



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS MEDIANTE  
LA GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE  
ELEVACIÓN LIDAR**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO GEOMÁTICO**

PRESENTA:

**DIEGO RAMÍREZ GUERRERO**

DIRECTOR DE TESIS:

**M.I. JUAN MANUEL NUÑEZ HERNANDEZ**



CIUDAD UNIVERSITARIA, 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/056/15

Señor  
DIEGO RAMÍREZ GUERRERO  
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.G. JUAN MANUEL NUÑEZ HERNÁNDEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO GEOMÁTICO.

**"ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS MEDIANTE LA GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN LIDAR"**

- INTRODUCCIÓN
- I. EL SISTEMA LIDAR
- II. MANEJO Y PROCESAMIENTO DE DATOS LIDAR
- III. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS MEDIANTE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN
- IV. DETERMINACIÓN DE ALTURA DE VOLUMEN DE CONSTRUCCIÓN EN EDIFICIOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO
- V. VALIDACIÓN DE RESULTADOS
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 11 de junio del 2015.  
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH\*gar

# Contenido

Introducción.....	5
1. El sistema LIDAR.....	8
1.1. Características generales del sistema LIDAR.....	8
1.2. Componentes del sistema ALS.....	15
1.2.1 Componente aéreo.....	16
1.2.2 Componente terrestre.....	25
1.3. Aplicaciones del sistema ALS.....	25
2. Manejo y procesamiento de datos LIDAR.....	32
2.1. Manejo para la planeación y levantamiento de datos LiDAR.....	33
2.1.1. Plan de cobertura geodésica.....	33
2.1.2. Plan geométrico de vuelo.....	35
2.1.3. Levantamiento de datos.....	39
2.2. Procesamiento para la descarga, tratamiento y modelado de los datos LiDAR.....	41
2.2.1 Respaldo.....	41
2.2.2 Sincronización.....	42
2.2.3 Registro.....	43
2.2.4 Calibración.....	49
2.2.5 Modelado.....	53
3. Estimación de parámetros físicos mediante modelos digitales de elevación.....	56
3.1. Modelo Digital de Elevaciones (MDE).....	56
3.2. Determinación del parámetro físico de altura mediante LIDAR.....	60
3.1. Estimación de modelos digitales.....	63
3.1.1. Modelo Digital de Terreno (MDT).....	65
3.1.2. Modelo Digital de Alturas (MDA).....	67
3.1.3. Modelo Digital de Volumen (MDV).....	69
4. Determinación de superficie, altura y volumen de construcción en edificios de la Ciudad de México.....	71
4.1. Datos entrada y procesos.....	71
4.2. Máscaras.....	75
5. Validación de resultados.....	93
5.1. Determinación de sitios para la validación.....	93
5.2. Trabajo de campo y obtención de resultados.....	94
5.3. Evaluación de resultados.....	101
5.3.1. Validación de alturas.....	102
5.3.2. Validación de Superficies.....	103
5.3.3. Validación volúmenes.....	109
Conclusiones.....	111
Bibliografía.....	115

# Índice de Figuras

Figura 1. Áreas de desarrollo del sistema LiDAR.....	10
Figura 2. Patrones de escaneo con un solo espejo o un par de espejos planos oscilantes .....	12
Figura 3. Patrón de escaneo con un polígono óptico giratorio .....	13
Figura 4. Patrón de escaneo con un espejo oscilante .....	14
Figura 5. Patrón de escaneo con un par de espejos inclinados.....	14
Figura 6. Diagrama de bloques de un telémetro pulsado. (J. M. de Luis Ruiz, 2009) .....	18
Figura 7. Controlador y GUI del sensor ALS50-II (Leica Geosystems, 2007) .....	21
Figura 8. Avión Cessna-310, ventana del lado derecho (INEGI, 2005) .....	24
Figura 9. Modelos Digitales Forestales de la biomasa de madera, volumen de copa y altura (V. Zaldo et. al. 2010) .....	27
Figura 10. Resultado de la caracterización con LIDAR de las Dunas en el Parque de Corrubedo (Fernandez Núñez M. et.al) .....	29
Figura 11. Imagen de la ciudad de New York en 3D creada con LIDAR (NOAA/U.S. Army JPSD, 2001) .....	30
Figura 12. Mapa de densidad de población obtenido con información LiDAR (Lwin & Murayama, 2012) .....	31
Figura 13. Diagrama del manejo y procesamiento de datos LiDAR .....	32
Figura 14. Hoja de configuración para un sistema ALS.....	39
Figura 15. Diagrama de la Ecuación 9.....	44
Figura 16. Posición del IMU.....	45
Figura 17. Brazos de palanca.....	46
Figura 18. Vector instantáneo $s$ .....	50
Figura 19. Esquema de Estaciones base GPS.....	51
Figura 20. Esquema de puntos tomados con LiDAR .....	62
Figura 21. Modelo Digital de Terreno de Chiapas, (INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014) .....	67
Figura 22. Modelo Digital de Alturas (INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014) .....	69
Figura 23. Diagrama de procesos.....	72
Figura 24. MDE.....	73
Figura 25. MDT .....	73
Figura 26. MDA.....	74
Figura 27. NDVI en la zona de interés .....	77
Figura 28. Máscara 1, rango del NDVI de 0.25-0.80. ....	77
Figura 29. Máscara 2, Alturas menores o iguales a 2m. ....	79
Figura 30. Máscara 1 + Máscara 2 .....	80
Figura 31. Máscara inversa. ....	81
Figura 32. Primer nivel de depuración .....	81
Figura 33. Raster discreto con 37 clases. ....	83
Figura 34. Máscara 1 + Máscara 2 + Máscara 3 .....	85
Figura 35. Plano E-3 Zonificación y Normas de Ordenación.....	86
Figura 36. Zona de interés en el Ordenamiento .....	88
Figura 37. Usos de suelo vectorizados .....	89
Figura 38. Máscara final.....	90
Figura 39. Polígonos para el cálculo de las superficies de los edificios.....	91
Figura 40. MDA sólo para edificios .....	91
Figura 41. Edificios elegidos para validación en campo.....	94
Figura 42. Formato de campo lleno.....	96
Figura 43. Puntos de toma de datos, sobre el MDA .....	96
Figura 44. Cálculo del volumen que se toma como real.....	99
Figura 45. Gráfica de dispersión, alturas .....	103
Figura 46. Edificios para validación de datos en el PDU de Cuauhtémoc.....	104
Figura 47. Gráfica de dispersión, superficies .....	105
Figura 48. Gráfica de dispersión, volúmenes.....	110

## Índice de tablas

Tabla 1. Áreas de aplicación, nivel primario de clasificación de los sistemas LiDAR .....	11
Tabla 2. Clasificación del sensor Leica ALS50-II.....	16
Tabla 3. Alturas de vuelo y exactitudes posicionales .....	26
Tabla 4. Tabla resumen de parámetros para el plan de vuelo.....	38
Tabla 5. Volumen de datos captados.....	40
Tabla 6. Ejemplo de bitácora de vuelo.....	40
Tabla 7. Datos de entrada.....	71
Tabla 8. Rangos de alturas para clasificación .....	83
Tabla 9. Sección B, Reglamento de construcciones para el D.F. ....	84
Tabla 10. Especificaciones TruPulse 360 R .....	95
Tabla 11. Alturas para validación.....	97
Tabla 12. Superficies para validación .....	98
Tabla 13. Volúmenes para validación .....	100
Tabla 14. Resultados de DAE, SAR y FAR.....	108

# Introducción.

Las necesidades actuales hacen que cada vez más disciplinas se valgan de datos geoespaciales para sus propósitos, lo cual conlleva a buscar nuevas formas de analizar el espacio terrestre para tener su representación digital de una forma que nos permita visualizarlo, estudiarlo, gestionarlo, difundirlo, representarlo y almacenarlo lo más apegado posible a la realidad y buscando la manera de automatizar los procesos para hacer más eficiente la obtención de resultados, es por ello que en el presente trabajo de tesis se decidió por la tecnología conocida como LiDAR para la estimación de parámetros físicos mediante la generación de modelos digitales de elevación LiDAR.

LiDAR (siglas en inglés para *Light Detection And Ranging Laser*) es una clase de sensor remoto activo que envía millones de pulsos láser a una superficie terrestre que se pretende analizar; una vez que estos impulsos chocan con los objetos, la mayor parte de estos regresan al sensor (algunos se pierden) con una energía menor con la que fueron emitidos. Cada uno de los impulsos que regresa tiene una ubicación espacial tridimensional de alta precisión (en ejes X, Y y Z) y una energía de regreso diferencial (intensidad reflejada), la cual va a variar dependiendo de la naturaleza del objeto con que chocó (Ackermann, 1999).

En este orden de ideas el objetivo del presente trabajo, estructurado en cinco capítulos es, por un lado, dar a conocer y hablar de las características, aplicaciones y alcances de manera general de la tecnología LiDAR y por otro, se propone y explica paso a paso un método para estimar en base de datos LiDAR,

parámetros físicos, en específico superficie, altura y volumen de construcciones dentro de la Ciudad de México escogiendo como zona de interés el Conjunto Urbano Presidente Adolfo López Mateos de Nonoalco Tlatelolco, conocida comúnmente sólo como, Unidad Tlatelolco.

En el **Capítulo 1. El sistema LiDAR**, aborda de una manera general la tecnología LÍDAR, abordando temas como los tipos que existen, las aplicaciones que se les dan y su funcionamiento físico y teórico; hasta el específico que se utiliza para la obtención de los datos a procesar, el sistema LEICA ALS50-II.

En el **Capítulo 2. Manejo y procesamiento de datos LiDAR**, se muestran los alcances de la tecnología ALS, se da a conocer la naturaleza de los datos que éste obtiene y los procesos que se le deben aplicar los cuales van de la mano según el producto o aplicación que se quiera obtener; en resumen se explica el proceso general para el levantamiento, manejo, procesamiento y modelado de los datos obtenidos con un sistema ALS.

En el **Capítulo 3. Estimación de parámetros físicos mediante modelos digitales de elevación**, se explican los diferentes tipos y características de los modelos digitales que se pueden obtener en base de datos obtenidos con un sistema ALS, las formas de representarlos y analizarlos para llegar a los parámetros físicos que se pueden estimar con estos.

En el **Capítulo 4. Determinación de superficie, altura y volumen de construcción en edificios de la Ciudad de México**, se describe el modelado particular para la zona de interés, mostrando los procesos que se realizaron para

llegar a la obtención de los parámetros físicos buscados y la obtención de productos finales.

En el **Capítulo 5. Validación de resultados**, se propone una estrategia de validación para mostrar la precisión de los datos estimados con el proceso propuesto en base a compararlos con datos reales obtenidos en campo y de documentales legales.

# 1. El sistema LIDAR.

## 1.1. Características generales del sistema LIDAR.

El sensor LIDAR constituye una tecnología eficiente para la adquisición de DEM (siglas en inglés para *Digital Elevation Model*) de grandes áreas. Los DEM pueden ser generados a alta resolución con un detalle considerable mediante esta tecnología, además, al ser un sistema activo, también puede operar de noche, haciendo que la tecnología sea más eficiente en términos de coste y tiempo cuando se compara con otros métodos de percepción remota como la fotogrametría o la toma de datos con sensores satelitales.

El elemento más importante para el sensor LiDAR que proporciona la fuente que hace que sea un sensor activo y que pueda operar indistintamente en el día o la noche, es el láser, voz tomada de LASER (siglas en inglés para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), esta es una tecnología que estimula la radiación de la luz, amplificándola y concentrándola en un potente e intenso haz de luz, que se caracteriza por su coherencia (longitud de onda ordenada), evitando que se disperse y permitiendo que se proyecte de manera puntual (RSAC, 2008). Si bien el láser fue planteado teóricamente por Albert Einstein en 1916, Charles Townes y Arthur Leonard Schawlow lo desarrollaron como tecnología aplicada en 1958, en mediciones atmosféricas y satelitales (p.e. fue aplicada por la NASA para calcular la distancia entre la Tierra y la Luna en 1969) (Fowler & Samberg, 2007). En términos generales los láseres son clasificados usualmente según el tipo de material que estos usan para originar la

radiación. Los tipos más comunes son los láseres de gas, los de estado sólido y los de semiconductores. Para propósitos de escaneo de superficies (Sistema LiDAR), donde se requieren grandes niveles de energía para realizar medidas de distancias la mayoría de las veces muy grandes, sólo ciertos tipos de láseres de estado sólido y de semiconductores tienen las características específicas que son necesarias para realizar éstas operaciones. Dos ejemplos de los tipos de láseres que se utilizan para escaneo de superficies en especial para aplicaciones topográficas son, uno de estado sólido Nd:YAG (siglas en inglés para *neodymium-doped yttrium aluminium garnet*) y uno de semiconductores, GaAs (siglas en inglés para *Gallium arsenide*) (Petrie & Toth, 2008).

Debido al acelerado avance tecnológico y a la gran necesidad de llevar las características físicas del espacio que nos rodea a un entorno digital tridimensional para su estudio, proceso, gestión y análisis, se ha incrementado la aplicación del sistema LiDAR, llevándolo a diferentes entornos de aplicación, teniendo así tres áreas de desarrollo (Figura 1) (Sánchez E. A., 2011). Estas son variantes que a pesar de que se desarrollan con el mismo sistema de medición, sus aplicaciones y resultados son muy diversos. Estas diferencias se marcan por la variedad de disciplinas que se valen de datos digitales tridimensionales para sus propios fines como son la percepción remota, topografía, gestión de recursos forestales e hídricos, catastro, ingeniería, arquitectura, arqueología, etc.; los objetos medidos, la superficie, la escala de los datos obtenidos, la precisión de estos, el postprocesamiento y los alcances establecidos para con las mediciones

realizadas, en la Tabla 1 se muestran las áreas de aplicación del sistema LiDAR con algunas de sus aplicaciones.

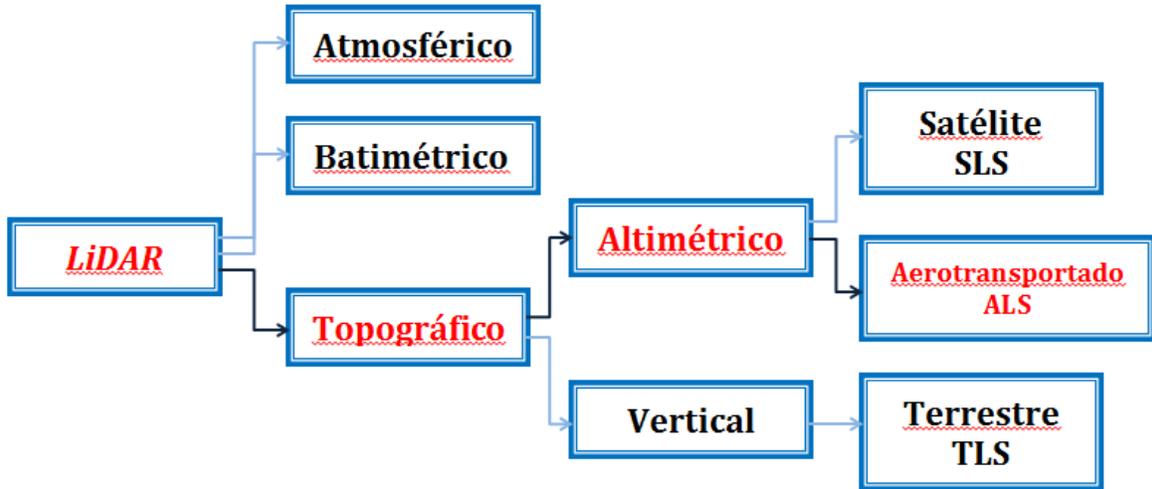


Figura 1. Áreas de desarrollo del sistema LiDAR

ÁREA	BANDAS LÁSER	APLICACIONES
<b>ATMOSFÉRICO</b>	Ultravioleta, visible (verde, rojo) e infrarrojo cercano. 380nm a 780nm	Mediciones atmosféricas que permiten la elaboración de pronósticos meteorológicos: condiciones de temperatura, densidad, propiedades de nubes, detección de contaminantes y aerosoles, etc. Recientemente es utilizado en el estudio del impacto del Calentamiento Global.

<b>BATIMÉTRICO</b>	Azul y verde (el infrarrojo es absorbido por el agua) 450 a 510 nm 510 a 580 nm	Determinar la profundidad y escaneo de la topografía (fondo) del cuerpo de agua (dependiendo de la claridad del agua), por ejemplo, este escaneo se utiliza en el dragado de los canales de navegación en puertos marítimos ( <i>Burtch,2002</i> ).
<b>TOPOGRÁFICO</b>	Infrarrojo cercano 770 a 1040 nm	Realiza mediciones y escaneos en la superficie terrestre de dos formas:  <b>a) Altimétrico</b> , sensores montados en <b>satélites</b> ( <i>Satelliteborne-Spaceborne Laser Scanning, SLS</i> ); o vehículos <b>aerotransportados</b> ( <i>Airborne Laser Scanning ALS</i> ).  <b>b) Vertical o terrestre</b> (Terrestrial Laser Scanning, TLS).

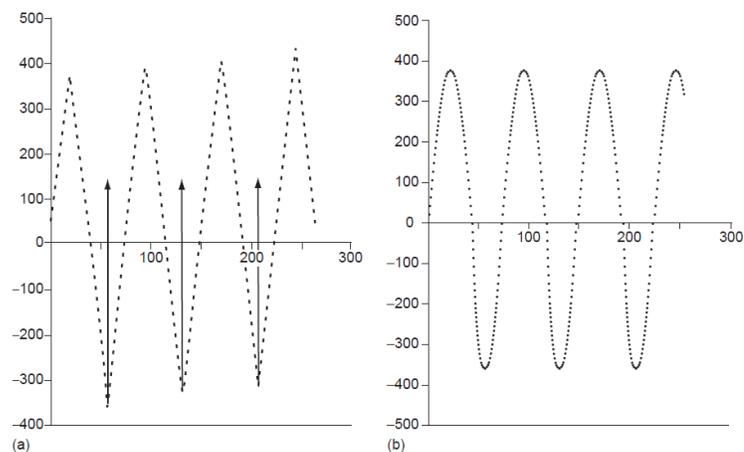
**Tabla 1. Áreas de aplicación, nivel primario de clasificación de los sistemas LiDAR**

La clasificación mostrada en la Tabla 1 se considera como una clasificación primaria de los sistemas LiDAR de las cuales se precisa describir más a fondo el sistema ALS (siglas en inglés para *Airborne Laser Scanning*) (*Baltsavias, 1999*) ya que es en el que está enfocado el presente trabajo de tesis. Es útil tener en cuenta una clasificación secundaria de los sistemas ALS en base a los diferentes tipos de mecanismos que están siendo utilizados para escanear el suelo y medir su topografía, la acción de la exploración de un mecanismo en particular define el patrón, el espaciado y la ubicación de los puntos que se miden tanto en la superficie del suelo así como sobre los objetos que están presentes en él; de

acuerdo a esta clasificación se cuentan 4 mecanismos principales de escaneo, cada uno con su propio patrón para medir, estos se pueden distinguir de la siguiente manera (Petrie & Toth, 2008).

-Nivel secundario de clasificación de los sistemas LiDAR:

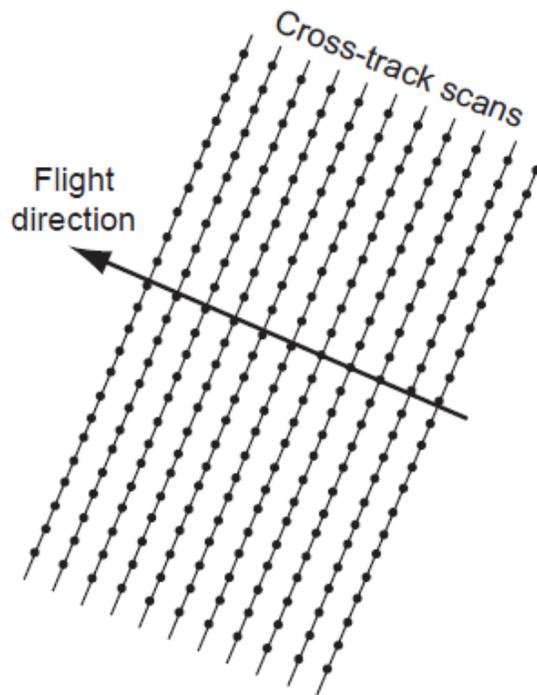
I. Ya sea con un solo espejo o un par de espejos planos oscilantes son los que se utilizan en los sistemas que han sido construidos por los dos más grandes proveedores de sistemas ALS, Optech, con su sistema ALTM y Leica Geosystems con su escáner ALS (Gordon Petrie, 2008). El ángulo preciso que el espejo hace con respecto a la dirección vertical de vuelo se mide continuamente por medio de un codificador angular, el uso de este tipo de mecanismos de exploración bidireccionales tiene como resultado un patrón ya sea en forma de Z (dientes de sierra) o en un patrón sinusoidal, incisos a y b respectivamente de la Figura 2.



**Figura 2. Patrones de escaneo con un solo espejo o un par de espejos planos oscilantes**

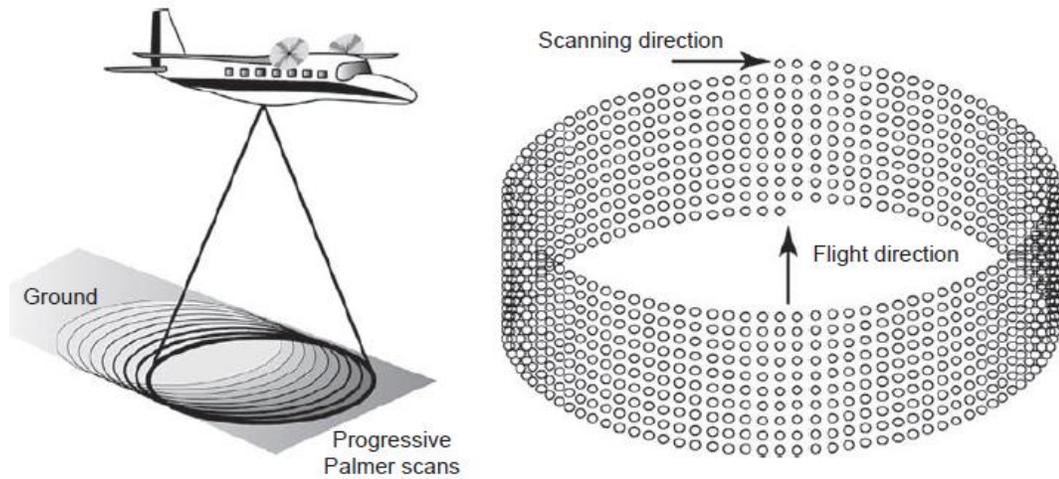
II. Un polígono óptico que gira continuamente en una dirección que proporciona un movimiento de barrido unidireccional, se utiliza en los sistemas

como el IGI LiteMapper, TopoSys Harrier, iMAR, etc. (Gordon Petrie, 2008) El uso de este tipo de mecanismos genera una serie de líneas paralelas de puntos medidos que se generan sobre el terreno, la velocidad de rotación constante del polígono óptico significa que no hay aceleración o desaceleración repetitivas del espejo, esto permite altas frecuencias tales como 160 Hz, a su vez, esto ofrece un mejor control sobre el espaciado de los puntos LiDAR.



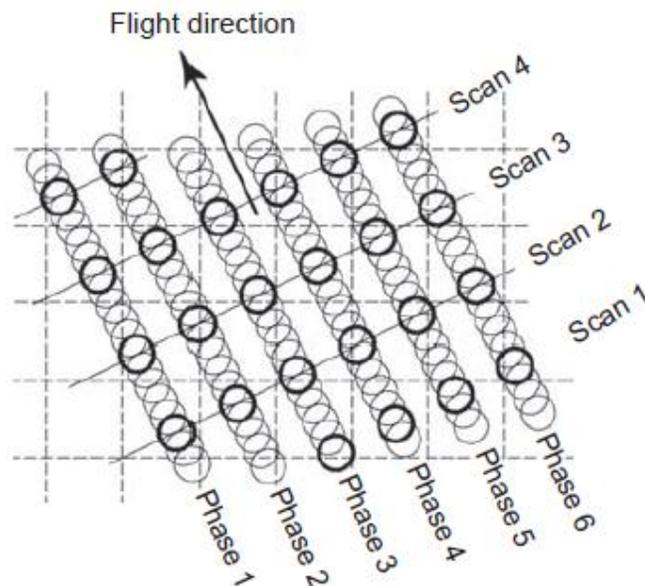
**Figura 3. Patrón de escaneo con un polígono óptico giratorio**

III. Un espejo oscilante que produce una exploración con un patrón elíptico, denominado como escaneado Palmer. Esto produce una serie de superposición de escaneos elípticos sobre el suelo (Gordon Petrie, 2008).



**Figura 4. Patrón de escaneo con un espejo oscilante**

IV. Un par de espejos inclinados impulsados por un motor que distribuye y recoge los pulsos que se envían. Esta disposición resulta en una serie de líneas de exploración que corren paralelas a la línea de vuelo.



**Figura 5. Patrón de escaneo con un par de espejos inclinados**

Además de los diferentes patrones de escaneo se debe tener en cuenta una clasificación terciaria que se basa en las diferentes alturas sobre las que el sistema puede ser utilizado, en la práctica, esto se basa en gran medida de la distancia máxima o distancia oblicua que puede ser medida por el teledetector láser, así existen según esta clasificación 2 variantes (Petrie & Toth, 2008).

I. Un cierto número de sistemas ALS que están diseñados principalmente para el funcionamiento a altitudes relativamente bajas y a velocidades de vuelo lento, en la mayoría de las ocasiones estos sistemas utilizan como plataforma un helicóptero y se utilizan principalmente para llevar a cabo el mapeo de características lineales, tales como carreteras, ríos, canales, líneas eléctricas, etc.

II. En el otro extremo están aquellos sistemas diseñados para la operación comercial en una gama mucho mayor de alturas de vuelo de hasta 6 km, estos tienden a ser utilizados en el mapeo topográfico de áreas sustanciales de terreno.

## **1.2. Componentes del sistema ALS.**

Un correcto levantamiento LiDAR sería imposible si sólo se usa este como un dispositivo aislado. Para que pueda dar resultados satisfactorios, un sistema LiDAR consiste de un componente aéreo y otro terrestre. En éste apartado se describen los componentes, del segmento aéreo, del sistema ALS utilizando como ejemplo al sensor LEICA ALS50-II, debido a que este es el que utiliza INEGI para

la toma de sus datos. En la Tabla 2 se muestra la clasificación de dicho sensor según los niveles descritos en el apartado anterior.

Nivel	Clasificación
<b>Primario</b>	Topográfico – Altimétrico – Aerotransportado (ALS)
<b>Secundario</b>	I. Con un solo espejo o un par de espejos planos oscilantes
<b>Terciario</b>	II. Alturas de vuelo de hasta 6 km.

**Tabla 2. Clasificación del sensor Leica ALS50-II**

Un sistema ALS con ésta clasificación requiere de forma general los componentes que a continuación se describen:

### **1.2.1 Componente aéreo.**

#### **1.2.1.1 Unidad de exploración.**

El sistema ALS, es un sensor activo que consta de un telémetro emisor de luz láser y de un espejo que desvía el haz perpendicularmente a la trayectoria del avión, generando una serie de pulsos de luz que al entrar en contacto con los objetos o el terreno refleja al sensor parte de la energía del pulso emitido. Una característica distintiva de los retornos en zonas de vegetación es que éstos se pueden producir a diferentes niveles, siendo posible que el último retorno se produzca al nivel del terreno (INEGI, Nube de puntos LIDAR ajustada al terreno, Distrito Federal y Chalco, Estado de México, 2011).

Partiendo de la cita anterior los elementos básicos de la unidad de exploración se describen a continuación.

El telémetro láser utilizado por el sistema ALS es de tipo pulsado y consiste en lo siguiente:

- Un transmisor: Láser en estado sólido o diodo de láser semiconductor.
- Canal receptor: Detector, amplificadores y control de ganancia automático AGC.
- Componentes electrónicos para medir el tiempo: Equipo de discriminar el tiempo y equipo de medida del tiempo con convertidor digital TDC.
- La óptica del transmisor y del receptor.

Los láseres utilizados en la mayor parte de los exploradores son capaces de emitir pulsos de luz láser en la banda del espectro electromagnético comprendido entre el ultravioleta e infrarrojo (500 – 1500 nm) (Moreno Brotóns, 2010) y la frecuencia de repetición del pulso está en el orden de 75 a 150 KHz. El sensor ALS50-II trabaja con una longitud de onda de 1084nm, esto para cumplir con todos los requerimientos de la 21 CFR 1040 - *PERFORMANCE STANDARDS FOR LIGHT-EMITTING PRODUCTS* y hasta con una frecuencia de 150 KHz por la ISO-7137 (RTCA/DO-160E) *Section 8 Category S*, (Geosystems, 2007) . En la Figura 6 se puede ver el diagrama de bloques de un telémetro pulsado:

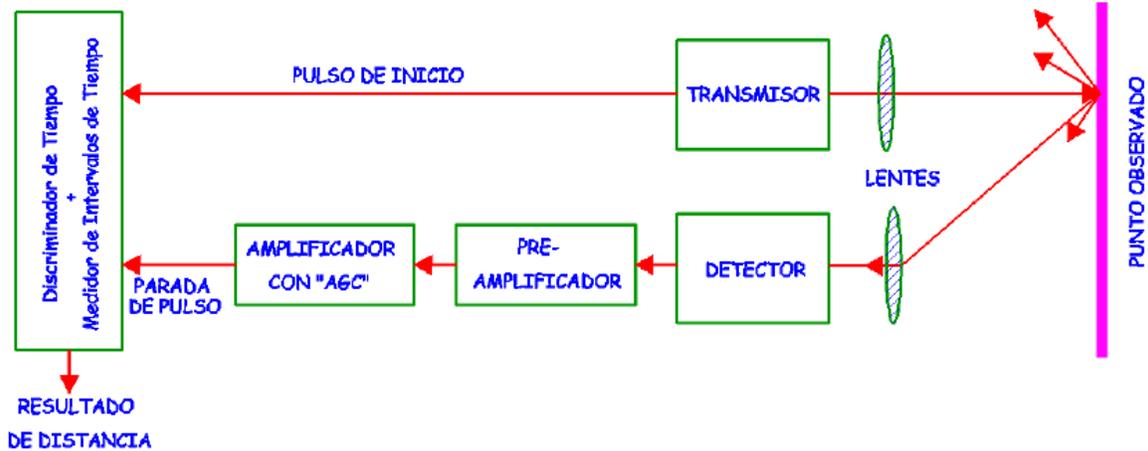


Figura 6. Diagrama de bloques de un telémetro pulsado. (J. M. de Luis Ruiz, 2009)

Para proporcionar medidas tridimensionales del objeto o territorio, el rayo láser utiliza la unidad de desviación, siendo el elemento principal de esta unidad un espejo que proporciona la desviación del haz láser ortogonal con respecto a la dirección vertical (INGE, 06):

El sistema ALS50-II se suministra con un espejo de exploración “*low-inertia/high speed*” optimizado para los campos de visión de hasta 75° en altitudes máximas de 6000m. (Geosystems, 2007). Para la toma de datos utilizados en el presente documento el barrido se realizó con un ángulo de captura de 25 y 45 grados (INEGI, Nube de puntos LIDAR ajustada al terreno, Distrito Federal y Chalco, Estado de México, 2011).

Adicional a estos componentes se puede instalar una cámara digital cerca o en la misma base de montaje del telémetro láser, su funcionamiento estará estrechamente integrado con el del telémetro y el mecanismo de escaneo, este

sistema es incorporado para generar imágenes requeridas a la hora del procesamiento de los datos (Petrie & Toth, 2008).

#### **1.2.1.2 Unidad de control.**

Se entiende como unidad de control al equipo de software y hardware utilizados durante el levantamiento de los datos, debiendo tener estas las características y capacidades necesarias según lo demande la unidad de exploración para recabar los datos de una manera óptima.

La unidad de control esta normalmente basada en un equipo con una pantalla y un software de exploración a través del cual se pueden dar órdenes al sistema para ejecutar operaciones específicas. Además de controlar el funcionamiento del telemetro láser y el mecanismo de escaneo (espejo), esta unidad controla el sistema de grabación de datos que recoge y almacena la hora y la forma de onda de datos de medición desde el telémetro láser y los datos angulares del mecanismo de escaneo, junto con los datos correspondientes desde el receptor GPS (siglas en inglés para *Global Positioning System*) y la IMU (siglas en inglés para *Inertial Measurement Unit*). El almacenamiento de todos estos datos normalmente se lleva a cabo utilizando el disco duro o unidad de estado sólido de la computadora (Petrie & Toth, 2008).

El sensor Leica ALS50-II cuenta con un disco duro removible de 300 Gb de fábrica, un controlador del funcionamiento del sistema (Unidad de exploración) que verifica las medidas que van a tierra a través del controlador de intervalos de

tiempo de alta velocidad, mide la intensidad de las señales de retorno reflejadas, genera señales eléctricas necesarias para dirigir el escáner óptico de acuerdo al ángulo de exploración codificado, lee la información de temporización GPS y todos los formatos de estos datos para su correcto registro. Haciéndose necesaria la manipulación de este controlador el sistema ofrece una GUI (siglas en inglés para *Graphical User Interface*) que funciona en un equipo de tipo portátil robusto dotado con una pantalla táctil de gran resolución. La GUI ofrece dos modos de funcionamiento: normal y de prueba. En el modo de operación normal, proporciona al usuario la posibilidad de seleccionar el FOV (siglas en inglés para *Field Of View*) el número de ciclos, así como el control sobre detener/empezar las funciones del láser y de la toma de datos. En el modo de prueba, la GUI proporciona la capacidad de desplegar los datos del histograma y el “gráfico continuo”, que es la visualización de datos en bruto para fines de diagnóstico. El software GUI está diseñado para versiones de Windows 2000 en adelante (Geosystems, 2007). En la Figura 7 se muestra el controlador y la GUI del sensor ALS50-II.



Figura 7. Controlador y GUI del sensor ALS50-II (Leica Geosystems, 2007)

### 1.2.1.3 POS.

La unidad POS (siglas en inglés para *Position and orientation system*) esta unidad está formado por el llamado INS (siglas en inglés para *Inertial Navigation System*) o sistema de navegación inercial, que a su vez se divide entre la IMU o unidad de medición inercial y un receptor GPS, los cuales son gestionados por una unidad de procesamiento (Unidad de control), que gestiona el conjunto de datos a los que se le nombra con el mismo nombre, POS.

Como el vehículo aéreo que contiene el sensor está sujeto a movimientos atmosféricos (vientos o presión), siempre se generan errores durante el escaneo y en la recepción de la señal del GPS. Para ello, son utilizados giroscopios y acelerómetros instalados en la unidad IMU, que miden en unidades de ángulos las inclinaciones, aceleraciones y rotaciones que permiten la corrección de errores producidos por la aeronave en los tres ejes espaciales (Sánchez E. A., 2011):

a) **Cabeceo (Roll  $\omega$ ):** Conocido como eje X, (transversal o lateral), este movimiento mide la inclinación del avión de ala a ala. En Fotogrametría es conocido como ángulo de rotación W.

b) **Alabeo (Pitch  $\varphi$ ):** Eje Y, (longitudinal u horizontal) es perpendicular y horizontal con respecto a X, mide la rotación vertical de la nariz a la cola del avión. En Fotogrametría se le conoce como ángulo de rotación J.

c) **Deriva (Heading  $k$ ):** Eje Z, (vertical), es perpendicular y vertical a X, mide la rotación vertical del avión (movimientos derecha-izquierda de la punta del avión). Se le conoce como ángulo de rotación K en Fotogrametría.

Todo punto medido con el sistema ALS cuenta con coordenadas (longitud X, latitud Y, altura Z) georreferenciado en una proyección geodésica, gracias al GPS, sistema compuesto por 24 satélites que orbitan el planeta, emitiendo señales hacia receptores terrestres y por medio del proceso de triangulación, estiman la posición exacta. Todo sistema ALS cuenta con un receptor de señales transmitidas por la constelación GPS. Además de contar con el receptor GPS, el

escaneo debe operar con un mínimo de tres estaciones base GPS en el terreno (puntos de control), donde reciben señales de los satélites. Los puntos de control se establecen en zonas planas y despejadas en la zona a escanear. Con el sensor GPS y los puntos de control, es posible corregir y georreferenciar los puntos que modelan la zona escaneada. En nuestro país, las estaciones base operan simultáneamente con la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) del INEGI.

La combinación de datos GPS/INS en un sistema integrado incrementa la precisión global y la fiabilidad de ambas fuentes debido a que las características del GPS y del INS son radicalmente distintas (*Lerma J.L., 2002*). Por un lado, la alta estabilidad del INS en periodos de tiempo cortos suaviza los errores de observación del GPS. Por otro lado, la estabilidad del GPS en periodos largos ayuda a compensar los errores sistemáticos y temporales del INS (*Portales & Lerma, 2003*).

#### **1.2.1.4 Plataforma.**

En percepción remota se considera como plataforma al vehículo que es capaz de transportar al sensor utilizado para la recolección de los datos de interés.

El sistema ALS se monta en aviones tripulados (los más utilizados) y no tripulados, helicópteros y globos dirigibles. El sistema ALS y otros artefactos complementarios (GPS, sistemas inerciales) son montados en el fuselaje, ala o nariz del avión. Algunos se montan en dispositivos especiales sobre una parte externa de la aeronave. La selección del vehículo aéreo dependerá de los

alcances del proyecto y escena a escanear, por ejemplo, los sensores montados en un helicóptero permiten una captura de mayor densidad de datos, aunque su procesamiento digital será mayor que los datos capturados por un avión (Sánchez E. A., 2011).

Para el caso del levantamiento de los datos a utilizar en el presente documento, el sensor ALS50-II se instaló en una aeronave tipo Cessna modelo 310, que tiene una capacidad de vuelo de hasta 2,668km, una velocidad máxima de 383 km/hr, en la que generalmente se vuela, para la toma de los datos a una altura de entre 2000 y 3600 metros y con una velocidad promedio de 165 nudos (INEGI, Nube de puntos LIDAR ajustada al terreno, Distrito Federal y Chalco, Estado de México, 2011), a continuación se muestran el avión antes mencionado y el lugar en donde se monta el sensor en éste.



**Figura 8. Avión Cessna-310, ventana del lado derecho (INEGI, 2005)**

### **1.2.2 Componente terrestre.**

Para el componente terrestre del sistema ALS se utilizan GPS diferencial DGPS (siglas en inglés para *Differential Global Position System*) de doble banda, que en el caso de México tienen que estar ligados a la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA), utilizando los métodos estático y estático rápido con períodos de medición máximos de una hora determinados por las condiciones de visibilidad satelital dentro de la zona seleccionada.

### **1.3. Aplicaciones del sistema ALS.**

Al sistema ALS se le asigna como aplicación primordial la topográfica debido a que los productos más básicos de este son los obtenidos con la topografía altimétrica clásica (curvas de nivel, perfiles, secciones transversales, etc.), teniendo el sistema ALS la gran ventaja de cubrir grandes extensiones de terreno en tiempos sumamente más cortos y con menor coste, además de poder tener más aplicaciones cada una de estas con productos de gran calidad en cuanto a precisión y presentación debido a su avanzada tecnología, como los que se muestran a continuación.

a) Basados en experiencias previas del INEGI en donde cuentan con dos líneas de producción; una es la que considera sólo la cartografía a escala de 1:20,000 y la segunda atiende diversos proyectos que se ejecutan para satisfacer necesidades específicas de determinados clientes. A modo de ejemplo las diferentes aplicaciones según altura de vuelo y exactitudes

posicionales requeridas para colecta de datos y su procesamiento se muestran en la Tabla 3 (Sánchez, García, & Díaz, 2007).

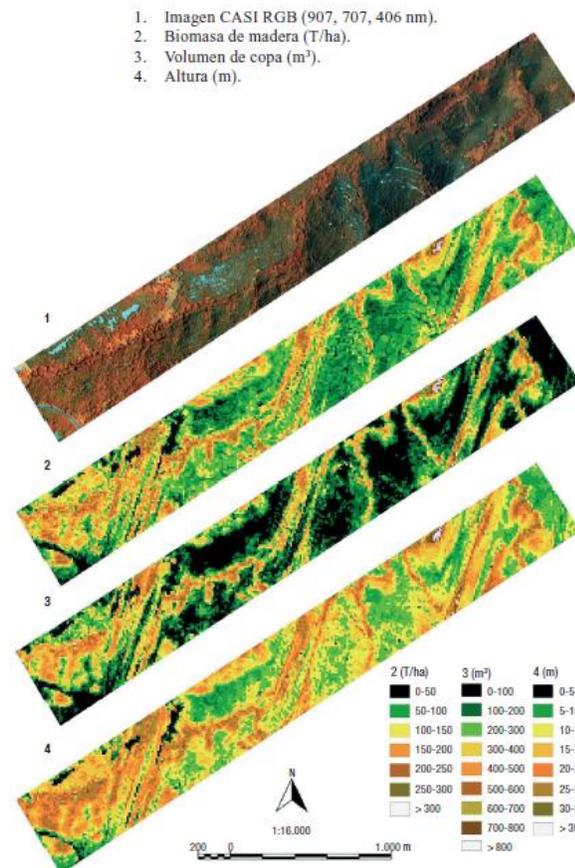
Altura de vuelo aprox. (metros) y ángulo de barrido.	Aplicaciones	Niveles de exactitud (m) (Nadir 1 $\sigma$ )
<b>1000 o menos a 25°</b>	Zonas susceptibles de desastres naturales o que lo han sufrido; líneas eléctricas; vías de comunicación; corredores urbanos, zonas arqueológicas.	<0.20 en (X,Y) <0.15 en (Z)
<b>3000 a 45°</b>	Zonas costeras, bosques	<0.40 en (X,Y) <0.20 en (Z)
<b>6000 a 65°</b>	Cobertura de áreas extensas (4000 km <sup>2</sup> ) zonas montañosas; llanuras. Compatible con producción cartográfica a la escala 1:20,000	<0.70 en (X,Y) <0.40 en (Z)

**Tabla 3. Alturas de vuelo y exactitudes posicionales**

b) La información obtenida con el sistema ALS proporciona de forma continua miles de datos de altura de la vegetación por hectárea que pueden ser utilizados para calcular existencias de biomasa, madera o CO<sub>2</sub>,

generar cartografía de alta resolución de las superficies forestales, de actuaciones silvícolas, de modelos de combustible o de riesgo de incendios.

Los resultados del estudio revelaron que los datos permiten estimar a nivel de parcela y con elevada exactitud, parámetros forestales de ecosistemas de tipo mediterráneo. Los modelos a nivel de árbol mostraron que todas las variables empleadas fueron significativas pero con bajos ajustes, mientras que a nivel de parcela algunas variables no fueron significativas pero los modelos en general incrementaron considerablemente su nivel de ajuste (Figura 9) (V. Zaldo, 2010)



**Figura 9. Modelos Digitales Forestales de la biomasa de madera, volumen de copa y altura (V. Zaldo et. al. 2010)**

c) Derivado del tratamiento de información recolectada con un sistema ALS e imágenes aéreas con 4 bandas, 3 del espectro electromagnético visible R, G, B (siglas en inglés para *Red, Green, Blue*) y 1 correspondiente al infrarrojo, en el Parque Natural de Dunas de Corrubedo y Lagos de Carregal y Vixian en Galicia (Fernández Núñez, 2013), se obtuvieron productos dirigidos a diferentes tipos de usuarios (gestores, técnicos, educadores, visitantes del parque, etc.) bajo esta perspectiva se listan algunos de los resultados de este estudio:

A partir del tratamiento del MDT y de la ortofotografía, se obtuvieron productos como mapas 3D, vuelos virtuales sobre el parque, etc. que constituyen herramientas útiles tanto en las tareas de gestión del Parque como para las actividades de educación ambiental y difusión en los centros de visitantes que estas áreas protegidas implementan.

En relación a la caracterización morfométrica, los análisis referidos a los perfiles de la duna del Parque y el análisis volumétrico permitieron la caracterización altimétrica y morfológica del sistema de dunas del Parque de Corrubedo, obteniéndose los resultados que se muestran en la figura 10

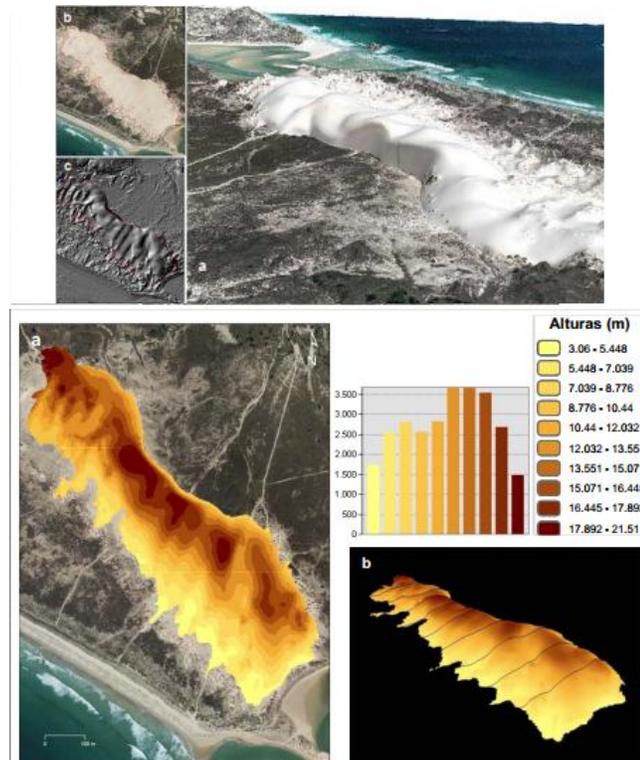


Figura 10. Resultado de la caracterización con LIDAR de las Dunas en el Parque de Corrubedo (Fernandez Núñez M. et.al)

d) La modelización de entornos urbanos (es decir, la representación virtual de edificios, calles, mobiliario, vegetación o cualquier otra infraestructura) añade un valor significativo en numerosas aplicaciones de gestión relacionadas con el procesamiento de información cartográfica. La adición de la geometría 3D no sólo supone una ayuda a la visualización, mejorando el aspecto estético de la solución final, sino que abre la puerta a otro tipo de procedimientos y análisis para la obtención de información complementaria de elevado valor añadido (Javier Suárez Quirós, 2012).

En el proyecto *Modelización tridimensional semiautomática de entornos urbanos a partir de datos LIDAR combinados con información catastral* (Suárez J., 2012) se plantea una metodología innovadora para

simplificar el proceso de recreación tridimensional partiendo del cruce entre información cartográfica y datos LIDAR, minimizando la participación del usuario y generando una serie de productos diferenciados en función del equilibrio entre precisión y rapidez con la que sean generados en cada caso. La implementación, probada sobre una zona de contraste del norte de España, emplea la aplicación Terrasolid para la reconstrucción virtual y utiliza estándares X3D que es un lenguaje de modelado basado en XML también conocido como Extensible3D, para el entorno de visualización tridimensional interactivo (Figura 11) (Javier Suárez Quirós, 2012).

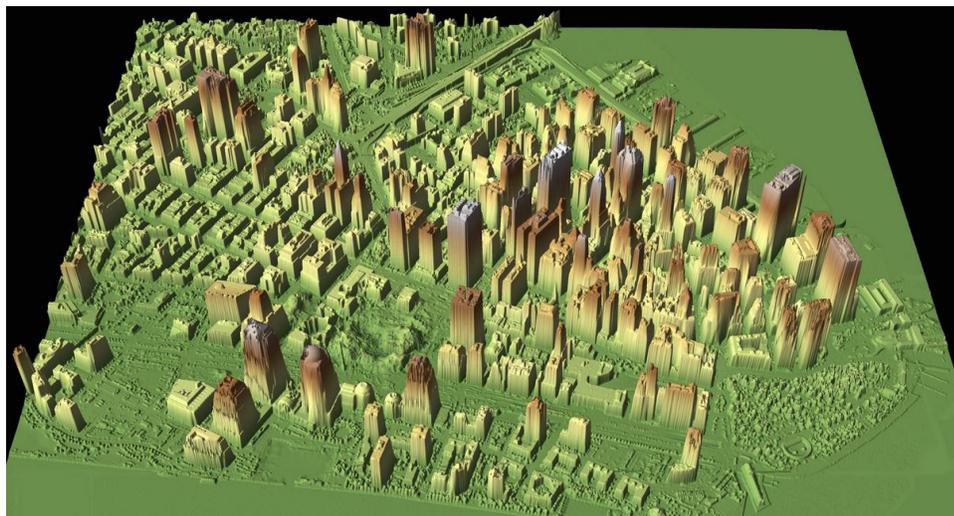


Figura 11. Imagen de la ciudad de New York en 3D creada con LIDAR (NOAA/U.S. Army JPSS, 2001)

e) Muchos métodos para cartografiar la población se han puesto en práctica con SIG y percepción remota. (Lwin & Murayama, 2011) en su estudio ***“Estimation of Building Population from LIDAR Derived Digital Volume Model”*** introducen dos métodos para la estimación de población en edificios, uno midiendo su área (no se requiere de información del número de pisos del

edificio) y otro midiendo su volumen (se requiere de información del número de pisos del edificio), para obtener mayor precisión en los dos métodos realizan el filtrado de otras categorías como por ejemplo el uso del suelo. Con éste estudio (Lwin & Murayama, 2012) logran obtener un mapeo de la densidad de población en la ciudad de Tsukuba, Japón, el resultado de éste estudio se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Mapa de densidad de población obtenido con información LiDAR (Lwin & Murayama, 2012)

## 2. Manejo y procesamiento de datos LIDAR.

Para comprender los alcances que se tienen con la tecnología del sistema ALS es necesario conocer la naturaleza de los datos que éste obtiene, así como también comprender los procesos que se les deben de aplicar a un proyecto LiDAR según la finalidad que se le quiera dar a estos, es por eso que en éste capítulo se explica de manera general todo el proceso para la planeación, levantamiento de datos, descarga, tratamiento y modelado de los datos obtenidos con un sistema ALS.

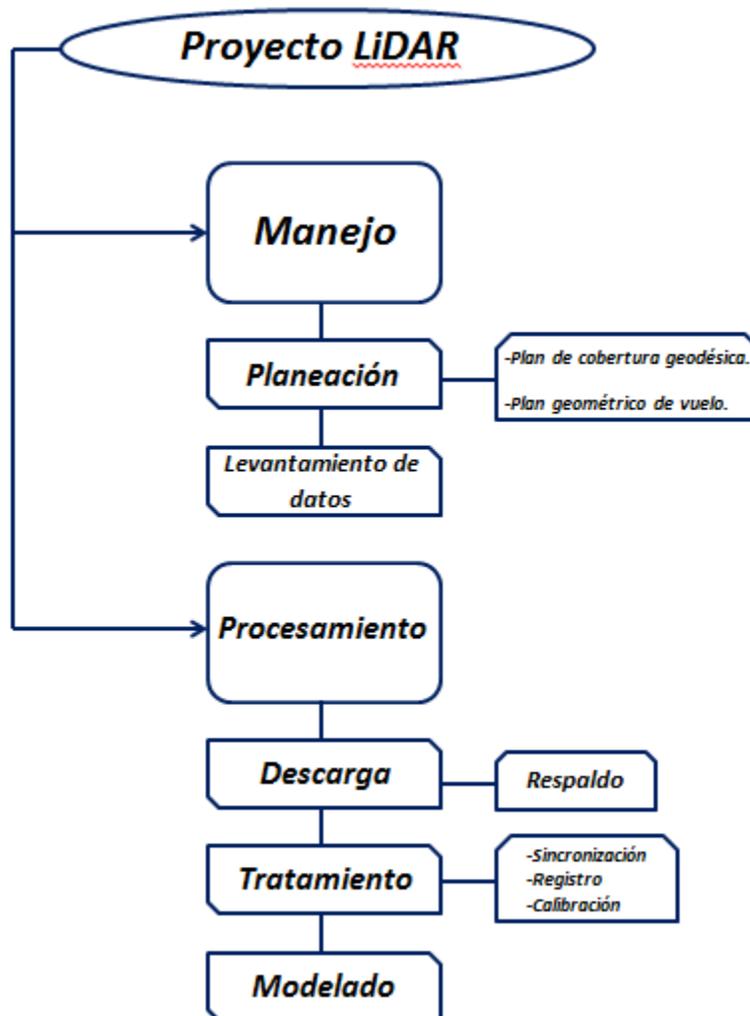


Figura 13. Diagrama del manejo y procesamiento de datos LiDAR

## **2.1. Manejo para la planeación y levantamiento de datos LiDAR.**

Para realizar un levantamiento de datos LiDAR con el sistema ALS es estrictamente necesario trabajo previo en gabinete para la planeación, el cual está marcado según los alcances del levantamiento en cuanto a cobertura, resolución, precisión etc. Se puede dividir en dos etapas:

### **2.1.1. Plan de cobertura geodésica.**

Teniendo claro las especificaciones del proyecto, la definición de zonas de trabajo y el cubrimiento a realizar, se define el componente terrestre (DGPS) del sistema ALS, dividiéndolo en la ubicación de estaciones base y campos de control a efecto de tener sitios con posicionamiento geodésico tridimensional ya establecido para el proceso de todos los datos captados por el GPS del avión, lo cual permite obtener la orientación y el cálculo de la trayectoria, generar la nube de puntos y ajustar los puntos al terreno (Sánchez, García, & Díaz, 2007) , a continuación se describe qué son las estaciones base y campos de control y su utilidad en el levantamiento de datos LIDAR.

#### **a) Estaciones base GPS**

Una estación base provee los datos necesarios para un postprocesamiento diferencial. Se ubica una estación dentro del aeropuerto que sirve de base de operaciones y una más al centro del proyecto de levantamiento de datos LIDAR, lo que asegura el cubrimiento y respaldo al equipo GPS instalado dentro de la aeronave. Cada estación se liga al

marco físico de referencia geodésica nacional mediante el empleo de equipos de doble banda y el método de levantamiento estático con liga a la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA), las posiciones tridimensionales obtenidas previamente son introducidas en los equipos GPS cuando se configura la medición común con el equipo GPS dentro de la aeronave. La operación de los equipos GPS en tierra se inicia antes de la misión de vuelo y concluye después de que se cierra la sesión láser en la aeronave (Sánchez, García, & Díaz, 2007).

b) Campos de control

Los campos de control para trabajos LIDAR deben establecerse en áreas relativamente planas, de forma regular, preferentemente rectangulares (canchas de fútbol o baloncesto) donde se miden puntos GPS distribuidos dentro de una malla regular para ofrecer una comparación más real de los puntos LIDAR que caen dentro del campo.

A diferencia de las estaciones base y dada la cantidad de puntos, el método de levantamiento es estático rápido con períodos de medición máximos de una hora determinados por las condiciones de visibilidad satelital dentro de la zona seleccionada. Los campos de control tienen como finalidad proporcionar el control de calidad de la altura obtenida por los datos LIDAR. Su mayor utilidad reside en que permiten identificar los errores sistemáticos en las alturas.

### 2.1.2. Plan geométrico de vuelo.

El plan geométrico de vuelo es una de las primeras etapas para un levantamiento con el sistema LiDAR. Existen diversos programas de planificación de vuelo en el mercado, los cuales se venden con un software que le dice al piloto el curso y la altitud del vuelo, y cuando tiene que iniciar y detener el sensor LiDAR a lo largo de una línea de vuelo (Wehr, 2008). Sin embargo esto no resulta conveniente para los fines de este apartado en donde se busca explicar de manera general los pasos para desarrollar desde el principio un plan geométrico de vuelo. Por lo tanto su planificación necesita diferentes etapas de trabajo que van ligadas con el plan de cobertura geodésica.

Las características de rendimiento del sensor LiDAR y del POS determinarán la densidad de puntos a lo largo y a través de la dirección de vuelo, la exactitud de la elevación, la precisión de los puntos y la resolución de la elevación (Wehr, 2008).

El espaciado de puntos a lo largo de la línea de vuelo (Ecuación 1) está dada por la velocidad ( $v$ ) del avión y la velocidad de escaneo que está determinada por la frecuencia de escaneo ( $f_x$ ) (Wehr, 2008).

$$\text{Ecuación 1} \quad \rightarrow \quad \Delta x_{\text{along}} = \frac{v}{f_x}$$

Si no se conoce el avión con el que se realizará el vuelo, una velocidad de 75m/s es una buena opción para empezar con el plan geométrico de vuelo (Wehr, 2008).

El espaciado de puntos a través de la línea de vuelo ( Ecuación 2) se puede calcular de la siguiente manera (Wehr, 2008):

$$\text{Ecuación 2} \rightarrow \Delta x_{\text{across}} = \frac{\theta}{N} * \frac{H}{\cos^2(\theta/2)}$$

Donde H es la altura de vuelo,  $\theta$  es el FOV del sensor y N es el número de puntos por línea escaneada, asumiendo que el terreno es plano y que las distancias entre los puntos de las líneas son iguales, se calcula con la Ecuación 3 (Wehr, 2008):

$$\text{Ecuación 3} \rightarrow N = \frac{f_{\text{pulse}}}{f_x}$$

Donde  $f_{\text{pulse}}$  es la frecuencia de los pulsos láser.

En caso de que el terreno cuente con una pendiente con ángulo  $i$  a lo largo de la línea de vuelo, la distancia máxima a través de la línea de vuelo se calcula con la Ecuación 4 (Wehr, 2008):

$$\text{Ecuación 4} \rightarrow \Delta x_{\text{across}} = \begin{cases} \frac{\theta}{N} * \frac{H}{\cos^2(\theta/2) * \cos(i) * [1 - \tan(\theta/2) * \tan(i)]^2}, & \text{si } i \geq 0 \\ \frac{\theta}{N} * \frac{H}{\cos^2(\theta/2) * \cos(i) * [\tan(\theta/2) * \tan(i) - 1]^2}, & \text{si } i < 0 \end{cases}$$

Los valores  $\Delta x_{\text{along}}$  y  $\Delta x_{\text{across}}$  se usan para determinar la densidad de puntos  $d$ , que da el número de puntos láser por metro cuadrado, Ecuación 5 (Wehr, 2008):

$$\text{Ecuación 5} \rightarrow d = \frac{1}{\Delta x_{\text{along}} * \Delta x_{\text{across}}}$$

Algunos de los parámetros calculados no sólo dependen de los parámetros del sensor LiDAR, más bien son función de la altura de vuelo. La altura de vuelo es el resultado del rango máximo de inclinación ( $R_{max}$ ) los cuales están relacionados por la Ecuación 6 (Wehr, 2008):

$$\text{Ecuación 6} \rightarrow R_{max} = \frac{H}{\cos\theta/2}$$

Para determinar el ancho de las líneas de vuelo (SW), se utiliza la Ecuación 7 (Wehr, 2008):

$$\text{Ecuación 7} \rightarrow SW = 2 * H * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Además de los parámetros clave ya calculados para la planificación del vuelo el factor de superposición ( $\mu$ ) entre líneas de vuelo debe de ser establecido, éste está definido por la Ecuación 8 (Wehr, 2008):

$$\text{Ecuación 8} \rightarrow \mu = 1 - \frac{e}{SW}$$

Donde  $e$  es la distancia entre los centros de las líneas de vuelo adyacentes, la superposición depende de la precisión de vuelo del piloto. La planificación del vuelo sin solapamiento no es recomendable ya que se tendría que enfrentar el problema de que no se cubrieran áreas debido a un vuelo irregular, se recomienda como mínimo una superposición de 20%. Para los levantamientos con los que no se puede lograr una alta densidad de puntos con las características del sensor y la velocidad de vuelo puede usarse una superposición del 50% (Wehr, 2008).

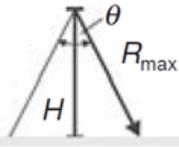
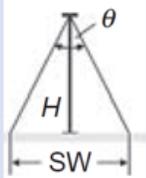
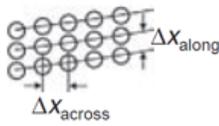
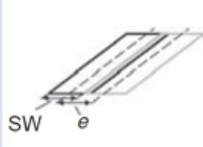
	Altura sobre el terreno	$H = R_{max} * \cos \theta / 2$	$R_{max}$ : Rango máximo de inclinación $\theta$ : Ángulo FOV	
	Ancho de línea	$SW = 2 * H * \tan \left( \frac{\theta}{2} \right)$	$H$ : Altura sobre el terreno $\theta$ : Ángulo FOV	
	Espaciado de puntos	A través de la línea de vuelo	$\Delta x_{across} = \frac{\theta}{N} * \frac{H}{\cos^2(\theta/2)}$	$H$ : Altura sobre el terreno $\theta$ : Ángulo FOV $N$ : Número de puntos por línea escaneada.
		A lo largo de la línea de vuelo	$\Delta x_{along} = \frac{v}{fx}$	$V$ : Velocidad del avión. $fx$ : Frecuencia de escaneado.
	Densidad de puntos	$d = \frac{1}{\Delta x_{along} * \Delta x_{across}}$	$\Delta x_{across}$ $\Delta x_{along}$ : Espaciado de puntos.	
	Factor de traslape	$\mu = 1 - \frac{e}{SW}$	$SW$ : Ancho de línea de vuelo $e$ : Separación entre líneas de vuelo.	
	Separación entre líneas de vuelo	$e = SW * (1 - \mu)$	$SW$ : Ancho de línea de vuelo $\mu$ : Factor de traslape.	

Tabla 4. Tabla resumen de parámetros para el plan de vuelo

Una vez teniendo estos datos bien planeados y establecidos se puede pasar a la etapa de levantamiento de datos.

### 2.1.3. Levantamiento de datos

El levantamiento de datos se hace durante la misión de vuelo ya planeada y programada en gabinete en la que es necesario darle al piloto del avión y al operador del sistema ALS una hoja de configuración con los datos básicos para la misión de vuelo, a continuación se muestra un extracto de una de estas (Sánchez, García, & Díaz, 2007).

#### Scanner Setup

##### **Commanded FOV (full angle)**

Terrain Elevation AMSL (minimum in survey area)	degrees	65.00
Terrain Elevation AMSL (maximum in survey area)	meters	100.00
Nominal Flying Height Above Minimum Terrain Elevation	meters	700.00
Nominal Flying Altitude AMSL	meters	6000.00
Airspeed	meters	6100.00
Range/Intensity Mode (1, 2, 3, 4)	knots	160.00
Max Laser Pulse Rate		1.00
Laser Pulse Rate Used	Hz	17100.00
System Controller Firmware (<V2.07, V2.07+)	Hz	17100.00
Laser Power Class (3=3W, 4=4W)		V2.07+
Receiver Aperture Stop (45, 60, 65, 75, LM, ALS50)	Watts	4.00
Scan Rate	degrees	LM
Max Scan Rate (ALS40/ALS50, 45-degree/3000 m mirror, gen 1c driver)	Hz	9.40
Max Scan Rate (ALS40, 45-degree/3000 m mirror, gen 1b driver)	Hz	26.80
Max Scan Rate (ALS40, 67-degree/6100 m mirror, all drivers)	Hz	21.63
Max Scan Rate (ALS40, 75-degree/6100 m mirror, all drivers)	Hz	10.82
	Hz	9.45

**Figura 14** Hoja de configuración para un sistema ALS

Durante la misión de vuelo se monitorea la cantidad de pulsos programados respecto a la cantidad de pulsos recibidos los cuales tienen que ser mayor al 80%, idealmente se esperan de 95% a 99%. También se graban imágenes en una cámara que se utilizan para detectar información dudosa o falsa para facilitar el procesamiento de las posiciones colectadas, se deben de monitorear los retornos del láser dependiendo del terreno o los objetos sobre el:

- En una superficie sólida (edificios, suelo, vehículos, etc.), el rayo se refleja de manera inmediata al sensor.
- En el agua y el vidrio, el rayo de luz presenta reflexión especular (dispersión), que hace que el reflejo no retorne al sensor; para estas áreas no se registran datos.
- En algunas zonas con materiales volcánicos con presencia de agua y en donde se presenta asfalto nuevo el rayo es absorbido, y no se obtienen datos.
- En zonas de vegetación, el rayo choca con la capa superior de los árboles y una parte del rayo retorna al sensor (primer retorno), pero otras partes pueden penetrar entre los huecos del follaje hasta chocar con algún objeto

y retornar (segundo retorno), y otras partes siguen penetrando hasta que son reflejadas por el suelo cuando la vegetación no es muy densa (tercer retorno).

A efecto de tener una idea del volumen de datos captados por misión de vuelo y la densidad de puntos sobre el terreno según los parámetros configurados, en la siguiente tabla se muestra un ejemplo de este registro.

Altura de vuelo (m)	Ángulo de barrido	Frecuencia de barrido	Frecuencia de barrido del espejo	Resultados obtenidos
6000	65°	16600 hz	9.45 hz	-105 millones de puntos en 7GB  -Densidad de puntos 0.03 m <sup>2</sup>  -12 líneas de barrido con sobreposición lateral de 30% más una línea transversal a las 12

**Tabla 5. Volumen de datos captados**

También durante la misión de vuelo es necesario realizar una bitácora de vuelo donde se especifican situaciones sistemáticas que se presentan durante la ejecución de la misión aérea, dando énfasis a las diferencias detectadas respecto a lo planeado, tales como diferencias de altura de vuelo, velocidades de desplazamiento del avión, ángulo de barrido, mensajes de falla en la grabación de datos, etc., su utilidad es primordial para el postprocesamiento de la información, en la siguiente imagen se muestra un ejemplo de una bitácora de vuelo (Sánchez, García, & Díaz, 2007).

AVION XC-GON		PILOTO E. GOMEZ		COPILOTO J.M. BELMAN		OPLASER A. HERNANDEZ		FOTONAVEGANTE A. SALAZAR			
Fecha de vuelo 07/08/06		PROYECTO TIJUANA		ZONA Tijuana		Disk Usage 3		PC CARD Loggin Control 4			
No de satélites inicial 6/7	No de satélites final 5/7	LASER POWER 2.34		TEMP °C 6	PRESION in/hg 3003	FOV 65		SCAN RATE (HZ) 9.4	ATENUADOR 0	IDENTIFICADOR 060807a	
Especificaciones del LASER											
No. Línea	Pasada	ARCHIVO ID de la Misión	Pulse Rate (kHz)		VELOCIDAD kts		ALTITUD		RETORNOS MAXIMO MINIMO %		
			Inicial-----Final	AVION	GPS	AVION	GALT	%	%		
37	1	181310	15800	15800	150	180	19000	20055	100	86	DOBLECAPA
38	1	182854	15800	15800	150	210	19000	20050	100	82	DOBLECAPA
39	1	184346	15800	15800	150	179	19000	20040	100	91	DOBLECAPA
40	1	185926	15800	15800	150	217	19000	20070	100	92	
41	1	191347	15800	15800	150	186	19000	20090	100	90	
42	1	192845	15800	15800	150	215	19000	20100	100	87	

**Tabla 6. Ejemplo de bitácora de vuelo**

## 2.2 Procesamiento para la descarga, tratamiento y modelado de los datos LiDAR.

### 2.2.1 Respaldo

Después de la misión de vuelo se hace un respaldo con copias de los datos LiDAR y POS obtenidos en ésta, normalmente se guardan en un formato binario comprimido. Las copias de datos que no son para respaldo se descomprimen y se convierten a formato ASCII, que es el formato más común para las rutinas del software utilizado en los procesos. En la primera etapa del procesamiento los datos LiDAR y POS se tratan por separado, se explican los pasos subsecuentes para el manejo de los datos levantados en la misión de vuelo.

Los datos POS comprenden los datos del IMU y del GPS del avión, antes de integrar los datos POS con los datos LiDAR, se deben procesar los datos DGPS usando los datos GPS de los campos de control, la integración de los datos DGPS e IMU ofrece de principio el siguiente conjunto de datos:

$$GPS_{time} \ X_{WGS84} \ Y_{WGS84} \ Z_{WGS84} \ roll, pitch, yaw$$

Las coordenadas tienen que ver con el origen de los datos LiDAR y los ángulos de orientación son las rotaciones sobre el sistema horizontal local instantáneo en el tiempo del GPS, en un segundo paso los datos deben de ser sincronizados.

### **2.2.2 Sincronización.**

Los datos LiDAR y POS tienen que ser sincronizados, como estos dos elementos generalmente son fabricados por diferentes compañías, la combinación de sus datos puede variar dependiendo de los componentes que se utilicen, debido a esto se describe un enfoque para este procedimiento desarrollado en el *Institute of Navigation of the University Stuttgart* el cual es independiente del sensor LiDAR y el IMU empleados.

Ya que el sensor LiDAR es controlado por una unidad llamada LCU (siglas en inglés para *LiDAR Control Unit*) y el GPS e IMU por el PCS (siglas en inglés para *POS Computer System*), estas dos unidades de control trabajan cada una en su propio sistema de tiempo, PCS se define por el tiempo del GPS mientras que LCU por el reloj interno de la computadora. Suponiendo que el POS proporciona los datos del GPS y de la IMU sincronizados, la sincronización se puede reducir a la sincronización del tiempo del GPS con el tiempo de la computadora de LCU.

Un módulo de software controla el tiempo de los datos LCU. Al comienzo de la toma de datos en cada línea de vuelo, el tiempo LCU está vinculado al flujo de los datos que se está levantando, tiempo local, en paralelo a esta grabación, la etiqueta del tiempo de la señal del GPS, unidad POS y el tiempo de LCU se almacenan en un archivo de protocolo separado. La señal del receptor GPS a bordo provoca a través de un controlador que mediante una alarma el tiempo GPS y el tiempo local LCU se almacenen en el mismo instante. Este método logra una precisión superior a los 10 $\mu$ s. Como el archivo generado (Archivo de protocolo) en este proceso contiene la información de la sincronización durante la toma de los

datos, una post-sincronización entre los datos POS y los datos del sensor LiDAR en posible. Antes de la sincronización, el usuario tiene 3 archivos:

1. Archivo de datos brutos LiDAR, que contiene el tiempo LCU para cada línea de vuelo, un conjunto de datos con los ángulos instantáneos del sensor durante la toma de los datos, la distancia oblicua y los valores de intensidad.
2. Archivo de protocolo.
3. Archivo POS que contiene la posición tridimensional instantánea y los ángulos de orientación con respecto al tiempo GPS.

Normalmente el archivo LiDAR contiene más líneas de datos por intervalo de tiempo que el archivo POS, debido a que la frecuencia de muestreo del pulso láser es mucho mayor, es por esto que se requiere la interpolación de las posiciones del archivo POS y los ángulos de orientación, en caso de escalares se aplica una interpolación lineal, después de este proceso de sincronización se obtienen datos en el siguiente arreglo:

$GPS_{time} X, Y, Z (WGS84) | Roll(\omega), Pitch(\varphi), Heading (k) | distancia\ oblicua | intensidad | ángulo\ de\ escaneo |$

Este arreglo son los datos de entrada para el siguiente proceso que es el de registro.

### **2.2.3 Registro.**

Para una mejor comprensión del proceso de registro, se supone en primer lugar que la orientación interna del LiDAR se conoce, en este caso, la calibración

significa la determinación de la orientación externa descrita por los ángulos heading pitch y roll.

El proceso de registro puede ser descrito matemáticamente (**Ecuación 9**) con un simple vector (Figura 15):

$$\text{Ecuación 9} \rightarrow \vec{G} = \vec{r}_L + \vec{s}$$

donde

$\vec{G}$  es el vector que va desde el centro de la Tierra hasta el punto en el terreno.

$\vec{r}_L$  es el vector que va del centro de la Tierra al origen de los puntos LiDAR.

$\vec{s}$  es el vector de distancia oblicua.

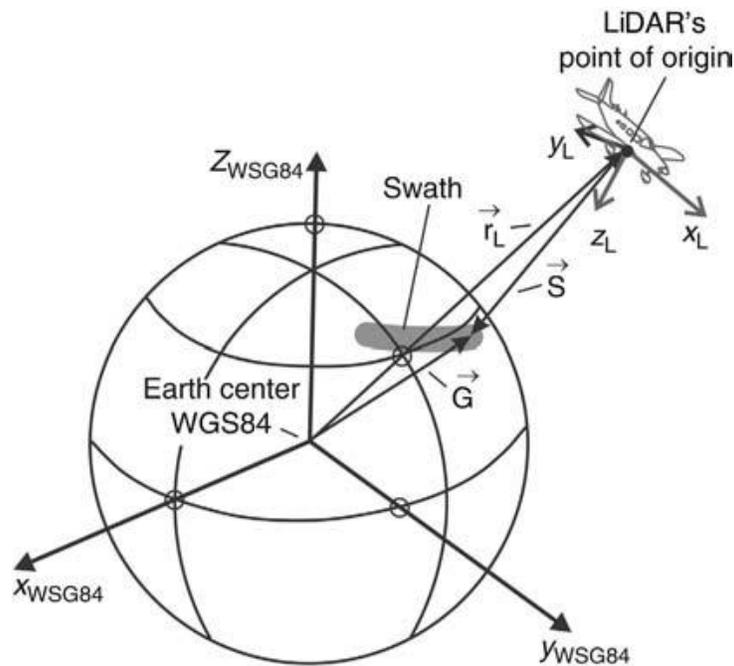
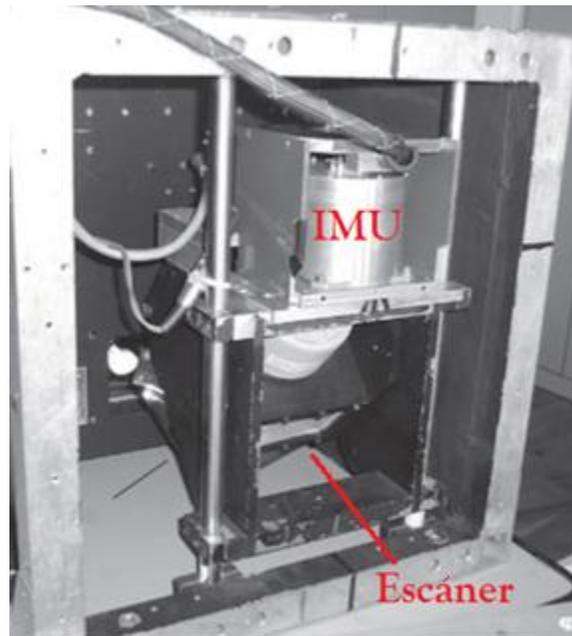


Figura 15. Diagrama de la Ecuación 9

El origen de los puntos LiDAR es un punto fijo en el espacio 3D en el cual el rayo láser se dispara en el ángulo de escaneado en ese instante. La posición real de este punto es muy dependiente del mecanismo de exploración utilizado. Para realizar un cálculo sencillo y alcanzar una precisión tan alta como sea posible se aplica la ecuación (vector). Debido a que el IMU se monta normalmente sobre el soporte de escáner LiDAR como se muestra en la Figura 16:



**Figura 16. Posición del IMU**

Los datos POS se transforman al punto de origen del LiDAR, para esta transformación el usuario tiene que introducir los parámetros para los llamados brazos de palanca (Figura 17), en el software de procesamiento de POS, estos son dos vectores tridimensionales, uno es desde el origen del LiDAR hacia el centro del IMU y el otro es desde el origen del LiDAR hacia el centro de la antena GPS.

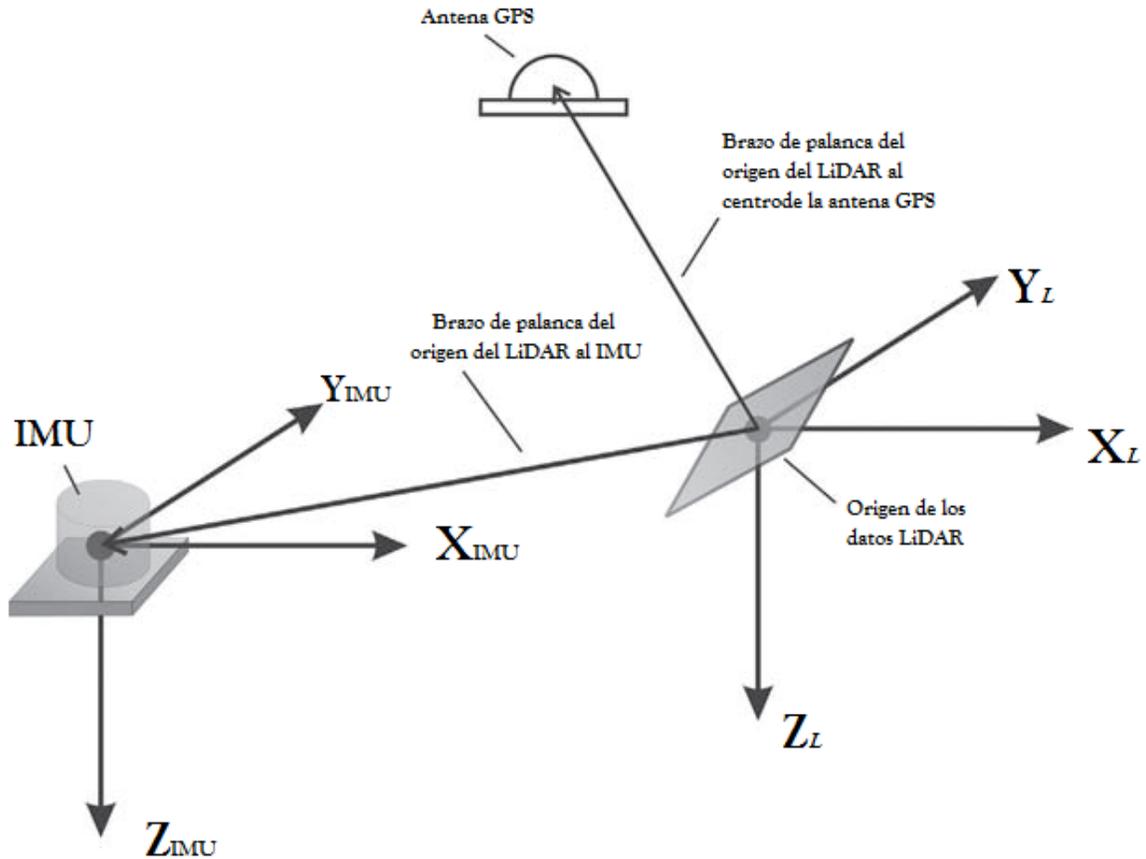


Figura 17. Brazos de palanca

El origen de los datos LiDAR define el origen del sistema de coordenadas del LiDAR, sistema  $L$ , donde el eje  $X_L$  crece en la dirección de vuelo, el eje  $Y_L$  crece hacia la derecha del avión y el eje  $Z_L$  hacia abajo perpendicular al plano que definen los ejes  $X_L$  y  $Y_L$ . El vector  $\vec{r}_L$  se mide en el sistema WGS84, los puntos que describe el vector  $\vec{G}$  también se miden en WGS84, como el vector  $\vec{s}$  se mide en un sistema de coordenadas arbitrario ( $L$ ) tiene que ser transformado por matrices de transformación a WGS84, el sistema de coordenadas en un enfoque general se representa con la Ecuación 10:

$$\text{Ecuación 10} \rightarrow \mathbf{G}_{\text{WGS84}} = \mathbf{r}_{L \text{ WGS84}} + ( )_{\text{H}}^{\text{WGS84}} * ( )_{\text{IMU}}^{\text{H}} * ( )_{\text{L}}^{\text{IMU}} * \mathbf{S}_{\text{L}}$$

El producto de las matrices  $(\ )_L^{IMU}$  y  $(\ )_{IMU}^H$  describen la orientación del sistema de coordenadas  $L$  con respecto a la horizontal del sistema de coordenadas del plano  $H$  o plano del avión. Asumiendo que el sistema de coordenadas  $L$  está perfectamente sincronizado con el sistema de coordenadas IMU, se puede considerar que tiene la misma orientación, por lo que la matriz  $(\ )_L^{IMU}$  se convierte en la unidad, en este caso sólo la orientación instantánea del avión o de forma más precisa la orientación del IMU determina, junto con el ángulo de escaneado instantáneo la dirección real del haz de luz láser (vector  $\vec{s}$ ).

La orientación del IMU en relación con el sistema  $H$  esta descrita por los ángulos Roll, Pitch y Heading. Si las rotaciones se toman en cuenta en el siguiente orden, primero Roll, después Pitch y al final Heading la matriz  $(\ )_{IMU}^H$  se puede representar de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 11} \rightarrow (\ )_{IMU}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{11} & \mathbf{a}_{21} & \mathbf{a}_{31} \\ \mathbf{a}_{12} & \mathbf{a}_{22} & \mathbf{a}_{32} \\ \mathbf{a}_{13} & \mathbf{a}_{23} & \mathbf{a}_{33} \end{bmatrix}$$

en donde:

$$\text{Ecuación 12} \rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{11} \\ \mathbf{a}_{12} \\ \mathbf{a}_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\mathbf{k}) * \cos(\varphi) \\ \text{sen}(\mathbf{k}) * \cos(\varphi) \\ -\text{sen}(\varphi) \end{bmatrix}$$

$$\text{Ecuación 13} \rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{21} \\ \mathbf{a}_{22} \\ \mathbf{a}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\mathbf{k}) * \text{sen}(\varphi) * \text{sen}(\omega) - \text{sen}(\mathbf{k}) * \cos(\omega) \\ \text{sen}(\mathbf{k}) * \text{sen}(\varphi) * \text{sen}(\omega) + \cos(\mathbf{k}) * \cos(\omega) \\ \cos(\varphi) * \text{sen}(\omega) \end{bmatrix}$$

$$\text{Ecuación 14} \rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{31} \\ \mathbf{a}_{32} \\ \mathbf{a}_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\mathbf{k}) * \text{sen}(\varphi) * \cos(\omega) + \text{sen}(\mathbf{k}) * \text{sen}(\omega) \\ \text{sen}(\mathbf{k}) * \text{sen}(\varphi) * \cos(\omega) - \cos(\mathbf{k}) * \text{sen}(\omega) \\ \cos(\varphi) * \cos(\omega) \end{bmatrix}$$

La matriz de transformación  $(\ )_H^{WGS84}$  se refiere a la orientación entre el sistema  $H$  y el sistema WGS84, esta orientación se define por la latitud geográfica  $\Phi_0$  y la longitud geográfica  $\Lambda_0$ , de manera que la matriz  $(\ )_H^{WGS84}$  se convierte en:

$$\text{Ecuación 15} \rightarrow (\ )_H^{WGS84} = \begin{bmatrix} -\cos\Lambda_0 * \text{sen}\Phi_0 & -\text{sen}\Lambda_0 & -\cos\Lambda_0 * \cos\Phi_0 \\ -\text{sen}\Lambda_0 * \text{sen}\Phi_0 & \cos\Lambda_0 & -\text{sen}\Lambda_0 * \cos\Phi_0 \\ \cos\Phi_0 & 0 & \text{sen}\Phi_0 \end{bmatrix}$$

La Ecuación 10 y las matrices mostradas, muestran que los puntos LiDAR pueden procesarse sólo si la orientación y la posición del LiDAR se conocen, estos valores son medidos por el POS, hasta ahorita se ha supuesto que el LiDAR y el POS tienen la misma orientación, este no es siempre el caso. Debido a las tolerancias de la instalación en el avión hay que tener en cuenta una desalineación entre el POS y el LiDAR, esta desalineación es descrita por los ángulos en Roll  $\delta_\omega$ , en Pitch  $\delta_\varphi$  y en Heading  $\delta_k$ ; como la secuencia de estas rotaciones es igual al orden de rotación de la matriz  $(\ )_{IMU}^H$ , ésta y la matriz  $(\ )_L^{IMU}$  se parecen, sin embargo la orientación de los ángulos Roll, Pitch y Heading tienen que ser corregidos por la desalineación de los ángulos en Roll  $\delta_\omega$ , en Pitch  $\delta_\varphi$  y en Heading  $\delta_k$ , por lo tanto la matriz  $(\ )_L^{IMU}$  está dada por:

$$\text{Ecuación 16} \rightarrow (\ )_L^{IMU} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{11} & \mathbf{b}_{21} & \mathbf{b}_{31} \\ \mathbf{b}_{12} & \mathbf{b}_{22} & \mathbf{b}_{32} \\ \mathbf{b}_{13} & \mathbf{b}_{23} & \mathbf{b}_{33} \end{bmatrix}$$

en donde:

$$\text{Ecuación 17} \rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{11} \\ \mathbf{b}_{12} \\ \mathbf{b}_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_k) * \cos(\delta_\varphi) \\ \text{sen}(\delta_k) * \cos(\delta_\varphi) \\ -\text{sen}(\delta_\varphi) \end{bmatrix}$$

$$\text{Ecuación 18} \rightarrow \begin{matrix} b_{21} \\ b_{22} \\ b_{23} \end{matrix} = \begin{matrix} \cos(\delta_k) * \text{sen}(\delta_\varphi) * \text{sen}(\delta_\omega) - \text{sen}(\delta_k) * \cos(\delta_\omega) \\ \text{sen}(\delta_k) * \text{sen}(\delta_\varphi) * \text{sen}(\delta_\omega) + \cos(\delta_k) * \cos(\delta_\omega) \\ \cos(\delta_\varphi) * \text{sen}(\delta_\omega) \end{matrix}$$

$$\text{Ecuación 19} \rightarrow \begin{matrix} b_{31} \\ b_{31} \\ b_{31} \end{matrix} = \begin{matrix} \cos(\delta_k) * \text{sen}(\delta_\varphi) * \cos(\delta_\omega) + \text{sen}(\delta_k) * \text{sen}(\delta_\omega) \\ \text{sen}(\delta_k) * \text{sen}(\delta_\varphi) * \cos(\delta_\omega) - \cos(\delta_k) * \text{sen}(\delta_\omega) \\ \cos(\delta_\varphi) * \cos(\delta_\omega) \end{matrix}$$

Estos ángulos de desalineación se determinan mediante la calibración.

## 2.2.4 Calibración.

La exactitud de los datos levantados en la misión de vuelo depende en gran parte de los datos de calibración del sensor LiDAR y de la unidad POS. Una calibración incorrecta no sólo introduce errores sistemáticos, sino que también puede introducir ruido aleatorio por las desviaciones estándar en las elevaciones más altas. La importancia de la calibración se destaca por la mejora en la precisión de los levantamientos LiDAR que se ha logrado en los últimos años, esto se ha logrado principalmente, sin cambiar el software con el que se hace el levantamiento LiDAR, sino más bien por las mejoras en los procedimientos de calibración y las mejoras asociadas a la precisión de los datos de navegación y la sincronización de los datos (Burman, 2002).

Para una calibración además de los parámetros  $\delta_\omega$ ,  $\delta_\varphi$  y  $\delta_k$  se deben de tener en cuenta el ángulo de oscilación  $\gamma_M$ , que corresponde con el ángulo máximo de barrido o en otras palabras el FOV y un parámetro aditivo  $s_{add}$  que corresponde a la distancia oblicua, por lo tanto para la calibración se tienen un

total de 5 parámetros. De acuerdo con la Figura 18 el vector instantáneo de la distancia oblicua ( $\vec{s}$ ) es calculado en el sistema de coordenadas propio del sistema LiDAR ( $L$ ).

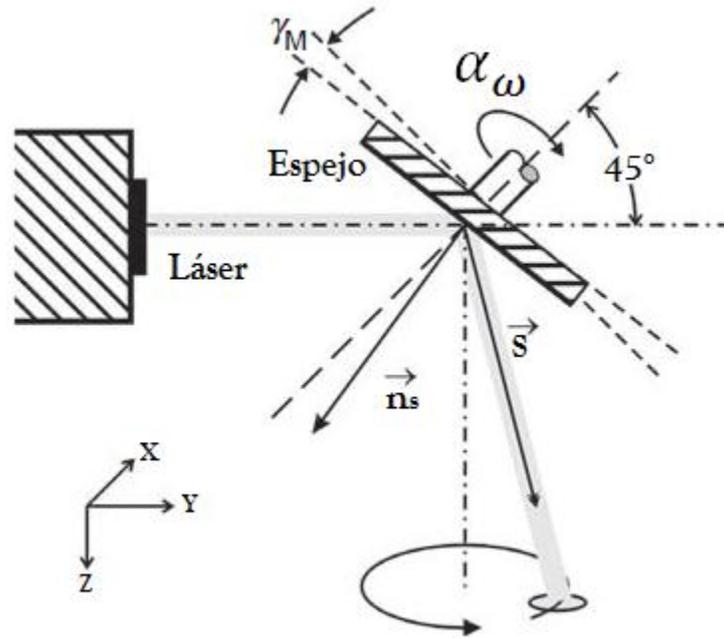


Figura 18. Vector instantáneo  $\vec{s}$

$$\text{Ecuación 20} \rightarrow s_L = (\vec{s} + s_{add}) * \begin{bmatrix} \text{sen}(\delta) * \text{sen}(\xi) \\ -\text{cos}(\delta) \\ \text{sen}(\delta) * \text{cos}(\xi) \end{bmatrix}$$

en donde

$$\text{Ecuación 21} \rightarrow \delta = 2 * \arccos[\cos(\alpha_\omega) * \text{sen}(\gamma_M) * \text{sen}(\vartheta) + \cos(\gamma_M) * \cos(\vartheta)]$$

$$\text{Ecuación 22} \rightarrow \xi = -\arctan \left[ \frac{\text{sen}(\alpha_\omega) * \text{sen}(\gamma_M)}{\cos(\alpha_\omega) * \text{sen}(\gamma_M) * \cos(\vartheta) + \text{sen}(\gamma_M) * \text{sen}(\vartheta)} \right]$$

donde:

$\vec{s}$  es el vector de la distancia oblicua.

$\alpha_\omega$  es el ángulo de rotación instantáneo del eje.

$\vartheta$  es la inclinación del eje, la cual está definida por el diseño del escáner, son válidos  $45^\circ$ .

La Ecuación 23 deja ver que sólo dos parámetros de  $s_L$  son de interés para esta calibración, estos son  $\gamma_M$  y  $s_{add}$  todos los otros parámetros de transformación se encuentran en la matriz  $(\ )_L^{IMU}$  que describe la desalineación entre el IMU y el LiDAR.

$$\text{Ecuación 23} \rightarrow \mathbf{G}^{\text{WGS84}} = \mathbf{r}_L^{\text{WGS84}} + (\Lambda_0, \Phi_0)_H^{\text{WGS84}} * (\omega, \mathbf{k}, \varphi)_{IMU}^H * (\delta_\omega, \delta_k, \delta_\varphi)_L^{IMU} * \mathbf{s}_L(s_{add}, \gamma_M)$$

La Ecuación 23 utiliza un modelo Gauss-Markoff para estimar los parámetros de calibración la calibración se lleva a cabo en zonas planas (Estaciones base GPS), en la Figura 19 se muestra un esquema de estas zonas.

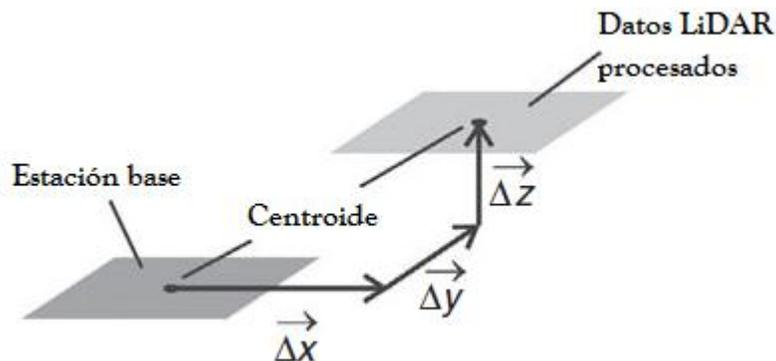


Figura 19. Esquema de Estaciones base GPS

El centroide de la estación base está desplazada  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$  y  $\Delta_z$  de la misma zona derivada de los datos LiDAR, por lo tanto la finalidad del método de Gauss-Markoff es el de reducir al mínimo estas diferencias mediante la variación de los

parámetros de calibración, el centroide de referencia en el espacio 3D se puede calcular con método geométricos simples (Toth, 2008). Después de extraer todas las mediciones láser que pertenecen a la zona de la estación base, esta se modela por triangulación, se recomienda el algoritmo de Delaunay para este proceso, como esta superficie se aproxima por N triángulos las coordenadas de su centroide se pueden procesar de forma independiente de la densidad de puntos, con la Ecuación 24:

$$\text{Ecuación 24} \rightarrow \overline{\mathbf{x}}_{\text{cent}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n F_i} * \sum_{i=1}^n (\overline{\mathbf{x}}_i * F_i)$$

donde:

$F_i$  es el triángulo  $i$ .

$\overline{\mathbf{x}}_i$  correspondiente al vector del centroide del triángulo  $i$ .

El proceso de usar a  $\overline{\mathbf{x}}_{\text{cent}}$  y la ubicación del centroide derivado de la medición GPS para la calibración, se denomina calibración por estaciones base.

Después de este proceso de calibración se derivan un nuevo conjunto de parámetros, los cuales tendrán que ser revisados y validados. La salida de los archivos ya calibrados contiene información en el siguiente orden:

*GPS<sub>tiempo</sub> X<sub>Laser\_WGS84</sub> Y<sub>Laser\_WGS84</sub> Z<sub>Laser\_WGS84</sub> intesidad*

### **2.2.5 Modelado.**

El modelado es la etapa para la generación de productos finales, los cuales son por ejemplo, los DEM o extraer otra información geográfica, como las estructuras de las casas, las formas de los techos, las alturas de los árboles, etc. En otras palabras en esta etapa del proceso se deben de llevar a cabo algunas tareas de clasificación.

Todos los datos del láser se ordenan dentro de los pixeles de un raster, cuyo tamaño será determinado por la resolución del proyecto. En general el tamaño de pixel debe de ser mayor o igual que el mayor espaciado entre puntos del láser, para asegurar que todos los pixeles contengan al menos un punto LiDAR, si se llegan a tener varios puntos LiDAR dentro de un mismo pixel se aplican algoritmos para obtener la información deseada ya que la salida del raster final debe de tener un sólo valor por pixel.

La difusión de las elevaciones se determinan principalmente por la calidad de la medición LiDAR, por ejemplo en las zonas forestales donde algunas medidas que caen en un pixel pueden ser del suelo o de la copa de un árbol, se hace una discriminación para clasificar estos valores para que así el valor que más probablemente sea el deseado se guarde en ese pixel.

La discriminación de objetos que están sobre el terreno ha demostrado ser difícil de automatizar, especialmente para grandes áreas con características variadas en el terreno. Varios métodos han sido desarrollados para la filtración de

los datos LiDAR, de los cuales tres enfoques son más frecuentes, el de predicción lineal (*Kraus & Pfeifer, 1998*), basado en pendiente / diferencia de altura (*Roggero, 2001; Shan and Sampath, 2005; Sithole, 2001; Vosselman, 2000*) y el filtrado morfológico (*Kilian et al., 1996; Zhang et al., 2003*) (*Silván-Cárdenas & Wang, 2006*).

Para éste trabajo de tesis los datos de entrada se obtuvieron mediante un modelo en el cual se calcula un gradiente multiescala de la variación de la superficie, que se utiliza para filtrar de manera adaptativa lo datos LiDAR, llamado MHT (siglas en inglés para *Multiscale Hermite Transform*) cuya teoría se explica en el artículo “*A multi-resolution approach for filtering LiDAR altimetry data*. J.L. Silván-Cárdenas & L. Wang, 2006”.

En este se implementa, como ya se mencionó, una transformada multiescala que descompone la señal en un conjunto de versiones diezmas de la señal original, que en el caso de LiDAR es una señal en forma de cuadrícula rectangular con valores de elevación que están referenciados a en un espacio de dos dimensiones X, Y. La señal es analizada por convolución en donde la señal se filtra para remover componentes con ciertas frecuencias de la señal.

Para el proceso antes descrito se tiene que tener un grid de entrada el cual se obtiene de la nube de puntos original tomada por el sistema LiDAR que se interpolan, antes de la interpolación los valores atípicos se retiran con el siguiente proceso:

- En el primer paso se analiza el histograma de elevación y sus umbrales para eliminar los valores máximos y mínimos, se define una diferencia de altura mínima de cada punto con respecto a todos sus vecinos, utilizando la triangulación de Delaunay para definir a los vecinos de cada punto, los puntos que están muy por arriba o muy debajo con respecto a sus vecinos se remueven. Los puntos que quedan se acomodan en una cuadrícula de entre 1, 2 o 4 metros de resolución usando la regla del vecino más próximo, la resolución espacial se define en base al espaciamiento entre puntos en la nube de puntos original.

### **3. Estimación de parámetros físicos mediante modelos digitales de elevación.**

#### **3.1. Modelo Digital de Elevaciones (MDE).**

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo, puede representarse de forma genérica mediante la ecuación:

$$z = f(x, y)$$

que define un campo de variación continua. La imposibilidad de resolver la ecuación anterior para todos los puntos del territorio obliga a definir elementos discretos sobre el mismo que permitan la codificación de las elevaciones, la más habitual es el formato raster, en el que los valores están contenidos en un archivo con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados. En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación (tamaño del pixel), la calidad de un MDE en formato raster va a depender tanto de los errores presentes en los datos con los que se ha construido como del procedimiento de interpolación que se ha llevado a cabo, para el caso de los que son generados con tecnología LIDAR se obtienen modelos de alta resolución y

gran exactitud (valores submétricos) (INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014).

Un MDE no solamente contiene información explícita acerca de la altitud en un área muestreada en diversos puntos sino que también aporta información relativa a las relaciones, distancia y vecindad, entre los diferentes valores de altitud. Ello permite el cálculo, a partir de diversos procedimientos, de nuevas variables topográficas.

Un modelo digital de elevaciones, es un primer producto generado con la nube de puntos obtenida mediante el sistema ALS el cual es clasificado para la obtención de otras variables.

En la Figura 24 se muestra el MDE de entrada para el desarrollo del presente trabajo de tesis.

Desde el punto de vista matemático existen dos principales enfoques que se pueden usar para describir la superficie topográfica

1. Funciones bidimensionales continuas se pueden aplicar para definir relativamente pequeñas porciones de la superficie (Strakhov, 2007). También pueden usarse las funciones esféricas para definir la topografía del planeta, hemisferios, u otros vastos territorios.

2. Funciones discretas de dos dimensiones, es decir, MDEs, en este trabajo de tesis se discute sólo este enfoque ya que ha obtenido una gran aceptación debido a su relativa simplicidad.

En este último caso, se pueden usar varios tipos de obtención de los valores de elevación, medidos o estimados. Estos pueden ser exportados a un

MDE de relativamente pequeñas porciones de la superficie topográfica, cuando la curvatura del planeta puede ser ignorada (Peucker, 1980):

- a) Distribución aleatoria de puntos.
- b) Puntos críticos en las curvas de nivel.
- c) Secciones transversales topográficas.
- d) Elementos críticos de la superficie topográfica, como líneas estructurales, los mínimos y máximos locales, etc.

Estos métodos son los que se utilizan comúnmente para la construcción de MDEs, que son una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados (Peucker, 1980).

En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos y para el caso de los que son generados con tecnología LIDAR se obtienen modelos de alta resolución y gran exactitud (valores submétricos) (INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014). Para cualquier parte de la superficie terrestre modelos digitales de todas las variables morfométricas se derivan de un MDE (Florinsky, 2012)

Los MDE son una importante fuente de información se han aplicado a la geografía física, la hidrología, la ecología y la biología, debido a que como ya se ha dicho expresa la superficie terrestre en tres dimensiones e imita la geografía natural del terreno, en la actualidad, las fuentes de datos de ellos son las siguientes:

1. Levantamientos fotogramétricos: Los datos se recogen mediante la decodificación de pares estereoscópicos de fotografías aéreas y de forma manual o automática hacer trazos altimétricos mediante estereoscopía.

2. Digitalización de información analógica que contenga información de alturas.

3. Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

#### **4. LIDAR**

El último método ofrece la resolución más fina donde su resolución vertical puede alcanzar hasta 12cm. De acuerdo con fuentes de datos y métodos de análisis, la estructura de los datos MDE que se obtuvieron a travez de los diferentes métodos mencionados anteriormente, se pueden dividir en tres tipos: Grid, TIN y líneas de contorno (Bi Huaxing, 2006).

### **3.2. Determinación del parámetro físico de altura mediante LIDAR.**

Para el presente trabajo de tesis el método de obtención de los datos, como ya se ha mencionado es mediante el sistema LIDAR aerotransportado que nos da, como se menciona en el primer apartado de este capítulo, que el tipo de obtención es de , distribución aleatoria de puntos.

El proceso de escaneo láser para la obtención de los puntos distribuidos aleatoriamente se realiza por el cálculo del tiempo de los impulsos del haz de luz enviados desde el sensor hasta el objeto de interacción y el retorno del objeto hacia el sensor de nuevo. Como la distancia está en función del tiempo de impulsos de envío y retorno, la ecuación de la velocidad se emplea en este caso:

$$V = D / T$$

Donde:

**V**, es velocidad

**D**, distancia

**T**, tiempo

Si se despeja la distancia, entonces se obtiene:

$$D = V * T$$

La distancia resulta de multiplicar la velocidad por el tiempo.

En el caso del láser, en la ecuación anterior de la distancia, la velocidad se refiere a la conocida velocidad de la luz, derivando la siguiente expresión:

$$D = r * (T/2)$$

Donde:

**D** = Distancia del sensor hacia el objeto

**r** = velocidad de la luz, expresada como rango de 0.3 metros por nanosegundo.

**T** = Intervalo de tiempo de los impulsos de envío y retorno. Por esta razón, el tiempo está dividido entre 2, ya que el láser tiene que viajar desde el sensor hacia el objeto, y del objeto retornar hacia el detector (Shan & Toth, 2008).

Al ser un haz de luz este “rebota” contra todos los objetos que se encuentran en la superficie que escanea el sensor y de los cuales obtiene para todos esa distancia que después del post proceso resulta en la altura sobre el nivel del mar de cada uno de estos objetos en forma de una nube de puntos, partiendo de esta premisa la posibilidad de estimar alturas mediante esta tecnología se esquematiza a continuación.

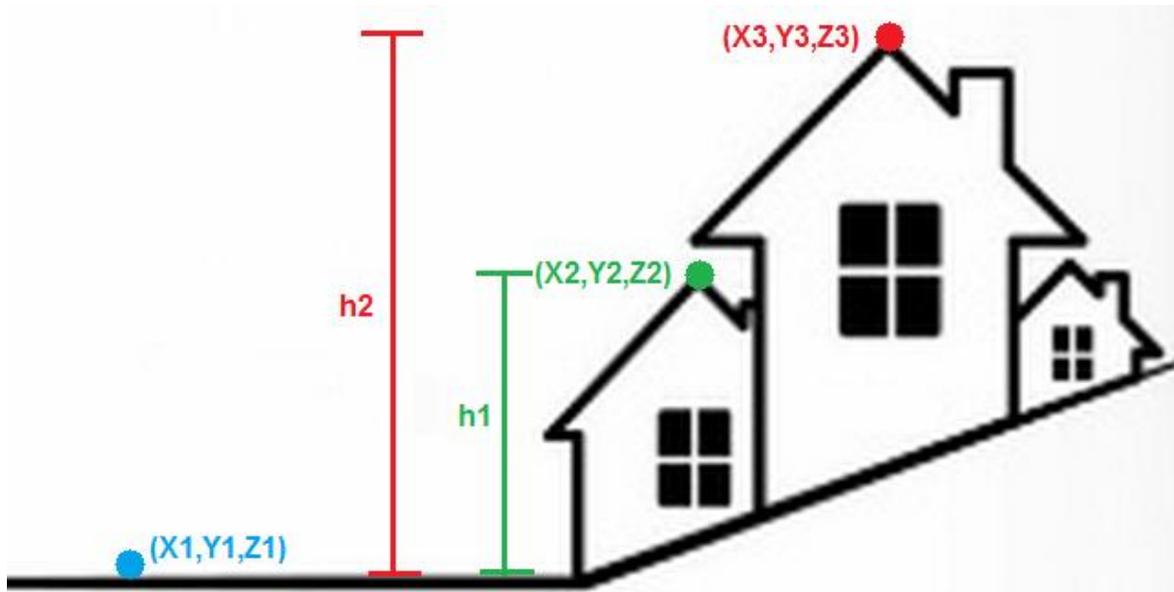


Figura 20. Esquema de puntos tomados con LiDAR

Donde la terna de coordenadas  $(X_1, Y_1, Z_1)$ ,  $(X_2, Y_2, Z_2)$  y  $(X_3, Y_3, Z_3)$  fueron obtenidas mediante el barrido del sistema LIDAR siendo la primera correspondiente al terreno natural de la zona de estudio y las 2 últimas a objetos cualesquiera sobre éste teniendo en los 3 casos a Z referida al nivel medio del mar y ya que se busca sólo la altura de los objetos sobre el terreno natural y teniendo todas las Z referidas al mismo nivel, el cálculo de h1 y h2 se reduce a lo siguiente:

$$h_1 = Z_2 - Z_1$$

$$h_2 = Z_3 - Z_1$$

### **3.1. Estimación de modelos digitales.**

Una acepción de la palabra modelo, originada en ámbitos geográficos, lo define como una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades (Joly, 1988).

Los modelos se construyen estableciendo una relación de correspondencia con la realidad cuyas variantes pueden producir modelos de características notablemente diferentes (Felicísimo, 1994).

Los MDE son muy efectivos para el análisis del terreno, muchos atributos de este pueden ser derivados de un MDE. Con la ayuda de un SIG estos atributos del terreno pueden ser mostrados con imágenes y atributos relacionados entre ellos. El análisis y la derivación de los atributos del terreno a partir de MDE son más accesibles que los de los métodos manuales (Bi Huaxing, 2006).

Una superficie puede ser vista como una suma de superficies. Esta trivialidad forma la base para resolver una variedad de problemas en el análisis digital del terreno y en el suelo, las tareas más populares son las siguientes (Florinsky, 2012):

- La separación de los componentes de baja y alta frecuencia de la superficie para estudiar regularidades en su estructura y sus elementos en diferentes escalas.
- Eliminación de ruido.
- Generalización, es decir, la eliminación de componentes de alta frecuencia o de ruido de la superficie

Como cualquier MDE contiene muchos errores y objetos aleatorios (Bourillet et al., 1996; Hastings and Dunbar, 1998; Arabelos, 2000; Holmes et al., 2000; Bergbauer et al., 2003; Smith and Sandwell, 2003; Rodríguez et al., 2006). La ocurrencia de ruido de un MDE conduce a la producción de modelos más ruidosos de atributos morfométricos derivados del MDE (Brown and Bara, 1994; Giles and Franklin, 1996; Steen et al., 1998; Stewart and Podolski, 1998; Roberts, 2001; Florinsky, 2002; Bergbauer and Pollard, 2003; Bergbauer et al., 2003; Oksanen and Sarjakoski, 2005).

El término generalización cartográfica se refiere a la generalización del contenido del mapa de acuerdo con el propósito y escala. Hay dos tipos de generalización: la orientada a escala y la orientada a un objetivo (Shiryaev, 1987). La generalización orientada a escala es una condición necesaria para la producción de cualquier mapa, esta es la manifestación cartográfica de reducir el exceso de información, la generalización orientada a escala ocupa las tres siguientes tareas (Florinsky, 2012):

5.1 Simplificación de la estructura del mapa, preservado una similitud general al mapa inicial.

5.2 Preservación de una máxima precisión para la ubicación de las características asignadas

5.3 Un equilibrio entre el contenido informativo de un mapa y su legibilidad.

La generalización orientada a un objetivo es una condición necesaria para revelar las características más importantes o particulares de objetos, fenómenos y

procesos en cuestión. La percepción y la comprensión de dicha información utilizando un mapa no generalizado puede ser difícil debido a la naturaleza de representación de datos; trata de las dos tareas siguientes (Florinsky, 2012):

1. Revelación y representación de los atributos particulares, propiedades y relaciones de objetos, fenómenos y procesos bajo estudio.
2. La transición de las características individuales a los grupos.

La resolución de estas tareas puede mejorar los resultados del análisis, así como permiten obtener cualitativamente nueva información (Salishchev, 1962) que puede ser de gran importancia.

### **3.1.1. Modelo Digital de Terreno (MDT).**

Los Modelos Digitales de Terreno (MDT) son modelos simbólicos los cuales llegan a un alto nivel de abstracción ya que el objeto real queda representado mediante una simbolización matemática (geométrica, estadística, etc.), se incluyen en esta categoría por las relaciones de correspondencia que se establecen con el objeto, tienen la forma de algoritmos o formalismos matemáticos. En este caso, los MDT presentan algunas ventajas, derivadas de su naturaleza numérica: no ambigüedad, posibilidad de modelización de procesos, verificabilidad y repetitividad de los resultados (Felicísimo, 1994).

En la cartografía convencional la descripción de las elevaciones a través del mapa topográfico constituye la infraestructura básica del resto de los mapas, estos usan casi exclusivamente una única convención, las curvas de nivel, para la representación de la superficie del terreno, no así en los MDT que son una

estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno natural, es decir que en esta no se consideran objetos que se encuentran sobre este como pueden ser, árboles, edificios o cualquier otro elemento artificial o natural que no pertenezca a la topografía natural de la zona, objetos eliminados en base del análisis y proceso del denominado Modelo Digital de Elevaciones.

Los modelos digitales del terreno han sido uno de los campos de investigación y aplicación más activos en ciencias de la información geo-espacial y la tecnología. Utilizando las técnicas de la infografía, la superficie de la Tierra o la superficie del terreno, se pueden representar digitalmente utilizando grandes volúmenes de puntos de muestreo distribuidos regular o irregularmente, en lugar de depender únicamente de curvas de nivel u otros simbolismos cartográficos. El modelo digital del terreno es ampliamente reconocido como la representación digital de la superficie natural para una región geográfica determinada (Q. Zhou, 2008). En comparación con las curvas de nivel tradicionales Li, et al. (2005) expuso las características específicas de un MDT como:

- Variedad de formas de representación.
- No hay pérdida de precisión de los datos con el tiempo.
- Mayor viabilidad de la automatización y el procesamiento en tiempo real.
- Representación multiescala más fácil.

A pesar de sus evidentes ventajas que se enumeraron anteriormente, el uso eficaz de los MDT, sin embargo, requiere más esfuerzo que la interpretación de

mapas de papel tradicionales. Así como la extracción de información sobre el terreno a partir de curvas de nivel requiere las técnicas de lectura de mapas, interpretación y medición derivando las características del terreno y las mediciones de un MDT también exige información, métodos y técnicas de extracción basado en la representación digital del terreno (Q. Zhou, 2008). En la Figura 21 se muestra un MDT.

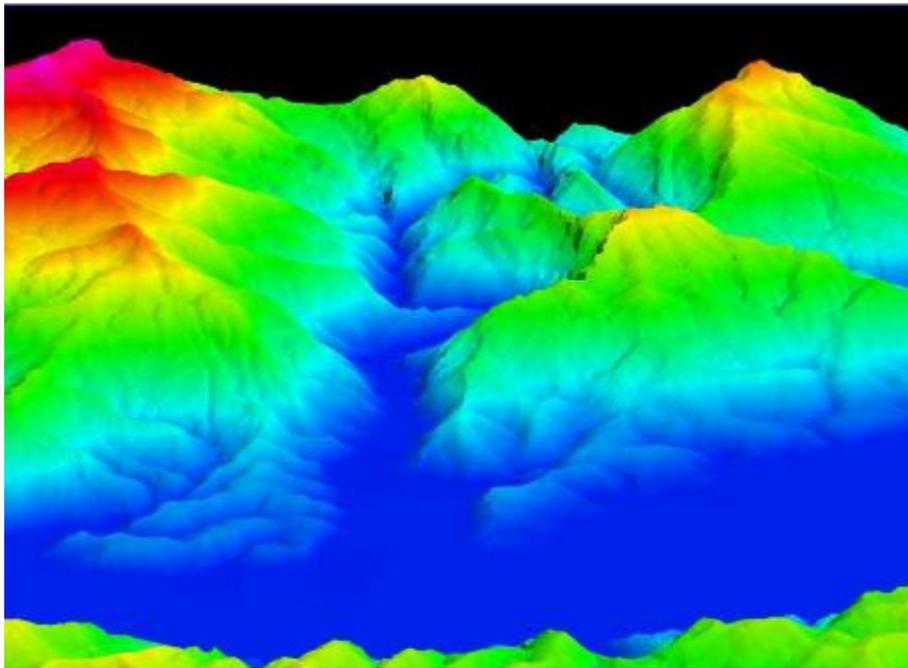


Figura 21. Modelo Digital de Terreno de Chiapas, (INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014)

### 3.1.2. Modelo Digital de Alturas (MDA).

Como se vio en el apartado anterior para la obtención del MDT se aplican algoritmos automatizados a un modelo ya existente, sin embargo se pueden obtener otros resultados operando 2 o más modelos entre sí, partiendo de que guardan en su estructura numérica valores correspondientes a la misma variable, elevaciones, que si bien es de elementos diferentes, especialmente comparten la

misma ubicación; por un lado tenemos el MDE que guarda las elevaciones de todos los elementos que se encuentran sobre la superficie que se está analizando y por el otro al MDT que guarda las elevaciones sólo del terreno natural (topografía); operando estos dos modelos mediante álgebra de mapas que es una herramienta de modelaje espacial que se aplica en este caso pixel por pixel de un modelo con otro según su ubicación espacial, tenemos que para obtener el Modelo Digital de Alturas (MDA) se aplica la siguiente operación:

$$\mathbf{MDA = MDE - MDT}$$

Obteniendo como resultado un modelo digital en donde todos los píxeles que guardaban el mismo valor de altura (altura sobre el nivel medio del mar) quedarán en cero y sólo quedarán con valor los píxeles en los cuales espacialmente se ubican elementos por sobre el terreno natural de la zona, esta operación sumándole edición manual para los fines del presente trabajo, que es obtener sólo las construcciones se explica en el siguiente capítulo. En Figura 22 se muestra un ejemplo de un MDA.



Figura 22. Modelo Digital de Alturas (INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014)

### 3.1.3. Modelo Digital de Volumen (MDV).

Partiendo de que en el MDA se guardan los valores de la altura sobre el terreno natural en cada pixel, se puede hacer una agrupación para obtener conjuntos de pixeles con el mismo valor de altura que en teoría se podría tratar del mismo objeto, (verificable con una imagen satelital, como se mostrará en el siguiente capítulo) y conociendo en tamaño del pixel en el MDA el cálculo del volumen de un objeto se puede expresar de la siguiente manera:

$$V = T_e * MDA$$

Donde,

V -> Volumen del objeto.

$T_p$  -> Tamaño de pixel (constante).

MDA -> Modelo Digital de Alturas.

## 4. Determinación de superficie, altura y volumen de construcción en edificios de la Ciudad de México.

Como se menciona en el capítulo 2 sección 2.3 el modelado es la etapa para la generación de productos finales y es en esta etapa del proceso donde se deben de llevar a cabo algunas tareas de clasificación.

### 4.1. Datos entrada y procesos

Datos	Fuente
Modelo Digital de Elevaciones LIDAR	Generado a partir de la nube de puntos levantada por INEGI entre noviembre y diciembre del 2007 con el sistema aerotransportado Leica ALS50-II
Imagen de satélite WorldView 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensor: WorldView 2</li> <li>• Fecha de toma: 13/06/2012</li> <li>• Hora de toma: 17:37 GMT-6</li> <li>• Imagen pancromática: 0.5m/px</li> <li>• Imagen multiespectral: 2.0m/px (R, G, B, Nir)</li> </ul>
Otros	Reglamento de construcciones del Distrito Federal Programa Delegacional de Desarrollo Urbano de la delegación Cuauhtémoc.

**Tabla 7. Datos de entrada**

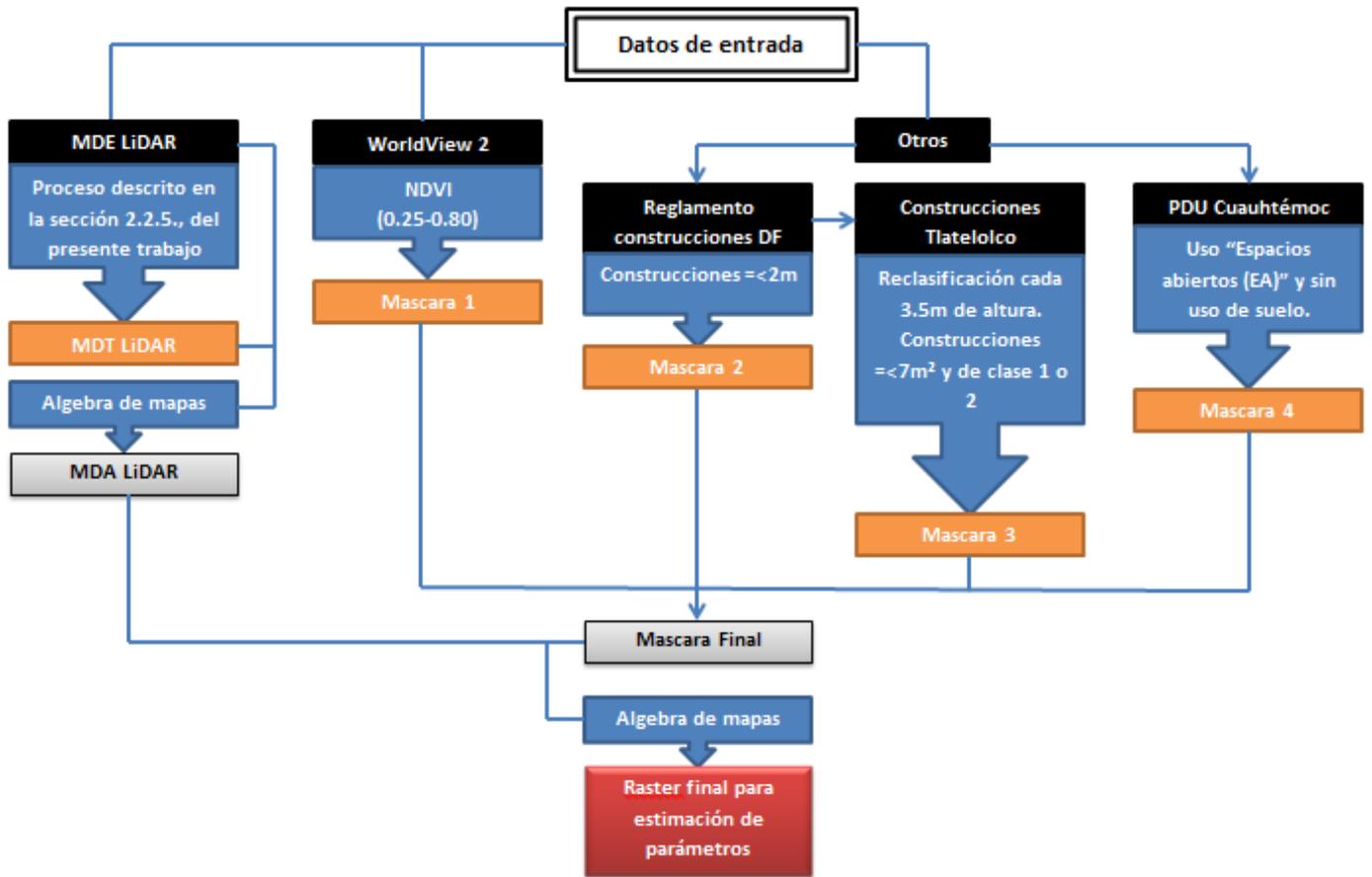


Figura 23. Diagrama de procesos

Con estos los dos modelos digitales MDE (Figura 24) y MDT (Figura 25) recortados al área de interés se puede empezar a realizar procesos dirigidos al objetivo particular del presente trabajo el cual es estimar las características de altura y volumen de los edificios en la zona de interés.

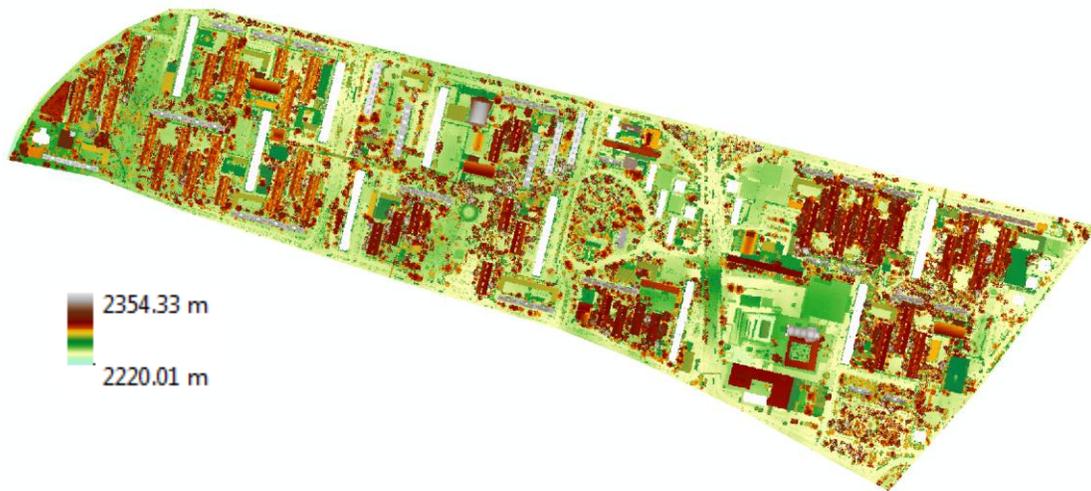


Figura 24. MDE

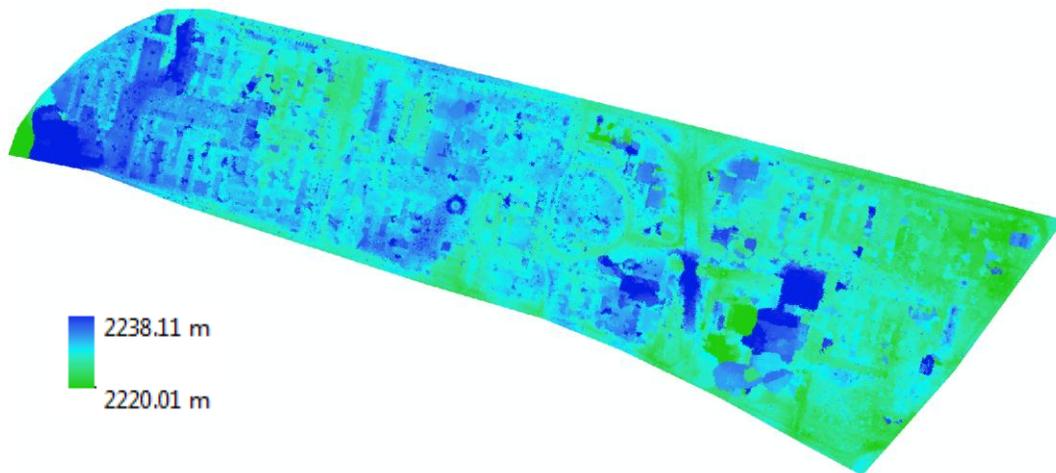
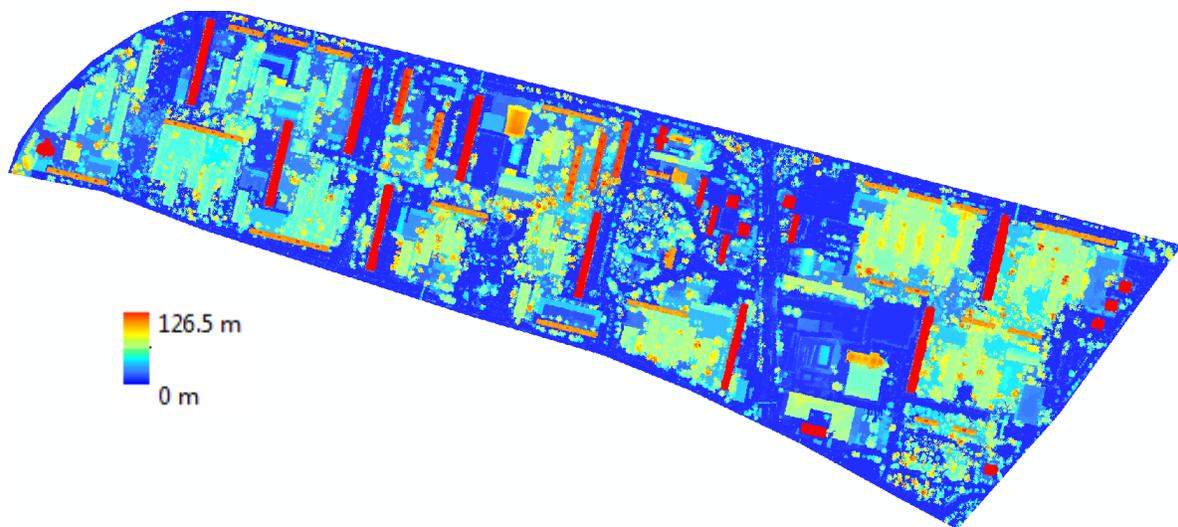


Figura 25. MDT

El primer paso a seguir es el del cálculo del MDA mediante álgebra de mapas que nos permite una operación matricial uno a uno de los valores de pixel basándose en la ubicación geográfica de cada uno de estos, entonces tenemos como datos de entrada al MDE y al MDT a los cuales se les aplica una resta aritmética como se explicó en la sección 3.1.2 del presente trabajo.

De esta operación resulta el MDA modelo en que las cotas (msnm) se transforman a alturas cuyo cero es el nivel de piso o terreno natural de la zona quedando en los valores de pixel las alturas físicas de todos los objetos que se encuentran por encima del terreno natural o nivel de piso (Figura 26).



**Figura 26. MDA**

Debido a que en el MDA tenemos las alturas de todos los elementos que están por encima del nivel de piso o terreno natural y sólo se requieren las que corresponden a edificios se realizaron clasificaciones para la generación de máscaras las cuales nos permiten depurar el MDA y obtener lo esperado.

## 4.2. Máscaras

### Máscara 1:

Con la finalidad de obtener sólo los elementos que como se comentó en el paso anterior correspondan a edificios, se presenta la problemática de vegetación alta que esté a la misma altura o por encima de dichos elementos, por lo que con la imagen de satélite WorldView 2, después de aplicarle un proceso de pansharpening<sup>1</sup> se procedió a calcular un NDVI (por sus siglas en inglés *Normalized Difference Vegetation Index*) el cual se utiliza para mejorar la discriminación de cubiertas vegetales, medir el vigor de las plantas y la producción de la biomasa (Toby N. Carlson, 1997). El peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permite determinar si la vegetación se encuentra sana o si tiene algún grado de estrés.

Los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético. La respuesta espectral que tiene la vegetación sana, muestra un claro contraste entre el espectro del visible, especialmente la banda roja, y el Infrarojo Cercano (IRC). Mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el IRC, las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía.

---

<sup>1</sup> Es una técnica que fusiona una imagen multispectral de baja resolución y una imagen pancromática de alta resolución, para obtener una imagen multispectral con la resolución y la calidad de la imagen pancromática preservando la información espectral.

En contraste, cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares por lo que la reflectividad disminuye el IRC y aumenta paralelamente en el rojo al tener menor absorción clorofílica. Esta diferencia en la respuesta espectral permite separar con relativa facilidad la vegetación sana de otras cubiertas.

El cálculo del NDVI produce una medida cuantitativa que está relacionada con las condiciones de la vegetación y su biomasa.

Los valores del NDVI van desde -1.0 hasta +1.0 en donde los valores más bajos, por ejemplo 0.1 o menores corresponden a zonas de roca estéril, arena o nieve; zonas con escasa vegetación tales como arbustos, praderas o cultivos deteriorados pueden dar lugar a valores de NDVI aproximadamente en el rango de 0.2 a 0.5 y los altos valores aproximadamente de 0.6 en adelante corresponden a la vegetación densa como la que se encuentra en bosques o cultivos en etapas de máximo crecimiento (USGS, 2015).

En la Figura 27 se muestra el resultado del cálculo del NDVI en la zona de estudio el cual arrojó un rango de -0.17 a 0.80.



Figura 27. NDVI en la zona de interés

Para este caso en particular se decidió hacer la máscara reclasificando el raster generado con el cálculo del NDVI en el rango de valores que van del 0.25 al más alto en la escala que en este caso es 0.80 para con esto poder discriminar la vegetación presente en la zona de estudio, Figura 28.

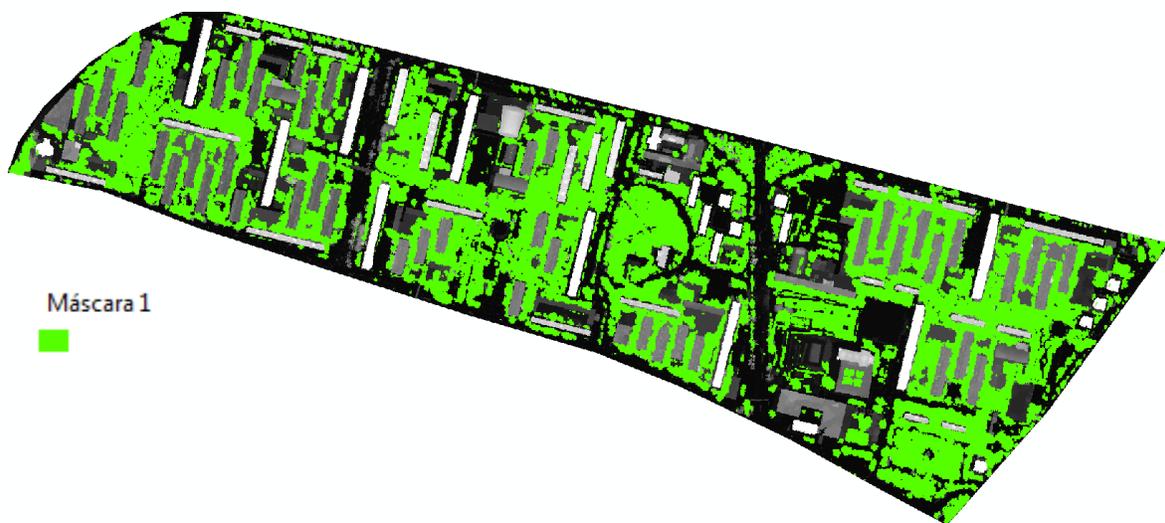


Figura 28. Máscara 1, rango del NDVI de 0.25-0.80.

Debido a que en la geomática no se tienen que tomar en cuenta sólo las variables obtenidas por medio de disciplinas propias de la misma geomática como percepción remota, fotogrametría, etc. que son de naturaleza espacial sino que también son de gran relevancia y utilidad los datos no espaciales de diversas fuentes como las establecidas en documentaciones legales y/o oficiales que si bien, algunas, no tienen una naturaleza espacial como tal se pueden llevar al análisis geográfico con el uso correcto de las diferentes herramientas; es que se decidió tomar en cuenta documentación gráfica y escrita de diferentes fuentes para continuar con la generación de las máscaras.

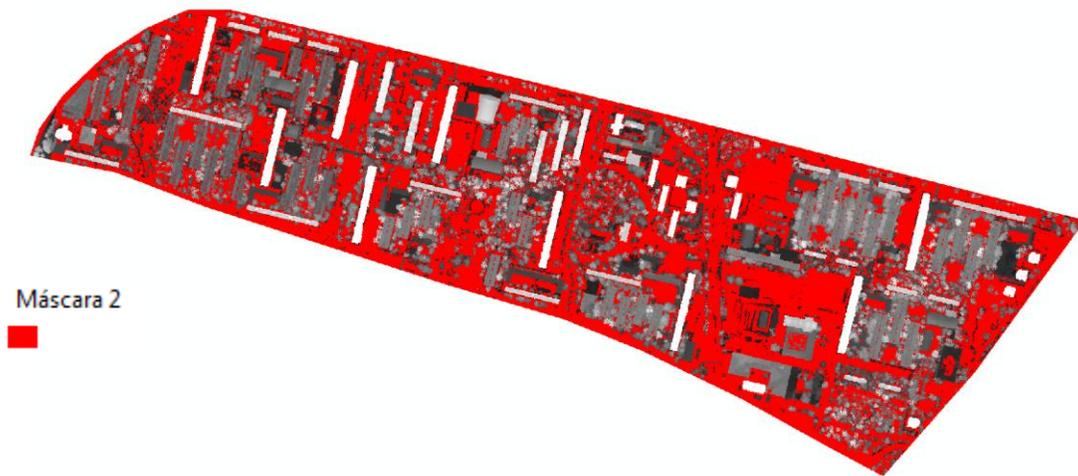
### **Máscara 2:**

El Reglamento de construcciones para el Distrito Federal en su artículo 99 establece que:

*Las circulaciones horizontales, como corredores, pasillos y túneles deberán cumplir con una altura mínima de 2.10 m. y con una anchura adicional no menor de 0.60 m. por cada 100 usuarios o fracción, ni menor de los valores mínimos que establezcan las Normas Técnicas Complementarias para cada tipo de edificación.*

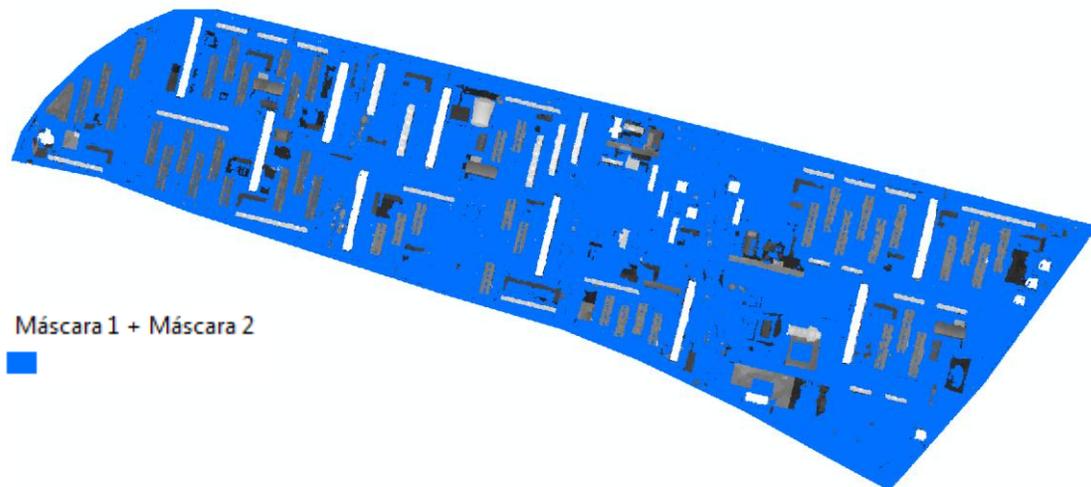
Debido a lo anterior y como ya se ha venido diciendo en el presente trabajo de tesis se busca determinar los edificios se decidió crear una reclasificación del MDA para obtener una máscara en la cual sólo se incluyan los pixeles cuya altura

sea menor o igual a un valor redondeado de 2 metros (Figura 29) y así depurar del MDA cualquier objeto de los que establece el artículo citado y adicionales como bancas, banquetas, personas, etc. que tengan una altura igual o menor a 2 metros.



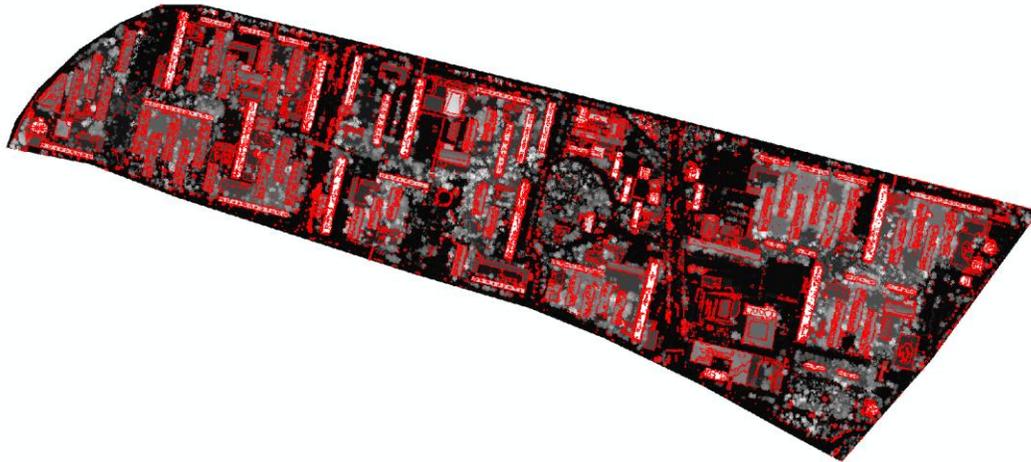
**Figura 29. Mascara 2, Alturas menores o iguales a 2m.**

Al haber reclasificado los raster anteriores de valores continuos a valores discretos, se tiene la posibilidad de convertir estos a vectores, mediante una conversión Raster-Polígono y así poder jugar con las características que da la información vectorial, siendo una de estas el poder unir 2 o más capas espacialmente más fácil que con 2 o más raster y la posibilidad de disolver geometrías pequeñas que se encuentran dentro de las más grandes para obtener un solo bloque en forma de vector, en la Figura 30 se muestra la unión espacial de las máscaras 1 y 2.



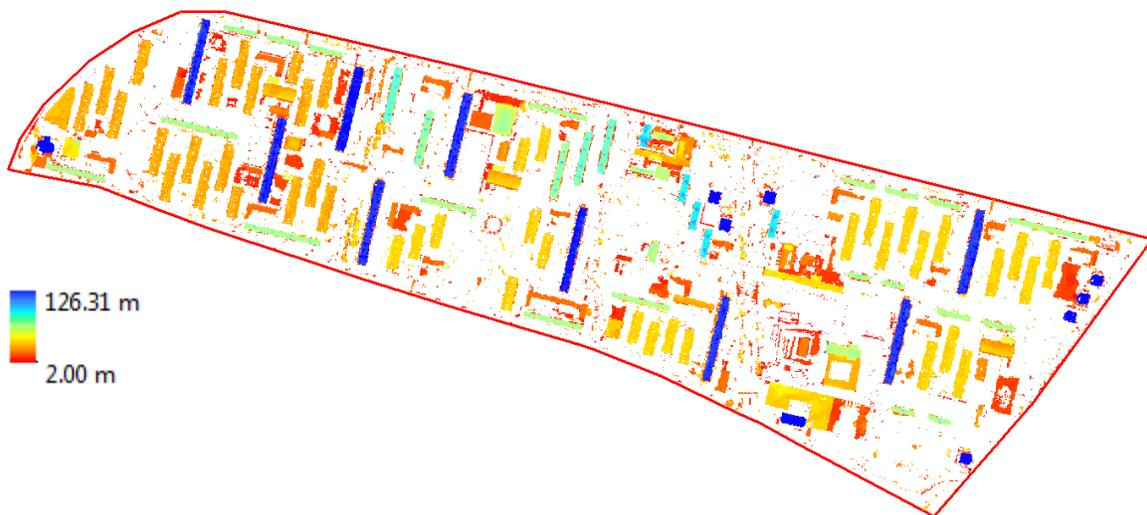
**Figura 30. Máscara 1 + Máscara 2**

Una vez teniendo un solo bloque como máscara principal, lo que se busca es eliminar todos los píxeles del MDA que se encuentren dentro de este, debido a que la máscara es información vectorial y el MDA un raster, no se puede restar directamente la cobertura espacial de la máscara, sin embargo la operación que si se puede hacer entre Raster-Vector es la extracción de píxeles por máscara, es decir, que la operación extrae del raster todos los píxeles que se encuentren dentro de esta para lo que hacemos una “Máscara inversa” a la obtenida en el paso anterior restándole espacialmente nuestro bloque al polígono de nuestra zona de interés (Figura 31) para con esta poder extraer los valores de píxel que se encuentran en los “espacios en blanco” de nuestra máscara original.



**Figura 31. Máscara inversa.**

En la Figura 32 se muestra el raster extraído con la máscara inversa para con esto tener un primer nivel de depuración para nuestro modelado.



**Figura 32. Primer nivel de depuración**

Siguiendo la línea de utilizar documentaciones legales y/o oficiales se continúa con un segundo nivel de depuración para eliminar los elementos que no

corresponden a edificios y que no fueron eliminados en el primer nivel de depuración.

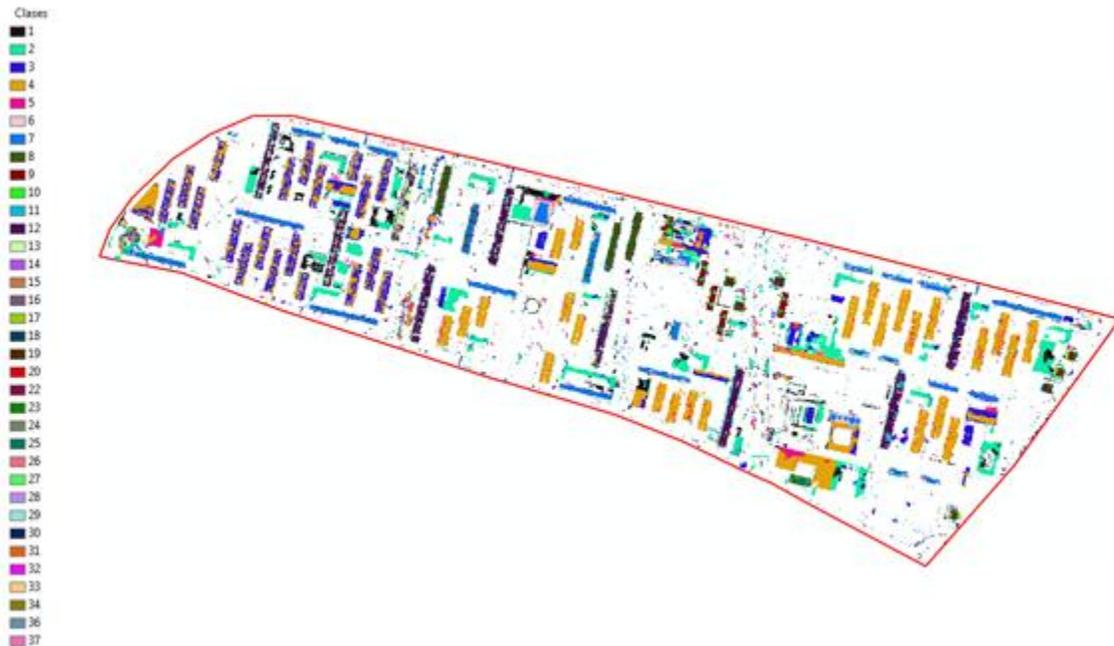
### **Máscara 3:**

Partiendo de que en Tlatelolco la altura promedio de los niveles en sus edificios es de 3.5 metros se reclasificó el raster de la Figura 32 a cada 3.5 metros para pasar de un raster continuo con un rango de alturas que van de 2.00m a 126.31m a un raster discreto con un total de 37 clases (Figura 33) divididas de la siguiente manera:

<b>Rango (m)</b>		<b>Clase</b>
<b>2.00</b>	3.50	1
<b>3.50</b>	7.00	2
<b>7.00</b>	10.50	3
<b>10.50</b>	14.00	4
<b>14.00</b>	17.50	5
<b>17.50</b>	21.00	6
<b>21.00</b>	24.50	7
<b>24.50</b>	28.00	8
<b>28.00</b>	31.50	9
<b>31.50</b>	35.00	10
<b>35.00</b>	38.50	11
<b>38.50</b>	42.00	12
<b>42.00</b>	45.50	13
<b>45.50</b>	49.00	14
<b>49.00</b>	52.50	15
<b>52.50</b>	56.00	16
<b>56.00</b>	59.50	17
<b>59.50</b>	63.00	18
<b>63.00</b>	66.50	19
<b>66.50</b>	70.00	20
<b>70.00</b>	73.50	21
<b>73.50</b>	77.00	22
<b>77.00</b>	80.50	23
<b>80.50</b>	84.00	24

<b>84.00</b>	87.50	25
<b>87.50</b>	91.00	26
<b>91.00</b>	94.50	27
<b>94.50</b>	98.00	28
<b>98.00</b>	101.50	29
<b>101.50</b>	105.00	30
<b>105.00</b>	108.50	31
<b>108.50</b>	112.00	32
<b>112.00</b>	115.50	33
<b>115.50</b>	119.00	34
<b>119.00</b>	122.50	35
<b>122.50</b>	126.00	36
<b>126.00</b>	126.31	37

**Tabla 8. Rangos de alturas para clasificación**



**Figura 33. Raster discreto con 37 clases.**

Una vez teniendo este raster discreto se transforma a vector para poder realizar análisis con respecto a las superficies de los polígonos generados que además guardan como atributo la clase que les corresponde derivado de la

reclasificación anterior, una vez teniendo el vector mencionado, se clasifican polígonos que cumplan con las siguientes características

- Menores a una superficie de 7.00m<sup>2</sup> ya que ningún alojamiento podría ser menor a estas dimensiones de acuerdo a lo establecido en el Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, Sección B. Requerimientos mínimos de habitabilidad y funcionamiento, Tabla 9.

#### B.- REQUERIMIENTOS MINIMOS DE HABITABILIDAD Y FUNCIONAMIENTO

Tipología Local	Dimensiones Area o Indice	Libres Lado (metros)	Mínimas Altura (metros)	Observaciones
<b>I. HABITACION</b>				
<b>Locales habitables:</b>				
Recámara única o principal	7.00 m <sup>2</sup>	2.40	2.30	
Recámaras adicionales y alcoba	6.00 m <sup>2</sup>	2.00	2.30	
Estancias	7.30 m <sup>2</sup>	2.60	2.30	
Comedores	6.30 m <sup>2</sup>	2.40	2.30	
Estancia-comedores (integrados)	13.60 m <sup>2</sup>	2.60	2.30	
<b>Locales complementarios:</b>				
Cocina	3.00 m <sup>2</sup>	1.50	2.30	
Cocineta integrada a estancia-comedor	_____	2.00	2.30	a)
cuarto de lavado	1.68 m <sup>2</sup>	1.40	2.10	
cuartos de aseo, despensas y similares	_____	_____	2.10	
Baños y sanitarios	_____	_____	2.10	(b)

Tabla 9. Sección B, Reglamento de construcciones para el D.F.

- Que correspondan a las clases 1 o 2, ya que de lo contrario podría tratarse de elementos en los techos de las construcciones altas tales

como cuartos de servicio que corresponden al mismo elemento y que son necesarios para el objetivo final del presente trabajo de tesis.

El resultado de la clasificación de los polígonos descritos en los puntos anteriores más la máscara 1 más la máscara 2 se muestra en la Figura 34.



Figura 34. Máscara 1 + Máscara 2 + Máscara 3

#### Máscara 4:

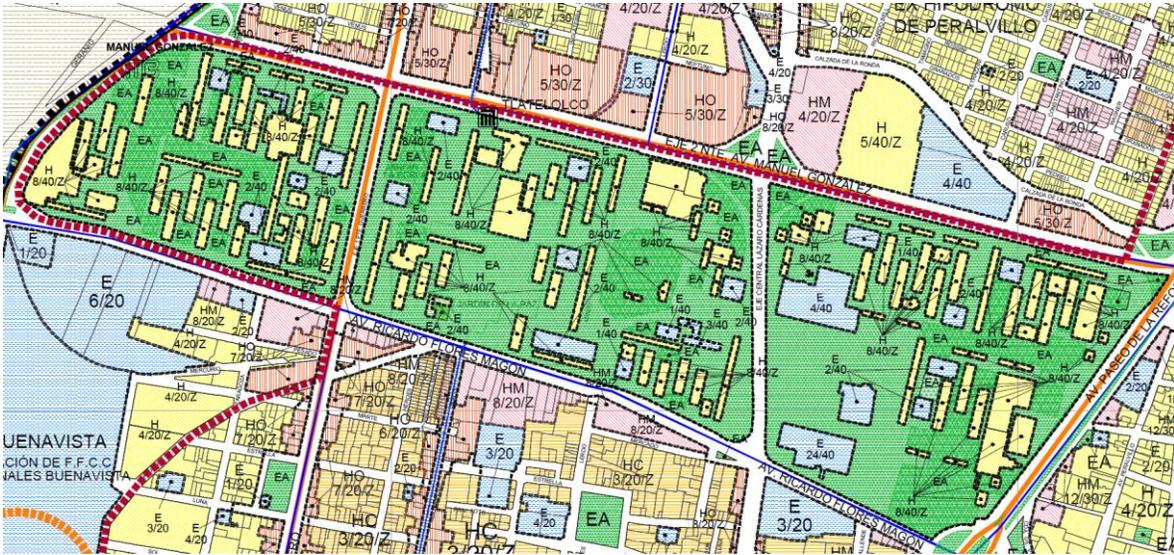
Toda zona geográfica en el país debe de tener un ordenamiento que regule las actividades en dicha zona, para nuestra área de interés el ordenamiento aplicable es el denominado **Programa Delegacional de Desarrollo Urbano de Cuauhtémoc**, instrumento que permite la vinculación de los objetivos y estrategias de los diferentes niveles de planeación con la intención de lograr el desarrollo equilibrado de los procesos urbanos, orientando la planeación y el ordenamiento territorial hacia una mejor calidad de vida para la población, conservación y



- **Habitacional (H):** En esta zonificación se permite la vivienda unifamiliar y plurifamiliar y se propone conservar las características habitacionales en barrios y colonias sin usos que puedan alterar su vocación netamente habitacional. Este uso se propone en aproximadamente 480.1 ha que representan el 14.8% de la superficie total de la Delegación.

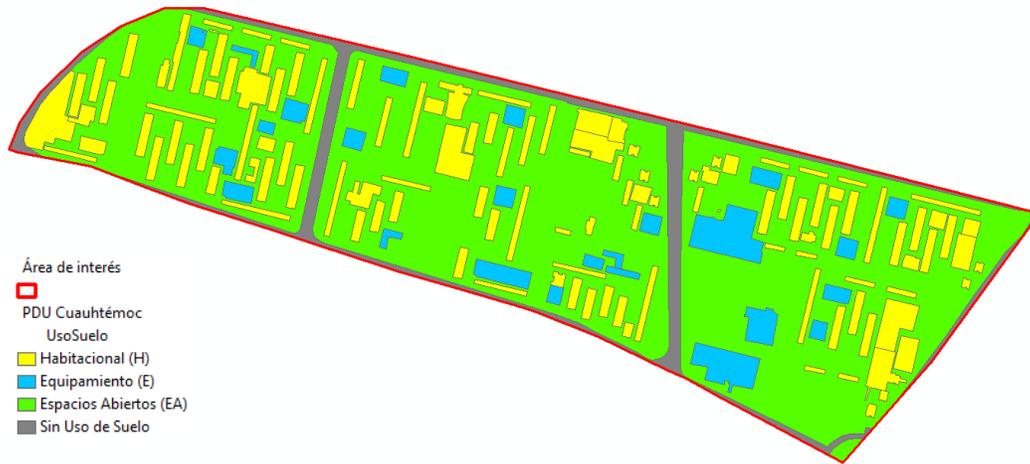
- **Equipamiento (E):** En ésta zonificación se incluyen inmuebles públicos y/o privados que prestan un servicio a la población en materia de educación, salud, cultura, abasto, recreación, servicios urbanos y administración y baldíos propiedad del Gobierno del Distrito Federal que están destinados a facilitar la cobertura de los servicios ya instalados. Este uso se propone en 178.4 ha, es decir, el 5.5% de la superficie total de la demarcación.

- **Espacios abiertos (EA):** En esta zonificación se incluyen parques, jardines y plazas públicas, con o sin juegos infantiles, instalaciones deportivas y áreas ajardinadas en vialidades, es decir, en los camellones ubicados en toda la demarcación, cuenta con una superficie de 94.3 ha que representan el 2.90% de la superficie delegacional.



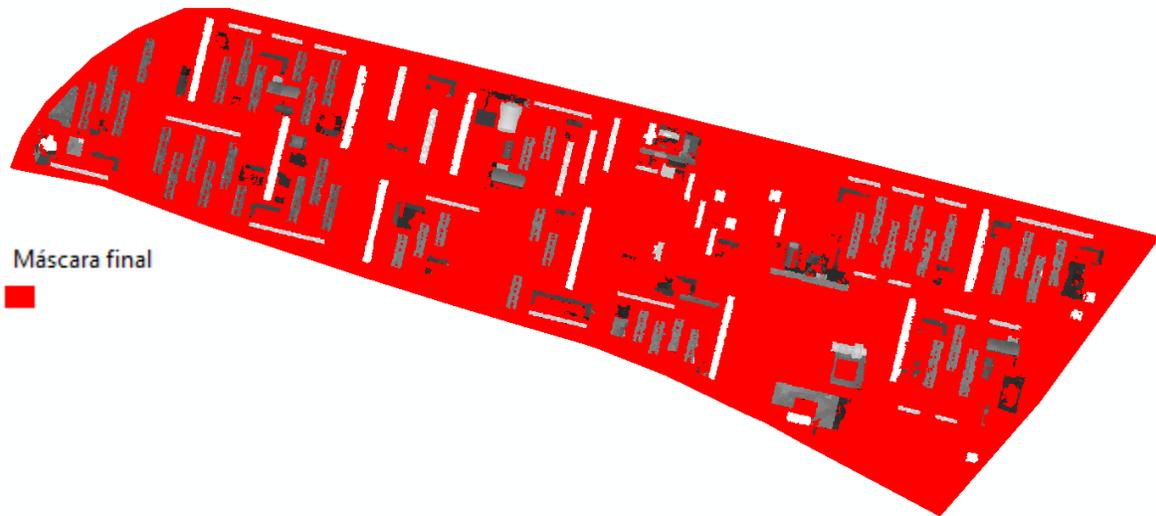
**Figura 36. Zona de interés en el Ordenamiento**

Los polígonos de los usos de suelo en nuestra zona de interés que se observan en la Figura 36 nos servirán como una última máscara para poder depurar todos los elementos que no se han eliminado con las otras máscaras debido a que por su naturaleza no han sido clasificados con estas como puentes, automóviles, carpas, etc. para lo que se procedió a georreferenciar la Figura 36 para vectorizar los polígonos de los usos de suelo en la zona de interés, incluyendo las zonas “en blanco” que no tengan un uso de suelo definido pero que se encuentren dentro de nuestra zona de interés tales como calles o avenidas, Figura 37.



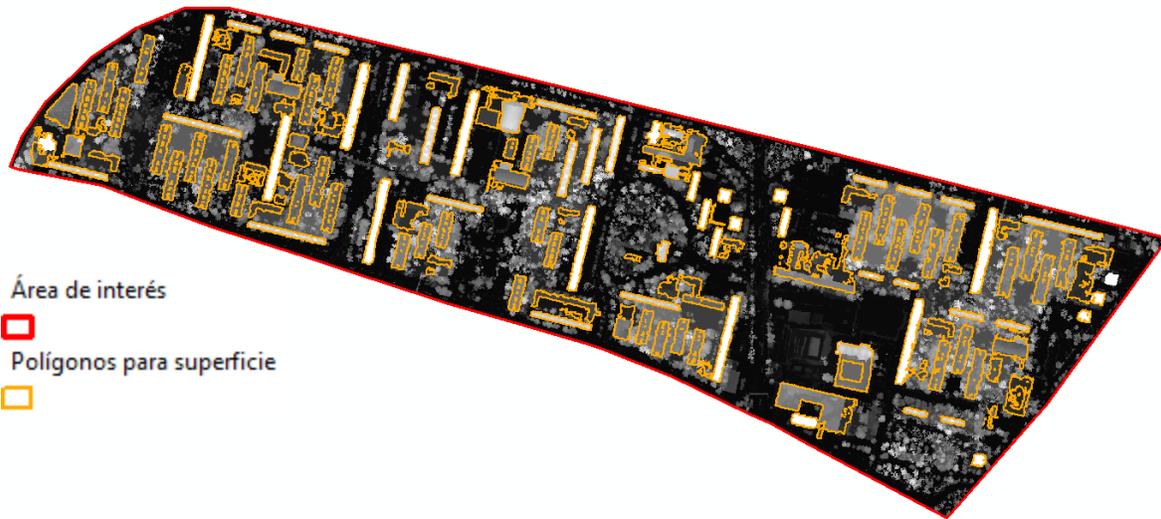
**Figura 37. Usos de suelo vectorizados**

Una vez teniendo estos polígonos vectorizados, la máscara 4 será la cobertura del uso de suelo “Espacios Abiertos (EA)” y las zonas sin uso de suelo, pero para esta última depuración no se va a eliminar todos los elementos que se encuentren en contacto con estas coberturas ya que debido a la forma pixelada del resultado obtenido de la depuración con la máscara compuesta en la Figura 34 podrían estar en contacto elementos que formen parte de edificios, así que para esta depuración se van a eliminar los elementos que estén en contacto con los usos de suelo “Espacios Abiertos (EA)” y zonas sin uso de suelo si y sólo si estos no se encuentran en contacto también con los usos “Habitacional (H)” y “Equipamiento (E)”, el resultado de esta máscara 4 unida con la máscara compuesta por las máscaras 1, 2 y 3 da como resultado la máscara final que se usará para extraer del MDA los píxeles que corresponden sólo a los edificios en nuestra zona de interés, Figura 38.



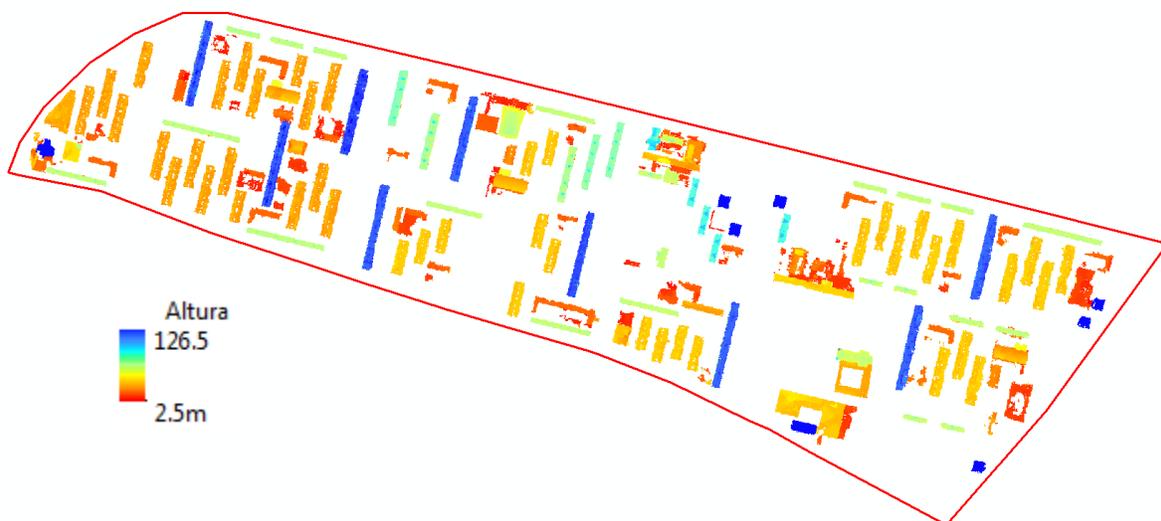
**Figura 38. Máscara final**

Tal como lo dice el título del presente capítulo el objetivo es obtener la altura y volumen de los edificios delimitados en el paso anterior con la máscara final, la altura se puede obtener directo del MDA –se explicará detalladamente más adelante- pero para obtener el volumen necesitamos un paso intermedio que es el de obtener la superficie de los edificios obtenidos con nuestra máscara 4, para esto, se obtiene un vector inverso al de la máscara final para con esta calcular la superficie de cada edificio clasificado con los procesos anteriores, Figura 39.



**Figura 39. Polígonos para el cálculo de las superficies de los edificios**

Para la altura se obtiene un nuevo MDA, extrayéndolo del original con los polígonos mostrados en la figura anterior, con esto tendremos un modelo sólo con los pixeles que corresponden a edificios y que además tienen como valor la altura sobre el nivel del piso de la zona de interés, Figura 40.



**Figura 40. MDA sólo para edificios**

Para el cálculo del volumen se “cubicó” el MDA mostrado en la figura anterior, reclasificando sus alturas a cada metro y como el tamaño del pixel es igual de 1 metro en X y 1 metro en Y es como si se estuvieran dividiendo los edificios en cubos unitarios para hacer más fácil el cálculo de su volumen para el cual sólo se aplica la siguiente ecuación, la cual es muy parecida pero ya más desarrollada que la mostrada en el capítulo 3, sección 6:

$$V = \left[ \sum_i Np_i \right] * \nabla_i + \left[ \sum_j Np_j \right] * \nabla_j + \dots + \left[ \sum_n Np_n \right] * \nabla_n$$

Donde:

$V \rightarrow$  Volumen del edificio.

$Np \rightarrow$  Número de pixeles.

$\nabla \rightarrow$  Valor de la clase en metros.

$i, j, \dots, n \rightarrow$  Clase o clases que se ubiquen dentro de un mismo edificio.

## 5. Validación de resultados.

Debido a la gran cantidad de edificios en la zona de estudio en este capítulo se validará sólo para ciertos edificios la metodología del cálculo de superficie, altura y volumen que se planteó en el capítulo anterior, comparándola con el levantamiento en campo de las mismas características físicas.

### 5.1 Determinación de sitios para la validación.

Para darle una significancia estadística a la validación a realizar, se eligió utilizar un método de muestreo aleatorio simple con el caso en el que se conoce el tamaño de la población para el cual se aplica la siguiente formula

$$n = \frac{Z^2 pqN}{NE^2 + Z^2 pq}$$

Donde

$n$  es el tamaño de la muestra..... ?

$Z$  es el nivel de confianza..... 90% -> 1.645

$p$  es la variabilidad positiva..... 0.5

$q$  es la variabilidad negativa..... 0.5

$N$  es el tamaño de la población... 150

$E$  es la precisión o el error permitido..... 10%

Sustituyendo los valores elegidos tenemos lo siguiente:

$$n = \frac{(1.645)^2 * 0.5 * 0.5 * 150}{150 * (0.1)^2 + (1.645)^2 * 0.5 * 0.5} \approx 47 \rightarrow \text{Número de edificios a muestrear}$$

Estos 47 edificios resultantes de aplicar la fórmula del muestreo aleatorio simple se eligieron sobre el MDA aleatoriamente buscando tener edificios en toda el área de interés, Figura 41.

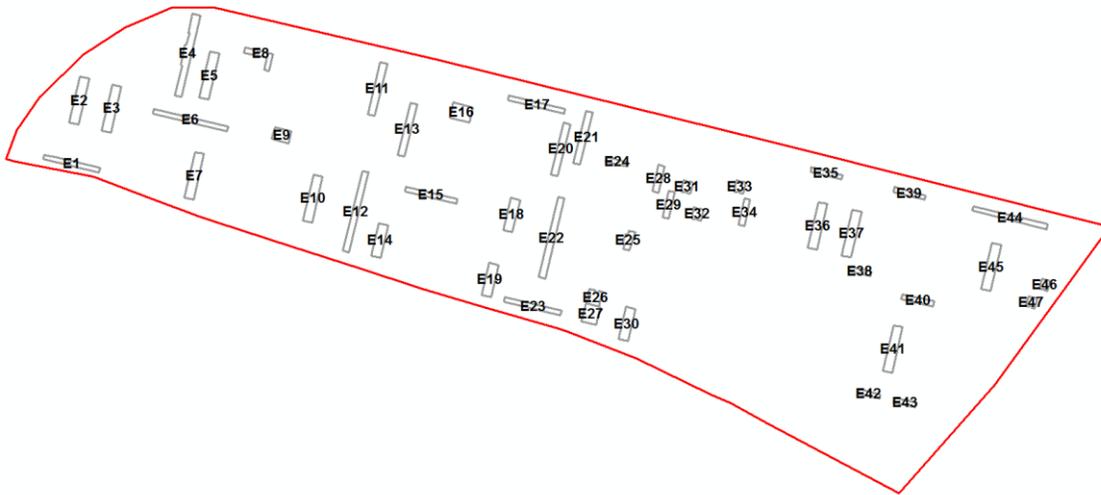


Figura 41. Edificios elegidos para validación en campo

## 5.2. Trabajo de campo y obtención de resultados.

El trabajo de campo se llevó a cabo para medir físicamente sólo las alturas de los edificios elegidos para el muestreo, ya que como se ha mencionado la superficie que se va a tomar como real para el presente trabajo es la mostrada en el PDU de Cuauhtémoc y el volumen será calculado; las mediciones se realizaron con un equipo TruPulse 360 R, Tabla 10.

<b>TruPulse 360 R</b>

<b>Medición de azimút con tecnología TruVector 360° Compass</b>
<b>Cálculo de Distancia horizontal, vertical, desnivel e inclinación entre 2 puntos</b>
<b>30cm de precisión en distancias</b>
<b>0.25° de precisión en inclinaciones</b>
<b>1° de precisión en azimuts</b>
<b>Rango máximo de medida 1000m</b>

**Tabla 10. Especificaciones TruPulse 360 R**

La metodología para tomar las mediciones es, ubicarse en frente del edificio a muestrear en una posición que permita ver su base y su parte más alta, con el aparato se visa la parte baja del edificio y se hace el primer “disparo” inmediatamente se voltea para visar la parte alta y se realiza un segundo disparo, después de unos segundos el algoritmo del aparato calcula la altura y la despliega en su display, se toman las coordenadas UTM del punto desde donde se hace la visual, los datos se anotan en el formato de campo y se continua con el siguiente edificio.

Edificios	Altura	X	Y
E1	22	48 47 75	21 51 087
E2	10.5	48 42 59	21 51 248
E3	10.5	48 45 55	21 51 208
E4	47.62.1.1	48 45 72	21 51 332
E5	10.5	48 44 97	21 51 332
E6	21.5	48 44 32	21 51 226
E7	10.5	48 49 08	21 51 240
E8	6.8	48 46 06	21 51 303
E9	8	48 46 40	21 51 138
E10	10.5	48 46 94	21 51 078
E11	25.5	48 47 81	21 51 165
E12	4.2	48 47 92	21 51 065
E13	25.5	48 48 19	21 51 487
E14	13	48 48 37	21 51 473
E15	2.2	48 48 33	21 51 013
E16	0	48 48 33	21 51 107
E17	21.5-22	48 49 64	21 51 119
E18	12	48 50 37	21 51 653
E19	12.8	48 50 18	21 50 908
E20	2.5	48 51 54	21 50 941
E21	2.5	48 51 66	21 50 920
E22	40.5	48 51 54	21 50 941
E23	2.2	48 51 62	21 50 866
E24	2.2	48 51 66	21 50 920
E25	2.1	48 52 09	21 50 897
E26	3	48 53 96	21 50 821
E27	9.5	48 53 96	21 50 821
E28	29	48 52 49	21 50 944
E29	29	48 52 49	21 50 944
E30	12.5	48 53 69	21 50 881
E31	5.8	48 53 19	21 50 893
E32	5.8	48 53 19	21 50 893
E33	5.8		
E34	29	48 54 14	21 50 897
E35	2.2	48 55 57	21 50 973
E36	12.5	48 55 57	21 50 973
E37	12.5	48 56 51	21 50 944
E38	21.5	48 57 43	21 50 744
E39	2.2	48 58 25	21 50 830
E40	2.2	48 58 31	21 50 848
E41	13	48 58 29	21 50 748
E42	21.5-3	48 58 06	21 50 646
E43	21.5-3	48 58 06	21 50 646
E44	21.5	48 57 29	21 50 474
E45	12.5	48 60 63	21 50 842

Figura 42. Formato de campo lleno

En base a las coordenadas tomadas en campo y con ayuda de un SIG, se pusieron los puntos de toma de datos sobre los edificios en el MDA

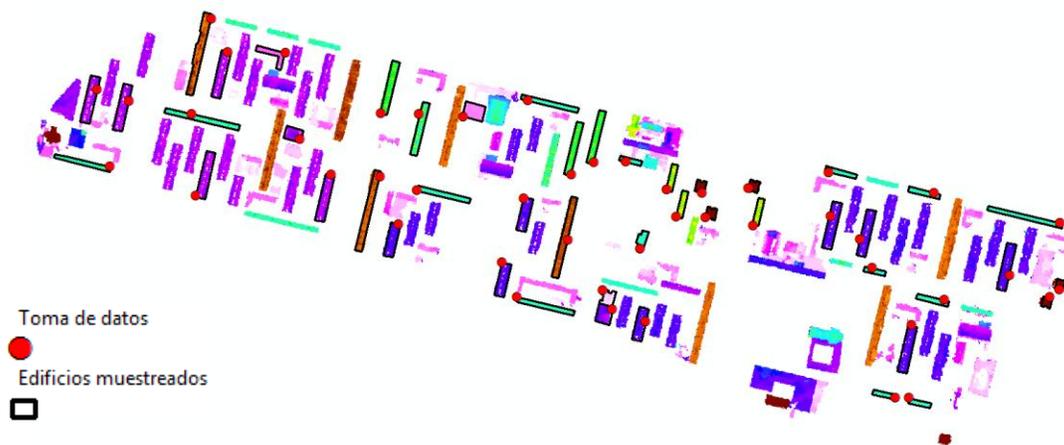


Figura 43. Puntos de toma de datos, sobre el MDA

Una vez en gabinete se digitalizaron los datos y se acomodaron en tablas por variable.

- **Alturas:** En la misma tabla las medidas en campo y las obtenidas del MDA.

Nombre	Altura campo	Altura MDA
	m	m
E1	22.000	22.800
E2	10.500	10.460
E3	10.500	10.270
E4	40.500	40.360
E5	10.500	10.810
E6	21.500	21.800
E7	10.500	10.710
E8	7.000	7.030
E9	8.000	8.210
E10	10.500	10.670
E11	25.500	25.610
E12	42.000	42.370
E13	25.500	25.570
E14	13.000	13.080
E15	22.000	22.600
E16	6.000	6.040
E17	21.500	21.400
E18	12.000	11.920
E19	12.800	12.730
E20	25.000	25.170
E21	25.000	25.150
E22	40.500	40.500
E23	22.000	22.540
E24	22.000	21.960
E25	21.000	21.300
E26	3.000	2.920
E27	9.500	9.410
E28	29.000	28.710
E29	29.000	28.790
E30	12.500	12.480
E31	58.000	58.620
E32	58.000	58.110
E33	58.000	58.060
E34	29.000	28.940
E35	22.000	22.330
E36	12.500	12.650
E37	12.500	12.330
E38	21.500	21.770
E39	22.000	22.480
E40	22.000	21.860
E41	13.000	13.090
E42	21.500	20.860
E43	21.500	22.380
E44	21.500	22.460
E45	12.500	12.710
E46	58.000	58.650
E47	58.000	58.620

**Tabla 11. Alturas para validación**

- **Superficies:** Datos obtenidos del PDU Cuauhtémoc y de las “huellas” del MDA.

Nombre	Superficie PDU	Superficie MDA
	Área m <sup>2</sup>	Área m <sup>2</sup>
E1	1,035.625	1,125.405
E2	1,696.299	1,614.146
E3	1,696.299	1,688.108
E4	2,337.589	2,616.616
E5	1,696.299	1,582.164
E6	1,454.287	1,474.221
E7	1,696.299	1,626.141
E8	848.456	883.534
E9	816.848	831.560
E10	1,696.299	1,768.065
E11	1,434.570	1,690.107
E12	1,999.118	2,541.658
E13	1,434.570	1,636.136
E14	1,217.870	1,330.297
E15	1,006.118	1,032.455
E16	1,214.632	1,185.373
E17	1,090.267	1,090.424
E18	1,217.870	1,253.338
E19	1,217.870	1,250.341
E20	1,434.570	1,413.253
E21	1,434.570	1,415.252
E22	1,999.118	2,458.701
E23	1,090.267	1,107.415
E24	400.942	417.779
E25	566.792	599.683
E26	673.702	602.682
E27	1,049.721	1,030.456
E28	628.832	658.652
E29	628.832	680.640
E30	1,217.870	1,275.324
E31	400.509	485.744
E32	400.509	476.749
E33	400.509	509.731
E34	628.832	737.610
E35	587.753	615.675
E36	1,696.299	1,661.122
E37	1,696.299	1,629.139
E38	398.011	416.780
E39	587.753	628.669
E40	655.173	690.635
E41	1,696.299	1,825.037
E42	398.011	434.770
E43	398.011	414.781
E44	1,370.076	1,526.193
E45	1,696.299	1,825.037
E46	324.301	314.834
E47	324.301	428.774

**Tabla 12. Superficies para validación**

- **Volúmenes:** El cálculo del volumen estimado es como se describe en la última sección del capítulo anterior y para el cálculo del valor del volumen que en este caso se tomará como real va a ser combinando los valores de superficie tomados del PDU de Cuauhtémoc y los datos de altura obtenidos en campo considerando como un prisma regular a cada edificio teniendo como base inferior el polígono que forma su superficie y como base superior la misma a la altura tomada en campo, Figura 44.

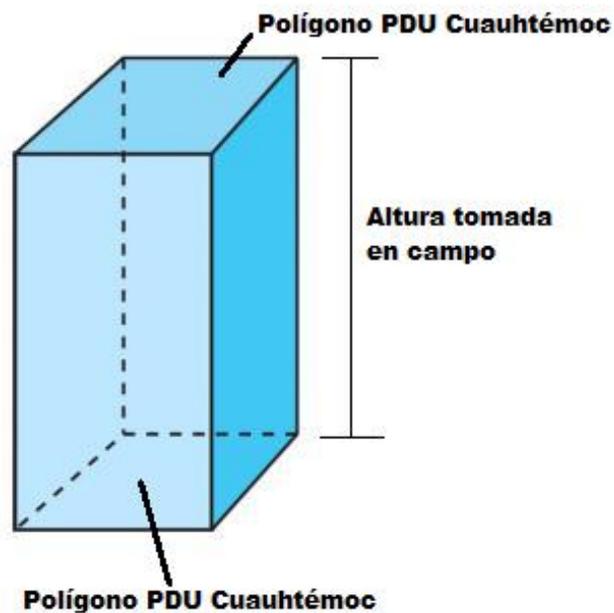


Figura 44. Cálculo del volumen que se toma como real

Nombre	Volumen "Real"	Volumen estimado
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
E1	22,783.740	25,659.245
E2	17,811.137	16,883.963
E3	17,811.137	17,336.870
E4	94,672.346	105,606.641
E5	17,811.137	17,103.194
E6	31,267.174	32,138.014
E7	17,811.137	17,415.967
E8	5,939.192	6,211.243
E9	6,534.780	6,827.111
E10	17,811.137	18,865.250
E11	36,581.527	43,283.641
E12	83,962.945	107,690.065
E13	36,581.527	41,835.995
E14	15,832.315	17,400.291
E15	22,134.587	23,333.476
E16	7,287.792	7,159.653
E17	23,440.746	23,335.069
E18	14,614.445	14,939.794
E19	15,588.741	15,916.838
E20	35,864.242	35,571.591
E21	35,864.242	35,593.595
E22	80,964.269	99,577.406
E23	23,985.880	24,961.140
E24	8,820.717	9,174.436
E25	11,902.641	12,773.238
E26	2,021.106	1,759.832
E27	9,972.345	9,696.595
E28	18,236.125	18,909.906
E29	18,236.125	19,595.615
E30	15,223.380	15,916.050
E31	23,229.513	28,474.292
E32	23,229.513	27,703.863
E33	23,229.513	29,594.978
E34	18,236.125	21,346.435
E35	12,930.570	13,748.030
E36	21,203.734	21,013.192
E37	21,203.734	20,087.279
E38	8,557.242	9,073.303
E39	12,930.570	14,132.473
E40	14,413.811	15,097.287
E41	22,051.884	23,889.735
E42	8,557.242	9,069.309
E43	8,557.242	9,282.799
E44	29,456.630	34,278.302
E45	21,203.734	23,196.221
E46	18,809.484	18,464.992
E47	18,809.484	25,134.710

**Tabla 13. Volúmenes para validación**

### 5.3. Evaluación de resultados.

Para dar un valor estadístico a la precisión obtenida en el presente trabajo de tesis se eligieron los siguientes métodos para las diferentes variables a analizar:

- **Error medio cuadrático:** En estadística, el error medio cuadrático (EMC) es una forma de evaluar la diferencia entre un estimador y el valor real de la cantidad que se quiere calcular. El EMC mide el promedio del cuadrado del "error", siendo el error el valor en la que el estimador difiere de la cantidad a ser estimada. Esta dado por:

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (A_i - B_i)^2}{N}}$$

en donde:

$A_i$ : Es el valor real para cada elemento de la muestra.

$B_i$ : Es el valor estimado para cada elemento de la muestra.

$N$ : Es el tamaño de la muestra.

- **Diagramas de dispersión:** Un diagrama de dispersión es una herramienta que representa gráficamente la relación entre dos variables. En este caso es de la misma variable pero una medida y la otra estimada, lo que permite visualizar de manera más sencilla la interpretación de su relación. El resultado será un montón de puntos "dispersos" alrededor del plano; si la tendencia general es que los puntos suban a la derecha de la gráfica, entonces decimos que hay una correlación positiva entre las dos

variables medidas, si los puntos caen a la izquierda de la gráfica, decimos que hay una correlación negativa y si no hay tendencia general, entonces no hay correlación.

### 5.3.1. Validación de alturas.

Para la validación de alturas se utilizaron los datos ya descritos y que se muestran en la Tabla 11.

- **Error medio cuadrático.**

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (A_i - B_i)^2}{N}} \rightarrow EMC = \sqrt{\frac{5.991}{47}} \rightarrow EMC = 0.357$$

- **Gráfica de dispersión.**

En la gráfica de dispersión se observa que el rango en el que las alturas obtenidas del MDA se ajustan más a las medidas en campo es en los valores más bajos de la recta que van de 3 a 13, después tiene una leve dispersión en los valores de entre 21 y 23 para después ajustar con buena precisión una vez más en el rango de 25 a 58.

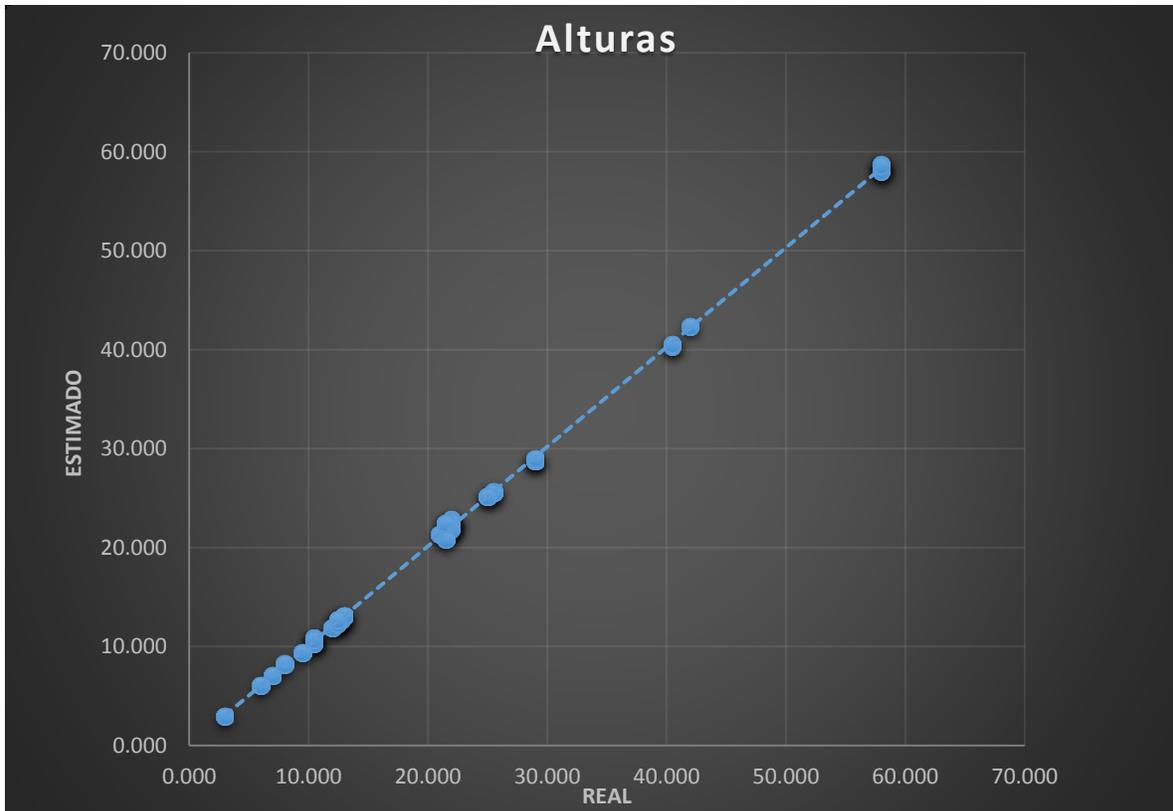


Figura 45. Gráfica de dispersión, alturas

### 5.3.2. Validación de Superficies.

Como ya se mencionó la validación para la superficie es el único que no se comparará con datos obtenidos en campo ya que para esta se eligió utilizar la capa vectorial derivada de la vectorización del Programa Delegacional de Desarrollo Urbano en Cuauhtémoc, mostrado en la Figura 14 del capítulo 4 y de la cual se muestran en la Figura 46 los polígonos correspondientes a los edificios elegidos. Se decidió utilizar esta capa ya que al estar en un ordenamiento urbano del Gobierno de la Ciudad de México son las que la ley considera como superficies oficiales de los edificios ahí mostrados.



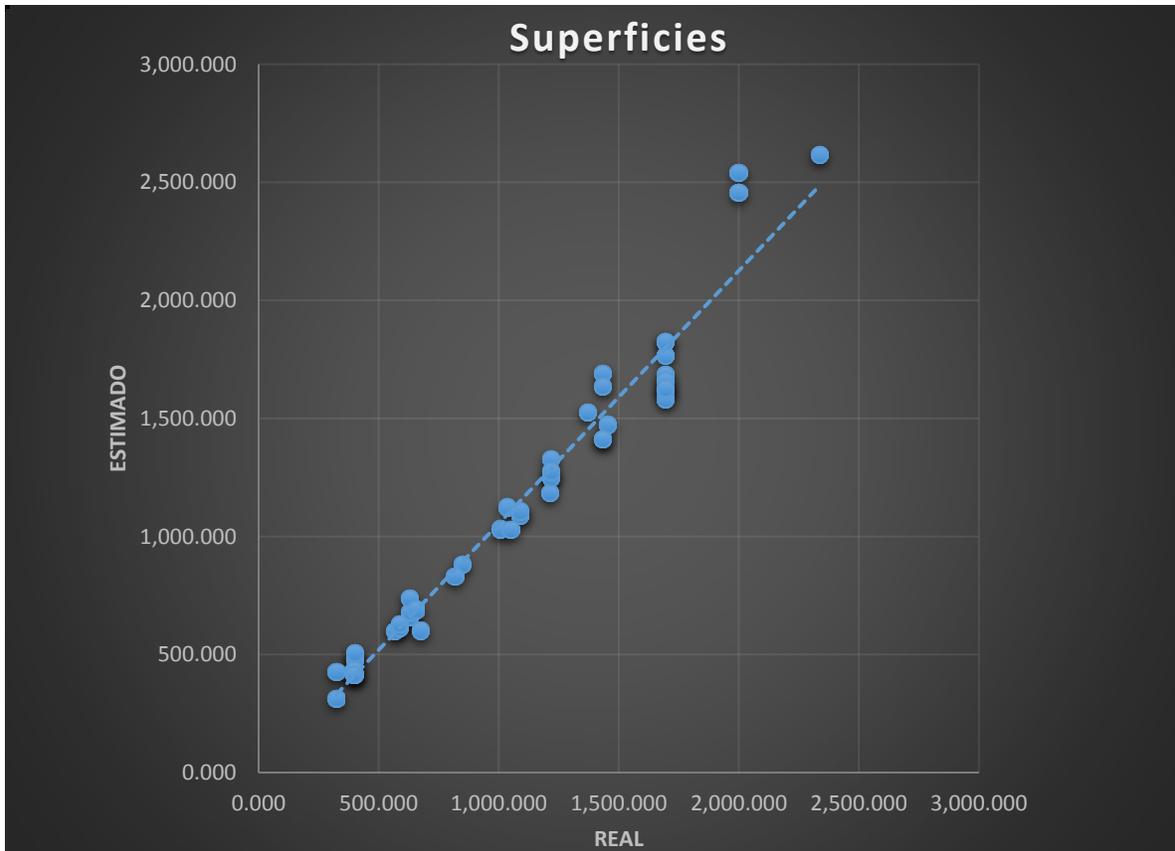
Figura 46. Edificios para validación de datos en el PDU de Cuauhtémoc

- **Error medio cuadrático.**

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (A_i - B_i)^2}{N}} \rightarrow EMC = \sqrt{\frac{877,257.837}{47}} \rightarrow EMC = 136.62$$

- **Gráfica de dispersión.**

En la gráfica de dispersión de los valores estimados versus los valores reales se puede observar que el rango en el que los valores calculados se ajustan más a los reales es en el rango que esta entre 500 a 1100 aproximadamente con unos pocos valores dispersos en ese mismo rango; a lo largo de los demás valores los puntos se encuentran más dispersos siendo la mayor dispersión en la segunda mitad de la recta cuyos valores van de 1,250 a 2,350.



**Figura 47. Gráfica de dispersión, superficies**

- **Adicional al error medio cuadrático y a las gráficas de dispersión, para las superficies se plantean 3 parámetros adicionales, extraídos de (Douglas Scott, 2014):**

-Eficiencia del área calculada (DAE, por sus siglas en inglés):

$$DAE = \frac{DIA}{DIA + SIA}$$

-Porcentaje de superficie omitida (SAR, por sus siglas en inglés):

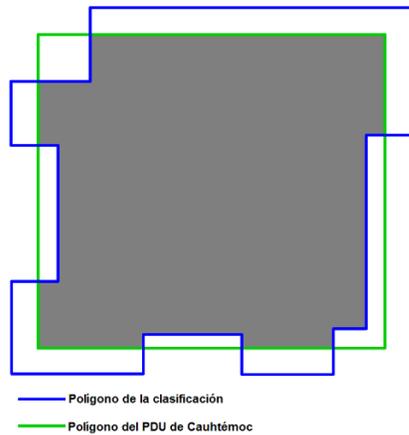
$$SAR = \frac{SIA}{DIA + SIA}$$

-Porcentaje de superficie falsa (FAR, por sus siglas en inglés):

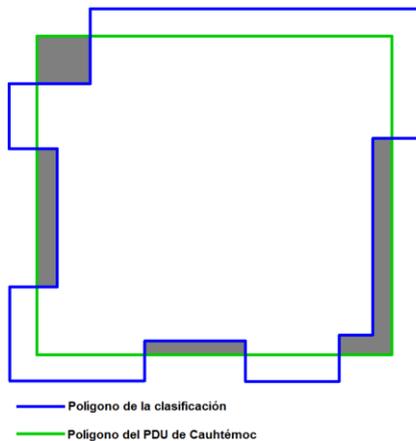
$$FAR = \frac{FIA}{DIA + FIA}$$

en donde:

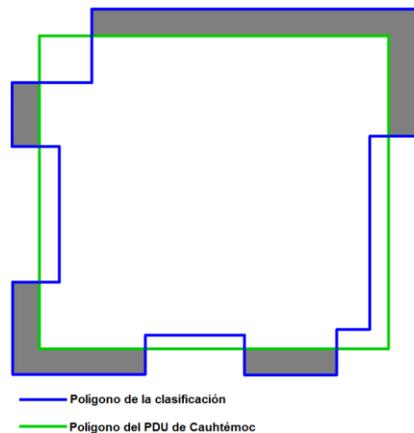
- **DIA:** Es la superficie en común que como su nombre lo dice es la superficie que comparten ambos polígonos, el de la clasificación realizada y el del PDU de Cuauhtémoc.



- **SIA:** Es el error de omisión, superficie que deberían de tener en común ambos polígonos pero que al de la clasificación le hace falta.



- **FIA:** Es el error de comisión, superficie extra en el polígono de la clasificación, es decir la que está por fuera del polígono del PDU de Cuauhtémoc.



Los parámetros DAE, SAR, FAR se leen en porcentaje donde valores mayores en DAE y menores en SAR y FAR representan una muy buena estimación de la superficie.

Para simplificar los resultados y no calcular y escribir 47 valores de porcentaje para cada parámetro se decidió llevar las ecuaciones arriba descritas con las sumatorias de cada valor, quedando ecuaciones generales como sigue:

$$DAE = \frac{\sum DIA}{\sum DIA + \sum SIA}$$

$$SAR = \frac{\sum SIA}{\sum DIA + \sum SIA}$$

$$FAR = \frac{\sum FIA}{\sum DIA + \sum FIA}$$

Las sumatorias obtenidas a partir de los valores mostrados en la Tabla 12.

$$\Sigma DIA = 48,270.867$$

$$\Sigma SIA = 3,308.014$$

$$\Sigma FIA = 6,217.886$$

Calculando con las ecuaciones generales obtenemos la siguiente tabla:

Parámetro	Resultado	Descripción
<b>DAE</b>	93.58%	Muy buena eficiencia del área calculada.
<b>SAR</b>	6.41%	La superficie omitida equivale a sólo 3,308.81m <sup>2</sup> de los 51,591.34m <sup>2</sup> totales.
<b>FAR</b>	11.41%	La superficie falsa equivale a sólo 5,887.25m <sup>2</sup> de los 51,591.34m <sup>2</sup> totales

**Tabla 14. Resultados de DAE, SAR y FAR**

### 5.3.3. Validación volúmenes.

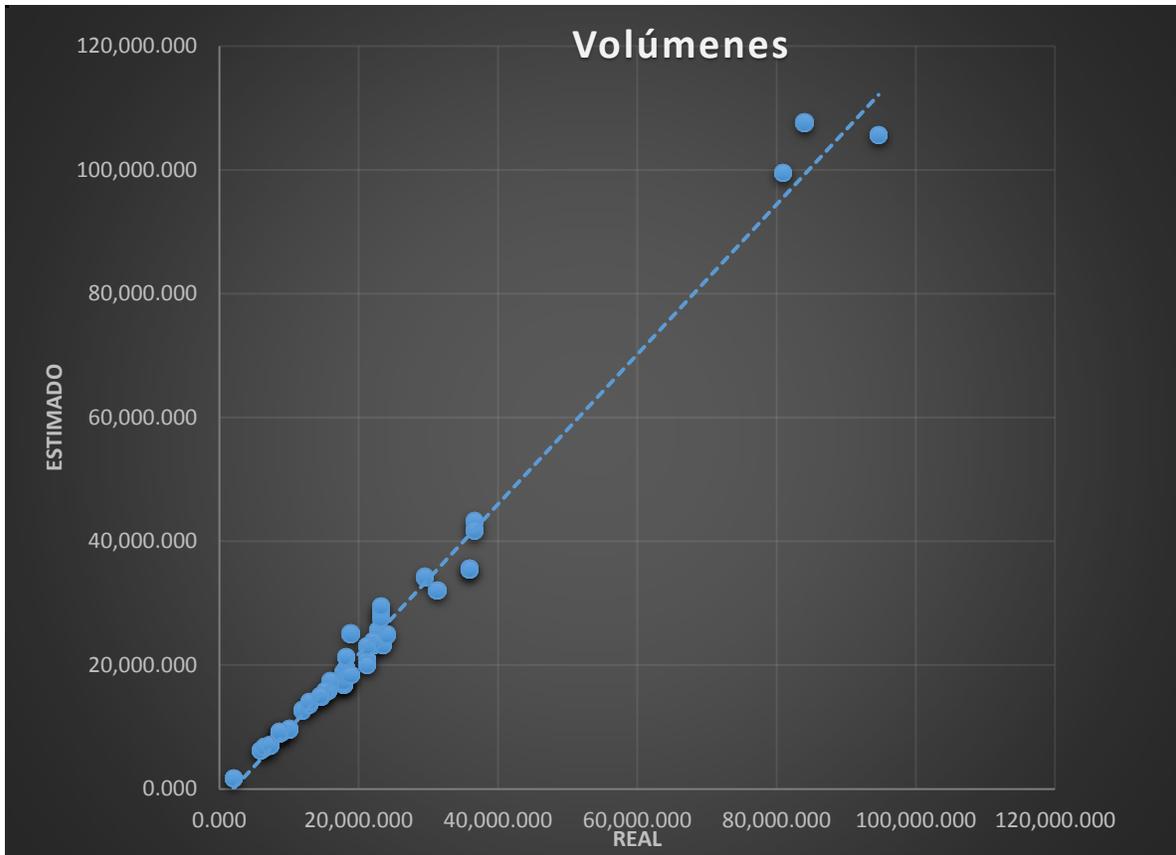
Para la validación de volúmenes se utilizaron los datos ya descritos y que se muestran en la Tabla 13.

- **Error medio cuadrático.**

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (A_i - B_i)^2}{N}} \rightarrow EMC = \sqrt{\frac{1,295,969,202.261}{47}} \rightarrow EMC$$
$$= 5,251.07$$

- **Gráfica de dispersión.**

Se puede notar que en la gráfica de dispersión donde ajustan más los valores estimados versus los valores reales de volumen es, al igual que en la gráfica de alturas, en la primera sección de la recta que está en el rango que va de 2,000 a 17,000 y los valores se van dispersando conforme los datos de los volúmenes incrementan.



**Figura 48. Gráfica de dispersión, volúmenes**

## **Conclusiones.**

Es bien sabido que los datos estimados siempre van a tener un inevitable error, sin embargo, dadas las condiciones y finalidades para lo que se pretendan usar los resultados de las estimaciones, estos errores pueden ser acotados en un rango tolerable para hacer más eficiente el trabajo en cuestiones de tiempo, disminución de gastos económicos, evasión de riesgos en campo, etc. que implicaría la medición directa, que a veces, es prácticamente imposible.

En el presente trabajo de tesis se propuso una metodología, primero, para estimar en base de modelos digitales LiDAR características físicas de edificios y segundo, para estimar la fiabilidad de los datos arrojados en base a análisis estadísticos.

### **Alturas.**

El error medio cuadrático es muy bajo, 0.357, esto debido a que en sí, para este caso los dos valores se podrían tomar como real ya que como se explicó a lo largo de todo el desarrollo del documento lo que calcula el sistema ALS son coordenadas X, Y, Z y altura, casi con el mismo concepto que lo calcula el equipo que se usó en campo, TruPulse 360 R, que es en base de un as de láser, por lo que el error debe de ser a causa de:

- Diferentes precisiones de los equipos usados.
- Diferentes condiciones climáticas en las fechas de toma de datos.
- Errores sistemáticos durante las mediciones.

- Diferentes procesos con la información para cada equipo.

En conclusión en los datos LiDAR la estimación de altura es buena debido a que hacen referencia a una superficie relativamente grande y homogénea lo que hace que este error sea totalmente despreciable, ya que como se mencionó la altura de pisos en la zona de estudio es de 3.5m, este valor de 0.357 bien podría tratarse también de elementos de construcción como entresijos, cornisas, techos falsos, etc.

## **Superficies.**

El error medio cuadrático para las superficies es alto 136.62 para las finalidades y el uso que se le piensa dar a los datos estimados, no obstante esto pudo haber sido a causa de la información con la que se validó, que si bien es un ordenamiento urbano legal, no existe ningún antecedente de con que método, equipo y rangos de precisiones fueron medidos esos polígonos, además de que fueron obtenidos, para el análisis vectorial mediante vectorización lo cual también genera cierto error implícito en el proceso y que a pesar de todo esto fue elegida esta información debido a que no se contaba con nada más para realizarlo. Adicional a estos posibles errores implícitos en la información que se tomó como real, existen los derivados de la estimación realizada que son:

- El tamaño de pixel de los rasters generados.
- Los polígonos no son uniformes, están “cuadrículados” debido a los pixeles.
- Elementos como terrazas que no dejaron pasar el as de láser hasta la base real de los edificios.

- Presencia de vegetación, en algunas zonas más alta que los edificios que impidieron modelarlos correctamente.

Estos puntos se pueden observar en el análisis y cálculo de los valores DAE, SAR y FAR, los cuales reflejan los errores más fuertes son debidos a la diferencia de formas geométricas en los elementos ya que presenta un muy buen porcentaje 93.58% de superficie en común, no obstante la definición de formas y su correspondiente área está asociada a la densidad de puntos LiDAR es por esto que en los errores de omisión y comisión el más alto es el de comisión, esto debido a la naturaleza de toma de datos del sensor, el cual “ve” desde el aire, lo que causa que elementos físicos del entorno no dejen obtener la información de la base real y además le agreguen superficie a los elementos; creando un mayor porcentaje de áreas “falsas” en esta estimación.

En conclusión, debido a la automatización y escalabilidad del método para grandes zonas de estudio se podría usar para tener un valor previo con buena aproximación para este dato.

## **Volumen.**

El error medio cuadrático para los volúmenes estimados es alto, lo cual es de esperarse siendo este obtenido por la operación de las alturas y superficies estimadas, ambas ya con sus respectivos errores que se han explicado, los cuales también aumenta de igual manera, según las operaciones realizadas que para este caso es multiplicarlos, siendo el mayor error el que proviene de las superficies por lo mencionado anteriormente; esto se puede apreciar gráficamente en la

gráfica de dispersión en la que se aprecia que los mayores errores de volumen está en el extremo superior, debido a que entre mayor es el valor de altura y/o superficie el error implícito en estos se multiplica más.

En conclusión, la precisión del valor estimado de volumen va a estar directamente relacionado y va a ser proporcional a los errores implícitos de los valores de alturas y superficies usados para su cálculo.

# Bibliografía

- Ackermann, F. (1999). Airborne laser scanning—present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 64-67.
- Bi Huaxing, L. X. (2006). Digital Terrain Analysis Based on DEM. *Higher Education Press and Springer-Verlag*, 1, 5.
- Burman, H. (2002). *Laser strip adjustment for data calibration and verification*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Douglas Scott, G. P. (2014, Noviembre 25). Quantifying the Physical Composition of Urban Morphology throughout Wales Based on the Time Series (1989–2011) Analysis of Landsat TM/ETM+ Images and Supporting GIS Data. (J. N. Thenkabail, Ed.) *Remote Sensing*, 11741.
- Felicísimo, A. M. (1994). *Modelos Digitales del Terreno, Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*.
- Fernández Núñez, M. S. (2013). *Aplicación de sensores aerotransportados (Lidar/cámara fotogramétrica digital) en la gestión de espacios protegidos: El Parque Natural de Dunas de Corrubedo y Lagos de Carregal y Vixan (Galicia, NO España)*.
- Florinsky, I. V. (2012). *DIGITAL TERRAIN ANALYSIS IN SOIL SCIENCE AND GEOLOGY*. USA: Elsevier.
- Fowler, R., & Samberg, A. F. (2007). Digital elevation Model Technologies and Applications: the DEM Users Manual. *Topographic LiDAR*, 209.
- Geosystems, L. (2007). *Leica ALS50-II Airborne Laser Scanner Product Specifications*. Heerbrugg, Suiza: Leica Geosystems AG.
- Gordon Petrie, C. K. (2008). Airborne and Spaceborne Laser Profilers. En C. K. Jie Shan, *Topographic Laser Ranging and Scanning, Principles and Processing*. Taylor & Francis Group, LLC.
- INEGI. (2011). *Nube de puntos LIDAR ajustada al terreno, Distrito Federal y Chalco, Estado de México*. Aguascalientes, Ags., México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI (ed.).
- INEGI. (2014). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Retrieved Noviembre 2014, from <http://www.inegi.org.mx/>
- Javier Suárez Quirós, C. F. (2012). *Modelización tridimensional semiautomática de entornos urbanos a partir de datos LIDAR combinados con información catastral*.
- Joly, F. (1988). *La cartografía*. Barcelona: Oikos-Tau.
- Lwin, K. K., & Murayama, Y. (2012). Estimation of Building Population from LIDAR Derived Digital Volume Model. In K. K. Murayama, *Development of GIS tool for dasymmetric mapping*. *International Journal of Geoinformatics* (pp. 11-18).

- Moreno Brotóns, J. A. (2010). Análisis y validación de Modelos Digitales de Elevaciones mediante datos LiDAR. *Tecnologías de la Información Geográfica: La información Geográfica al servicio de los ciudadanos.*, 254-271.
- Petrie, G., & Toth, C. K. (2008). Introduction to Laser Ranging, Profiling and Scanning. In J. Shan, & C. K. Toth, *Topographic Laser Ranging and Scanning, Principles and Processing*. Taylor & Francis Group, LLC.
- Peucker, T. K. (1980). The impact of different mathematical approaches to contouring.
- Portales, C., & Lerma, J. L. (2003). Georreferenciación GPS/INS de imágenes aéreas adquiridas con escáneres rotacionales: ejemplo práctico y resultados. *Revista del Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía*, 4-9.
- Q. Zhou, B. L. (2008). *Advances in Digital Terrain Analysis*. Springer.
- RSAC, R. S. (2008, 06 14). *Introduction to LiDAR: Light detection and ranging*. Retrieved from [www.fs.fed.us/eng/rsac/lidar/ie5/index.html?dhtmlActivation=window](http://www.fs.fed.us/eng/rsac/lidar/ie5/index.html?dhtmlActivation=window)
- Salishchev, K. A. (1962). *Cartography in the Universities of the United States*. Unión Soviética.
- Sánchez, E. A. (2011, Enero 26). El modelado geomático del LiDAR: De la fusión SVM a la noción de prosdetección. México D.F.
- Sánchez, J. A., García, J. V., & Díaz, J. J. (2007). *Línea de producción LiDAR*. INEGI.
- SEDUVI. (2008, Septiembre 29). *SEDUVI*.
- Shan, J., & Toth, C. K. (2008). *Topographic laser ranging and scanning, Principles and Processing*. Taylor & Francis Group. LLC.
- Shiryaev, E. E. (1987). *Computers and the Representation of Geographical Data*. Gran Bretaña: John Wiley and Sons, Ltd.
- Silván-Cárdenas, J., & Wang, L. (2006). A multi-resolution approach for filtering LiDAR altimetry data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 11-22.
- Strakhov, V. N. (2007). Change of epochs in Earth science. *Russian journal of Earth sciences*, 1-19.
- Toby N. Carlson, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 241-252.
- Toth, C. K. (2008). Strip Adjustment and Registration. In G. & Petrie, *Topographic Laser Ranging and Scanning, Principles and Processing*. Taylor & Francis Group, LLC.
- USGS. (12 de Enero de 2015). *USGS science for a changing world*. Recuperado el 2016, de Remote Sensing Phenology: [http://phenology.cr.usgs.gov/ndvi\\_foundation.php](http://phenology.cr.usgs.gov/ndvi_foundation.php)
- V. Zaldo, G. M. (2010). Estimación y cartografía de parámetros ecológicos y forestales en tres especies (*Quercus ilex* L. subsp *ilex*, *Fagus sylvatica* L. y *Pinus halepensis* L.) con datos LiDAR. *Revista de Teledetección.*, 55-68.

Wehr, A. (2008). LiDAR Systems and Calibration. In C. K. Jie Shan, *Topographic Laser Ranging and Scanning, Principles and Processing* (pp. 129-171). Taylor & Francis Group.