

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1. Introducción

En el siglo actual, se ha producido un gran desarrollo en el campo científico-tecnológico e innovación, generando una verdadera revolución en las diferentes ramas de la ingeniería especialmente en la Geodesia, que sin duda ha exigido una especialización cada vez mayor en todas sus ramas.

Cabe subrayar que la importancia de la Geodesia y la Topografía radica en que son las herramientas que proporcionan el conocimiento de la forma y dimensiones de la Tierra o parte de ella, y este es el paso previo a cualquier intento para su representación cartográfica, bien de forma completa o parcial.

La información acerca de los elementos en la superficie de la Tierra tiene una gran importancia para el análisis y estudios de diversa índole en los campos de la Ingeniería Civil y Ciencias de la Tierra. El estudio de la forma del terreno constituye un importante insumo para muchos profesionales como Ingenieros, Geólogos, Hidrólogos, Cartógrafos y Fuerzas Armadas.

En las postrimerías del siglo XX, se materializa la idea de generar un sistema global de navegación, posicionamiento y transmisión del tiempo basado en tecnología satelitaria.

La superficie del terreno puede ser representada en un modelo simplificado que sea lo suficientemente próximo a la realidad, debido a que se cuenta con un número muy abundante de puntos que la componen. Para realizar dicho modelo, se procesan los puntos mediante el uso de sistemas computarizados.

El LIDAR (Light Detection And Ranging) cuyo significado es Detección y Medición a través de la Luz, es un sistema que permite obtener una nube de puntos del terreno tomados mediante un scanner laser aerotransportado. Para realizar este escaneado se

combinan dos movimientos. Uno longitudinal dado por la trayectoria del avión y otro transversal mediante el espejo móvil que desvía el haz de luz, laser emitido por el scanner.

Para obtener los diferentes Modelos Digitales utilizando tecnología Lidar, se emplean los múltiples ecos recibidos por el sensor, los que proveen la información sobre las diferentes superficies que el rayo láser va encontrando a su paso. En la mayoría de los casos, los últimos pulsos definirán la superficie del terreno, mientras que los primeros pertenecerán a elementos situados por sobre dicha superficie.

El resultado bruto de un levantamiento es una densa nube de puntos LAS que se pueden usar en una variedad de formas para modelar el terreno y elementos como la vegetación y los edificios, con exactitud. Las principales características de este conjunto de puntos son su alto número y su gran homogeneidad espacial. La gran desventaja es identificar el cuerpo sobre el que impacta, por esa razón se acompaña la toma de datos Lidar con la adquisición de imágenes del área levantada. Por lo tanto, para generar el MDT utilizando tecnología Lidar, la nube de puntos obtenida debe ser clasificada para preservar las entidades útiles para la función de cada representación.

Comparado con métodos como la aerofotogrametría o la topografía clásica, la exactitud, mejor detalle y los tiempos de respuesta en la obtención de los resultados son sustantivamente mejores y son variables a considerar al momento de elegir la tecnología Lidar como fuente de obtención de datos de posición y elevación del terreno.

1.2. Justificación

El desarrollo tecnológico alcanzado por las sociedades modernas en las últimas décadas ha brindado la posibilidad de producir continuamente una serie de nuevas herramientas para lograr satisfacer, abastecer y mejorar incesantes requerimientos cartográficos, por esta razón el presente trabajo pretende exponer un estudio de sistemas de alto rendimiento, que brindan mayor precisión en los procedimientos empleados para realizar levantamientos topográficos en tres dimensiones.

Los levantamientos con tecnología LIDAR son de alto rendimiento, tienen la ventaja de ser levantamientos tridimensionales en grandes magnitudes de terreno obteniendo mayor información en menor tiempo, es decir, si realizamos una recopilación de datos de la superficie terrestre, utilizando equipos de alto rendimiento observamos que se obtendrá mayor detallamiento y precisión en un tiempo considerablemente mínimo en comparación a los empleados en topografía clásica o moderna.

Con la técnica de escáner laser LIDAR para la obtención de datos en campo del terreno, se demostrara que las innovaciones tecnológicas progresan mejorando y optimizando el rendimiento. La aparición de nuevas tecnologías modifica sustancialmente los métodos de trabajo y por tanto los resultados, siendo estos notablemente más satisfactorios.

El instrumental que se pretende describir en la presente memoria configura la base sobre la que se cimentaran en breves años los procedimientos a emplear en el control de todo tipo de estructuras, tan habitual en la actualidad, pero realizado por técnicas clásicas. Este tipo de técnicas basado en la tecnología scanner aerotransportado tienen como principal mejoría la captura continua y directa de la información que permite determinar la geometría tridimensional del objeto. Otras ventajas que ofrece son:

- El procedimiento del sistema LIDAR permite una drástica reducción de los tiempos de observación de los datos de campo y, por tanto, de los costos, además de una ejecución mucho más rápida de la representación del objeto.
- Posibilidad para examinar objetos y áreas remotas, evitando así problemas de accesibilidad o peligrosidad en la captura de la información.
- Posibilidad de escanear objetos muy complejos, donde las técnicas tradicionales no son capaces de generar una información continua tan precisa.
- La captura de los datos de campo son en gran medida independientes de la iluminación ambiental, por lo que se puede explorar de noche.
- La posibilidad de representar “todo” lo que hay en el lugar en el momento de la toma de datos.

Actualmente se ha venido desarrollando una serie de trabajos con tecnología LIDAR en nuestro país. Por ser una tecnología incipiente en nuestro medio aún no se conoce su metodología de trabajo.

El propósito de este trabajo es la creación del Modelo Digital de Terreno utilizando tecnología LIDAR, permitiendo visualizar la distribución espacial del tramo en estudio.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar un estudio que exponga los procedimientos de levantamientos topográficos con tecnología LIDAR de alto rendimiento, que permite obtener un modelo Digital de Terreno confiable para el emplazamiento de proyectos viales.

1.3.2. Objetivos específicos

- Establecer los elementos teórico-prácticos del sistema de levantamientos topográficos con el método LIDAR.
- Describir la metodología de obtención de datos de campo empleando el sistema LIDAR.
- Aplicar esta metodología a un tramo carretero de manera que se visualice la aplicación del sistema LIDAR en proyectos viales
- Obtener las curvas de nivel del tramo en estudio.
- Realizar una comparación de perfiles longitudinales de terreno obtenidos mediante los levantamientos realizados con sistema LIDAR y topografía convencional.
- Establecer las conclusiones y recomendaciones del trabajo ejecutado.

1.4. Alcance

La superficie del terreno puede ser representada en un modelo simplificado que sea lo suficientemente próximo a la realidad, debido a que se cuenta con un número muy abundante de puntos que la componen. Para realizar dicho modelo, se procesan los puntos mediante el uso de sistemas computarizados con la finalidad de obtener un Modelo Digital de Terreno y así contar con esta fuente de información para el estudio de la superficie del terreno.

En esta memoria se abordara la problemática de cómo se puede obtener un Modelo Digital de Terreno, que represente de manera fiel la zona de estudio, utilizando la data entregada por la tecnología Láser Escáner Aerotransportado – LIDAR.

Puntualizar conceptos fundamentales de las ciencias madre encargadas del estudio y la obtención detallada de la superficie terrestre, las mismas que son la base de las nuevas tecnologías.

Describir que es el sistema LIDAR, sus características, procedimiento detallado de trabajo, los equipos que utiliza para lograr un modelo del terreno, los avances tecnológicos que presenta, las ventajas en cuanto a precisión, optimización y rendimiento que ofrece al emplear esta metodología.

Se pretende realizar el levantamiento de un tramo determinado de carretera empleando tecnología LIDAR, con ayuda de expertos en el procedimiento de la técnica, con el fin de conseguir conocimientos reales de campo, realizando todo el procedimiento necesario para obtener datos de la nube de puntos.

Cabe resaltar que en Bolivia la utilización del Sistema Láser Aerotransportado, es una tecnología que se introdujo recientemente, por lo tanto, es una tecnología que está en plena etapa de expansión, siendo tal información considerable en este trabajo.

Finalmente se mostrarán los resultados obtenidos, los mismos aportarán sugerencias para mejorar el trabajo en caso de haberse presentado algún inconveniente.

Con la finalización exitosa del presente trabajo se sentaran bases en cuanto al conocimiento de un nuevo método de trabajo evolucionado con las nuevas tecnologías.

1.5. Metodología

En el presente estudio se identificara, observara, analizara y recopilara la información necesaria para la comprensión del tema planteado.

Afortunadamente día a día van apareciendo más herramientas que permiten aumentar tanto el rendimiento como la propia calidad de los trabajos topográficos realizados.

Recopilación de la Información y Documentación

- Se precisa tener conocimiento detallado de las características del sistema LIDAR.

Teniendo conocimiento del procedimiento teórico, se plasmara en la práctica, realizando el levantamiento de la zona de estudio:

- Se define la zona de estudio, en este caso será un tramo de la carretera CARAPARI – PALOS BLANCOS.
- Se define los pasos a seguir para llevar acabo tal levantamiento:
 1. Actividades preliminares
 2. Movilización (Equipos y personal)
 3. Monumentación de mojones para BM's y puntos de control
 4. Control horizontal
 5. Control vertical
 6. Procesamiento de datos
 7. Medición con el LASER Aerotransportado

Para conseguir un modelo digital del terreno en estudio, de alta precisión y densidad con un rendimiento muy elevado, el sistema LIDAR realiza diferentes mediciones, combina tres sistemas para tal proceso:

- Medida de distancias mediante laser.
- Posicionamiento GPS.
- Medida de las rotaciones tridimensionales de la aeronave en la que se ha instalado el equipo.

Finalmente se procesaran los datos de la nube de puntos obtenidas con las mediciones del LIDAR, para generar un MDT.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES GENERALES Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1. Topografía

La palabra topografía procede del griego "topo" = lugar, y "grafos" = dibujo. Es la ciencia que con el auxilio de las matemáticas nos ayuda a representar gráficamente un terreno o lugar determinado, con todos sus accidentes y particularidades naturales o artificiales de su superficie.

Es la ciencia y la técnica de realizar mediciones de ángulos y distancias en extensiones de terreno lo suficientemente reducidas como para poder desprestigiar el efecto de la curvatura terrestre, para después procesarlas y obtener así coordenadas de puntos, direcciones, elevaciones, áreas o volúmenes, en forma gráfica y/o numérica, según los requerimientos del trabajo.

La Topografía ha tenido gran importancia desde el principio de la civilización. Sus primeras aplicaciones fueron las de medir y marcar los límites de los derechos de propiedad.

A través de los años su importancia ha ido en aumento al haber una mayor demanda de diversos mapas y planos, y la necesidad de establecer líneas y niveles más precisos como una guía para las operaciones de construcción.

2.1.1. División de la Topografía

La topografía se divide en dos grandes áreas que son la Planimetría y la Altimetría.

Planimetría:

La planimetría es la representación de todos los detalles interesantes del terreno sobre una superficie plana, la cual es la superficie media de la Tierra; en esta parte de la Topografía se estudia el conjunto de métodos y procedimientos para fijar las posiciones de puntos proyectados en un plano horizontal, sin tomar en cuenta sus

elevaciones, ya que aquí no importan las diferencias relativas de las elevaciones entre los diferentes puntos del terreno. Es decir se representa el terreno visto desde arriba o en planta.

La ubicación de los diferentes puntos sobre la superficie de la Tierra se hace mediante la medición de ángulos y distancias a partir de puntos y líneas de referencia proyectadas sobre un plano horizontal.

El conjunto de líneas que unen los puntos observados se denomina Poligonal Base y es la que conforma la red fundamental o esqueleto del levantamiento, a partir de la cual se referencia la posición de todos los detalles o accidentes naturales y/o artificiales de interés. La poligonal base puede ser abierta o cerrada según los requerimientos del levantamiento topográfico. Como resultado de los trabajos de planimetría se obtiene un esquema horizontal.

Altimetría:

La altimetría es el conjunto de operaciones, cuyo objetivo principal es determinar la diferencia de alturas entre diferentes puntos situados en el terreno, las cuales representan las distancias verticales medidas a partir de un plano horizontal de referencia.

La determinación de las alturas o distancias verticales también se puede hacer a partir de las mediciones de las pendientes o grado de inclinación del terreno y de la distancia inclinada entre cada dos puntos. Como resultado se obtiene el esquema vertical.

Mediante la altimetría se logra representar el relieve del terreno, esta representación se la hace por medio de planos con las curvas de nivel, perfiles, etc.

2.2. Geodesia

El término GEODESIA del griego (tierra) y (divisiones ó —yo dividol) fue usado inicialmente por Aristóteles 384-322 a.c.) y puede significar tanto —divisiones

(geográficas) de la tierra como también el acto de —dividir la tierra, por ejemplo, entre propietarios. La geodesia es, al mismo tiempo, una rama de las geociencias y una ingeniería, que trata del levantamiento y de la representación de la forma y de la superficie de la tierra, global y parcial, con sus formas parciales y artificiales. La geodesia estudia la forma, dimensiones y campo gravitatorio de la Tierra en territorios extensos. Como ya sabemos, esta es su principal diferencia con la topografía, la cual basa sus trabajos en superficies de extensión reducida en las cuales puede considerarse despreciable la esfericidad terrestre. La gran evolución que han experimentado los distintos aparatos topográficos, que nos han llevado a conseguir precisiones antes sólo imaginables tras complejos trabajos, ha llegado a dificultar sobremanera el establecimiento de separación clara entre ambas ciencias. En esencia, la geodesia comienza sus trabajos allí donde termina la topografía.

La Geodesia suministra, con sus teorías y sus resultados de mediciones y cálculos, la referencia geométrica para las demás geo-ciencias como también para la Geo informática, los Sistemas de Informaciones Geográficas (SIG), el catastro, la planificación, las ingenierías de construcción, la navegación aérea, marítima y terrestre, entre otros e, inclusive, para aplicaciones militares y programas espaciales. La Geodesia Superior o Geodesia Teórica, dividida entre la Geodesia Física y la Geodesia Matemática trata de determinar y representar la figura de la tierra en términos globales; la Geodesia Inferior, también llamada Geodesia práctica o Topografía, levanta y representa partes menores de la tierra donde la superficie puede ser considerada plana. Para este fin, podemos considerar algunas ciencias auxiliares como es el caso de la Cartografía, de la Fotogrametría, del cálculo de compensación y de la Teoría de Errores de Observación, cada una con diversas subáreas. Además de las disciplinas de la Geodesia científica, existen una serie de disciplinas técnicas que tratan problemas de la organización, administración pública o aplicación de mediciones geodésicas, por ejemplo la Cartografía sistemática, el Catastro inmobiliario, el Saneamiento Rural, las mediciones de Ingeniería y el Geoprocesamiento.

- **Geodesia Teórica.** La observación y descripción del campo de gravedad y su variación temporal, actualmente, es considerada el problema de mayor interés en la Geodesia Teórica. La dirección de la fuerza de la gravedad en un punto, producido por la rotación de la Tierra y por la masa terrestre, como también de la masa del sol, de la luna y de los otros planetas, y el mismo como la dirección como la dirección de la vertical (o de la plomada) en algún punto. La dirección del campo de gravedad y la dirección vertical no son idénticas. Las superficies perpendiculares a estas direcciones son superficies equipotenciales. Una de estas superficies equipotenciales es llamada Geoide (es aquella superficie que más se aproxima al nivel medio del mar). El problema de la determinación de la figura terrestre es resuelto para un determinado momento si es conocido el campo de gravedad dentro de un sistema espacial de coordenadas. Este campo de gravedad también sufre alteraciones causadas por la rotación de la tierra y también por los movimientos de los planetas (mareas). Conforme el ritmo de las mareas, también la costra terrestre, a causa de las mismas fuerzas, sufre deformaciones elásticas: las —mareas‖ terrestres. Para una determinación del geoide, libre de hipótesis, se necesita en primer lugar de mediciones gravimétricas además de mediciones astronómicas, triangulaciones, nivelaciones geométricas y trigonométricas y observaciones de satélites (Geodesia por satélites).
- **Geodesia Física.** La mayor parte de las mediciones geodésicas se aplica en la superficie terrestre, donde, para fines de determinaciones planimétricas, son marcados puntos de una red de triangulación. Con los métodos exactos de la Geodesia matemática se proyectan estos puntos en una superficie geométrica que matemáticamente debe ser bien definida. Para este fin se suele definir un Elipsoide de rotación o Elipsoide de referencia. Existe una serie de elipsoides que antes fueron definidos para las necesidades de apenas un país, después para los continentes, hoy para el globo entero, en primer lugar definidos en proyectos geodésicos internacionales y la aplicación de los métodos de la

Geodesia de satélites. Además del sistema de referencia planimétrica (red de triangulación y el elipsoide de rotación), existe un segundo sistema de referencia: el sistema de superficies equipotenciales y líneas verticales para las mediciones altimétricas. Según la definición geodésica, la altura de un punto es la longitud de las líneas de las verticales (curva) entre un punto P y el geoide (altura geodésica). También se puede describir la altura del punto P como la diferencia de potencial entre el geoide y aquella superficie equipotencial que contiene el punto P. Esta altura es llamada Cota Geopotencial. Las cotas geopotenciales tienen la ventaja, comparándolas con alturas métricas u ortométricas, de poder ser determinadas con alta precisión sin conocimientos de la forma del geoide (nivelación). Por esta razón, en los proyectos de nivelación de grandes áreas, como continentes, se suelen usar cotas geopotenciales, como en el caso de la —Red única de Altimetría de Europa. En el caso de tener una cantidad suficiente, tanto de puntos planimétricos, como también altimétricos, se puede determinar el geoide local de aquella área. El área de la Geodesia que trata de la definición local o global de la figura terrestre generalmente es llamada Geodesia Física, para aquella área, o para sus subáreas. También se usan términos como Geodesia Dinámica, Geodesia por Satélite, Gravimetría, Geodesia astronómica, Geodesia clásica, Geodesia tridimensional.

- **Geodesia Matemática.** En la Geodesia matemática se formulan los métodos y las técnicas para la construcción y el cálculo de las coordenadas de redes de puntos de referencia para el levantamiento de un país o de una región. Estas redes pueden ser referenciadas para nuevas redes de orden inferior y para mediciones topográficas y registrales. Para los cálculos planimétricos modernos se usan tres diferentes sistemas de coordenadas, definidos como —proyecciones conformes de la red geográfica de coordenadas: la proyección estereográfica (para áreas de pequeña extensión), la proyección Lambert para (países con grandes extensiones en la dirección oeste-este) y la proyección

Mercator transversal o proyección transversal de Gauss (por ejemplo UTM), para áreas con mayores extensiones meridionales. Según la resolución de la IUGG (Roma, 1954) cada país puede definir su propio sistema de referencia altimétrica. Estos sistemas también son llamados —Sistemas altimétricos de uso. Tales sistemas de uso son por ejemplo: las alturas ortométricas, que son la longitud de la línea vertical entre un punto P y el punto P', que es la intersección de aquella línea de las verticales con el geode. Se determina tal altura como la cota geopotencial c a través de la relación, donde \bar{g} es la media de las aceleraciones de gravedad acompañando la línea PP', un valor que no es conmensurable directamente, y para determinarlo se necesita de más informaciones sobre la variación de las masas en el interior de la tierra. Las alturas ortométricas son exactamente definidas, su valor numérico se determina apenas aproximadamente. Para esa aproximación se usa también la relación (fórmula) donde la constante es la media de las aceleraciones de gravedad. La gran evolución que han experimentado los distintos aparatos topográficos, que nos han llevado a conseguir precisiones antes sólo imaginables tras complejos trabajos, ha llegado a dificultar sobremanera el establecimiento de separación clara entre ambas ciencias. En esencia, la Geodesia comienza sus trabajos allí donde termina la Topografía. De todas formas, no debe acometerse el estudio de estas ciencias por separado, pues están íntimamente relacionadas, de tal manera que la Topografía necesitará apoyarse en la Geodesia para una gran cantidad de aplicaciones prácticas.

2.2.1. Objetivos de la Geodesia.

A continuación se describen los principales objetivos de la Geodesia:

- Establecer y mantener las redes de control geodésico tridimensionales ya sea nacional como global de la tierra, tomando en cuenta la naturaleza cambiante de estas redes debido al movimiento de las placas tectónicas.

- Medición y representación de fenómenos geofísicos (movimiento de los polos, mareas terrestres y movimiento de la corteza).
- Determinación del campo gravitacional de La Tierra, incluyendo las variaciones temporales.

2.3. Conceptos Geodésicos Fundamentales.

2.3.1. El Geoide.

La palabra Geoide significa —forma de la tierra y fue introducida por Listing en el año de 1873. El geoide es un esferoide tridimensional que constituye una superficie equipotencial imaginaria que resulta de suponer la superficie de los océanos en reposo y prolongada por debajo de los continentes la de la fuerza centrífuga ocasionada por la rotación y traslación del planeta de manera que la dirección de la gravedad es perpendicular a todos los lugares. El geoide tiene en cuenta las anomalías gravimétricas (debidas a la distribución de las masas continentales y la densidad de los componentes de la Tierra) y el achatamiento de los polos, por el cual es una superficie irregular con protuberancias y depresiones. Por tanto y resumiendo, podemos concluir que el geoide será el lugar geométrico de los puntos que se encuentran en equilibrio bajo la acción de las siguientes solicitaciones: Fuerzas de atracción gravitatoria del resto de los puntos de la superficie del mismo. Fuerzas de atracción gravitatoria del resto de los astros del sistema solar. Fuerza centrífuga, debida al movimiento de rotación de la Tierra.

Mediante el estudio de estas solicitaciones o fuerzas y los potenciales que las mismas producen es posible llegar a la definición geométrica del geoide. Para la correcta definición del geoide es necesario establecer el concepto de nivel medio del mar, en contraposición con el podríamos llamar nivel instantáneo, pues la superficie real de los mares no se adapta con exactitud al geoide, debido a la existencia de mareas y corrientes. Por lo tanto, podríamos definir al geoide como la superficie equipotencial

que se corresponde con el nivel medio de los océanos. La desigual distribución de las masas continentales, así como la densidad variable de los materiales que componen nuestro Planeta, hacen que el geoide no sea una superficie regular y que, en cambio, presente protuberancias y depresiones, apartándose de la superficie regular media en desniveles que alcanzan hasta los 100 metros.

2.3.2. Dátum Geodésico

Modelo matemático diseñado para ajustarse lo mejor posible a una parte o a la totalidad del geoide. Se define por un elipsoide y la relación que existe entre éste y un punto sobre la superficie topográfica, establecido como el origen el dátum. Dicha relación se establece por medio de seis cantidades, generalmente (aunque no necesariamente): la latitud y longitud geodésica y la altura de origen, los dos componentes de la deflexión de la vertical en el origen y el acimut geodésico de una línea que va desde el origen hacia cualquier otro punto. También se puede mencionar que es el punto inicial o dátum de coordenadas conocidas del cual se pueda partir, así como una línea de dirección también conocida. Es lo mismo que tradicionalmente se necesita en cualquier levantamiento topográfico, con la diferencia de que en éste las coordenadas pueden ser arbitrariamente establecidas y en el sistema geográfico debe ser bastante absolutas y de aplicación a escala mundial. Esto conduce al concepto de Dátum Horizontal. El dátum geodésico está constituido por:

- Una superficie de referencia con definición geométrica exacta, generalmente una elipsoide de revolución.
- Un punto fundamental, en el que coinciden las verticales al geoide y al elipsoide (con lo que también coincidirán las coordenadas astronómicas y geodésicas).

En general, el dátum es la superficie de referencia para el cálculo y determinación de coordenadas, estableciéndose unos datos iniciales de los cuales se derivan el resto. En Geodesia se emplean dos tipos de dátum, el vertical y el horizontal. El dátum geodésico también cuenta con las siguientes particularidades:

- Conjunto de cantidades que sirven como base para el cálculo de otras cantidades.
- Las coordenadas que surgen de un ajuste de las mediciones (terrestres) comprenden el dátum.

El elipsoide es utilizado como superficie de referencia para referir las coordenadas. Existen dátums verticales y horizontales.

2.3.3. Dátum Horizontal.

El dátum horizontal permite la determinación de la longitud y latitud. Se elige un punto en el cual la superficies del elipsoide de referencia y del geoide sean tangentes. De esta forma, ambas verticales (geodésica y astronómica respectivamente) coincidirán, así como las coordenadas astronómicas y geodésicas en dicho punto. Este punto en el cual son tangentes la superficie del geoide y del elipsoide se denomina también Punto Astronómico Fundamental (ya que se determinan sus coordenadas por métodos astronómicos y se igualan a las respectivas geodésicas, pues ambas, como hemos indicado son coincidentes) y es el que sirve como referencia para el posterior cálculo de las coordenadas de todos los vértices de una red geodésica. Es obvio que en el mismo, la desviación de la vertical es nula.

El dátum geodésico también cuenta con las siguientes particularidades: Necesidad de orientar el elipsoide respecto a la superficie física de la Tierra. Parámetros:

- Las dimensiones del elipsoide (a, b)
- Las coordenadas geodésicas (latitud, longitud y altura episódica) de un punto fundamental,
- El acimut de una línea desde este punto a otro la desviación de la vertical o ángulo entre la perpendicular al geoide (coincidente con la dirección de la gravedad) y la perpendicular al elipsoide. Multiplicidad de dátum's en la geodesia clásica. Ajustes locales de un elipsoide al geoide.

2.3.4. Dátum vertical (nivel medio del mar)

El dátum vertical se refiere a la superficie a la cual se refieren las elevaciones. Actualmente la superficie adoptada como dátum vertical es el nivel medio del mar (N.M.M). Para su determinación precisa se realizaron observaciones continuas de las fluctuaciones de las mareas en estaciones mareográficas.

Otra definición que tenemos del dátum vertical es que es la superficie de referencia que permite el cálculo de las alturas y por tanto es la superficie de altura nula. Lo más usual es que esta superficie sea el geoide y las alturas a las referidas sean alturas ortométricas. En lo que respecta a las alturas, todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico vertical, deberá estar referido al nivel de referencia vertical definido por el Dátum Vertical Norteamericano de 1988 (NAVD88), debiéndose expresar sus valores en metros.

Es importante señalar que las determinaciones altimétricas clásicas son referidas al geoide, mientras que la moderna utilización del sistema WGS-84 implica que éstas son referidas al elipsoide. El dátum vertical cuenta con las siguientes particularidades:

- El horizonte de los instrumentos ópticos es sensible al vector gravedad (la superficie debe tener un significado físico).
- La geodesia adopta el geoide (altura = 0) como superficie de referencia para definir las cotas.
- El geoide es materializado a través de lecturas promediadas en un período extendido de tiempo sobre mareógrafos.

2.4. Sistema Geodésico de Referencia.

Los sistemas geodésicos de referencia definen la forma y dimensión de la Tierra, así como el origen y orientación de los sistemas de coordenadas. Los sistemas de referencia geodésicos pueden ser descritos en base a dos modelos matemáticos: el esférico y el elipsoidal, los cuales son obtenidos en base parámetros físicos medidos sobre la superficie terrestre, tales como la aceleración de gravedad. Los sistemas

globales de coordenadas nos permiten definir posiciones sobre la superficie de la Tierra. El más comúnmente usado sistema es el de la latitud, longitud y altura. El primer meridiano y el ecuador son los planos que definen la latitud y la longitud.

La latitud geodésica de un punto, es el ángulo desde el plano ecuatorial a la dirección vertical de la línea normal al elipsoide de referencia.

La longitud geodésica de un punto es el ángulo que forma el meridiano que pasa por el punto con el meridiano origen en sentido dextrógiro.

La altura elipsoidal de un punto es la distancia desde el elipsoide de referencia al punto en dirección normal al elipsoide.

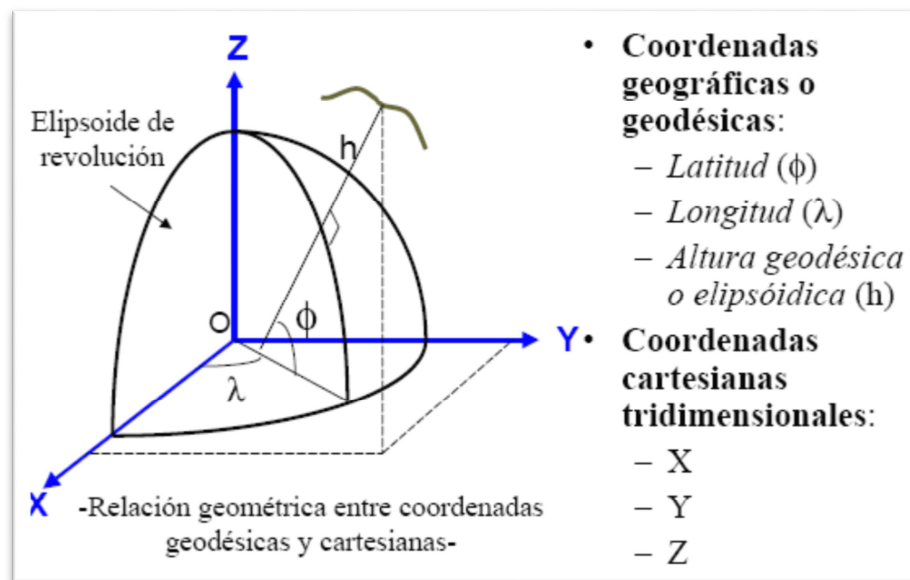
Dentro de un sistema cartesiano global las coordenadas están expresadas en función de los ejes X, Y y Z, del cual su origen es el centro de masas de la Tierra. El eje Z es paralelo al eje de rotación terrestre, el eje X a su vez es paralelo al meridiano de Greenwich y por último el eje Y es perpendicular al plano XOZ.

¿Qué es un sistema de referencia?

Ya quedo establecido que cuando hablamos de coordenadas geográficas de puntos del terreno, lo hacemos en un determinado Sistema de Referencia. Pero cabe una pregunta: ¿Qué es un Sistema de Referencia? La respuesta es: una terna de ejes cartesianos ortogonales X Y Z, cuyo origen 0 se encuentra ubicado en el centro geométrico del elipsoide de representación matemática de la Tierra. No debemos confundir X e Y cartesiana ortogonal con x e y planas. Las primeras son cartesianas ortogonales y se encuentran en un Sistema de Referencia y las segundas son planas y se encuentran en un Sistema de Representación Cartográfica. Como sabemos, la Tierra se encuentra ligeramente achatada en los Polos y ligeramente ensanchada en el Ecuador y la forma matemática que mejor la representa es la del elipsoide de revolución. Si conocemos el valor del semieje mayor del elipsoide y su achatamiento, podremos definir su forma y dimensiones y hallar el resto de sus parámetros. Si al elipsoide le incorporamos una red de meridianos y paralelos, podremos establecer las

relaciones matemáticas entre las coordenadas geográficas elipsoidales y las cartesianas ortogonales, y pasar de unas a otras a través de las mismas. Así, la Tierra quedará representada por un elipsoide de revolución de determinada forma y dimensiones, y los puntos del terreno estarán referenciados ya sea por coordenadas cartesianas ortogonales XYZ o por coordenadas geográficas elipsoidales ϕ , λ , h. En la carta ubicaremos a los mismos por coordenadas planas x e y.

FIGURA 1. Coordenadas de Referencia



Fuente: FUNDAMENTOS GEODESICOS RELACIONADOS CON EL GEOPOSICIONAMIENTO SATELITAL

2.4.1. Sistema WGS84.

El acrónimo WGS 84 deviene de World Geodetic System 1984 (Sistema geodésico mundial 1984). Se trata de un sistema de referencia creado por la Agencia de Mapeo del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América (Defense Mapping Agency - DMA) para sustentar la cartografía producida en dicha institución y las operaciones del Departamento de Defensa (DoD).

El WGS 84 es un Sistema Convencional Terrestre (CTS) tal que:

El origen de coordenadas X Y Z es el centro de masas de la Tierra, el eje Z pasa por el polo convencional terrestre (CTP) definido por el Bureau Internacional de la Hora (BIH) para la época 1984.0.

El eje X es la intersección entre el meridiano origen de longitudes definido por el BIH para la época 1984.0 y el plano del ecuador CTP.

El eje Y completa con los ejes anteriores una terna derecha de ejes fijos a la Tierra, está en el Ecuador, a 90° al este del eje X. El origen de la terna así definida sirve además de centro geométrico del elipsoide WGS 84, y el eje Z es su eje de revolución, El semieje mayor (a) del elipsoide 1984 mide 6378137 metros. El achatamiento $(a-b)/a$ siendo b el semieje menor, es $1/298.257223563$ Otros parámetros, además de los anteriores, son:

Constante de gravitación terrestre $GM = 3986005 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ Velocidad angular de la tierra $w = 7292115 \times 10^{-11} \text{ rad/seg}$ Coeficiente gravitacional de segundo grado normalizado $C20 = -484.16685 \times 10^{-6}$ Velocidad de la luz en el vacío $c = 299792458 \text{ m s}^{-1}$.

2.4.2. La Georreferenciación

Hablar de información espacial nos obliga a conocer algunos aspectos fundamentales de cartografía y geodesia para su correcta posición sobre el globo terráqueo. La difusión de los SIG y del GPS ha introducido en nuestro lenguaje cotidiano la palabra *georreferenciar*. Esta palabra de apariencia inofensiva encierra en verdad una serie de problemas, algunos de los cuales trataremos de discutir en este tema. En un sentido abstracto, georreferenciar significa asignar *algún tipo de coordenadas ligadas al terreno* a los objetos de interés, sean estos naturales, obras de ingeniería, los vértices de una parcela, etc. No nos proponemos discutir los *distintos tipos de coordenadas* que pueden utilizarse con este propósito (curvilíneas, rectangulares, proyectivas, etc.), sus ventajas o inconvenientes. Es este un tema muy vigente y muy interesante que bien podría ser motivo de otra contribución, pero nuestro objetivo ahora es discutir

qué entendemos por *ligadas al terreno*. Adquirir la información que integrará la base de datos es la operación más laboriosa y costosa involucrada en el desarrollo de un SIG.

2.5. Geodesia Espacial.

En geodesia clásica, la determinación de la latitud y longitud de un punto se basa en la observación de ángulos y distancias a otros puntos situados también sobre la superficie terrestre.

Frente a dicho esquema de trabajo, en la década de los 50 surge una nueva etapa de la geodesia debido al perfeccionamiento de nuevas técnicas de observación: radar, láser, doppler, interferométricas, altimétricas, etc., medida del tiempo con relojes atómicos, y nuevos métodos de cálculo electrónico, que contribuyen a la determinación muy precisa de ángulos y distancias. Esta nueva etapa de la geodesia se desarrolla efectuando observaciones exteriores a la tierra, tales como globos, satélites, la luna, fuentes extragalácticas, etc., dando lugar a un conjunto de técnicas que constituyen lo que se denomina geodesia espacial.

Con la geodesia espacial se han podido abordar dos cuestiones fundamentales pendientes, a saber, por una parte el enlace de los diversos elipsoides regionales, pudiéndose hablar por primera vez de geodesia global. Por otra, el llevar a cabo las determinaciones calculando a la vez las tres coordenadas, lo que ha inducido a muchos autores a referirse a este nuevo período como el de la geodesia tridimensional, remarcando de este modo la gran diferencia de los nuevos métodos con respecto a los de la geodesia clásica o bidimensional, en la que la altitud es obtenida de modo distinto que la longitud y latitud, haciendo uso de una superficie convencional (geoide o elipsoide).

El uso de los satélites en geodesia, tanto para determinar coordenadas como en estudios de tipo geodinámico, introduce un elemento apenas considerado en la geodesia clásica: la medida del tiempo, ya que los satélites son jalones móviles que se

desplazan a gran velocidad, por lo que podemos hablar de una geodesia tetradimensional. En otras palabras, buscando la posición de un receptor de señales de un satélite, deberemos determinar cuatro incógnitas. Otro aspecto importante de la geodesia con satélites es el papel relevante que adquiere el centro de gravedad terrestre.

En la actualidad la geodesia espacial tiene a su disposición varios tipos de satélites, tanto activos como pasivos, y los programas en desarrollo son muy diversos.

Dependiendo del tipo de satélites, estos se aplican a tareas tan diversas como: levantamientos geodésicos, desplazamientos geotécnicos, aplicaciones hidrográficas, posicionamiento dinámico, conservación del tiempo, o cuestiones globales tales como movimiento del polo, rotación de la Tierra, etc.

En la actualidad, la posibilidad de usar constelaciones de satélites como el sistema de posicionamiento global (GPS) con fines geodésicos y geodinámicos, han llevado a una auténtica revolución en los planteamientos de la geodesia. Baste con mencionar el hecho de que usar observaciones "simultáneas" es hoy una rutina. Sin embargo, esto mismo plantea cuestiones tales como la selección "óptima" de satélites a observar, o el modo más eficaz de procesar los datos recibidos, etc. Todo esto hace que muchos autores se refieran hoy a la geodesia bajo el nombre de geomática por la variedad de algoritmos disponibles y la necesidad de un soporte informática para el manejo de los mismos.

2.6. Sistema de Posicionamiento Global

GPS es la abreviatura de NAVSTAR GPS. Este es el acrónimo en inglés de NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System, (que en español significa Sistema de Posicionamiento Global con Sistema de Navegación por Tiempo y Distancia).

GPS es la solución para una de las incógnitas más antiguas que se ha planteado el hombre: el preguntarse — ¿En qué lugar de la tierra me encuentro? Uno puede pensar

que esta es una pregunta sencilla de responder. Nos podemos ubicar fácilmente observando los objetos que nos rodean, lo cual nos da una cierta posición en relación a los mismos.

Pero ¿qué sucede cuando no hay objetos a nuestro alrededor? ¿Y qué ocurre si nos encontramos en medio del desierto o del océano? Durante muchos siglos, este problema fue resuelto empleando al sol y las estrellas para navegar. Asimismo, en tierra, los topógrafos y los exploradores utilizaban puntos conocidos hacia los cuales hacían referencia para sus mediciones o para encontrar su camino.

Estos métodos cumplían su cometido dentro de ciertos límites, pues el Sol y las estrellas no pueden ser observados cuando el cielo está nublado. Además, aún efectuando las mediciones lo más precisas posibles, la posición no podía ser determinada en forma muy exacta.

El GPS es un sistema basado en Satélites artificiales, dispuestos en una constelación de 24 de ellos, para brindar al usuario una posición precisa. En este punto es importante definir el término “precisión”.

Para un excursionista o un soldado que se encuentre en el desierto, la precisión significa más o menos 15m. Para un barco en aguas costeras, la precisión significa 5m. Para un topógrafo, 1cm o menos. El GPS se puede emplear para obtener todos estos rangos de precisión, la diferencia radicaré en el tipo de receptor a emplear y en la técnica aplicada.

El GPS fue diseñado originalmente para emplearse con fines militares, en cualquier momento y sobre cualquier punto de la superficie terrestre. Poco tiempo después de presentarse las propuestas originales de este sistema, resultaba claro que el GPS también podía ser utilizado en aplicaciones civiles y no únicamente para obtener el posicionamiento personal (como era previsto para los fines militares). Las dos primeras aplicaciones principales de tipo civil fueron aquellas para navegación y topografía. Hoy en día, el rango de aplicaciones va desde la navegación de

automóviles o la administración de una flotilla de camiones, hasta la automatización de maquinaria de construcción.

2.7. Redes Geodésicas.

El establecimiento de redes geodésicas es uno de los objetivos principales que se persiguen con la Geodesia, pues en ellas se basarán una gran cantidad de estudios y trabajos posteriores (levantamientos topográficos, etc.).

Las redes geodésicas consisten básicamente en una serie de puntos distribuidos por toda la superficie de un país, formando una malla de triángulos, en los cuales, tras un proceso de complejos cálculos, se conocen todos sus elementos, incluyendo las coordenadas de todos sus vértices, a los que denominaremos vértices geodésicos.

Para determinar las coordenadas de los vértices geodésicos se parte de las del Punto Astronómico Fundamental, que se determinan por métodos exclusivamente astronómicos, como ya hemos dicho anteriormente. Posteriormente, se irán determinando el resto de puntos mediante visuales que formen una malla triangulada. Es necesario medir, con la máxima precisión, los tres ángulos de cada triángulo (triangulación), además de una línea determinada por dos vértices que suele tomarse hacia el centro del país, denominándose base, que, como su propio nombre indica, es la base de toda la red geodésica, razón por la cual es imprescindible establecerla con absoluta precisión, muy por encima de la que estamos acostumbrados a obtener en los trabajos topográficos convencionales.

A partir de la base, que constituye el lado de uno de los triángulos, y de la medición de los ángulos, se van determinando el resto de coordenadas, teniendo en cuenta que estos triángulos están sobre el Elipsoide y sus lados serán líneas geodésicas (lo que complica los cálculos enormemente), y apoyándose unos triángulos en otros.

La Geodesia también necesita conocer la orientación, y se determina, en cada punto geodésico, la dirección Norte-Sur, que es la intersección del plano horizontal, tangente al elipsoide en ese punto y el plano del meridiano que pasa por el mismo

punto. Esta línea se llama meridiana. El ángulo que forma la meridiana con una dirección dada del terreno se llama acimut de dicha dirección.

Para evitar en lo posible la lógica acumulación de errores que supone el cálculo de unos triángulos apoyados en los anteriores, se establecen redes geodésicas de distinta precisión u orden.

Generalmente se disponen redes de primero, segundo y tercer orden, con precisiones progresivamente decrecientes.

2.8. Teledetección

El término teledetección es una traducción del inglés 'remote sensing', y se refiere no sólo a la captación de datos desde el aire o desde el espacio sino también a su posterior tratamiento. Una definición más formal la describe como la técnica de adquisición y posterior tratamiento de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, en virtud de la interacción electromagnética existente entre la tierra y el sensor, siendo la fuente de radiación bien proveniente del sol (teledetección pasiva) o del propio sensor (teledetección activa).

Nuestros sentidos perciben un objeto sólo cuando pueden descifrar la información que éste les envía y la propia visión es, en sí, un proceso de teledetección. Los tres elementos principales en un sistema de teledetección son:

1. **Sensor**, el ojo.
2. **La película fotográfica**, objeto observado
3. **Flujo energético**, que permite poner a los dos anteriores en relación. Este flujo procede del objeto por reflexión de la luz solar (color de los objetos), por emisión propia o también podría tratarse de energía emitida por el propio sensor y reflejada por el objeto, en cuyo caso la teledetección recibe el nombre de **ACTIVA**, por oposición a teledetección **PASIVA**, cuando la fuente energética es el sol.

La posibilidad de adquirir información a distancia se basa en lo específico de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Todos los objetos tienen una respuesta espectral propia y además esta combinación espectral es similar a la que presentan otros objetos o superficies de las mismas características u homogeneidad.

2.9. Fotogrametría

La fotogrametría es la disciplina que utiliza las fotografías para la obtención de mapas de terrenos. Los levantamientos fotogramétricos comprenden la obtención de datos y mediciones precisas a partir de fotografías del terreno tomadas con cámaras especiales u otros instrumentos sensores, ya sea desde aviones (fotogrametría aérea) o desde puntos elevados del terreno (fotogrametría terrestre) y que tiene aplicación en trabajos topográficos. Se utilizan los principios de la perspectiva para la proyección sobre planos a escala, de los detalles que figuran en las fotografías. Los trabajos fotogramétricos deben apoyarse sobre puntos visibles y localizados por métodos de triangulación topográfica o geodésicos que sirven de control tanto planimétrico como altimétrico. Como una derivación de la fotogrametría, está la fotointerpretación que se emplea para el análisis cualitativo de los terrenos.

La fotogrametría aérea se basa en fotografías tomadas desde aviones equipados para el trabajo, en combinación de las técnicas de aerotriangulación analítica para establecer posiciones de control para la obtención de proyecciones reales del terreno y para hacer comprobaciones con una menor precisión que la obtenida en las redes primarias de control geodésico.

Tiene las ventajas de la rapidez con que se hace el trabajo, la profusión de los detalles y su empleo en lugares de difícil o imposible acceso desde el propio terreno. Esta disciplina se emplea tanto para fines militares, como para los levantamientos topográficos generales, anteproyecto de carreteras, canales y usos agrícolas catastrales, estudios de tránsito, puertos, urbanismo, etc.

La fotogrametría terrestre hace los levantamientos basados en fotografías tomadas desde estaciones situadas sobre el terreno, constituye un excelente medio auxiliar para los levantamientos topográficos clásicos, especialmente en el trazado de planos a pequeña escala de zonas montañosas y para el levantamiento de accidentes de tránsito. El trabajo consiste en esencia en tomar fotografía desde dos o más estaciones adecuadas y utilizarlas después para obtener los detalles del terreno fotografiado, tanto en planta como en alzado o perfil.

Las operaciones corrientes en un levantamiento fotogramétrico en general son las siguientes:

Estudios sobre planos disponibles de la región para planificar el trabajo, determinar las líneas de vuelo, en función de la distancia focal de la cámara, la escala de la fotografía, la superposición o traslapes de las fotografías, tanto longitudinal como transversal, el tamaño de los negativos, la altura de vuelo, etc. · Reconocimiento del terreno a fotografiar.

Fijación de los puntos de control terrestre básico, tanto planimétricos como altimétricos para lograr la correcta orientación y localización de los puntos sobre la fotografía.

Toma, desarrollo, clasificación, y numeración de las fotografías.

Ensamble de mosaicos o disposición secuencial de las fotografías en conjunto de tal manera que representen el área deseada.

Elaboración de planos obtenidos por el sistema de restitución fotogramétrica y sus aplicaciones para proyectos de ingeniería.

CAPÍTULO III

SISTEMA LIDAR

3.1. Introducción

La información acerca de los elementos en la superficie de la Tierra tiene una gran importancia para el análisis y estudios de diversa índole en los campos de la Ingeniería Civil y Ciencias de la Tierra. El estudio de la forma del terreno constituye un importante insumo para muchos profesionales como Ingenieros, Geólogos, Hidrólogos, Cartógrafos y Fuerzas Armadas. La superficie del terreno puede ser representada en un modelo simplificado que sea lo suficientemente próximo a la realidad, debido a que se cuenta con un número muy abundante de puntos que la componen. Para realizar dicho modelo, se procesan los puntos mediante el uso de sistemas computarizados con la finalidad de obtener un Modelo Digital de Terreno y así contar con esta fuente de información para el estudio de la superficie del terreno.

Considerando la importancia de los datos de relieve en el mundo para el modelado del terreno que demandan mayor exactitud y oportunidad en su disponibilidad se han venido adoptando las mejores prácticas y estándares internacionales que involucran el uso de tecnología de punta, entre las que se destaca el uso de la percepción remota aerotransportada para la georreferencia espacial de fenómenos naturales y culturales.

Para la generación del MDT se pueden utilizar variadas metodologías y formas. Una de estas metodologías está cambiando la forma de obtención de datos por su rapidez y su capacidad de manejar grandes cantidades de información, es el sistema Lidar que consiste básicamente en lo siguiente: el equipo aerotransportado emite pulsos láser que rebotan sobre los objetos del terreno y se registra el tiempo que tarda la señal en regresar al detector, al conocer la posición, el ángulo y el tiempo de ida y regreso mediante un GPS y una unidad de medida inercial (IMU), se puede calcular la ubicación geoespacial para cada pulso generándose una fiel representación del terreno levantado.

3.2. Fundamentos de la tecnología LIDAR

3.2.1. Principios

La tecnología LIDAR comprende la operación de un sistema que integra una serie de sensores, que juntos permiten determinar la posición tridimensional de puntos que están sobre la superficie terrestre.

Para Ackermann, 1999, la técnica se establece con el suceso de los últimos años, por haber sido un desenvolvimiento tecnológicamente dirigido.

Esto significa, que si no fuese por la incorporación de diversas corrientes científicas y diferentes tecnologías, unidas en un único y complejo paquete de componentes electrónicos, la referida técnica no sería posible. Así mismo, entre las corrientes científicas y tecnológicas utilizadas para la técnica LIDAR, se las puede citar:

- El desarrollo de los LASER de alta potencia que operan en la región del infrarrojo próximo.
- Las técnicas de posicionamiento utilizando GPS, marcado por los recientes alcances y metodologías como el Real Time Kinematic (RTK) y/o post-procesado, permitiendo la posición relativa de un receptor en movimiento (en relación a otro fijo) es determinada con precisión del orden de pocos centímetros [Scherzinger, 2001].
- El desarrollo de giroscopios a LASER (Ring LASER Gyro –RLG), base para el funcionamiento de los modernos sistemas de navegación inercial (INS) [Scherzinger, 2001].
- El desarrollo de la tecnología Direct Georeferencing (DG) por medio de la integración GPS/INS, lo que posibilita la medida directa de la posición de los parámetros de orientación de un sensor remoto, a fin de estabilizar y registrar los datos colectados, en coordenadas geográficas [Scherzinger, 2001].

Básicamente, un sistema LIDAR comprende dos segmentos: el aéreo y el terrestre. El primero consiste de toda la electrónica que contiene el sistema LIDAR se considera

como el firmware (software dedicado a un hardware) responsable de la medida y registro de los datos colectados por diversos sensores, siendo normalmente denominado “sistema activo” [Optech, 2000].

El segundo consiste en los hardware y software responsables para la transformación de los datos colectados en puntos de coordenadas 3D georreferenciadas, siendo denominado “sistema relativo” [Optech, 2000].

El segmento aéreo, de modo general, incluye las unidades descritas a continuación.

3.2.1.1. Unidad LASER de Medida

Las aplicaciones genéricas del LASER dentro de la teledetección van desde aplicaciones medioambientales (control de polución, composición atmósfera, detección de contaminantes específicos) hasta la generación de modelos de elevaciones. En teledetección el LASER debe emitir su pulso electromagnético con una gran potencia, con una corta duración, con un ancho de banda estrecho y con una baja divergencia.

El espectro electromagnético que se muestra en la figura 2 va desde el ultravioleta hasta al infrarrojo cercano y los diodos usados para poder identificar esta energía electromagnética pueden ser sólidos, de gas, líquidos teñidos orgánicamente o semiconductores.

Los diodos más usados para generar un MDE son sólidos, de alta energía y pulso corto. Pueden ser:

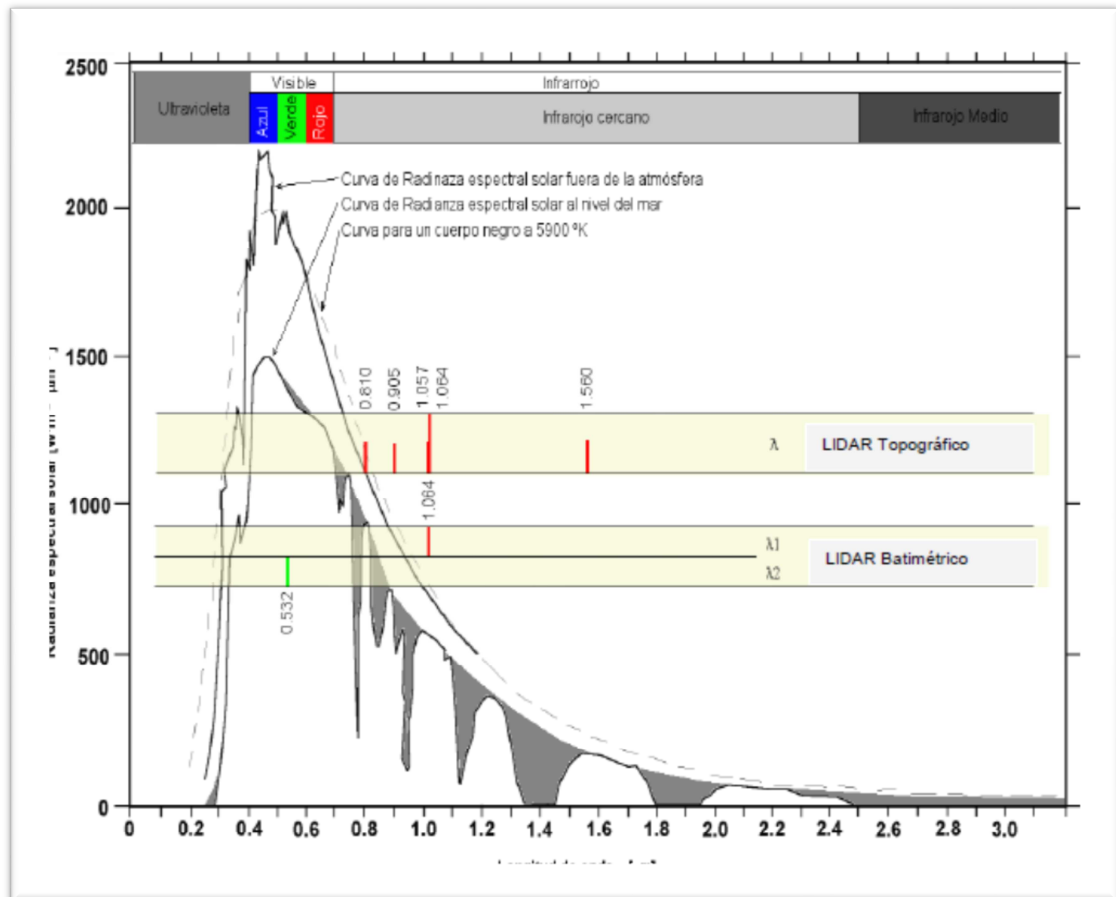
- Nd – YAG. El neodimio es la impureza del $Y_3Al_2O_{15}$ (Itrio-aluminio-granate). Su longitud de onda (λ) es de 1064nm. El ancho del pulso varía entre 0.005 y 0.015 μs y la divergencia entre 0.08 y 35 mrad. Es el más usado en los sistemas actuales.
- Rubí. Su longitud de onda (λ) es de 694.3nm.
- Alejandrita. Su longitud de onda es modulable ($\lambda \in [701: 818nm]$).

Según la banda de emisión se distinguen dos tipos de sensores: en la banda del infrarrojo cercano para aplicaciones topográficas terrestres sin superficies de agua implicadas ($\lambda \in [800\text{nm}: 1600\text{nm}]$); y en la banda verde del visible para aplicaciones batimétricas ($\lambda \in [500\text{nm}: 600\text{nm}]$). Ambos casos se presentan en la figura 2. La longitud de onda (λ) más usada en los sensores terrestres están en la dimensión de 1064nm. [Measures 1992].

En la figura 2, también se han superpuesto las curvas de radianza espectral solar ($E\lambda$) en el nivel del mar y fuera de la atmósfera para dar a conocer que el sol en su máxima emitancia espectral se manifiesta en torno a los [480nm:500nm] que coincide con el color verde apreciado por nuestros ojos y se asemeja a la de un cuerpo negro. Según Chuvieco, 1999, el sol presenta una elevada emitancia entre [300nm: 2000nm] la cual se denomina dominio óptico del espectro y se constituye la región de mayor interés para la observación remota de la superficie terrestre.

En la figura 2 se observa que las longitudes elegidas por los fabricantes se encuentran donde la absorción en la atmósfera es menor.

FIGURA 2: Longitudes de onda usadas actualmente por los fabricantes de sistemas LIDAR.



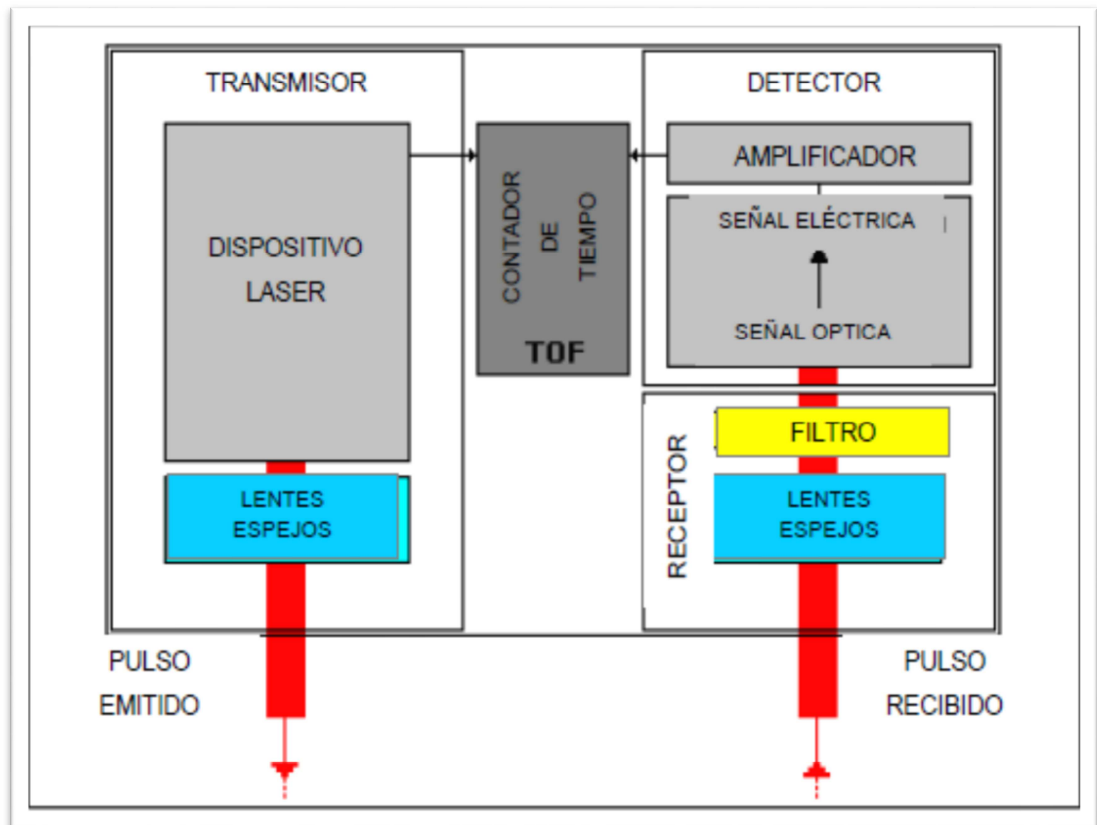
Fuente: Measures, 1992.

La “unidad LASER de medida” o LASER Rangefinder (LRF) [Baltasavias, 1999] es el dispositivo responsable para la medida de las distancias entre el sistema LIDAR y la superficie del terreno.

Baltasavias, 1999 describe el LRF como un dispositivo que comprende básicamente, de un LASER pulsado, la óptica (lentes y espejos) de transmisión y de recepción de los pulsos LASER, un detector, un amplificador y un contador de tiempo.

El LRF (LASER Rangefinder) utilizado por un sistema LIDAR también es dotado de un filtro óptico espectral de inferencia, cuya función es permitir que solamente la onda emitida por el LASER, alcance el detector.

FIGURA 3: Elementos de un LRF



Fuente: Creada por Baltasavias, 1999.

Así, las distancias entre un sistema LIDAR y la superficie del terreno son determinadas en función de la velocidad y del tiempo de viaje de cada pulso LASER emitido y recibido de vuelta por el LRF. Este método de medida de distancias es conocido, como Time of Flight (TOF) [Wehr & Lohr, 1999].

Es importante resaltar que el LRF, por ser parte de un sistema que es aerotransportado, tiene los elementos ópticos de transmisión y recepción de los pulsos

LASER direccionados hacia la superficie del terreno, apuntando verticalmente hacia abajo, en dirección del Nadir.

3.2.1.2. Unidad de Barrido

La unidad de barrido o scanner es el dispositivo responsable para la deflexión de los pulsos LASER emitidos por la LRF, transversalmente a la línea de vuelo, y como resultado se tiene una faja de terreno mostrada a lo largo de esta línea.

Todo scanner emplea un principio o método de barrido, cada principio o método, resulta un patrón de barrido característico (forma como se encuentran distribuidos, sobre la faja de terreno, o puntos medidos).

En el cuadro 1, creado a partir de información contenida en Baltasavias, 1999, identifica los principios de barrido más comunes entre los sistemas LIDAR existentes y sus correspondientes patrones de barrido.

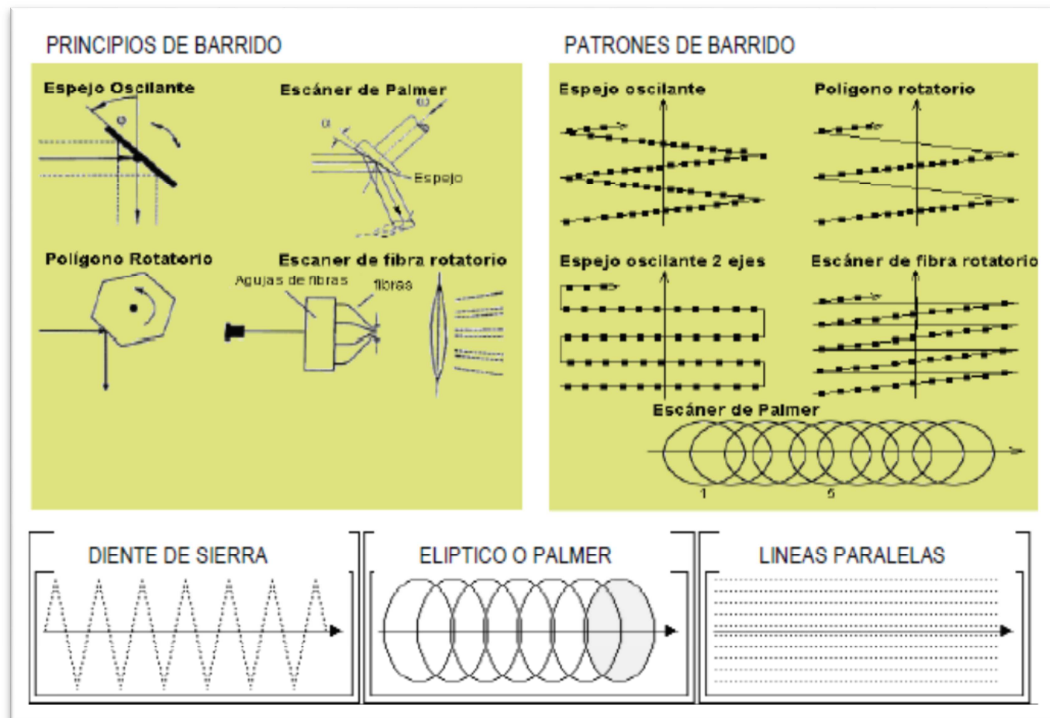
CUADRO 1: Principios y patrones de barrido

BARRIDO		
PRINCIPIO	PATRON	
	Direccion	Tipo
Oscillatting Mirror (Lente Oscilador)	Bidireccional	Zig-Zag Diente de Sierra
Oscillatting or Rotating Mirror (Lente de Oscilacion y de Rotacion)	Unidireccional	Lineas Paralelas
Nutating Mirror (Lente Oscilador)	Multidireccional	Eliptico
Two -Axis Galvanometer (Dos ejes Galvanometricos)	Bidireccional	Zig-Zag
	Unidireccional	Lineas Paralelas
Optical Fiber (Fibra Optica)	Unidireccional	Lineas Paralelas

Fuente: Baltasavias, 1999

En la figura 4, muestra los principios y patrones de barrido presentados en el cuadro anterior indicando la dirección de vuelo.

FIGURA 4: Patrones de barrido



Fuente: Lohmann, 2003

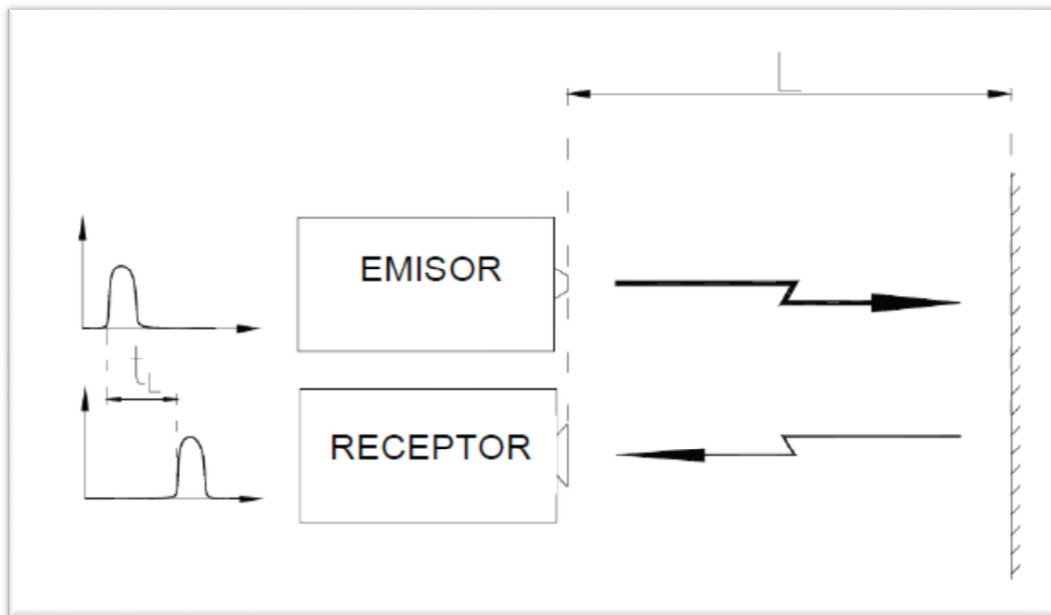
Los scanners funcionan a base de espejos que normalmente se encuentran integrados a la óptica de transmisor de pulsos LASER (LRF). Ambos (LRF y scanner) forman parte de un componente del sistema LIDAR y se denomina “cabeza del sensor”.

La forma más directa de la medición de la distancia (L) es determinar el tiempo del recorrido del pulso luminoso, midiendo el intervalo de tiempo (t_L) entre la emisión y la recepción del pulso, como se muestra en la figura 5 y en las ecuaciones 3.1 y 3.2.

El tiempo (t_L) está dada por la ecuación:

$$t_L = 2 * \left(\frac{L}{c}\right) \quad \text{Ecuación 3.1}$$

FIGURA 5: Funcionamiento del medidor de distancia del pulso.



Fuente: Wehr & Lohr, 1999

La onda (L) es la distancia entre el sensor y el objeto a la velocidad de la luz 299.792.458 m/s (c), de la ecuación anterior se tiene como resultado la distancia proporcional a la resolución de la medición de tiempo y se puede definir como:

$$\Delta L = \frac{1}{2} * c * \Delta t_L \quad \text{Ecuación 3.2}$$

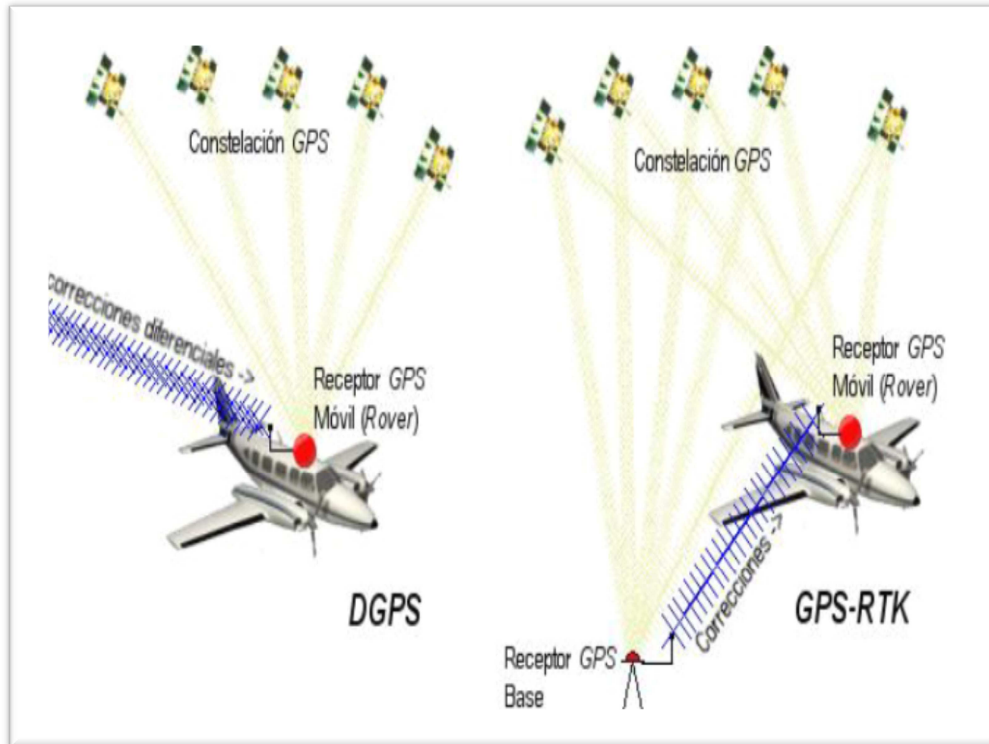
3.2.1.3. Unidad de Posicionamiento (Sistema GPS)

La unidad de posicionamiento es normalmente constituida por un receptor GPS de doble frecuencia cuya antena está localizada en la parte superior externa de la aeronave utilizada como plataforma y por tanto, desarticulada (offset) con relación a la unidad de medida de barrido (cabeza del sensor), generalmente acomodada en una abertura en la parte inferior del fuselaje de la aeronave.

La mencionada unidad de posicionamiento requiere la utilización conjunta de otro receptor GPS, también de doble frecuencia, localizado sobre la superficie del terreno, en una estación de referencia (punto con coordenadas conocidas). En función de la distancia de la línea de vuelo.

La frecuencia del sistema GPS varía entre 1Hz y 10Hz. Los sistemas disponibles trabajan en tiempo real y/o en post-proceso. En tiempo real con DGPS o GPS-RTK (figura 6). El segundo es difícilmente aplicable en áreas extensas debido al radio de acción del radio-enlace (correcciones que se envían al receptor móvil). Las precisiones altimétricas en ambos sistemas son entre 30cm y de 10cm a 15cm respectivamente. Y las precisiones en (X, Y) están entre los 10cm a 15cm [Huising y Gomes, 1998; Maune, 2001].

FIGURA 6: Modos de trabajo GPS en tiempo real



Fuente: Maune, 2001

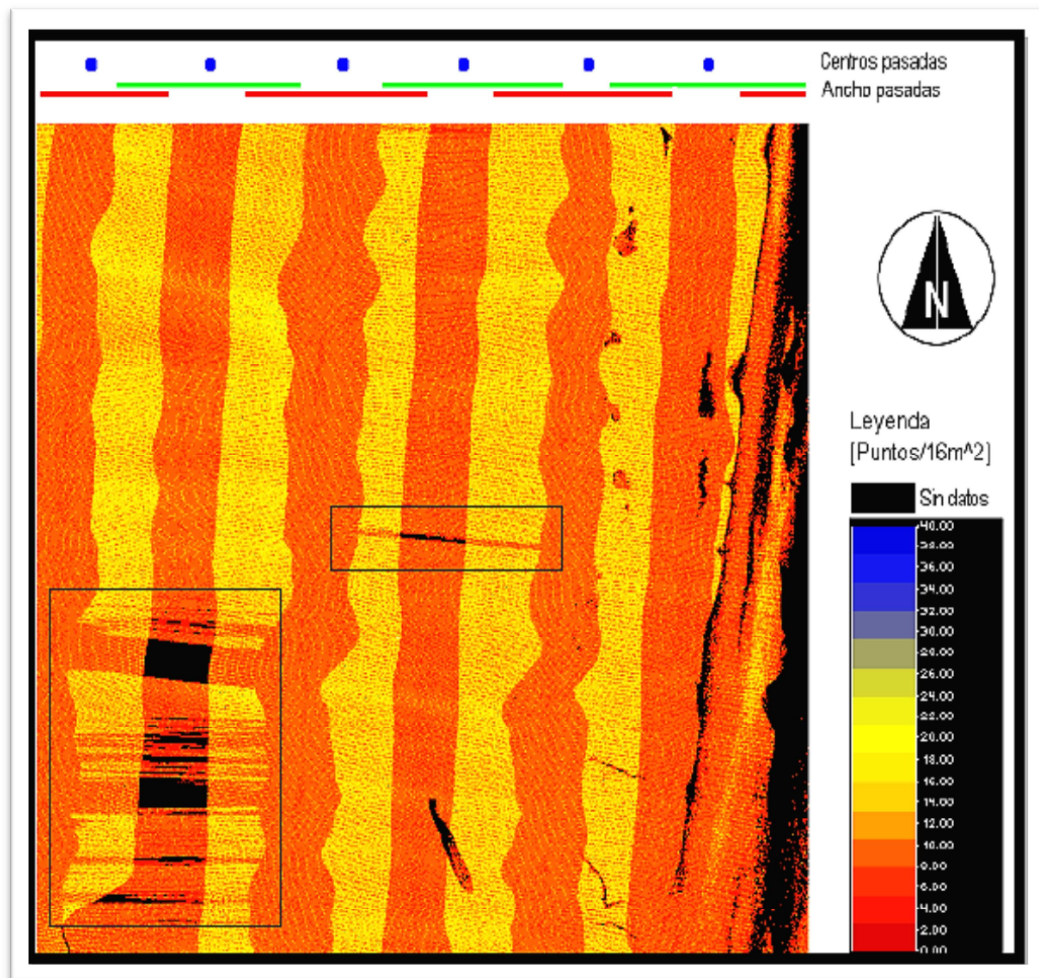
El modo GPS-RTK se basa en la resolución cinemática de las ambigüedades KAR (Kinematic Ambiguity Resolution). Ésta se aplica cuando el equipo móvil está en movimiento durante la inicialización. La solución es posible sólo con la fase o con número de épocas analizadas se resuelven las ambigüedades y se obtienen coordenadas precisas para la trayectoria. Cuando se han fijado las ambigüedades se ha completado la fase de inicialización.

La combinación con el sistema inercial permite mejorar la inicialización, la precisión de las coordenadas y la reparación de pérdidas de ciclos con mayor facilidad [Lee, 2004].

Estos modos de trabajo (DGPS Y GPS-RTK) no están libres de efectos cinemáticos, troposféricos o de multicamino (multipath). Las pérdidas de ciclos son la mayor fuente de problemas.

Para su reparación se requieren más satélites que el número de ambigüedades y de pérdidas de ciclo sumadas. Hasta que no se subsana, el levantamiento queda falto de puntos LASER como se muestra en la figura 7.

FIGURA 7. Pérdida de información de los puntos LASER



Fuente: Lee, 2004

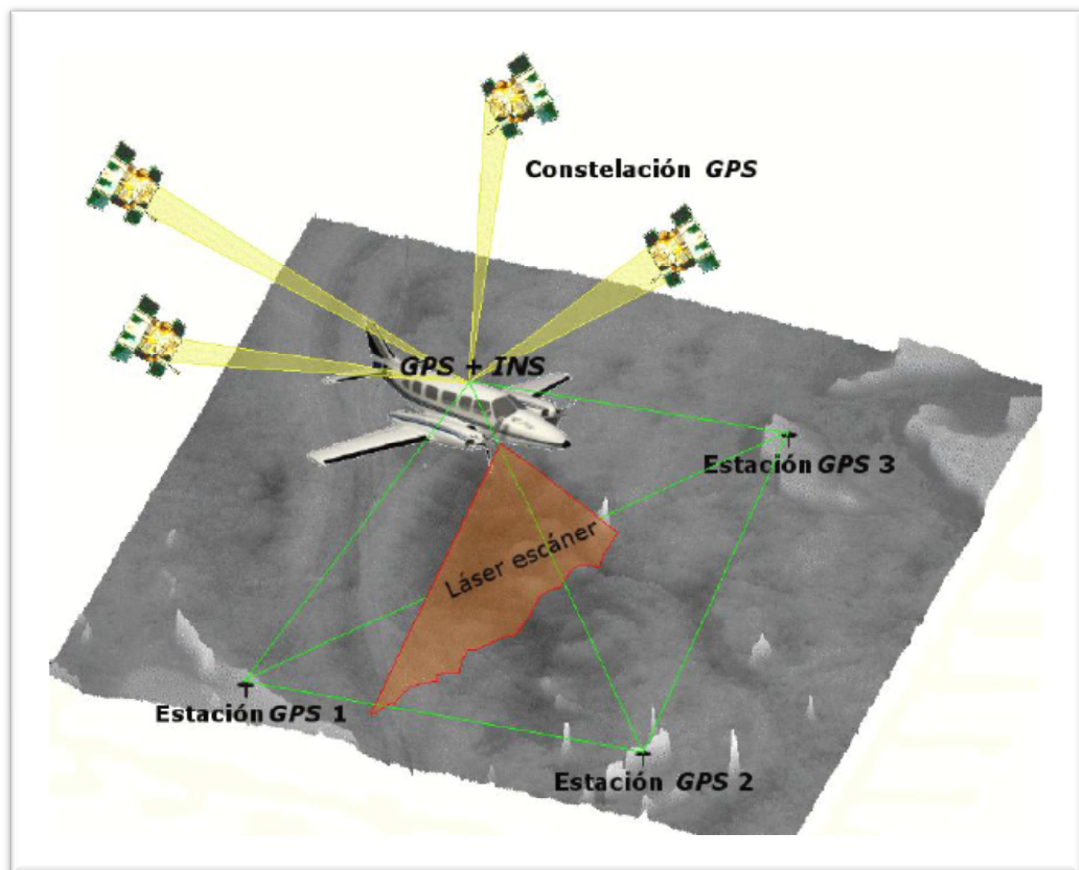
La resolución en post-proceso requiere establecer una red GPS en tierra (figura 8).

Aunque el número mínimo de estaciones es una, es necesario usar más para resultados precisos [Kraus y Pfeifer, 2001]. Su distribución debe ser tal que las líneas

base con el receptor móvil sean inferiores a 20km. Fabricantes de software de post-proceso (GrafNav de Waypoint) recomiendan líneas base inferiores a 10km.

Durante el vuelo LIDAR se recomienda que el número de satélites sea superior a 5 y el PDOP (Position Dilution Of Precision) < 3 para evitar fallas en la resolución de ambigüedades.

FIGURA 8: Esquema de trabajo del sistema LIDAR



Fuente: Kraus y Pfeifer, 2001

También es importante resaltar que el receptor GPS utilizado por un sistema LIDAR se encuentra integrado, física y lógicamente, a la unidad de medida inercial (descrita

en el siguiente subtítulo) utilizada por el mismo sistema, no debiendo ser confundida con el receptor GPS normalmente utilizada por la aeronave para la navegación.

Sistema y Marco de Referencia de la Densificación GPS.

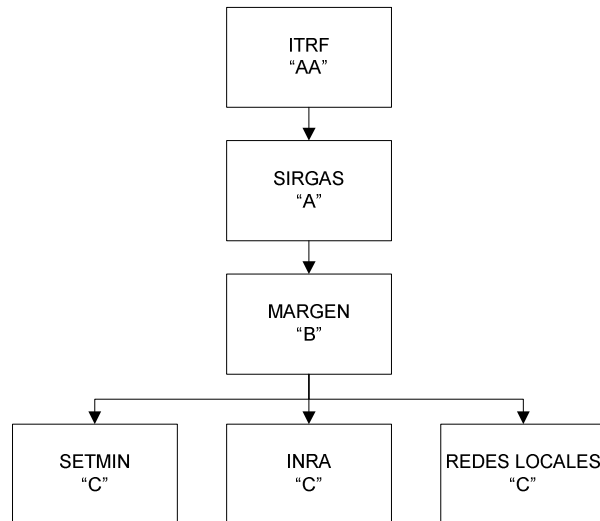
El Sistema de Referencia Internacional (ITRS) está materializado por el Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF) el cual es un conjunto de puntos establecidos con alta precisión que incorporan la variable dinámica de la tierra.

El Marco de Referencia Geocéntrico Nacional (MARGEN) de Bolivia, constituye la Red Geodésica Fundamental que sirve de referencia para todos los proyectos geodésicos de posicionamiento en nuestro País. Este Marco de Referencia Nacional ha sido densificado a partir de los Puntos de la Red SIRGAS establecidos en nuestro territorio, que a su vez corresponden al ITRF. El proyecto SIRGAS inició su primera campaña en Bolivia el año 1995 en el cual se establecieron seis estaciones de control en todo el País, con sesiones de 10 días continuos de observación. Durante la campaña 2000 estas estaciones fueron reobservadas e incrementándose 3 nuevas estaciones, contándose a la fecha con nueve estaciones SIRGAS en todo el País.

La Red Geodésica Nacional, que posteriormente se la denominó “RED MARGEN”, fue enlazada a la Red SIRGAS, mediante observaciones de 8 a 10 días, obteniéndose de esa manera una Red Geocéntrica Nacional de clase “B” que sirve de referencia para todo proyecto geodésico de alta precisión.

Para una mejor comprensión de la jerarquía de las Redes GPS, se muestra la Figura 9.

Figura 9. Jerarquía de las Redes GPS



3.2.1.4.Unidad de imagen

Un sistema LIDAR, a pesar de ser clasificado como un sistema de sensoriamiento remoto activo, no es capaz de registrar, en forma de imagen, la muestra de puntos sobre la superficie terrestre.

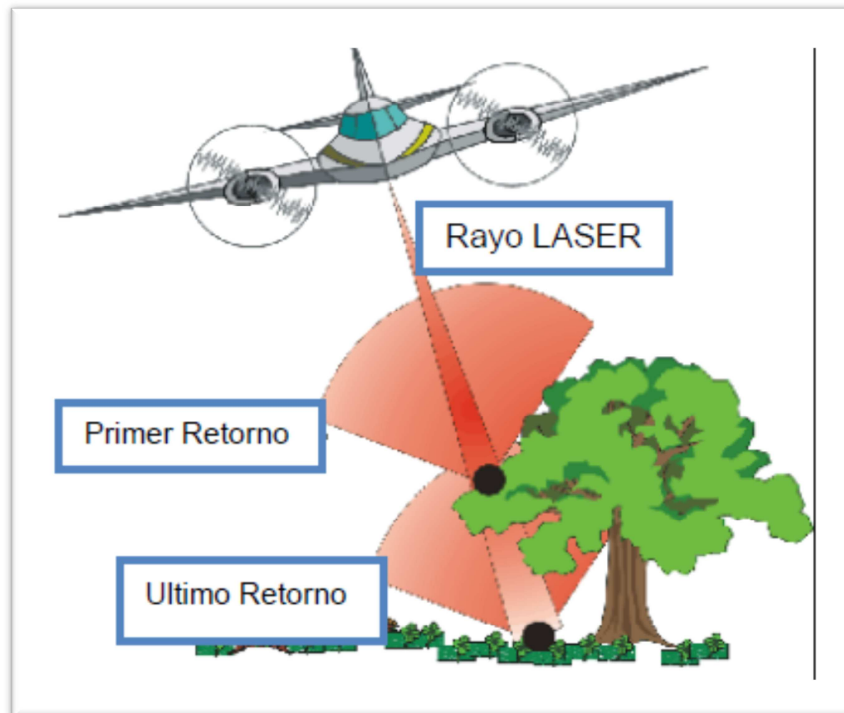
Esto se debe a que los sensores que integran el sistema son capaces de registrar datos relativos en la posición y los movimientos dinámicos de la plataforma, más el intervalo de tiempo y la inclinación del scanner, para cada pulso de LASER emitido.

Dado que cada pulso LASER, debido a la divergencia de su rayo termina llegando a la superficie del terreno no en un solo punto, sino en un área de tamaño predeterminado, este rayo puede alcanzar al mismo tiempo parte de un objeto situado en mencionada superficie (por ejemplo, la copa de un árbol o el techo de una edificación) y parte de la superficie (por ejemplo, suelo).

Por lo tanto, parte del rayo que llega y se refleja en un objeto determinado (más próximo) llega antes al sensor y es registrado por él como primer retorno (o eco) de pulso emitido, en cuanto la parte del rayo que llega a la superficie del terreno (más

tarde) y que retorna al sensor después, se registra como el último retorno. Este principio se ilustra en la figura 10.

FIGURA 10: Retornos de un pulso LASER



Fuente: Creación del Instituto Cartográfico del Brasil

La capacidad de registrar múltiples retornos (mínimo 2 y máximo 5) por pulso son características de los sistemas LIDAR más modernos, pues los primeros modelos lanzados al mercado, registraban apenas dos retornos (el primero y el último).

La tecnología que permite el registro de múltiples retornos por pulso permite, también, el registro de la intensidad o reflectancia de cada uno de estos retornos.

Por tanto, en la práctica, aunque el sistema LIDAR no se desarrolló para la captura directa de imágenes de la superficie del terreno, los resultados del procesamiento de datos colectados permiten generar los siguientes tipos de imágenes:

Imágenes de Distancia y Elevación (Range Image and Elevation Image). Esta imagen está formada por una matriz de puntos cuyas posiciones son determinadas por las coordenadas 2D georeferenciadas (E, N). A cada punto se le atribuye un valor de color que corresponde a su lejanía del sensor, es decir, que corresponde a su altura (H).

Por lo general, la escala de colores adaptados para la representación referida a una matriz de puntos está comprendida entre los colores rojo y azul. Así mismo, los puntos rojos deben ser interpretados como aquellos que se encontraban más próximos al sensor durante la colecta (puntos de mayor altitud), mientras los puntos azules deben ser interpretados como aquellos que se encontraban más distantes (puntos de menor altitud).

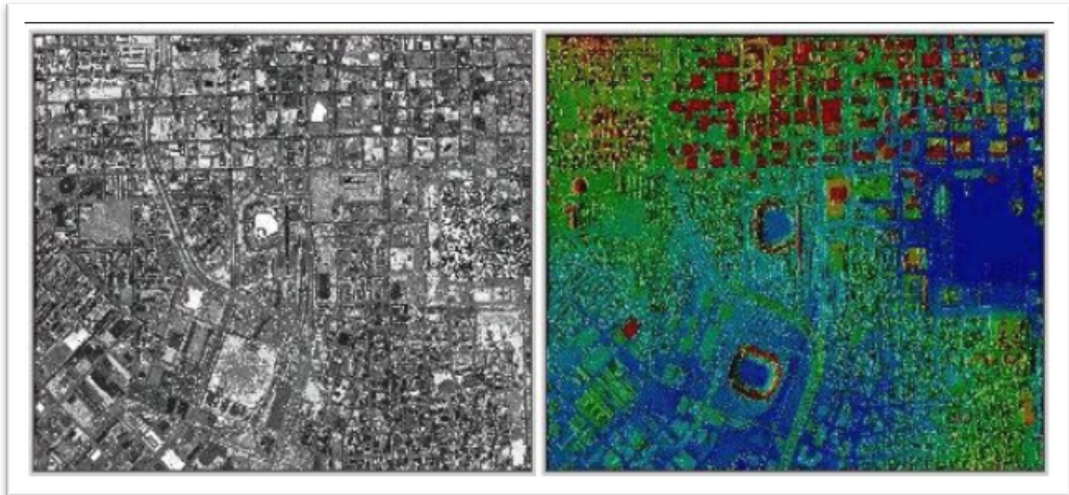
Los puntos de la superficie del terreno que absorben gran parte de la radiación LASER, en estos casos, no retornan ningún tipo de señal al sensor, suelen estar representados de color negro.

Imagen de Intensidad (Intensity Image). Esta imagen está formada por una matriz de puntos cuyas posiciones son determinadas por sus coordenadas 2D georeferenciadas (E, N).

Sin embargo, en lugar de asignar un valor de color que corresponde a la altura (H) de cada punto, se le asigna un valor de color (por lo general dentro de un rango de 256 tonos de gris), que corresponde a la cantidad de luz LASER reflejada en cada punto sobre la superficie del terreno.

La figura 11 muestra las imágenes de la intensidad y la elevación (relativas al primer retorno) de la misma zona de la ciudad de Baltimore (EE. UU.), obtenidas a partir de una colecta realizada el 09/1999 con el sistema ALTM 1210 (Optech Inc.).

FIGURA 11: Imágenes de intensidad y de elevación.



Fuente: Optech, 2001.

Para Axelsson, 1998 por el contrario indica que las imágenes intensidad tienen una resolución espacial y radiométrica limitada en comparación con las fotografías aéreas obtenidas por técnicas de fotogrametría.

Esta es la razón para que los sistemas LIDAR comercializados vengán integrados a sensores de toma de imágenes pasivos de diferentes tipos (cámaras de video analógicas o digitales, cámaras digitales no métricas, cámaras métricas analógicas o digitales, sensores multi e hiperspectrales).

Según Baltsavias, 1999, las cámaras de video que normalmente acompañan a los sistemas LIDAR tienen como objetivo documentar la superficie del terreno levantado y permitir la inspección visual de los vuelos realizados. Tales cámaras, del mismo modo como algunas de las unidades descritas anteriormente (LRF, scanner, IMU), se encuentran alojadas en la cabeza del sensor, y las imágenes obtenidas, son registradas y marcadas temporalmente con el fin de permitir que posteriormente sean tratadas conjuntamente con los datos colectados.

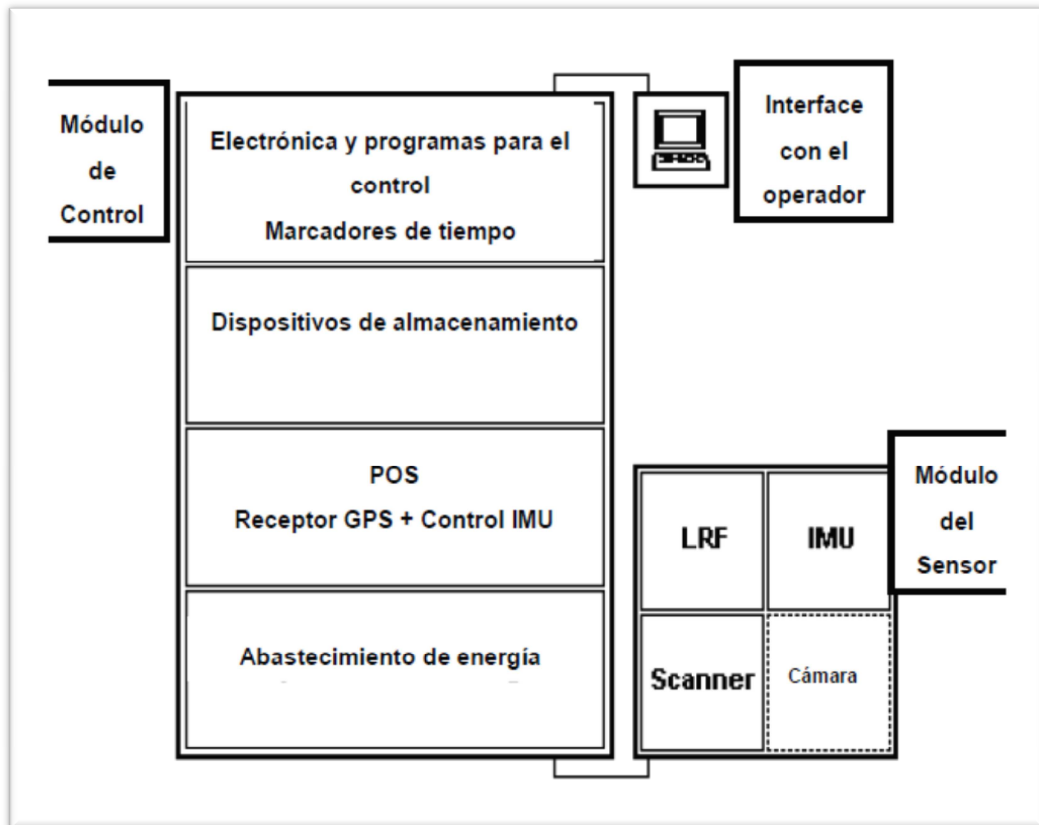
3.2.1.5. Unidad de Control

La unidad de control es responsable, básicamente por el abastecimiento de energía necesaria para el funcionamiento de las demás unidades, para el contador y marcador de tiempo relativo a cada medida realizada por el sistema y para el almacenamiento de los datos colectados (LRF, scanner, GPS/IMU y cámara).

La unidad de control está comprendida, por los siguientes elementos:

- Electrónica y programas para el control del LRF, scanner, GPS/IMU y cámara (incluyendo los marcadores de tiempo).
- Módulo para el abastecimiento de energía.
- Dispositivos para el registro de datos colectados.
- Interface del operador.
- Cables conectores.

La figura 12 ilustra, esquemáticamente, como se encuentran integradas las unidades que componen el segmento aéreo de un sistema LIDAR.

FIGURA 12: Sistema LIDAR: Segmento aéreo (MODULOS)

FUENTE: Baltasavias, 1999

El segmento terrestre, a su vez, comprende de las siguientes unidades.

3.2.1.6. Estaciones de Referencia Terrestres

La técnica LIDAR, diferente a la técnica fotogramétrica convencional (donde es posible establecer un control terrestre por medio de puntos fotoidentificables), se efectúan los levantamientos solamente con el uso de estaciones base GPS.

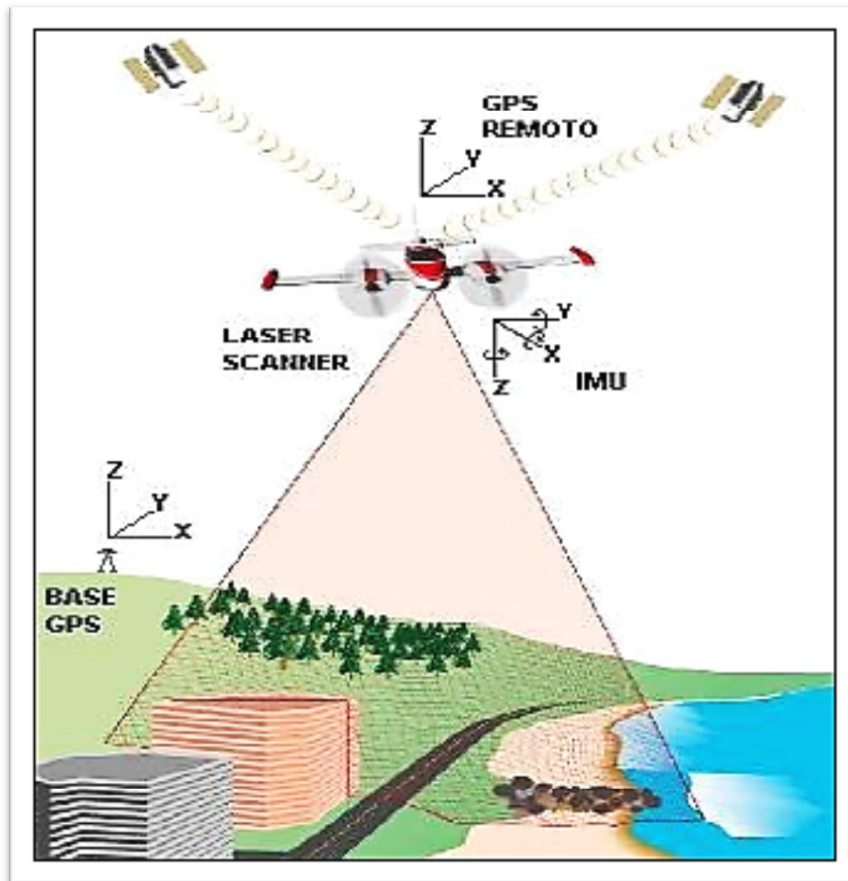
Así mismo, las observaciones hechas en estas estaciones y la estación móvil (aeronave), son integradas y post-procesadas a fin de “referenciar los puntos LASER medidos a un sistema de coordenadas externa” [Ackermann, 1999].

El número de estaciones base de referencia, se presenta como una distribución de distancias en relación a la plataforma, depende de la finalidad del levantamiento realizado.

Además se debe contar con líneas bases establecidas por métodos de topografía clásica. Estas deben formar un conjunto de puntos de nivelación posicionados con un GPS de doble frecuencia y con cota de nivelación geométrica. Dentro del levantamiento se debe realizar la monumentación o colocar una marca sobre los puntos, con sus respectivos nombres.

Un esquema de funcionamiento integrado al segmento aéreo y a las estaciones de referencia terrestres se la representa en la figura 13.

FIGURA 13: Funcionamiento Integrado de un Sistema Lidar



Fuente: Optech, 2000.

3.2.1.7. Unidad de Procesamiento

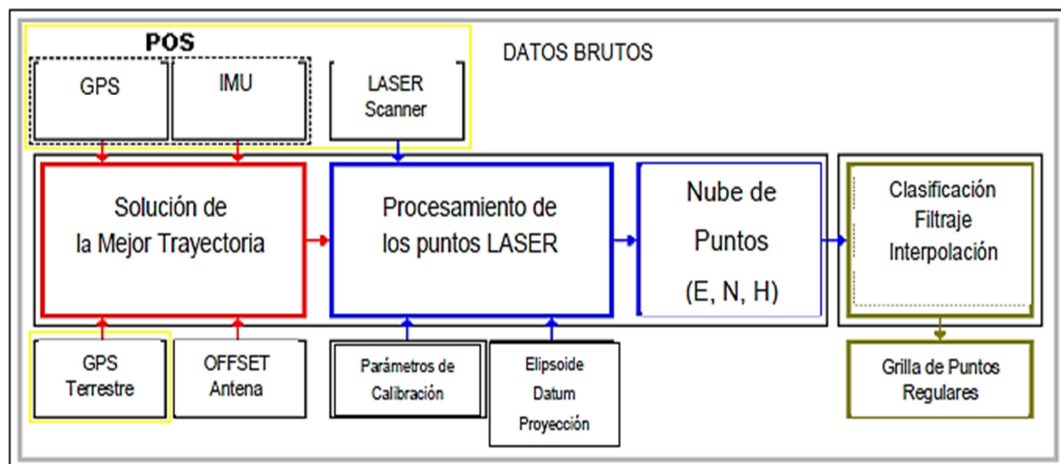
El procesamiento de los datos colectados por un sistema LIDAR comprende de componentes (hardware y software) necesarios para la transformación de los “datos brutos” en una grilla de puntos 3D georreferenciados.

Forman parte del referido conjunto: computadoras; dispositivos de entrada (lectura de datos colectados) y de salida (registro y visualización de datos transformados); dispositivos de seguridad contra copias no autorizadas (hardlocks) de los programas de procesamiento.

Una vez que la cantidad de datos colectados es bastante grande, los computadores utilizados para el procesamiento de estos datos deben cumplir una cierta configuración mínima en relación, principalmente a la velocidad de procesamiento y memoria disponible.

En la figura 14 se presenta las principales etapas del procesamiento de los datos colectados por el sistema LIDAR.

FIGURA 14: Procesamiento de los datos LIDAR– ETAPAS



Fuente: Optech, 2002

De este modo, por medio de la solución de la mejor trayectoria (dada por la integración DGPS/IMU combinada con los parámetros de montaje, como el offset de la antena) y de los datos LASER scanner colectados (distancias y ángulos de barrido) son transformados en una nube de puntos de coordenadas 3D georreferenciadas (en una primera etapa, relativamente a un sistema geodésico WGS-84, propio del GPS, en una etapa posterior, relativamente a un sistema geodésico local, definido por un elipsoide, un dátum y una proyección cartográfica).

Para WEHR & LOHR, 1999, la georreferencia (o geo-codificación) de los puntos LIDAR colectados requiere una exacta sincronización de las medidas de todos los sensores involucrados. La medida del tiempo es por tanto importante para la

aplicación de la técnica LIDAR, esto es a menudo citado como el cuarto componente del sistema (los otros tres serían GPS, IMU y LASER aerotransportado).

A su vez, las etapas de clasificación, filtraje e interpolación involucran la discriminación de los puntos (distinción entre los puntos colectados sobre la vegetación o edificaciones, aquellos colectados sobre la superficie del suelo desnudo) estos (en función de los objetivos del levantamiento). Tales etapas no precisan, necesariamente, ser realizadas en orden, llegando inclusive a efectuarlas al mismo tiempo, dependiendo de los algoritmos o programas de procesamiento empleados.

Los programas usados para el procesamiento de las etapas descritas anteriormente son registrados por Axelsson, 1999; Flood, 2001; Van DerVegt & Hoffmann, 2001 como “propietarios”. Estos programas son por lo tanto desarrollados por los fabricantes de los sistemas LIDAR (o sus asociados) exclusivamente para los compradores de estos sistemas, los algoritmos utilizados para la transformación de los datos brutos en una nube de puntos 3D georreferenciados, raramente son divulgadas. Como ejemplos de programas pueden ser citados: el REALM, utilizado en el procesamiento de los datos colectados por los sistemas ALTM de Optech Inc.; el TopPIT (comprendido por varios módulos), utilizado en el procesamiento de los datos colectados por el sistema FALCON de TopoSys GmbH.

Es importante resaltar que no todos los programas incluidos con el sistema LIDAR tienen algoritmos para la clasificación, filtraje y/o interpolación de la nube de puntos LASER procesados. Muchas veces, una o más de estas etapas, para ser realizadas, requieren la adquisición de otro tipo de programa disponible. Como ejemplos se pueden citar los programas TerraModeler™ e TerraScan™ (TerraSolid Ltd.), capaces de procesar datos provenientes de sistemas de barrido LASER aerotransportados o terrestres, proyectos fotogramétricos e incluso sistemas batimétricos e hidrográficos.

Por ser ejecutado después del levantamiento, el procesamiento de los datos brutos LIDAR son normalmente denominado “post-procesamiento” (por la gran mayoría de autores). Autores como Lohr & Eibert, 1995 y Thiel & Wehr, 1999 se refieren a este

proceso como “procesamiento off-line”. Otras denominaciones utilizadas son “procesamiento post-misión” o “procesamiento post-vuelo”.

3.3. Parámetros de un Sistema LIDAR

Para [Fowler, 2001], un sistema LIDAR está definido principalmente por los parámetros que se presentan a continuación.

Para el dispositivo LASER:

- Longitud de onda (λ)

Está en función al LASER utilizado. En general, se trata de un LASER de estado sólido de tipo Nd: YAG (NeodmioItrio-aluminio-granate), Nd: YLF (Neodmio-itrinio fluoruro de litio) o Nd: YVO4 (Neodmio ortovanado itrio). Su unidad de medida es un submúltiplo del metro (m), normalmente, el nanómetro (nm) o el micrómetro (μ m), su equivalencia en metros es de 10^{-6} m.

- Divergencia del rayo LASER (γ)

Es el ángulo que el rayo LASER se propaga después de haber sido emitido. Esto está en función al diámetro de la longitud de onda y el diámetro de la abertura del LASER (d ó ϕ).

Su unidad de medida es un submúltiplo del radian (rad), por lo general el mili radian (mrad). En [Baltsavias, 1999], la divergencia mínima del rayo LASER (limitada por la difracción) está definida por:

$$\gamma = 2.44 * \frac{\lambda}{d} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Dónde:

γ : Divergencia del rayo LASER

λ : Longitud de onda

d : diámetro de la abertura del LASER

- Duración del pulso LASER (t_p)

Expresa el tiempo de duración de cada pulso, desde su emisión hasta su retorno a el sistema su unidad de medida es el submúltiplo del segundo (s) en general es el nanosegundo (ns).

- Energía del pulso LASER (T)

Expresa la fuerza con que se mueve el pulso emitido en el espacio. Es un parámetro que limita el alcance máximo de un sistema LIDAR.

Según [Baltsavias, 1999] para una dada potencia media, como cuanto mayor sea la tasa de repetición del pulso LASER, menor será su energía. Su unidad de medida es un submúltiplo de la julios (J), por lo general el microjulio (μJ).

- Potencia Media del Pulso LASER (P)

Está en función a la duración del pulso LASER y su tasa de repetición. También se constituye en uno de los parámetros limitantes para un sistema LIDAR. Según [Baltsavias, 1999], para una energía dada, cuanto menor sea la duración de un pulso LASER, más alta será su potencia (emitida y recibida), por lo tanto menor será el error de la detección de este pulso. Su unidad de medida es el watt (W).

- Tasa de Repetición del Pulso LASER (F)

Expresa el número de pulsos emitidos por segundo. Frecuentemente es designada por las siglas PRF (Pulse Repetition Frequency) o PRR (Pulse Repetition Rate). Su unidad de medida es un múltiplo del Hertz (Hz), es el kilohertz (kHz).

Relativo al scanner empleado:

- Angulo de Barrido (θ)

Corresponde al ángulo máximo de apertura o de giro del scanner. El ángulo de barradura es el FOV (campo de visión). Su unidad de medida es el grado sexagesimal ($^\circ$).

- Semiángulo de Apertura (β)

Ángulo del nadir a la máxima apertura de escaneado en la dirección perpendicular al vuelo. El error crece exponencialmente con este ángulo. Los sistemas comerciales ofrecen aperturas máximas entre 30° y 45° . En los levantamientos no se superan los 20° .

- Frecuencia de Barrido (f_{SC})

Es la frecuencia del scanner, expresa el número de veces que el scanner recorre el FOV movimiento de ida y vuelta en un segundo, su unidad de medida es el Hertz (Hz).

- Patrón de Barrido

Depende del sistema LIDAR utilizado. Como se explicó anteriormente, los principales son en zig-zag, líneas paralelas y elípticas. Para [Ackermann, 1999], estos sufren la influencia de la velocidad de la plataforma (v), la dirección de vuelo y el tipo de terreno levantado.

Para el empleo de la posición:

- Frecuencia del GPS (f_{GPS})

Expresa el número de posiciones colectadas y registradas por el receptor GPS(a bordo de la aeronave) en un segundo. Su unidad de medida es el Hertz (Hz).

- Frecuencia del INS (f_{INS})

Expresa el número de variaciones en roll, pitch y heading detectadas y registradas por la IMU (a bordo de la aeronave) en un segundo. Su unidad de medida también es el Hertz (Hz).

Relativo a la plataforma utilizada:

- Altura de Vuelo Operacional (H')

Corresponde a la distancia vertical máxima entre la plataforma y la superficie del terreno. Por esta razón, depende del tipo de plataforma y el sistema LIDAR utilizado. Su unidad de medida es el metro (m).

Otros parámetros:

- Registro de Múltiples Retornos

Expresa la capacidad de un sistema LIDAR, discrimina y registra los múltiples retornos o ecos (normalmente el primero del último) para cada pulso emitido.

- Registro de la Intensidad

Expresa la capacidad de un sistema LIDAR en captar y registrar la intensidad, o valor de reflectancia, de cada uno de los retornos de un pulso LASER emitido.

Para [Baltasvias, 1999], los sistemas LIDAR son también definidos por parámetros que dependen de los citados anteriormente. Entre ellos están los siguientes:

- Largo de la Faja de Barrido (L)

Está en función a la altura de vuelo y el ángulo de Barrido su unidad de medida es el metro (m). El largo de la faja de Barredura, está determinado a partir de relaciones trigonométricas, y expresadas por:

$$L = 2 * H' * \tan \frac{\theta}{2} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Dónde:

L: Largo de la Faja de Barrido

H' : Altura de Vuelo Operacional

θ : Angulo de Barrido

- Número de Puntos por Línea de Barrida (N_p)

Expresa el número de puntos LASER de cada línea de barrida por el scanner. Está en función de la tasa de repetición del pulso LASER y de la frecuencia de barradura y está definido por:

$$N_p = \frac{F}{f_{sc}} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Dónde:

N_p : Número de Puntos por Línea de Barrida

F: Tasa de Repetición del Pulso LASER

f_{sc} : Frecuencia de Barrido

- Densidad de Puntos (D)

Expresa el número de puntos LASER colectados por una unidad de superficie. La densidad está en función a la altura de vuelo y la velocidad de la plataforma, el ángulo de barrido, la tasa de repetición del punto LASER, la dirección del vuelo y el tipo de terreno levantado. Su unidad de medida es puntos por metro cuadrado (puntos/m²). La densidad de puntos por unidad de área, para una única faja de vuelo es:

$$D = \frac{F}{2 * H' * \tan\frac{\theta}{2} * v} = \frac{F}{L * v} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Dónde:

D: Densidad de Puntos

F: Tasa de Repetición del Pulso LASER

L: Largo de la Faja de Barrido

H': Altura de Vuelo Operacional

θ : Angulo de Barrido

v : Velocidad de la Plataforma

- Espacio Longitudinal de los Puntos (D_{LONG})

O sea, a lo largo de línea de vuelo, está en función de la frecuencia de barrido y la velocidad de la plataforma. Su unidad de medida es el metro (m) está definido por:

$$D_{LONG} = \frac{v}{f_{SC}} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Dónde:

D_{LONG} : Espacio Longitudinal de los Puntos

f_{SC} : Frecuencia de Barrido

v : Velocidad de la Plataforma

– Espacio Transversal de los Puntos (D_{TRANS})

En relación a la línea de vuelo. Está en función de la altura de vuelo, de la tasa de repetición del pulso LASER el ángulo de frecuencia de barrido y su unidad de medida también es el metro (m) y está dada por:

$$D_{TRANS} = \frac{(2 * H' * \tan \frac{\theta}{2})}{F} * f_{SC} = \frac{L}{Np} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Dónde:

D_{TRANS} : Espacio Transversal de los Puntos

f_{SC} : Frecuencia de Barrido

F : Tasa de Repetición del Pulso LASER

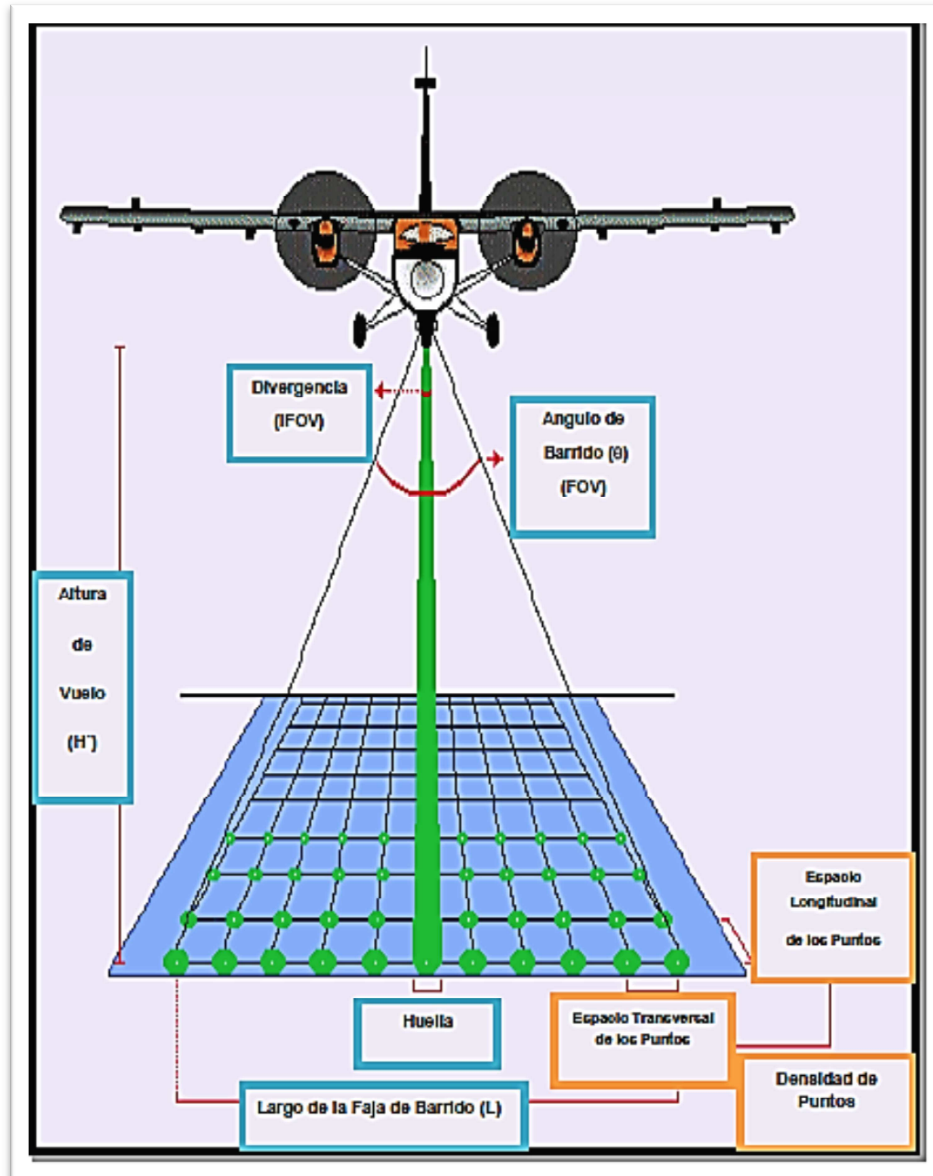
L : Largo de la Faja de Barrido

H' : Altura de Vuelo Operacional

θ : Angulo de Barrido

En la figura 15 se ilustra algunos de los parámetros descritos anteriormente.

FIGURA 15: Parámetros de un sistema LIDAR

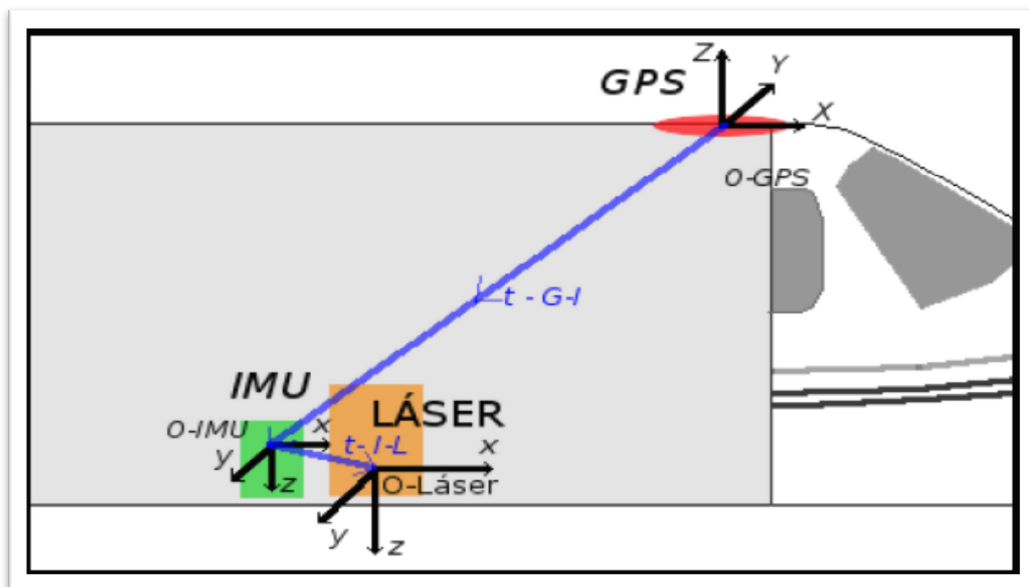


Fuente: Optech, 2002

3.4. Geodesia Satelital (Integración de los sistemas LASER- INS/GPS)

En la figura 16 se presenta un esquema de disposición en un avión de los tres sistemas descritos, los cuales han de trabajar de forma integrada. Actualmente las antenas GPS no requieren ninguna orientación. Los ejes (X, Y, Z) de la figura son los propios del sistema GPS, a partir del centro de fase de la antena. En ese punto se particulariza la solución de navegación GPS/INS. A partir de él, con los “brazos” o vectores t_{G-I} y t_{I-L} (figura 16), se determina la posición de la IMU y del sensor LASER.

FIGURA 16. Relación entre los sistemas de coordenadas de cada elemento del conjunto. Los vectores t_{G-I} y t_{I-L} son los que se calibran con precisión, además de los ángulos entre los sistemas de la unidad inercial y del sensor LÁSER.



Fuente: LindenBerger, 2003.

La unidad inercial (IMU) debe tener el eje Z según la vertical, los otros ejes se alinean con la dirección de vuelo (X) y perpendicularmente a ella (Y). El sensor LASER se instala con el sistema de referencia de forma similar a la unidad inercial. Es recomendable situar la IMU tan cerca como sea posible del sensor LASER

[Maune, 2001], así como instalar la antena del sistema GPS cerca de la vertical del sensor LASER.

A continuación se muestra el modelo matemático para la obtención de las coordenadas de la superficie levantada. Se la denomina ecuación general LASER para obtener las coordenadas del punto resulta (Schenk, 2001 y Lindenberger, 2003):

$$\mathbf{x}_L = \mathbf{x}_{GPS} + R \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\pi}{2} + \varphi_{GPS} - \lambda_{GPS} * R \omega, \phi, k * R \beta_1, \alpha, 0 \end{bmatrix} * d + t_{I-L} + t_{G-I}$$

Ecuación 3.9

Donde:

\mathbf{x}_L =Coordenadas geocéntricas de un punto LASER referida al sistema GPS

\mathbf{x}_{GPS} =Coordenadas geocéntricas del centro de fase de la antena GPS

$$R(a, b, c) = R_3(c) * R_2(b) * R_1(a)$$

R_1 = matriz de giro alrededor del eje X

R_2 = matriz de giro alrededor del eje Y

R_3 = matriz de giro alrededor del eje Z

φ_{GPS} =latitud GPS

λ_{GPS} = Longitud GPS

ω = ángulo de alabeo

Φ = ángulo de cabeceo

K = ángulo de giro

β_i = ángulo instantáneo de apertura vertical en el plano YZ

α = ángulo instantáneo de apertura en el plano XZ

d = distancia del origen del sensor láser al objetivo

t_{I-L} = distancia del origen láser al de la unidad inercial

t_{G-I} = distancia del origen de la unidad inercial al centro de fases de la antena GPS

3.5. Nivelación Geométrica (Taquimetría)

La taquimetría es un levantamiento topográfico, el que se realiza con el fin de determinar la configuración del terreno y la posición sobre la superficie de la tierra, de elementos naturales o instalaciones construidas por el hombre.

En un levantamiento topográfico se toman los datos necesarios para la representación gráfica o elaboración del mapa del área de estudio.

Por definición la taquimetría, es el procedimiento topográfico que determina en forma simultánea las coordenadas Norte (N), Este (E) y altura (H) de puntos sobre la superficie del terreno.

Otras definiciones como la del diccionario de arquitectura y construcción la define “Levantamiento topográfico mediante la lectura de las distancias y la anotación del intervalo entre dos hilos horizontales del aparato, sobre una mira graduada”.

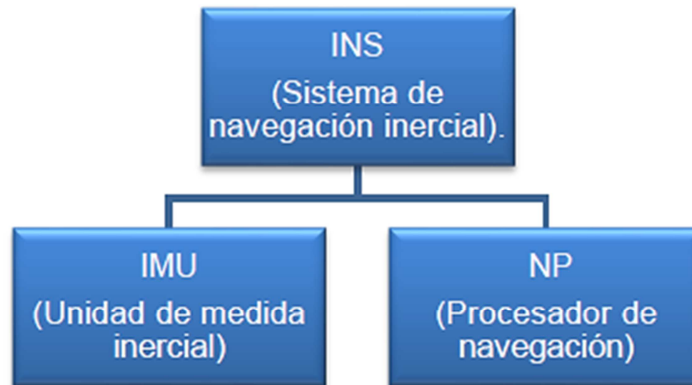
Hasta la década de los 90, los procedimientos topográficos se realizaban con teodolitos y miras verticales. Con la introducción en el mercado de las estaciones totales electrónicas, de tamaño reducido, costos accesibles, funciones pre programadas y programas de aplicación incluidos, la aplicación de la taquimetría tradicional con teodolito y mira ha venido siendo desplazada por el uso de estas estaciones.

3.6. Sistemas inerciales (Unidad de Medida Inercial)

La unidad de medida inercial es un dispositivo que controla la orientación de los movimientos angulares de la aeronave normalmente es citada por diversos autores como IMU (unidad de medida inercial) o INS (sistema de navegación inercial)

[Scherzinger, 2001] observa, sin embargo, que los términos IMU y el INS no son sinónimos. Según este autor, la IMU es de hecho una de las principales componentes de un sistema INS que también incluye el componente llamado procesador de navegación (NP). (Figura 17)

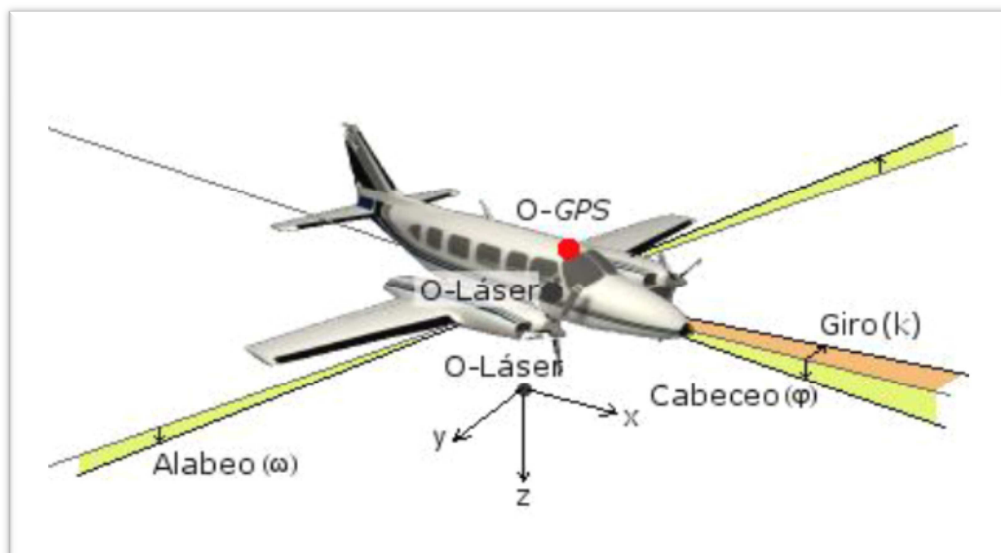
Figura 17: Componentes del Sistema Inercial



Fuente: Elaboración propia en base a Scherzinger, 2001

Este sistema determina los tres movimientos principales: alabeo, cabeceo, y giro (ω , ϕ , k en la figura 18). Estos permiten dar coordenadas al centro óptico del sensor LASER, relacionando los orígenes de coordenadas GPS y del LASER con los ángulos (ω , ϕ , k) entre los ejes de los dos sistemas de referencia.

FIGURA 18: Plataforma aérea con los movimientos dinámicos de alabeo, cabeceo y giro más los orígenes de coordenadas (O-LASER), (O-GPS).



FUENTE: Baltasavias, 1999

[Lithopoulos, 1999] describe al IMU como una unidad que comprende:

Tres acelerómetros, tres giroscopios y un conversor de señal además de otros componentes electrónicos. Este tiene como objetivo medir los movimientos dinámicos de la aeronave sobre los tres ejes ortogonales entre sí, estos movimientos son continuamente monitoreados, registrados por el sistema y posteriormente se correlaciona con la información GPS, a fin de derivar informaciones adecuadas acerca la posición de cada pulso LASER.

El uso integrado de unidades GPS e INS, es una condición para el empleo de la técnica LIDAR. En este caso el INS es compacto ligero y preciso pudiendo ser posicionado junto al instrumento LASER de barrido localizado en la cabeza del sensor sin mayores problemas.

Según, Scherzinger, 200, la empresa canadiense Applanix fue la primera en fabricar unidades que integran GPS de precisión a tecnologías inerciales utilizadas específicamente para sistemas comerciales de mapeamiento.

FIGURA 19: Unidad POS™ / AV de APPLANIX



Fuente: Applanix

Las primeras unidades, para el uso exclusivo en plataformas terrestres surgen en 1993. En cuanto para el uso de plataformas aéreas se tornarían disponibles a partir de

1997. Estas unidades conocidas como Position and Orientation System for Airborne Vehicles (POSTM/AV) (figura 19), forman efectivamente parte del sistema LIDAR.

3.7. Modelo Digital del Terreno (Productos Generados)

Los productos generados a partir de los datos brutos colectados por un sistema LIDAR son básicamente, grandes mallas regulares de puntos 3D geo- referenciadas (E, N, H) en coordenadas UTM.

Cabe señalar que este tratamiento es totalmente automático, incluso cuando las etapas de clasificación, filtrado e interpolación de puntos se realizan por programas suministrados por los fabricantes de los sistemas LIDAR.

Según Watson, 1992, cuando la interpolación de los puntos LASER son procesados se producen intervalos fijos, el resultado es una malla regular de puntos 3D georreferenciados. Normalmente, dicha malla puede ser visualizada, analizada y editada (relativamente a cualquier anomalía resultante del procesamiento automatizado).

También según el mismo autor indica, que la interpolación no es más que un método de generación de superficies. Luego, las superficies que pueden ser generadas a partir del procesamiento de datos obtenidos por la técnica LIDAR, y estos a su vez pueden ser clasificados como indica el autor Maune, 2001 en:

Digital Elevation Model (DEM) o Modelo digital de Elevación (MDE): malla o red de valores de elevación (Z) regularmente espaciadas (en X, Y), referenciada a un dátum (horizontal y vertical) y a un sistema de coordenadas, que representa la superficie del suelo desnudo (con exclusión de vegetación y características artificiales).

Digital Terrain Model (DTM) o Modelo Digital del Terreno (MDT): similar a un DEM, incorpora valores de elevación (Z) de las características topográficas

importantes e irregularmente espaciadas (cuencas, valles, caminos, cotas) con el fin de caracterizar mejor la superficie del suelo desnudo.

Digital Surface Model (DSM) o Modelo Digital de Superficie (MDS): similar al DEM y DTM, incorpora valores de elevación (Z) de características naturales y artificiales que están por encima de la superficie del suelo desnudo, como edificios, árboles y líneas eléctricas.

Por lo tanto para Maune, 2001, DEM, DTM y DSM son superficies generadas mediante una red o grilla, constituidas como un conjunto de células organizadas en líneas (X) y columnas (Y) y que almacenan, cada una, un determinado valor de elevación relativo a su centro. De esta forma, la superficie del terreno, matemáticamente continúa, está comprendida por un número infinito de puntos, a través de una colecta (como resultado de la técnica LIDAR), al ser interpolada y modelada digitalmente.

3.8. Control de Calidad LIDAR

Control de calidad LIDAR es un procedimiento difícil, muchos investigadores han dedicado su valioso tiempo tratando de entender los sistemas LIDAR con el fin de idear métodos optimizados para la calibración del sistema, la garantía de calidad, y el ajuste LIDAR.

Las contribuciones en los campos son enormes, sin embargo, en Bolivia no hay suficiente investigación para el control de calidad de los sistemas LIDAR

El control de calidad LIDAR se define como "un procedimiento posterior a la misión, para garantizar o verificar la calidad de los datos recogidos" [Habib, 2007].

El control de calidad se pueden dividir en dos partes principales: el interno o relativo de Control de Calidad (CIC) y el exterior o absoluto de Control de Calidad (CCE).

El CIC, término que se aplica cuando existe inconsistencias entre las tiras superpuestas, además de no tener relación con el marco de referencia del suelo, el

termino CCE, se utiliza cuando se comparan las tiras con respecto al marco de referencia del suelo (por ejemplo, utilizando los puntos de control en tierra, o puntos con coordenadas conocidas en relación con el marco de referencia en tierra).

El control de calidad es una etapa muy importante, ayuda a evaluar la calidad de los datos disponibles. La mayoría de los métodos actuales de control de calidad LIDAR se centran en el CIC en lugar de la CCE, debido al hecho de que todavía es costoso y requiere mucho tiempo para establecer puntos de control o superficies. Sin embargo, muchos métodos del CIC podrían ser utilizados para la realización de la CCE.

3.9. Calibración de un sistema LIDAR

Toda técnica de medición tiene la susceptibilidad de la calidad de los datos colectados y en consecuencia, la calidad de los resultados obtenidos, requiere que los instrumentos o sistemas utilizados sean periódicamente calibrados.

Para Filin y Csatho, 2000; toda calibración se realiza por medio de procedimientos que sirven para identificar e eliminar errores sistemáticos a fin de validar un proceso de colecta de datos por un determinado sistema.

Estos mismos autores afirman que la calibración de los sistemas de barrido LASER aerotransportados no es algo trivial, pues, todo lo que se tiene disponible es una nube de puntos 3D que no se tiene relación con los objetos de la superficie del terreno, y es por esta razón, que [Wher y Lohr, 1999] afirman que no hay procedimientos estándar para la calibración de este tipo de sistema. Por lo tanto, la imposibilidad de establecer una relación entre los puntos LASER colectados y una característica específica del terreno llevó, a cada fabricante, a desenvolver su propio método o procedimiento de calibración a fin de evitar el problema de la correspondencia.

La calibración en la mayoría de los sistemas LIDAR se efectúa en lugares considerados adecuados, o sea, sobre superficies planas que comprenden objetos o figuras muy bien definidas, como edificaciones de gran porte, pequeñas áreas con vegetación, áreas de estacionamiento y carreteras. Tales lugares deben ser

previamente completamente levantadas por medio de técnicas independientes y cuyos resultados ofrezcan mejor precisión que aquella esperada por los datos LIDAR.

De hecho, la calibración de un sistema LIDAR se lleva a cabo en dos etapas: la de laboratorio y la de campo. La etapa de laboratorio es realizada por el fabricante. En cuanto a la etapa de campo es realizada por el propietario del sistema LIDAR. Como resultado (de ambas etapas), se calculan nueve componentes para la corrección de los errores sistemáticos del referido sistema.

Ellos son: tres parámetros para el montaje del LASER scanner, tres parámetros de traslación para el GPS (offset de la antena) y tres parámetros de rotación para la IMU. [Lohmann, 1999].

Para Molander, 2001, la IMU es el dispositivo más crítico de calibrar, si su posición en la aeronave es fija, este puede permanecer estable por algunos meses. Sin embargo, si su posición es susceptible a interferencias, el sistema debe ser calibrado para cada nuevo proyecto.

Del mismo modo, Fowler, 2001, aconseja que los sistemas LIDAR sean calibrados más de una vez durante aquellos proyectos que requieren el barrido de grandes áreas o fajas bastantes extensas de superficie de terreno. Este mismo autor afirma que una nueva calibración debe ser realizada toda vez que el equipo sea removido o reinstalado y debe realizar un levantamiento de verificación a fin de asegurar la integridad de la calibración.

Se concluye, por lo tanto, que la calibración de cada uno de los componentes de un sistema LIDAR es de extrema importancia para la determinación de la precisión del sistema como un todo [Lohmann, 1999].

3.10. Transformación de coordenadas

Éste es un aspecto externo a la tecnología pero necesario en la práctica para obtener el producto final. La nube de puntos procesada tiene el dátum del sistema GPS (WGS-84). Para obtener las coordenadas en otro sistema es necesaria una transformación.

Kraus y Pfeifer (1998), afirman que para áreas inferiores a 10km² las correcciones geoidales se pueden omitir si no hay gradientes de ondulaciones importantes en la zona. Un modelo geoidal global como el EGM96 no tiene la precisión necesaria.

La precisión (en un área de trabajo) puede ser mejorada si se obtiene un ajuste local de este geoide (se pasa de una precisión métrica/decimétrica a centimétrica).

Idealmente para ello se debe disponer de la cota ortométrica en los vértices de la red GPS. La baja disponibilidad de este tipo de datos obligaría en la mayoría de los casos a realizar medidas de campo con métodos topográficos clásicos y gravimétricos. El costo de estos trabajos explica que no siempre se lleve a cabo un ajuste local del geoide.

3.11. Aplicación de la tecnología LIDAR

La utilización de productos generados a partir de mediciones LIDAR es apenas limitada por las necesidades, imaginación y disponibilidad de software de los usuarios.

Así mismo, entre las aplicaciones más comunes para los productos provenientes del empleo de la técnica LIDAR, pueden ser relacionadas con:

3.11.1. Mapeamiento Topográfico

- De carreteras o figuras lineales como ferrovías, líneas de transmisión de energía de ductos (gas o petróleo). La técnica también ha sido empleada en el estudio de potencial hidroeléctrico, en lo que implica el levantamiento de figuras hidrográficas lineales como ríos.

- De zonas costeras como praderas y dunas, para el análisis de la topografía, en la estructura de los procesos de transporte de sedimentos, ofreciendo ventajas en relación al de la técnica de la fotogrametría tradicional.
- De áreas forestales. Por ser una de las primeras áreas comerciales investigadas por la aplicación de la técnica LIDAR, este es extremadamente importante para la administración de los recursos naturales y para la industria forestal. La técnica LIDAR permite obtener información detallada sobre la altura de la vegetación y su densidad (distribución espacial). Los sistemas son capaces de captar más de dos retornos por pulso, y así mismo de captar el rayo LASER emitido en una forma continua, esto especialmente utilizado en la determinación de algunas características principales en la estructura de la vegetación como la altura, diámetro, especie, volumen y condición de los árboles, que es base para la preparación de inventarios forestales.
- De áreas urbanas, donde los modelos digitales de superficie son utilizados para la generación de las figuras 3D obteniendo la información de construcciones (edificios, casas, canchas, plazas, etc.) que se presenten en una urbe y también en otros estudios, como los realizados para las industrias de las telecomunicaciones.

3.11.2. Análisis Ambientales

- Los provocados por terremotos, maremotos, entre otros, relacionados a su magnitud y extensión de daño.
- De riesgos, principalmente los relacionados a inundaciones e incendios. Modelos digitales de superficie y de elevación son utilizados, por planes urbanos y regionales, en el estudio de mencionados riesgos y desarrollo de mapas de prevención.

Es importante resaltar que el empleo de la técnica LIDAR, en las aplicaciones descritas en párrafos anteriores, normalmente van acompañadas del empleo

(simultáneo, previo o posterior) de alguna otra técnica de toma de imágenes, como el de una cámara digital no usada para fines fotogramétricos (accesorio que acompaña al sistema LIDAR) para un levantamiento detallado de la superficie del terreno.

3.12. Comparación con Otras Técnicas

El empleo del sistema LIDAR, así como cualquier otra técnica presenta ventajas y desventajas, normalmente las ventajas y desventajas son enumeradas para una determinada técnica, son el resultado de un análisis comparativo entre esta y otras técnicas que a pesar de ser distintas son capaces de generar productos considerados similares.

Como se señaló anteriormente, la técnica LIDAR permite levantar, sobre la superficie del terreno, una nube de puntos distribuidos y así generar a partir de esta nube, una gran malla regular de puntos 3D georreferenciados expresados sobre una forma de un DSM, DEM o un DTM.

Se sabe sin embargo que dicha red también pueden ser generados por el empleo de técnicas como la fotogrametría, la taquimetría y recientemente a partir de la interferometría por radar (Interferometric Synthetic Aperture Radar – IFSAR).

Así mismo en el cuadro a continuación se presenta, relativamente los sensores o sistemas aerotransportados que tienen la capacidad de coleccionar datos de elevación, las características generales permiten distinguir la técnica LIDAR de las técnicas aerofotogramétricas e IFSAR.

CUADRO 2: LIDAR vs AEROFOTOGRAMETRIA vs IFSAR

CARACTERISTICAS		LIDAR	AERO FOTO	IFSAR
SENSOR	Activo	SI	NO	SI
	Óptico	SI	SI	NO
	Imageador	NO	SI	SI
	Exige calibración periódica	SI	SI	SI
ALTITUD DE VUELO	Baja 5 Km	SI	SI	SI
	Media 5 a 10 Km	NO	SI	SI
	Alta encima de los 10 Km	NO	SI	SI
DATOS	Georreferenciados	SI	SI	SI
	Colectados digitalmente	SI	1	SI
	Procesados automáticamente	SI	2	SI
	Pueden ser integrados a datos obtenidos por otras técnicas	SI	SI	SI
OBSTACULOS	Condiciones climáticas (viento, nubes, chubascos, neblina, nieve)	SI	SI	3
	Inclinación del sol	NO	SI	NO
	Uso nocturno	SI	NO	NO
PROBLEMAS	Provoca áreas de sombras debido a la inclinación de la señal emitida	SI	NO	SI
USO RESTRINGIDO	En áreas de vegetación densa	NO	SI	SI
	En áreas urbanas densamente edificadas	NO	NO	SI
	En regiones costeras y en regiones cubiertas por nieve	NO	SI	NO
	En áreas alejadas	SI	NO	NO
APROPIADA	Para la cobertura de grandes áreas de terreno	NO	SI	SI
	Para la cobertura de fajas estrechas de terreno	SI	SI	NO

FUENTE: Creada por el Instituto Cartográfico del Brasil

Nota:

- 1 se aplican en el empleo de cámaras digitales métricas.
- 2 depende del método empleado para el producto generado.
- 3 existen divergencias entre autores en cuanto a penetrar nubes.

Las principales diferencias entre las técnicas IFSAR y LIDAR son el tipo de ondas emitidas por los sensores (microondas/ LASER) y el método empleado para la

obtención de altitudes de los puntos que componen la superficie del terreno (antenas/LRF).

Según Hensley, 2001, apenas tres de los sistemas IFSAR en operación, en el mundo son aerotransportados, los sensores espaciotransportados son en mayor número y vienen colectando imágenes de datos de elevación desde la década de los 80, entonces la generación de modelos digitales por medio de la técnica IFSAR aerotransportada es por tanto limitada que la realizada por la técnica LIDAR.

En cambio la aerofotogrametría, diferente a la interferiometría por radar, opera sensores pasivos que obtienen imágenes de superficie del terreno, a partir de fotografías de la superficie terrestre y el procesamiento de estas imágenes es posible obtener modelos digitales semejantes a los obtenidos por la técnica LIDAR (cuya mayor ventaja está en la rapidez con que los datos son colectados y procesados).

También, el método tradicionalmente empleado para la generación de DEM es el estéreo-fotogramétrico basado en el perfilamiento de estéreo-modelos, en este método, una red uniformemente espaciada puede ser compilada directamente por medio de procedimientos que se ejecutan automáticamente.

Otro método estéreo-fotogramétrico empleado por la correlación de imágenes (también denominado autocorrelación), este es un método automático desarrollado en base del procesamiento de imágenes digitales (obtenidas directamente por medio de cámaras digitales, o por medio de digitalización de las películas utilizando scanner fotogramétrico), pero el uso en la práctica se ha restringido por el tiempo debido al post-procesamiento requerido para la edición de los modelos digitales convirtiéndose en una desventaja.

Para Petrie, 2000, casi todos los mapas topográficos (99%) ejecutados en el mundo se sigue haciendo uso de cámaras convencionales aerofotogramétricas (Analógico) y, por tanto, los productos derivados de la utilización de esta técnica son todavía considerados estándar para juzgar los productos generados por el uso de otras técnicas como del LIDAR e IFSAR.

3.13. Sistemas LIDAR Disponibles en el Mercado

Actualmente los sistemas LIDAR disponibles en el mercado mundial, así como sus respectivos fabricantes, se muestran a continuación en el siguiente cuadro 3.

CUADRO 3: Sistemas LIDAR disponibles en el mercado

Fabricante	Sistemas en Operación	Primer Modelo	Año de Lanzamiento	Modelo más Reciente	Año de Lanzamiento
Leica Geosystems (Suiza)	21	AeroScan	1998	ALS60	2009
Optech Inc. (Canada)	54	ALTM 1020	1995	ALTM 3100EA	2004
TopEyeAB (Suecia)	14	TopEye	1996	TopEye II (1)	2007
TopoSys GmbH (Alemania)	1	TopoSys	1995	Falcon II	2006

Fuentes: Flood, 2003; TopoSys, 2006 y Optech, 2004

(1) Sistema que se hizo específicamente para su uso en helicópteros.

De estos sistemas, el TopEye™, actualmente fabricado por la TopEye AB (ex Saab Survey Systems AB), parece ser el único que conserva las mismas características técnicas desde su lanzamiento, en 1996. Los demás han sufrido constantes actualizaciones, los últimos años, en función a las innumerables innovaciones tecnológicas alcanzadas por la comunidad científica mundial y también por los propios fabricantes.

En el cuadro 4 se presenta alguna de las características de los modelos más recientes.

CUADRO 4: Algunas características de modelos más recientes

	ALS60	ALTM 3100 (1)	TopEye II	Falcon II
Altitud Operacional	500 - 4000 m	80 - 3500 m	60 - 480 m	500 - 1600 m
FOV	10° - 75° programable	0° - 50°	10° - 50°	14° - 50°
Patrón de Barredura	Elíptico	Diente de Sierra	Diente de Sierra	Lineas Paralelas
Retornos por pulso	4	4	4	3
Registro de intensidad	SI	SI	SI	SI
Opcional	ADS60 Digital Sensor	4k x 4k Digital Camera	60 Mp x 60 MP Digital Camera	RGB-NIR Line Camera

Fuentes: Leica Geosystems, 2006, TopoSys, 2006 y Optech, 2004.

(1)Sensor LIDAR que cuenta SGT Ltda.

3.14. Investigaciones en el control de calidad LIDAR

Como se ha mencionado anteriormente, existe una carencia de investigación para el control de calidad de los sistemas LIDAR en Bolivia.

Por lo tanto, se enunciarán los métodos existentes para el control de calidad de los sistemas LIDAR. Se ha observado que los temas de investigación actuales se centran en la adaptación de las tiras LIDAR.

En los párrafos siguientes se resumen los métodos de la tira de ajuste sugerido por investigadores.

Estos procedimientos varían en términos de complejidad, precisión, y el consumo de tiempo. En esta sección, el trabajo se centrará en los métodos de control de calidad interno.

Estos métodos se discuten brevemente en los párrafos siguientes:

Un método CIC, está basado en un procedimiento de ajuste por mínimos cuadrados, fue propuesto por el autor Maas, 2000. Este método utiliza un conjunto de puntos de la primera tira y genera una red triangulada irregular (TIN) a partir de la segunda tira.

Vosselman, 2001 discutió el ajuste de la tira de datos LIDAR usando el control y puntos de amarre. En este método, la topografía de campo se requiere para obtener los puntos de control en tierra. Por lo tanto, este método no es aplicable en los casos en que el acceso a la zona de estudio es limitado o prohibido. Este es el caso de muchos de los actuales métodos de CCE.

Un método que se utiliza fotogrametricamente es la generación de Modelos Digitales de Superficie (DSM) propuesta por Bretar, 2004. El concepto aquí es para que coincida con tiras LIDAR individualmente se necesita una referencia DSM generada mediante técnicas fotogramétricas.

En este caso, las tiras LIDAR ajustadas son consistentes con el marco de referencia de fotogrametría, que es un beneficio para toda nueva solicitud (por ejemplo, modelado 3D, la generación de ortofotos, el modelado de realidad virtual). Sin embargo, este método requiere la disponibilidad de fotografías aéreas o previamente generado DSM que cubre el área de estudio, o una parte de ella. Por otra parte, los errores provenientes del proceso fotogramétrico se hereda en el ajuste de la tira LIDAR.

Rönnholm, 2004 introdujo un método de ajuste de las tiras de LIDAR utilizando imágenes de la zona del conjunto de datos, y utilizando el criterio humano para identificar las características, conjugando entre las imágenes y las tiras LIDAR. El proceso de ajuste se ejecuta de forma simultánea en todas las tiras de medición.

Rönnholm sostiene que la intervención del hombre es una ventaja, ya que el humano tiene una mayor capacidad para hacer juicios sobre las características, aunque las

características no son perfectamente claras. Sin embargo, este método no es práctico para el control de calidad LIDAR.

El proceso de control de calidad se espera que sea rápido y preciso. Por otra parte, debido a la enorme cantidad de datos (datos LIDAR) que sale de una sola misión, el proceso de control de calidad debe ser planificada con cuidado, con el mayor grado de optimización.

3.15. Control de calidad de MDT generados con LIDAR

La validación de un Modelo Digital del Terreno nace de la necesidad del productor/usuario de comprobar la calidad del producto. La presencia de inconsistencias y/o errores en el modelo pueden ser críticos para cualquier aplicación (por ejemplo el cálculo de volúmenes inundados en el campo de la gestión de recursos hídricos), llegando incluso al extremo de no ser útil para uso que se generó.

Los procedimientos genéricos descritos en este subtítulo es aplicable a la tecnología LIDAR descrita anteriormente.

Los procesos de validación se clasifican según el resultado en cuantitativos y cualitativos [Sithole 2003, y 2004]. Los cuantitativos evalúan numéricamente la calidad del modelo. Los cualitativos evalúan un área concreta del modelo en términos de correcto e incorrecto. Las fuentes de información usadas pueden ser independientes o se puede usar la propia información del proceso LIDAR (“autovalidación”).

La información independiente que se usa como referencia puede ser desde un conjunto de puntos de coordenadas conocidas hasta información fotográfica de objetos o vegetación. La calidad de esta información condiciona el análisis que se puede realizar.

Generalmente en la validación cuantitativa se compara el modelo con información independiente (un conjunto de puntos distribuidos por el levantamiento) obteniendo

un estimador del error para todo el modelo. Los análisis más complejos generan un modelo de error altimétrico e intentan acotar los errores o conjunto de errores del sistema LIDAR [Schenk, 2001; Crombaghs, 2002].

La fuente de información de referencia (la que se usará para dar por buena o mala un área del modelo) puede ser independiente o se puede emplear la información del procesado de los datos LIDAR. Esta información: puntos de control (puntos distribuidos por el terreno de coordenadas conocidas y precisas [Latypov, 2002], superficies planas (como pavimentos, cubiertas de edificios), imágenes digitales de mayor resolución que el modelo LIDAR, e información gráfica de elementos característicos (por ejemplo, fotografías de elementos singulares como puentes, edificios, bosques, vegetación).

La validación puede localizar y cuantificar errores en el modelo. Algunos procesos permiten la detección, modelización y “corrección” de errores sistemáticos. Para ello generalmente se requiere recalcular las coordenadas de la nube de puntos, debiendo disponer de los puntos antes de la homogenización de las tiras del levantamiento. En caso de errores de clasificación de la nube de puntos, se corrige el artefacto sin necesidad de recalcular la homogenización de las tiras de levantamiento, y requiriendo sólo la nube de puntos homogeneizada (PG).

Para la validación es conveniente conocer el algoritmo de clasificación de la nube de puntos y generación del MDE, ello permite obtener explicaciones a determinados problemas o errores.

En cuanto a cómo se compara la información, la comprobación cuantitativa puede ser: Punto – punto. Se interpola la cota de un punto sobre una superficie definida por un conjunto de puntos.

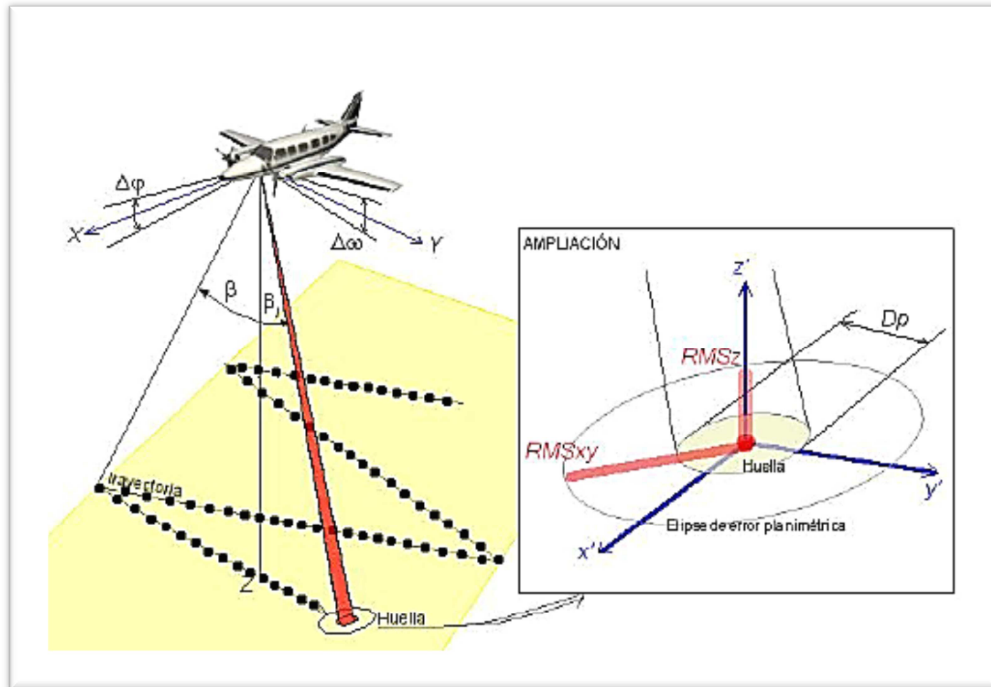
3.15.1. Calidad de la Información de Validación

La calidad altimétrica y planimétrica de la información de referencia debe ser superior a la del LIDAR, limitando el origen de esta información casi exclusivamente a métodos topográficos terrestres (topografía clásica y GPS). La distribución espacial de esta información condiciona el análisis a realizar.

Casi todos los estudios de precisión del LIDAR se concentran en el error en Z, sin tratar el error en planta. En cambio, el planimétrico es entre 2 y 5 veces mayor que el altimétrico. Según [Huisin, 1998], se presentan errores planimétricos de hasta 1.5m. Valores típicos son $RMSZ=15\text{cm}$ y $RMSXY=50\text{cm}$ (figura 20). Lo que ocurre es que el error crítico es el altimétrico y por esta razón se plantean análisis que sólo controlan directamente este error. Generalmente la calidad planimétrica también se controla indirectamente con estas comprobaciones ya que la rugosidad del terreno introduce el error planimétrico en el análisis altimétrico.

Las fotos de áreas del levantamiento y cualquier otro tipo de conocimiento general sobre la morfología del terreno y su vegetación son información de menor calidad y permiten sólo análisis cualitativos.

FIGURA 20: Esquema en que se presenta la huella (diámetro mayor D_p) de un impacto LASER. Se presentan También el error RMS_z Y RMS_{xy} .



Fuente: Huising, 1998

CAPITULO IV

APLICACIÓN PRÁCTICA: “TRAMO ACHERAL – CHOERE”

Como se explicó en el primer capítulo el objetivo del presente trabajo, es mostrar los procedimientos de levantamientos topográficos con tecnología LIDAR de alto rendimiento, que permita obtener un modelo Digital de Terreno confiable, los datos fueron obtenidos por el sistema ALTM 3100EA, de propiedad de la consultora boliviana SGT Ltda.

En el anterior capítulo del presente trabajo, a su vez, se ha descrito la mayoría de los parámetros involucrados en la obtención de los datos LIDAR, permitiendo una noción general y amplia del empleo de la técnica LIDAR, es por eso que se debe tomar en cuenta las características específicas de cada sistema.

En este contexto, y como parte del marco práctico, se presenta a continuación las principales características del sistema LIDAR utilizado en la obtención de estos datos.

4.1. Características del sistema LIDAR utilizado

El sistema LIDAR empleado para realizar el levantamiento topográfico fue ALTM (Airborne LASER Terrain Mapper) modelo 3100EA, lanzado al mercado mundial por Optech Inc. a finales del año 2004.

CUADRO 5. Modelos de Sistema ALTM comercializados en el mercado

MODELO	MEDIDAS POR SEGUNDO	ALTURA MAXIMA (M)	AÑO DE LANZAMIENTO	SISTEMAS FABRICADOS
ALSS	2000	1000	1993	Prototipo
ALTM 1020	5000	1000	1995	9
ALTM 1025	25000	700	1999	2
ALTM 1210	10000	1200	1998	8
ALTM 1225	25000	1200	1999	6
ALTM 2025	25000	2000	2000	1
ALTM 2033	33000	2000	2000	3
ALTM 3025	25000	2000	2001	2
ALTM 3033	33000	3000	2001	4
ALTM 2050	50000	2000	2002	7
ALTM 3070	70000	3000	2003	6
ALTM 3100EA	100000	3500	2004	7
ALTM Orion-c(1)	200000	2000	2008	-
ALTM Gemini	167000	4000	2009	-
ALTM Pegasus HD 400	400000	2500	2011	-

FUENTE: OPTECH 2011

El ALTM 3100EA es un sistema de barrido LASER aerotransportado con una tasa de repetición del pulso LASER DE 100 kHz y una altura operacional variando entre 80 m (mínima) y 3500 m (máxima). Estas en tanto, no son las únicas especificaciones que se deben tomar en cuenta cuando se pretende validar los datos colectados por un determinado sistema.

Así mismo, en el siguiente cuadro, creado en base a las informaciones obtenidas por el propio fabricante del sistema ATLM 3100EA, presenta las especificaciones consideradas relevantes para el presente trabajo.

CUADRO 6: Especificaciones del sistema ALTM 3100EA

	PARAMETROS	VALOR
SCANNER	Angulo de barrido (FOV)	Variable: de 0° a ± 20° (máximo) en incremento de 1°
	Resolución del ángulo de barrido	0,01°
	Precisión del ángulo de barrido	0,01°
	Patrón de barrido	Diente de sierra
LASER	Tipo	Q-Switched, Diode-Pumped, Vanadate LASER Con $\lambda= 1064\text{nm}$
	Divergencia del Rayo	0,25 mrad y 0,8 mrad. (nominal)
	Alcance máximo	3500 m (nominal)
	Resolución de alcance	1 cm
POS	Receptor GPS	Novatel Millennium
	Frecuencia del receptor	10 Hz
	GPS	
	IMU	Applanix custom AV510
CONTROL	Frecuencia del IMU	Variable: de 10 a 100Hz
	Almacenamiento de los datos	File Digital 8mm (datos IMU y LASER) Cámara de video (NTSC o PAL)
	Requisitos de potencia	28 V (mínimo) a 35 (máximo)
OTROS	Temperatura operacional	10 a 35 °C
	Ancho de faja de barrido	Variable: 0 a ± 0.93 x altitud (m)
	Precisión horizontal en condiciones ideales	1/2000 x altitud
OTROS	Precisión de elevación en condiciones ideales	< 5 cm a 500 m <15 cm a 1200 m <25 cm a 2000 m < 35cm a 3000 m

FUENTE: OPTECH 2005

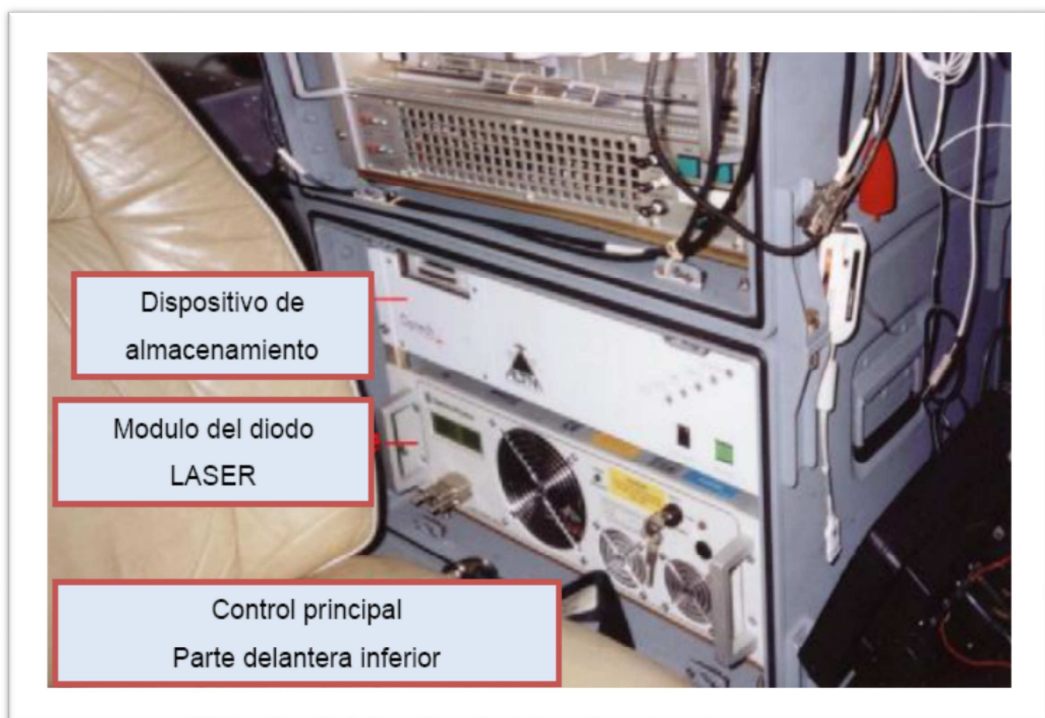
Lo destacable de las especificaciones contenidas en el cuadro 6, son que el sistema ALTM 3100EA es capaz de registrar el primer y el último retorno de cada pulso LASER emitido, además de medir y registrar sus respectivas intensidades (fuerza de la señal).

En cuanto a la plataforma utilizada en los escaneos laser, actualmente, el sistema ALTM 3100EA puede ser asentado sobre la estructura de aeronaves como el Lear Jet, o de un Cessna Air King. Estas aeronaves vuelan a una velocidad media crucero de 165 y 145 nudos (305.6 y 268.5 km/h), respectivamente.

En las figuras 21 y 22 se presentan el control principal (Main Control Rack o Computer Chassis) del sistema ALTM 3100EA, instalada en la aeronave Cessna Air King.

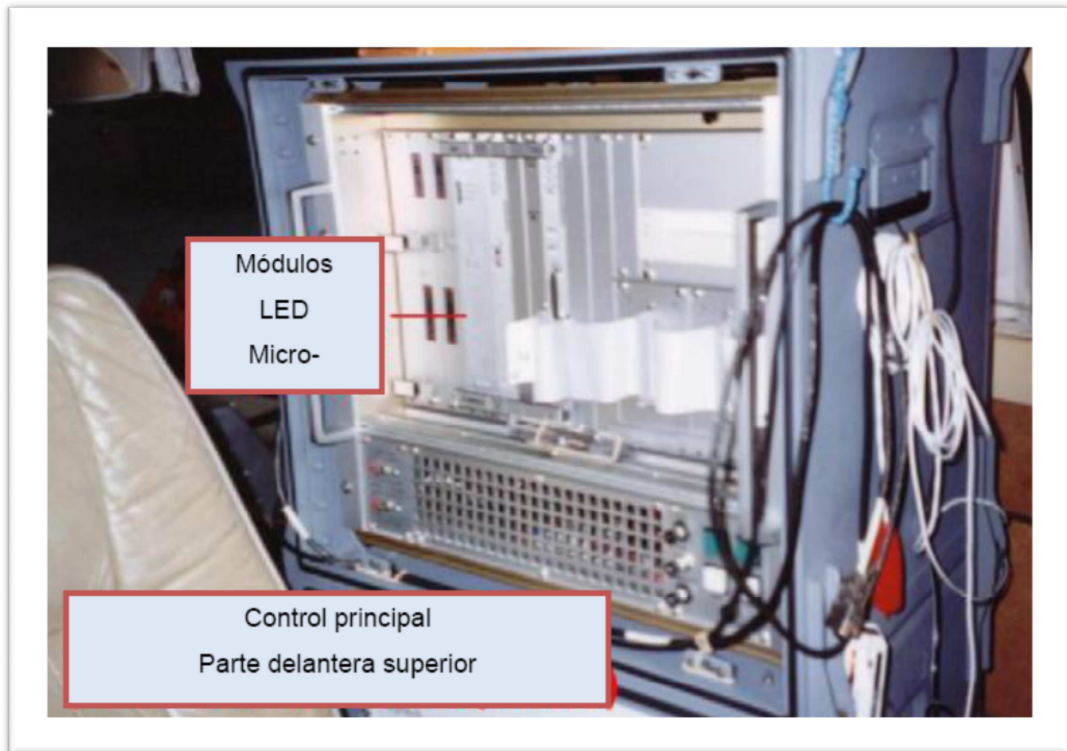
La figura 21 permite visualizar la parte delantera inferior del mencionado control, que comprende del módulo del diodo LASER y el dispositivo de almacenamiento.

FIGURA 21: ATLM 3100EA – Parte delantera inferior del control principal



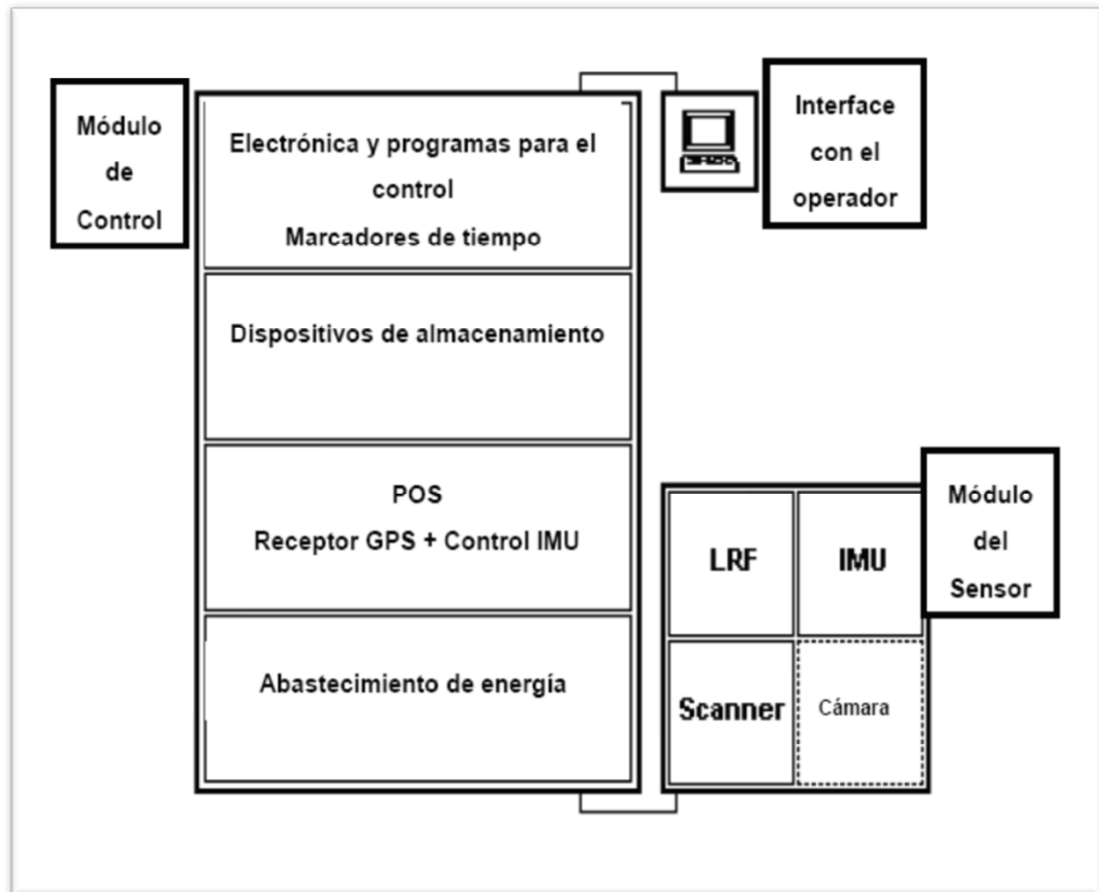
La figura 22 permite visualizar la parte delantera superior, que comprende algunos LED, micro-controladores (scanner), módulos (intensidad) y conexiones.

FIGURA 22: ATLM 3100EA – Parte delantera superior del control principal



Para un mejor entendimiento de los módulos de control que conforman el segmento aéreo del sistema LIDAR, la figura 23 muestra de una manera gráfica mencionados módulos aquellos que se mostraron anteriormente en las figuras 21 y 22.

FIGURA 23: Sistema LIDAR: Segmento aéreo (MODULOS)



FUENTE: Baltasavias, 1999

El sistema ALTM 3100EA, cuenta con una cámara de video que tiene por finalidad registrar la superficie del terreno barrida por el LASER, auxiliando de esta manera en la detección de fallas en el vuelo y en la validación de posibles errores de procesamiento de los datos colectados.

La figura 24 se muestra, el receptor GPS y la cámara de video (solo donde se grava, el lente está localizada en la cabeza del sensor), ambos conectados al control principal del sistema. En esta misma figura es posible visualizar, también el telescopio de navegación.

FIGURA 24: ATLM 3100EA – Receptor GPS y Cámara de video



Por último, en la figura 25 se muestra como se encuentran los dispositivos de control principal (Main Control Rack) y la cabeza del sensor (Sensor Head), en el interior de la referida aeronave.

FIGURA 25. Ubicación del equipo LIDAR en el interior de la aeronave



El GPS utilizado en tierra para el soporte de la posición del sistema por el método cinemático diferencial es un Sokkia de doble frecuencia, de 12 canales y un periodo de 1 s. Este utiliza un dispositivo para el almacenamiento de los datos colectados.

4.2. Datos referentes a la zona de estudio.

a. Datos iniciales del proyecto

CUADRO 7: Proyecto realizado por SGT LTDA.

PROYECTO	DISEÑO FINAL ASFALTADO ACHERAL-CHOERE
LOCALIZACIÓN	Provincia Gran Chaco
CONTRATANTE	Gobierno Regional del GRAN CHACO
EXTENSIÓN	16 km
PRODUCTOS	Levantamiento GPS Levantamiento topográfico

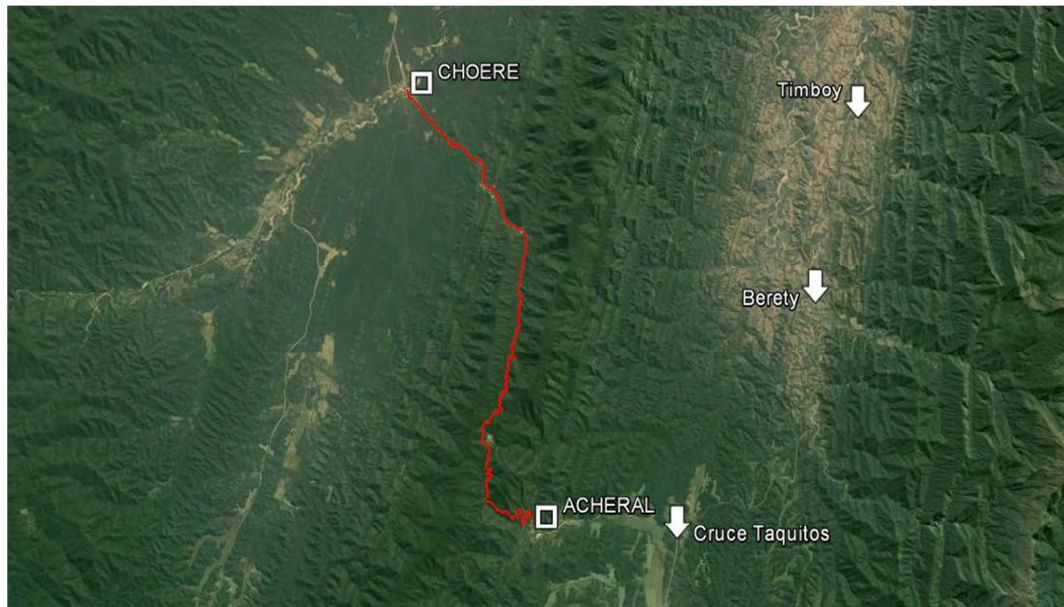
FUENTE: Elaboración propia en base a datos de SGT LTDA

b. Ubicación geográfica del proyecto.

El proyecto se encuentra ubicado en los distritos 1 y 6 del Municipio de Caraparí, Segunda Sección de la Provincia Gran Chaco del Departamento de Tarija.

El Municipio de Caraparí, Segunda Sección de la Provincia Gran Chaco, se encuentra ubicado entre las coordenadas de 21° 11' 18,4'' a 22° 18' 29,8'' de latitud sur y los meridianos 63° 31' 26,6'' a 64° 24' 28,0'' de longitud oeste, con una altitud mínima de 429 msnm, altura máxima de 2.145 msnm y una altura media de 1.004,70 m.s.n.m.

(Ver anexo A)

FIGURA 26. Imagen satelital de la ZONA DEL PROYECTO

Fuente: Elaboración Propia

La zona donde se ejecutó del proyecto presenta las características indicadas en el cuadro 8.

CUADRO 8: Características del área de barrido

PROYECTO	AREA ⁽¹⁾		RELIEVE ⁽²⁾					DENSIDAD DE LA COBERTURA VEGETAL ⁽³⁾			DENSIDAD DE EDIFICACIONES ⁽⁴⁾		
	R	U	PL	OS	ON	OF	MN	B	M	A	B	M	A
Carretera Acherál- Choere	SI	-	SI	SI	-	-	-	-	SI	-	-	-	-

FUENTE: Elaboración propia en base a datos de SGT LTDA

NOTAS:

- (1). Área predominante rural (R) o urbana (U).
- (2). Relieve plano (PL), suave ondulado (OS), ondulado (ON), fuertemente ondulado (OF) y montañoso (MN).
- (3). Densidad de cobertura vegetal baja (B), media (M) y alta (A)
- (4). Densidad de edificaciones baja (B), media (M) y alta (A)

Para realizar el llenado del cuadro anterior se tomó en cuenta los parámetros que se describen a continuación:

Las clases de relieve utilizadas son recomendadas por la Sociedad Brasileira de Ciencia del Suelo (SBCS) y por el centro Nacional de Investigación de Suelos (CNPS) de la Empresa brasileira de Investigación Agropecuaria (EMBRAPA). Mencionadas clases se encuentran detalladas en el Cuadro 9.

CUADRO 9: Clases de Relieve

RELIEVE	PENDIENTE (%)
Plano	< 3
Suave Ondulado	3 a 8
Ondulado	8 a 20
Fuertemente Ondulado	20 a 45
Montañoso	45 a 75
Escarpado	> 75

FUENTE: Lemos & Santos (2005)

Debido a la densidad de la cobertura vegetal se opta por la clasificación propuesta por Shrestha & Zinch (2001), que define cada clase en función del porcentaje del área (de terreno) cubierta por árboles, de acuerdo con el cuadro 10.

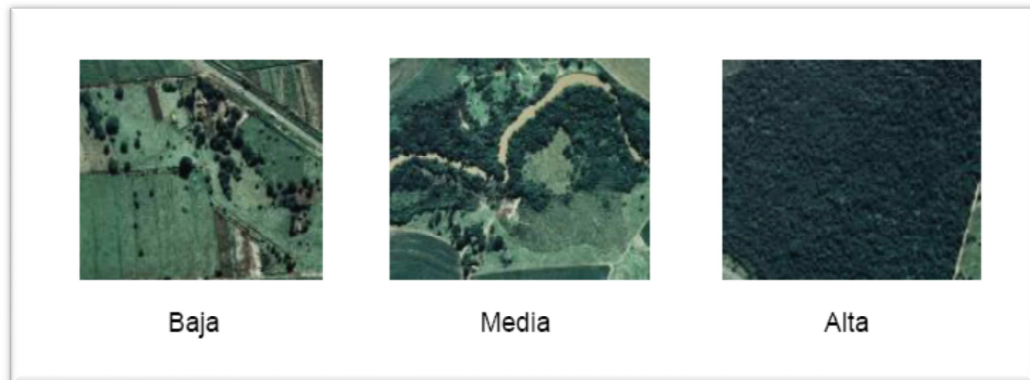
CUADRO 10: Clases de Densidad de la Cobertura Vegetal

DENSIDAD	AREA CUBIERTA POR ARBOLES (%)
Bajo	< 40
Medio	40 a 70
Alto	>70

FUENTE: Shrestha & Zinch (2001)

En la figura 27 se da ejemplos de las clases de vegetación definidas anteriormente.

FIGURA 27: Clases de densidad de la Cobertura Vegetal



FUENTE: Shrestha & Zinch (2001)

La densidad urbana es una relación que indica la intensidad del uso de la ocupación del suelo urbano, siendo normalmente medida en función del número de habitantes fijos por hectárea (densidad habitacional), o, en función del número total de habitantes por hectárea (densidad poblacional).

Por otro lado, como el objetivo de esta investigación no es planear o monitorear la densidad de la población de las áreas urbanas o rurales, más, simplemente utilizar este parámetro solo para informar acerca de las características donde el proyecto se ubica, se opta por una clasificación más simple y general, derivada de la anterior utilizada para la cobertura vegetal. La clasificación se presenta en el cuadro 10 y se da ejemplos en la figura 28.

CUADRO 10: Clases de Densidad de las Edificaciones

DENSIDAD	AREA EDIFICADA
	(%)
Bajo	< 40
Medio	40 a 70
Alto	>70

FUENTE: Shrestha & Zinch (2001)

FIGURA 28: Clases de densidad de las Edificaciones

FUENTE: Shrestha & Zinch (2001)

4.3. Acciones previas

Se realizó una recopilación de los datos y proyectos realizados y disponibles sobre el tramo carretero “ACHERAL - CHOERE”.

Gracias a la colaboración de la consultora SGT Ltda., propietaria del sistema ALTM 3100EA, se pudo obtener los datos para la elaboración del presente proyecto, cuyos detalles se mencionan a continuación.

Los datos considerados como “no LIDAR” son todos aquellos provenientes del empleo de otras técnicas, como fotografías aéreas, la topografía, geodesia, incluyendo los resultados de levantamientos que utilizan GPS y de digitalizaciones.

De esta forma, el proyecto “Carretera Acherál - Choere”, cuenta con los datos “no LIDAR” descritos a continuación en el cuadro 10.

CUADRO 10: Datos No LIDAR Disponibles para el Área de Barrido

PROYECTO	TECNICA		
	TOPOGRAFIA	GEODESIA	FOTOGRAFIAS AEREAS
Tramo Carretero Acheral - Choere	PUNTOS NIVELADOS	GPS	NO METRICAS
	SI	SI	NO

FUENTE: Elaboración propia en base a datos de SGT LTDA

El proyecto escaneado por el ALTM 3100EA servirá de base para la realización de la descripción del procedimiento de levantamiento mediante la técnica LIDAR.

Antes de realizar las mediciones correspondientes se calibro el equipo:

Calibración del sensor LIDAR

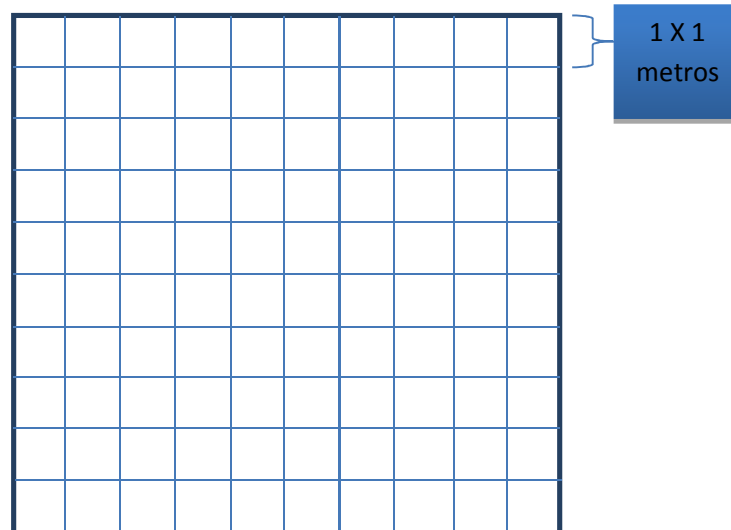
La calibración del sensor LIDAR se la debe realizar cada vez que el sensor sea removido de la plataforma. A continuación en los siguientes pasos se describe la calibración.

Paso 1:

Se debe utilizar un área de preferencia plana, en este caso se utilizó la plataforma de un aeropuerto.

Paso 2:

Sobre el área seleccionada se realiza una grilla preferentemente cada metro. Y posteriormente se realiza el levantamiento taquimétrico.

FIGURA 29: Grilla para la calibración LIDAR

FUENTE: Elaboración propia en base a SGT Ltda., 2013

Paso 3:

Luego se realiza el vuelo de calibración realizando el barrido LASER del área de calibración.

Paso 4:

Posteriormente se obtiene las correcciones en base a la grilla y el barrido LASER, además de errores los cuales van a corregir a los datos que se van a coleccionar después en la campaña LIDAR. Éste procedimiento lo realiza el POS PAC software proporcionado por los fabricantes del sensor OPTECH.

FIGURA 30: Resultados del vuelo de calibración

```

CALIBRACION 10-05-2010.txt - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

Used loaded points
Trajectories: E:\PORCESOSLIDAR2011\LAPAZ_ORURO\18-05-2011\TRAY
No known points
Observe every 5th point
Solution for whole data set

Starting average dz: 0.1236
Final average dz: 0.1124

Standard error of unit 0.0502

Execution time: 53.0 sec
Number of iterations: 7

Points 18868
H shift -0.0903 Std dev 0.0453
R shift +0.0597 Std dev 0.0038
P shift -0.0206 Std dev 0.0097
Scale +0.00331

```

FUENTE: Elaboración propia en base a datos de SGT LTDA

4.3.1. Parámetros determinantes para el planeamiento de vuelo LIDAR.

Comprende las siguientes características

CUADRO 11: Parámetros del planeamiento de vuelo LIDAR

PROYECTO	PLATAFORMA	V	H'	θ	f_{sc}	L	Np	D _{LONG}	D _{TRANS}
		(km)	(m)		(Hz)	(m)	(puntos)	(m)	(m)
CARRETERA ACHERAL- CHOERE	Cessna 402C	180	1500 - 1800	\pm 17°	37.1	493,188	997.015	0,674	0,989

FUENTE: Elaboración propia en base a datos de SGT LTDA

Para una mejor comprensión de los datos necesarios para el planeamiento de vuelo, se muestran las fórmulas necesarias para este propósito mismos fueron señalados en el capítulo anterior.

A continuación se realizó el cálculo correspondiente para el llenado del cuadro 11.

Angulo de Barrido (θ)

+/- 17.0 °

Frecuencia de Barrido (f_{SC})

37.0 Hz

El operador gradúa tanto el ángulo de barrido como la frecuencia del mismo según la productividad requerida en el proyecto

Altura de Vuelo Operacional (H')

Variable entre 1500-1800 m

La altura de vuelo está limitada por "AERONAUTIA CIVIL" según las condiciones de trabajo que se presentan.

Largo de la Faja de Barrido (L)

$$L = 2 * H' * \tan \frac{\theta}{2}$$

Dónde:

L: Largo de la Faja de Barrido

H': Altura de Vuelo Operacional

θ : Angulo de Barrido

L=493,188 m

Velocidad de la Plataforma

180 km/h

La velocidad de barrido se encuentra dentro de los rangos estandarizados por el fabricante y dependen del tipo de aeronave empleada, además se tiene en cuenta la productividad con la que se requiere trabajar, por tanto es recomendable volar a una velocidad aproximada al menor rango para obtener una cantidad de datos que detallen mejor el área de trabajo.

Tasa de Repetición del Pulso LASER (F)

37.1 kHz

37100 Hz

Número de Puntos por Línea de Barrida (Np)

$$Np = \frac{F}{f_{sc}}$$

Dónde:

Np: Número de Puntos por Línea de Barrida

F: Tasa de Repetición del Pulso LASER

f_{SC}: Frecuencia de Barrido

$$Np = 997.015 \text{ puntos}$$

Espacio Longitudinal de los Puntos (D_{LONG})

$$D_{LONG} = \frac{v}{f_{sc}} * \frac{1}{2}$$

Dónde:

D_{LONG}: Espacio Longitudinal de los Puntosf_{SC}: Frecuencia de Barrido

v : Velocidad de la Plataforma

$$D_{LONG} = 0,674 \text{ m}$$

Espacio Transversal de los Puntos (D_{TRANS})

$$D_{TRANS} = \frac{L}{Np} * 2$$

Dónde:

D_{TRANS}: Espacio Transversal de los Puntos

L: Largo de la Faja de Barrido

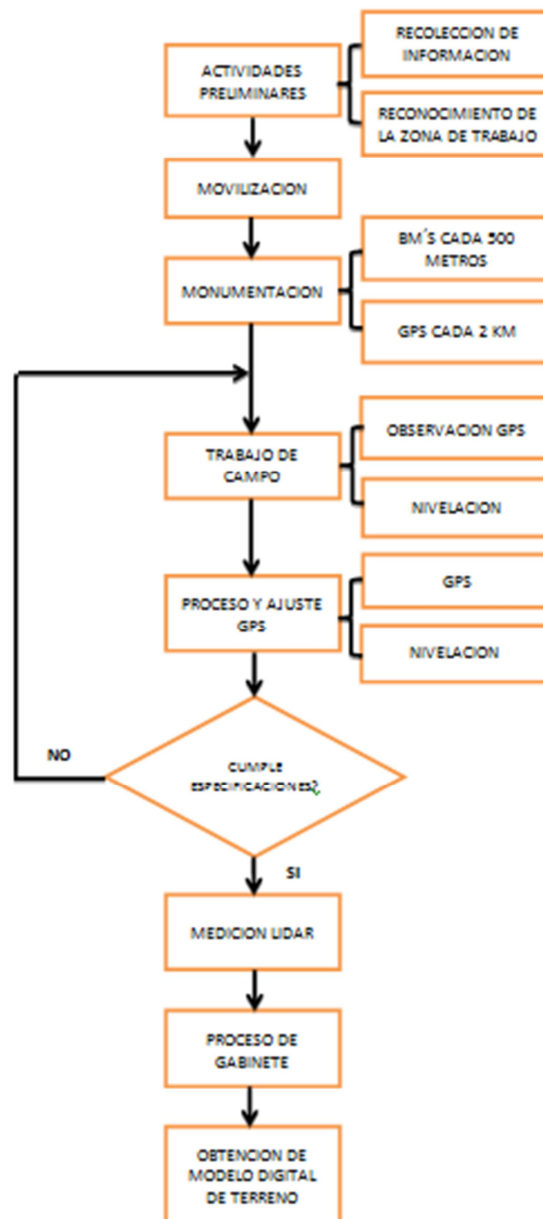
Np: Número de Puntos por Línea de Barrida

$$D_{TRANS} = 0,989 \text{ m}$$

4.4. Metodología de la toma de datos LIDAR

En base de la información recolectada e investigación realizada se ha trabajado bajo una metodología que ha permitido recolectar la información topográfica suficiente y necesaria para realizar la evaluación de la carretera Acheral – Choere.

Metodologia de Trabajo.



Con el propósito de alcanzar los objetivos de la investigación a continuación se detallará todas las actividades que se realizó junto a la empresa SGT Ltda., para la recolección de datos con la aplicación de la técnica LIDAR:

- **Actividades Preliminares**

Una vez emitida la orden de proceder, dentro de las actividades preliminares, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

1. Recolección de Información.

Información existente relacionada al proyecto.

Imágenes de diferentes fuentes.

Cartas Geográficas de las zonas y otros.

2. Reconocimiento de la zona.

En fecha julio de 2013 un equipo conformado por profesionales de SGT en compañía de mi persona como observadora, realizó el reconocimiento de la zona de trabajo. El resultado de dicha visita fue la planificación de sectores de trabajo, metodología para encarar los trabajos de control horizontal y vertical, tiempos requeridos y planificación del vuelo LIDAR.

- **Movilización.**

Una vez realizadas las Actividades Preliminares se forman dos grupos de trabajo, las mismas que consisten en el Grupo de Control Horizontal y el Grupo de Control Vertical.

Para el efecto se cuenta con dos camionetas todo terreno, las cuales transportan el personal y equipo necesario para este trabajo.

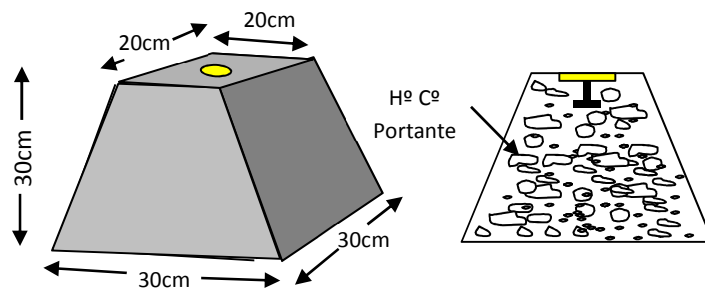
- **Monumentación de mojones para la densificación GPS (poligonal) y bancos de nivel (BM'S).**

El establecimiento de monumentos para lecturas Geodésicas y Topográficas tiene como propósito el de servir como puntos de control e inicio de lecturas posteriores que sean requeridas.

En esta fase del trabajo, se materializaron los mojones para cada punto GPS y/o Banco de Nivel, con material de concreto en cuyo centro lleva empotrado bulón, en el cual está inscrita la designación del vértice GPS y/o Banco de Nivel.

Los mojones fueron colocados con intervalos de distancias de 500 metros aproximadamente (para los Bancos de Nivel) y de aproximadamente 2Km. Para los puntos GPS, mismos que se encuentran al borde de la Carretera Acherál - Choere a fin de que estos no sean destruidos o removidos.

FIGURA 31. Dimensiones y forma de los Mojones colocados en la Carretera



Para una fácil identificación, estos bulones llevan la siguiente codificación:

ACH – XX

Donde:

<i>A</i>	Acheral
<i>Ch</i>	Choere
<i>XX</i>	Numero Correlativo

Ejemplo: ACH- 465

Es necesario indicar que cada uno de estos monumentos cuenta con Altura sobre el Nivel Medio del Mar.

En un intervalo de 500 metros aproximadamente las coordenadas Este y norte, han sido obtenidas con navegador.

Cada 2 kilómetros aproximadamente, se cuenta con coordenadas Este y Norte obtenidas con GPS diferencial.

- **Medición de poligonal base con equipos GPS doble frecuencia (Control Horizontal)**

La metodología LIDAR, al constituirse en una tecnología de alta precisión, requiere contar con un sistema de referencia materializado por un marco de referencia. En el caso de nuestro país, el sistema de referencia utilizado en la cartografía Nacional es el Sistema WGS-84 o Sistema Geodésico Mundial de 1984.

En base a este nuevo sistema de referencia el Instituto Geográfico Militar ha establecido una serie de estaciones estáticas y activas, materializando de este modo el marco de referencia necesario para cualquier tipo de trabajo de índole Geodésico o Topográfico.

Todas las posiciones GPS están basadas en la medición de la distancia desde los satélites hasta el receptor GPS en Tierra.

Esta distancia hacia cada satélite puede ser determinada por el receptor GPS.

Para la realización del Estudio Topográfico se utilizó receptores GPS DOBLE FRECUENCIA los cuales además se encuentran equipados con un radio modem, el cual permite trabajar en metodología de Tiempo Real.

Por sus características, el sistema GPS permite realizar mediciones geodésicas aún en condiciones atmosféricas desfavorables.

– **Medición de la red GPS.**

Las Mediciones de los puntos de Control Geodésico (control horizontal) se efectuaron, conformando figuras que determinen figuras geométricas cerradas (Diseño Red de GPS). Al constituirse en observaciones simultaneas y con más de dos vector de llegada por punto observado, se logró realizar un proceso y ajuste con las precisiones requeridas por la Administradora Boliviana de Carreteras.

Como es norma, durante la etapa de planificación, se tomó en cuenta que esta Red GPS, debería enlazarse a estaciones base conocidas. En este caso, contó con los puntos 383-H (ubicado entre la carretera a Oruro, pasando la ex tranca de Senkata, entre la población de villa remedios y Viacha B) y el CM-281 (ubicado en la ciudad de Oruro).

El trabajo de campo para la georeferenciación de los diferentes puntos fueron distribuidos consecuentemente de acuerdo a un cuadro de sesiones. Se dio inicio desde dos puntos de la RED MARGEN, ubicados en la población de Senkata con la designación de 383-H y el CM-281 ubicado en la Ciudad de Oruro.

Consecutivamente se procedió a las observaciones GPS en cada uno de los puntos materializados; posteriormente se realizó el trabajo de Nivelación Geométrica a lo largo del tramo carretero Acherál – Choere.

El Trabajo de Gabinete, fue realizado por el personal de la consultora SGT en oficinas de la misma, donde se procedió a la transferencia, procesamiento y ajuste de datos GPS, cálculo de elevaciones de cada punto nivelado geométricamente, y la elaboración de la documentación pertinente.

Para el planeamiento del proyecto de Densificación GPS, se utilizaron mapas de la Cartografía Nacional IGM Esc. 1:50.000. Sobre la base de la información extractada de estos mapas, y calculando las distancias requeridas para el efecto, se ubicaron los puntos GPS y los BM's, los cuales fueron materializados de acuerdo al requerimiento de la Administradora Boliviana de Carreteras.

Con el propósito de validar los datos, se verificaron los siguientes aspectos en campo:

1. Configuración de los receptores GPS:
 - Intervalo de registro de datos cada 15 seg.
 - Máscara de elevación 15° desde el horizonte.
 - PDOP – GDOP menor a 5
 - Método de observación estático
 - Modo diferencial.
 - Cuatro Satélites como mínimo durante la sesión.
2. Enlace a estaciones pertenecientes a la RED MARGEN.
3. Tiempo de recepción de acuerdo a lo establecido en los términos de referencia.

Concluido el trabajo de campo, se procedió a la transferencia de los datos de los equipos geodésicos al computador mediante el software de bajado de datos. Posteriormente se realizaron las siguientes tareas:

- Organización de los datos
- Transferencia de los datos a formato RINEX
- Procesamiento de la Información
- Ajuste de La Red

Para el ajuste de Puntos establecidos se ocuparon estaciones de Referencia que corresponden a la Red Geodésica MARGEN de Bolivia, las cuales se mencionan a continuación:

PUNTO	X	Y	UBICACION
383-H	587109.51	8146412.12	POCOHOTA
CM-281	699104.32	8013014.83	ORURO

Habiéndose realizado el procesamiento en campo para cada punto, la verificación se realizó nuevamente de acuerdo a lo siguiente:

- Restauración de todos los BACKUPS, creados en el procesamiento y ajuste de campo.
- Análisis Sumario Reporte del Proyecto (Project Report Summary) donde se verificó el cumplimiento de los requerimientos exigidos en los Términos de Referencia,
- Reprocesamiento de los datos crudos para la verificación de coordenadas obtenidas en campo.

- **Nivelación de bancos de nivel (BM'S) (Control Vertical)**

La Nivelación geométrica es un procedimiento topográfico que permite materializar la altura sobre el nivel del mar “arrastrando” una altura conocida referida a un mareógrafo, el cual registra el Nivel Medio del Mar.

Para le presente trabajo, la Nivelación se efectuó empleando dos Niveles Digitales Leica, modelo DNA 03, el mismo que tiene como característica el de registrar las lecturas en su módulo de memoria.

Para trabajos de alta precisión es necesaria la utilización de miras INVAR, las cuales evitan cualquier tipo de distorsión a causa de las condiciones atmosféricas, haciendo de estas sumamente confiables

Con el propósito de mejorar la calidad de los datos generados, la nivelación se realizó empleando técnicas clásicas con lecturas de ida y vuelta. Las precisiones obtenidas se encuentran dentro de la tolerancia de 8mm.

Antes de dar inicio al trabajo de Nivelación, y en cumplimiento de especificaciones técnicas de nivelación, se realizaron los siguientes trabajos preliminares:

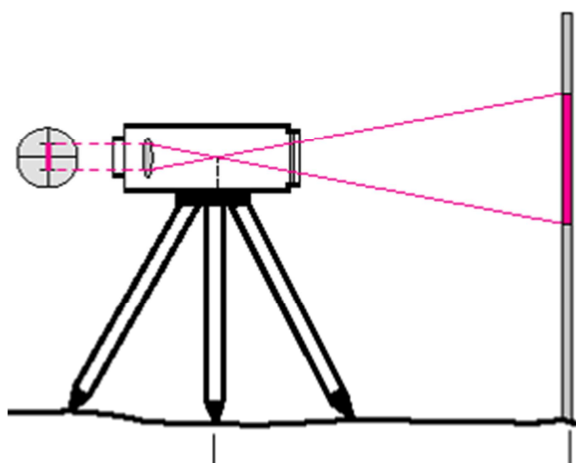
– Calibración de las Miras.

La finalidad de este chequeo es verificar y corregir el nivel circular de las miras, que si bien se constituyen en instrumentos electrónicos, no dejan de mantener ciertas características de los tradicionales instrumentos óptico-mecánicos.

De esta manera el eje vertical de la mira, deberá ser coincidente con el hilo vertical del instrumento en el momento de ser nivelada.

Este trabajo es muy importante porque dependiendo de este control las lecturas sobre las miras serán de mayor precisión, esta tarea se realizó al inicio de la nivelación de cada línea.

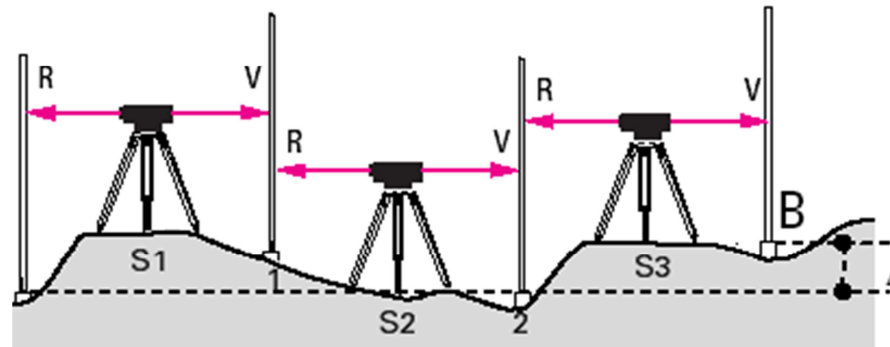
FIGURA 32 .Calibración de Mira



– Nivelación de las Secciones

Habiendo comprobado que el instrumento esté en condiciones de operatividad, se inició las corridas de nivelación, a partir del Banco de Nivel de referencia, perteneciente a la Red Geodésica de Nivelación.

Para el control de calidad y determinación de la precisión se aplicaron corridas de Ida y Regreso en cada sección, observando que las distancias de cada sección no excedan los 2 Km., normativa contemplada en las especificaciones técnicas para nivelación.

FIGURA 33. Nivelación de Secciones

Concluido el cierre de la sección se efectuó el control de campo a fin de verificar el cumplimiento de la tolerancia exigida por ABC.

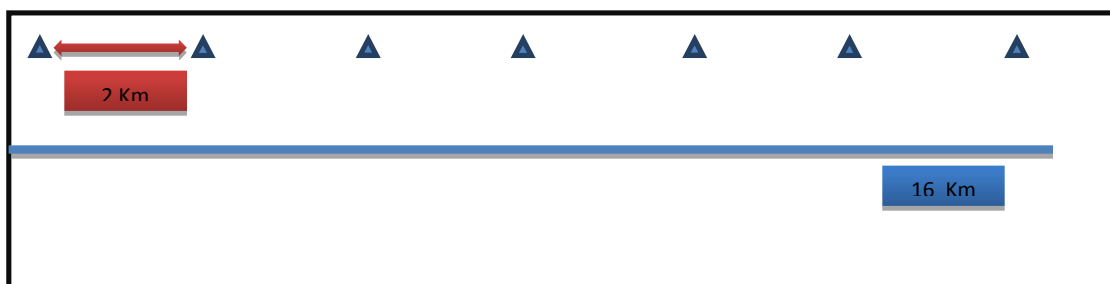
El posicionamiento en tierra de los GPS para la georreferencia de la nube de puntos LIDAR se la describe a continuación en los siguientes pasos:

Paso 1:

Se emplazan los GPS de doble frecuencia en tierra. En teoría se colocan los GPS a una distancia mínima de 2 Km, establecidos en las especificaciones requeridas por la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).

Paso 2:

De acuerdo a la distancia de barrido la cantidad de GPS varían por ejemplo a una distancia de 16 Km, se utilizarían 9 GPS que se encuentran a una distancia de 2 Km.

FIGURA 34: Posicionamiento de GPS en tierra

FUENTE: Elaboración propia en base a SGT Ltda., 2013

- **Proceso de información GPS y Nivel.**

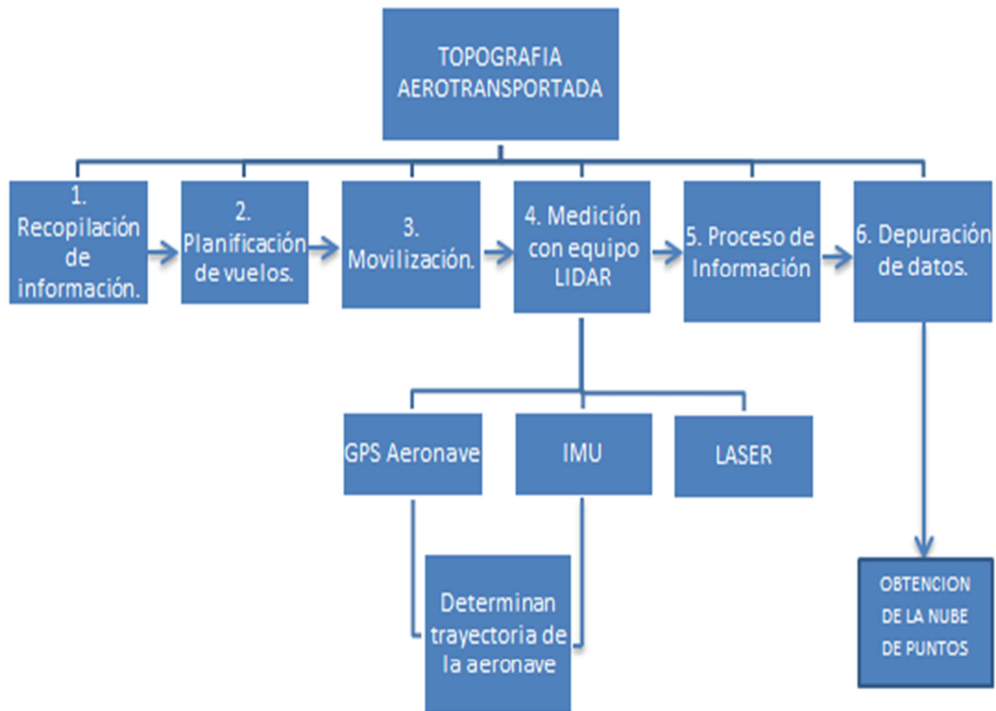
Una vez concluido el trabajo de campo, se procede al trabajo de gabinete, el que consiste básicamente en el bajado de datos de los receptores GPS y Niveles Electrónicos, para el proceso de estos datos y el posterior ajuste.

La información de estos dispositivos fue procesada empleando diferentes programas, entre los que destaca el uso de la aplicación SGT versión 2008, el mismo que fue diseñado por personal de SGT. Entre las bondades de esta aplicación se encuentra que este programa depura, calcula y ajusta toda información obtenida por los GPS y Niveles Digitales de cualquier marca para luego alimentar con los datos finales a los programas graficadores como Autodesk con plataforma AUTO CAD.

Proceso que se detalla a continuación:

- Transferencia de la información obtenida en campo y que se encuentre almacenada en los módulos de registro de GPS y tarjetas de memoria de los Niveles a sistemas computacionales por medio de programas desarrollados por nuestro personal.
- Detección y depuración de datos erróneos surgidos en el proceso de medición y transferencia de información.
- Cálculo de coordenadas y/o cotas de los puntos de control relevados topográficamente en campo.
- Conversión a un sistema de coordenadas planas absolutas de todos y cada uno de los puntos que tengan información de campo.

- **Medición con equipo “LIDAR” (Topografía Aerotransportada)**



Metodología y Programas Utilizados

1. Recopilación de información.

La primera actividad que se realiza para el levantamiento aerotransportado es la recopilación de la información que permita conocer las características del terreno y además la delimitación del área de trabajo. Esta información consiste básicamente en Coordenadas de los vértices del área de proyecto (X,Y Máximos, X,Y Mínimos), coordenadas de los puntos de control densificados para realizar los vuelos, Imágenes de satélite y cartografía de la zona de trabajo con el propósito de planificar rutas y tiempos de vuelo.

2. Planificación de vuelos.

Procesados estos datos, es necesario elaborar el plan de vuelo para la zona de trabajo, tomando en cuenta la velocidad de la aeronave y la altura de vuelo. Esta operación es realizada mediante un programa especializado.

El programa especializado de referencia permite trazar las líneas de vuelo paralelas con sobre posición entre franjas de levantamiento.

3. Movilización.

Con los datos del plan de vuelo, se procede a la movilización del personal al sitio de proyecto para instalar los equipos GPS en los puntos de control densificados para el efecto.

Paralelamente al desplazamiento por tierra, se procedió a la instalación del sensor LIDAR en avioneta CESSNA 402C del Servicio Nacional de Aerofotogrametría – SNA, única institución autorizada por Decreto Supremo para realizar levantamientos aerotransportados.

4. Medición con equipo LIDAR.

Para este trabajo, los vuelos se realizaron con una Avioneta CESSNA 402C la cual ha sufrido una modificación en la parte baja del fuselaje, habiéndose habilitado una compuerta la cual sirve de protección del sensor en el despeje y aterrizaje. Durante el vuelo, esta compuerta no debe obstaculizar el campo de vista entre el sensor y el exterior de la aeronave.

FIGURA 35: Aeronave Cessna 402C

Fuente: Elaboración propia

La altura máxima a la que se puede volar con un sistema LIDAR debería estar condicionada por la frecuencia de emisión del sistema láser, aunque en la práctica este intervalo de tiempo es suficientemente pequeño como para no ser el elemento determinante. El parámetro que establecerá el límite en la distancia será la pérdida de energía de la señal, que a partir de una cierta altura de vuelo no retornará al escáner láser.

Durante el vuelo, se toman medidas en los tres subsistemas de los que dispone el LIDAR: GPS, IMU y LASER, de forma independiente pero con una etiqueta de tiempos acorde con el tiempo GPS. Estas etiquetas serán las que permitan sincronizar todas las medidas en post-proceso.

Para realizar la adquisición de datos durante el vuelo y posterior pos-procesamiento y poder determinar la posición tridimensional de los puntos en la superficie se debe tener los siguientes componentes de mediciones:

GPS Aeronave (Global Position System): registra la posición tridimensional de latitud, longitud.

IMU (Inertial Measurement Unit): registra las rotaciones tridimensionales de la aeronave durante el vuelo.

GPS Estación Base: el GPS tiene que estar estacionado en un punto de coordenadas conocidas del marco de referencia nacional, (Red MARGEN referida al sistema WGS-84) la que proporciona las coordenadas de latitud y longitud, y para altitud la referencia es la elevación geométrica obtenida mediante la Nivelación Geométrica

Además de las medidas realizadas con el láser, es necesario conocer las coordenadas de la antena GPS y la posición del LASER respecto a esta antena para poder asignar coordenadas a los puntos del terreno.

Las coordenadas de la antena en cada instante se conocerán después de hacer el post-proceso en Gabinete. Previamente a este post-proceso, se deberá haber medido la distancia entre ambos. Finalmente, la orientación entre la antena GPS y el centro del LASER estará dada por los sistemas inerciales.

Durante el post-proceso, propiamente dicho, los datos GPS y los datos IMU se integran mediante un filtro para determinar la trayectoria del vuelo y los giros en cada instante. Estos elementos más el ángulo de salida que ha formado el pulso láser con respecto a la vertical, se combinan para determinar la línea imaginaria que ha descrito el pulso láser en el espacio.

Finalmente la longitud del camino descrito por el rayo, los giros definidos por los sistemas inerciales, y la posición del escáner láser obtenido a partir de las medidas GPS, se utilizarán para determinar las coordenadas WGS84 de los puntos medidos.

Una vez se ha llegado a este punto se tiene que realizar la conversión de alturas elipsoidales (alturas registradas por el sistema de posicionamiento global GPS) a cotas ortométricas.

El sistema tiene la habilidad de registrar informaciones de varios retornos y la intensidad del láser reflejado para cada punto obtenido. Para el presente proyecto se trabajó con 2 retornos:

1er. retorno: referente a la topografía de los objetos (vegetación)

Ultimo retorno: referente a la superficie del terreno

Parte de los haces emitidos por el sensor encuentran espacios entre las hojas de los árboles y logran penetrar hasta el suelo (último retorno), y otros encuentran vegetación u objetos que no son el propio terreno en las capas superiores (primer retorno).

Parte de los haces emitidos por el sensor encuentran espacios entre las hojas de los árboles y logran penetrar hasta el suelo (último retorno), y otros encuentran vegetación u objetos que no son el propio terreno en las capas superiores (primer retorno).

El resultado de un vuelo LIDAR es una colección de puntos con coordenadas conocidas. El sistema es muy versátil, por lo que el ángulo y la frecuencia de barrido lateral se pueden ajustar teniendo en cuenta la altitud sobre el terreno y la velocidad del avión de manera que la densidad de puntos sobre el terreno sea la deseada.

Los datos fueron adquiridos a través de un sensor láser aerotransportado modelo ALTM 3100EA (Enhanced Accuracy, que significa mayor precisión).

Las especificaciones del sistema para el vuelo y pos-proceso a lo largo del tramo carretero Acherai-Choere se muestran en el siguiente cuadro:

CUADRO 12. Especificaciones del sistema láser utilizado en el estudio

Descripción del sistema	Característica
Modelo del equipo	ALTM 3100EA
Fabricante del equipo	Optech
Frecuencia del láser	50000 pulsos por segundo – 50kHz
Frecuencia de Escaneo	37Hz
Ángulo de Escaneo	17°
Sistema Inercial (IMU) / GPS	Applanix
Altura de Escaneo	Variable, 1500 -1800 m. aprox.
Software de operación de vuelo	ALTM-NAV (Optech)
Software de procesamiento de datos	REALM (Optech)
Tipo de coleta de datos	Primer y último retorno del láser
Overlap de líneas de vuelo	30 %
Almacenamiento Datos	Disco duro extraíble
Clasificación de Láser	Clase IV
Requisitos de alimentación	28 V, 35 A (máximo)
Avioneta	CESSNA 402C

FUENTE: Elaboración propia en base a datos de SGT LTDA

5. Proceso de Información.

Obtenida la información de campo, tanto de los equipos GPS terrestres como los del sistema LIDAR y GPS de la aeronave, se procedió a la descarga y organización de esta información para su proceso hasta la obtención de los resultados esperados, proceso que se detalla a continuación:

Transferencia de la información obtenida en campo y que se encuentre almacenada en los módulos de registro de los GPS a sistemas computacionales que permiten transformar esta información a formatos compatibles con el software propio del Sistema LIDAR.

Se procede separar la información por vuelos realizados, tanto información LIDAR como GPS, para generar sesiones simultáneas entre los equipos terrestres y el móvil aéreo.

Con ayuda del software POS-PAC, propio del sistema, se procede al ajuste de GPS fijando las coordenadas de los puntos terrestres para la obtención de la trayectoria de cada uno de los vuelos realizados por la aeronave.

Obtenida la trayectoria, se procede a calcular el área de vuelo por día de trabajo para la obtención de la nube de puntos en formato laser compatible con el Software TERRASOLID que permite filtrar los distintos pulsos obtenidos durante los trabajos de vuelo.

A partir de la gran cantidad de pulsos recibidos (se emiten unos 50000 pulsos por segundo y se recibe el 95 % de los pulsos emitidos más sus ecos), se genera un modelo digital de terreno. Se obtendrá una nube de puntos que permitirá modelar el terreno con el máximo detalle.

La información obtenida con el Sistema LIDAR permite la obtención tanto de modelos digitales del terreno como del detalle que se encuentra en la zona de proyecto, detalles como Líneas de Alta Tensión, edificios, viviendas, caminos, áreas

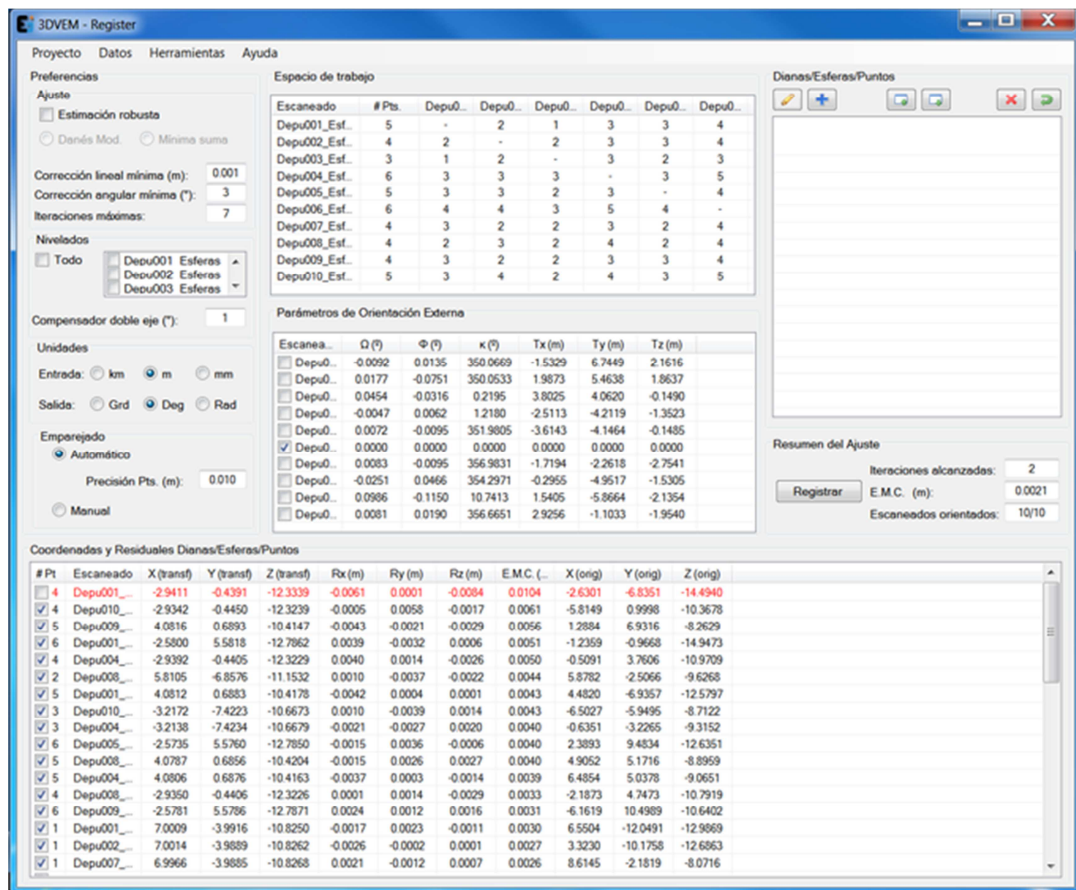
cultivables, etc. Información con la que es posible realizar el dibujo a detalle de estos elementos en insertarlos en los planos generales.

FIGURA 36. Computador portátil usado en la aeronave



Fuente: Elaboración propia

FIGURA 37. Colección de datos escaneados



Fuente: Elaboración propia

6. Depuración de datos.

Los sistemas de levantamiento topográfico de alta resolución generan inmensos volúmenes de datos detallados que permiten la creación de Modelos Digitales de Terreno (MDT) de alta precisión. Sin embargo, las herramientas de análisis de ingeniería frecuentemente se encuentran limitadas, aunque a una escala mucho menor que en el pasado, por restricciones tales como el tamaño de archivo y la memoria de la computadora.

La depuración se realizó en dos etapas:

1. El tamaño del grupo de datos se redujo mediante el uso de algoritmos de reducción arbitraria por medio de la cuadrícula de datos y la posterior reducción de la resolución de la cuadrícula, además también se descarta datos cada tercer punto, cuarto punto, etc.
2. De manera ideal, el tamaño del grupo de datos se redujo por medio de una reducción inteligente, descartando únicamente aquellos puntos que no afectan, o únicamente afectan mínimamente, los detalles del MDT. De este modo, se retienen aquellos puntos en los que se requiere detalle y se descartan los puntos que no afectan el modelo. Mediante el algoritmo de reducción inteligente primero se realiza una triangulación rápida de todo el grupo de distancias hacia el este, hacia el norte y puntos de elevación en una Red Irregular Triangular (RIT). El planteamiento tradicional para generar TIN ha sido aplicar un algoritmo de triangulación Delaunay a un grupo de puntos. Este planteamiento asegura que ningún círculo rodeado por los vértices de un triángulo en la red contenga otros puntos de la red. Este es un método sumamente óptimo para modelar las superficies irregulares, pero su generación demanda mucho tiempo, especialmente a medida que se incrementa el número de puntos de la superficie. A medida que cada punto se conecta a la pared, forma un triángulo y la pared avanza en dirección al Norte hasta que todos los puntos hayan sido triangulados. La razón por la que este algoritmo es tan rápido es que en cualquier momento dado del proceso, la computadora tiene un mínimo de información que rastrear. Cuando se añade un punto en la triangulación Delaunay, la computadora debe rastrear no sólo dicho punto sino de todos los demás puntos en todos los demás triángulos que ya han sido triangulados previamente. Esta es la razón por la cual se hace lento a medida que el número de puntos aumenta. En la Triangulación Rápida, la computadora únicamente tiene que rastrear el punto que se añade, y el borde adelantado de la pared del triángulo. Todo lo que se haya triangulado

detrás de la pared puede ignorarse. Este algoritmo ha tenido gran éxito con datos LIDAR, datos de levantamiento multihaz y otros grupos de datos de alta densidad. El algoritmo de reducción inteligente trabaja utilizando curvas de nivel hipotéticas. Para un grupo de curvas de nivel sumamente densas, la reducción se ejecuta mediante el procesamiento de cada vértice en la trama del triángulo original y la identificación de aquellos vértices que NO sean responsables de una sola curva de nivel que cruce cualquiera de los triángulos que contienen el vértice. Específicamente, el algoritmo de reducción primero marca cada punto en la red del vértice con un rótulo 'Innecesario'. Posteriormente, se procesan todos los triángulos. Esto significa que cada vértice será probado varias veces para triángulos diferentes. Cada lado del triángulo se procesa. Si los dos vértices en el lado de un triángulo cruzan el umbral de la curva de nivel, entonces AMBOS vértices se marcan como 'Necesarios'. Con excepción del inicio, los vértices NUNCA se marcan como 'Innecesarios'. Una vez que se han evaluado todos los demás lados del triángulo, la red del vértice se describe conteniendo únicamente aquellos puntos marcados como 'Necesarios'. Esta técnica asegura que las áreas con profundidades variables no sean reducidas mientras que la densidad del punto en áreas relativamente planas se ve ampliamente reducida. El intervalo de contorneado utilizado es el factor que controla la reducción del punto y también la pérdida de precisión.

- **Revisión y Aprobación**

Una vez terminado el proceso de los datos obtenidos, se procedió a la elaboración del informe final con los archivos de todos los Puntos en formato texto con las coordenadas Este, Norte y Elevación, que pueden ser interpretados por cualquier software de esta temática, además del dibujo de detalles en CAD ubicados en el área de proyecto, para su revisión y aprobación.

EQUIPO UTILIZADO

El equipo disponible para la realización del trabajo lidargramétrico se describe a continuación:

GPS

- 5 Receptores GPS de doble frecuencia, marca Sokkia, Novatel Millennium.

Estos receptores fueron utilizados para la densificación de la Red GPS como para el establecimiento de puntos base y control LIDAR.

Las características de estos receptores son las siguientes:

Función tiempo real, combina todos los observables GPS (Fase portadora L1 y L2, código P(L1) Código C/A, Código P(L2)).

Número de canales: 12 L1 y 12 L2, rastreo continuo.

Métodos de observación: estática, estática rápida, cinemática, cinemática con inicialización en vuelo, reocupación, Stop and Go y tiempo real.

Medición de fase con toda la longitud de onda de las frecuencias L1 y L2.

Precisión en medición estática: $\pm (5+1\text{ppm}\cdot D)$ mm.

Precisión en medición cinemática: $\pm (10+1\text{ppm}\cdot D)$ mm.

Antenas para Geodesia tipo micro Strip, con plano de tierra integrado.

NIVEL DIGITAL

- 3 Niveles Digitales, marca Leica, modelo DNA 03

Precisión ± 0.3 mm. por km. en doble nivelación.

Módulo de registro REC, para almacenamiento de información.

Lecturas y medición por proceso de imagen, tanto en elevación como en distancia.

Dos miras INVAR con código de barras.

AVIONETA

Aeronave Cessna 402C

PERSONAL ASIGNADO AL TRABAJO

El personal asignado para la realización de los trabajos descritos anteriormente, es el detallado a continuación:

TRABAJOS DE CAMPO

- 3 Topógrafos con especialidad en manejo de GPS y Nivel respectivamente.
- 6 Alarifes.
- 2 Pilotos y un técnico.
- Especialista para manejo y control del Sistema LIDAR ALTM 3100EA.
- Conductores, encargados de la movilización y transporte en tierra.

TRABAJOS DE GABINETE

- 2 Procesadores de datos, responsables del área de cálculos y generación de documentos.
- Dibujante responsable del área de representación gráfica.

4.5. Elaboración de Modelos Digitales del Terreno (MDT)

En estos últimos años se viene aplicando la técnica LIDAR en trabajos y requerimientos altimétricos. Bolivia cuenta con esta tecnología, la consultora SGT propietaria del equipo en estudio ha establecido una metodología que pueda guiar a los usuarios finales a utilizar los datos LIDAR con absoluta confianza.

Para tener una validación de la calidad de los resultados se puede establecer vínculos directos según las operaciones realizadas y por tanto se establece que es sumamente importante desarrollar énfasis a momento de realizar los siguientes pasos:

- **Procesamiento de datos preliminares**

El procedimiento de realizar los datos preliminares se describe a continuación en los siguientes pasos:

Paso 1:

Colecta de datos LIDAR:

Contar con los datos procesados de la nube de puntos LIDAR en coordenadas E, N, H. (Ver Figura).

Los datos LIDAR al ser colectados con la interacción de un GPS diferencial y una unidad de medida inercial, se encuentran referidas a un sistema de referencia WGS 84, en el presente caso las coordenadas están procesadas por el software POS PAC que proporciona coordenadas Este, Norte y Alturas.

Al ser una gran cantidad de pulsos LASER se recomienda que las coordenadas deban ser del último pulso LASER del barrido LIDAR ya que este llega hasta la superficie del suelo.

El formato de salida de las coordenadas, es el LAS, aunque en general, estas son exportadas al formato TXT el cual es versátil permitiendo el empleo en cualquier software de análisis de datos geográficos.

FIGURA 38: Coordenadas en formato .TXT

pto	X	Y	Z
2210348	587258,62	8161499,87	3936,07
2210349	587257,67	8161500,81	3936,4
2210350	587244,03	8161499,58	3936,85
2210351	587244	8161500,2	3936,85
2210352	587243,94	8161500,13	3936,75
2210353	587243,99	8161499,64	3936,8
2210354	587243,15	8161498,63	3937,52
2210355	587243,94	8161500,19	3935,75
2210356	587243,97	8161499,59	3935,77
2210357	587243,23	8161498,58	3936,52
2210358	587242,98	8161501,14	3936,47
2210359	587242,88	8161501,11	3935,95
2210360	587243,1	8161498,7	3935,85
2210361	587243,99	8161499,9	3936,06
2210362	587244,76	8161600,65	3938,44
2210363	587245,95	8161582,31	3938,25
2210364	587248,21	8161544,83	3937,88
2210365	587250,38	8161515,33	3937,71
2210366	587252,58	8161482,2	3937,49

FUENTE: Elaboración propia en base a datos de SGT LTDA

Después del proceso de los datos brutos a continuación se detalla el procedimiento para obtener el producto final del empleo de la técnica LIDAR.



- Contar con las coordenadas N, E, H

Como se mencionó anteriormente en primer lugar se debe contar con las coordenadas N, E, H, las mismas que fueron georreferenciadas y procesadas por los softwares proporcionados por el fabricante del sistema LIDAR, en este caso OPTECH, estos son REALM, ALTM y TERRASOLID, como resultado de este proceso de los datos brutos por estos paquetes se puede llegar a obtener la nube de puntos en formato .TXT.

Este formato es muy versátil permitiendo su manipulación en cualquier paquete destinado al estudio de la superficie terrestre y que pueda analizar y procesar los datos que se encuentra dentro del archivo. A continuación se muestra el formato de salida TXT de las coordenadas N, E, H del barrido de la carretera Acheral - Choere donde contiene 9141 coordenadas.

FIGURA 39: Formato de presentación TXT

The image shows a Notepad window titled 'xyzlprarya.txt - Bloc de notas'. The window contains a list of 40 rows of data, each with four columns of numbers. The numbers are formatted with commas as thousands separators and periods as decimal separators. The first column contains IDs from 256848 to 256887. The second column contains values ranging from 587202.390 to 587205.650. The third column contains values ranging from 8161552.850 to 8161555.400. The fourth column contains values ranging from 3937.220 to 3937.380.

256848	587202.390	8161552.850	3937.220
256849	587211.570	8161553.590	3937.320
256850	587213.540	8161555.050	3937.360
256851	587214.640	8161555.270	3937.390
256852	587215.950	8161555.520	3937.430
256853	587215.070	8161554.290	3937.350
256854	587218.790	8161555.020	3937.470
256855	587216.520	8161556.470	3937.360
256856	587219.450	8161556.220	3937.420
256857	587220.020	8161554.380	3937.360
256858	587220.100	8161555.300	3937.390
256859	587223.600	8161555.980	3937.530
256860	587224.910	8161556.240	3937.570
256861	587226.000	8161556.460	3937.590
256862	587223.160	8161556.950	3937.460
256863	587227.240	8161555.780	3937.630
256864	587220.750	8161556.480	3937.370
256865	587227.310	8161556.720	3937.670
256866	587228.410	8161556.940	3937.630
256867	587221.850	8161556.690	3937.420
256868	587205.010	8161553.370	3937.260
256869	587203.700	8161553.110	3937.260
256870	587203.180	8161553.810	3937.310
256871	587206.110	8161553.580	3937.340
256872	587207.420	8161553.840	3937.300
256873	587205.590	8161554.290	3937.350
256874	587215.200	8161556.210	3937.370
256875	587201.930	8161554.680	3937.250
256876	587200.840	8161554.460	3937.230
256877	587199.740	8161554.250	3937.200
256878	587198.360	8161552.860	3937.150
256879	587203.240	8161554.930	3937.290
256880	587209.080	8161555.000	3937.250
256881	587209.370	8161556.130	3937.360
256882	587211.140	8161554.580	3937.330
256883	587206.970	8161555.650	3937.420
256884	587208.280	8161555.920	3937.340
256885	587204.560	8161555.180	3937.380
256886	587198.430	8161553.990	3937.200
256887	587205.650	8161555.400	3937.380

FUENTE: Elaboración propia en base a información obtenida de SGT Ltda.

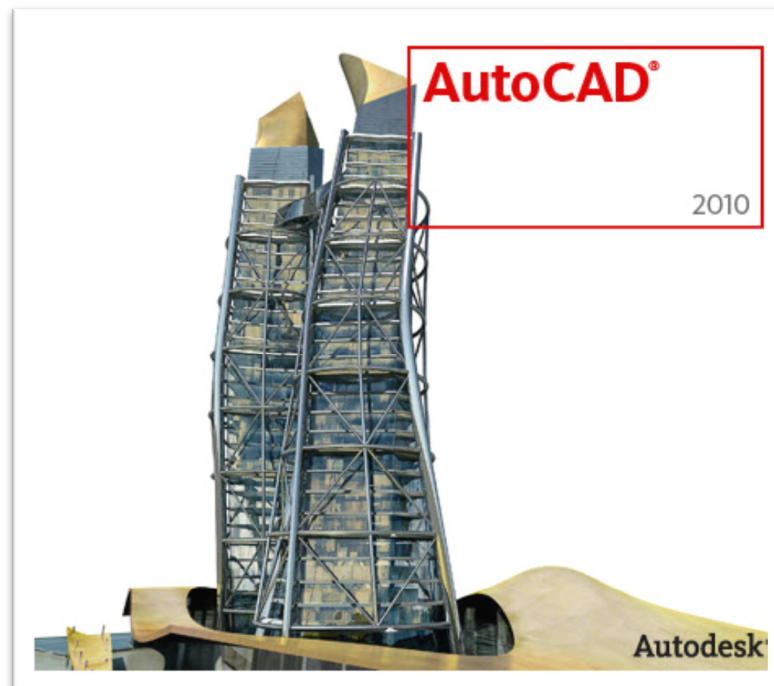
- Proceso de datos obtenidos de LIDAR

Para el análisis de las coordenadas obtenidas por el sensor LIDAR se utilizó los programas AUTOCAD en su versión 2010, el cual tiene las siguientes características generales:

El AUTOCAD es un software CAD utilizado para dibujo 2D y modelado 3D. Actualmente es desarrollado y comercializado por la empresa Autodesk. El nombre AutoCAD surge como creación de la compañía Autodesk, en que Auto hace referencia a la empresa creadora del software y CAD a Diseño Asistido por Computadora (por sus siglas en inglés) teniendo su primera aparición en 1982.

AutoCAD es un software reconocido a nivel internacional por sus amplias capacidades de edición, que hacen posible el dibujo digital de planos de edificios o la recreación de imágenes en 3D, es uno de los programas más usados por arquitectos, Ingenieros y diseñadores industriales

FIGURA 40. AutoCAD Logo



Existen bastantes programas que son útiles para la generación de modelos digitales del terreno (MDT). En este trabajo se optó por el citado anteriormente para demostrar que los datos LIDAR después de haber sido procesados son sencillos y de fácil uso.

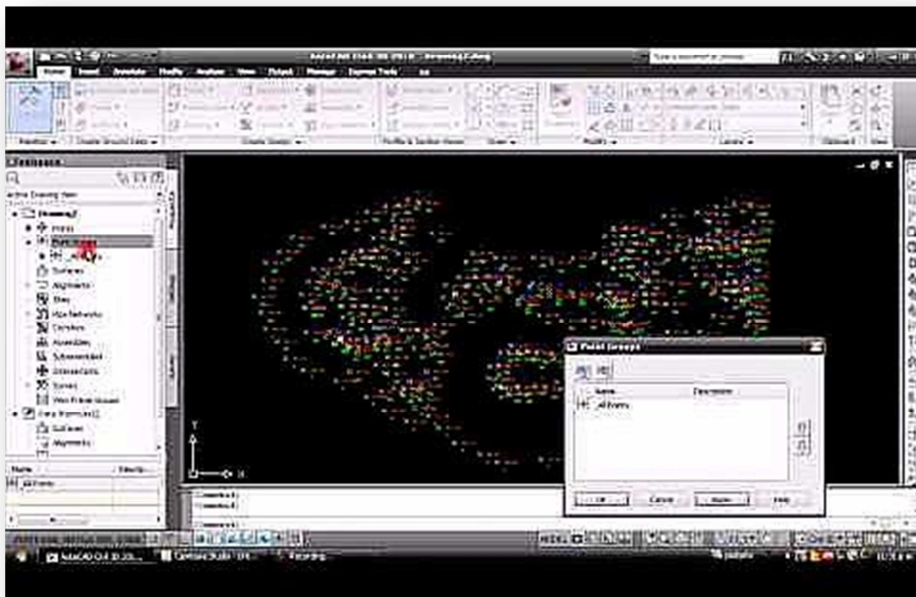
- Proceso en el software

A continuación se detallara el proceso de generación de MDT en los siguientes pasos:

1. Obtención las curvas de nivel

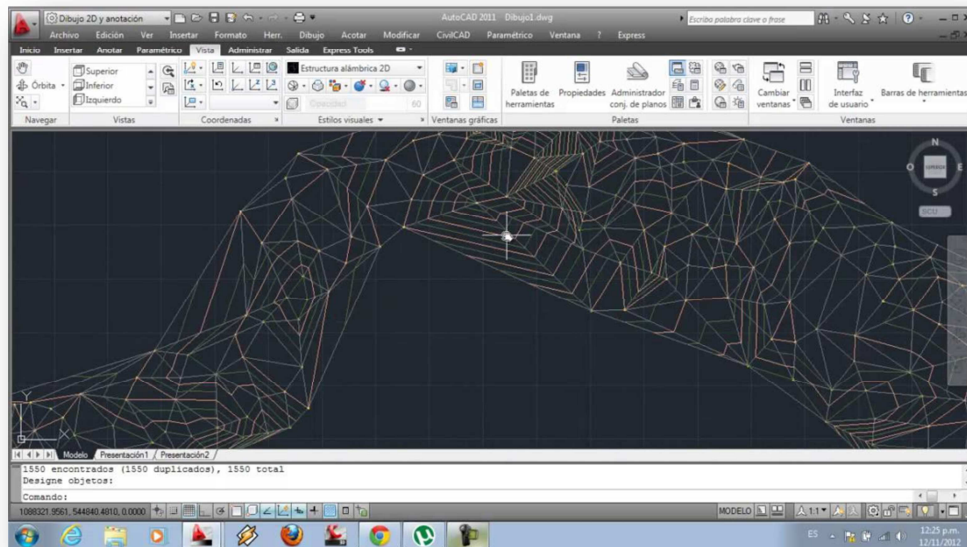
Para obtener las curvas de nivel en primer lugar se debe importar el archivo TXT a la plataforma para ser transformada al formato el cual trabaja el software AUTOCAD.

Del menú se selecciona la rutina “Importar Puntos”, el tipo de archivo debe ser X, Y, Z, en estas coordenadas se encuentran los datos procesados por el LIDAR.



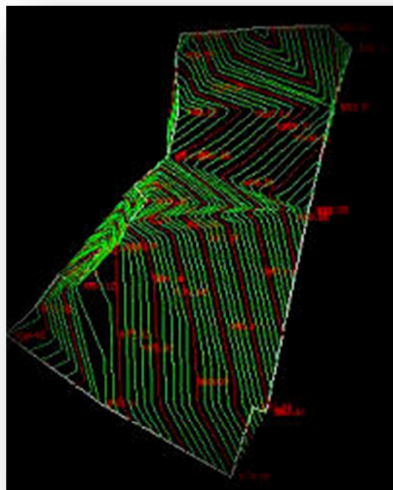
FUENTE: Elaboración propia

Se importan los datos de la planilla para luego realizar la triangulación en el AUTOCAD.



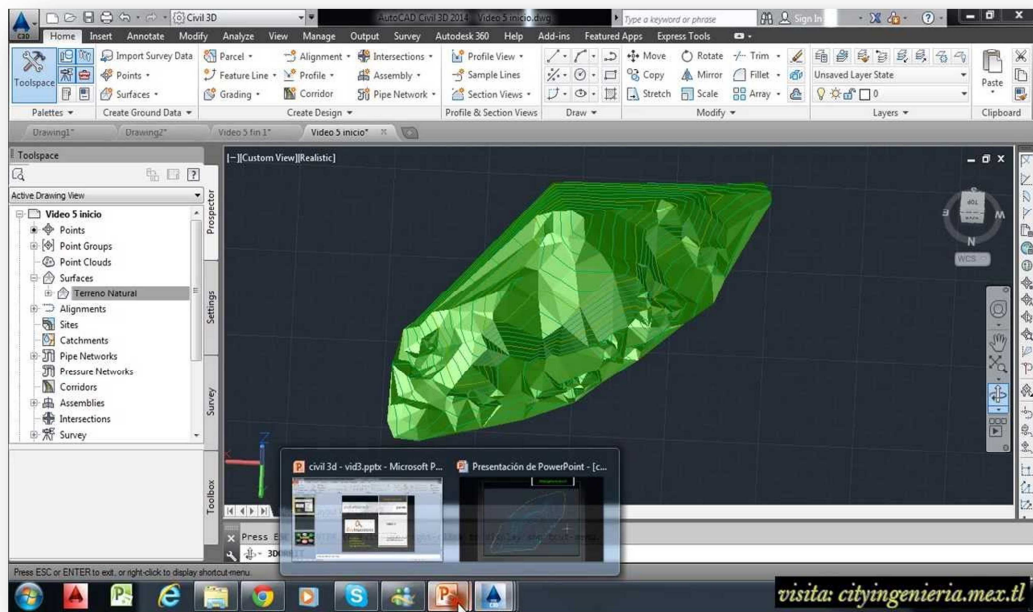
FUENTE: Elaboración propia

Luego realizando el procedimiento obligatorio se generan las curvas de nivel y se dan las respectivas acotaciones:



FUENTE: Elaboración propia

Para generar la superficie en 3D a partir de las curvas de nivel, se selecciona la opción OBJECT VIEWER, es un visor que permite ver en órbita las curvas de nivel.



FUENTE: Elaboración propia

De esta manera concluye el presente trabajo.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Análisis de Resultados

Para realizar trabajos con sistema LIDAR se desarrolló una metodología de trabajo basada en la información de la empresa SGT Ltda., que resulta muy útil para obtener organizadamente los resultados de la nube de puntos final.

Un proyecto LiDAR se puede dividir en dos bloques claramente diferenciados: la adquisición de los datos y el procesado de los mismos.

Los puntos de control establecidos para realizar cualquier levantamiento en las áreas definidas (Control Vertical y Horizontal) se encuentran referenciados a la RED MARGEN establecida en nuestro país.

La ubicación y caracterización de los puntos de control (BM's y pares geodésicos) son estratégicos e influyentes en la confiabilidad y validación de los datos obtenidos con el sistema LIDAR.

El personal designado para la realización de los trabajos tanto en campo como en gabinete debe ser especializado e idóneo, de la operación con la que lleven a cabo la medición dependerá también la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Cabe destacar que para un levantamiento LIDAR se debe tomar en cuenta factores importantes para la obtención de resultados confiables, estos factores son:

- La calibración del sistema antes de efectuarse el levantamiento, la misma que se realizó cada vez que el equipo era removido de la plataforma, se lleva a cabo sobre un área preferentemente plana y extensa con coordenadas conocidas.
- La altura de vuelo de la plataforma, la cual determino la productividad

de la cantidad de puntos que se obtuvieron

- La manipulación de los datos al momento del procesamiento y posterior depuración, esta parte de la metodología es muy importante debido a que en ella se determina la semejanza del resultado obtenido con la superficie real del terreno
- La manipulación del sensor en el momento de montar y desmontar en la plataforma. La instalación una vez terminada cumple en todas las medidas de seguridad correspondiente.

No se contó con los datos crudos del levantamiento LIDAR, por celo y seguridad de la empresa SGT Ltda., lo que no permitió tener una mayor apreciación de los datos obtenidos directamente del levantamiento sin realizar las correcciones debidas antes de ser entregada la nube de puntos en formato TXT.

En definitiva el producto final que nos determina un levantamiento con la metodología LIDAR es el modelo digital del terreno, para que este producto final sea satisfactorio y permita tener una mayor confiabilidad y certeza se requiere lo siguiente:

- Que los puntos del LIDAR sean depurados para lo cual se requiere de personal especializado en este proceso.
- Que la triangulación sea exactamente entre puntos cuya certeza sea muy alta en cuanto a la posición plani-altimétrica.
- Desarrollada la triangulación se realice una segunda depuración eliminando algunas interpolaciones no correctas que originen distorsión del modelo digital.
- Obtención de un modelo digital con curvas suavizadas de manera que se acerquen con mayor grado a la realidad del terreno.

Para reafirmar que el sistema LIDAR es más preciso y óptimo, de los datos obtenidos por el barrido LASER se realizó una comparación con puntos obtenidos mediante topografía tradicional:

A momento de realizar las Actividades Preliminares pertinentes como es la recolección de documentos existentes acerca del tramo en estudio, se obtuvo los puntos de un levantamiento topográfico realizado años anteriores mediante TOPOGRAFIA TRADICIONAL del área de estudio, estos datos están respaldados debido a que fueron base del **“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD, DISEÑO FINAL E IMPACTO AMBIENTAL ASFALTADO TRAMO VIAL “CARAPARÍ – PALOS BLANCOS”**, tal información fue proporcionada por el MUNICIPIO DE CARAPARI.

Para validar los datos obtenidos con el sistema LIDAR se procedió a realizar una comparación de perfiles longitudinales y planos en planta. (Ver planos)

Los perfiles longitudinales fueron superpuestos para realizar una mejor apreciación de la variación de los mismos; para definir cuál es el más aproximado al terreno natural se realizó un recorrido físico de la zona en estudio.

El sistema LIDAR en este caso se asemejan mas.

Es importante recalcar que la comparación de puntos no es posible debido a que las metodología de trabajo son diferentes dando a su vez distintos puntos de levantamiento, por tanto se observa únicamente los productos finales de ambas técnicas.

Las curvas de nivel generadas con los datos del sistema LIDAR son más armonizadas en comparación con las de topografía tradicional (Ver planos)

La cantidad de puntos obtenidos con tecnología LIDAR supera en número notablemente a la metodología tradicional, lo que también hace que el sistema sea más preciso y óptimo.

Al realizar una comparación con levantamientos mediante topografía tradicional se deben considerar los tiempos empleados en el proceso de captura de información y en la elaboración de productos, además del tipo de superficies que se deben levantar, ya que implica mayor complejidad realizar levantamientos en zonas de pendientes abruptas mediante topografía tradicional. En topografía tradicional se deben realizar planes estratégicos para no afectar de manera invasiva la flora y fauna, se ejemplifica esto cuando se deben realizar roce en zonas con alta vegetación. Además se deben considerar los permisos para tener acceso a predios privados. Esto se traduce en que la utilización de LIDAR posibilita el ahorro en tiempo y dinero en la obtención de productos ya que utilizando el espacio aéreo no se deben realizar inversiones en estas actividades. Se debe mencionar que no se descarta la utilización de topografía tradicional, pero si el proyecto requiere la obtención de productos en corto plazo se debe considerar que la tecnología LIDAR es la más adecuada.

Al realizar una comparación de la tecnología LIDAR con Topografía Tradicional en términos de tiempo, ambas realizadas en las mismas condiciones, podemos afirmar:

Comparación Lidar vs Topografía tradicional (tiempo)

Longitud de camino levantado	LIDAR	TOPOGRAFIA TRADICIONAL
	Vuelo (días)	Levantamiento (días)
16 km	0,085	16

Fuente: Elaboración propia

Este cuadro está basado en la información recolectada tanto de la empresa SGT Ltda. como de los datos proporcionados por la sub gobernación de la Provincia Gran Chaco

en el municipio de Carapari. Se observa la optimización claramente del tiempo.

Para complementar el trabajo propuesto se define las limitaciones, ventajas y desventajas del método estudiado en función a la topografía Tradicional.

METODO TRADICIONAL			METODO LIDAR		
LIMITACIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS	LIMITACIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es sumamente complicado en grandes extensiones	No se necesita personal especializado	Demasiado tiempo en los levantamientos	No tener una avioneta propia y depender de terceros.	Reducción sustancial del tiempo en los levantamientos	Exigencia de personal especializado
Limita la presencia de mucha vegetación.	El costo de los equipos es más accesible	De acuerdo a la magnitud del trabajo mayor personal	El clima para realizar los vuelos	Procesos de campo y gabinete más rápidos	Mayor costo
En áreas inaccesibles limita las operaciones del levantamiento.	En el proceso de operación se hace un reconocimiento del terreno más real	Perdida de precisión de acuerdo al número de puntos por unidad de área	Falta de servicio técnico para el equipo en nuestro país.	Número de puntos que dan mayor certeza del modelo de terreno	No es fácil identificar el cuerpo sobre el que impacta, por esa razón se acompaña la toma de datos LIDAR con la adquisición de imágenes del área levantada
Las condiciones climáticas influyen en la operación y desempeño de los equipos	Los equipos son más accesibles y se encuentran disponibles en situaciones inesperadas	En grandes extensiones de terreno se arrastra demasiado error de medición	El láser siempre debe estar estático a momento de tomar las mediciones	Permite levantar grandes extensiones de terreno e inaccesibles por tierra	

FUENTE: Elaboración propia

En el cuadro anterior se menciona que la topografía tradicional es más accesible que el sistema LIDAR en el anexo D se presenta un detalle con la cotización del costo de cada metodología por km de levantamiento.

Haciendo una comparación efectivamente se observa la diferencia de precios, en nuestro país la topografía tradicional es más accesible.

Es importante recordar que en Bolivia la única empresa que ha incursionado en el sistema LIDAR es la consultora SGT Ltda., tal vez con los años al establecerse competencia exista variación en los precios.

El sentido de la trayectoria de vuelo es indistinto, estos se realizan tanto de ida y vuelta con el objetivo de ampliar la faja de barrido.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se agrupan todas las conclusiones del trabajo de grado y de los trabajos descritos en el cuerpo del mismo; desde el proceso de obtención de los datos LIDAR hasta la generación de Modelos Digitales del Terreno.

6.1. Conclusiones

El dinamismo del avance tecnológico en los últimos tiempos, conduce hacia la optimización de los recursos disponibles, encaminados hacia una evolucionada gestión utilizando la información generada. Las diferentes herramientas otorgadas por los MDT, son esenciales en el análisis y la transferencia de conocimiento gráfico de la superficie terrestre. La tecnología Lidar es parte de este avance tecnológico, ya que permite minimizar los tiempos empleados para generar los productos mencionados en esta memoria.

Una vez finalizado el presente estudio se cumplieron satisfactoriamente los objetivos específicos planteados a un principio del estudio, los conocimientos adquiridos permitieron realizar el procedimiento metodológico que emplea el Sistema LIDAR para la obtención de MDT, curvas de nivel, perfiles planimétricos y altimétricos. Alcanzando así el cumplimiento del principal objetivo de este trabajo de grado.

La tecnología Lidar es una tecnología compleja, donde la mayoría de las etapas son automatizadas, que requiere de la participación de profesionales que tengan conocimientos amplios de las Ciencias de la Tierra, tales como: Geodesia, Cartografía, Geomática, SIG, Fotogrametría, entre otros.

Los procesos automatizados mencionados en el punto anterior, requieren de la participación de un profesional idóneo para asegurar la calidad de los productos.

Para llevar a cabo un proyecto de esta envergadura es fundamental la participación de un Ingeniero Geomensor, el cual interviene en las siguientes etapas:

- Planificación de vuelo.
- Determinación de puntos de apoyo terrestre para el vuelo, con lo que se asegura la calidad de la red geodésica empleada en el proyecto.
- Determinación de sistemas de referencia planimétrica y altimétrica del proyecto.
- Controles de calidad.

La rapidez con que el sistema Lidar entrega resultados, permite disminuir los tiempos en la etapa de estudio y en la toma de decisiones, de este modo se acelera la ejecución del proyecto en cuestión. Debido a esta agilización será posible obtener productos de estos proyectos en corto plazo, lo que justifica la implementación del Sistema Lidar.

A través de la metodología planteada desde la etapa de planificación de vuelo hasta la etapa de post-proceso de datos Lidar, es posible generar productos a distintas escalas. La nube de puntos obtenida del procesamiento con data Lidar nos brinda una cantidad necesaria de puntos que posibilita la generación de escalas 1:2000, 1:1000 y 1:500. Estos productos cuentan con la suficiente información para alcanzar la precisión requerida.

LIDAR ha tenido un impacto en diversos ámbitos en la planificación y tiempos de diferentes proyectos de Ingeniería.

LIDAR por lo tanto, ha sobrepasado la barrera de ser un instrumento que solo permite la generación de modelos digitales de terreno, se amplía su funcionalidad para la generación de herramientas de control, producción y seguridad a través de análisis geoespacial.

6.2. Recomendaciones

– **Autocontrol**

La calidad planimétrica de los datos está dada por el ajuste de la red GPS, sin embargo para la comprobación altimétrica de los distintos productos es necesario generar un método de comprobación de la precisión.

Previo a la realización del vuelo Lidar es recomendable realizar una inspección en terreno para determinar las zonas en donde se hace necesario realizar controles de carácter altimétrico, estos son donde el ángulo de escaneo del Lidar pueda tener cierto grado de dificultad para llegar al terreno, como taludes inclinados y pendientes muy fuertes. La necesidad de realizar controles altimétricos se puede ampliar a diversos tipos de levantamientos realizados con Lidar dependiendo de las características del terreno, como es el caso de zonas de alta vegetación donde Lidar puede tener dificultades para penetrar la copa de los árboles, esto sirve para establecer si la altimetría representa las zonas donde las fotografías no son capaces de mostrar los cambios de pendiente sobre la zona en donde se realizó el levantamiento.

– **Condiciones climáticas**

Previa realización de vuelo se debe averiguar acerca de las condiciones climáticas de la zona a levantar, pues éstas pueden condicionar el avance regular de los días efectivos de vuelo. La existencia de gran nubosidad y humedad impide la obtención de una fotografía aérea de calidad ya que la presencia de estas impide observar con claridad el terreno.

– **Lidar + Fotogrametría**

La posibilidad de capturar simultáneamente datos LIDAR e imágenes de alta resolución, permite contar con una fuente de información enorme, al combinar ambas técnicas para obtener mejores productos derivados, como el MDT o la ortofoto.

También se recomienda realizar estudios profundos de la tecnología LIDAR de los productos generados por esta, podrían ser herramientas de gran utilidad en estudios multidisciplinarios en lo referente a la superficie del terreno, ya que en Bolivia esta técnica aún es incipiente.

Con estas recomendaciones se pretende obtener buenos resultados en el empleo de los productos generados por la tecnología LIDAR y así en futuros proyectos tener resultados fiables y así minimizar esfuerzos en el terreno en lo referente al trabajo de campo en la recolección de datos taquimétricos.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Análisis de Resultados

Para realizar trabajos con sistema LIDAR se desarrolló una metodología de trabajo basada en la información de la empresa SGT Ltda., que resulta muy útil para obtener organizadamente los resultados de la nube de puntos final.

Un proyecto LiDAR se puede dividir en dos bloques claramente diferenciados: la adquisición de los datos y el procesado de los mismos.

Los puntos de control establecidos para realizar cualquier levantamiento en las áreas definidas (Control Vertical y Horizontal) se encuentran referenciados a la RED MARGEN establecida en nuestro país.

La ubicación y caracterización de los puntos de control (BM's y pares geodésicos) son estratégicos e influyentes en la confiabilidad y validación de los datos obtenidos con el sistema LIDAR.

El personal designado para la realización de los trabajos tanto en campo como en gabinete debe ser especializado e idóneo, de la operación con la que lleven a cabo la medición dependerá también la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Cabe destacar que para un levantamiento LIDAR se debe tomar en cuenta factores importantes para la obtención de resultados confiables, estos factores son:

- La calibración del sistema antes de efectuarse el levantamiento, la misma que se realizó cada vez que el equipo era removido de la plataforma, se lleva a cabo sobre un área preferentemente plana y extensa con coordenadas conocidas.
- La altura de vuelo de la plataforma, la cual determino la productividad

de la cantidad de puntos que se obtuvieron

- La manipulación de los datos al momento del procesamiento y posterior depuración, esta parte de la metodología es muy importante debido a que en ella se determina la semejanza del resultado obtenido con la superficie real del terreno
- La manipulación del sensor en el momento de montar y desmontar en la plataforma. La instalación una vez terminada cumple en todas las medidas de seguridad correspondiente.

No se contó con los datos crudos del levantamiento LIDAR, por celo y seguridad de la empresa SGT Ltda., lo que no permitió tener una mayor apreciación de los datos obtenidos directamente del levantamiento sin realizar las correcciones debidas antes de ser entregada la nube de puntos en formato TXT.

En definitiva el producto final que nos determina un levantamiento con la metodología LIDAR es el modelo digital del terreno, para que este producto final sea satisfactorio y permita tener una mayor confiabilidad y certeza se requiere lo siguiente:

- Que los puntos del LIDAR sean depurados para lo cual se requiere de personal especializado en este proceso.
- Que la triangulación sea exactamente entre puntos cuya certeza sea muy alta en cuanto a la posición plani-altimétrica.
- Desarrollada la triangulación se realice una segunda depuración eliminando algunas interpolaciones no correctas que originen distorsión del modelo digital.
- Obtención de un modelo digital con curvas suavizadas de manera que se acerquen con mayor grado a la realidad del terreno.

Para reafirmar que el sistema LIDAR es más preciso y óptimo, de los datos obtenidos por el barrido LASER se realizó una comparación con puntos obtenidos mediante topografía tradicional:

A momento de realizar las Actividades Preliminares pertinentes como es la recolección de documentos existentes acerca del tramo en estudio, se obtuvo los puntos de un levantamiento topográfico realizado años anteriores mediante TOPOGRAFIA TRADICIONAL del área de estudio, estos datos están respaldados debido a que fueron base del **“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD, DISEÑO FINAL E IMPACTO AMBIENTAL ASFALTADO TRAMO VIAL “CARAPARÍ – PALOS BLANCOS”**, tal información fue proporcionada por el MUNICIPIO DE CARAPARI.

Para validar los datos obtenidos con el sistema LIDAR se procedió a realizar una comparación de perfiles longitudinales y planos en planta. (Ver planos)

Los perfiles longitudinales fueron superpuestos para realizar una mejor apreciación de la variación de los mismos; para definir cuál es el más aproximado al terreno natural se realizó un recorrido físico de la zona en estudio.

El sistema LIDAR en este caso se asemejan mas.

Es importante recalcar que la comparación de puntos no es posible debido a que las metodología de trabajo son diferentes dando a su vez distintos puntos de levantamiento, por tanto se observa únicamente los productos finales de ambas técnicas.

Las curvas de nivel generadas con los datos del sistema LIDAR son más armonizadas en comparación con las de topografía tradicional (Ver planos)

La cantidad de puntos obtenidos con tecnología LIDAR supera en número notablemente a la metodología tradicional, lo que también hace que el sistema sea más preciso y óptimo.

Al realizar una comparación con levantamientos mediante topografía tradicional se deben considerar los tiempos empleados en el proceso de captura de información y en la elaboración de productos, además del tipo de superficies que se deben levantar, ya que implica mayor complejidad realizar levantamientos en zonas de pendientes abruptas mediante topografía tradicional. En topografía tradicional se deben realizar planes estratégicos para no afectar de manera invasiva la flora y fauna, se ejemplifica esto cuando se deben realizar roce en zonas con alta vegetación. Además se deben considerar los permisos para tener acceso a predios privados. Esto se traduce en que la utilización de LIDAR posibilita el ahorro en tiempo y dinero en la obtención de productos ya que utilizando el espacio aéreo no se deben realizar inversiones en estas actividades. Se debe mencionar que no se descarta la utilización de topografía tradicional, pero si el proyecto requiere la obtención de productos en corto plazo se debe considerar que la tecnología LIDAR es la más adecuada.

Al realizar una comparación de la tecnología LIDAR con Topografía Tradicional en términos de tiempo, ambas realizadas en las mismas condiciones, podemos afirmar:

Comparación Lidar vs Topografía tradicional (tiempo)

Longitud de camino levantado	LIDAR	TOPOGRAFIA TRADICIONAL
	Vuelo (días)	Levantamiento (días)
16 km	0,085	16

Fuente: Elaboración propia

Este cuadro está basado en la información recolectada tanto de la empresa SGT Ltda. como de los datos proporcionados por la sub gobernación de la Provincia Gran Chaco

en el municipio de Carapari. Se observa la optimización claramente del tiempo.

Para complementar el trabajo propuesto se define las limitaciones, ventajas y desventajas del método estudiado en función a la topografía Tradicional.

METODO TRADICIONAL			METODO LIDAR		
LIMITACIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS	LIMITACIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es sumamente complicado en grandes extensiones	No se necesita personal especializado	Demasiado tiempo en los levantamientos	No tener una avioneta propia y depender de terceros.	Reducción sustancial del tiempo en los levantamientos	Exigencia de personal especializado
Limita la presencia de mucha vegetación.	El costo de los equipos es más accesible	De acuerdo a la magnitud del trabajo mayor personal	El clima para realizar los vuelos	Procesos de campo y gabinete más rápidos	Mayor costo
En áreas inaccesibles limita las operaciones del levantamiento.	En el proceso de operación se hace un reconocimiento del terreno más real	Perdida de precisión de acuerdo al número de puntos por unidad de área	Falta de servicio técnico para el equipo en nuestro país.	Número de puntos que dan mayor certeza del modelo de terreno	No es fácil identificar el cuerpo sobre el que impacta, por esa razón se acompaña la toma de datos LIDAR con la adquisición de imágenes del área levantada
Las condiciones climáticas influyen en la operación y desempeño de los equipos	Los equipos son más accesibles y se encuentran disponibles en situaciones inesperadas	En grandes extensiones de terreno se arrastra demasiado error de medición	El láser siempre debe estar estático a momento de tomar las mediciones	Permite levantar grandes extensiones de terreno e inaccesibles por tierra	

FUENTE: Elaboración propia

En el cuadro anterior se menciona que la topografía tradicional es más accesible que el sistema LIDAR en el anexo D se presenta un detalle con la cotización del costo de cada metodología por km de levantamiento.

Haciendo una comparación efectivamente se observa la diferencia de precios, en nuestro país la topografía tradicional es más accesible.

Es importante recordar que en Bolivia la única empresa que ha incursionado en el sistema LIDAR es la consultora SGT Ltda., tal vez con los años al establecerse competencia exista variación en los precios.

El sentido de la trayectoria de vuelo es indistinto, estos se realizan tanto de ida y vuelta con el objetivo de ampliar la faja de barrido.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se agrupan todas las conclusiones del trabajo de grado y de los trabajos descritos en el cuerpo del mismo; desde el proceso de obtención de los datos LIDAR hasta la generación de Modelos Digitales del Terreno.

6.1. Conclusiones

El dinamismo del avance tecnológico en los últimos tiempos, conduce hacia la optimización de los recursos disponibles, encaminados hacia una evolucionada gestión utilizando la información generada. Las diferentes herramientas otorgadas por los MDT, son esenciales en el análisis y la transferencia de conocimiento gráfico de la superficie terrestre. La tecnología Lidar es parte de este avance tecnológico, ya que permite minimizar los tiempos empleados para generar los productos mencionados en esta memoria.

Una vez finalizado el presente estudio se cumplieron satisfactoriamente los objetivos específicos planteados a un principio del estudio, los conocimientos adquiridos permitieron realizar el procedimiento metodológico que emplea el Sistema LIDAR para la obtención de MDT, curvas de nivel, perfiles planimétricos y altimétricos. Alcanzando así el cumplimiento del principal objetivo de este trabajo de grado.

La tecnología Lidar es una tecnología compleja, donde la mayoría de las etapas son automatizadas, que requiere de la participación de profesionales que tengan conocimientos amplios de las Ciencias de la Tierra, tales como: Geodesia, Cartografía, Geomática, SIG, Fotogrametría, entre otros.

Los procesos automatizados mencionados en el punto anterior, requieren de la participación de un profesional idóneo para asegurar la calidad de los productos.

Para llevar a cabo un proyecto de esta envergadura es fundamental la participación de un Ingeniero Geomensor, el cual interviene en las siguientes etapas:

- Planificación de vuelo.
- Determinación de puntos de apoyo terrestre para el vuelo, con lo que se asegura la calidad de la red geodésica empleada en el proyecto.
- Determinación de sistemas de referencia planimétrica y altimétrica del proyecto.
- Controles de calidad.

La rapidez con que el sistema Lidar entrega resultados, permite disminuir los tiempos en la etapa de estudio y en la toma de decisiones, de este modo se acelera la ejecución del proyecto en cuestión. Debido a esta agilización será posible obtener productos de estos proyectos en corto plazo, lo que justifica la implementación del Sistema Lidar.

A través de la metodología planteada desde la etapa de planificación de vuelo hasta la etapa de post-proceso de datos Lidar, es posible generar productos a distintas escalas. La nube de puntos obtenida del procesamiento con data Lidar nos brinda una cantidad necesaria de puntos que posibilita la generación de escalas 1:2000, 1:1000 y 1:500. Estos productos cuentan con la suficiente información para alcanzar la precisión requerida.

LIDAR ha tenido un impacto en diversos ámbitos en la planificación y tiempos de diferentes proyectos de Ingeniería.

LIDAR por lo tanto, ha sobrepasado la barrera de ser un instrumento que solo permite la generación de modelos digitales de terreno, se amplía su funcionalidad para la generación de herramientas de control, producción y seguridad a través de análisis geoespacial.

6.2. Recomendaciones

– **Autocontrol**

La calidad planimétrica de los datos está dada por el ajuste de la red GPS, sin embargo para la comprobación altimétrica de los distintos productos es necesario generar un método de comprobación de la precisión.

Previo a la realización del vuelo Lidar es recomendable realizar una inspección en terreno para determinar las zonas en donde se hace necesario realizar controles de carácter altimétrico, estos son donde el ángulo de escaneo del Lidar pueda tener cierto grado de dificultad para llegar al terreno, como taludes inclinados y pendientes muy fuertes. La necesidad de realizar controles altimétricos se puede ampliar a diversos tipos de levantamientos realizados con Lidar dependiendo de las características del terreno, como es el caso de zonas de alta vegetación donde Lidar puede tener dificultades para penetrar la copa de los árboles, esto sirve para establecer si la altimetría representa las zonas donde las fotografías no son capaces de mostrar los cambios de pendiente sobre la zona en donde se realizó el levantamiento.

– **Condiciones climáticas**

Previa realización de vuelo se debe averiguar acerca de las condiciones climáticas de la zona a levantar, pues éstas pueden condicionar el avance regular de los días efectivos de vuelo. La existencia de gran nubosidad y humedad impide la obtención de una fotografía aérea de calidad ya que la presencia de estas impide observar con claridad el terreno.

– **Lidar + Fotogrametría**

La posibilidad de capturar simultáneamente datos LIDAR e imágenes de alta resolución, permite contar con una fuente de información enorme, al combinar ambas técnicas para obtener mejores productos derivados, como el MDT o la ortofoto.

También se recomienda realizar estudios profundos de la tecnología LIDAR de los productos generados por esta, podrían ser herramientas de gran utilidad en estudios multidisciplinarios en lo referente a la superficie del terreno, ya que en Bolivia esta técnica aún es incipiente.

Con estas recomendaciones se pretende obtener buenos resultados en el empleo de los productos generados por la tecnología LIDAR y así en futuros proyectos tener resultados fiables y así minimizar esfuerzos en el terreno en lo referente al trabajo de campo en la recolección de datos taquimétricos.