayleigh ⁶¹LIDAR. Con la aplicación de Raman en el sistema HSRL se pueden separar las contribuciones de retrodispersión para determinar un coeficiente de extinción de partículas. (Ansmann, and Müller, 2005). Es posible converger en los promedios directrices de emisiones radiantes presentes en la retrodispersión en cada una de las diferentes temperaturas teniendo en cuenta que no existen otras pérdidas en la interacción.

$$S(R)L_{\text{aer}}(R) \exp \left\{ -2 \int_0^R [L_{\text{aer}}(r) - L_{\text{mol}}] \beta_{\text{mol}}(r) dr \right\} \\ = E_0 \eta_L Y(R) \exp \left[-2 \int_0^R Y(r) dr \right].$$

E18. Ecuación LIDAR ajustada a la HSRL. El Power para estas partículas de aerosol ha considerado las pérdidas que se dan en la interacción con el promedio de las mismas (ratio) y es igualado a la capacidad de reflexión con una determinada eficiencia óptica en la superficie.

4.8.5.3-Interacción especial BELINDA (Broadband Emission LIDAR with Narrowband Determination of Absorption)

El principio de Belinda puede reconocer la concentración de un gas o de vapor a través de la absorción en una interacción elástica⁶². Esta materia no se encuentra precisamente en equilibrio térmico, por lo que la distribución de Maxwell no aplica en este estado caótico y gracias a este sistema es posible tener información de estado en esas concentraciones identificadas a través de la ampliación y reemplazamiento de banda (infrarroja entre 700nm y 900nm) que diferencia a BELINDA de DIAL; así como la estabilización de longitud de onda en el proceso transmisión-recepción. La dispersión de espectro en las moléculas de aire y aerosol es casi idéntica, a través de la amplificación se posibilita la diferenciación de propiedades. A través de la absorción en el vapor de agua de la luz con longitud de onda cercana a los 720nm, se puede modelar en puntos idénticos la intercepción de los espectros y sus efectos. (Theopold et al., 2005).

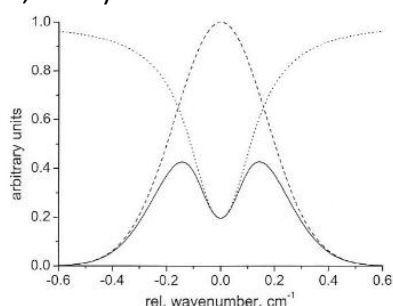


Fig. 14.1. Backscattered spectrum (solid line) of a broad laser emission line (dashed) attenuated by the absorption feature (dotted). No broadening assumed.

G12. Grafico de Retrodispersión, emisión y absorción para BELINDA.

⁶¹ Sistema o banda utilizada para medir comportamiento molecular, que representa temperatura independiente a la banda de energía rotacional y la banda vibracional, entre otras. Se aplica de día y de noche. (Andreas Behrendt, 2005)

⁶² Reflexión elástica se revisa en el capítulo 3.

4.8.5.3.1-Transmisión y Recepción BELINDA

La **transmisión** BELINDA se da sin un reemplazamiento de longitud de onda. La ventaja, más allá de los efectos de operación que implica utilizar un único LASER, radica en que no se genera superposición de ondas que puedan generar interferencia como en el caso de DIAL. Adicionalmente no se utiliza una energía diferente para generar diferentes amplificaciones y en esta selección de longitudes de onda no interfieren los pulsos individuales, solamente al integrarse en un perfil que puede generarse teóricamente en un infinito número de variables. Esta estabilidad produce una inexactitud de frecuencia central de Laser de +/- 0.11cm⁻¹ lo que deviene en un error de 0.5%. En la **recepción** si se añaden filtros para capturar dispersión amplificada y no amplificada, se puede delimitar un centro de absorción de resonancia y a partir del mismo se puede establecer una simetría en donde las longitudes de onda se desplazan alrededor de +/-0.05cm⁻¹. Adicionalmente es posible utilizar un filtro que funciona como interferómetro de no resonancia, el cual permite contar con información (inclinación de longitud de onda) de ajuste para que el proceso transmisión-recepción sea estable.

Table 14.1. Comparison of main characteristics of the BELINDA with those of a usual DIAL setup

Property	BELINDA	DIAL
Aerosol correction	Not mandatory	Required
Data evaluation where $O(z) \leq 1^\dagger$	No restriction	Difficult
Sensitivity to ASE*	Low	High
On/off pulse delay Δt	Not applicable	$200 \mu s \leq \Delta t \leq 1 \text{ ms}$
Number of laser(s)	1	2, or 1 with switching
Number of optical axes	2 (laser + telescope)	3 (2 lasers + telescope)
Usable laser power	7%	100%
Laser spectral requirements[‡]		
Bandwidth (HWHM)	0.200/0.100 cm ⁻¹	0.013/0.005 cm ⁻¹
Line center accuracy	0.020/0.010 cm ⁻¹	0.005/0.002 cm ⁻¹

[†] $O(z)$: overlap integral, *ASE: amplified spontaneous emission, [‡]for 1% systematic error on water vapor/temperature

T14. Cuadro comparativo de las propiedades BELINDA y DIAL.

Table 4.1. Properties of aerosol types [1]^a

Aerosol type	N (cm ⁻³)	r_{eff} (μm)	ssa (0.55 μm)	g (0.55 μm)	$\tilde{a}$ (0.35–0.55 μm)	$\tilde{a}$ (0.55–0.8 μm)
Cont. clean	2600	0.247	0.972	0.709	1.10	1.42
Cont. average	15,300	0.204	0.925	0.703	1.11	1.42
Cont. polluted	50,000	0.150	0.892	0.698	1.13	1.45
Urban	158,000	0.139	0.817	0.689	1.14	0.43
Desert	2300	1.488	0.888	0.729	0.20	0.17
Marit. clean	1520	0.445	0.997	0.772	0.12	0.08
Marit. polluted	9000	0.252	0.975	0.756	0.41	0.35
Marit. tropical	600	0.479	0.998	0.774	0.07	0.04
Arctic	6600	0.120	0.887	0.721	0.85	0.89
Antarctic	43	0.260	1.000	0.784	0.34	0.73
Stratosphere (12–35 km)	3	0.243	1.000	0.784	0.74	1.14

^aNumber concentration is denoted by N . The effective radius r_{eff} describes the mean size of the particle ensemble. The single-scattering albedo ssa is defined as the ratio of total scattering to extinction of the investigated particle ensemble. The asymmetry parameter g is a measure of light scattered toward the forward direction compared with the light scattered toward the back direction. The Ångström exponent $\tilde{a}$ [2] describes the spectral slope of the optical coefficients. All numbers hold for a relative humidity of 80%. Effective radius is calculated for 50% relative humidity. A further discussion of some of the parameters is given in Section 4.3.

T15. Algunas propiedades de las partículas en base al desarrollo LIDAR.

Capítulo 5

Land Cover y Clasificación Corine Land Cover en El Salvador

5.1-CORINE Land Cover en El Salvador.

Las coberturas en el salvador son clasificadas actualmente a través de la metodología CORINE Land Cover y para ello se ha realizado una adaptación de las clases presentadas en el **capítulo 2**. Con esta convención se trabajo el mapa llamado “uso de suelos” basado en imágenes de satélite LANSAT 7 ETM con 15m de resolución en enero de 2002, a partir del banco de información del IGN (Instituto geográfico nacional) en el periodo comprendido entre 1970-2002. (MARN, 2002). La siguiente tabla fue elaborada en base a la adaptación realizada por MARN (2002) en donde las clases CORINE han aumentado.

1. Territorios artificiales (5 Ha)	1.1. Zonas urbanizadas	1.1.1. Tejido urbano continuo 1.1.2. Tejido urbano discontinuo 1.1.3. Tejido urbano precario
	1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	1.2.1. Zonas industriales o comerciales 1.2.2. Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados 1.2.3. Zonas portuarias 1.2.4. Aeropuertos 1.2.5. Areas turísticas y/o arqueológicas
	1.3. Minas, escombreras y zonas en construcción	1.3.1. Zonas de extracción minera 1.3.2. Escombreras, vertederos y rellenos sanitarios 1.3.3. Zonas en construcción
	1.4. Zonas verdes artificiales, no agrícolas	1.4.1. Zonas verdes urbanas 1.4.2. Instalaciones deportivas y recreativas

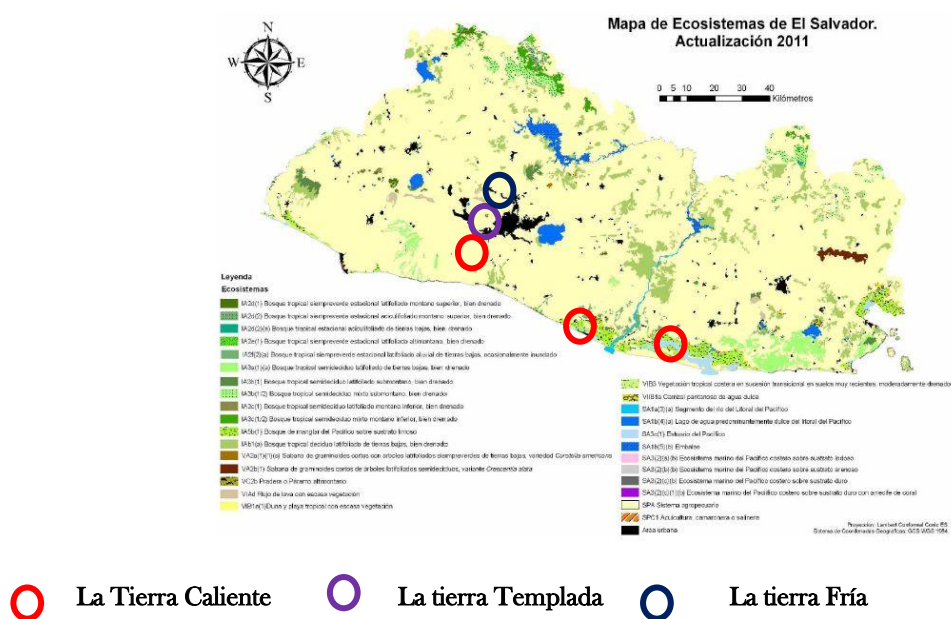
2. Territorios agrícolas	2.1. Cultivos Anuales 2.2. Cultivos permanentes 2.3. Pastos	2.1.1. Cultivos No Irrigados 2.1.1.1. Granos básicos (maíz, arroz, frijol, maicillo, trigo) 2.1.2. Cultivos Irrigados 2.1.2.1 arrozales de submersion 2.1.2.2 otros cultivos irrigados 2.1.3. Hortalizas 2.1.4 Algodón 2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos 2.2.1.1 Platanales y bananeras 2.2.1.2 Henequén 2.2.1.3 Piña 2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos 2.2.2.1 Café 2.2.2.2 Kenaf 2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos 2.2.3.1 Palmeras oleíferas 2.2.3.2 Cacao 2.2.3.3 Hule 2.2.3.4 Arboles Frutales 2.2.3.5 Plantaciones de Frutales asociadas con otras especies arbóreas 2.2.4 Cultivos permanentes de plantas à tallo 2.2.4.1 Caña de azúcar 2.2.4.2 Cardamomo 2.3.1. Pastos cultivados y potreros 2.3.2. Pastos naturales 2.3.2.1 Pasto Natural Seco 2.3.2.2 Morrales en Potreros 2.4. Zonas agrícolas heterogéneas 2.4.1. Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes 2.4.2. Mosaico de cultivos 2.4.3. Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes 2.4.4. Sistemas agroforestales
--------------------------	--	---

3. Bosques y medios seminaturales	3.1. Bosques	3.1.1. Bosques de Latifolias
		3.1.1.1 Bosques caducifóleos
		3.1.1.2 Bosques siempre verdes
		3.1.1.3 Bosques mixtos semicaducifóleos
		3.1.2. Bosques de coníferas
		3.1.3. Bosques mixtos
	3.2. Medios con vegetación arbustiva y/o herbácea	3.1.4. Bosques de mangle
		3.1.5 Plantación de bosques monoespecíficos
		3.1.6. Bosques de Galería (a orillas de ríos y quebradas)
		3.2.1. Vegetación Herbácea Natural (Sabana)
		3.2.2. Vegetación arbustiva baja (Matorral)
		3.2.3. Vegetación esclerófila chaparral o espinoso
4. Zonas húmedas	3.3. Espacios abiertos, sin o con poca vegetación	3.2.3.1. Vegetación esclerófila continental (no costera)
		3.2.3.2. Vegetación arbustiva
		3.2.3.3 Zonas ecotonales
		3.2.4. Bosques en transición
		3.3.1. Playas, dunas y arenales
		3.3.2. Rocoso, lavas
	4.1. Zonas húmedas interiores	3.3.3. Espacios con vegetación escasa
		3.3.4. Zonas quemadas
		4.1.1. Marismas interiores
		4.1.2. Praderas pantanosas
5. Cuerpos de agua	4.2. Zonas húmedas marítimas	4.1.3 vegetación acuática sobre cuerpos de agua
		4.2.1. Marismas marítimas
		4.2.2. Salinas
		4.2.3. Zonas llanas intermareales
	5.1. Aguas continentales	4.2.4 Perímetro aquícola
		5.1.1. Ríos
		5.1.2. Lagos, lagunas y lagunetas de agua dulce
		5.1.3. Lagos salados
	5.2. Aguas marítimas	5.2.1. Lagunas costeras y esteros
		5.2.2. Estuarios
		5.2.3. Mares y océanos
		5.2.4 Arrecifes coralinos

T16. Nomenclatura de CORINE Land Cover para El Salvador.

5.2-Land Cover en El Salvador

Se ha tomada la descripción de Lauer(1956) como base, porque está fundamentada en diferenciaciones concretas para cualquier especialista y los grupos se marcan fundamentalmente por la elevación, dicho aspecto es fundamental en la aplicación GIS, además de contar para el análisis del **capítulo 8**, con un DEM que proviene de un geoproceto de los geodatos LIDAR. En el Salvador existe una caracterización de ecosistemas apegada a las categorías fundamentales de la UNESCO que identifica con más detalle los ecosistemas sin embargo propone áreas protegidas sin necesitar un detalle de la cobertura y uso actuales, sino asignando una clasificación general “uso humano intensivo” que se destina a su recuperación.(World Institute for Conservation and Environment, 2011). Esta clase enfocada a un uso potencial no es realista para los fines de este trabajo que pretende identificar y clasificar las coberturas en CORINE a partir de geodatos LIDAR. En las conclusiones finales del **capítulo 8** se revisará como el aporte de este trabajo y posterior geoprocetamiento de datos LIDAR puede tener impacto en el mapa de ecosistemas de ESA (2011) y estas categorías UNESCO.



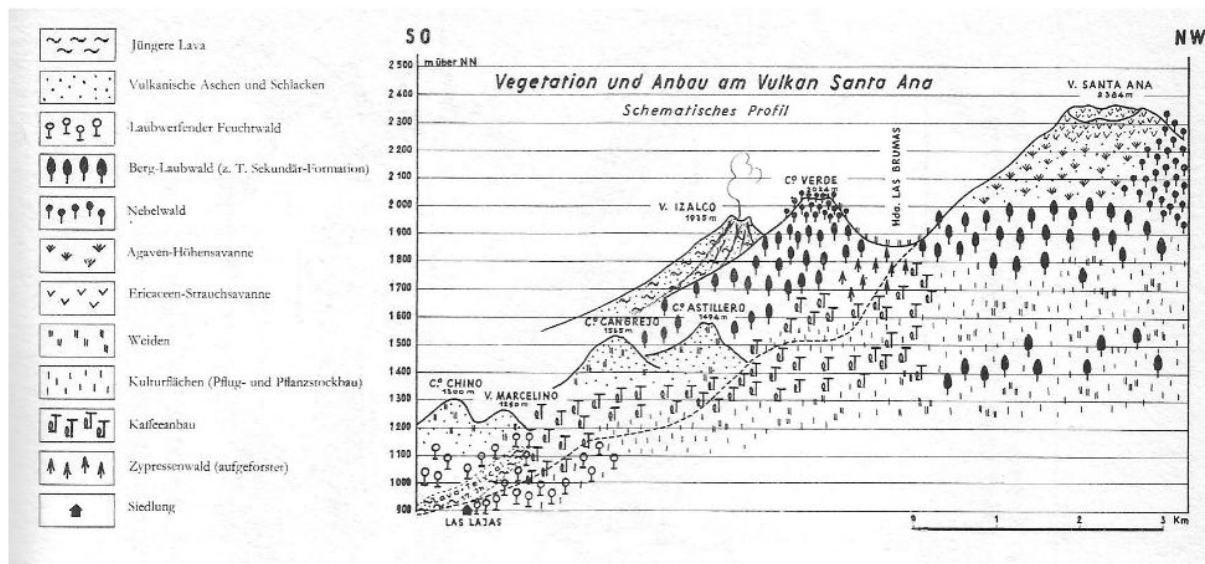
F23. Ecosistema de ESA con las zonas de trabajo señaladas.

Los restos de vegetación original de el salvador son pocos debido al uso intensivo de la tierra. Esta estaba constituida de elementos de vegetación similares a la que se puede observar en el puente terrestre de México a Panamá en el clima con variaciones de humedad en las condiciones climáticas, con estaciones de 6 a 7 meses de lluvia, con depresiones entre 1500mm y 2500mm; con temperaturas medidas que rondan de manera general entre los 10° y 27°, siendo la zona más húmeda del país la occidental en la frontera con Guatemala, mientras la más seca es la zona que colinda con el golfo de Fonseca al oriente.(Lauer, 1956).

Las coberturas existentes en el apartado anterior se presentan con cautela en función de la zona donde se encuentran y para ello Lauer (1956) establece tres zonas delimitadas por su altura sobre el nivel del fundamentalmente; aunque para definir tipos de vegetación y presencia de dichos tipos, tienen participación adicionalmente los factores de topografía, suelo y contenido de agua y de esta variación deviene el paréntesis considerado en el campo de altura de la siguientes tabla:

Clasificación	Altura(msnm)	Temperatura	Lluvia
Tierra Caliente	0-800(1000)m	22° y 27°	1700mm y 2000mm
Tierra Templada	800(1000)m- 1800(2000)m	17° y 23°	1500mm y 1700mm
Tierra Fría	Sobre 1800m	10° y 17°	1700mm y 2500mm

T16. Zonas geográficas de Lauer(1956)



F24. Perfil de los cambios de vegetación con la elevación. El concepto de perfil se ha incorporado en este trabajo con la selección de las zonas de prueba en un perfil que escala el volcán de San Salvador en dirección N desde el bosque caducifolio en la Libertad y en dirección NO desde el bosque de manglares en La Paz hasta llegar al picacho.

Clasificación	Vegetación Climático	Vegetación Edáfica
Tierra Caliente	Selva húmeda y Selva seca	Hidrófilas siempre verdes Bosque de río siempre verde Chaparrales y arbustos secos Morrales y arbustos de lluvia Manglares Vegetación de playa
Tierra Templada	Arboles Hojas(Bosque mixto) Bosque de montaña de lluvia	Henequén de sabana alta (También presente en tierra fría)
Tierra Fría	Bosque nebuloso siempre verde	Arbustos en la sabana alta (sabana de Henequenes) Plantas ericáceas

T18. Vegetación en la zonificación de Lauer.

En las siguientes secciones (**5.2.1, 5.2.2, 5.2.3**) se detallan los tipos de vegetación presentes en cada una de las zonas mencionadas y más adelante en (**5.3.1.1, 5.3.1.2, 5.3.1.3**) se establece un paralelo con las clases CORINE Land Cover para El Salvador. Las características físicas de estas superficies serán abordadas en el **capítulo 6** a la luz de fuentes de verificación actual y de la verificación en campo para tener una orientación en el plano de la realidad tangible y no solamente desde la interpretación teórica; así como la presencia de estas características serán delimitadas en las presentes en los geodatos LIDAR y en el **capítulo 7** desembocaran en un sistema de consultas SQL de los mismos.

De acuerdo a Lauer (1956) se han clasificado tres zonas de vegetación para El salvador:

5.2.1-La Tierra Caliente

En sus bajas alturas de entre *0 msnm* y *800(1000) msnm* muestra una gama de plantas en un clima húmedo cambiante donde se encuentran las plantas verdes de lluvia. Los suelos tienen un alto contenido de lluvia.

La selva húmeda y selva seca proporcionan el ritmo en la dinámica de las estaciones de estas zonas; ya que el espectro de plantas se da entre las plantas verdes de lluvia y bosques de hojarascas. Esta zona tiene presencia grande en el sur y el occidente del país en donde las pendientes de la montaña no descienden abruptamente sobre la costa. Es posible encontrar esta zona en otros sectores del país como al norte San Salvador y en el oriente, en este último se encuentran los datos de muestra representativos para esta zona. En las zonas que fueron cubiertas por la erupción del volcán al norte de la capital se presentaba una vegetación con árboles de 25m de altura y pobre en el sotobosque, con lianas y algunos

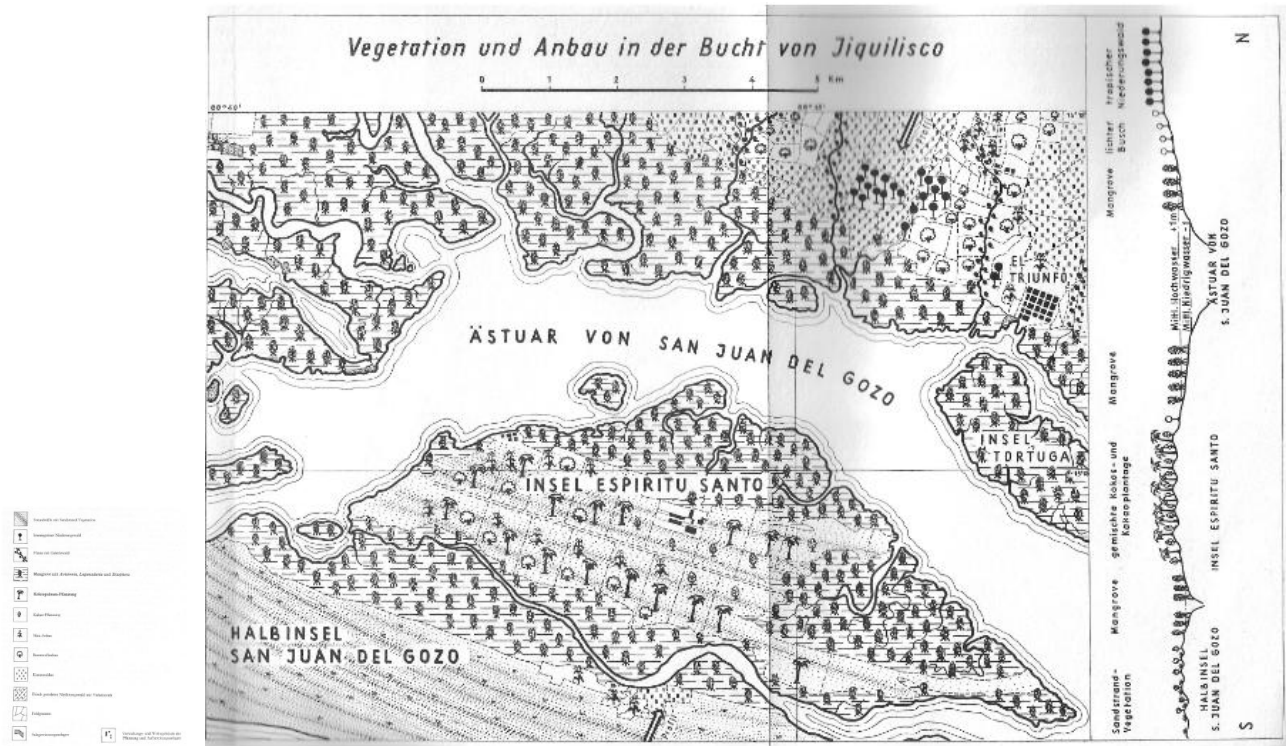
kaktus adaptados a la zona. En la variación de estaciones la fisionomía de la zona es muy diferente. Algunos árboles mudan su vegetación en su ciclo que se da en los meses secos. Por ejemplo la *Ceiba pentandra* que deja sus hojas mayormente en enero. En el límite superior de 100 msnm esta zona se encuentran *bosques húmedos* bajos en donde se dan árboles como el bálsamo y la existencia de este bosque se fundamenta en la existencia de una sobre oferta de agua con espesos mantos acuíferos, la cual dura hasta el inicio de la próxima temporada de lluvia. Es particular que la producción de hojarasca es imperceptible y cada árbol va en su propio ritmo. Se puede encontrar este tipo de bosque en las zonas fronterizas a las costeras que van presentando esa transición.

El bosque de río siempre verde se da en las riveras de los ríos, quebradas y cuerpos de agua. Debido a las formaciones rocosas y al entorno son víctimas en raros casos de actividades humanas; mientras el entorno, es más bien el de una sabana. Al final del tiempo seco se agotan en esta franja y pierden las hojas poco a poco y al mismo tiempo florecen. Esta formación de vegetación se da en Centroamérica y en El Salvador se da alrededor de los lagos de Coatepeque e Ilopango; así como en los alrededores de la selva húmeda y seca.

Existen otras zonas que pertenecen a la tierra caliente; tal es el caso de Los Chaparrales (arbustos secos) que son arbustos de entre 4-8 metros, en donde la mayor presencia es hierba y zacate. En El Salvador esta se da adicionalmente en aguas bajas y funcionan como coberturas impermeables, de otra manera estos suelos se erosionarían. Estas presentes como seguidores de la selva húmeda devastada en las llamadas ubicaciones primarias⁶³. Las zonas de *morrales y arbustos secos* presentan bastamente árboles pequeños crecidos de manera irregular con coronas llamados *morros*, estas zonas han sido sustituidos por pastizales debido a una influencia antrópica y la parte conformada por arbustos se mantiene pelada en la época seca. Esta formación se debe a la permeabilidad de agua y al estancamiento.

Los Manglares se dan gracias a una combinación de temperaturas óptimas en el trópico. Son plantas capaces de vivir en un medio salado y son levemente suministrados por el suelo. Conforman bosques en las zonas fronterizas entre el océano y la tierra firme en los estuarios del río grande de San Miguel y el Lempa; así como en las bahías de Jiquilisco, que es una de las zonas de muestra en el presente trabajo, y Jaltepeque y al oriente de Acajutla fronterizo con Guatemala. Es particular la presencia de manglares de tierra firme, el *Conarcapus erecta*, que se mantiene en islas secas entre otras especies. Cuando existe presencia excesiva de agua dulce en una zona de manglares, este reduce su presencia. Como ejemplo particular la erupción del lago volcánico de Ilopango que produjo una inundación de agua dulce en la costa de Jaltepeque, reduciendo la presencia del mangle de *Rizophora*.

⁶³ Lauer llama en alemán a estas zonas *Primarias* (Primärstandorte).



F25. Caracterización vegetal de Lauer(1956) en la zona de la bahía de Jiquilisco.

La Vegetación de Playa funciona por segmentos largos como murallas. En la zona entre Acajutla y la libertad existe una cadena montañosa por lo que solo se dan pequeños arbustos. Esta muralla encierra varias especies, tales como el *berro de mar* y se encuentran relativamente vulnerables a actividades humanas y esta formación se encuentra como ejemplo en la Herradura y en los blancos al occidente de Acajutla al oriente de la zona conformada de manglares.

5.2.2-La Tierra Templada

En las alturas entre 800 msnm y 1800msnm es donde se ubica la tierra templada sobre todo en el norte del país y están presentes bosques de pinos. En los volcanes jóvenes se dan los bálsamos y es allí donde se ha colmado de cafetales esta zona, la zona de estudio del presente trabajo se ubica en esta condición y está ubicada al sur del lago de Coatepeque. Los arboles de roble fueron característicos en el siglo XVI en la sierra de Apaneca en el occidente y en el oriente en Jucuarán y el volcán joven de Tecapa. Se pueden encontrar muchos elementos de vegetación de montaña como muestra de la vegetación original de El salvador. Los Robles son diversos y existen 12 especies distribuidos en las zonas mencionadas y el volcán de San Vicente. Los bosques de pinos y robles mixtos se dan en Montecristo que es una zona protegida fronteriza con Honduras y Guatemala, en donde los arboles alcanzan alturas de hasta 30m, los cuales son amenazados antropicamente por extracción de madera y tienden a parecer sabanas. Los pinos adicionalmente se distribuyen ascendiendo a los bosques nebulosos de la *tierra fría*, con suelos bien drenados y son arboles típicos de suelos pobres.

El bosque lluvioso de montaña está conformado por el árbol de Mezcal que está presente en zonas aisladas entre ellas el cerro del jabalí al lado del volcán de San Salvador, el sur este de San Vicente y la sierra de Apaneca.

5.2.3-La Tierra Fría

Influenciados por la niebla y la humedad de las nubes es posible el cambio de estado de vegetación entre los 1800msnm y 2000 msnm. Son pocas las zonas que alcanzan esta altura pero pueden destacar los picos de Montectristo, la zona norte del país en Chalatenango, las cumbres de algunos volcanes; entre estos el volcán de San Salvador en la zona más alta del picacho que es una de las zonas de estudio de este trabajo. Las temperaturas medias rondan los 17° y “no es extraño que se den temperaturas de congelamiento”(Lauer Wilhelm, 1956).

El siempre verde bosque nebulosos o de altura, en esta zona los arboles tienen una altura entre 25m y 30m conformada por *Bromelias* en donde se alojan varias especies de orquídeas. El suelo está cubierto poco a poco por follajes descompuestos. Cerca de las cúspides de las montañas masivas, esta vegetación enfrenta condiciones extremas de viento, presentándose en Honduras y algunas zonas altas de Costa Rica. En los volcanes de la zona central la actividad humana ha tenido injerencia. *La alta sabana* y abarcando cierta parte de las zonas templadas se cubren estas zonas por henequenes/Helechos que se encuentran en el volcán de San Miguel y en la parte sur occidente del volcán de Santa Ana se observan las formaciones en el nivel Ericáceo.

5.3-Geodatos LIDAR Muestra

Los geodatos LIDAR muestra tienen las características técnicas descritas en la sección **3.8.1** y cada muestra de geodatos es un cuadrante (Tile) que es representativo para cada una de las zonas detalladas por Lauer(1956) y a su vez para identificar las coberturas de suelo en CORINE que se presentan en dichos *tiles*.

Zona	Área	Ubicación
Tierra Caliente	4km2(4 Tiles)	San Juan del Gozo. (zona 1) y Manglares de La puntilla en La Paz(zona 2). 2 Zonas: Bosque Caducifolio en Zaragoza(zona3) y de galería(Chilama)(zona4), en La Libertad y
Tierra Templada	2km2(1 Tiles)	Eco- parque el espino con aledaños urbanos del área metropolitana de San Salvador(AMSS) (zona5)
Tierra Fría	1km2(1 Tile)	El Picacho del Volcán de Salvador. (zona6)

T18. Detalle de Tiles con Geodatos Muestra

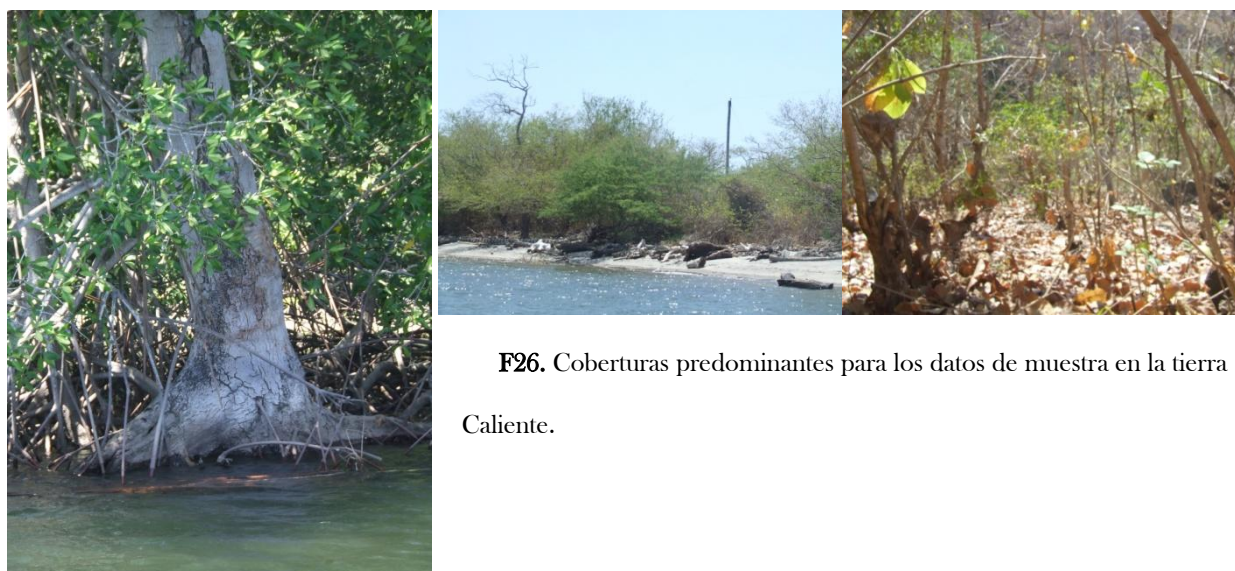
5.3.1-Coberturas vegetales presentes Datos Muestra

Los datos muestra representan a una variedad de coberturas naturales y de uso antrópico (cultivos, asentamientos e infraestructuras) para poder hacer una caracterización justa, que incluya la información general documentada para cada gran zona y ecosistema, pero que a su vez examine la realidad como método de validación, no se ha realizado una calibración de intensidad con superficies de prueba, variación de alturas de vuelo y condiciones climáticas del medio (Kaartinen, 2007) por carecer de instrumentos de medición, tal es el caso de un espectrómetro, pero se han realizado visitas de campo a cada una de las zonas en cuestión con el objeto de corroborar la existencia de las coberturas y algunas características físicas observables de algunas coberturas dominantes en los Tiles involucrados en los datos muestra. Con el objeto de establecer patrones pivote en torno a los cuales se desarrolla una metodología en el **capítulo 7** del presente trabajo, que identifica las coberturas en los geodatos LIDAR. Los tipos de coberturas observadas en las siguientes secciones fueron verificados in situ y con un medio de captura de posición GPS; además de una ficha de campo que se puede encontrar en los **anexos**.

5.3.1.1-Coberturas de Lauer en CORINE para La Tierra Caliente hasta 800 msnm

Lauer	CORINE	Altura
Manglares	Bosques de mangle	Hasta 40m
Vegetación de Playa	Vegetación arbustiva (costera)	4-8 m

T19. Categorías identificadas en la tierra caliente



F26. Coberturas predominantes para los datos de muestra en la tierra Caliente.

(a) Árbol en bosque de Manglar de 1m de diámetro y 30m de alto (b) Bosque dulce arbustivo (c) Bosque Caducifolio. Estos escenarios corresponden a la muestra de la tierra caliente,

5.3.1.2-Coberturas para La Tierra Templada hasta 1800 msnm

Lauer	CORINE	Altura
Café	Cultivo permanente Arbustivo	2-4 m
Bálsamo y Conacaste	Bosques caducifolios	Hasta 30m
Pinos	Bosques siempre verdes	Hasta 30m
Robles	Bosques mixtos caducifolios	Hasta 30m
Arbustos	Vegetación Herbácea Natural (Sabana)	4-8 m
Hojarasca	Suelo de hojas secas	0-0.5m

T20. Categorías identificadas en la tierra templada.

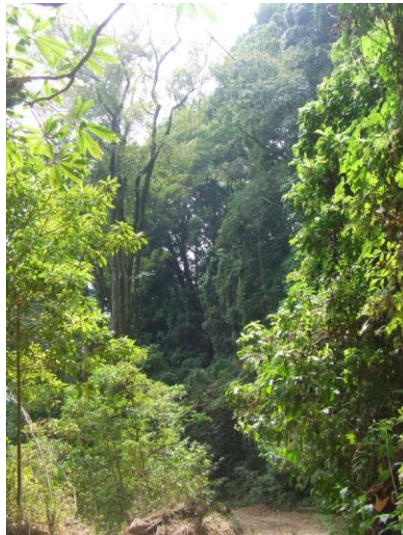


F24. Cobertura predominante para los datos de muestra en la tierra Templada. Plantación de café y bosque mixto.

5.3.1.3- Coberturas para La Tierra Fría desde 1800 msnm

Lauer	CORINE	Altura
Bosque Nebuloso (Roble y Ahuacate)	Bosques siempre verdes	0-30m
Helechos/Henequenes	Vegetación Herbácea Natural (Sabana)	0-3m
Bromelias	Vegetación Herbácea Natural (Sabana)	Habitan sobre el Bosque
Hojarasca	Suelo de hojas secas	0-0.5m

T21. Categorías identificadas en la tierra fría.



F27. Cobertura predominante para los datos de muestra en la tierra fría. Robles y Bromelias, la foto se logro en la frontera de la tierra fría cerca de los 1800m.

5.3.2-Otras Coberturas presentes en los Datos Muestra

Los datos de este trabajo se centran en la cobertura vegetal en las tres diferentes zonas mencionadas: tierra fría, tierra templada y tierra caliente. Sin embargo es necesario precisar que mas allá de la cobertura vegetal que se detalla en el siguiente apartado, existen otras coberturas que pueden estar presentes en los datos muestra, en la siguiente tabla se muestran estas coberturas junto al paralelo en CORINE.

Grupo	CORINE
Espacios sin vegetación	3.3.1 Playas dunas y arenales 3.3.2 Rocoso, lava 3.3.3 Espacios con vegetación escasa 3.3.4. Zonas quemadas 4.1.1 Marismas interiores 4.1.2 Praderas pantanosas 4.2.1. Marismas marítimas 4.2.2 Salinas 4.2.3 Zonas llanas intermareales 4.2.4 Perímetro agrícola
Infraestructura	1.1.2 Tejido urbano continuo 1.1.2 Tejido urbano discontinuo 1.1.3 Tejido urbano precario 1.4.2 Instalaciones deportivas y recreativas 1.4 X Calles y caminos
Agua	5.1.1 Ríos 5.1.2 Lagos, lagunas y lagunetas 5.2.1 Lagunas costeras y esteros 5.2.2 Estuarios 5.2.3 Mares y océanos 5.2.X Zonas inundadas

T22. Otras Categorías identificadas en cada una de las muestras.



F28. Otras coberturas Identificadas. Coberturas de calle de suelo desnudo y bordas de prevención de erosión, están presentes en las zonas de estudio además de asentamientos precarios, tejidos continuos y no continuos urbanos.

El detalle de las características de las categorías presentes en los datos y de las características de los datos se realiza en el **capítulo 6** como la base fundamental para el desarrollo de procesos geoinformáticas capaces de extraer una información clasificada con la nomenclatura CORINE Land Cover (adaptación para El Salvador) que se desarrollará en el **capítulo 8**.

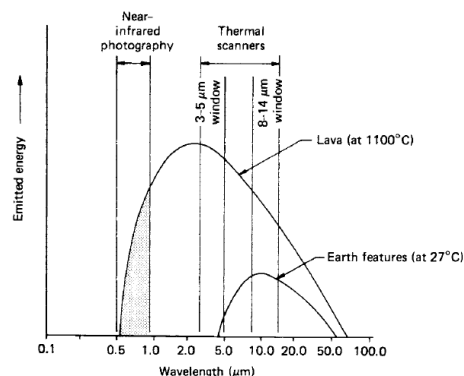
Capítulo 6

Reflexión de Superficies e intensidad

6.1-Reflexión

Para que exista un registro de intensidad medible a partir de la retrodispersión o backscattering de un pulso LASER e interpretarlas variaciones del mismo, es necesario interpretar las emisiones que se están reflejando a partir de la base de conocimiento del fenómeno de reflexión fundado en el desarrollo del **capítulo 4** de este trabajo. La reflexión es la respuesta a un rayo incidente y esta respuesta se presenta *especular* cuando se refleja con el mismo ángulo al plano que incidió desfasado perpendicularmente y es *difusa* cuando se da reflejada en todas las direcciones siendo este el caso más usual en el ambiente. (FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations)) .En el caso LIDAR, las superficies son incididas con pulsos *coherentes*; la *polaridad* de estos pulsos, no garantiza una reflexión especular en las superficies; sin embargo el valor de longitud de onda, para los datos muestra de este trabajo 1064 nm se mantiene invariable, respetando el concepto de retrodispersión elástica o Elastic backscattering abordado en el **capítulo 3**.

Los objetos de la tierra en la oscuridad no generan emisiones que distorsionen la captura LIDAR, puesto que emiten radiación en una frecuencia mayor y solamente la emisión de la lava podría generar un ruido en la frecuencia de recepción(Chipman et al., 2004); mientras la cantidad de radiación solar que emite una superficie de la tierra en la frecuencia de captura de 1064 nm tiene un nivel de energía (Irradiancia) bajo y se distinguen de los retornos capturados por el sensor generando un ruido que puede ser depurado.



G13. Radicaciones del medio ambiente y de lava idealizados como cuerpos negros.

Existen emisiones de luz en el amplio espectro electromagnético, producto de la radiación solar, entre estas podrían encontrarse ondas a 1064 nm, gracias a la *polarización* registrada en las ondas reflejadas, los sensores activos pueden diferenciar las ondas provenientes de

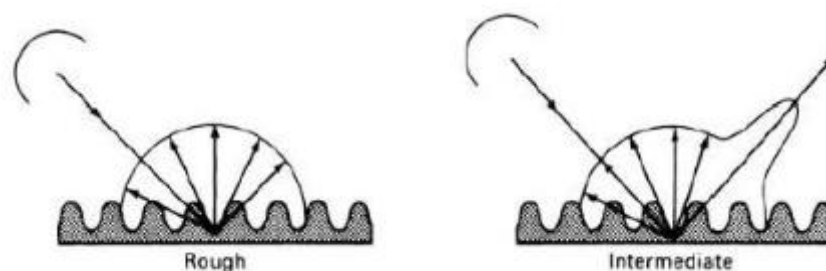
los pulsos emitidos de las ondas emitidas por el ambiente de radiación solar o de cuerpos negros a alta temperatura como la lava que emite ondas con esa longitud de onda; ya que la luz polarizada en esta frecuencia es de ocurrencia escasa en el medio natural, pese a que casi todos Los objetos del planeta emiten radiación cumpliendo la condición de encontrarse a una temperatura mayor que el 0 absoluto de Kelvin (-273.5° C).

En la **sección 4.2** de este trabajo se encuentra el gráfico de la energía de *Radiación Electromagnética*; al realizar la integral bajo la curva se puede calcular la emisión total por radiación solar y si se integra en los diferentes límites, en donde se puede calcular la potencia o cantidad de energía emitida por cada longitud de onda por unidad de tiempo.

6.2-Superficies relevantes para Land Cover y curvas espectrales de reflectividad (Spectral Signatures⁶⁴)

La radiación electromagnética tiene tres interacciones con las coberturas de la superficie, la *transmisión* se refiere al movimiento de energía sobre la superficie o a través de la misma y dependerá de la longitud de onda, la *reflexión* que puede ser *difusa*, en direcciones múltiples o *especulares*, *teóricamente* misma dirección. La otra porción de energía forma parte de la *absorción*, significando que los electrones de la superficie absorben esa energía y son excitados, en forma de reacciones moleculares o usualmente con un aumento de temperatura de la superficie. (Weng, 2010)

En la naturaleza existen combinaciones en el tipo de reflexión, es posible que una luz coherente produzca reflexión difusa como en el caso LIDAR y también es posible que una luz difusa como la solar reflejada en ciertas superficies produzca parcialmente una reflexión especular. En estas variaciones dependen de la rugosidad del material y de la longitud de onda.



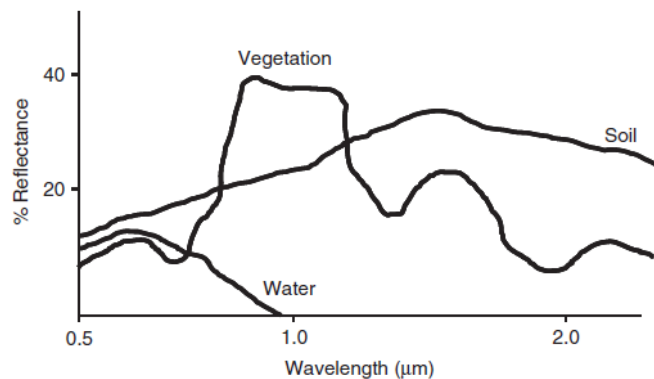
F29. Esquema comparativo de la presencia de reflexión especular para dos tipos de rugosidad.

Para detectar la mayor reflectividad de una superficie se puede utilizar una polarización específica para una longitud de onda que aporte a la reflectividad de esta superficie. Al momento de censar esta reflectividad se encontrará en un rango claramente mayor cuando

⁶⁴ Firmas espectrales o espectro de radiación de superficies.

existe menor penetración del pulso, lo que indica la presencia de un tipo de materia y su condición de superficie.

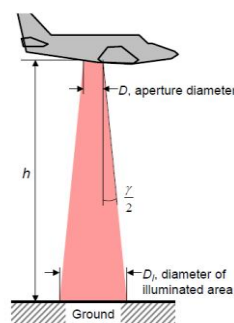
Las curvas espectrales permiten identificar el comportamiento de reflectividad en diferentes superficies, cuantificable a través del valor de *Reflectancia*. Utilizando este tipo de curvas es posible identificar las superficies más comunes del planeta y al utilizar más de una longitud de onda se pueden realizar comparaciones que faciliten la interpretación de los materiales en cuestión. (Weng, 2010).



G14. Firma espectral de vegetación, suelo y agua.

6.3 Divergencia y Retornos de la muestra de geodatos LIDAR

El haz de luz experimenta una divergencia que es la apertura del mismo desde una determinada altura en el área proyectada que en el caso LIDAR su sección transversal producto de la apertura óptica es circular. El límite de *divergencia* para cada altura permite definir un *footprint* que incluye en la captura, solamente la retrodispersión que pertenece a esa sección transversal delimitada para una altura determinada. (Brenner and Vosselman, 2006).

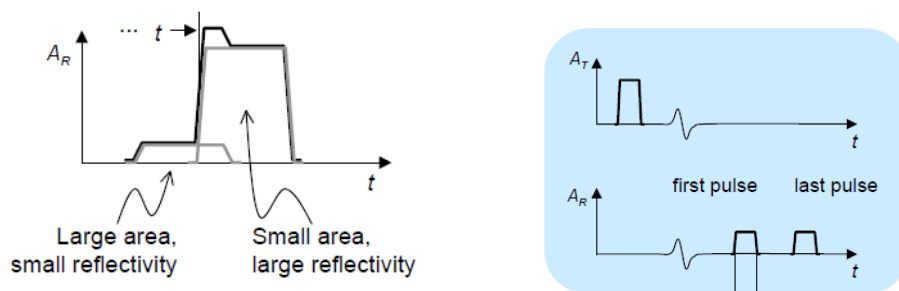


F30. Divergencia del haz para el footprint ⁶⁵

La divergencia se mide en mili-radianes, una vez considerado el efecto de la difracción y es posible establecer cierta relación: por cada kilómetro de altura de vuelo con una apertura de 1mrad se obtiene un diámetro de 1m en la superficie proyectada. Las interacciones

⁶⁵ La Huella de luz que interactúa con las coberturas.

parciales de esta superficie en un objetivo se conocen como retornos y depende de cada sistema, se pueden registrar una cantidad variable de hasta n retornos.(Brenner and Vosselman, 2006). La capacidad del sensor de registrar una densidad de información espacial continua en intervalos de tiempo variables y que se ajustan en el cortísimo tiempo de recepción, definen la cantidad de *retornos* avalados por un sistema. En la especificación del equipo GEMINI están definidos hasta 4 retornos y una divergencia de 0.25 mrad. Este sensor es un sensor discreto, existen otros tipos de sistemas activos que captan información continua mientras emiten, son los llamados “Full Wave Form” que no estiman un tiempo de recepción sino que censan constantemente durante la emisión y el *chirp*; estos sistemas permiten obtener retornos constantes con información suavizada no discreta de la reflexión superficial; otro sistemas de aplicación, son los sistemas de pulsos múltiples(Baltsavias, 2014), similares al Diferencial de absorción LIDAR (DIAL)de la **sección 3.5.2** pero con otras facultades de captura, entre ellas una mayor densidad, muy digna para otros análisis.



G15. Retornos discretos.

- (a) La cantidad de información reflectividad del retorno de un pulso dependerá del área abordada.
- (b) El intervalo de tiempo de recepción de información consistente determina el orden del pulso (primero, segundo, etc.)

6.4 Consideraciones para interpretar el valor de intensidad

Ante la incidencia de una reflexión polarizada con longitud onda de 1064nm, se registro un valor de *intensidad* LIDAR que *“es relativa, no cuantificable, no se puede esperar el mismo valor del mismo objeto de vuelo a vuelo o de elevación a elevación”*(“ArcGIS Help 10.1 - ¿Qué son los datos de intensidad LIDAR?,”)

En esta medida cualitativa, la Reflectancia de la superficie es proporcional y las variaciones del ángulo de incidencia en superficies similares son parte de los aspectos a considerar para definir intensidades en las diferentes superficies presentes en una muestra y así los rangos de intensidad funcionales y las alturas de los objetos con respecto al DEM para la clasificación de la nube en la nomenclatura CORINE Land Cover.

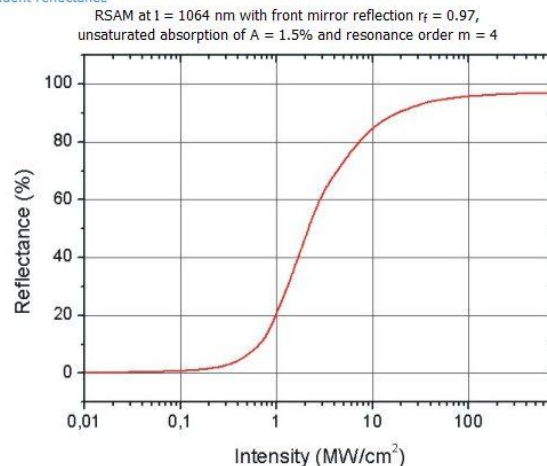
Debido a la naturaleza monocromática y discreta de este valor, muchos objetos no habrán respondido en lo absoluto o lo harán muy poco, con lo que se generaran agujeros de información o *gaps* además de presentar un ruido cercano al 10% que se considera alto, paradójicamente en reflexiones especulares se da una saturación de respuesta y por ende de los registros. Solamente este valor puede presentar dificultades para la clasificación de coberturas de suelo (Baltsavias, 2014), contradecir lo anterior dependerá de la metodología empleada en el **capítulo 7** del presente trabajo.

6.4.1 Relación con el poder de resolución y la Reflectancia

Es posible variar parámetros en la emisión para encontrar una mayor reflectividad y el comportamiento de la reflexión del pulso en cuestión. A través del registro del comportamiento de cierta superficie ante una emisión se puede determinar cuándo penetra más energía en una superficie. Esto no significa que será más fácil o más difícil censar la emisión difusa dada, sino que deberá utilizarse el receptor adecuado para capturar dicha emisividad y este proceso puede ser apoyado por el uso de filtros en el receptor. Así genera el sistema de emisión y de recepción más apropiado para la detección de una superficie específica.

Para estimar esta Intensidad Lidar se toma en cuenta la proporción de la intensidad enviada (potencia/unidad área) por el sensor activo con respecto a la incidencia de la emisión en el sensor.

> Intensity dependent reflectance



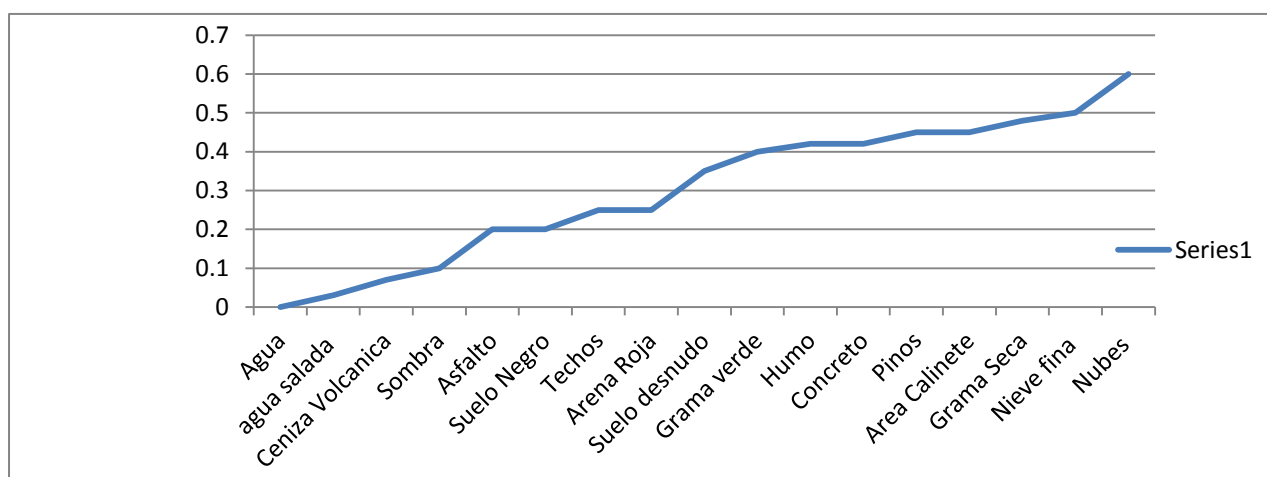
G16. Relación de la Reflectancia ante el ajuste de intensidad de emisión de un pulso a una longitud de onda de 1064 nm. Esta prueba fue realizada por la empresa BATOP optoelectronics.

La Reflectancia crece a medida se aumenta la energía de incidencia reflejada en la potencia por unidad de área, (“Resonant saturable absorber mirror - RSAM information,”) debido a que aumenta la cantidad de energía de incidencia y la proporción reflejada aumenta estadísticamente para una misma superficie; mientras la intensidad LIDAR definida a partir de la energía censada por el sensor es proporcional a la reflectancia. Así, entre mayor sea la reflectancia de una superficie, basada en las características propias de la superficie de contacto, aumenta la probabilidad de que el sensor pueda registrar una mayor cantidad de

ondas que entraron en contacto con dicha superficie. De la interpretación del gráfico se puede determinar que si se aumenta la energía de Intensidad de un pulso LIDAR crece la reflectividad de algunas superficies.

Materials	Reflectivity(%)
White paper	Up to 100
Dimension lumber	94
Snow	80~90
Beer foam	88
White masonry	85
Limestone, clay	Up to 75
Newspaper with print	69
Tissue paper, with ply	60
Deciduous trees	Typ. 60
Carbonate sand(dry)	57
Beach sands	Typ. 50
Carbonate sand(wet)	41
Coniferous trees	Typ. 30
Rough wood pallet (clean)	25
Concrete, smooth	24
Asphalt with pebbles	17
Lava	8
Black rubber tire wall	2

T23. Reflectancia registrada a una longitud de onda de 900 nm.



G17. Reflectancia para diferentes superficies ante una longitud de onda de 1064 nm. Grafico de creación propia basado en diferentes curvas espectrales de reflectividad.

El gráfico anterior es una orientación para establecer en el **capítulo 7** criterios de proporcionalidad a la reflectancia para los valores de intensidad LIDAR y de esta manera junto a los criterios de incidencia y altura, que se consideran en cada análisis de los datos muestra, establecer rangos funcionales para la clasificación CORINE Land Cover.

6.5 “State of the Art⁶⁶” de la aplicación de la intensidad para detección de coberturas diversas.

Área de Estudio	Descripción	Aporte	Fuente
Clasificación de Land Cover a través de datos de intensidad LIDAR	En Seul, se estudio las variaciones de reflectividad para superficies con una reflectividad teórica clara a una longitud de onda 900 nm.	La principal fuente de ruido es el ángulo de reflexión y para estudiar la intensidad lo más conveniente es hacerlo con un Raster. Es posible realizar filtros en este GRID. Posteriormente se obtuvieron rangos de valores para esa región y sistema. Con el uso del DSM es posible tener más análisis.	(Song, 2002)
Modelo de reflexión para condiciones de Land Cover	Establecer la correlación que existe entre superficies de reflexión de prueba y la distinción de las mismas en los valores de intensidad LIDAR	No es posible separar todas las superficies similares, mientras los ángulos de reflexión en algunos materiales son indiferentes, en otros son el componente de desviación mayor. Finalmente se obtiene un gráfico de caracterización de intensidad por coberturas.	(HASEGAWA, 2006)
Calibración Radiométrica de la Intensidad	A partir de superficies de laboratorio y sensores CCD se desarrolla un método de calibración empírica en Finlandia.	El valor de intensidad tiende a decrecer con el aumento de longitud de onda, las variaciones surgen a partir de las condiciones de rugosidad y humedad de la superficie son determinantes y se pueden asociar fenómenos relacionados en el medio; tal es el caso del viento y la condensación de agua.	(Karttinen, 2007)
Clasificación de la nube de puntos y generación de DEM	Generación de un algoritmo que opere con los datos RAW y a partir de estos realizar el DEM.	Mediante un algoritmo de profundidad se remueven los puntos base y apoyándose en la intensidad se hace una segunda separación de la vegetación. Los puntos más altos darán lugar a una interpolación TIN	(Chaoyi, 2008)

⁶⁶ Estado de investigación de una tecnología determinada (“State-of-the-art | Define State-of-the-art at Dictionary.com,” n.d.)

		clásica para generar DSM	
Identificación de especies individuales de árboles	A través de las bondades de LIDAR es posible extraer información de la condición de la vegetación que define especies individuales en el Washington park Arboretum.	Luego de haber delimitado las muestras a identificar. Se procedió a aislarlos utilizando un modelo de volúmenes del canope aislado comparándolos con datos de biomasa en un algoritmo complejo para la identificación de coníferas.	(Kim, 2008)
Fusión de imágenes multiespectrales con geodatos LIDAR para detección Urbana	En Arizona se compara la clasificación urbana con presencia de mosquitos producto de análisis de imágenes de satélite para establecer rango de intensidades en la intensidad LIDAR.	El estudio incluye la identificación de focos de hábitats de mosquitos en el entorno urbano. El DSM ⁶⁷ contribuye a precisar estos entornos heterogéneos que son corroborados con la intensidad LIDAR.	(Harfield, 2011)
Calibración de el valor de intensidad	El “National Land Survey of Finland” estudió a partir de una ecuación que involucra factores de corrección atmosférica, ángulos de incidencia y scan; así como los valores de energía de incidencia y los obtenidos en la línea de vuelo, una calibración de valores de intensidad.	Para que se pueda dar una calibración la condición de estado cambiante de vegetación genera incerteza. Mientras el coeficiente de correlación entre valores calibrados y no calibrados es cercano al 50% y calibrando entre dos capturas cercano al 80%. Lo que indica que es más consistente una referencia de valores de la misma línea de vuelo.	(Kaasalainen, 2011)
Cartografía de Vegetación	En Madrid, mediante la disponibilidad de geodatos LIDAR se incorpora la estructura de vegetación continua para arbolado y matorral para actualizar el mapa forestal de la comunidad de Madrid.	Una vez calibrada la información y con la generación de mallas topográficas, consistentes es posible separar la vegetación si se han definido los rangos de retornos previamente.	(MORÁN, 2013)

T24. Algunos estudios realizados sobre Intensidad LIDAR.

⁶⁷ DSM: Digital Surface Model o modelo digital de superficie.

Capítulo 7

Metodología: LIDAR en CORINE Land Cover

7.1 Objetivo

Mediante el uso de los datos descritos en la **sección 3.8.4** producto del proyecto impulsado por el MARN, en donde se sobrevoló y capturo información LIDAR en los meses comprendidos entre marzo y mayo de 2014 (estación seca ESA⁶⁸), se realiza una metodología de geoprocesamiento de estos geodatos LIDAR en la nomenclatura CORINE en la adaptación realizada para Centroamérica y específicamente para El Salvador. Esta metodología considera los aspectos relevantes de las propiedades y características de estos geodatos a lo largo de las secciones de este trabajo. Una clasificación total y la integración de los datos, así como el *merge*⁶⁹ no corresponden a la misiva de este trabajo.

7.2 Metodología

La intensidad es un parámetro que da una referencia grossa por si misma del tipo de material que ha interactuado con un pulso registrado por un sistema ALS. Los datos de altura de los objetos son adicionalmente un parámetro que contribuye grandemente a una clasificación más precisa.

La identificación de diferentes tipos de vegetación es un reto que bajo esta tecnología no resulta muy sencillo, si no se tiene conocimiento de la zona y adicionalmente de los objetos que la conforman. En Madrid apoyados en estas propiedades se realizo un mapa de cartografía vegetal a través de la definición de rangos de intensidad(MORÁN, 2013).

Los datos de altura de objetos que devienen de la diferencia entre el DEM y el DSM son un componente fundamental en este trabajo, estos datos han sido utilizados para la identificación de canope (Kim, 2008) y hábitats heterogéneos(Harfield, 2011). Para la identificación de objetos urbanos se han creado algoritmos de clases que incluyen los diferentes rangos de altura(YEPEZ, 2013), validos para los rangos de intensidad que son definidos en la **sección 8.2**.

A partir de la observación y mediciones realizadas en las visitas de campo que son descritas en la **sección 7.2.1** y en el contexto de clasificación de cobertura vegetal establecido por

⁶⁸ La vegetación caducifolia, matorrales y arbustos es abundante y hay presencia de cultivos estacionarios.

⁶⁹ La fusión que respeta los márgenes de los polígonos de manera integral.

Lauer (1956) se identifican las propiedades de los objetos de observación; estableciendo rangos de altura para cada objeto y finalmente la posición de los objetos sometidos a observación en el territorio se vuelven una fuente de validación. Entre estas propiedades se determina el rango de intensidades para cada objeto y zona de trabajo. El modelo de análisis espacial considera el *Raster* de alturas, combinándolo con la imagen de intensidad y con el uso de los rangos de intensidad observados en los puntos de muestra con los factores de validación.

7.3 Visitas de campo

Se realizaron visitas de campo con el objeto de identificar las propiedades de estado para algunas ubicaciones de los objetos muestra. Como instrumentos se conto con un GPS, un distanciómetro LASER y una boleta que se presenta en el **ANEXO 8**. No se conto con un espectrómetro a 1064 nm que podría haber dado información de reflectancia valiosa.

lat	lon	Objeto	Tierra	Zona	Elevacion	Altura	Observacion	CORINE
13.2905556	-88.8818056	Puntilla	Caliente	zona 4	17	0	Arena blanca	64
13.2864722	-88.8782222	Bosque Dulce	Caliente	zona 4	17	5-Apr	Arbustos	61
13.2829167	-88.8681944	Arboles Frutales	Caliente	zona 4	7	20	Asentamiento	33
13.2878611	-88.8634722	Bosque Salado	Caliente	zona 4	18	25	Manglar	54
13.2866667	-88.8663889	Manglar de guia	Caliente	zona 4	18	5	Cincahuete	54
13.286	-88.8726111	Rancho flotante	Caliente	zona 4	10	7-Jun	1m Profundidad	8
13.5031111	-89.3131389	Dos quebradas	Caliente	zona 2	98	15	Conacaste blanco	49
13.5027778	-89.3121111	Piedra volcanica	Caliente	zona 2	105	10	arbol zorrillo	10
13.5023056	-89.3141111	Cueva baja	Caliente	zona 2	110		Cotuzas	10
13.5019722	-89.3141389	Mango	Caliente	zona 2	115			33

T25. Muestra de Puntos de validación adquiridos en campo.

7.4 Definición de rangos de Altura

Tal como se enlistaron en la **sección 5.3** las coberturas presentes; para cada zona se presentan colecciones de objetos diferentes, por ello los rangos de variable altura se fijan independientemente en cada zona en base a la medición, observación y registros de alturas de ciertas especies planteadas por Lauer(1956) y en el documento que sustenta al mapa de ecosistemas de ESA (World Institute for Conservation and Environment, 2011).

En el caso de la intensidad se registraron los valores mínimos y máximos para cada objeto en cuestión a partir de los geodatos en forma de puntos observados en campo y el uso de la imagen RGB para cada zona proporcionada para este trabajo y capturada junto a los geodatos LIDAR con las especificaciones que se encuentran en el ANEXO 5; se definió un rango de intensidad que será determinante para la clasificación de los objetos en su respectiva categoría CORINE.



F18. En las celdas color café se observa un corredor de manglares con una intensidad variable en un rango específico.

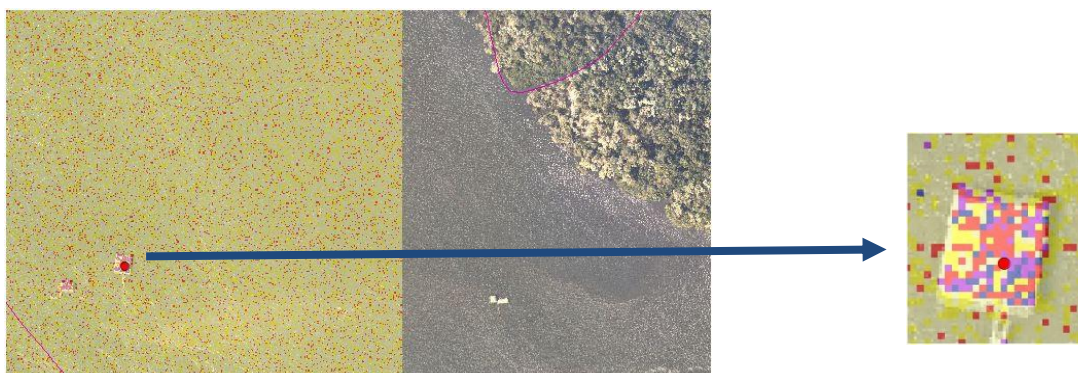
7.4.1 Alturas de objetos CORINE para cada zona.

Altura de Objetos para la tierra Caliente			
ID	OBJETO	ALTURA	CORINE
1	Cancha	0m	13
2	Arena, Agua	0m	64,79
3	Suelo hojas	0-0.5m	49
4	Cuevas, Rocas	0.5-3m	65
5	Techos	3-4m	3
6	Bosque Dulce, Manglar guia	4m-7m	59
7	Manglar	7-20m	54
8	Bosque Caducifolio	8-15m	49
9	Palmeras, Arboles	20-30m	14,33
Altura de Objetos para la tierra Templada			
ID	OBJETO	ALTURA	CORINE
10	Suelo: organico, polvo	0-0.5m	49,4
11	Calle Asfalto	0m	4
12	Calle Cemento	0m	4
13	Piscina	0m	13
14	Techos	3-4m	3
15	Café	2-4m	27
16	Conacaste, otros arboles	5-30m	53
17	Ciprez	15-30m	52
Altura de Objetos para la tierra Fria			
ID	OBJETO	ALTURA	CORINE
18	Arbustos	0-5m	61
19	Roble, Ahuacate	10-30m	53
20	Antenas blancas	15-30m	3

T27. Tipo de coberturas identificables y alturas para cada tipo de tierra que incluyen diferentes zonas.

7.5 Aspectos a considerar

La imagen de intensidad presenta variaciones grandes en los objetos que no provienen solamente de la interpolación *IDW* realizada en una naturaleza de objetos mixtos descritos en la **sección 2.2.1**; sino también de variaciones en la respuesta e interacción de la onda que información de *Full Wave Form* podrían atenderse o en variaciones que se dan propiamente en la reflectancia del material y su superficie debido a condiciones temporales, desgaste o climáticas. (Kaartinen, 2007). Para atenuar estos efectos últimos se utilizan filtros tal como se realizo en Seúl para atenuar los efectos en la intensidad debido a la variabilidad del ángulo de incidencia (Song, 2002); en el caso particular de este trabajo el filtro aplicado para el Raster de intensidad, es de carácter estadístico local, *Mean*.



F31. Identificación de un restaurante flotante en la puntilla. Tierra Caliente Zona 1.

Las diferencias entre coberturas se puede realizar mediante la intensidad, diferenciar tipos de vegetación, es una limitante de esta tecnología pese a que se realice una calibración(Kaasalainen, 2011).

7.5.1 Condiciones Necesarias para desarrollar el modelo

- a) Para identificar los tipos de bosque se generan clases a partir de alturas predominantes y apoyándose en la información de altura de objetos que se puede deducir de la resta del DSM y el DEM, se generan clases en donde solo se incluirá el bosque predominante, esta geoproceso depura implícitamente a otras clases que comparten la altura de objeto.
- b) Los valores digitales de intensidad de las celdas para coberturas diferenciables se expresan en una escala decimal proporcional para cada clase, en donde se identifican cada una de las clases generadas; por esta razón las clases a partir de la altura de objeto en un principio son polimórficas.

c) Los valores No Data son asignados como 0(cero); con el objeto de ser tomados en cuenta en el análisis.

d) La estadística focal con una selección de máximo valor para un tamaño de rectángulo de celda que será definido dependiendo del caso, colaborara a asignar valores de intensidad a las celdas que presentaron una mayor reflectancia. Suponiendo no existen aumentos de reflexión en las superficies.

e) Se utilizaran clases para cada zona debido a la redundancia de clase entre alturas de objetos presentes en cada zona.

f) Debido a la limitante que presenta la intensidad, no es posible abordar el problema desde la generación de clases de intensidad; adicionalmente la separación final de alturas presentaría un polimorfismo.

7.6 Modelo Espacial

El modelo espacial se construye a partir de los siguientes geodatos en la proyección Lambert Conformal Conic 1927 para El Salvador:

- a) Raster RGB para cada zona con resolución de 1x1m.
- b) Modelo digital de superficie(DSM) y modelo de elevación digital (DEM)
- c) Imagen de Intensidad para cada zona en resolución 1x1m.
- d) Muestreo de puntos en formato .shp file con la respectiva información alfanumérica identificada en campo.

El modelo se realiza en el programa Arcgis 10.2, necesariamente con la extensión Spatial Analyst, el análisis de resultados es abordado en el **capítulo 8**; mientras la secuencia y estructura de implementación de metodología será detallada a continuación:

1-Creación de rangos de altura a partir de la información obtenida y las fuentes de validación de campo.

2-Creación de rangos de intensidad utilizando el valor digital que varía entre 0-254, a partir de la identificación de objetos y validación a partir de la imagen RGB para cada cuadrante de intensidad. Los valores No Data tienen un valor fuera del rango.

3-Aplicación de un filtro espacial local en la imagen de intensidad (**output R1**): en donde se prioriza la opción *max*, para simplificar las variaciones de las variaciones en la imagen de intensidad. Los valores No Data tienen un valor fuera del rango.

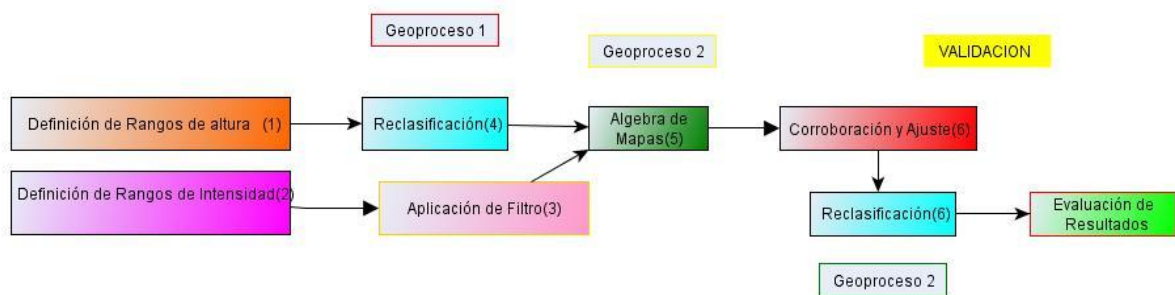
4-Primera Reclasificación (**output R1**): Definición secuencial de intervalos de altura en n clases, dependiendo de la zona de muestra. Para evitar la redundancia en el siguiente paso

se ha innovado con una escala especial decimal que se explica con detalla en el **capítulo 8** sirve para agrupar en su propia representación numérica una altura determinada.

5-Operación Aritmética Raster (**inputR1 x inputR2**) en donde el resultado (**output R3**) agrupa las variaciones de intensidad por rango de altura definido en la escala especial.

6-Segunda Reclasificación (**output R4**): consiste en asignar un campo de atributos de código de clase CORINE Land Cover que permita finalmente establecer una relación con la tabla de categorías de la nomenclatura CORINE.

7-Proceso de validación de asignación CORINE (Corroboración, Ajuste y Validación temática)



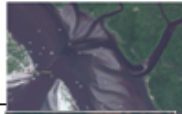
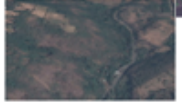
F32. Esquema metodológico para la clasificación en CORINE Land Cover.

Capítulo 8

Análisis Espacial: CORINE en LIDAR

8.1 Zonas de Análisis Espacial

En el presente capítulo se desarrolla el análisis que conlleva a una clasificación CORINE Land Cover. Los geodatos LIDAR elegidos como modelo descriptivo y con detalle de resultados intermedios, se ubican en la isla de San Juan del Gozo en la tierra caliente, con el objeto de darle seguimiento y honor al trabajo de Lauer (1956) que en su informe presenta un mapa de tipos de vegetación de dicha zona, el cual está incluido en la **figura 25** en la **sección 5.2.1** de este trabajo. Para el análisis de cada *tierra* (Caliente, Templada y fría) se han considerado las zonas descritas en la **sección 5.3**, la cantidad de zonas incluidas en cada tipo de tierra no es simétrica y los geodatos de la tierra fría (zona 6) no han sido publicados por MARN a la fecha, los geodatos muestra responden más bien a abordar la mayor diversidad de coberturas disponibles en la tierra caliente y la tierra templada; lo que se mantiene constante es el uso de 1 tile de 1 km² para cada muestra en las zonas definidas. Los rangos finales de intensidad para cada zona y los resultados de la clasificación, una vez sometidos al geoprocésamiento, se presentan y discuten en la respectiva sección. El método se encuentra estandarizado para cada una de las tres *tierras*.

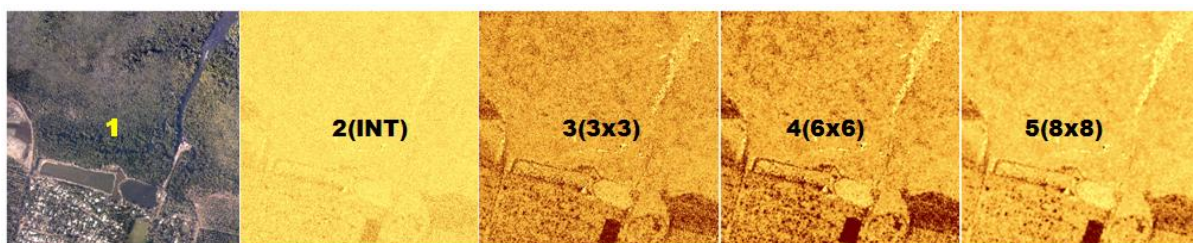
Zonas de muestras LIDAR				
	Lugar	Zonas Lauer	Vegetación Predominante	Foto tomada de google
Zona 1	El Jobal, Jiquilisco, Usulután	Tierra Caliente	Palmas y Manglares	
Zona 2	La Puntilla, San Luis la Herradura, La Paz	Tierra Caliente	Palmas y Manglares	
Zona 3	El Dante, Zaragoza, La Libertad	Tierra Caliente	Bosque Caducifolio	
Zona 4	Rio Chilamas	Tierra Caliente	Bosque Siempreverde de galería (rivera)	
Zona 5	Ecoparque El Espino y la Sabana, Ciudad Merliot, Santa Tecla	Tierra Templada	Café e infraestructuras: calle cemento y pavimento, techos diversos, piscinas.	

T28. Zonas de muestra incluidas en este trabajo.

8.2 Definición de Rangos de intensidad

Los rangos de intensidad se han definido para responder a la identificación de la mayor presencia de objetos presentes por altura descritos en la **sección 7.4.1**. Esta clasificación de rangos de intensidad se determina tomando como base la imagen de intensidad de cada zona, en donde se aplica un filtro focal estadístico con un vecindario (*Neighborhood*) rectangular, del cual su tamaño se determinó a partir de múltiples experimentos. El tamaño final de este vecindario es de 6x6 celdas, siendo esta un área plausible con las áreas que proyectan los objetos más pequeños a identificar en la cobertura y el método estadístico de asignación es la media estadística (MEAN) para normalizar valores de reflectividad críticos. En un principio fue considerado aplicar el filtro MAJORITY, pero este filtro cambia el valor de los píxeles que se encuentran en una intensidad media a un valor extremo en los casos que estos valores extremos son una mayoría focal y en el caso de ser erróneos hace aumentar el error; mientras MEAN incluye la influencia de los valores extremos y normaliza los valores erróneos. Un método similar fue desarrollado por *Sleve and Clump*, removiendo los píxeles aislados con vecindarios de 4 u 8 píxeles y aplicado en el pre procesamiento de imágenes en RAW⁷⁰ data en Arabia Saudita (Al-Ahmadi, 2009).

Este filtro no constituye una clasificación en sí, es solamente el proceso de remoción de “sal y pimienta”⁷¹ o ruido que se realiza en una clasificación. De esta manera se filtra la información Raster proveniente del IDW en la imagen de intensidad para clasificación de coberturas de suelo para poder realizar una separación de clases de intensidad (Song, 2002).



F37. Definición de objetos a partir de imagen RGB(1), imagen de intensidad INT(2) y los resultados de las estadísticas focales con vecindario rectangular de 3 celdas(3), 6 celdas(4) y 8 celdas(5).

De acuerdo a Song(2004) la separación de rangos de intensidad posibilita incluso la diferenciación de zonas cubiertas con coníferas frente a otras especies vegetales. Esta separación de rangos de intensidad se ve reforzada en este trabajo con la corroboración en imágenes RGB y la delimitación de oportuna de estratos utilizando la información de altura de objetos.

⁷⁰ Datos crudos sin procesamiento

⁷¹ “salt and peper” se utiliza para hacer referencia al ruido y presencia de valores extremos y erróneos.

Los rangos de intensidad son definidos mediante *Natural Breaks (Jenks)*,⁷² clasificación de la cual devienen los rangos en base a una proporción de la cantidad de valores presentes en cada clase y el número de clases, es elegido en base a dos criterios:

- a) La cantidad de coberturas determinantes en la zona
- b) La representatividad de estas clases para poder disgregar otras coberturas presentando un *polimorfismo de intensidad*⁷³.

8.3 Análisis Espacial

El objetivo de este análisis es generar un *Raster* en donde los valores de sus celdas tengan un asignamiento de enteros de acuerdo al código de la nomenclatura CORINE Land Cover, presentes en cada zona de estudio. Para lograr este objetivo es necesario realizar un asignamiento en forma de reclasificaciones para generar las variables que participan luego en la operación de álgebra de mapas que conlleva a un resultado intermedio antes de la clasificación final, en este apartado se describe el proceso de definición de variables y el *Workflow* que incluye los resultados intermedios propios de un geoprocesamiento de este tipo. Los asignamientos de las reclasificaciones involucradas han sido diseñados para representar los grupos de tiles de la tierra caliente, templada y fría; razón por la cual no todos los objetos involucrados ni valores se presentan en cada uno de los tiles y los valores de clase que participan se incorporan a otras clases CORINE, este fenómeno se examina en la **sección 8.3.2**. El resultado preliminar está definido por la siguiente ecuación:

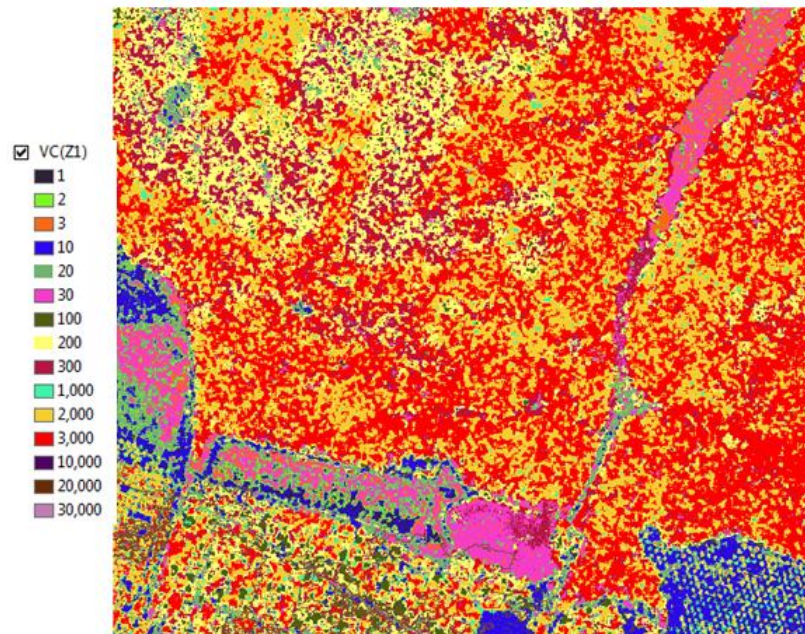
Valor de Cobertura (VC)=Intensidad reclasificada X Altura reclasificada

PRODUCTO = (Multiplicando) X (Multiplicador)

⁷² En Arcgis es posible realizar este proceso de manera semi-automática.

⁷³ La disgregación de este polimorfismo de intensidad es la médula central del análisis espacial (**sección 8.3**)

El *Valor de Cobertura (VC)*, es el valor único e irrepetible de objetos que comparten rango de intensidad en un rango de altura específico; representa las combinaciones posibles entre rango de altura y rango de intensidad, es reclasificado a partir de la interpretación de resultados a un valor de cobertura CORINE Land Cover. Esta reclasificación le da un sentido a los valores de los objetos VC en CORINE. Esta reclasificación se muestra en el Workflow de la **sección 8.3.2** y la interpretación que conlleva a esta asignación se discute en la **sección 8.4** del presente trabajo.



F37. Valor de Cobertura en la zona 1 producto de la multiplicación.

8.3.1-Reclasificaciones de Variables

8.3.1.1-Reclasificación de Intensidad (Multiplicando)

El criterio bajo el cual se realiza la reclasificación de los valores digitales de intensidad parte del asignamiento de un valor entero para el rango de intensidad que representa a los objetos con similar reflectividad. El número de clases depende del número de objetos con que comparten rango de intensidad por clase en cada zona. Para apoyar este proceso se utiliza la imagen RGB capturada junto a los geodatos LIDAR y proporcionada por MARN para los efectos de este trabajo. De esta manera la intensidad se muestra constante para algunas coberturas que en la interpretación serán ubicadas en los diferentes estratos de altura de la siguiente sección.

Reclasificación de intensidades de objetos para la tierra Caliente				
ID_INT	OBJETOS	INTENSIDAD		CLASE
1	Cancha,Arena,techos	62.55838714 - 157.9444427		1
2	Suelo hojas,arbustos, bosque dulce, bosque Caducifoleo	43.97668799 - 62.55838713		2
3	Manglar,Palmeras,Arboles frutales, Cuevas y rocas,Agua	0 - 43.97668798		3
Reclasificación de intensidades de objetos para la tierra Templada				
ID_INT	OBJETOS	INTENSIDAD		CLASE
1	Techos,suelo polvo,cancha	156.1830066 - 252		1
2	Calle cemento ,suelo organico,	100.6091503 - 156.1830065		2
3	Calle Asfalto,piscina,café,conacaste,otros arboles,ciprez,techos rojos	7.666666508 - 100.6091502		3
Reclasificación de intensidades de objetos para la tierra fría				
ID_INT	OBJETOS	INTENSIDAD		CLASE
1	Antenas blancas			1
2	Roble,Ahuacate y Arbustos			2

T29. Reclasificación de la intensidad (nótese el carácter descendiente de la clasificación. Se contará con los valores de intensidad de los geodatos LIDAR cuando MARN los publique.

8.3.1.2-Reclasificación de alturas (Multiplicador)

La reclasificación de las alturas tiene como objetivo definir las coberturas presentes en cada estrato en una escala decimal (unidad, decenas, centenas etc.) que separa al desarrollar el análisis, las diferentes clases de intensidades presentes por altura y facilita la interpretación. Esta clasificación de estratos (1,10, 100,1000 etc.) permite matemáticamente tener un resultado irrepitable que funciona como un identificado (id) de la combinación entre rango de intensidad y rango de altura para el producto de la **sección 8.3** y lógicamente permite la interpretación estratos de la **sección 8.3.1**.

Reclasificación de alturas de objetos para la tierra Caliente				
ID_ALT	OBJETOS	ALTURAS	CORINE	CLASE
1	Cancha,Arena,Agua	0m	13,64,79	1
2	Suelo hojas	0-0.5m	49	10
3	Cuevas y Rocas,techos	0.5-4m	65,3	100
	Bosque Dulce, Manglar,,Bosque			
4	Caducifoleo,Arbustos	4m-20m	59,54,49	1000
5	Palmeras,Arboles	20-30m	14,33	10000
Reclasificación de alturas de objetos para la tierra Templada				
ID	OBJETO	ALTURA	CORINE	CLASE
1	Calle Asfalto,calle cemento,piscina,	0m	4,4,13	1
2	Suelo: organico, polvo	0-0.5m	49,4	10
3	Café y Techos	0.5-5m	27,3	100
4	Conacaste, otros	5-20m	53	1000
5	Ciprez	20-30m	52	10000
Reclasificación de Altura de Objetos para la tierra Fría				
ID	OBJETO	ALTURA	CORINE	CLASE
18	Arbustos	0-5m	61	1
19	Roble,Ahuacate	10-30m	53	10
20	Antenas blancas	15-30m	3	100

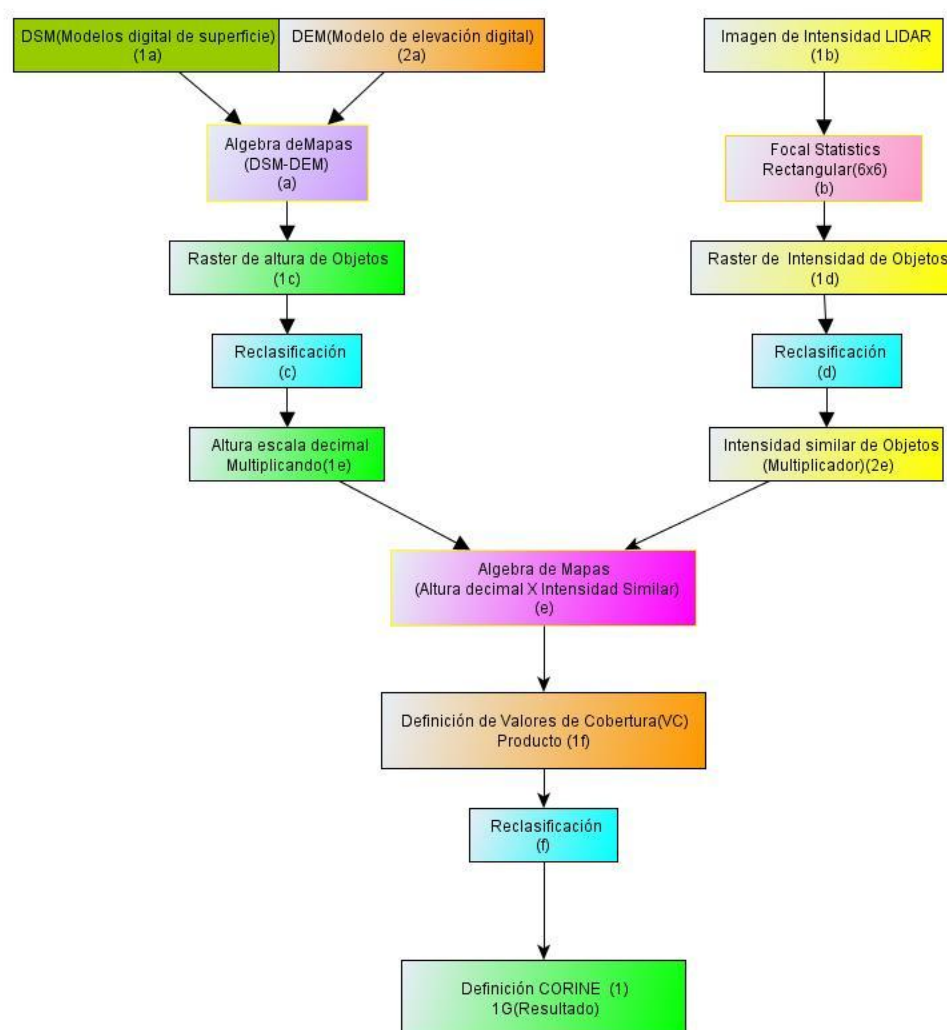
T30. Reclasificación de las alturas en una escala decimal que facilita la interpretación de estratos.

8.3.2- Workflow

El georprocesamiento se ha realizado con las funciones que ofrece Arcgis 10.2 en el modulo de análisis espacial y se ha realizado en los siguientes cuatro niveles:

- 1) Algebra de mapas (*Map Algebra*) y filtro estadístico focal (*Focal Statistics*)
- 2) Reclasificación (*Reclassify*)
- 3) Algebra de mapas (*Map Algebra*)
- 4) Reclasificación (*Reclassify*)

Como resultado de este geoproceso existen 6 tipos de resultados intermedios, entre ellos se ubican los mencionados en la sección anterior como multiplicando (Intensidad reclasificada) y Multiplicador(altura reclasificada) y el producto (*Valor de Cobertura VC*); el resultado final es único y se encuentra señalado en el Workflow siguiente como: Definición CORINE(1G).

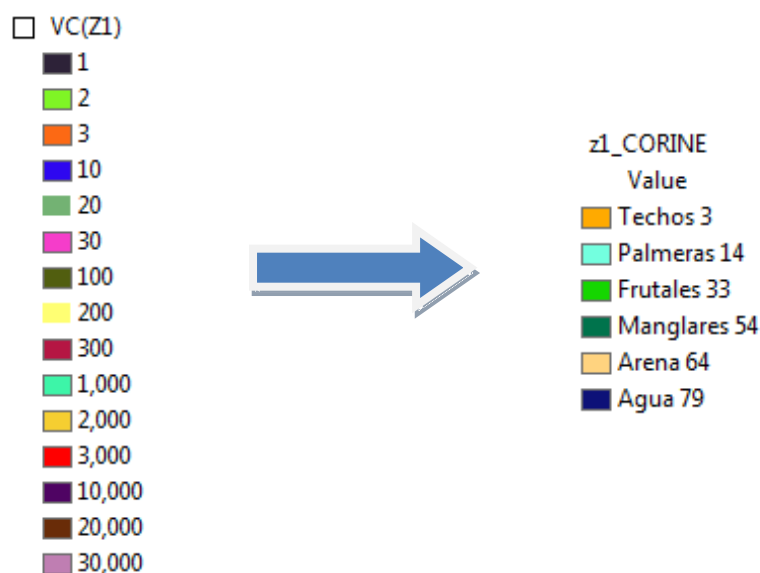


G18. Workflow del análisis espacial aplicado.

8.4-Discusión de resultados (Producto)

8.4.1 Interpretación

La clasificación a CORINE se realiza a partir de los valores de cobertura (VC) definidos en la **sección 8.3**, únicos e irrepetibles debido al arreglo matemático descrito en la **sección 8.3.1.2**; los cuales se presentan en una variabilidad decimal producto de la influencia de la variable de altura, en el arreglo ascendente de sus rangos de altura en múltiplos de 1,10, 100, 1000,1000. Cada uno de estos valores se presenta proporcional a la variable intensidad que esta ordenada en clases ascendentes e indirectamente proporcionales al rango de valores digital de intensidad que representan (1, 2,3). La manera más directa de interpretar este resultado único e irrepetible que funciona como identificador (id) del producto de la combinación entre los rangos de intensidad y de altura; es buscar los valores de clase coincidentes entre las posibles opciones constantes en una reflectividad, y su presencia en un rango de altura, de esta manera se ubica el objeto de intensidad en un estrato de altura específico donde solo existe dicho objeto. El método de interpretación exige un conocimiento de la zona de aplicación y para el entendimiento de la misma en un marco teórico han tenido influencia en este trabajo la clasificación de Lauer (1954-1956), las visitas de campo realizadas en el primer trimestre de 2015 y el acceso a las imágenes RGB que fueron capturadas en la época seca de 2014(Marzo-Abril).



G18. Reclasificación de valores de cobertura a CORINE.

8.4.2 Variaciones y Ajustes

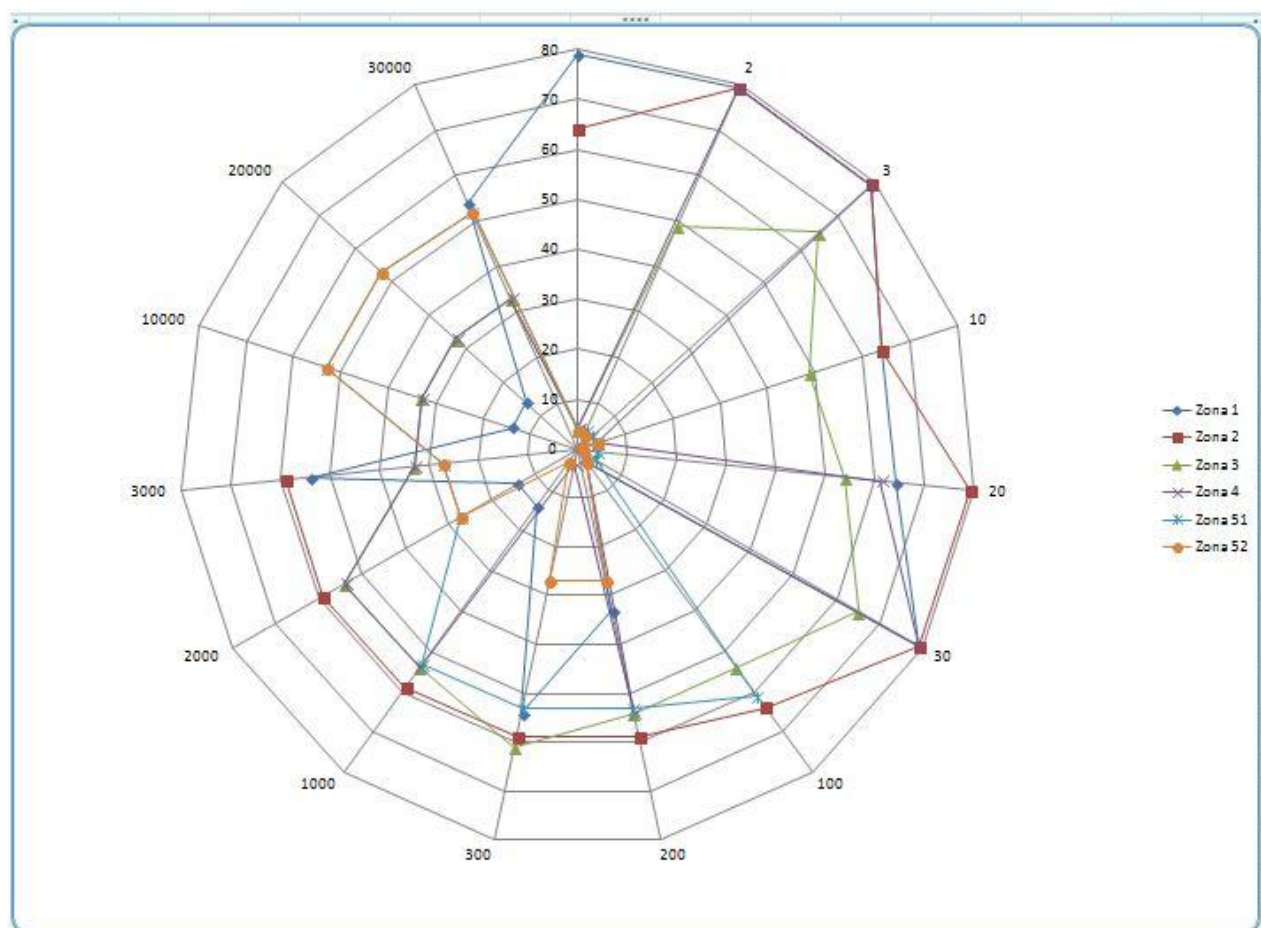
Para poder interpretar los valores VC que presentan múltiples coincidencias o que provienen de clases de intensidad que no pueden definirse fácilmente entre la muestra de objetos; se ha utilizado una tabla de ajuste con la cual de cara a la imagen RGB es posible encontrar una mayoría representativa para las clases y a su vez permite interpretar las variaciones en forma de ruido por ejemplo arena en el agua y agua en la arena.

Debido a que no todos los objetos de una tierra se presentan en cada *tile*; mas sin embargo las alturas e intensidades si se presentan, se deben incorporar los valores de cobertura a las coberturas existentes, estas variaciones se dan debido a las variaciones del valor de intensidad para la mayoría de superficies que no están pulidas y tienen variaciones de rugosidad; así como para las variaciones de reflectividad en las superficies por efectos ambientales (daño y suciedad), naturales (variaciones de tono en la naturaleza), sombras, reflejos y cambios de materiales debido a exposición y tiempo, así como cualquier otro efectos que conlleve a variaciones de tonalidad y reflectividad. Las coberturas en rangos intermedios de intensidad, en caso de no presentarse en una zona (tile), tienen a ubicarse en el extremo más cercano de intensidad existente. Así, los valores de clase de intensidad 2 y de rango de altura 100 en una zona sin bosque caducifolio pero con presencia de techos de lámina, tenderán a ser techos u otro objeto de similar reflectividad que se presente en la clase 1 de intensidad. Estos valores tendra estos casos se requiere del ajuste que se realiza con la siguiente tabla.

zona 1			
ID_VC	Valor Cobertura	Interpretación	CORINE
1	1	Agua	79
2	2	Agua	79
3	3	Agua	79
4	10	Arena	64
5	20	Arena	64
6	30	Agua	79
7	100	Techos	3
8	200	Frutales	33
9	300	Manglares	54
10	1000	palmeras	14
11	2000	palmeras	14
12	3000	Manglares	54
13	10000	Palmeras	14
14	20000	Palmeras	14
15	30000	Manglares	54

T31. Tabla de ajuste para la zona 1 (San Juan del Gozo) de la tierra caliente.

La combinación de imágenes de satélite con datos LIDAR se ha practicado con buenos resultados para responder a la pregunta “que hay y en donde” ⁷⁴ a partir del tratamiento supervisado que ha extraído los límites de texturas en imágenes que posteriormente son enriquecidos con datos LIDAR(Alhaddad, 2008), adicionalmente se han realizado clasificaciones a partir de consideraciones de textura de objetos identificadas en imágenes(B. I. Alhaddad et al., 2008); en el presente trabajo se han utilizado las imágenes como base fundamental para la corroboración visual y el posterior ajuste en la interpretación del valor de Cobertura en CORINE, en una preclasificación no supervisada que funda las bases para el ajuste de un *training set* en una clasificación supervisada futura que puede adoptar diferentes métodos de ajuste del modelo; tal como se han derivado mapas de coberturas vegetales a partir de geodatos ASTER aplicando el proceso conocido *Machine Learning* ⁷⁵ que crea y valida a partir de regresiones, patrones para la generación de los modelos más apropiados. (Borges, 2004).



G19. Código CORINE para los Valores de Cobertura (VC) en las diferentes zonas de muestra.

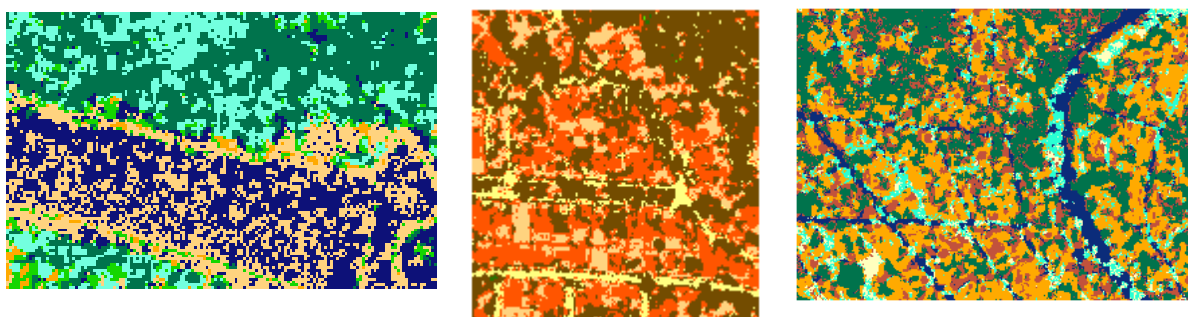
⁷⁴ Proviene de la expresión utilizada en teledetección “what” is “where”.

⁷⁵ Definición de ajustes estadísticos para la clasificación supervisada en modelos de datos.

Las combinaciones posibles entre altura e intensidad se ven reflejadas en el valor de intensidad VC, crean un método de predicción que substrahe información CORINE Land Cover, este algoritmo de clasificación puede incorporarse en un trabajo futuro. Es parte medular en un *Support Vector Machine* que permite delimitar y generalizar las partes (Stephens, 2014) con el *setup* mas adecuado del modelo en las diferentes zonas de El Salvador.

El método desarrollado en este trabajo logra superar la presencia de dualidad de resultados en términos numéricos como se deja claro en la **sección 8.3**. Pero existen coberturas que comparten características similares de altura e intensidad que presentan inseparabilidad y que requieren una interpretación zonal; otros factores presente que originan estas variaciones, inseparación de coberturas y contaminación son:

- a) Presencia significativa de ruido
- b) Amalgama de valores de cobertura.
- c) Coincidencia de acumulación focal de valores extremos, compartiendo valor de intensidad y valor de altura.



F38. Variaciones de clase CORINE. (a) agua azul con presencia de “arena” beige en una camaronera en San Juan del Gozo (b) Presencia de la arboleda urbana en forma de “café” café en el AMSS (c) Caminos vecinales en azul de la comunidad la Presa en forma de “río Chilama”.

8.4.3 Automatización y Potencialidades

Debido a la naturaleza compleja de las variaciones de reflectividad de la realidad, el desarrollo de un modelo con valores de ajuste con efecto de aplicación extensivo para las clasificación de las zonas en forma de tiles en CORINE para cada tipo de *tierra* y las razones de peso para la toma de decisiones de asignamiento en base a un conocimiento de las zonas definidas, no es posible automatizar el proceso con inteligencia artificial hasta llegar a una clasificación CORINE ,solamente es posible automatizar el geoprocesamiento, pero no la interpretación. Para superar la condición polimórfica de la intensidad, se recomienda identificar los casos de inseparabilidad y evaluar su condición con herramientas de toma de muestras que en el caso de Arcgis en las herramientas de Spatial Analyst definiendo una región de muestra con *create contour* y posteriormente visualizando el histograma de una zona.

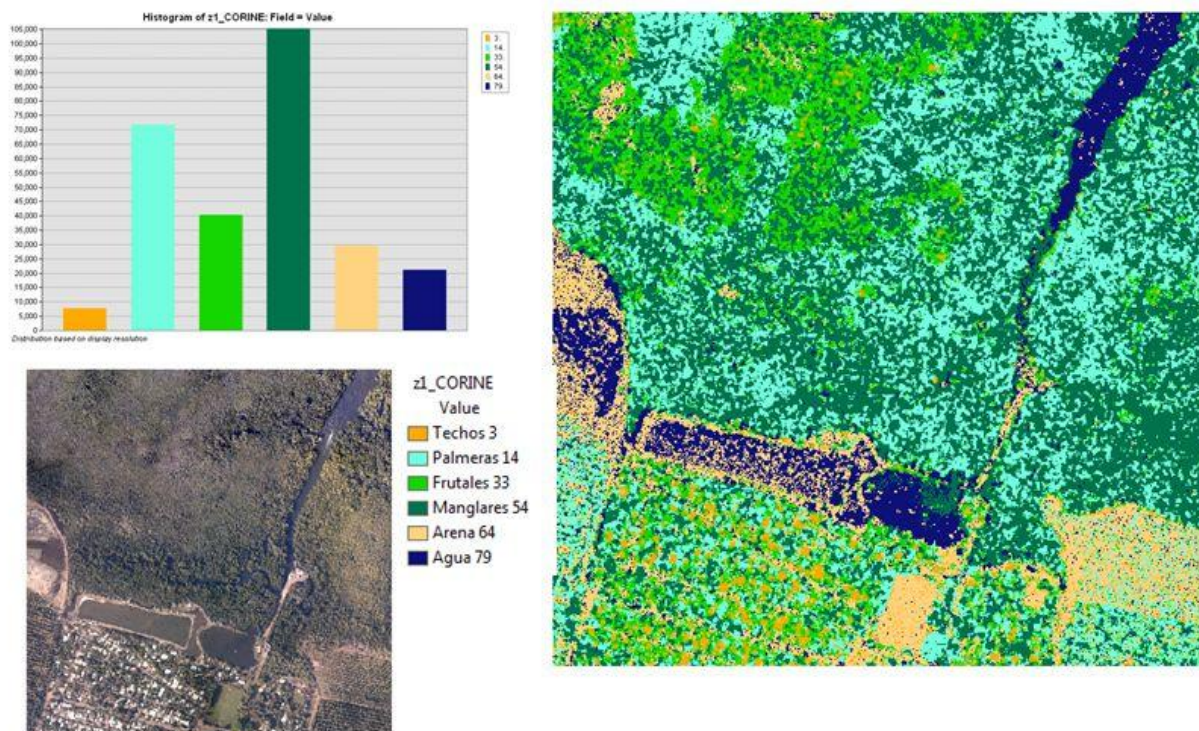


F39. Potencialidades para el ajuste.(a) Para la zona urbana se interpreta la muestra de “café” como arboles de sombra sobre la calle y en (b) al noroeste del norte del mismo tile se toma el café muestra como café.

8.4.4 Presentación y Análisis de resultados

Los siguientes resultados corresponden a una clasificación CORINE Land Cover luego de que los datos de entrada son sometidos al geoprocusamiento definido en la sección 8.3.2 y a la interpretación descrita en la sección 8.3.1.

8.4.4.1 Zona 1 en la Tierra Caliente baja (0-100msnm)



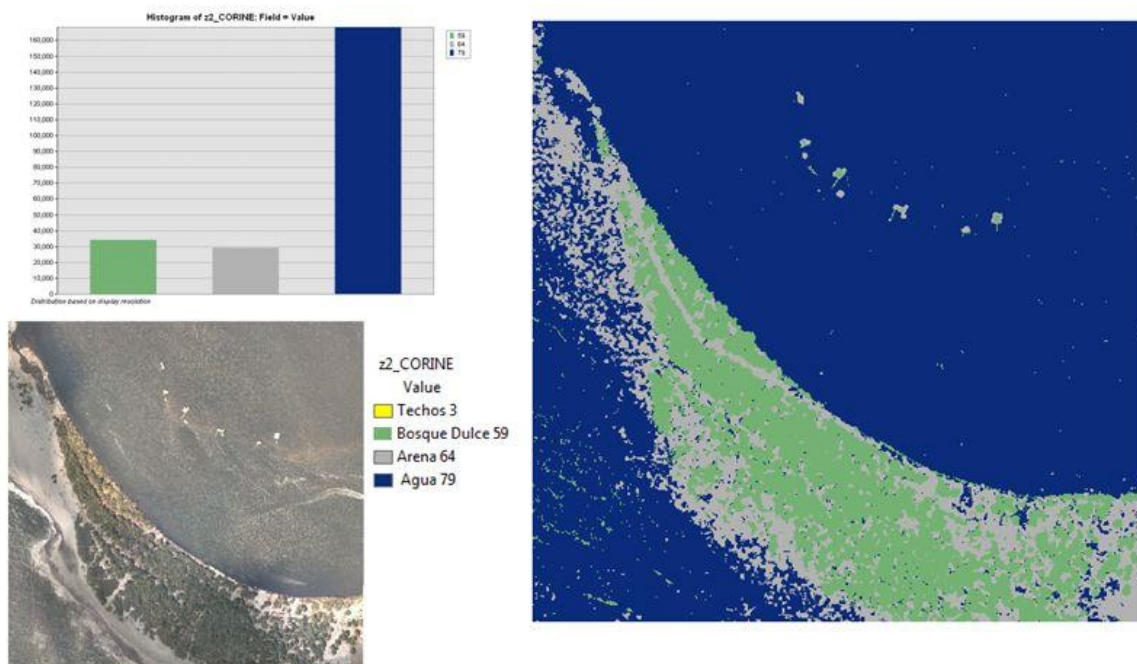
F40. Clasificación CORINE para la zona 1 de la tierra caliente en San Juan del Gozo, Jiquilisco.

La presencia de manglares es la más notable en la zona y en el histograma. Las palmeras se definen en su zona de presencia mayor SE y SO, mientras los arbustos se hacen presentes en el asentamiento. Sin embargo el bosque de manglares presenta una cantidad grande de “palmeras” y “arbustos” que solo pueden interpretarse en base a las variaciones de reflectividad de los mismos mencionadas en la sección 8.3.2 y para tener una interpretación más certera, es posible realizar otra clasificación con la tabla de ajuste y utilizar las herramientas descritas en 8.3.3. La presencia de agua tiene ruido de arena y los techos se identifican claramente en la clase CORINE 3 en la zona del asentamiento.

zona 1			
ID_VC	Valor Cobertura	Interpretación	CORINE
1	1	Agua	79
2	2	Agua	79
3	3	Agua	79
4	10	Arena	64
5	20	Arena	64
6	30	Agua	79
7	100	Techos	3
8	200	Frutales	33
9	300	Manglares	54
10	1000	palmeras	14
11	2000	palmeras	14
12	3000	Manglares	54
13	10000	Palmeras	14
14	20000	Palmeras	14
15	30000	Manglares	54

T32. Tabla de ajuste para la zona 1.

8.4.4.2 Zona 2 en la Tierra Caliente (0-100msnm)



F41. Clasificación CORINE para la zona 2 de la tierra caliente en “La Puntilla” en La Herradura.

La presencia de agua ocupa la mayor parte de esta zona, el bosque y la arena se delimitan muy bien ocupando esta última un área levemente mayor. El ruido de bosque dulce y arena está presente en el agua debido a las variaciones de tonalidades y colores; debido a la espuma de las olas y variaciones en el ángulo de reflexión. Debido a que los techos de los ranchos que funcionan como restaurantes flotantes están hechos de paja, no aparecen en la clase CORINE 3 sino más bien con valor de cobertura de 200,300, similar al del bosque dulce y se encuentran incluidos en dicha clase.

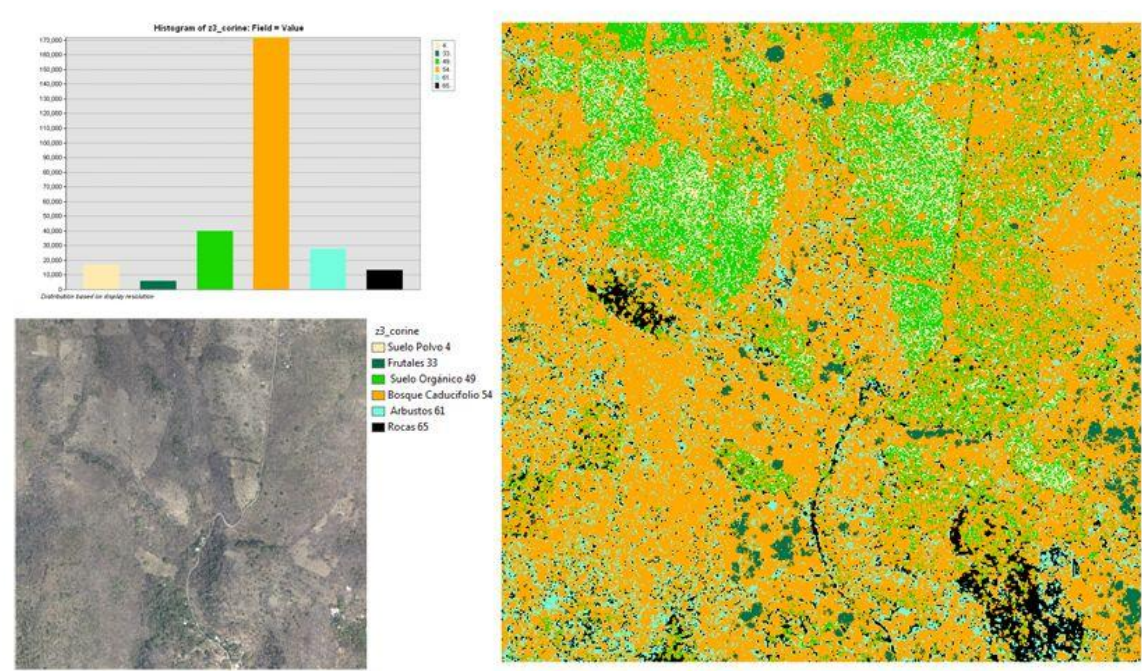
zona 2			
ID_VC	Valor Cobertura	Interpretación	CORINE
1	1	Arena	64
2	2	Agua	79
3	3	Agua	79
4	10	Arena	64
5	20	Agua	79
6	30	Agua	79
7	100	Arena	64
8	200	Bosque dulce	59
9	300	Bosque dulce	59
10	1000	Bosque dulce	59
11	2000	Bosque dulce	59
12	3000	Bosque dulce	59

T33. Tabla de ajuste para la zona 2.



F42. Objetos de zona 2. Bosque dulce(a) y variaciones de intensidad por el oleaje en La Puntilla (b).

8.4.4.3 Zona 3 en la Tierra Caliente media (100-500msnm)



F43. Clasificación CORINE para la zona 3 de la tierra caliente en Zaragoza, La Libertad

El bosque caducifolio en CORINE 54, ocupa la mayor presencia de esta zona, en verse oscura se observan arboles de sombra altos que a menudo son frutales con un valor de cobertura 20000, 30000; en esta zona existe presencia de rocas volcánicas consideradas con un VC de 3 y 30, ocupando la clase CORINE 65. El suelo orgánico se ha considerado en alturas de 0,5 m, ocupando la clase CORINE 49. Es notable la presencia de arbustos (CORINE 61) Y suelo de polvo descubierto (CORINE 4).

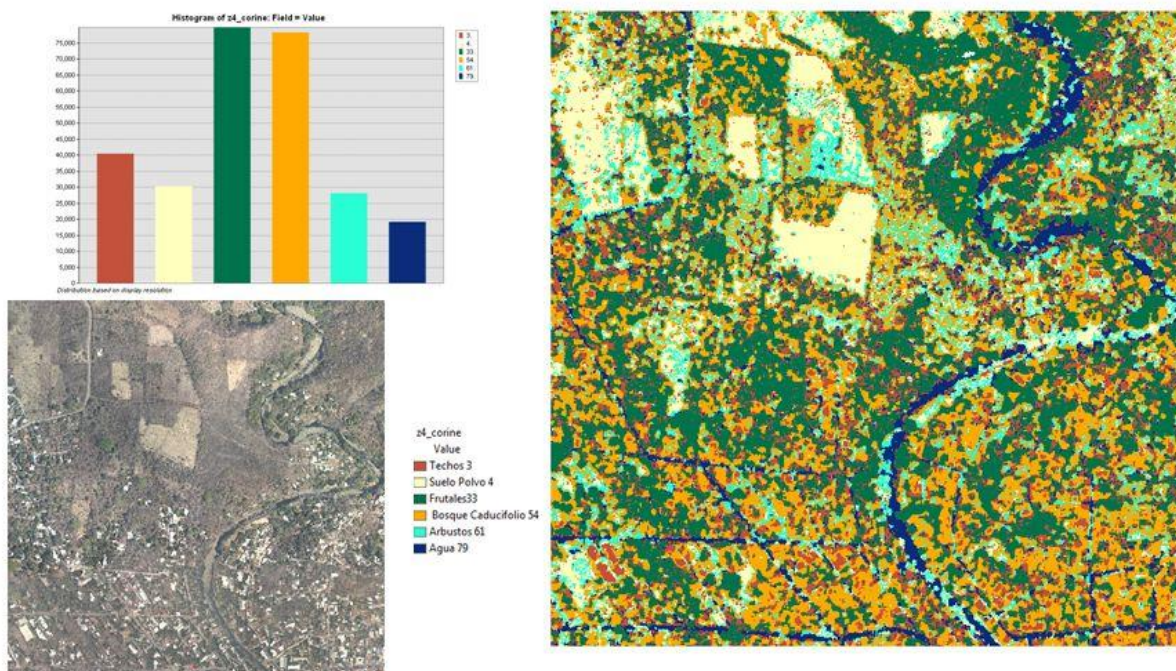
zona 3			
ID_VC	Valor Cobertura	Interpretación	CORINE
1	1	Suelo polvo	4
2	2	suelo orgánico	49
3	3	Rocas	65
4	10	suelo orgánico	49
5	20	Bosque caducifolio	54
6	30	Rocas	65
7	100	Bosque caducifolio	54
8	200	Bosque caducifoleo	54
9	300	Arbustos	61
10	1000	Bosque caducifolio	54
11	2000	Bosque caducifolio	54
12	3000	Frutales	33
13	10000	Frutales	33
14	20000	Frutales	33
15	30000	Frutales	33

T34. Tabla de ajuste para la zona 3.



F44. Objetos de zona 3. Rocas presentes(a), suelo orgánico caducifolio (b) y árboles frutales entre el bosque caducifolio(c).

8.4.4.4 Zona 4 Tierra Caliente media (100-500msnm)



F45. Clasificación CORINE para la zona 4 en el río Chilama en La Libertad.

La zona 4 incluye asentamientos y por ende techos en CORINE 3 Y suelo desnudo en cultivos de estación en CORINE 4. Es relevante la presencia de agua del río Chilama en CORINE 79 y con presencia de arbustos en su cauce en CORINE 61, sin embargo se presenta con igual valor de cobertura en los caminos vecinales y para separar esta polimorfía se sugiere el método en la **sección 8.3.3**. Notable es la presencia de los bosques de galería siempre verdes incluidos en CORINE 33.

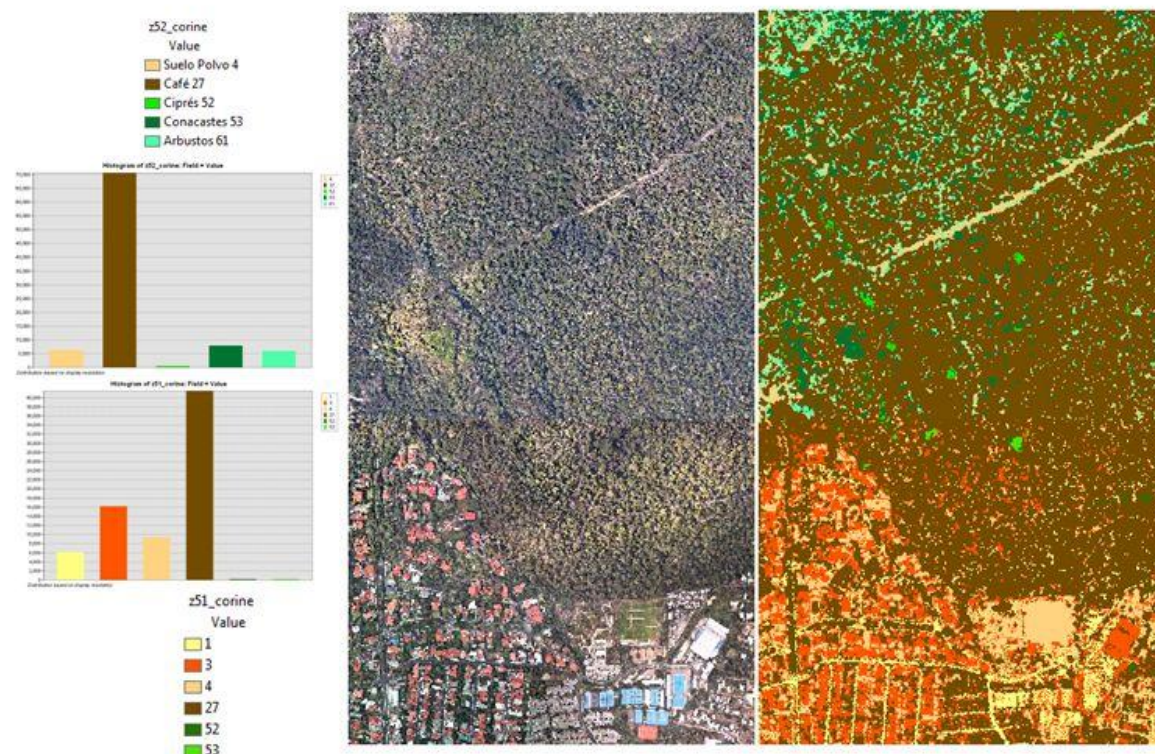
zona 4			
ID_VC	Valor Cobertura	Interpretación	CORINE
1	1	Suelo polvo	4
2	2	Agua	79
3	3	Agua	79
4	10	Suelo polvo	4
5	20	Arbustos	61
6	30	Agua	79
7	100	Techos	3
8	200	Bosque caducifolio	54
9	300	Techos	3
10	1000	Bosque caducifolio	54
11	2000	Bosque caducifolio	54
12	3000	Frutales	33
13	10000	Frutales	33
14	20000	Frutales	33
15	30000	Frutales	33

T35. Tabla de ajuste para la zona 4



F46. Objetos de zona 4. Cultivo de estación (Maíz/Milpa)(a) y río Chilama con presencia de arbustos(b).

8.4.4.5 Zona 5 Tierra Templada media (800-1800msnm)



F47. Clasificación CORINE para la zona del ecoparque El Espino y ciudad Merlito en el AMSS.

En la zona 5 se incluyeron 2 tiles con el objeto de mostrar la zona 52 ubicada al norte y la zona 51 ubicada al sur. En la zona 52 se delimita claramente una mayor presencia de café en CORINE 27 y los caminos de polvo se delimitan claramente en CORINE 4, junto a los árboles de conacaste, entre otros (CORINE 53) y coníferas como el ciprés (CORINE 52) que sirven como árboles de sombra para un cafetal. En la zona 51 se muestra una mezcla de un tejido urbano continuo en donde se han clasificado solamente los techos de viviendas y edificios en el valor de cobertura 100 y 1000 en CORINE 3. La presencia de “café” como árboles de sombra de calles y avenidas, resulta inseparable presentando polimorfía; el ajuste de estas zonas se describe en la sección 8.3.3.



F48. Camino de polvo entre cafetales con presencia de arboles de sombra, conacastes, cipreses; entre otros.

zona 52			
ID_VC	Valor Cobertura	Interpretación	CORINE
1	1	Suelo	4
2	2	Suelo	4
3	3	Suelo	4
4	10	Polvo	4
5	20	Tierra	4
6	30	Suelo	4
7	100	Arbustos	61
8	200	Conacaste	53
9	300	Conacaste	53
10	1000	Conacaste	53
11	2000	Café	27
12	3000	Café	27
13	10000	Conacaste	53
14	20000	Conacaste	53
15	30000	Ciprés	52

zona 51			
ID_VC	Valor Cobertura	Interpretación	CORINE
1	1	Suelo Polvo	4
2	2	Suelo Cemento	3
3	3	Piscinas, canchas, asfalto	1
4	10	Suelo Polvo, grama	4
5	20	Superficies construcción	1
6	30	Piscinas, canchas	1
7	100	Techos	3
8	200	café	27
9	300	Café	27
10	1000	Techos blancos	3
11	2000	Café	27
12	3000	Café	27
13	10000	Conacaste	53
14	20000	Conacaste	53
15	30000	Ciprés	52

T36 Tablas de ajuste para la zona 51 y 52.

8.4.5-Validación Temática

La validación temática se realiza en base a todos los puntos de muestra que fueron obtenidos in situ en las visitas realizadas en la época seca entre febrero y marzo de 2015; incluyendo todas las zonas de las tierras caliente, templada y fría. Se realizó mediante la coincidencia de clase CORINE observada con la clase obtenida de la extracción de valores de los resultados (rasters) finales por zona con la clase CORINE. Los elementos observados solo se consideraron una vez; así que de las 12 observaciones incluidas solo se tomaron 11 debido a que el ciprés se presenta repetido. La calidad temática viene dada por:

Calidad temática=Valores coincidentes/Valores Totales=10/11=90.9%

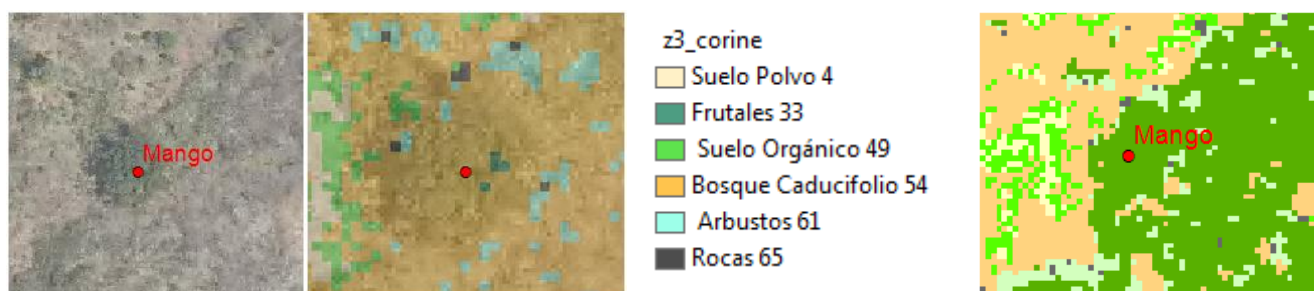
Objeto	Tierra	Zona	Elevacion	Altura	Observacio	CORINE	z2_corine	z51_corine	z52_corine	z4_corine	z3_corine
Puntilla	Caliente	zona 4	17	0			0	0	0	0	0
Bosque Dulce	Caliente	zona 4	17	0		ok	59	0	0	0	0
Arboles Frutales	Caliente	zona 4	7	20	Asentamiento		0	0	0	0	0
Bosque Salado	Caliente	zona 4	15	25			0	0	0	0	0
Manglar de gua	Caliente	zona 4	18	5	Cincahuete		0	0	0	0	0
Rancho flotante	Caliente	zona 4	10	0	1m Profundidad	ok	59	0	0	0	0
Dos quebradas	Caliente	zona 2	98	0	Conacaste blanco		0	0	0	0	0
Piedra volcanica	Caliente	zona 2	105	0	arbol zorrillo		0	0	0	0	0
Cueva baja	Caliente	zona 2	110	0	Coluzas	ok	0	0	0	0	54
Mango	Caliente	zona 2	115	0		no	0	0	0	0	54
Pinai de mutate	Caliente	zona 2	130	0	Jocote	ok	0	0	0	0	54
Plano de milpa	Caliente	zona 2	135	0		ok	0	0	0	0	4
La Cueva	Caliente	zona 2	158	0	Chaparral	ok	0	0	0	0	54
Siempreverde	Caliente	zona 6	47	0	Arbol Mango&Piedra 3m		0	0	0	33	0
Almendro de río	Caliente	zona 6	39	0			0	0	0	54	0
Arbol de Sombracafe	Templada	zona 5	927	20			0	27	0	0	0
cafetales	Templada	zona 5	973	0			0	4	0	0	0
ciprés	Templada	zona 5	948	15	orilla de calle	no	0	27	0	0	0
cafetal limpio	Templada	zona 5	999	0		ok	0	53	0	0	0
suelo	Templada	zona 5	1004	30	arbuatos	ok	0	3	0	0	0
ciprés	Templada	zona 5	1024	40	orilla de calle	no	0	0	27	0	0
suelo desnudo tierra	Templada	zona 5	1082	0	fin de ruta	ok	0	0	27	0	0
esquina de casa	Fria	zona 1	1976	0			0	0	0	0	0
ahuacate	Fria	zona 1	1956	0			0	0	0	0	0
roble1	Fria	zona 1	1945	0			0	0	0	0	0
frontera tierra fria	Fria	zona 1	1921	0			0	0	0	0	0
suelo hojas café	Fria	zona 1	1947	0			0	0	0	0	0
roble2	Fria	zona 1	1940	0			0	0	0	0	0

T37. Tabla de control de calidad temático.

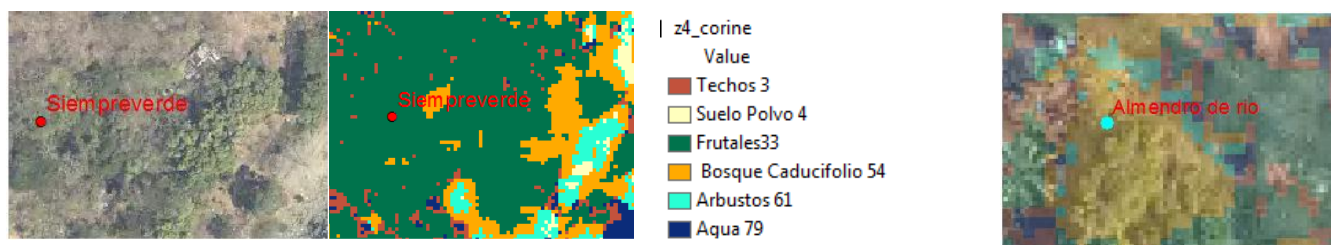
Los casos de mención notable para la validación temática muestran a continuación:



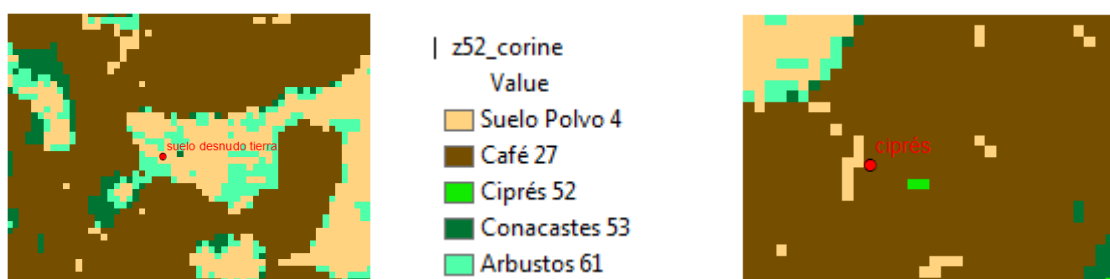
F49. En la zona 2 de la tierra caliente baja el techo de los ranchos flotantes es de paja, razón por la cual tiene una reflectividad similar al bosque dulce y se ubican en la misma clasificación.



F50. (a) En la zona 3 de la tierra caliente media no es posible disgregar un árbol de mango del bosque caducifolio, (b) En la imagen derecha se observa una clasificación de ajuste no considerada, en donde se incluyen los valores de intensidad más bajos combinados con la penúltima clase de alturas (en la tabla de ajuste el valor 3000). Este ajuste da como resultado un exceso de presencia de la clase CORINE 33 de árboles frutales.



F51. (a) En la zona 4 de la tierra caliente media es posible identificar a la presencia certera de frutales ubicados en los bosques de galería *siempre verdes* que se ubican en la riberia de los ríos. (b) En la imagen derecha se observa un almendro de río con un color de hojas verde claro característico que se ubica en el rango de intensidad 3000 en el *bosque caducifolio*.



F52. (a) En la parte norte de la zona 5 en el eco parque de cafetales el espino se identifica certeramente el suelo desnudo; sin embargo en (b) los cipreses identificados in situ no pertenecen a la clase 30000 pese a la presencia de dos celdas CORINE 52 (Ciprés) en su cercanía.

8.5-Conclusiones y trabajo futuro

- a) Es posible realizar una clasificación CORINE Land Cover a partir del geoprocesamiento de geodatos LIDAR, siendo muy necesaria como punto de partida la aplicación de filtros focales estadísticos a los valores de intensidad y posteriormente el desarrollo de un sistema de clasificación en un orden de una cifra decimal por clase que permita la delimitación y focalización de las coberturas presentes en los estratos en función de los rangos de altura.
- b) La agregación y reclasificación de objetos en grupos facilitaría la delimitación de zonas para la vectorización de los datos y producción cartográfica.
- c) La validación arroja muy buenos resultados con un porcentaje de calidad temática de 90.9%.
- d) El *valor de cobertura VC*, definido en el presente trabajo tiene un carácter modular; en su interpretación radica la clasificación de un objeto CORINE Land Cover y en su significado se han estratificado los objetos que comparten similar intensidad en base a un arreglo matemático de orden decimal que genera un identificador único e irrepetible para un conjunto reducido de los posibles objetos de cobertura presentes.
- e) Los objetos que presentan lo que en este trabajo se ha llamado *polimorfía de intensidad* y que al mismo tiempo se ubican en el mismo estrato clase decimal especial, presentan por ende el mismo *valor de cobertura(VC)*. Esto significa una inseparación y para ello se sugiere el análisis de estas zonas a través de la selección de zonas de muestra y las herramientas que ofrece Arcgis 10.2.
- f) Ha sido posible identificar objetos diversos con diferente precisión de tamaños e intensidades. Los casos destacados son las rocas en CORINE clase 65 y la diferenciación de diferentes tipos de vegetación; en el caso más propicio lo facilitó la estación seca en el bosque caducifolio debido al notable cambio de intensidad, pero en vegetación verde se logró diferenciar tipos dependiendo de la altura que los representa y en algunos casos como es el caso del Almendro de río, el Bosque dulce, palmeras y conacaste blanco por tener una intensidad mayor que otras los manglares, árboles de mango y cipreses que se presentan con menor intensidad.

Trabajo futuro

- g) Es posible desarrollar los geoprocursos para desarrollar una cartografía vectorial CORINE Land Cover de El Salvador a partir de geodatos LIDAR, con información alfanumérica que registre las coberturas históricas en los tres períodos más relevantes.
- h) Es posible delimitar zonas que representen los ecosistemas, a través de la agregación de clases CORINE y partir de esta delimitación, desarrollar los geoprocursos que conlleven a una cartografía de ecosistemas de El Salvador.
- i) Es posible desarrollar procesos semi automáticos que apoyen el geoprocusamiento. Un proceso de interpretación automático que logre desarrollar un método que supere el *polimorfismo de intensidad* deberá involucrar métodos complejos de PPA (*Point Pattern Analysis*) en el campo del *Data Mining* en una *Supervised Learning Machine*, para realizar una clasificación más exacta que considere la variabilidad entre zona y zona. El algoritmo de clasificación desarrollado puede considerarse como el esquema de datos de entrenamiento (*Training Data*).
- j) La forma de onda (*Waveform*) puede proporcionar información valiosa para superar este polimorfismo de intensidad; así como obtener datos de concentración o dispersión focal de la nube de puntos (*Clustering*) para las coberturas en cuestión. Los datos de la forma de onda como el ángulo de incidencia o un indicador de concentración para cada punto ofrecen una dimensión adicional y por ende una variable que puede interpolarse para generar un Raster adicional a incorporar en el *workflow* del geoprocusamiento para poder diluir o separar estos casos y adicionalmente reducir el ruido considerablemente. Contando con información de la banda termal es posible a su vez, abonar en otra dimensión de análisis.



F53. Cartografía de Lauer (1956) modificada con CORINE en LIDAR en color para
La zona de la Isla del Espíritu Santo en San Juan del Gozo en la Tierra Caliente.

BIBLIOGRAFIA

- Al-Ahmadi, F.S., 2009. Comparison of Four Classification Methods to Extract Land Use and Land Cover from Raw Satellite Images for Some Remote Arid Areas, Kingdom of Saudi Arabia. *Earth Sci.* 20, 167–191.
- Alhaddad, B.I., 2008. Satellite Imagey and LIDAR data for efficiently describing structures and densities in residential urban land uses classification. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* Vol. XXXVII., part B8.
- Andreas Behrendt, 2005. Temperature Measurements with Lidar, in: *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, Optical Sciences. Springer.
- Ansmann, A., Müller, D., 2005. Lidar and Atmospheric Aerosol Particles, in: *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Springer.
- ArcGIS Help 10.1 - Crear imágenes de intensidad a partir de LIDAR en ArcGIS [WWW Document], 2014. URL <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#/na/015w00000055000000/> (accessed 10.9.14).
- Baltsavias, E., 2014. *Airborne Laser Technology, Data Processing and Applications*.
- B. I. Alhaddad, J.R., M. C. Burns, J. Garcia, 2008. Satellite Imagey and LIDAR data for efficiently describing structures and densities in residential urban land uses classification. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, International journal of Remote Sensing and GIS Vol. XXXVII.
- Borges, J.S., 2004. Comparison of three supervised classification methods for deriving land cover maps from ASTER satellite images. Universidade Porto Rua Campo Alegre.
- Brenner, C., Vosselman, G., 2006. *Aerial Laser Scanning*.
- Browell, E.V., 1984. Remote Sensing from Space Platforms, in: *Tunable Solid State Lasers for Remote Sensing*. Springer Verlag, NASA Langley Research Center, Hampton,USA.
- Brown, D.C., 2005. Scalability of High Average Power Solid State Lasers, in: *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Springer.
- Bruni, F.J., 1984. Growth of Nd:YAG and Cr, Nd:GScGG - A comparative study, in: *Tunable Solid State Lasers for Remote Sensing*. Springer Verlag, NASA Langley Research Center, Hampton,USA.
- Building and Fire Research Laboratory, Manufacturing Engineering Laboratory, 2004. *Performance Analysis of Next-Generation LADAR for Manufacturing, Construction, and Mobility*.
- Byer, R.L., Gustafson, E.K., Trebino, R., 1984a. *Tunable Solid State Lasers for Remote Sensing*, Optical Sciences. Springer Verlag.
- Chang, W., 2005. *Principles of Lasers and Optics*. Cambridge University Press, New York.
- Chaoyi, C., 2008. CLASSIFICATION OF LIDAR POINT CLOUD AND GENERATION OF DTM FROM LIDAR HEIGHT AND INTENSITY DATA IN FORESTED AREA. *Int. Arch. Photogr Ammetry Remote Sens. Spat. Inf. Tion Sci.* 37, Part B3b.
- Chipman, J., Kiefer, R., Lillestand, T., 2004. *Remote Sensing and Image Interpretation*, Fifth Edition. ed. WILEY.
- Eichhorn, M., 2013. *Laserphysik Grundlagen und Anwendungen für Physiker, Maschinenbauer und Ingenieure*, Springer Spektrum. Springer, Berlin Heidelberg.
- European Commission [WWW Document], n.d. URL <http://www.ec-gis.org/> (accessed 5.28.15).
- European Communities, 2001. *Manual of concepts on land cover and land use information systems*, 2000th ed. Office for Official Publications of the European Communities.
- FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations), n.d. *Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas: manual introductorio* [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/docrep/003/t0355s/t0355s02.htm> (accessed 1.29.15).
- F.J. Bruni, 1984. Wavelength Conversion via Stimulated Raman Scattering, in: *Tunable Solid State Lasers for Remote Sensing*. Springer Verlag, NASA Langley Research Center, Hampton,USA.

- GEMINI - Optech - PDF Catalogue | Technical Documentation | Brochure [WWW Document], 2014. URL <http://pdf.directindustry.com/pdf/optech/gemini/25132-387475.html> (accessed 11.18.14).
- Giri, C.P., 2012. Remote Sensing of Land Use and Land Cover, Principles and Applications. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Halliday & Resnick, 2011. Fundamentals of Physics, 9th Edition. ed. Wiley.
- Harfield, K., 2011. Fusion of High Resolution Aerial Multispectral and LiDAR Data: Land Cover in the Context of Urban Mosquito Habitat. *Remote Sens.* 3, 2364–2383.
- HASEGAWA, H., 2006. Evaluations of LIDAR reflectance amplitude sensitivity towards land cover conditions. *Bull. Geographical Surv. Inst.* Vol. 53, 43–50.
- Intensity - LiDAR News [WWW Document], 2014. URL <http://blog.lidarnews.com/intensity> (accessed 10.15.14).
- Kaartinen, H., 2007. RADIOMETRIC CALIBRATION OF ALS INTENSITY. *Finn. Geod. Inst. Dep. Remote Sens. Photogramm. Hels. Univ. Technol. Lab. Photogramm. Remote Sens., Commission WG III/3, III/4, V/3, VIII/11 Volume XXXVI, Part 3 / W52.*
- Kaasalainen, S., 2011. Absolute Radiometric Calibration of ALS Intensity Data: Effects on Accuracy and Target Classification. *Sensors*, Open Access 11.
- Keil, M., Strunz, G., 2002. Das Projekt CORINE Land Cover 2000 in Deutschland. Presented at the Tagungsband 19. DFD-Nutzerseminar, Berlin, pp. 95–104.
- Sassen K, 2005. , in: *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Optical Sciences*. Springer.
- Kim, S., 2008. INDIVIDUAL TREE SPECIES IDENTIFICATION USING LIDAR INTENSITY DATA. Presented at the ASPRS 2008 Annual Conference, Portland, Oregon.
- Laser Radar/LIDAR/LADAR and Eye-safe Lasers | Sensors Unlimited [WWW Document], 2014. URL <http://www.sensorsinc.com/applications/military/ladar> (accessed 11.13.14).
- Lauer, W., 1956. *Vegetation, Landnutzung und Agrarpotential in El Salvador (Zentralamerika)*. Selbstverlag Geogr. Inst. Univ. Kiel, Schriften des Geographischen Institut der Universitaet Kiel Band XVI, Heft I.
- Lillesand, T., Kiefer, R., 2008. *Remote sensing and image interpretation*, 6th ed. Wiley.
- Liu, Y.S., Jones, W., 1984. Progress in Solid-State Slab Laser, in: *Tunable Solid State Lasers for Remote Sensing*. Springer.
- MARN, 2002. Metodología CORINE Land Cover.
- MARN inicia mapeo aéreo de elevación digital de todo El Salvador [WWW Document], n.d. URL http://www.marn.gob.sv/index.php?option=com_content&view=article&id=2203:marn-inicia-mapeo-aereo-de-elevacion-digital-de-todo-el-salvador&catid=1:noticias-ciudadano&Itemid=227 (accessed 7.16.14).
- McCormick, M.P., 2005. Airborne and Spaceborne Lidar, in: *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Springer Series in Optical Sciences*. Springer, pp. 355–397.
- Menzies, R.T., 1984. Coherent und Inchoheren Lidar-an Overwiev, in: *Tunable Solid State Lasers for Remote Sensing*. Springer.
- Ministerio de medio ambiente y recursos naturales, 2013. Servicios para la obtención de imagenes LIDAR y fotogrametría para la producción de modelos de elevación digital y de superficies ortofotográficas.
- MORÁN, T., 2013. Cartografía de Vegetación en la Comunidad de Madrid utilizando información LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Presented at the VI Congreso Forestal Español.
- Phase One & Mamiya/Leaf Digital Solutions [WWW Document], 2014. URL <http://www.digitaltransitions.com/> (accessed 11.18.14).
- Resonant saturable absorber mirror - RSAM information [WWW Document], n.d. URL http://www.batop.de/information/RSAM_infos.html (accessed 2.12.15).

- R.T.Menzies, 1984. Coherent und Inchoheren Lidar-an Overwiev, in: Tunable Solid State Lasers for Remote Sensing, Optical Sciences. Springer.
- Sassen, K., 2005. Polarization in LIDAR, in: Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. Springer.
- Song, J.-H., 2002. ASSESSING THE POSSIBILITY OF LAND-COVER CLASSIFICATION USING LIDAR INTENSITY DATA. Sch. Civ. Urban Geo Syst. Eng. Seoul Natl. Univ. South Korea, Commission III, PCV02.
- State-of-the-art | Define State-of-the-art at Dictionary.com [WWW Document], n.d. URL <http://dictionary.reference.com/browse/state-of-the-art> (accessed 3.23.15).
- Stephens, D., 2014. A Comparison of Supervised Classification Methods for the Prediction of Substrate Type Using Multibeam Acoustic and Legacy Grain-Size Data. PLoS ONE 9, e93950.
- The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, 2009. LAS SPECIFICATION VERSION 1.3 – R10. The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing.
- The Federal Geographic Data Committee — Federal Geographic Data Committee [WWW Document], 2014. URL <https://www.fgdc.gov/> (accessed 11.14.14).
- Theopold, T.A., Wolf, J.P., Wöste, L., 2005. DIAL Revisited: BELINDA and White Light Femtosecond Lidar, in: Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. Springer, pp. 355–397.
- Träger, F., 2007. Handbook of Lasers and Optics 2007, Springer Science+Business Media. Springer, LLC New York.
- Perdigao V, Annoni A, 1997. Technical and Methodical Guide for Updating Corine Land Cover Data Base. European Environment Agency.
- Wandinger, U., 2005. Introduction to Lidar, in: Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere. Springer.
- Weitkamp, C., 2005. Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Springer series in optical sciences. Springer.
- Weng, Q., 2010. Remote Sensing and GIS Integration(Theories,Methods, and Applications). McGraw-Hill.
- Wilheim, L., 1956. Vegetation, Landnutzung und Agrarpotential in El Salvador(Zentralamerika), Schriften des geographischen Instituts der Universität Kiel. Geogr. Inst. d. Univ.
- World Institute for Conservation and Environment, 2011. MAPA DE LOS ECOSISTEMAS DE EL SALVADOR, ACTUALIZACIÓN ENERO 2011.
- YEPEZ, F., 2013. NIVELES DE DENSIDAD URBANA ESTIMADA CON DATOS LIDAR DE MEDIANA RESOLUCIÓN, EN MONTERREY, N.L. MÉXICO. ITESM Campus Monterrey.

ANEXOS

ANEXO 1. Unidades Radiométricas

Table 1.1 Radiometric units

	Symbol	SI unit	Definition
Radiant energy	Q_e	J = W s	—
Radiant energy density	w_e	J/m ³	$w_e = \langle dQ_e / dV \rangle$
Radiant flux (power)	Φ_e	W	$\Phi_e = \langle dQ_e / dt \rangle$
Radiant exitance	M_e	W m ⁻²	$M_e = \langle d\Phi_e / dA \rangle$
Irradiance	E_e	W m ⁻²	$E_e = \langle dQ_e / dt \rangle$
Radiant intensity	I_e	W sr ⁻¹	$I_e = \langle d\Phi_e / d\Omega \rangle$
Radiance	L_e	W m ⁻² sr ⁻¹	$L_e = I_e / \Delta A \equiv \langle d^2\Phi_e / d\Omega \cdot dA \rangle$

Table 1.2 Photometric units

	Symbol	SI unit	Photometric unit	Definition
Luminous energy	Q_v	J=W s	lm s (talbot)	—
Luminous energy density	W_v	J / m ³	lm s/m ³	$w_v = \overline{dQ_v / dV}$
Luminous intensity	I_v	W sr ⁻¹	lm sr ⁻¹ = candela (cd)	$I_v = \overline{d\Phi_v / d\Omega}$
Luminous power	Φ_v	W	lm (lumen)	$\Phi_v = \overline{dQ_v / dt}$
Luminous exitance	M_v	W m ⁻²	lm m ⁻²	$M_v = d\Phi_v / dA$
Illuminance	E_v	Wsr ⁻¹	lux (lx) = lm m ⁻²	$E_v = d\Phi_v / dA$
Luminance (Apostilb)	L_v	W m ⁻² sr ⁻¹	asb = 1/π cd/m ²	$L_v = \overline{d^2\Phi_v / dA \cdot d\Omega}$

ANEXO 2a. Codificación global del formato LAS

Table 4.4 - Global Encoding - Bit Field Encoding

Bits	Field Name	Description
0	GPS Time Type	The meaning of GPS Time in the Point Records 0 (not set) -> GPS time in the point record fields is GPS Week Time (the same as previous versions of LAS) 1 (set) -> GPS Time is standard GPS Time (satellite GPS Time) minus 1 x 10 ⁹ (Adjusted Standard GPS Time). The offset moves the time back to near zero to improve floating point resolution.
1	Waveform Data Packets Internal	If this bit is set, the waveform data packets are located within this file (note that this bit is mutually exclusive with bit 2)
2	Waveform Data Packets External	If this bit is set, the waveform data packets are located external to this file in an auxiliary file with the same base name as this file and the extension ".wdp". (note that this bit is mutually exclusive with bit 1)
3	Return numbers have been synthetically generated	If set, the point return numbers in the Point Data Records have been synthetically generated. This could be the case, for example, when a composite file is created by combining a First Return File and a Last Return File. In this case, first return data will be labeled "1 of 2" and second return data will be labeled "2 of 2"
4:15	Reserved	Must be set to zero

ANEXO 2b. Propiedades del Formato

Table 4.3 – Public Header Block

Item	Format	Size	Required
File Signature ("LASF")	char[4]	4 bytes	*
File Source ID	unsigned short	2 bytes	*
Global Encoding	unsigned short	2 bytes	*
Project ID - GUID data 1	unsigned long	4 bytes	
Project ID - GUID data 2	unsigned short	2 byte	
Project ID - GUID data 3	unsigned short	2 byte	
Project ID - GUID data 4	unsigned char[8]	8 bytes	
Version Major	unsigned char	1 byte	*
Version Minor	unsigned char	1 byte	*
System Identifier	char[32]	32 bytes	*
Generating Software	char[32]	32 bytes	*
File Creation Day of Year	unsigned short	2 bytes	*
File Creation Year	unsigned short	2 bytes	*
Header Size	unsigned short	2 bytes	*
Offset to point data	unsigned long	4 bytes	*
Number of Variable Length Records	unsigned long	4 bytes	*
Point Data Format ID (0-99 for spec)	unsigned char	1 byte	*
Point Data Record Length	unsigned short	2 bytes	*
Number of point records	unsigned long	4 bytes	*
Number of points by return	unsigned long[7]	28 bytes	*
X scale factor	Double	8 bytes	*
Y scale factor	Double	8 bytes	*
Z scale factor	Double	8 bytes	*
X offset	Double	8 bytes	*
Y offset	Double	8 bytes	*
Z offset	Double	8 bytes	*
Max X	Double	8 bytes	*
Min X	Double	8 bytes	*
Max Y	Double	8 bytes	*
Min Y	Double	8 bytes	*
Max Z	Double	8 bytes	*
Min Z	Double	8 bytes	*
Start of Waveform Data Packet Record	Unsigned long long	8 bytes	*

ANEXO 3. Fase en relacion al tiempo inicial de pulsos

Table 12.2 Temporal broadening of a Gaussian laser pulse Δt_{out} in fs for various initial pulse durations Δt and various values of the second-order phase coefficient ϕ'' , calculated with the help of (12.26). (The passage of a bandwidth-limited laser pulse at 800 nm through 1 cm of BK7 glass corresponds to $\phi'' = 440 \text{ fs}^2$. For the dispersion parameters of other materials see Table 12.3. Dispersion parameters of further optical elements are given in Sect. 12.1.3.)

$\Delta t(\text{fs})$	ϕ'' 100 fs ²	200 fs ²	500 fs ²	1000 fs ²	2000 fs ²	4000 fs ²	8000 fs ²
5	55.7	111.0	277.3	554.5	1109.0	2218.1	4436.1
10	29.5	56.3	139.0	277.4	554.6	1109.1	2218.1
20	24.3	34.2	72.1	140.1	278.0	554.9	1109.2
40	40.6	42.3	52.9	80.0	144.3	280.1	556.0
80	80.1	80.3	81.9	87.2	105.9	160.1	288.6
160	160.0	160.0	160.2	160.9	163.9	174.4	211.7

ANEXO 4. Parametros de dispersion para difertes emisiones de LASERs fabricados con materiales tipicos.

Table 12.3 Dispersion parameters n , $\frac{dn}{d\lambda}$, $\frac{d^2n}{d\lambda^2}$, $\frac{d^3n}{d\lambda^3}$, T_g , GDD and TOD for common optical materials for $L = 1 \text{ mm}$. The data were calculated using Sellmeier's equation in the form $n^2(\lambda) - 1 = B_1\lambda^2/(\lambda^2 - C_1) + B_2\lambda^2/(\lambda^2 - C_2) + B_3\lambda^2/(\lambda^2 - C_3)$ and data from various sources (BK7, SF10 from *Schott – Optisches Glas* catalogue; sapphire and quartz from the *Melles Griot* catalogue)

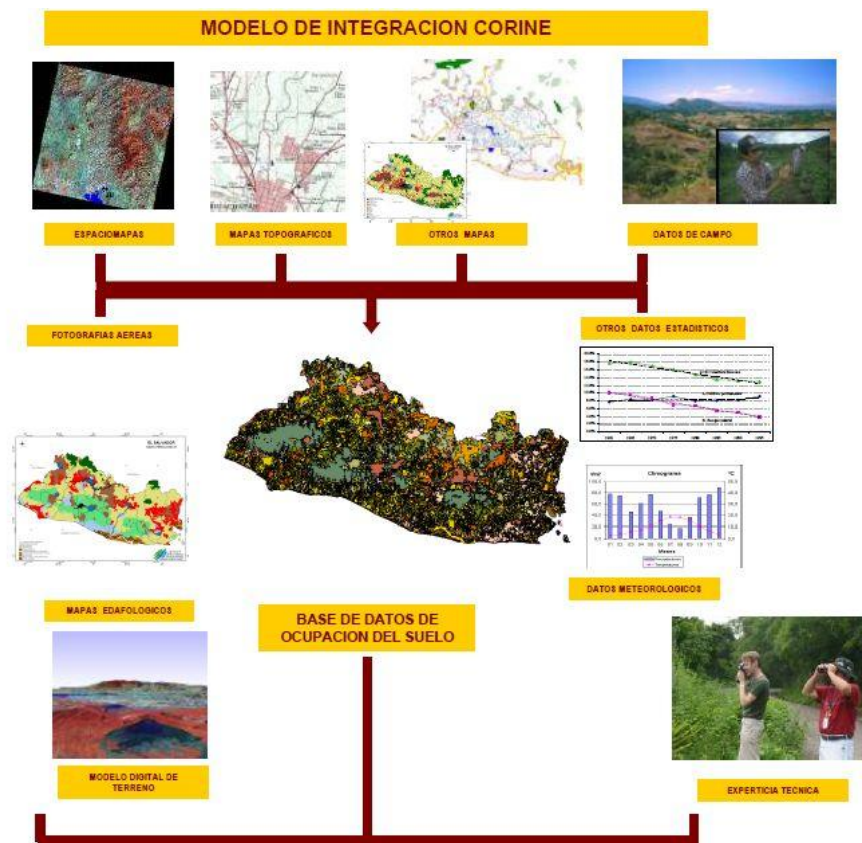
Material	$\lambda \text{ (nm)}$	$n \text{ (}\lambda\text{)}$	$\frac{dn}{d\lambda} \cdot 10^{-2}$ $\left(\frac{1}{\mu\text{m}}\right)$	$\frac{d^2n}{d\lambda^2} \cdot 10^{-1}$ $\left(\frac{1}{\mu\text{m}^2}\right)$	$\frac{d^3n}{d\lambda^3}$ $\left(\frac{1}{\mu\text{m}^3}\right)$	T_g $\left(\frac{\text{fs}}{\text{mm}}\right)$	GDD $\left(\frac{\text{fs}^2}{\text{mm}}\right)$	TOD $\left(\frac{\text{fs}^3}{\text{mm}}\right)$
BK7	400	1.5308	-13.17	10.66	-12.21	5282	120.79	40.57
	500	1.5214	-6.58	3.92	-3.46	5185	86.87	32.34
	600	1.5163	-3.91	1.77	-1.29	5136	67.52	29.70
	800	1.5108	-1.97	0.48	-0.29	5092	43.96	31.90
	1000	1.5075	-1.40	0.15	-0.09	5075	26.93	42.88
	1200	1.5049	-1.23	0.03	-0.04	5069	10.43	66.12
SF10	400	1.7783	-52.02	59.44	-101.56	6626	673.68	548.50
	500	1.7432	-20.89	15.55	-16.81	6163	344.19	219.81
	600	1.7267	-11.00	6.12	-4.98	5980	233.91	140.82
	800	1.7112	-4.55	1.58	-0.91	5830	143.38	97.26
	1000	1.7038	-2.62	0.56	-0.27	5771	99.42	92.79
	1200	1.6992	-1.88	0.22	-0.10	5743	68.59	107.51
Sapphire	400	1.7866	-17.20	13.55	-15.05	6189	153.62	47.03
	500	1.7743	-8.72	5.10	-4.42	6064	112.98	39.98
	600	1.7676	-5.23	2.32	-1.68	6001	88.65	37.97
	800	1.7602	-2.68	0.64	-0.38	5943	58.00	42.19
	1000	1.7557	-1.92	0.20	-0.12	5921	35.33	57.22
	1200	1.7522	-1.70	0.04	-0.05	5913	13.40	87.30
Quartz	300	1.4878	-30.04	34.31	-54.66	5263	164.06	46.49
	400	1.4701	-11.70	9.20	-10.17	5060	104.31	31.49
	500	1.4623	-5.93	3.48	-3.00	4977	77.04	26.88
	600	1.4580	-3.55	1.59	-1.14	4934	60.66	25.59
	800	1.4533	-1.80	0.44	-0.26	4896	40.00	28.43
	1000	1.4504	-1.27	0.14	-0.08	4880	24.71	38.73
	1200	1.4481	-1.12	0.03	-0.03	4875	9.76	60.05

ANEXO 5. Especificaciones técnicas de la cámara hiperspectral utilizada.

Technical Specifications

Camera type	Medium format camera for aerial photography	
Lenses	- Schneider-Kreuznach fast sync lenses for multiple camera configuration - Phase One digital focal plane lenses	
Lens mount	Phase One 645	
Shutter speed	- Focal plane: up to 1/4000 second - Leaf shutter: up to 1/1600 second*	
Shutter control	1/3 f-stop increments	
Sensor module interfaces	- FireWire 800 - USB 3	
Camera body interfaces	- Two secured I/O communication connectors (LEMO) - Secured power input (LEMO) - Mini USB connector for updating camera firmware	
Data storage	- Onboard computer - CompactFlash card Type VII including UDMA 6 and 7	
Synchronization speed in multiple camera configuration	100 microseconds with factory calibrated lenses	
Resolution	ixA 180 10320 x 7752 (80 MP)	ixA 160 8984 x 6732 (60.5 MP)
Dynamic range	>72 db	
Aspect ratio	4:3	
Pixel size	5.2 micron	6.0 micron
CCD size effective	53.7 x 40.4 mm	53.9 x 40.4 mm
Lens factor	1.0	
Light sensitivity (ISO)	35-800	50-800
Capture rate		
Full resolution	0.7 frame/second	0.8 frame/second
RAW File compression	IIQ large: 80 MB IIQ small: 54 MB	IIQ large: 60 MB IIQ small: 40 MB
Lens + technology optimizes	- Color cast - Light falloff - Chromatic aberration - Fringing - Sharpness falloff - Lens distortion	
Output format	Phase One Raw	
IR cut-off filter	Camera system available either with or without IR filter	
Connection to pod	Four M4 bolts	
Tripod sockets	Two 3/8 inch — on bottom and on left side (25 mm to locking pin hole)	
Power input	12 – 30 V DC	
Maximum power consumption	20 W	
Dimensions (excluding lens)	132 x 114 x 128.5 mm / 5.2 x 4.4 x 5 in (W x H x D)	
Weight (excluding lens)	1.7 kg / 3.7 lb	
Approvals	FCC (Class A), CE, RoHS	
Operating Conditions		
Temperature	-10° to 40°C (14° to 104°F)	
Humidity	15 to 80% (non-condensing)	
Operating systems / software for Phase One SDK	Windows 7® Mac OS X 10.6 or later	

ANEXO 6. Modelo de Integración en la clasificación de MARN para la cartografía vectorial de “Uso de Suelos”



ANEXO 7. Detalle de las especies de madera presentes en el bosque humedo y en el bosque seco.

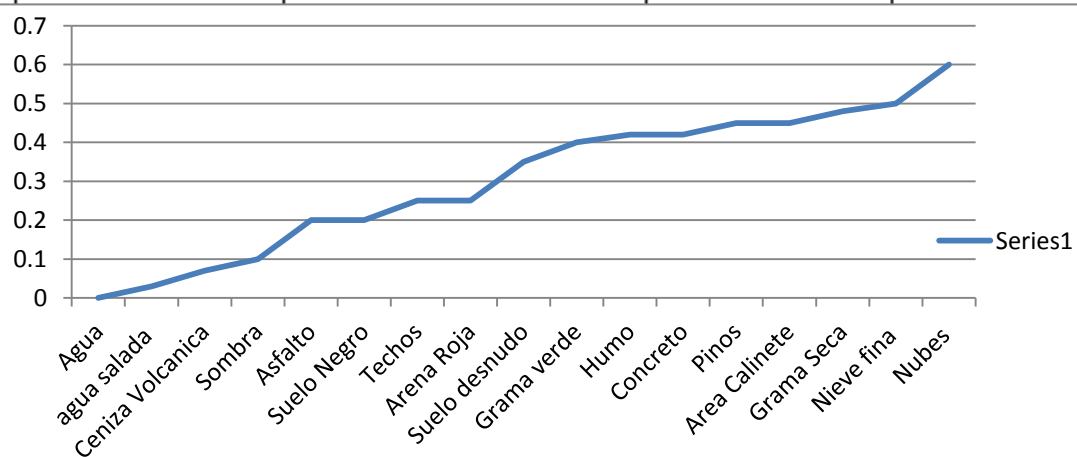
Folgende Tabelle zeigt den Verwendungszweck einiger Hölzer:

Holzentnahme aus den regengrünen Feucht- und Trockenwäldern

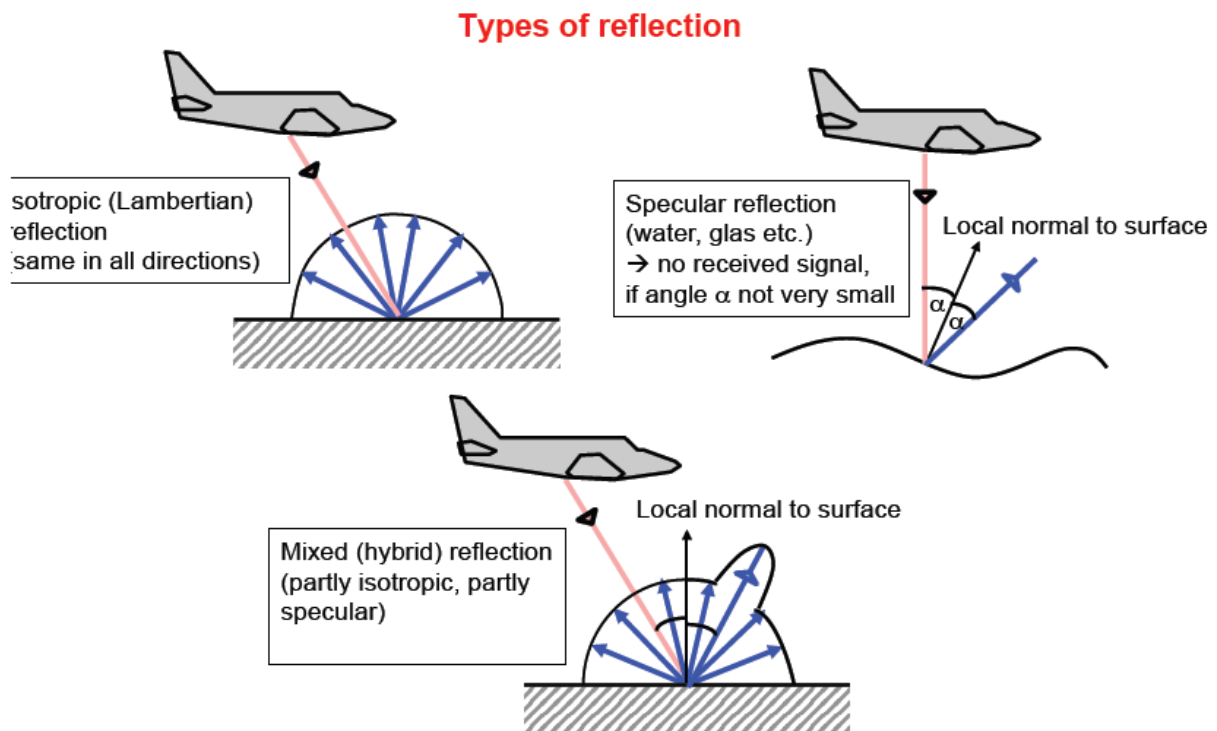
Verwendungszweck	Botanische Bezeichnung	Einheimischer Name
Bauholz (allgemein)	<i>Cedrela</i> sp. <i>Swietenia</i> sp. <i>Cordia alliodora</i> <i>Tabebuia pentaphylla</i> <i>Sideroxylon tempisque</i> <i>Calycophyllum candidissimum</i> <i>Enterolobium cyclocarpum</i> <i>Diphysa robinoides</i> <i>Cassia grandis</i> <i>Inga</i> sp. <i>Poeppigia procera</i>	Cedro Caoba (Mahagoni) Laurel Maquiligua Tempisque Salamo Conacaste Guachipilin Carago Pepeto Memble
Tischler- und Drechslerarbeiten	<i>Hymenaea courbaril</i> <i>Cordia alliodora</i> <i>Calycophyllum candidissimum</i> <i>Tabebuia chrysantha</i>	Copinol Laurel Salamo Cortez negro
Möbelindustrie	<i>Calycophyllum candidissimum</i> <i>Cedrela</i> sp. <i>Swietenia</i> sp. <i>Cordia alliodora</i> <i>Simaruba glauca</i>	Salamo Cedro Caoba (Mahagoni) Laurel Aceituno
Kunstgewerbe	<i>Calycophyllum candidissimum</i> <i>Swietenia</i> sp. <i>Cedrela</i> sp.	Salamo Caoba (Mahagoni) Cedro
Boote (Einbäume)	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Conacaste
Eisenbahnschwellen, Brücken-, Straßenbau	<i>Gliricidia sepium</i> <i>Sideroxylon tempisque</i> <i>Tabebuia chrysantha</i> <i>Diphysa robinoides</i> <i>Enterolobium cyclocarpum</i> <i>Myroxylon pereirae</i>	Madrecacao Tempisque Cortez negro Guachipilin Conacaste Bálsamo
Hausbau (Baharaque-Haus und Rancho)	<i>Enterolobium cyclocarpum</i> <i>Cordia alliodora</i> <i>Diphysa robinoides</i> <i>Calycophyllum candidissimum</i>	Conacaste Laurel Guachipilin Salamo
Grubenholz	<i>Mimosa tenuiflora</i>	Carbón
Masten, Pfosten, Pfähle, Zäune	<i>Cordia alba</i>	Tiguilote
Holzkohle	<i>Mimosa tenuiflora</i>	Carbón
Brennholz	<i>Gliricidia sepium</i> <i>Sideroxylon tempisque</i> <i>Diphysa robinoides</i> <i>Cassia grandis</i> <i>Inga</i> sp. <i>Tecoma stans</i>	Madrecacao Tempisque Guachipilin Carago Pepeto San Andrés

ANEXO 8. Ficha de validación utilizada para cada una de las zonas en estudio.

Lugar:	Características (1) color, (2) altura, (3) reflectancia en gráfico, (4) rugosidad, (5) tipo de superficies.	FOTO check	☐
Fecha existencia:			
Fecha Actual:			
BBOX (Coordenadas,h) EPSG 4326		FOTO check	☐
Elementos Mayoritariamente presentes :		FOTO check	☐
Elemento Particular 1 (Coordenadas,h)		FOTO check	☐
Elemento Particular 2 (Coordenadas,h)		FOTO check	☐
Elemento Particular 3 (Coordenadas,h)		FOTO check	☐
Elemento Particular 4 (Coordenadas,h)		FOTO check	☐
Elemento Particular 5 (Coordenadas,h)		FOTO check	☐
Elemento Particular 6 (Coordenadas,h)		FOTO check	☐



ANEXO 9. Tipos de Reflexión de onda.



ANEXO 10. Esquema y Ecuación de calibración .

$$I_{corrected} = I_{original} \cdot \frac{R_i^2}{R_{ref}^2} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \cdot \frac{1}{T^2} \cdot \frac{E_{Tref}}{E_{Tj}}$$

