

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
CAMPUS LOS ÁNGELES
INGENIERIA (E) GEOMENSURA**

**JAIME RAVANAL POBLETE
PROFESOR PATROCINANTE**



**ESTUDIO TOPOGRAFICO PARA PLANTA GEOTERMICA UTILIZANDO
EL SISTEMA LIDAR EN RIO TINGUIRIRICA ALTO**

**INFORME DE HABILITACION PROFESIONAL PARA OPTAR AL TITULO
DE INGENIERO DE EJECUCION EN GEOMENSURA**

**Rafael Letelier Larraguibel
Nelson Ramirez Cornejo
Alumnos**

LOS ANGELES, AGOSTO DE 2017

Sumario

La finalidad del presente trabajo, consiste en realizar un Levantamiento Topográfico con el sistema Laser(Lidar), para dos sectores con una extensión total de 550 hectáreas.

Para la realización de este informe aparte de la recopilación bibliográfica, se debió adquirir conocimientos en software de fotogrametría digital, Lidar y relacionar los datos de GPS con la planificación de vuelo, en esta parte involucra todo lo relacionado con este tipo de proyectos.

El trabajo se encuentra dividido en 4 capítulos, los cuales se describen brevemente a continuación:

Capítulo I, se describe los antecedentes generales del estudio del proyecto, definiciones generales y alcances necesarios para el desarrollo del trabajo

Capítulo II, que se refiere al marco teórico del trabajo en la cual se basa las definiciones de los conceptos empleados en el proyecto.

Capítulo III, en él se describen las definiciones aplicadas en teoría al proyecto y como se realiza un levantamiento con sistema lidar en general.

Capítulo IV, se describe el desarrollo del trabajo, procedimiento y equipos utilizados para la elaboración de la cartografía base mediante un levantamiento topográfico con el sistema Lidar.

INDICE	PAG
SUMARIO	2
LISTADO DE ILUSTRACIONES	5
CAPITULO I	
ANTECEDENTES GENERALES DEL ESTUDIO	7
Introducción	8
Planteamiento del problema	9
Objetivos Generales	10
Objetivos específicos	10
CAPITULO II	11
MARCO TEORICO	11
2.1 Topografía	12
2.1.1 Planimetría y Altimetría	13
2.2 Levantamientos Topográficos	14
2.2.1 Métodos taquimétricos	14
2.2.2 Método con Estación total	15
2.3 Levantamientos fotogramétricos	15
2.3.1 Apoyo terrestre convencional	16
2.3.2 Aerotriangulación	16
2.3.3 Restitución Fotogramétrica Clásica	17
2.3.4 Ortofoto Digital	18
2.4 Geodesia	18
2.4.1 Geoide y elipsoide	20
2.4.2 Modelo Geoidal EGM 08	24
2.4.3 Sistemas de referencia	27
2.4.4 Sistema WGS 84	27
2.4.5 Sirgas	28
2.5 GPS	31
2.5.2 Estación de referencia DGPS	36
2.5.3 Especificaciones de instrumental GPS	38
2.6 Sistema GLONASS	39
2.7. Modelos digitales de terreno	41
2.7.1 Definición de MDT	41



2.7.2	Estructuras de los MTD	42
2.7.3	Estructura Raster	43
2.7.4	Estructuras vectoriales	44
2.7.5	Estructura de triángulos	45
2.7.6.	Formato Hibrido	46
2.7.7	Algoritmo para la generación del MDT	48
2.8	Red irregular de triángulos	49
2.8.1	Evaluación de la calidad de los MDT	50
 CAPITULO III		 53
3.	PROCEDIMIENTO GENERAL LASER AEROTRANSPORTADO	54
3.1	Uso del sistema Lidar	55
3.2	Componentes del sistema	57
3.3	Tolerancias para levantamientos con laser aerotransportado	60
CAPITULO IV		61
4. APLICACIÓN LASER AEROTRANSPORTADO EN RIO TINGUIRIRICA ALTO		62
4.1	Área de estudio	62
4.2	Recopilación y análisis de información preliminar	64
4.3	Planificación de líneas de vuelo	64
4.4	Ejecución vuelo Lidar	68
4.4.1	Base estación GPS	68
4.4.2	Calibración levantamiento laser	70
4.5	Apoyo geodésico y cartográfico	72
4.5.1	Trabajo de gabinete	73
4.6	Generación de modelo digital	79
4.7	Generación de Orto imagen	80
4.7.1	Orientación de las imágenes	80
4.8	Generación de planimetría y toponimia	86
4.8.1	Edición cartográfica	86
4.8.2	Producto topográfico final	87
4.8.3	Control calidad gabinete	89

4.8.4	Autocontrol	90
4.8.5	Etapa de resultados	92
Conclusión		95
Bibliografía		98
Anexos		99
	Monografía APV3	100
	Monografía APV4	101

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Tablas N°		
1.-	Parámetros Sistema ITRF	28
2.-	Estaciones de referencia Utilizados en Chile	38
3.-	GPS de uso civil	39
4.-	Tolerancias para levantamientos con laser	60
5.-	Parámetros de vuelo	69
6.-	Coordenadas ajustadas geodésicas Sirgas	70
7.-	Coordenadas ajustadas UTM huso 19 Sirgas	70
8.-	Valores corrección del vuelo	72

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Figura N°		
1.-	Diferencia grafica entre elipsoide y geoide	22
2.-	Elipsoide	23
3.-	Figura matemática del elipsoide	24
4.-	Error N en el Geoide	26
5.-	Constelación GPS	32
6.-	Esquema Control	32
7.-	Ubicación geográfica estaciones de control	33
8.-	Mallas regulares	43

9.- Modelo de contornos	45
10.- Estructura TIN	46
11.- Estructura Híbrida	47
12.- Polígonos de malla TIN	50
13.- Grafico funcionamiento sistema	56
14.- Movimientos angulares del avión	59
15.- Ubicación sector proyecto	63
16.- Imagen zona proyecto	64
17.- imagen software altm nav	68
19.- Área de proyecto general	73
20.- Cobertura laser general del proyecto	75
21.- Puntos clasificados en software Terrascan	79
22.- Orientación imágenes línea de vuelo inicio proyecto	82
23.- Malla de triángulos	83
24.- Modelo de textura	84
25.- Modelo digital de elevación	85
26.- Edición cartográfica con civil 3D	88
27.- Laminas	89
28.- Área de control	91
29.- Reporte estadístico de autocontrol	92
30.- Modelo con curvas de nivel	94
31.- Ortoimagen	94
32.- Unión de los dos procesos	95
33.- Lamina de ejemplo proyecto finalizado	95





1. INTRODUCCION

Para el desarrollo de cualquier proyecto de ingeniería que considere una extensión importante de terreno, ya sea de diseño de obras de construcción, diseños de camino, tranques, minería etc. es necesario contar con una buena representación espacial del área geográfica de interés, vale decir una buena Base Topográfica, que permita el desarrollo seguro y preciso de dichas actividades.

Para realizar este tipo de actividades el mercado cuenta con distintos tipos de técnicas desde las más corrientes que trabajan con estaciones totales (Levantamiento Topográfico) hasta Levantamientos sin estar en contacto con la superficie que son los Fotogramétricos, Imágenes Satelitales y Sistemas Lidar.

El sistema LiDAR (Light Detection and Ranging) aerotransportado es un sistema de medición que utiliza una técnica de barrido óptico con pulsos láser para recoger información del terreno. El sistema escáner láser genera coordenadas tridimensionales de millones de puntos sobre la superficie terrestre en un corto período de tiempo.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa ENERGÍA ANDINA S.A. ha encargado a Asinge Ingeniería S.A. realizar un levantamiento topográfico en un sector del Rio Tinguiririca Alto, donde las condiciones geográficas hacen muy difícil utilizar otro tipo de metodología de tomas de datos de terreno que no sea con láser aerotransportado para dos sectores con una extensión total de 550 hectáreas.

El proyecto se encuentra emplazado en la Cordillera de los Andes a unos 56 kilómetros al este de la ciudad de San Fernando, al ser una zona montañosa se hace difícil el acceso para realizar el levantamiento de información directamente en terreno.

En el caso puntual de este proyecto, por indicación del mandante se planteó la necesidad de desarrollar el estudio Topográfico con sistema Lidar o laser Aerotransportado en desmedro de otros procedimientos para realizar el mismo trabajo, todo esto en virtud de contar con información actualizada, y con buena precisión que sirviera para el desarrollo del proyecto y con esto lograr resultados que permitan planificar y diseñar el proyecto.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos General

Elaborar de una base de información Topográfica, para su utilización en la planificación de un proyecto de camino en una empresa de ingeniería utilizando la técnica del Laser Aerotransportado en el Rio Tinguiririca Alto en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar un levantamiento topográfico a partir de la técnica con láser aerotransportado para dos sectores los cuales se encuentran emplazados en la Región de O'Higgins.
- Generar el plano topográfico a partir del levantamiento.
- Describir como se obtuvieron los productos topográficos.





2. MARCO TEORICO

Para fundamentar el trabajo realizado es necesario hablar de los principios básicos de la fotogrametría y apoyo terrestre, los cuales se desarrollarán a continuación.

2.1 Topografía

La topografía es considerada disciplinariamente, aquella que abarca todos los métodos para medir, procesar y difundir información acerca de la Tierra y nuestro medio ambiente en general. Su objetivo es mensurar determinadas extensiones de tierra, utilizando los datos necesarios para lograr representar gráficamente, sobre un plano a escala, sus características principales, tanto formas como accidentes. Si observamos la topografía desde un aspecto más científico, su definición se desarrollaría como la *“ciencia que determina las dimensiones y el contorno (características tridimensionales) de la superficie de la Tierra por medio de la medición de distancias, direcciones y elevaciones. Para ello hace uso del cálculo de operaciones geométricas (áreas, volúmenes y diversas cuantificaciones), así como la elaboración de perfiles y planos”* MOP Manual de carreteras vol 2, (2001). 630 p.

La representación gráfica tiene lugar sobre superficies planas, limitándose a pequeñas extensiones de terreno donde la curvatura terrestre no es influyente, en cambio para sectores más amplios de terreno existe la denominada geodesia la cual considera la curvatura terrestre para sus mediciones.

La topografía no solo se centra en el estudio de la tierra, sino que también comparte el área de los instrumentos utilizados que forman parte del proceso de representación detallada de la superficie terrestre.

Para lograr dicho objetivo la topografía se divide en dos aspectos:

2.1.1 Planimetría y Altimetría

A) **Planimetría** estudia el conjunto de instrumentos, métodos y procedimientos que tienden a conseguir la representación a escala de todos los detalles o puntos más importantes del terreno sobre la superficie plana, haciendo cuenta de su relieve, logrando una proyección horizontal similar del lugar.

B) **Altimetría** estudia el conjunto de métodos y procedimientos para lograr la determinación y representación de la altura, mejor conocida como “Cota”, de cada punto representado respecto a un plano de referencia, generalmente correspondiente al nivel medio del mar. Para ello hace uso tanto de planos de curvas de nivel, perfiles transversales y longitudinales, etc.

Para lograr una representación adecuada de una superficie se hace uso de elementos y conceptos básicos. Uno de ellos es el término “Levantamiento”, que es la operación técnica que consiste en medir directamente en el terreno con la ayuda de instrumentos como por ejemplo el nivel de ingeniero, taquímetro, teodolito, estación total, GPS, etc.

Las unidades de medidas que usa habitualmente la topografía son el metro que es “la longitud recorrida por un rayo de luz en el vacío en un tiempo de

1/299792456 segundos” y por otro lado las unidades angulares que dependiendo del país o sistema que se use será el grado sexagesimal o centesimal como es el caso para Chile.

2.2 Levantamientos Topográficos

Los levantamientos topográficos se realizan 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 en estudio.

Las herramientas necesarias para la representación gráfica o elaboración de los mapas topográficos se estudiaron en los capítulos precedentes, en el presente capítulo estudiaremos los métodos y procedimientos utilizados en la representación de superficies.

2.2.1 Métodos Taquimétricos

Por definición la taquimetría, es el procedimiento topográfico que determina en forma simultánea las coordenadas Norte, Este y Cota de puntos sobre la superficie del terreno.

Este procedimiento se utiliza para el levantamiento de detalles y puntos de relleno en donde no se requiere de grandes precisiones.

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.

2.2.2 Método con Estación Total

Una de las grandes ventajas de levantamientos con estación total es que la toma y registro de datos es automático, eliminando los errores de lectura, anotación, transcripción y cálculo; ya que con estas estaciones la toma de datos es automática (en forma digital) y los cálculos de coordenadas se realizan por medio de programas de computación incorporados a dichas estaciones.

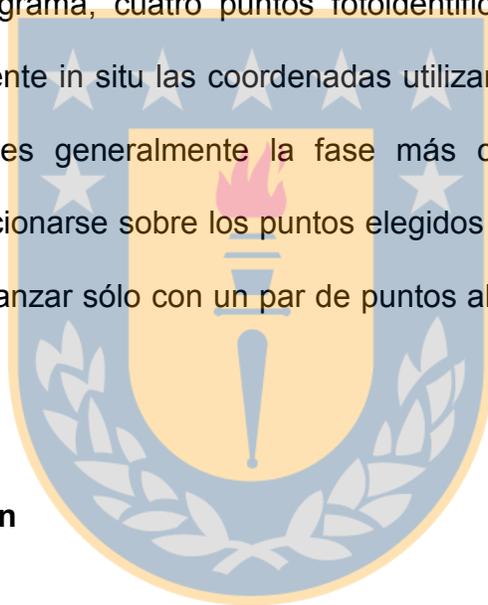
Generalmente estos datos son archivados en formato ASCII para poder ser leídos por diferentes programas de topografía, diseño geométrico y diseño y edición gráfica.

2.3 Levantamientos Fotogramétricos

La fotogrametría es el conjunto de métodos y procedimientos mediante los cuales podemos deducir de la fotografía de un objeto, la forma y dimensiones del mismo; el levantamiento fotogramétrico es la aplicación de la fotogrametría a la Topografía. La fotogrametría no es una ciencia nueva, ya que los principios matemático en que se basa son conocimientos desde hace más de un siglo, sin embargo sus aplicaciones topográficas son mucho más reciente.

2.3.1 Apoyo Terrestre Convencional

La aeronave al momento de exponer siempre presentará desnivelaciones, o sea, rotaciones relativas respecto de sus ejes longitudinal y transversal, además de la deriva, lo cual originará que el centro de la fotografía capturada no corresponderá efectivamente a la proyección ortogonal del terreno. Para precisar esta información fundamental en el proceso cartográfico, se hace obligatorio enviar cuadrillas a terreno compuestas por ingenieros en geomensura que ubiquen por cada fotograma, cuatro puntos fotoidentificables, a los cuales le determinarán directamente in situ las coordenadas utilizando equipos navegador GPS. Este proceso es generalmente la fase más costosa de un estudio cartográfico, pues posicionarse sobre los puntos elegidos y hacer las mediciones requeridas permiten avanzar sólo con un par de puntos al día dependiendo de la accesibilidad.



2.3.2 Aerotriangulación

La aerotriangulación son algoritmos matemáticos de alta complejidad que se usa para determinar teóricamente la orientación real de fotogramas, imágenes aéreas y de satélites a partir de puntos de apoyo obtenidos por topografía clásica u observaciones GPS. Predice las coordenadas de los centros de fotos de los fotogramas siguientes capturados. Estos algoritmos, permiten reducir el número de puntos de apoyo terrestre hasta en un 30%, sin embargo, igual se hace necesaria la captura en terreno de puntos fotoidentificados, lo cual sigue representando un gran porcentaje del costo de la cartografía, sobre todo en zonas remotas de difícil

acceso tales como zonas montañosas, boscosas, altiplánicas, fiordos, islas, bordes costeros. etc.

2.3.3 Restitución Fotogramétrica Clásica

El sistema análogo se basa en que el equipo restituidor es un componente mecánico-óptico de prismas y lentes de aumento que transmite mecánicamente los movimientos de navegación que hace el operador a una mesa de dibujo.

La óptica de este equipo permite una ampliación del modelo estereoscópico de hasta 8 veces, por lo que tiene una limitante de precisión y escala restituir.

El montaje del modelo óptico debe pasar por lo que se denomina orientaciones internas relativas y absolutas y para ello se debe efectuar esta calibración cada vez que se requiera montar el modelo estereoscópico, con lo que ningún montaje es igual a otro.

Para obtener las curvas de nivel, el operador debe seguir las marcas flotantes e ir colimando en forma constante por sobre el contorno del relieve, por lo que la intervención de las vista y manos conlleva de por si a errores en el dibujo.

La altura de los puntos que va trazando queda determinada por el contraste de los píxeles de la foto y que el software se encarga de comparar con las orientaciones del modelo ya grabadas.

2.3.4 Ortofoto Digital

Dentro de los métodos fotogramétricos digitales, la ortofoto es ya un producto "secundario" del proceso. Es entrecomilla el carácter de secundario, pues en realidad la ortofoto se obtiene como resultado, sin buscarlo, al conseguir la formación del modelo fotogramétrico. La rectificación digital (numérica) surge del modelo estero que ya está orientado, y donde se origina el DTM, que convierte la fotografía aérea en proyección ortogonal por algún método numérico.

2.4 Geodesia

La Geodesia, como definición, es una ciencia básica. Su fin principal es estudiar y determinar la forma más real de la Tierra, su campo de gravedad como también sus variaciones temporales y que inevitablemente en su conjunto conlleva a la orientación de la tierra en el espacio y a la determinación de posiciones geodésicas de cualquier punto en la superficie terrestre. Esto último está fuertemente ligado con la forma y dimensiones de la tierra, por lo tanto no se utilizan simplemente parámetros teóricos, sino que tiene una proyección práctica refiriéndonos a coordenadas y resolución de problemas geométricos sobre la superficie.

En términos más específicos, reconocemos como un ámbito superior dentro de lo que es el mundo de la geodesia, a aquellos parámetros teóricos los cuales comprende la geodesia física y la matemática, los cuales se encargan de determinar y representar la forma de la tierra con exactitud. En un ámbito más inferior, pero no menos importante, se reconoce la geodesia práctica o

topográfica, la cual se encarga de levantar y representar partes menores del planeta en las cuales por sus dimensiones no globales se pueden considerar como plana. Para ello se hace uso de ciencias tan importantes como lo es la Cartografía y Fotogrametría, cada una con metodologías de conocimiento obligatorio para un profesional relacionado con el mundo de la Geomensura.

Cabe mencionar que la Geodesia ha evolucionado en términos de campo de desarrollo, ya que hoy en día se ha logrado implementar está a problemas de organización, administración pública, catastro inmobiliario, saneamiento rural, geoprocesamiento, gestión, etc.

En síntesis, y abarcando un plano más actual con lo que es la Geodesia hoy en día, reconocemos algunos propósitos principales que posee.

Establecimiento y mantención de redes de control geodésico tridimensionales, nacional y global, reconociendo el tiempo como aspecto variante en dichas redes.

- **Medición y representación** de fenómenos geodinámicos tales como movimiento polar, mareas terrestres y movimientos de corteza.

- **Determinación del campo de gravedad terrestre**, incluyendo las variaciones temporales del mismo.

- **Determinación de parámetros**, similar a los geodésicos, para otros cuerpos del sistema solar.

2.4.1 Geoide y Elipsoide

En el año 1735 la Academia Francesa de Ciencias realizó dos expediciones. Una de ellas tomó como destino Laponia y la otra a Perú. La finalidad de estos viajes era medir la longitud de un arco de un grado a lo largo de un meridiano, uno cerca del polo y otro cerca del ecuador, respectivamente. Como en esa época se manejaba la teoría de una Tierra esférica, las mediciones de dichos arcos teóricamente deberían ser las mismas y así confirmando la teoría principal.

Increíblemente, las mediciones no resultaron ser iguales ya que uno de los arcos difería del otro. Es por ello, que se llegó a la siguiente conclusión: “Si un arco de un grado de longitud en un meridiano, cerca del polo, era más largo que la longitud de un arco de meridiano cerca del Ecuador, entonces la Tierra no era una esfera, sino, un sólido achatado en los Polos” *Baez, Juan carlos, Apuntes Geodesia Udec (1996), 164.p.*

Hoy por hoy, sabemos que la superficie de la tierra no es uniforme, y a pesar de que los océanos presentan una superficie plana o regular, la topografía terrestre presenta grandes y diversas variaciones de altura como lo son las montañas, cordilleras y valles, lo que crea grandes dificultades para expresar la verdadera forma de la Tierra sobre un área de gran tamaño mediante un modelo matemático simple.

Como la Tierra no tiene una forma matemáticamente perfecta, su representación cartográfica y la resolución de mediciones efectuadas en ella, se vuelven un problema bastante complejo. Es por ello que para solucionar dicho complicación, la Geodesia adopta como superficie matemática de la Tierra el “Geoide”, el cual se define como una “superficie equipotencial en el campo de la gravedad terrestre que se toma como cota cero en la determinación de altitudes ortométricas” *Miguel J. Sevilla de Lerma, Introducción Histórica a la Geodesia, Universidad Complutense de Madrid(1999) 39.p.*

De manera más concreta y fácil de comprender, el geoide se reconocería como aquella superficie equipotencial coincidente con el nivel medio del mar y que se prolonga imaginariamente bajo la topografía continental, entendiendo como superficie equipotencial a “el potencial gravitacional que en cualquiera de sus puntos será el mismo y la dirección de la gravedad en cualquier punto de él será perpendicular al geoide” *Matías Saavedra Achurra, Apuntes Geodesia Geométrica, (2002) 98.p*

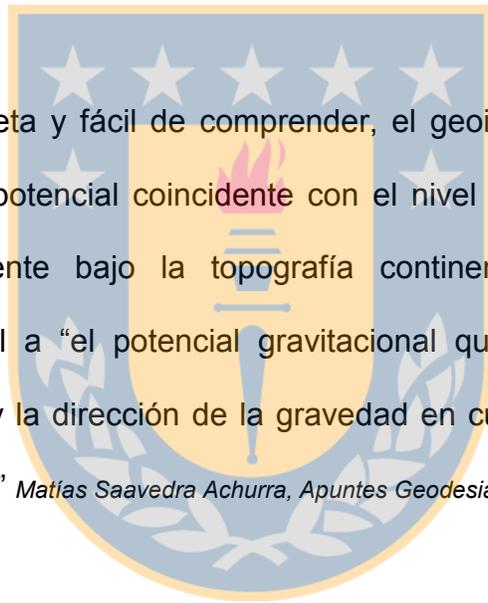
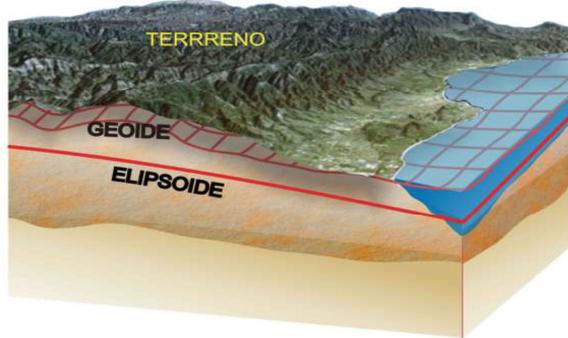


Fig. 1 Diferencia Gráfica entre Geoide y Elipsoide



Fuente: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/que_es_geoide.aspx

Gracias a las definiciones anteriores, y la importancia de ellas, entendemos que la determinación del Geoide, desde tiempos remotos y hoy en día, se convierte en uno de los objetivos fundamentales para esta ciencia.

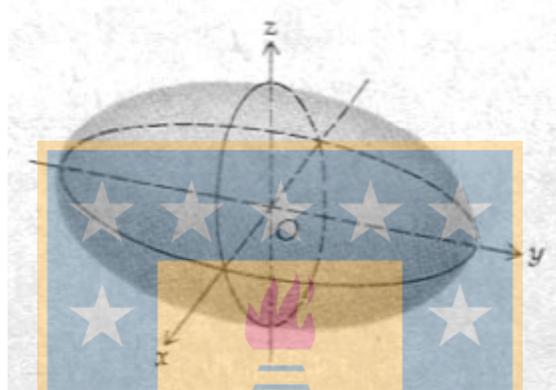
Ya insertos en el mundo de la Geodesia, si consideramos la Tierra como una superficie terrestre uniforme pero igualmente achatada, el geoide obtendría la forma de un "Elipsoide", el cual se centra sobre el centro de masa de la Tierra. El sólido de revolución formado será el que más se asemeje a la forma del geoide de referencia.

Como todo sólido estos se ven expuestos a diversos efectos. Las derivaciones sobre el Geoide según las variaciones en la densidad de la tierra están determinadas bajo el siguiente extracto:

“Donde existe un exceso de masa, el Geoide se levantará por sobre el Elipsoide”. *Matías Saavedra Achurra, Apuntes Geodesia Geométrica, (2002) 98.p*

Geoméricamente hablando, el Elipsoide se vería representado de la siguiente manera:

Fig. 2 Elipsoide

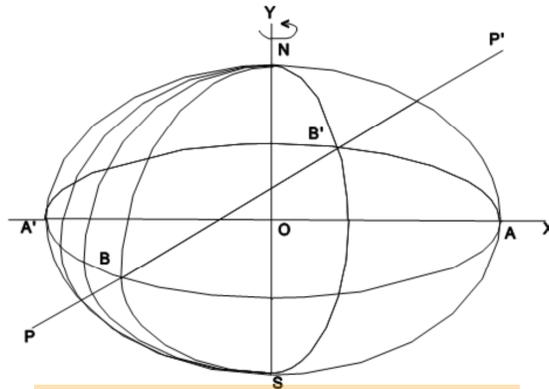


Fuente: *Apuntes de Geodesia Geométrica, Matías Saavedra Achurra, UTEM.*

Debemos reconocer que la superficie generada por la rotación de una curva alrededor de una recta contenida en su plano se conoce como “Superficie de Revolución”, y que en nuestro caso si hacemos rotar esta elipse alrededor de una recta que se encuentra en un plano se generará dicho elipsoide, tal como lo muestra la figura anterior.

Así, el modelo elipsoidal terrestre posee las siguientes características geométricas según figura siguiente:

Fig.3 Figura matemática del Elipsoide



Fuente: *Apuntes de Geodesia Geométrica, Matías Saavedra Achurra, UTEM.*

E (achatamiento) = $f(a, b, f)$ ó $E = f(a, f)$; $AA' = 2a$; $BB' = 2a$; $NS = 2b$

- Su eje menor se sitúa paralelamente al eje de rotación de la tierra.
- Su eje mayor es perpendicular al eje de rotación de la tierra.
- Las dimensiones de tal elipsoide están determinadas por la longitud de los dos semi-ejes o por la longitud del semi-eje mayor y el achatamiento polar.

2.4.2 Modelo Geoidal EGM 2008

Todo modelo Geopotencial permite obtener el valor estimado de la ondulación Geoidal para un punto determinado de la Tierra. Este valor relaciona la altura

Elipsoidal y la altura Ortométrica, teniendo en consideración una gran cantidad de variables entrelazadas.

Algunas de estas variables son:

- Atracción Gravimétrica Terrestre
- Semieje mayor y achatamiento del Elipsoide de Referencia
- Velocidad de rotación de la Tierra
- Coeficientes de desarrollo armónico (armónicos esféricos)

Estos valores se introducen en un software que lee los coeficientes y calcula los valores relacionados con el Potencial Terrestre, entre ellos el coeficiente N (Ondulación Geoidal).

La información requerida para generar un modelo de alta precisión es obtenida principalmente de tres fuentes, siendo estas:

- Perturbaciones orbitales de los Satélites
- Gravimetría Aérea y Terrestre (Información Gravimétrica existente)
- Información Altimétrica de los Satélites sobre los Océanos

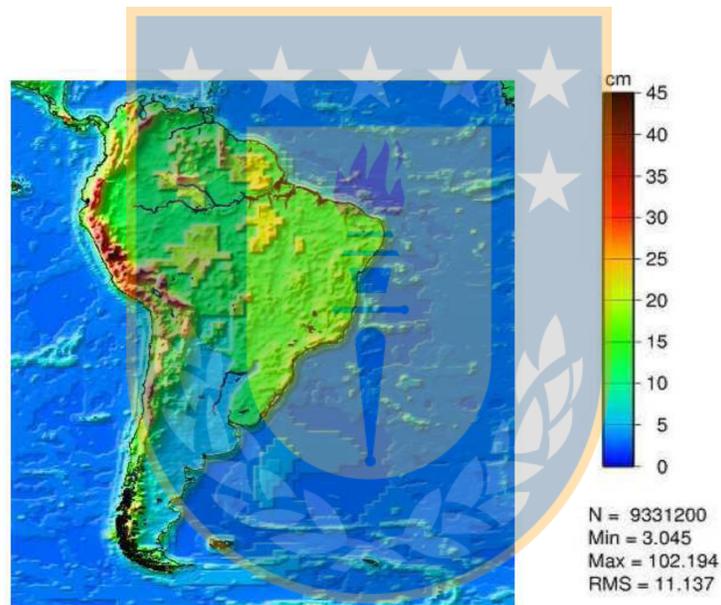
Al combinar los factores antes mencionados, es posible en la actualidad generar mejores modelos que hace algún tiempo atrás, debido a que usaban en sus cálculos solo un factor.

El modelo Geoidal EGM-2008 fue publicado por la Agencia Nacional de Inteligencia Espacial (NGA), EGM grupo de Desarrollo. Siendo el proceso de

cálculo basado en la filosofía de Helmert de condensación, la cual define que “la topografía se condensa en una capa delgada sobre el geoide, mientras que el efecto directo de la anomalía de la gravedad tiende hacia abajo del geoide”. *Instituto de Agrimensura de Uruguay. Estudio y refinamiento de modelos geoidales, (2009) 55.p.*

Por ejemplo, en Estados Unidos la precisión del Geoide (en comparación con el GPS / Nivelación de Control) es de 9.1cm usando la hipótesis de Helmert y 7.28cm utilizando el estudio de baja continuación.

Fig 4 Error de N para el Modelo Geoidal EGM 2008



Fuente: *Estudio y refinamiento de modelos geoidales, Facultad de Agrimensura del Instituto de Agrimensura, Uruguay, Diciembre del 2009*

2.4.3 Sistemas de referencia

Hoy en la actualidad, la utilización de sistemas de navegación como lo es GPS hace necesario el uso de sistemas de referencia correctamente definidos y constantes, como también globales y geocéntricos. Al mencionar este par de conceptos, globales y geocéntricos, nos referimos a que de esta manera incorporamos todo el orbe terrestre teniendo su origen en el centro de masa.

En Chile, el Manual de Carreteras, Volumen 2, indica algunos sistemas globales de referencia que pueden ser utilizados en diversos proyectos, entre los cuales se encuentra el sistema ITRF, WGS-84, SIRGAS, PSAD-56 y SAD-69.

2.4.4 Sistema WGS-84

Denominamos WGS-84 al Sistema Geodésico Mundial 1984, basado en el elipsoide GRS80 (o como lo indica su sigla en inglés “*World Geodetic System 1984*”), diseñado por la Agencia de Mapeo del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América (*Defence Mapping Agency – DMA*, hoy en día *NIMA*), como sustento para la cartografía producida por dicho departamento.

Este sistema geocéntrico, en donde el origen coincide con el centro de masa de la Tierra, se encuentra fuertemente ligado al desarrollo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) el cual entrega las posiciones de puntos terrestres como también la de los satélites del segmento espacial.

El sistema está definido para una Tierra estándar rotando con velocidad constante alrededor de un polo medio, incluye por lo tanto un modelo de la

Tierra que queda definido por una serie de parámetros definidos a continuación:

Tabla N° 1 Parámetros Sistema WGS-84

Semieje Mayor	a: 6.378.137 m
Semieje Menor	b: 6.356.752,3142 m
Achatamiento	f: 1/298,257223563
Producto de la Constante Gravitacional (G) y la Masa de la Tierra (M): GM = 3,986004418x10 ¹⁴ m ³ /s ²	
Velocidad Angular de la Tierra	ω : 7,292115x10 ⁻⁵ rad/s

El sistema de referencia queda materializado gracias al uso de cinco estaciones las cuales se encargan de controlar los satélites de la constelación GPS, conformándose así un marco de referencia terrestre.

De esta forma las coordenadas orbitales de los satélites se transforman en coordenadas instantáneas en el sistema WGS-84, así, satélites y posiciones de puntos sobre la corteza terrestre quedan definidos simultáneamente por un único sistema de referencia. Cada punto quedará constituido por tres coordenadas cartesianas, XYZ, los cuales pueden ser también expresadas en coordenadas elipsoidales.

En este sistema global cada punto puede ser expresado mediante coordenadas geodésicas: Latitud, Longitud y altura elipsoidal.

2.4.5 SIRGAS (visitar www.sirgas.org)

Nuestro país ha adoptado distintos sistemas de referencia específicos gracias a la situación geográfica del país, tanto por su posición, ubicación y de su angosto y extenso territorio. Es por ello que durante más de cuarenta

años la estructura cartográfica de nuestro país se vio desarrollada por la Red Geodésica Nacional, RGN, que se vio formada por los sistemas de referencia utilizados.

Como en todo proyecto, se hace necesario la exigencia máxima en las precisiones para cada trabajo realizado y la existencia de una homogeneidad en cada medición dentro de cada zona trabajada. Esta importancia dio como resultado la necesidad de adoptar un sistema geodésico moderno que entregara respuestas claras, mejores, precisas y un mayor dinamismo en la ubicación espacial de los datos geográficos entregados.

Ante esta meta, en el año 1993, Asunción - Paraguay, dentro del marco de la conferencia internacional para definir un referente geocéntrico para América del Sur, el proyecto SIRGAS fue creado y presentado a todos.

SIRGAS, en su naturaleza, es el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas que se define como: "idéntico al Sistema Internacional de Referencia Terrestre, ITRS, y su realización es la densificación regional del marco global de referencia terrestre ITRF en América Latina y EL Caribe.

Sus coordenadas están asociadas a una época específica de referencia y su variación con el tiempo es tomada en cuenta ya sea por las velocidades individuales de las estaciones que componen este sistema o mediante un modelo continuo de velocidades que cubre todo el continente". *Matias Saavedra*

Achurra, Geodesia Geometrica, (2002) 98.p.

Las realizaciones o densificaciones de SIRGAS asociadas a diferentes épocas y referidas a diferentes soluciones del ITRF materializan el mismo sistema de referencia y sus coordenadas, reducidas a la misma época y al mismo marco de referencia (ITRF), son compatibles en el nivel milimétrico.

Las características técnicas de SIRGAS son las siguientes:

- Sistema de Referencia SIRGAS: IERS (International Earth Rotation Service) Terrestrial Reference Frame (ITRF)
- Dátum Geocéntrico: eje de coordenadas basados en el sistema SIRGAS con parámetros elipsoidales Geodetic Reference System 1980 (GRS80). Así, como objetivo principal, SIRGAS lleva a cabo:
- Establecer un Sistema de Referencia Geodésico Único y Homogéneo para toda la región.
- Establecer y mantener un marco de referencia.
- Definir y establecer un Dátum geocéntrico.

Una de las mayores ventajas de este sistema es que para lograr una extensión del marco de referencia, se puede realizar por medio de densificaciones nacionales, las cuales a su vez sirven de marcos de referencia locales, y que otorga una mayor asociación entre el sistema y la zona en la cual se aplica o se hace uso, ejemplo de ello es el denominado SIRGAS 2000 y 2005 para el caso de nuestro país.

2.5 GPS

La sigla GPS proviene del término “Global Positioning System”, o Sistema de Posicionamiento Global, el cual fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) con el fin principal de ser utilizado como un sistema de navegación con fines principalmente militares.

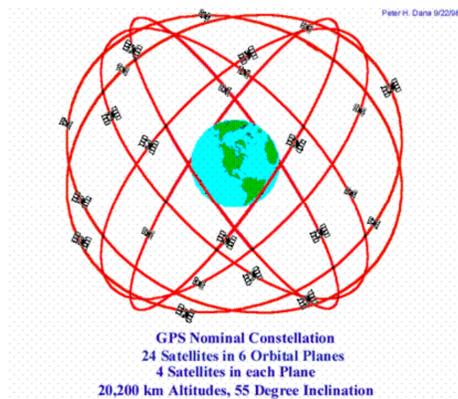
Por medio de satélites y receptores el sistema es capaz de determinar la posición geográfica con una exactitud de localización entre 10 y 100 metros para la mayoría de los equipamientos GPS.

Este sistema consta de una constelación de 24 satélites adecuadamente posicionados a 20.000 kms de altura y 3 satélites de reserva, estos en órbita alrededor de la Tierra denominada NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing And Ranging), lo cual asegura una disponibilidad de uso del sistema durante todo el día y en todo el orbe.

El sistema se encuentra compuesto por tres segmentos:

- A) Segmento Espacial:** determinado por los satélites GPS utilizados provenientes de la constelación NAVSTAR

Fig. 5 Constelacion GPS

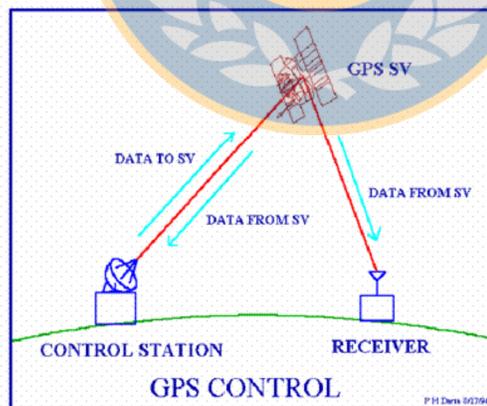


Fuente: *Apuntes Geodesia udec*

B) Segmento de Control:

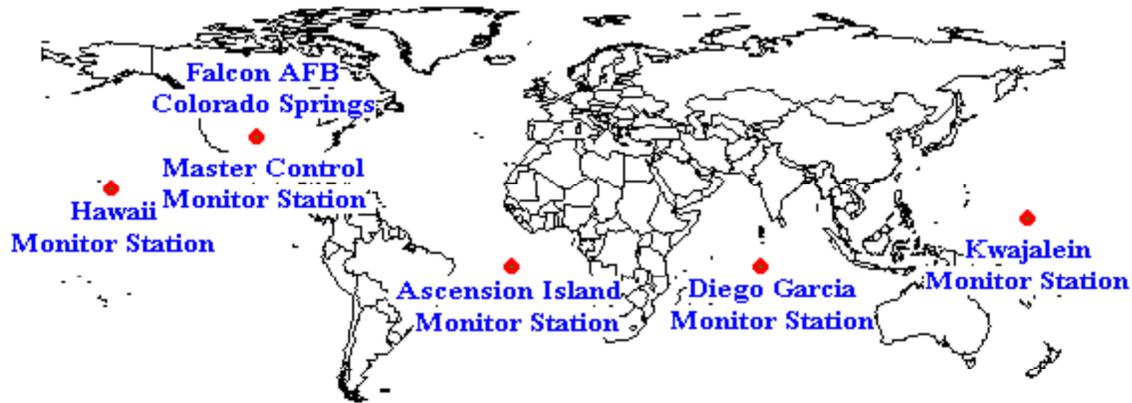
Este segmento rastrea los satélites actualizando su posición orbital, calibrando y sincronizando sus relojes determinando la órbita para cada satélite y predecir su trayectoria para las siguientes 24 horas

Fig.6 Esquema de control



Fuente: *Apuntes Geodesia udec*

Fig.7 Ubicación geográfica de las estaciones de control y control maestro



Global Positioning System (GPS) Master Control and Monitor Station Network

Fuente: NAVSTAR GPS, departamento de defensa de los Estados Unidos

C) Segmento Usuario: corresponde a todo equipo que tenga la capacidad de recibir señales GPS, tanto civiles como militares, con un receptor el cual determinará su posición y/u hora, tomando como base la velocidad de la luz y el tiempo de viaje de la señal, así se obtienen las pseudodistancias entre cada satélite y el receptor en un tiempo determinado.

El uso de estos dispositivos comúnmente se da en labores de navegación en tierra, determinación en la posición de vehículos, topografía, navegación marítima y aérea, etc.

2.5.1 Metodologías de medición GPS

Dentro del manejo de la tecnología GPS encontramos diversas metodologías de medición que van de la mano, y se diferencian, a través de la precisión

estimada, equipo y tiempo de medición estimada cada trabajo en particular en el cual se hace uso.

Es por ello que a continuación se definirán cada una de las metodologías existentes:

a) Método Estático: es utilizado para distancias mayores a 20 Km (distancias consideradas largas) y con la más alta precisión, parámetros que son de importancia al momento de medir líneas bases.

Este método consiste en estacionar dos receptores o más en los puntos en que queremos conocer sus coordenadas, almacenar datos y calcular las coordenadas en tiempo diferido.

En este tipo de posicionamiento se obtienen soluciones tan redundantes como deseemos, tan solo debemos prolongar la observación.

b) Método Estático Rápido: para distancias entre el punto de referencia y el móvil de 20 Km.

El método consiste en el estacionamiento de una estación de referencia temporal, la cual observa y almacena datos de todos los satélites a la vista continuamente.

El receptor móvil se estaciona en el punto que se pretende levantar.

El procedimiento se puede usar simultáneamente con el estático usando triangulación por el método estático y densificación por método estático rápido.

c) Método de Reocupación: se usa cuando las condiciones de medición no son del todo idóneas, es decir, no están disponibles los 4 satélites como mínimo o el GDOP es superior a 8 que es el máximo permitido.

d) Método Cinemático:

Consiste en que el receptor de referencia se estaciona siempre en posicionamiento estático y el receptor móvil se inicia en modo estático rápido o bien partiendo desde un punto conocido.

e) Método KOF: conocido también como Cinemático con Resolución de Ambigüedades en Movimiento Se utiliza solamente para equipos de doble frecuencia: AROF

AROF: resolución de ambigüedades en movimiento, quiere decir, que no es necesario partir de un punto con coordenadas conocidas o con estático rápido, si no que comenzamos directamente en movimiento y después de unos 10 segundos se resuelven las ambigüedades, utilizando estas para transmitirlas a los puntos anteriores a la resolución de ambigüedades.

f) Método Stop and Go: similar al cinemático, en donde se realiza una parada para levantar el punto en cuestión deteniéndose 2 épocas (10 segundos por lo normal) y se continúa con el siguiente punto sin perder señal de los satélites.

g) Método RTK: conocido también como Real Time Kinematic: Se puede utilizar para grandes distancias de referencia, o sea, tan lejos como la cobertura del radio nos permita.

2.5.2 Estación de referencia DGPS

El DGPS, o GPS diferencial, es un sistema que proporciona a los receptores correcciones de los datos recibidos de los satélites, con la intención de entregar una mayor precisión y solvencia en la posición calculada.

Este sistema se ha ideado principalmente por la introducción de la Disponibilidad Selectiva (SA) en las señales de los satélites.

Su fundamento se basa en el hecho de que errores producidos por el sistema GPS afectan de igual, o de forma parecida, a los receptores situados próximos entre sí. Dichos errores se encuentran correlacionados en los receptores próximos.

Un receptor GPS en tierra fijo es también denominado “estación de referencia”, el cual conoce exactamente su posición basándose en otras técnicas. Esta estación recibe la posición entregada por el sistema GPS y puede calcular los errores producidos por el mismo sistema, comparando su posición conocida de antemano con la posición entregada por el sistema.

Así, el receptor o estación transmite la corrección de errores a los receptores próximos a él, y así estos pueden, a su vez, corregir también los errores producidos por el sistema dentro del área de cobertura de transmisión de señales del equipo GPS de referencia.

En síntesis, DGPS posee la siguiente estructura:

- a) **Microprocesador:** para calcular los errores del sistema GPS y para generar la estructura del mensaje que se envía a los receptores.

b) Transmisor: para establecer un enlace de datos unidireccional hacia los receptores de los usuarios finales.

c) Equipo usuario: compuesto por un receptor DGPS (GPS + receptor del enlace de datos desde la estación monitorizada) Algunas de las formas de obtener estas correcciones DGPS son:

a.1) Por radio: por medio de un canal específico para dicho fin.

b.1) Por Internet: descargadas con una conexión inalámbrica.

c.1) Por Satélite: proporcionadas por algún sistema de satélites diseñados para tal efecto. Ejemplo: red de satélites geoestacionarios como los es WAAS (EEUU), EGNOS (Europa) y MSAS (Japón).

Para finalizar, los errores que se corrigen por medio del uso de estaciones de referencia o DGPS son los siguientes:

- Disponibilidad Selectiva (SA)
- Errores por la Ionosfera – Troposfera
- Errores en la posición del satélite (Efemérides)
- Errores producidos por problemas de sincronización de relojes.

Algunas estaciones de referencia en Chile de consideración para nuestro trabajo son las siguientes:

Tabla N° 2: Estaciones de referencia

PAIS	ESTACIÓN	UBICACIÓN	DESCRIPCIÓN
CHILE	COPO	Copiapó	Estación Activa Red IGS
	VM01	Viña del Mar	Vértice GPS Empresa Interra
	SANT	Santiago	Estación Activa Red IGS
	METR	Santiago, Centro	Estación Activa
	ESRI	Santiago, Centro	Estación Activa Empresa ESRI-Chile
	UTAL	Talca	Estación Activa Centro de Geomática. Universidad de Talca
	CONZ	Concepción	Estación Activa Red IGS
	MC07	Maihue	Vértice GPS Empresa Trayenko Ltda
	MULC	Mulchén	Vértice GPS Empresa Interra S.A

Fuente: Manual de Carreteras, Vol.2

2.5.3 Especificaciones técnicas de instrumental GPS

En esta materia se incluyen equipos electrónicos que son diseñados para detectar, convertir y procesar las señales emitidas por los satélites y obtener mediciones de ello, se incluyen los GPS de navegación, DGPS de baja precisión, DGPS para levantamientos, Alta precisión L1, Alta precisión L2 y Alta precisión L1+L2.

Tabla N° 3: Clasificación de Posicionamiento GPS de uso civil

CLASIFICACION DE POSICIONAMIENTO GPS CIVIL					
Modo	Observable	(1)	(2)	Precisión	Aplicación
Autónomo	Código	Estac.	PP	20 m (H) 30 m (V) (3)	Navegación; reconocimiento
			TR		
	Movim.	PP			
		TR			
Portadora	Estac.	PP	N/A	N/A (4)	
					TR
	Movim.	PP			
		TR			
Diferencial Relativo	Código	Estac.	PP	+2 a 5 m (5) ±0,5 m (6)	Levantamiento de elementos lineales; catastro rural
			TR		Replanteo aproximado de puntos
		Movim.	PP		Levantamiento de elementos lineales, catastro rural
			TR		Navegación DGPS; batimetría
	Portadora	Estac.	PP	0,5 a 1 cm + 1 a 2 ppm	Levantamientos estático y estático rápido; transporte de coordenadas; apoyo de puntos estereoscópicos
					TR
		Movim.	PP		Levantamientos cinemáticos continuos
					TR

- (1): Estacionario o en Movimiento.
 (2): Postprocesado o en Tiempo-Real.
 (3): Bajo efecto de SA activada se obtiene del orden de 100 a 150 m para (H) y (V).
 (4): No aplicable.
 (5): DGPS métrico.
 (6): DGPS submétrico.

Fuente: *Manual de Carreteras, Vol.2.*

2.6 Sistema GLONASS

Sistema análogo al sistema GPS creado por Rusia, el cual contiene los mismos principios y fines que GPS. Denominado como Sistema de Navegación Global – GLONASS (Global Navigation Satellite System).

- 24 satélites y 3 de reserva

- 3 planos orbitales con una inclinación de 64.8° respecto al ecuador con 8 satélites por plano.
- Órbitas a 19100 Km de altura
- Periodo de 11 horas y 15 minutos
- Transmisión de datos en señal

Este sistema sus transmite sus señales en frecuencias diferentes, distinguiéndose por un canal asignado.

L1: 1602 + 0.5625k (MHz)

L2: 1246 + 0.437k (MHz)

Donde “k” representa el número del canal asignado a cada satélite.

Algunas diferencias entre GLONASS y GPS son:

- GLONASS no tiene implementado la Disponibilidad Selectiva (SA).
- Efemérides para GLONASS son respecto al Datum PZ-90 el cual difiere del WGS-84 de GPS.
- Escala de tiempo de GLONASS es UTC(SU) – Tiempo Atómico Coordinado Unión Soviética, mientras que GPS es UTC(USNO) UTC Observatorio Naval de EEUU.

Es necesario saber que GLONASS, en aplicaciones topográficas y geodésicas, por sí solo no es más eficaz que GPS, pero el trabajo en conjunto de estas dos herramientas conlleva a un incremento de la constelación disponible lo cual se refleja en un incremento de mediciones, rapidez y consistencia en la solución de

las coordenadas. Huerta Eduardo, *GPS Posicionamiento Satéltal, Universidad Nacional de Rosario,(2004),148 p.*

Hoy en día ya existen equipos los cuales reconocen los satélites de ambos constelaciones por lo cual las mediciones serán más amplias y con beneficios para ambos sistemas.

2.7 Modelos Digitales del Terreno

2.7.1 Definición de MDT

Un Modelo Digital de Terreno es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continúa.

La información de estos modelos esta expresada mediante coordenadas cuyos valores X, Y, Z de los puntos que definen las características topográficas del objeto real. Por lo tanto se trata de modelos simbólicos cuyos datos numéricos permiten su tratamiento informático. Así mismo, en la definición se incluyen dos propiedades más que han de cumplir los MDT: la primera es la de poseer una estructura interna, lo que significa que no es solo un listado de coordenadas, sino que guardan relaciones entre ellos; y la segunda dice que la variable representada ha de ser cuantitativa y de distribución continua, con lo que acota

más el término MDT al excluir variables nominales empleadas en la elaboración de mapas temáticos. (Vozmediario, 2006).

La variable que define un MDT o Modelo Digital del Terreno puede representar muchas propiedades del terreno, por lo que este término se suele emplear cuando se habla de forma genérica. En el caso de ser representada la cota o altitud de puntos del terreno se denominarán Modelos Digitales de Elevación (MDE), lo mismo sucederá si se representan pendientes, aspecto, etc... Por tanto, los modelos de elevación, pendiente y aspecto, son ejemplos de modelos digitales del terreno. (Vozmediario, 2006).

2.7.2 Estructuras de los MDT

Los modelos se construyen básicamente según dos formas de organización de sus datos. (Vozmediario, 2006).

Ráster o cuadricular: el territorio se muestra como un mosaico formado por una retícula regular de puntos a los cuales se les asigna el valor de la variable en la superficie que representa.

Vectorial: basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos o vértices.

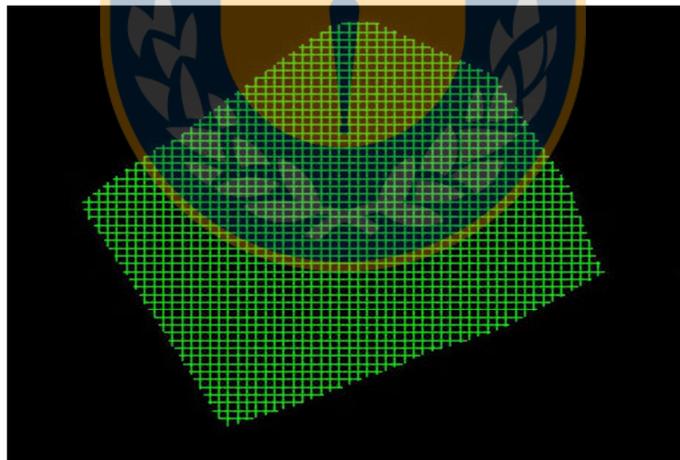
2.7.3 Estructura ráster:

Son métodos de almacenamiento, procesamiento y visualización de datos geográficos, mediante celdas. (Vozmediario, 2006).

- **Matrices regulares**

Se obtienen como resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media u otra propiedad media (del terreno) de cada celda, asociando dicho valor al punto medio de la misma. La retícula suele formar una red regular de celdas cuadradas, de tamaño definido, donde cada dato se localiza según su situación (fila y columna) en la matriz (Vozmediario, 2006). , como se muestra en la imagen siguiente.

Figura 8: Ejemplo de un modelo por mallas regulares.



Fuente: Elaboración Propia

- **Matrices jerárquicas – “quatreens”:**

Estas estructuras intentan solucionar uno de los principales problemas de las matrices regulares, que emplean una resolución espacial constante, independiente de la complejidad de la superficie a describir. Lo que hace la estructura, denominada quadtree, es variar la resolución espacial de las celdas, aumentando su tamaño en zonas de menor complejidad y reduciéndolo en zonas de mayor complejidad. (Vozmediario, 2006).

2.7.4 Estructuras Vectoriales

En ésta estructura de contornos el modelo está definido mediante vectores compuestos por un conjunto de pares de coordenadas (x, y) que definen la trayectoria de las curvas de nivel, donde el número de elementos de cada vector es variable, como se muestra en la siguiente imagen. (Vozmediario, 2006).

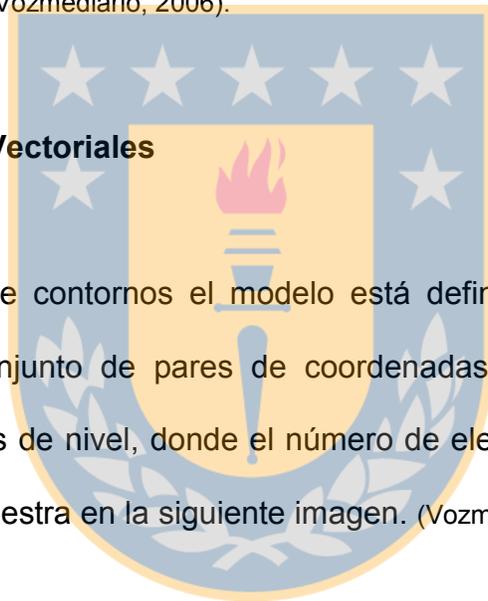
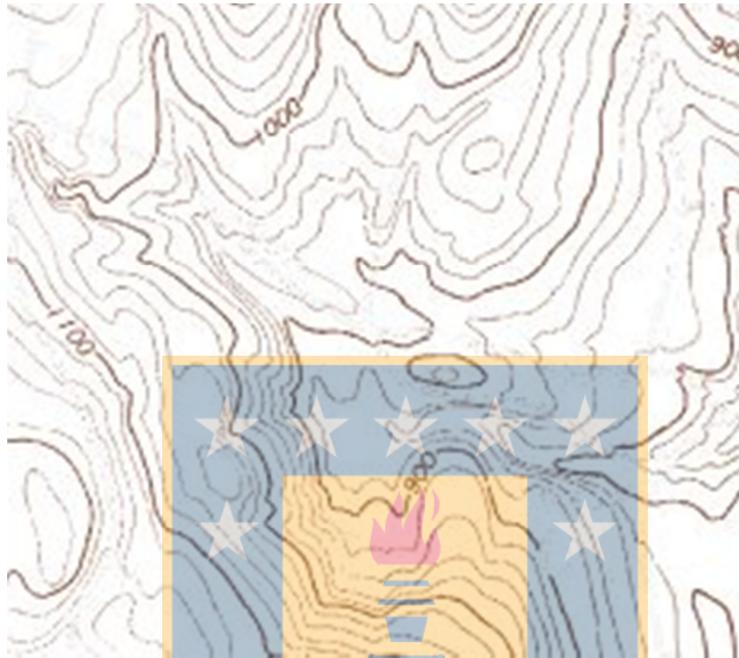


Figura 9: Ejemplo de un modelo de contornos

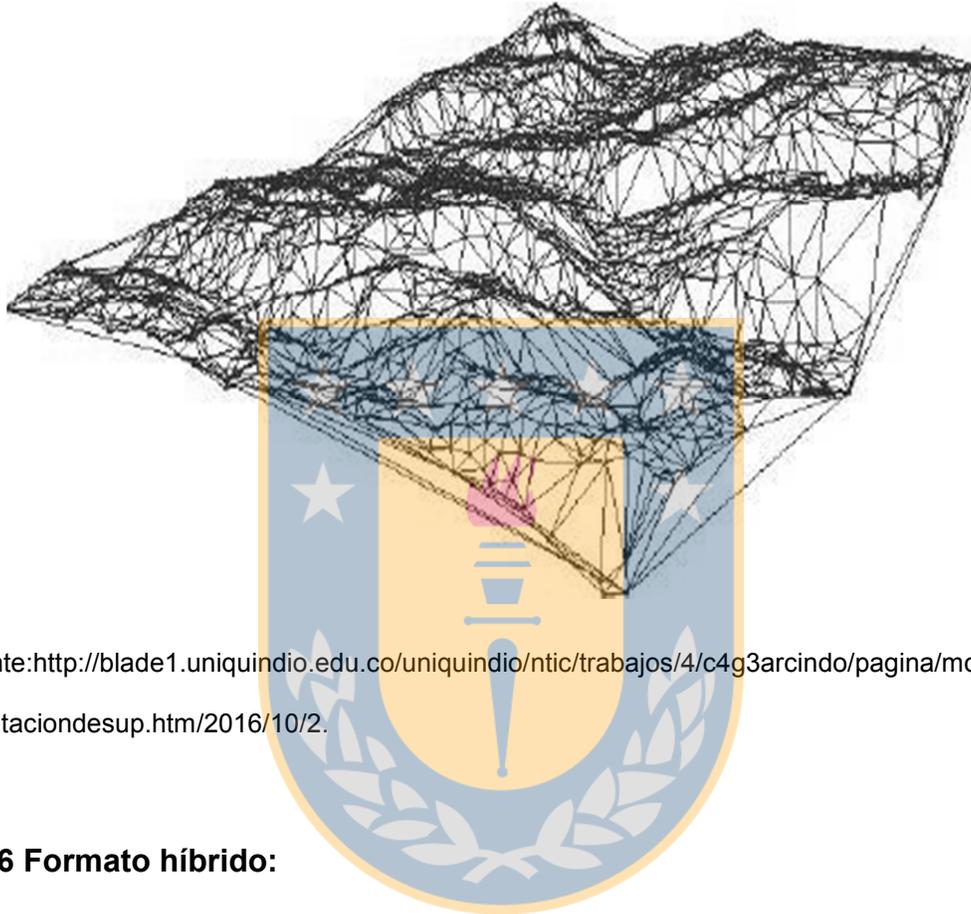


Fuente: <http://spatialnews.geocomm.com/features/childs3/2016/10/2>.

2.7.5 Estructura de triángulos

Esta estructura se compone de un conjunto de triángulos irregulares adosados. Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, que se unen sobre el terreno para formar un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferentes grados de detalle, en función de la complejidad del relieve, como se muestra en la siguiente imagen. (Vozmediario, 2006).

Figura 10: Ejemplo de un modelo con estructura TIN.

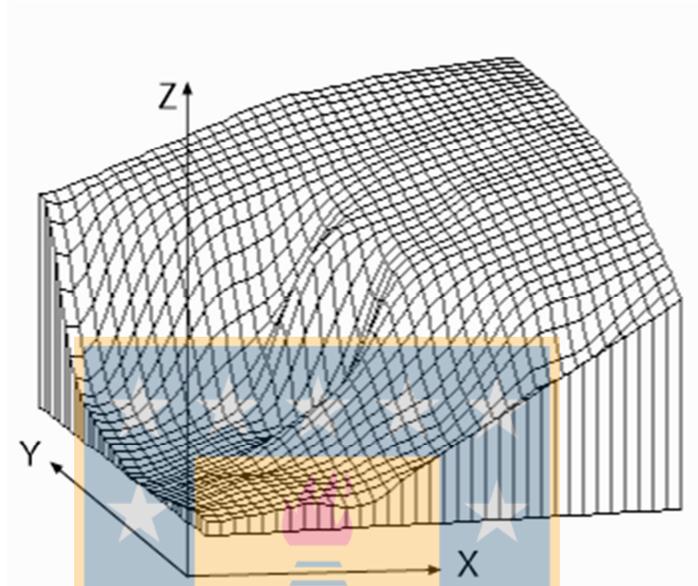


Fuente:<http://blade1.uniquindio.edu.co/uniquindio/ntic/trabajos/4/c4g3arcindo/pagina/modeloderrepresentaciondesup.htm/2016/10/2>.

2.7.6 Formato híbrido:

Generalmente son estructuras regulares, como las mallas de celda cuadrada, conjugadas en ocasiones con otras estructuras irregulares. Esta particularidad, de no ser una estructura tan rígida, permite que las mallas se adapten a las líneas de ruptura y de contorno, dando lugar a un modelo mejor definido. Los vértices de la red, de coordenadas x , y , z , se unirán entre sí mediante vectores para definir la malla, como se muestra en la siguiente imagen. (Vozmediario, 2006).

Figura N°11: Ejemplo de un modelo con estructura híbrida.



Fuente: <http://redgeomatiga.rediris.es/carto2/diccionario/cuerpoDiccionario.htm/2016/10/5>.

Revisando los distintos tipos de mallas más usuales con los que se construyen los modelos digitales del terreno, es necesario estudiar cual o cuales de ellas podrán proporcionar mejores resultados y mayor agilidad en el tratamiento de los datos. Es importante considerar el uso que se les vaya a dar, ya que condicionará la forma de estructuración de sus datos

A pesar de las diferentes alternativas vistas, la capacidad actual de los sistemas informáticos en la adquisición automática de gran cantidad de datos, así como, su rápido manejo y tratamiento, han hecho que, en la práctica, solo se

utilicen tres de las estructuras anteriores: las mallas regulares ráster, los TIN y el formato híbrido.

Las estructuras de contornos, debido a las dificultades que plantea el diseño de algoritmos para el tratamiento de sus datos, han quedado relegadas en gran medida a representaciones sobre papel. Así mismo, las matrices quatrees, aun por su eficiencia en la representación de superficies irregulares, plantean igualmente serios problemas en el diseño de algoritmos. (Vozmediano, 2006).

En cuanto aquellas estructuras más usadas, autores como Felicísimo opinan que tanto las mallas regulares como los modelos TIN proporcionan resultados muy parecidos y fidedignos en la representación de la topografía, aunque, estos últimos no permiten efectuar cálculos ni desarrollar modelos con la facilidad y rapidez de las matrices. (Vozmediano, 2006).

2.7.7 Algoritmos para la Generación del MDT:

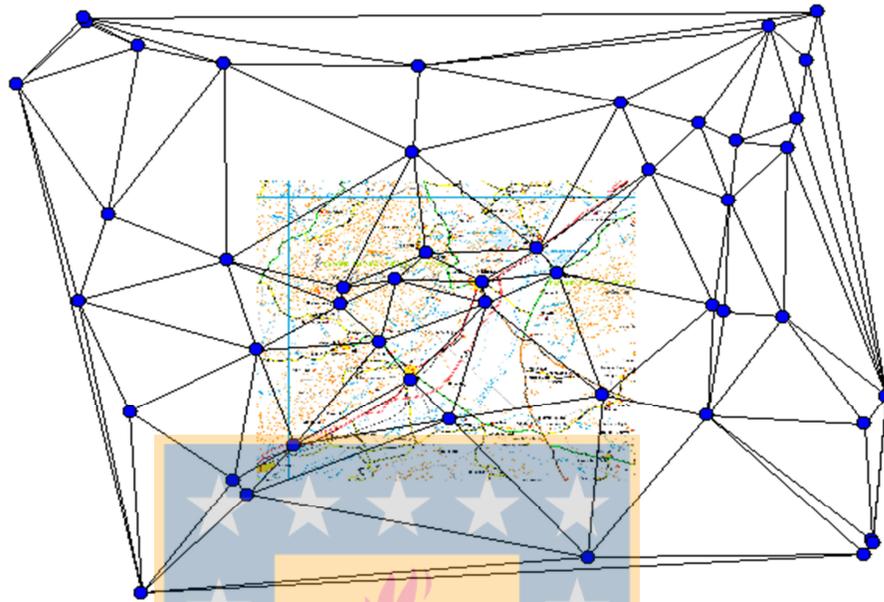
Generalmente los datos fuente empleados para la construcción de un modelo digital del terreno estarán constituidos por un conjunto de puntos con coordenadas x, y, z, distribuidos de forma irregular, así como de una serie de líneas, que en unos casos delimitarán el contorno del modelo, las zonas de ruptura o, incluso, representarán las curvas de nivel. (Vozmediano, 2006).

Cuando lo que se quiere es generar un modelo con una estructura TIN, el procedimiento seguido es seleccionar los puntos situados estratégicamente en zonas definitorias de la superficie, que constituirán los vértices de los triángulos de la red. En el caso de existir líneas de ruptura, estas se tomarán como caras de los triángulos. Si en lugar de construir una estructura TIN se quiere generar por mallas regulares, la obtención del MDT requiere un proceso previo de interpolación de los datos, de manera que pueda ser determinada la componente altimétrica de los nodos intersección de las celdas a partir de los datos del entorno. Se han propuesto y desarrollado muchos algoritmos para la generación de MDTs por interpolación, destacando los que se presentan a continuación: (Vozmediano, 2006).

2.8 Red Irregular de Triángulos (TIN)

Antes de proceder a la interpolación se realiza un paso previo de triangulación, donde se genera una red de triángulos irregulares (triangulated irregular network), TIN, a partir de los puntos de muestreo. La malla de triángulos TIN se construye mediante la triangulación y los polígonos. (Vozmediano, 2006).

Figura N°12 Triangulación y polígonos de una malla TIN



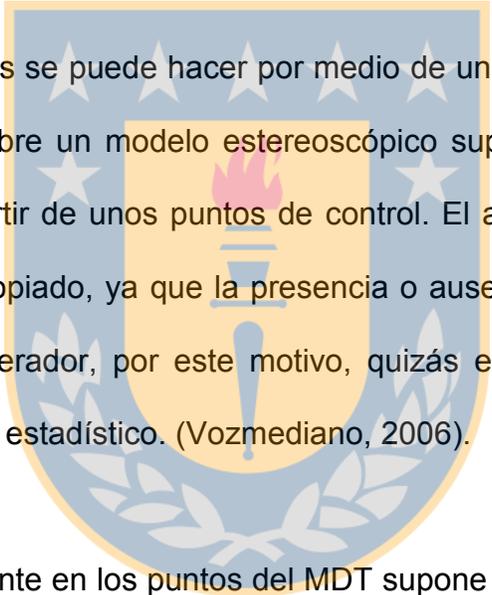
Fuente: <http://www.monografias.com/2016/10/5>.

2.8.1 Evaluación de la Calidad de los MDT:

Uno de los aspectos que influye en la calidad de los MDTs es el valor de error de la nube de puntos que los definen. Dicho error es la diferencia entre el valor medido y el valor real o verdadero (no siempre conocido) del punto, siendo mayor cuanto mayor sea la diferencia. Si el error es superior a las precisiones requeridas se tratará de un error grosero que habrá de ser eliminado o corregido. (Vozmediano, 2006).

Son varios los factores que influyen en la aparición de errores. Las principales fuentes de error surgen en la toma de los puntos de apoyo, en el proceso de orientación y en la captura automática de los puntos que conforman el MDT. (Vozmediano, 2006).

En cuanto a los errores de autocorrelación, se producen por una falsa detección de las entidades homólogas, debido por lo general a un bajo contraste de las imágenes, a la existencia de texturas repetitivas o a reflejos. Su presencia puede ser detectada por el valor del coeficiente de correlación, sin embargo, este índice no aporta la cuantía en la que se produce el error, por lo que es necesario buscar estrategias que permitan evaluarlo y de igual modo que permitan determinar la calidad del MDT. (Vozmediano, 2006).



El control de los MDTs se puede hacer por medio de un reconocimiento visual, comparando el MDT sobre un modelo estereoscópico superpuesto o realizando un test estadístico a partir de unos puntos de control. El análisis visual no suele ser un método muy apropiado, ya que la presencia o ausencia de error queda al criterio subjetivo del operador, por este motivo, quizás el método que mejores resultados de sea el test estadístico. (Vozmediano, 2006).

No solo el error presente en los puntos del MDT supone una cuestión relevante en la generación de un buen modelo, igualmente la densidad y distribución de los puntos influyen en el resultado final. Para mejorar el resultado se suelen también capturar líneas de ruptura y otros elementos morfológicos de interés, sobre todo en superficies con un relieve muy marcado. (Vozmediano, 2006).

Las líneas de ruptura (breaklines) se emplean para señalar las discontinuidades del terreno, los cambios bruscos de pendiente, con el objetivo de

que el modelo quede lo mejor definido posible. Su captura se realiza manualmente, digitalizando puntos estereoscópicamente, de forma que los puntos que las integran queden lo mejor seleccionados y medidos. La ventaja de utilizar líneas de ruptura es el aumento considerable de la calidad del MDT, sobre todo en superficies rugosas, aunque presentan el inconveniente de que su captura ralentiza mucho el proceso de generación del modelo. Actualmente, se está investigando en la detección automática de líneas de ruptura. (Vozmediano, 2006).



CAPITULO III

**METODOLOGIA PARA REALIZAR LEVANTAMIENTO CON SISTEMA LASER
PARA LA GENERACION DE PRODUCTOS CARTOGRAFICOS ESCALA 1:1000**



3. PROCEDIMIENTO PARA LEVANTAMIENTOS TOPOGRAFICOS MEDIANTE LASER AEROTRANSPORTADO

Según el Manual de carreteras Vol.2 Marzo 2012 “A partir de la década de los años 90 se perfeccionaron técnicas de levantamiento topográfico usando sistemas aerotransportados que generan rayos láser, cuyo rebote sobre el terreno permite calcular las coordenadas del punto de incidencia de la señal, al estar el equipo referido a un Sistema GPS.

Normalmente la aeronave es un helicóptero que se desplaza alrededor de 90 km/h (25 m/seg) y habitualmente a una altura media de 300 a 400 m sobre el nivel del suelo. El equipo de medición está constituido por un generador y receptor de rayos láser que opera en forma similar a un distanciómetro, el que está sincronizado con un equipo GPS a bordo y 2 equipos GPS en tierra, sobre puntos de coordenadas y cota conocida. Los equipos GPS deben tener una alta capacidad de grabación de datos, es decir un intervalo de grabación del orden de 1/10 de segundo, ya que en la práctica se estará trabajando como un Sistema GPS en Operación Cinemática. Los equipos GPS deben ser del tipo doble frecuencia (L1 y L2). En teoría basta con un equipo GPS en el helicóptero y uno en tierra, sin embargo por seguridad en la medición se deben usar al menos 2 equipos en tierra con tal de realizar el trabajo una sola vez.

El sistema genera rayos láser que permiten un muestreo mayor a 100.000 pulsos por segundo, los que procesados computacionalmente permiten en definitiva determinar las coordenadas x, y, z con densidades que superan los 4 puntos por m² (40.000 puntos/ha).

El trabajo da como resultado:

- El archivo digital de los puntos con coordenadas x, y, z.
- El plano de planta con curvas de nivel a la equidistancia especificada (0,25, 0,5, 1,0, 2,0m).
- Una fotografía a color de la faja levantada (Ortofoto) con pixels de 0,15 x 0,15 m.

Los catálogos de los fabricantes establecen las siguientes precisiones para el método:

- Precisión Absoluta de las Coordenadas x, y, z : 0,10 a 0,15 m.
- Precisión Relativa en Cota z relativo = 0,05 a 0,07 m.

3.1 Uso del Sistema LIDAR

Los productos estándar cartográficos derivados de los datos LIDAR incluyen modelos de contorno y elevación para generación de curvas de nivel, superficies, orto imágenes, etc. Un post procesamiento de los datos crudos es requerido para la generación de contornos precisos. Puesto que los datos LIDAR son recolectados sobre un modelo digital de elevación (de aquí en adelante "MDE"). ej. Edificios, cobertura arbórea, etc.; estos mediante algoritmos que son utilizados en los software se utilizan para eliminar o filtrar los puntos en estos objetos.

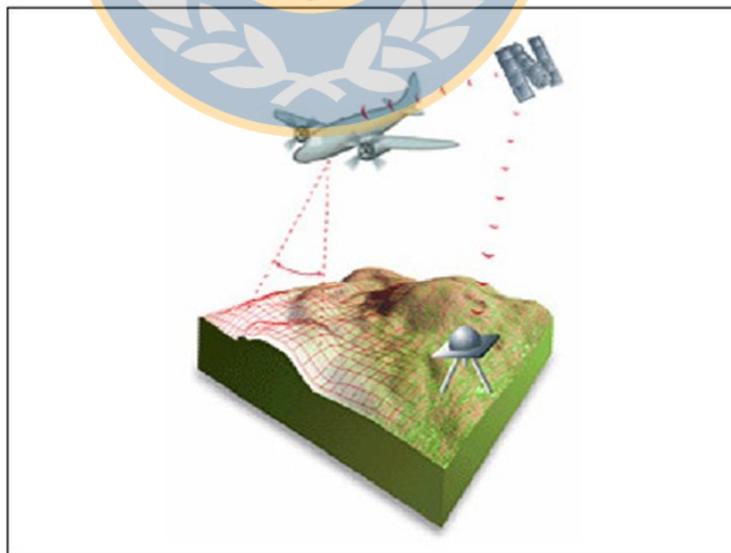
Compuesto por un escáner láser de alta potencia, un receptor GPS que proporciona la posición y altura del avión en cada momento y un sistema inercial

IMU (Inertial Measurement System) que registra los movimientos del avión y su trayectoria lo que permite realizar el levantamiento.

El elemento principal del sistema es el escáner láser, el cual emite pulsos de luz infrarroja, por medio de los cuales se determina la distancia entre el sensor y los puntos de terreno. A su vez, desde tierra se emplean equipos GPS para la aplicación posterior de la corrección diferencial de la antena GPS situada en el helicóptero.

En una hora de vuelo es posible recolectar más de 360.000.000 puntos, todos ellos georreferenciados. Luego, en gabinete y con un software de postproceso, se efectúa la corrección inercial del helicóptero y con ello la de los puntos levantados.

Figura 13 gráfico el funcionamiento del sistema.



Fuente: http://etyaf.es/site_flash/Cartografia.html

Un aspecto particular de este sistema de levantamiento de información, es que cada pulsación láser puede recibir diferentes ecos. Esto implica que si en la zona existen elementos como por ejemplo árboles, cables, techumbres, etc., (véase Figura 13) entonces habrá un primer eco de respuesta que registrará tales objetos y así sucesivamente habrá tantos ecos como elementos encontrados. Como es lógico suponer, entre los ecos más tardíos se encontrarán los puntos correspondientes al terreno.

3.2 Calibración del Sistema Láser Aerotransportado

El proceso de calibración de un sistema láser aerotransportado, consiste en la determinación y corrección de los errores sistemáticos que afectan las mediciones obtenidas por los siguientes componentes del sistema:

- IMU, Inertial Measurement Unit
- LRF, Láser Range Zinder

A continuación se detallan los errores sistemáticos a que se ven afectos las dos componentes antes mencionadas.

El primero corresponde a los errores en las mediciones de la IMU. Estos afectan a su vez dos mediciones realizadas por esta misma, los cuales a continuación se describen:

- **Ángulos de orientación (heading, roll y pitch):** Para las mediciones angulares de orientación, los errores son obtenidos y corregidos utilizando el programa TerraMatch.

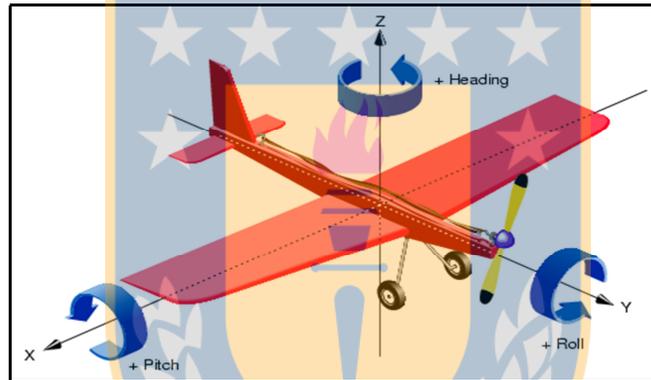
- **Las aceleraciones de la plataforma aérea en las tres direcciones.** Los errores sistemáticos en las mediciones de las aceleraciones, son determinados y corregidos en forma automática durante la fusión de los datos GPS e IMU (Aplicación del Filtro de Kalman, PosProc).

El segundo error sistemático corresponde a las mediciones del LRF, las cuales a su vez afectan:

- **Las mediciones de distancias ejecutadas (TIM ranges y scale factor).** Se define a los TIM Ranges como los valores constantes que se añaden o substraen al valor bruto de distancia medida. Idealmente, en un sistema que sea perfectamente calibrado, este valor tendría que ser igual a 0. En la realidad, se encuentra que este valor puede ser de hasta a $\pm 50\text{cm}$.

- **El factor de escala:** Los errores se generan como consecuencia de un desfase de tiempo, del aparato electrónico, que graba la información de posición angular del espejo oscilante, durante un escaneo. Ese efecto, cuando no se corrige, puede introducir en el levantamiento errores que pueden alcanzar los 50 cm. en altimetría. Ambos errores se determinan y corrigen mediante un procedimiento, que más adelante se describe.

Fig. 14: Movimientos angulares del avión (heading, roll y pitch)



Fuente: http://techpubs.sgi.com/library/dynaweb_docs/0640/SGI_Developer/books/Perf_PG/sgi_html/ch02.html

La calibración consiste en la corrección de los errores sistemáticos. Para ello se debe considerar que los puntos levantados por cada misión deben estar clasificados por líneas de vuelo independientes, por ende en cada una de las misiones se escogen áreas de traslape entre líneas de vuelo contiguas, las que son voladas en direcciones opuestas. Mientras más líneas de vuelo traslapadas en el área seleccionada, mayor es el peso estadístico de los valores angulares (heading, roll, pitch y factor de escala) obtenidos. Se entiende entonces que a mayor cantidad de líneas de vuelo (para un área), mayor es el peso estadístico.

3.3 Tolerancias para Levantamientos con láser Aerotransportado

Según el manual de carreteras la mayoría de los fabricantes de estos equipos ofrecen precisiones mejores que las que normalmente se exige a los levantamientos Aerofotogramétricos, no obstante no se tenga un mayor uso y experiencia en el país en los trabajos ejecutados con este procedimiento serán válidas las siguientes tolerancias, según la escala del plano.

Tabla n°4 Tolerancias para levantamientos Lidar

Escala del Plano	Curvas de Nivel cada (m)	Verificación en Terreno - No más de 10% de la Muestra presentará un error mayor que:	
		Altimetría (m)	Planimetría (m)
1:250	0,25	0,13	0,13
1:500	0,50	0,25	0,25
1:1.000	1,00	0,50	0,50
1:2.000	2,00	1,00	1,00
1:5.000	5,00	2,50	2,50
1:10.000	10,00	5,00	5,00

Fuente: *Manual de Carreteras, Vol.2. 2014*

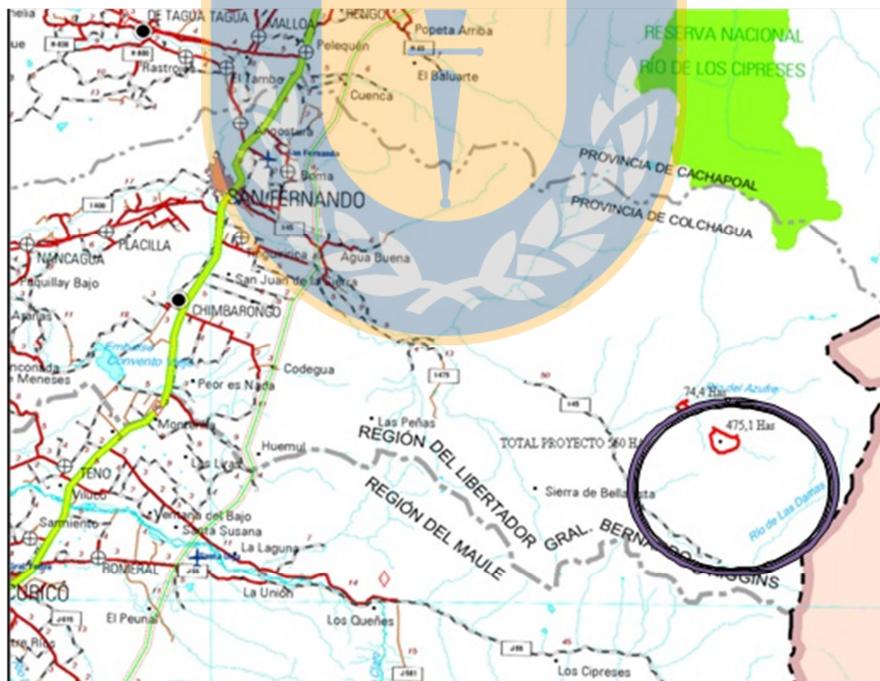


4. APLICACIÓN DE LASER AEROTRANSPORTADO EN RIO TINGUIRIRICA ALTO

4.1 Área de Estudio

El proyecto se encuentra emplazado a unos 56 kilómetros al este de la ciudad de San Fernando (ver Figura 15), en las siguientes coordenadas geográficas como punto central: WGS84: Latitud 34° 49' 29 " S, Longitud 70° 27' 51" W y a una altitud que fluctúa entre los 1300 y los 2800 metros sobre el nivel medio del mar. El levantamiento comprende una superficie de 550 hectáreas aproximadamente. (Ver Figura 16).

Fig. 15 Plano ubicación sector proyecto



Fuente: <http://www.mapas.mop.cl/cc2016/baja/vi-vii.jpg>

El área de estudio fue definida específicamente por la empresa mandante, Energía andina S.A por medio de dos polígonos o áreas de vuelo. A continuación se indica el tamaño en hectáreas de cada una de ellas y su ubicación.

Fig. 16 Muestra zona de proyecto



Fuente: Google earth

4.2 Recopilación e información preliminar

Durante esta etapa, se hizo un análisis de la información cartográfica disponible y toda otra información proveniente de otras fuentes que pueda ser de utilidad como antecedente preliminar de las actividades a desarrollar, en este caso se utilizó la carta regular escala 1:50.000 "Río Clarillo" del instituto geográfico militar.

4.3 Planificación de las Líneas de Vuelo

El proceso de planificación de las líneas de vuelo implicó varias etapas, en las cuales se organiza y se determinan características limitadas que se necesitan en el vuelo.

En cuanto a la planificación para determinar las misiones de vuelo necesarias se recurrió a un modelo digital del terreno SRTM (Shuttle Radar Topographic Misión) para evaluar atentamente las variaciones altimétricas a lo largo del área de estudio.

a continuación se mencionan las condiciones de las misiones para el vuelo:

- A) **Visibilidad de un número mínimo de 6 satélites de la constelación GPS**, los cuales debían presentar un ángulo de elevación mayor de 15° en los intervalos horarios elegidos para la ejecución de las misiones de vuelo.

B) **PDOP (Position Dilution Of Precision)**: menor a 3, en los intervalos horarios elegidos para la ejecución de las misiones de vuelo.

C) **Índice Kp de actividad solar**: menor o igual a 4 en los intervalos horarios elegidos para la ejecución de las misiones de vuelo. Un índice Kp revela una actividad solar intensa cuyo resultado será una disminución notable en la calidad de la señal GPS y como consecuencia de ello, los datos levantados mediante sistema láser aerotransportado.

El plan de vuelo requiere la estimación de los parámetros de ejecución del levantamiento, los cuales se obtienen del software ALTM-NAV. Para estimar estos valores es necesario conocer las especificación técnica del proyecto, respecto a la densidad de puntos solicitada por el mandante, para este proyecto se requirió 5 PPM2 (punto por metro cuadrado), con este antecedente más un análisis de la ubicación geográfica del área del proyecto para conocer el relieve y la altura del terreno donde se ubica el área, se procede a calcular los valores teóricos de los parámetros del plan de vuelo(véase tabla n°6) que nos permita obtener la densidad de puntos por metro cuadrado solicitada por el mandante.

A continuación se presenta una imagen con el software ALTM-NAV con su módulo Plan Survey, el cual permite calcular los valores de los parámetros de vuelo en función de los PPM2 solicitados.

Figura 17: ALTM NAV modulo Plan Survey

The screenshot shows the 'Plan Survey Grid' window with the following sections:

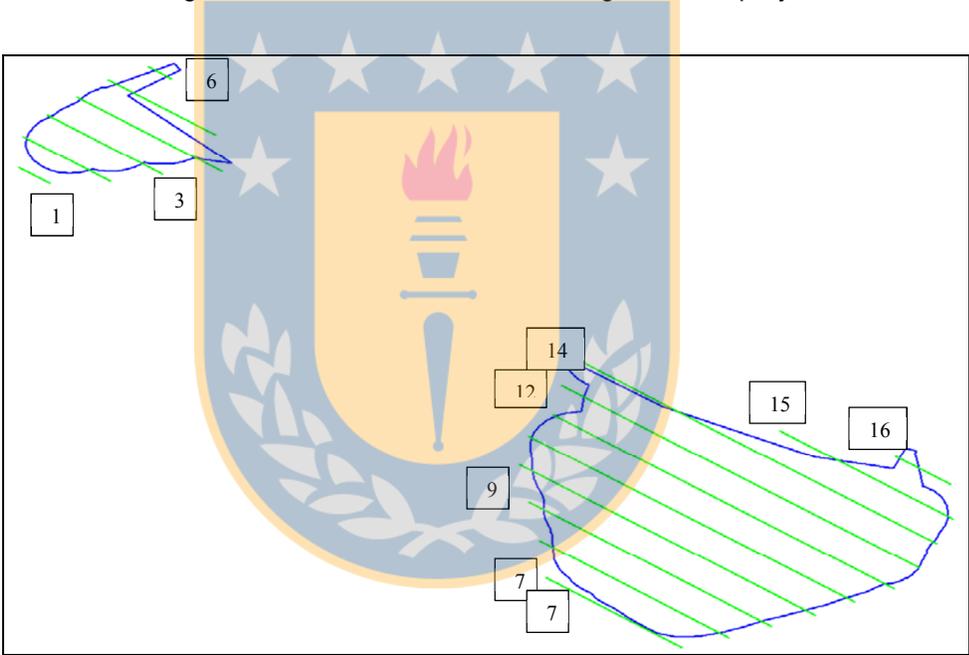
- Active Area:** Area 1 of 1.
- Pass Orientation:** A scale from 0 to 360 degrees.
- Flight Profile:**
 - Altitude (m AGL): 1219.2
 - Pass Heading (deg): 40
 - Overlap (m): 75
 - Speed (m/s): 95
 - Turn Time (min): 5
 - Passes: 50
 - Pass Spacing (m): 271.17
- LIDAR Settings:**
 - System PRF (kHz): 33.333
 - Scan Freq (Hz): 47.8
 - Scan Angle +/-: 8.1
 - Scan Offset: 0
 - Desired Res (m): 1
 - Cross Track Res: 0.995
 - Down Track Res: 0.994
 - PPM^2: 1.01
 - Scan Cutoff (deg): 0.02
 - Swath (m): 346.17
- Camera Settings:**
 - Photo Overlap (%): 30
 - Line Spacing: 2
 - Line Overlap (%): 33.32
 - Pixel Size X (m): 0.199
 - Pixel Size Y (m): 0.2
 - Trigger Dist (nmi): 0.31
 - Trigger Time (sec): 6.016
- Survey Totals:**
 - Total Passes: 50
 - Total Frames: 776
 - Total Length (km): 443.658
 - Total Flight Time: 05:30:10
 - Swath Area (km^2): 120.307
 - AOI Area (km^2): 112.973
 - Total Laser Time: 01:17:50
- Costs:**
 - Use Swath Area:
 - Use AOI Area:
 - Cost per Acre: 0
 - Cost per Hour: 0
 - Area Cost: \$0
 - Time Cost: \$0
- Options:** Errors, DEM Tools, Apply, Help, Export to KML, Close.

Tabla n°6 Resumen Parametros de vuelo

Área Total en hás	554 Hectáreas
Ancho cada línea de vuelo en metros	535.35 Metros
Altura de vuelo promedio en metros	800 Metros
Velocidad promedio en Nudos	70 Nudos
Frecuencia escaneo LIDAR	26.2 Hz
Angulo escaneo LIDAR	+/- 18.5°
Repetición Pulsaciones	50 kHz

Como resultado de la planificación de vuelo se obtuvieron un total de 16 líneas de vuelo, las que a continuación se muestra en la figura n°18 que presenta la distribución de las líneas de vuelo del proyecto. En color azul se muestran el polígono de proyecto y en color verde las líneas de vuelo.

Fig. 18 Líneas de vuelo en ubicación general del proyecto



Fuente :Propia

4.4 Ejecución del Vuelo LIDAR

El vuelo LIDAR, se ejecutó con una aeronave adaptada para trabajos de percepción remota, tomando en consideración las horas en donde se encuentre buena geometría de satélite, para de esta forma asegurar la calidad de la data obtenida. El horario de ejecución de los trabajos se concentró entre las 12:00 horas y 14:00 horas.

Durante la ejecución del vuelo LIDAR, el operador realiza un control directo y en tiempo real de los datos básicos que se programaron para el vuelo.

Tabla n°5 Parámetros de equipos utilizados

Vuelo	: color y de proyeccion
Tipo de aeronave	: Helicóptero:LAMA CC-CGT
Cámara	: Rollei AIC PhaseOne P45+
Scanner	: ALTM 2050 de Optech Inc
Gps	: Trimble 5700 Doble Frecuencia
Puntos de apoyo	: 2

4.4.1 Base Estación GPS.

De acuerdo a lo requerido, para dar cumplimiento a las Indicaciones Técnicas, las estaciones contaron con un equipo GPS de doble frecuencia, asegurando a los operadores aéreos las Coordenadas de Apoyo al vuelo.

Las siguientes tablas presentan las coordenadas que fueron ocupadas para georeferenciar el levantamiento láser, las cuales provienen los puntos geodésicos

materializados y vinculados el año 2011 para el proyecto aledaño y complementario al sector llamado Don Eugenio.

Estas coordenadas fueron utilizadas para el vuelo en la cancha de calibración que es una superficie cercana al área del proyecto en el que se instalan los equipos de medición que ayudaran a georreferenciar todo el proyecto.

Tabla n°6

COORDENADAS AJUSTADAS GEODESICAS SIRGAS

Vértice	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altura Elipsoidal	Error E	Error N	error a	Fijo
APV3	34°47'24.53907"	70°36'55.22228"	923.547m	0.012m	0.012m	0.038m	Lat.Long
APV4	34°48'01.98438"	70°36'13.53409"	961.852m	0.013m	0.013m	0.040m	

Tabla n°7

COORDENADAS AJUSTADAS UTM HUSO 19 SIRGAS

Nombre punto	Este	Norte	Altura Elipsoidal	Error E	Error N	error a	Fijo
APV3	352215.378m	6149039.300m	923.547m	0.012m	0.012m	0.038m	NE a
APV4	353293.345m	6147902.683m	961.852m	0.013m	0.013m	0.040m	

4.4.2 Calibración Levantamiento Láser

El procedimiento empleado en la calibración del levantamiento Láser para el proyecto, consistió en obtener valores de error tanto en ángulos como distancias, para cada misión por separado, para luego aplicar los métodos de corrección antes mencionados.

En la práctica la determinación de estos valores de corrección angular y de factor de escala se obtienen con el apoyo del programa TerraMatch, donde se eligen varias áreas en la misma misión promediándolas, de manera que estos valores medios sean aplicados en cada punto de las distintas líneas de vuelo de cada misión.

En general como cada misión tiene características distintas de vuelo. Existen muchos factores que afectan el levantamiento, los que se ven reflejados en la nube bruta de puntos. La obtención de los valores de calibración se efectúa a través de diversas series de valores obtenidos que son analizados e interpretados internamente por el software. De esa manera valores en heading, roll, pitch que sean mayores a 1° indicarían por ejemplo una mala ejecución del vuelo o una mala medición del offset del avión. Para el caso del presente levantamiento, los valores de corrección angular fueron inferiores a un grado y además similares entre ellos, lo que indica que la ejecución del levantamiento cumple satisfactoriamente este parámetro.

Tabla N° 8 presenta los valores de corrección calculados y aplicados a todo el proyecto.

Mision	Heading	Roll	Pitch	Scale Factor
CL12911_1A	0.38541818	-0.039893	-0.05982306	-0.00247378

Una vez que el ejecuta el procedimiento descrito para todas y cada una de las misiones, los puntos son importados en un solo proyecto, buscando la corrección del levantamiento completo.



4.5 APOYO GEODÉSICO Y CARTOGRÁFICO

El proyecto Tinguiririca es colindante con el proyecto Don Eugenio de la empresa Hydrochile. Considerando este antecedente Energía Andina solicitó que el levantamiento lidar se considerara como una extensión del primero, lo que implica que, todos los aspectos geodésicos fueran los mismos ocupados anteriormente.

La siguiente imagen ilustra el área roja la ubicación del proyecto Don Eugenio y el área azul el actual proyecto Tinguiririca de Energía Andina.

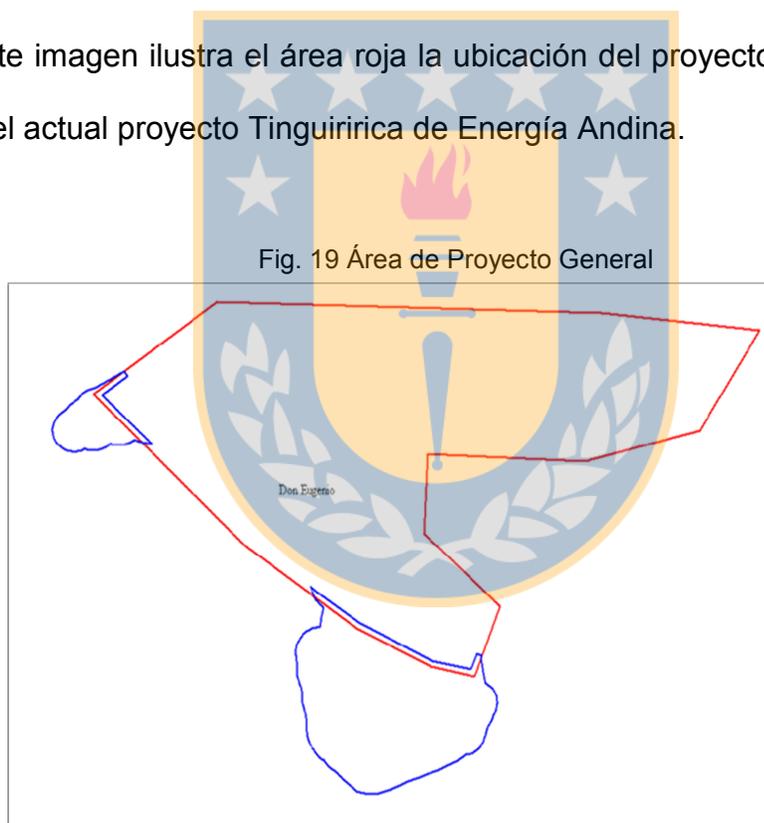


Fig. 19 Área de Proyecto General

Fuente: Propia

4.5.1 TRABAJO DE GABINETE

Los trabajos de gabinete se realizan en 2 etapas, la primera consiste en que una vez finalizados los vuelos, estos deben ser comprobados por un analista de datos en terreno y la segunda etapa comprende la generación de la nube de puntos y orto imágenes finales los cuales son realizados en nuestro centro de procesamiento, a continuación se detallan las etapas de revisión.

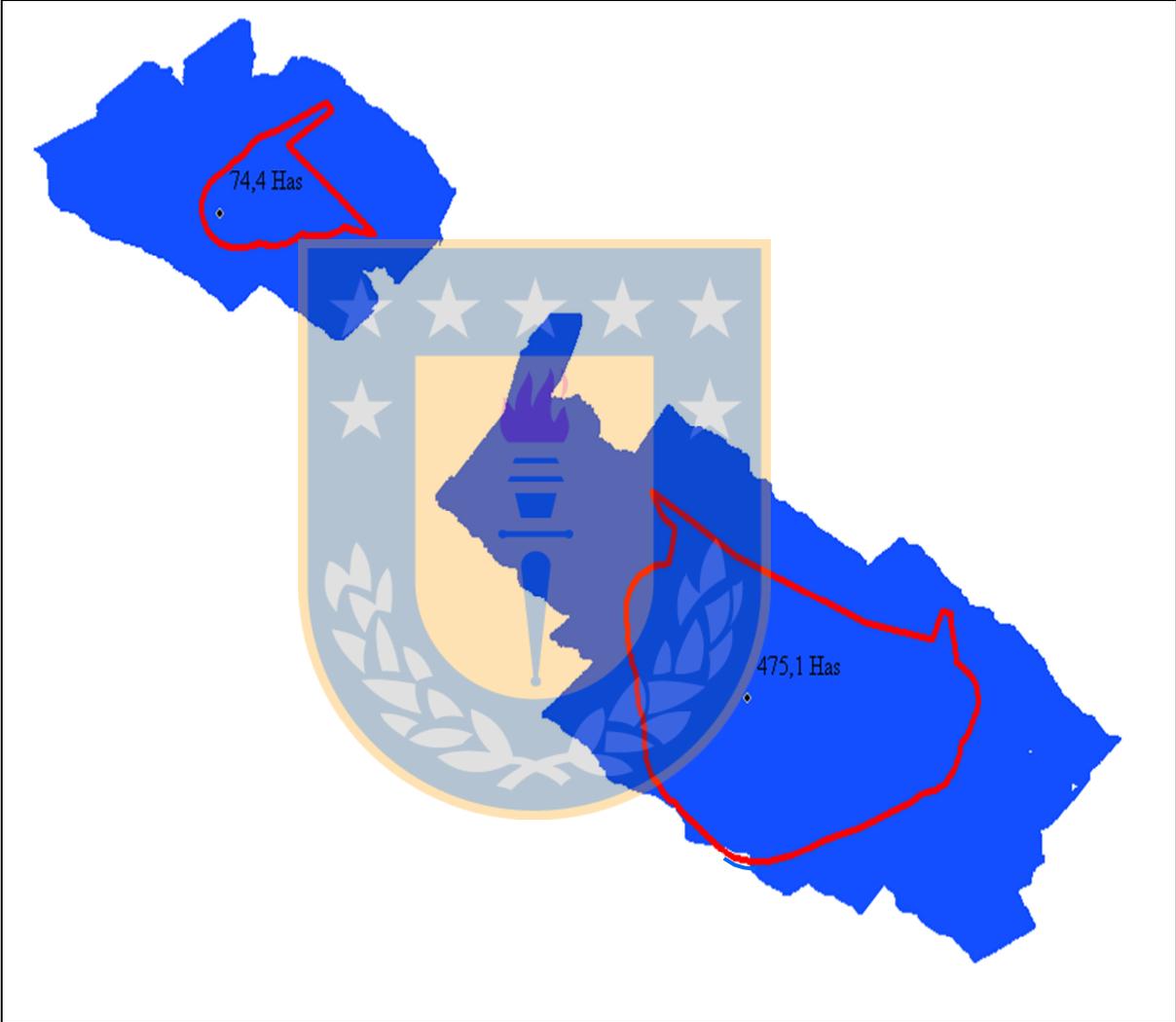
A) Revisión puntos Láser

Una vez obtenida la información capturada diariamente por el sensor escáner, se procedió a efectuar inmediatamente y en forma diaria los siguientes procedimientos respecto a la revisión de los puntos láser:

- Verificación del respaldo de los datos del láser.
- Verificación de la integridad de los datos de cada línea de vuelo.
- Comprobación del efectivo almacenamiento de los datos GPS a bordo de la aeronave.
- Comprobación del efectivo almacenamiento de los datos del GPS base.
- Verificación de la cobertura íntegra del vuelo, para evitar zonas sin levantar
- Comprobación de que la densidad de puntos levantados satisficían los requerimientos contractuales

El área efectiva levantada comprendió una superficie de 1.000 Hectáreas aproximadamente y corresponde al sector azul (Ver Figura 20)

Fig. 20 Cobertura Laser- Área de proyecto



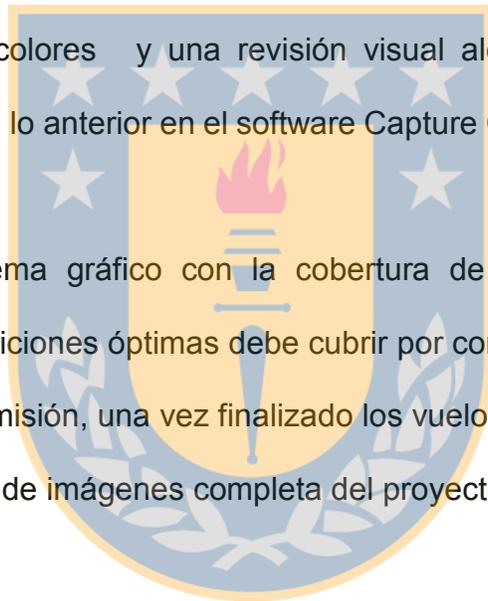
Fuente: Propia

B) Revisión de Imágenes

Junto con la revisión de puntos láser se efectúa la revisión de la captura de imágenes y calidad de las mismas, para ello se detallan a continuación los procedimientos realizados para su comprobación.

-Revisión de las imágenes brutas obtenidas del levantamiento, principalmente se revisa histograma RGB en el cual se identifica distintos niveles de información terrestre mediante los colores y una revisión visual aleatoria de las imágenes como control de calidad, lo anterior en el software Capture One.

-Se genera un esquema gráfico con la cobertura de imágenes logradas en la misión, la cual en condiciones óptimas debe cubrir por completo la cobertura láser obtenida en la misma misión, una vez finalizado los vuelos se revisa que se encuentre la cobertura de imágenes completa del proyecto



C) Procesamiento de la Información

Para el procesamiento de la información, se empleó una serie de programas, los cuales se aplican para una determinada función dentro del proceso, el detalle es el siguiente:

1) Proceso GPS e IMU

Waypoint's Grafnav Y Grafnav Batch, fueron empleados para obtener una solución óptima de GPS, lo que posteriormente fue ligado a los datos del IMU con el software Applanix Posproc.

2) Decodificación de los discos duros

Se utilizó el software de OPTECH'S REALM para decodificar los archivos almacenados en el disco duro durante las misiones de vuelo.

3) Extracción de la nube bruta de puntos

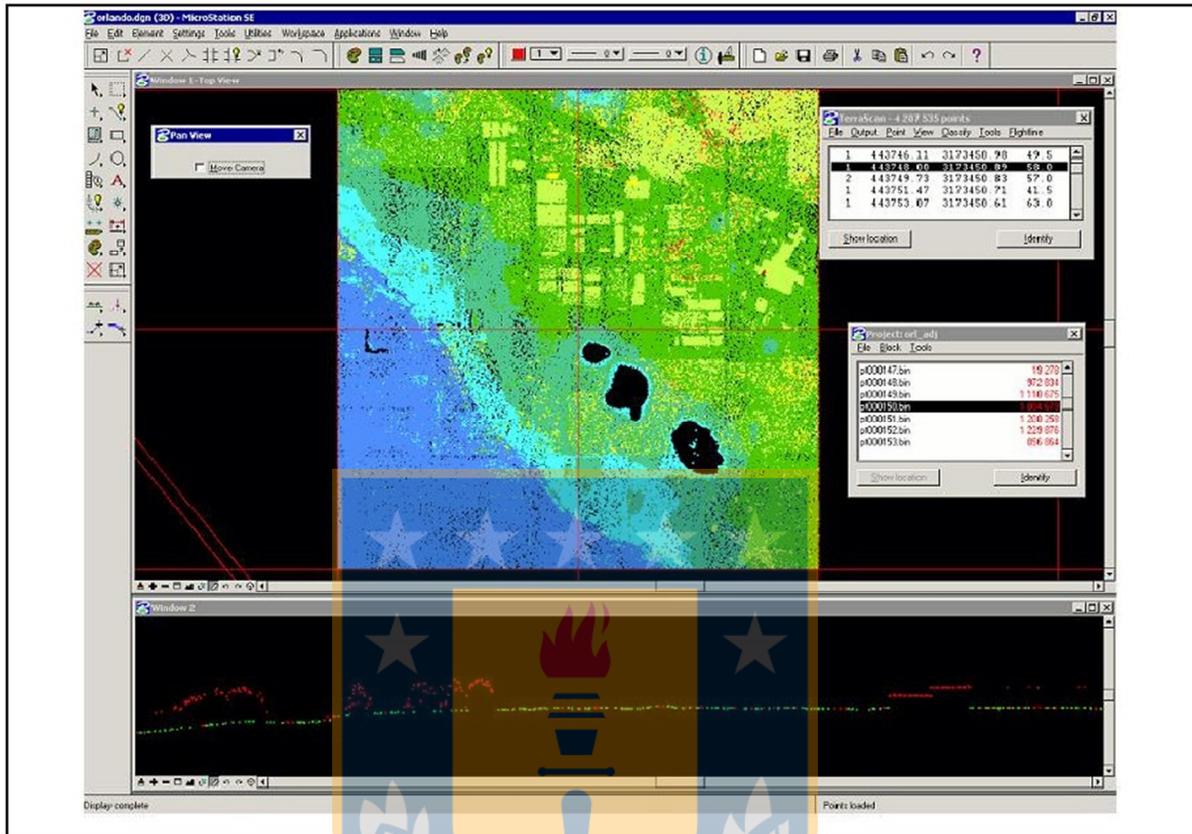
Para esta etapa se empleó OPTECH'S REALM, software para georreferenciar los puntos del láser, considerando para ello la distancia, inclinación del avión, ángulo de lectura etc. Con este proceso se obtienen los datos XYZ medidos sin clasificación.

4) Clasificación de puntos

Una vez finalizado los procesos de calibración, corrección DZ, etc., se procede a la clasificación automática, la cual consiste en clasificar como Ground y No Ground de los puntos, esto con el fin de optimizar los tiempos para la obtención del MDT final, el sistema Lidar permite recibir más de un eco, bajo este concepto el algoritmo clasifica los puntos en las dos clases antes señaladas, no obstante lo anterior, una vez finalizada la clasificación automática se requiere un proceso manual de clasificación, esto debido a que el proceso automático no generará un modelo completamente ideal, por lo cual la intervención manual en la clasificación es fundamental para obtener un modelo acorde a las precisiones requeridas por el mandante y que represente fielmente la realidad del terreno.

La clasificación fue realizada a través del módulo Terrascan de Microstation V8. Este software es capaz de manejar millones de puntos de láser a la vez clasificándolos en base a dos criterios: puntos que constituyen el terreno y puntos que no pertenecen al terreno (por ejemplo vegetación o infraestructuras).

Fig. 21 Puntos clasificados en Terrascan



Luego, cada uno de los archivos clasificados de forma manual, son remitidos al área de Procesamiento Láser e Imágenes para la generación de las respectivas curvas de nivel y ortoimágenes respectivamente.

4.6 Generación Modelo Digital del proyecto

De acuerdo a lo solicitado según bases técnicas se procedió con la generación de curvas de nivel.

-Escala 1:1.000 Modelo de curvas de nivel principales cada 1[m] y curvas índice cada 5[m].

Una vez clasificados los puntos se genera el modelo digital del terreno por medio del software Terrasolid y su módulo Terramodeler. Con el modelo generado y con el mismo software, se generan las curvas de nivel. Estas se subdividen usando el esquema de láminas indicado en la figura 27(pag.88), con el fin de permitir su manejo en algún determinado software CAD, luego se exportan al formato DWG y comienza la edición del trabajo en general y etiquetado de las curvas para la entrega final.

4.7 Generación de Orto imagen del proyecto

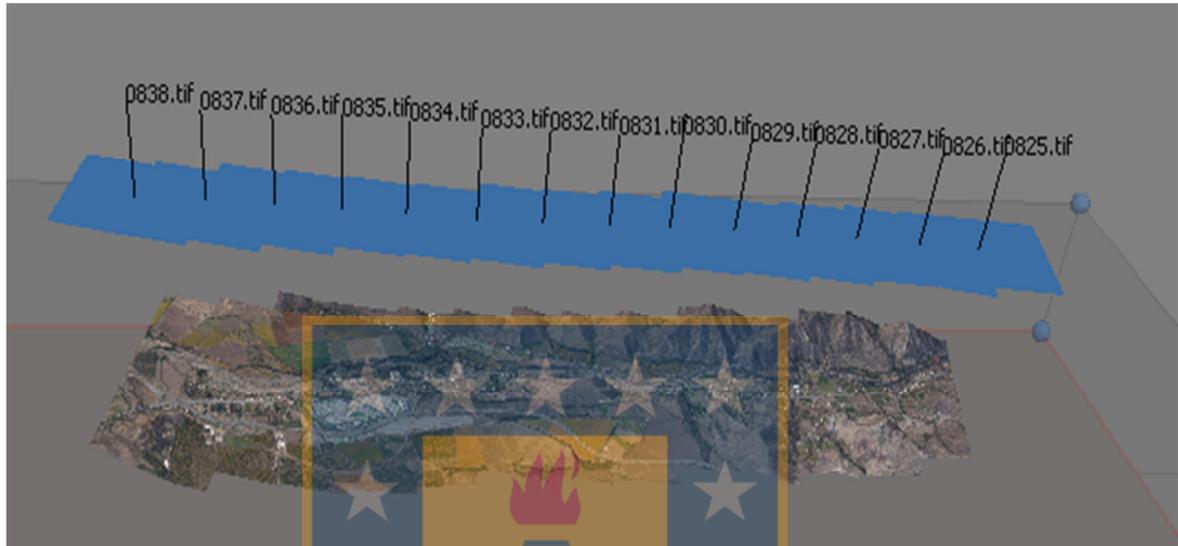
En este proceso de generación de una orto imagen y procesamiento de las imágenes digitales, se utilizó el software Photoscan.

4.7.1 Orientación de las imágenes

La primera etapa es la alineación u orientación de la cámara. En esta etapa el programa busca puntos comunes en las fotografías, es así como se encuentra la posición de la cámara para cada imagen, se refinan y se ajustan los parámetros de calibración de cámara, es decir, se realizan las orientaciones interna, relativa y absoluta de cada fotografía de las respectivas líneas de vuelo del proyecto y que, el programa realiza automáticamente solo con el ingreso de los datos. La calidad y precisión de los datos que se obtenga, dependerá del tiempo de procesamiento de estos, los cuales van en rango de dos horas para menor precisión y un día de procesamiento para una de alta calidad.

En la figura siguiente podemos ver una línea al inicio del valle completa y la posición en el espacio de cada centro de proyección de las fotografías.

Figura N° 22 Orientación línea ingreso sector



Fuente: Elaboración Propia

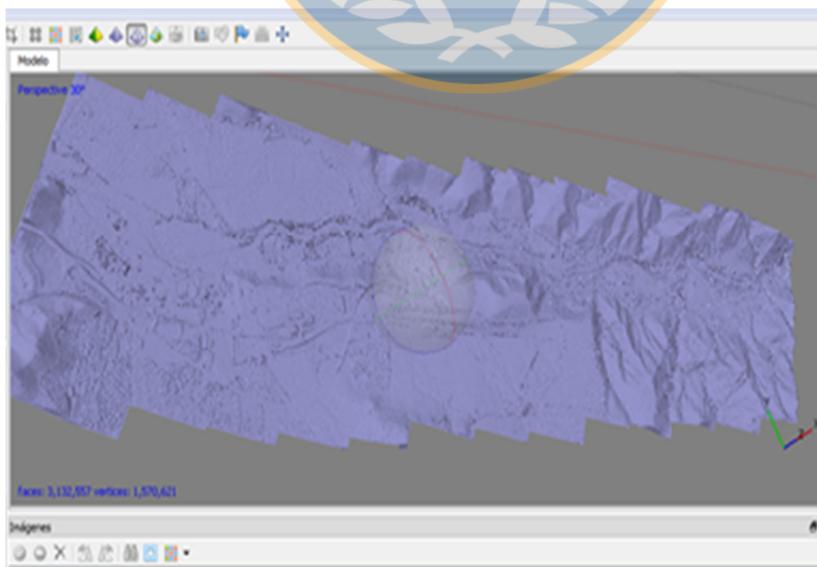
Como resultado se forman una pequeña nube de puntos y un conjunto de posiciones de la cámara en el instante de la exposición. Esta orientación primaria y la nube de puntos pequeña representa los resultados de la orientación de la foto y no se utiliza directamente en el procedimiento de construcción del modelo 3D. Sin embargo, puede ser exportado para su posterior uso en programas externos. Por ejemplo, en el modelo de nube de puntos pequeña puede ser utilizado en un editor de 3D como referencia.

- **Obtención de malla de triángulos**

La tercera etapa es la construcción de la malla de triángulos. El programa reconstruye una malla poligonal que representa el objeto 3D, es una superficie basado en la nube de millones de puntos obtenidos. En general hay dos métodos algorítmicos disponibles en el programa que pueden ser aplicados a la generación de malla 3D, altura del campo, para superficies planas, de tipo arbitrarias o por defecto, para cualquier tipo de objeto.

Una vez construida la malla, puede ser necesario editarla. Algunas correcciones, como espacios con malla destruida, eliminación de los componentes separados, el cierre de los agujeros en la malla, suavizado, etc. puede ser realizada por el programa. Para una edición más compleja se tiene que utilizar herramientas de edición 3D externos, como civil3D.

Fig.23 Malla de triángulos



Fuente: Elaboración Propia.

- **Obtención de textura**

Después de haber realizado la nube de puntos y la creación de la malla de triángulos, se debe crear una malla de textura que consiste en una similar a la de triángulos pero con forma rectangular o cuadrangular que se utiliza para la generación del ortofoto.

Figura N° 24 Modelo de textura

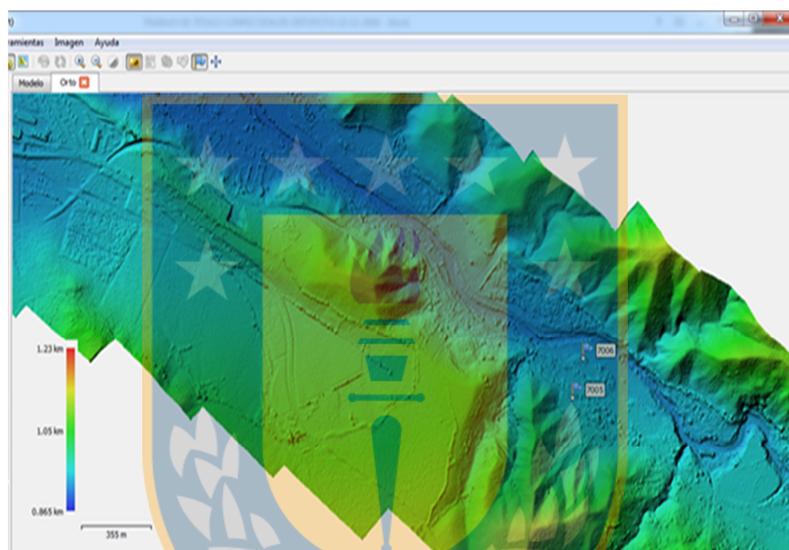


Fuente: Elaboración Propia.

- **Obtención del modelo digital de elevaciones o MDE**

Después de haber realizado la malla de textura se debe generar el MDE, el conjunto de todos estos elementos son los que se utilizan para la generación del ortofoto.

Figura N°25 Modelo digital de elevación.

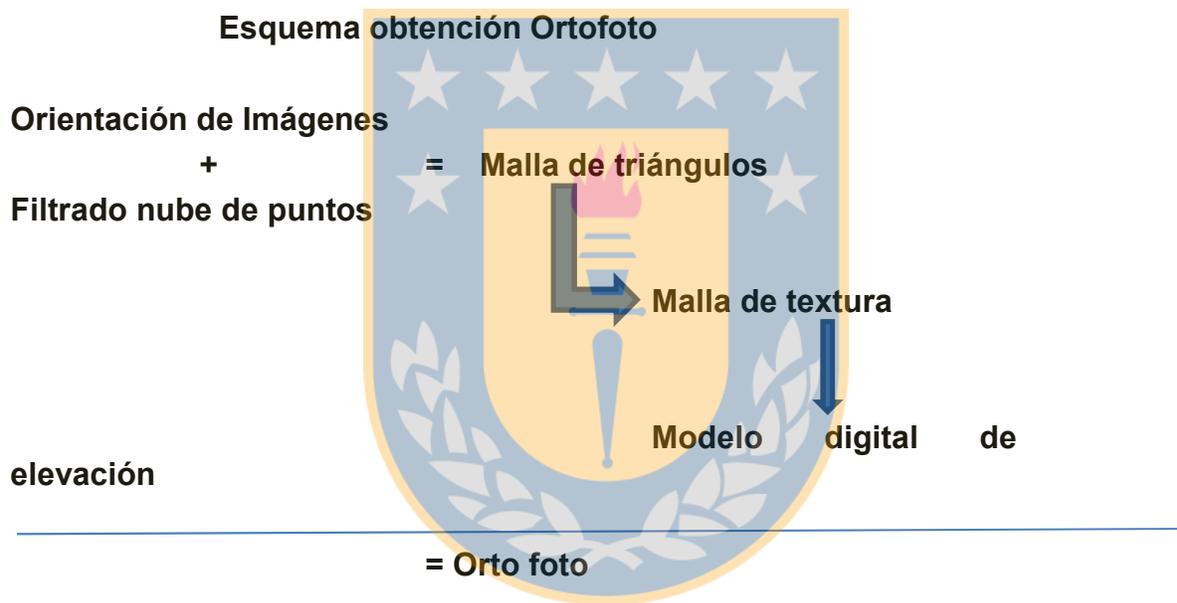


Fuente: Elaboración Propia.

Resumen generación de Orto foto

Una vez realizado todos los procedimientos anteriormente mencionados se generará la ortofoto de cada fotografía y también se obtiene el ortofotomosaico de la línea de vuelo completa en forma automática.

Cabe mencionar, que el tamaño del pixel para la ortofoto será de 20 cm.



- **Exportación de datos**

Luego de realizado el ortofoto los datos obtenidos de este, se deberán exportar para ser leídos o visualizados, en cualquier software a fin, para lo cual se utiliza el formato geotiff.

4.8 Generación de Planimetría y Toponimia

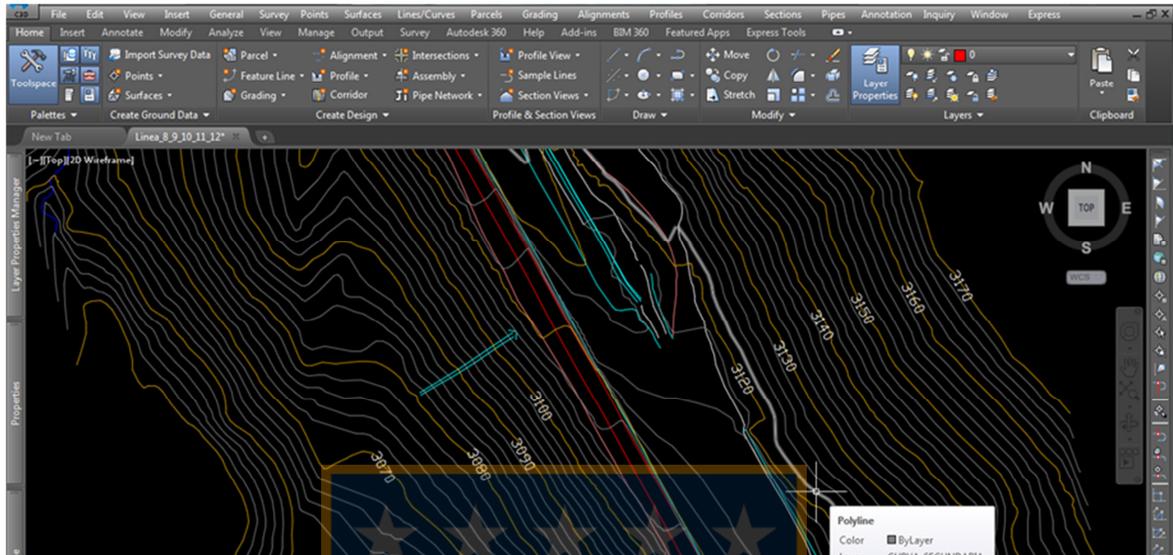
Una vez terminado el proceso de generación de la Orto imagen se procede al dibujo de la Planimetría y Toponimia. Básicamente la Vectorización de la planimetría consiste en el dibujo por computadora de los elementos foto identificables presentes en la zona del proyecto, ejemplos de elementos sería: Caminos, huellas, construcciones, etc. Los cuales se clasifican o separación en capas de información.

Además para completar la planimetría respecto a los elementos hidrográficos se hace necesario disponer del modelo de curvas para el correcto dibujo de estos elementos, principalmente del tipo quebradas o cursos de agua menores.

4.8.1 Edición Cartográfica

En esta etapa los modelos deben ser revisados, eliminando los posibles errores de traspaso de la información desde la Vectorización, para posteriormente ser unidos y depuradas las uniones, para que calcen los elementos levantados en un modelo y el modelo contiguo. Para la edición de los modelos se utilizará software Civil 3D, como indica la imagen siguiente, en la que se muestra el ingreso de un modelo exportado desde la Vectorización a Civil 3D, donde podemos reconocer curvas de nivel (color blanco y amarillo), carretera (color rojo), y comenzar el trabajo de edición.

Figura N° 26 Edición cartográfica con Civil 3D



Fuente: Elaboración Propia.

4.8.2 Producto Topográfico Final

Para concluir la etapa final del trabajo es necesario definir las láminas que cubren el proyecto de acuerdo al formato requerido por el mandante, por lo general es un formato A0 (841 X 1189 mm), ya que por la extensión del proyecto no es posible plotear en un solo plano el proyecto completo. Este laminado dependerá de la escala del proyecto, esto implica que cada lámina debe cubrir una superficie 1600 m x 2000 m.

Para crear el laminado será necesario:

- Definir la superficie útil.
- Generar una cuadrícula.

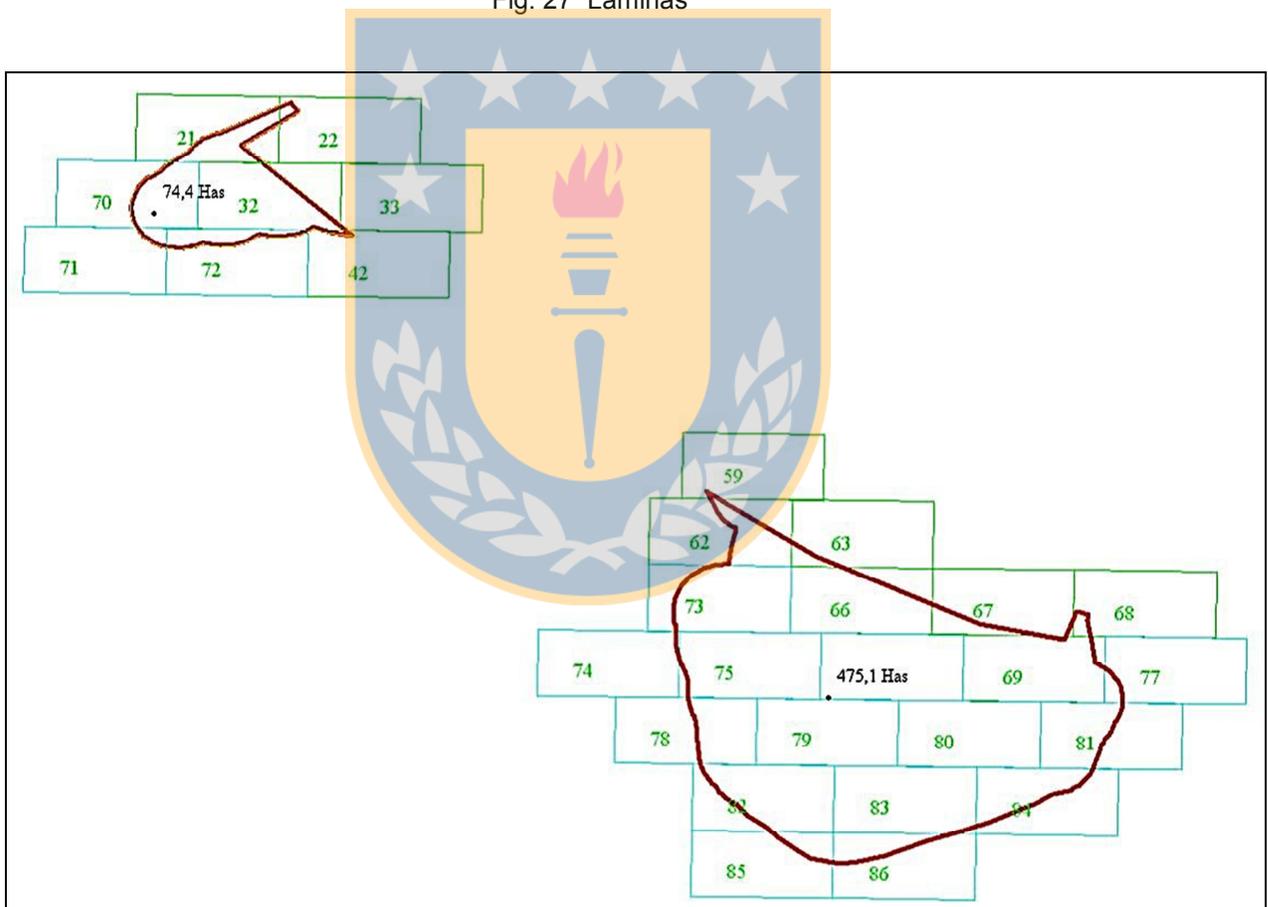
- Ubicar la cuadrícula en la cartografía digital.

Como se muestra en la figura N° 27, correspondiente al proyecto completo en la que se obtuvieron 29 láminas en total, a escala 1:1000.

La información se organizó de la siguiente manera:

29 Láminas a escala 1:1000

Fig. 27 Láminas



Fuente: Elaboración Propia.

Una vez finalizado el laminado se debe incluir la información marginal que consta de:

- Nombre del proyecto
- Norte
- Coordenadas UTM
- Datos del mandante
- Escala del plano
- Leyenda

4.8.3 Control de Calidad Gabinete

Los trabajos de control de calidad realizados, permitieron comprobar el fiel cumplimiento de la calidad de los productos generados, de acuerdo a lo requerido y esperado por el mandante para las escala 1:1.000.

La secuencia del proceso de captura de datos y revisión de calidad contempló:

- Confirmación cobertura de puntos sobre el área.
- Confirmación de que el 90 % de los puntos tomados están dentro de las Tolerancias permitidas. En estos casos la tolerancia es solo referencial ya que al ser un proyecto privado se optó por las normas del manual de carreteras volumen 2 del ministerio de obras públicas MOP(pag.60)
- Codificación de puntos en altura por colores para así visualizar rápidamente Cualquier anomalía en la información.
- Confirmación de que los traslapes fueran los adecuados.
- Confirmación de que las curvas de nivel fueran adecuadas en cuanto a su edición y que no presentan irregularidades (saltos o escalones).

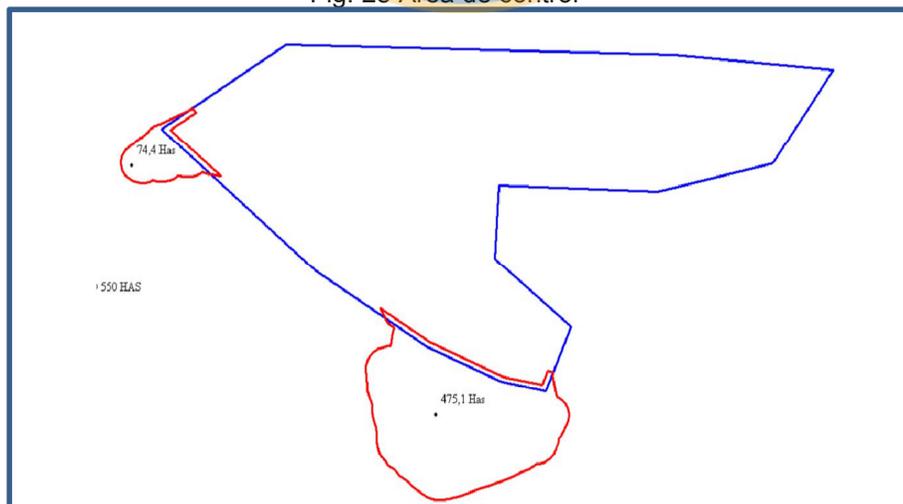
4.8.4 Autocontrol

Para controlar la calidad del levantamiento se realizó una comparación entre los puntos de empalme entre los proyectos Tinguiririca y Don Eugenio, en el cual se utilizaron los mismos puntos bases como referencia y se compararon los resultados obtenidos, para lo cual se generó un reporte estadístico (Fig.28).

Del reporte se puede concluir que, del total de la muestra de puntos (61810) comparados en la zona de traslape de ambos proyectos, el 99,79% se encuentra entre el intervalo $\pm 0.5m$, es decir, no se aprecian desplazamientos respecto al levantamiento de terreno, con lo que se infiere que el levantamiento láser cumple con las tolerancias de una escala 1:1.000. este fue la única forma de controlar el proyecto en esta etapa, en etapas posteriores a este trabajo de realizaron levantamientos en terreno que verifican de mejor forma la calidad del proyecto.

A continuación se muestra la ubicación de los autocontroles, el polígono azul corresponde al proyecto Don Eugenio y los polígonos rojos al proyecto Tinguiririca, en los empalmes entre ambos proyectos se realizó el autocontrol de puntos.

Fig. 28 Área de control



Fuente: Elaboración Propia

A) Reporte de Autocontrol

Fig. 29 Reporte estadístico de autocontrol

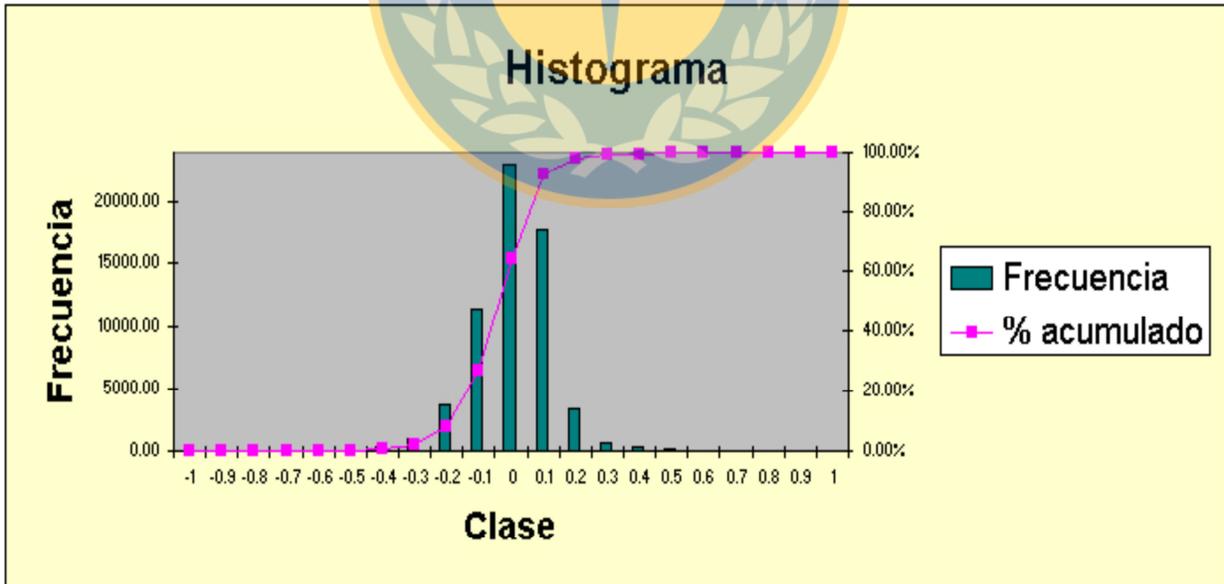
Clase (m)	Frecuencia	Frecuencia Acumulativa	Distribucion Normalizada	Estadísticas Descriptivas	
-1	0	0.00%	0.00%	Media	-0.035421129
-0.9	0	0.00%	0.00%	Error típico	0.000484334
-0.8	0	0.00%	0.00%	Mediana	-0.03
-0.7	0	0.00%	0.00%	Moda	-0.02
-0.6	8	0.01%	0.01%	Desviación estándar	0.120413352
-0.5	72	0.13%	0.12%	Varianza de la muestra	0.014499375
-0.4	318	0.64%	0.51%	Curtosis	5.052374663
-0.3	1002	2.27%	1.62%	Coefficiente de asimetría	0.324774081
-0.2	3685	8.23%	5.96%	Rango	1.63
-0.1	11337	26.57%	18.34%	Mínimo	-0.64
0	23025	63.82%	37.25%	Máximo	0.99
0.1	17808	92.63%	28.81%	Suma	-2189.38
0.2	3407	98.14%	5.51%	Cuenta	61810
0.3	577	99.08%	0.93%	Nivel de confianza(95.0%)	0.000949296
0.4	296	99.56%	0.48%		
0.5	151	99.80%	0.24%		
0.6	40	99.86%	0.06%		
0.7	20	99.90%	0.03%		
0.8	18	99.93%	0.03%		
0.9	29	99.97%	0.05%		
1	17	100.00%	0.03%		

puntos que se encuentran en el intervalo:

- 0.50 y menor (m) ▲ **0.01%**
- 0.50 to 0.50 (m) ▲ **99.79%**
- 0.50 y mayor (m) ▲ **0.20%**

Ptos. Ctrl. 61810

Porcentaje de los puntos que se encuentran en el intervalo +/- 0.50m 99.79%



Fuente: Planilla Excel Asinge.

4.8.5 Etapa de Resultados

Como resultado final del proceso tenemos la elaboración de 2 productos cartográficos, como primer producto se obtuvo un modelo digital de elevación a escala grande, 1:1.000 de una extensa área aledaña al mismo proyecto y como segundo producto, la obtención de una ortofoto a escala 1:1.000 sobre el mismo sector y finalmente la fusión de ambos, obteniendo un producto cartográfico de gran calidad.

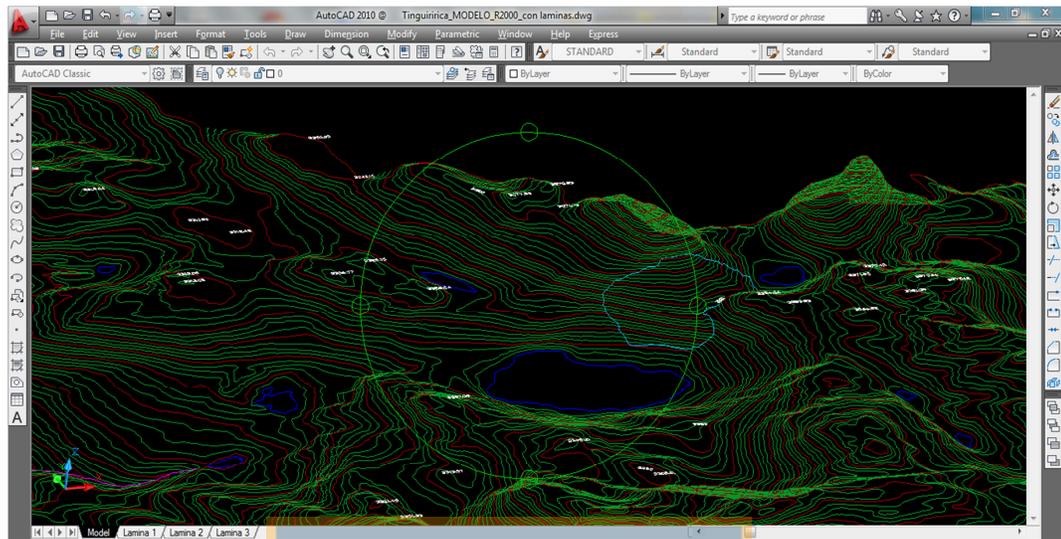
La trabajo obtenido nos arrojó una archivo final de 14.5 Mb en formato digital DWG estructurado en 24 layer de información y con 29 láminas de dibujo.

Los resultados obtenidos están validados por medio del autocontrol aplicado a toda la cartografía vectorial, el cual está descrito con más detalle en el Capítulo III, número 3.3

Sobre la cartografía obtenida también se añade información planimétrica y topográfica, como la toponimia, hidrografía, edificación y usos del suelo, vías de comunicación, nombres geográficos y límites administrativos.

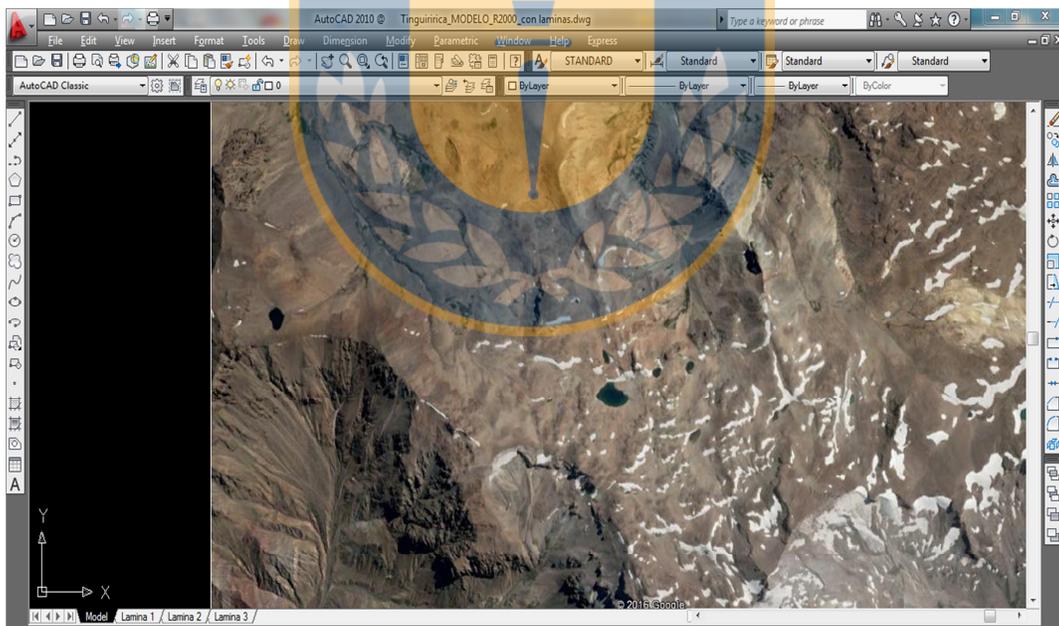
En la información marginal y leyenda se añade información auxiliar: organismo responsable de la cartografía, escala, número de lámina, coordenadas, sistema geodésico de referencia, fecha de la cartografía, fecha de vuelo, mapa de ubicación, gráfico de distribución de láminas, leyendas, etc.

Fig. 30 Modelo con curvas de nivel



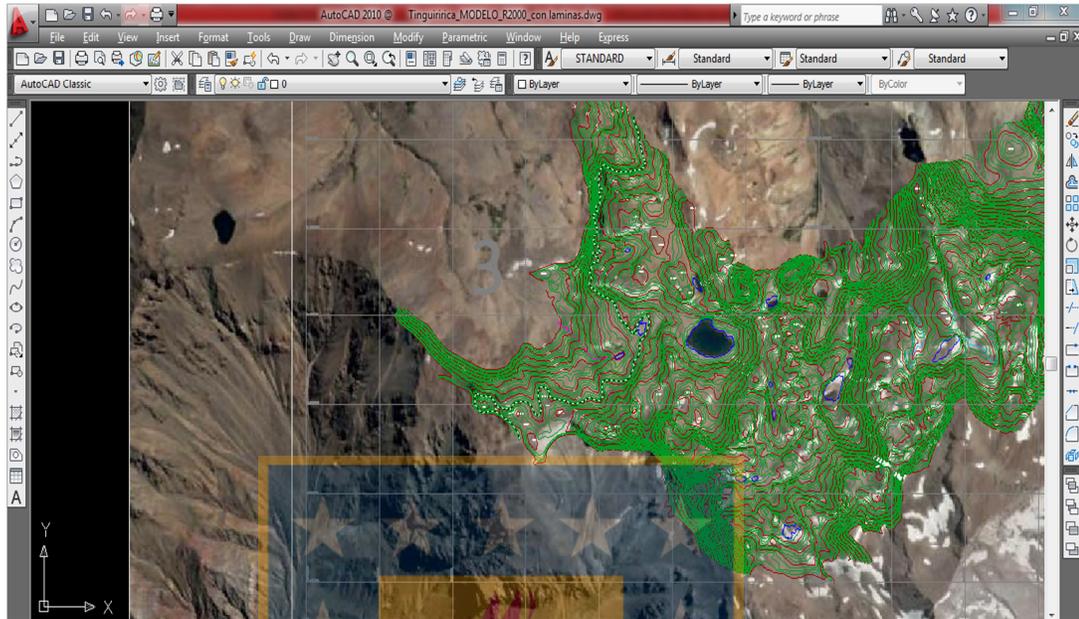
Fuente: Elaboración propia

Fig. 31 Orto imagen



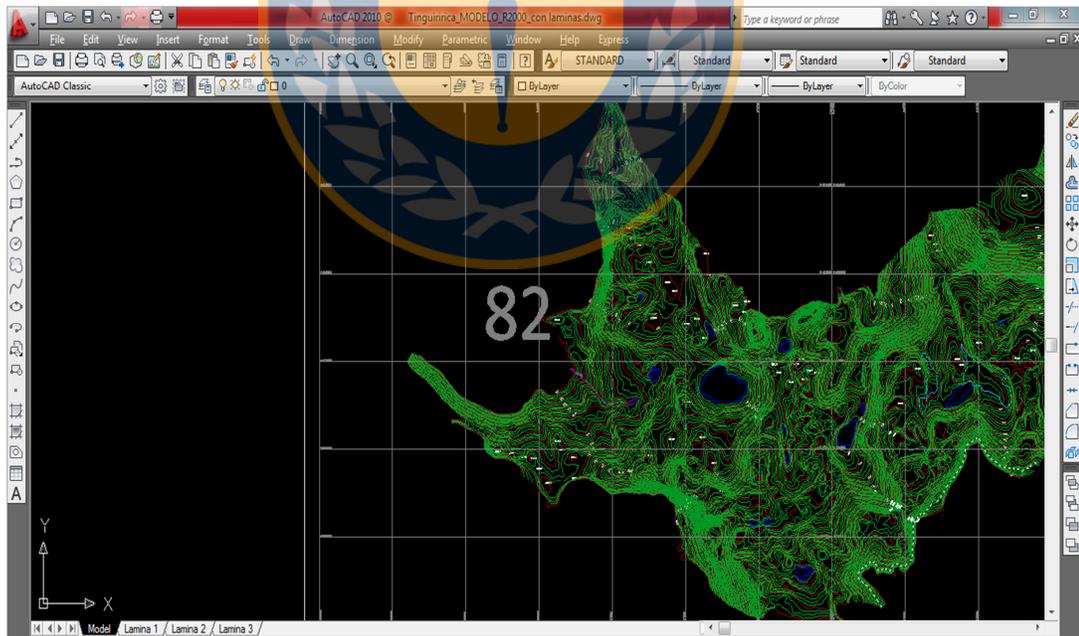
Fuente: Elaboración Propia

Fig. 32 Unión de los 2 procesos



Fuente: Elaboración propia

Fig. 33 Plano topográfico lamina 82



Fuente: Elaboración propia



El propósito de la realización de este trabajo, fue realizar un levantamiento topográfico laser en cuanto a precisión, confiabilidad, calidad, tiempo asociado, costos y disponibilidad de la información.

Para cumplir con el logro de este objetivo, se utilizó el sistema Laser aerotransportado, tecnología existente en el mercado Nacional e Internacional, que consiste en un escáner láser de alta potencia, un receptor GPS que proporciona la posición y altura del avión en cada momento y un sistema inercial IMU (Inertial Measurement System) que registra los movimientos del avión y su trayectoria.

El levantamiento topográfico con láser aerotransportado se realizó en condiciones normales, no presentando mayores inconvenientes en su ejecución ya que las condiciones técnicas y siguiendo los procedimientos adecuados se evitan resultados desfavorables.

Como resultado del levantamiento con laser aerotransportado se logró levantar el área de proyecto y con ellos generar los productos cartográficos escala 1:1.000 que formaban parte de este trabajo, los cuales son: Nube de puntos, Ortofotos y curvas de nivel.

Respecto al tema central de este proyecto, que dice relación con la introducción de tecnología LIDAR, se puede señalar que en Chile y Latinoamérica las empresa que cuentan con este sistema no son más de 5 aparte del Servicio de Aerofotogrametría de la fuerza aérea de Chile (SAF) y que también cuenta con todos los medios técnicos y tecnología existente en el mercado respecto a la fotogrametría.

Cabe destacar que la tecnología propuesta de levantamiento LIDAR es una de las tecnologías de levantamiento topográfico disponibles en el mercado chileno y uno como futuro ingeniero en Geomensura debe tener alternativas acerca de realizar levantamientos de información terrestre, ya que en este campo de las mensuras el profesional no se debe encasillar en un área solamente sino integrar nuevas tecnologías.

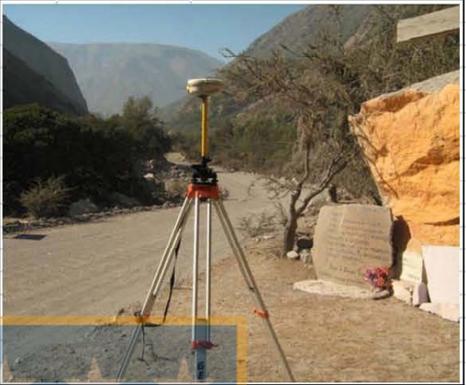
Como conclusión final podemos decir que el Sistema tiene grandes ventajas al recuperar los datos de terreno, pudiendo obtener en forma clara y rápida la forma real del terreno con sus respectivo modelo de elevación del terreno, pero presenta dificultades al realizar la edición o filtrado de los puntos de terreno ya que al enfrentarse a condiciones que no fueran a las que se dieron en este trabajo, el resultado sería distinto por el tiempo empleado en la edición, sin embargo, como se dijo en el párrafo anterior esta es una más de las herramientas para realizar esta labor que es la realización de un levantamiento topográfico en condiciones geográficas adversas y que se logra la finalidad que es un producto cartográfico de buena calidad, en cuanto a, precisión, confiabilidad, tiempo asociado, costos y disponibilidad de la información.

BIBLIOGRAFIA

- Baez, Juan Carlos. (2002). Apuntes Geodesia, Universidad de Concepción.
- Chuvieco, Emilio. (2010). La observación de la Tierra desde el espacio. Editorial Ariel.
- Estornell, Javier y Ruiz. (2007). Generación de MDE y MDS en una zona de vegetación arbórea y arbustiva mediante datos LiDAR e imágenes de satélite QuickBird. VII Semana Geomática, Febrero.
- Ministerio de Obras Públicas, Manual de Carreteras Volumen 2. (2001). capítulo 2.300, Ingeniería Básica Aspecto Geodésicos y Topográficos.
- Rocadenbosch, (2003). Remote Sensing mediante LIDAR en la UPC.
- Universidad Nacional de Rosario, (2005). GPS Posicionamiento Satélital, Editorial UNR.
- Saavedra Achurra, Matías, (2006). Apuntes de Geodesia Geométrica UTEM.
- Sevilla de Lerma Miguel, (2012). Introducción Histórica a la Geodesia Catedrático de Universidad Complutense De Madrid.
- Wolf, Paul. (2009) Topografía.
- Vozmediario Montoya Diego, Fotogrametría digital aplicada a la Obtención de ortofotos, modelos digitales de entidades patrimoniales, versión PDF, 2006



Protocolo Recepción Certificado y Monografía de Vértices			
Contrato		Correlativo	1
Contratista		Fecha Entrega	
Tramo			
Sector	Termas del Flaco		
Punto de Referencia	APV3		
Fotografía Vértice		Fotografía Panorámica	
			
Monografía		Coordenadas Sirgas 2000	
		Norte UTM (m)	6149039.300
		Este UTM (m)	352215.378
		Altura Elipsoidal (m)	923.547
		Cota S.N.M.M (m)	895.447
		Longitud	70°36'55.22228"O
		Ubicación	
		Región	Del Libertador Bernardo O'higgins
		Sector	Termas del Flaco
		Vértice Par más cercano	
		APV4	
Descripción:			
El vértice se encuentra en localidad de Puente Negro, comuna de San Fernando, por la ruta I-45 hacia Termas del Flaco, a 11.07 Km al oriente de la central hidroeléctrica la Higuera por la ruta y a 50 m del eje al costado izquierdo en dirección a termas del Flaco, existe una señal de madera en forma de "T" pintada por tramos en color Rojo/Blanco. Al pie de dicha señal se encuentra el fierro estriado de 2 Cm de diámetro enterrado en ripio.			

Protocolo Recepción Certificado y Monografía de Vértices															
Contrato		Correlativo	2												
Contratista		Fecha Entrega													
Tramo															
Secbr															
Punto de Referencia	APV4														
Fotografía Vértice		Fotografía Panorámica													
															
Monografía		Coordenadas Sirgas 2000													
		<table border="1"> <tr><td>Norte UTM (m)</td><td>6147902.683</td></tr> <tr><td>Este UTM (m)</td><td>353293.345</td></tr> <tr><td>Altura Elipsoidal (m)</td><td>961.852</td></tr> <tr><td>Cota S.N.M.M (m)</td><td>933.663</td></tr> <tr><td>Latitud</td><td>34°48'01.08437"S</td></tr> <tr><td>Longitud</td><td>70°36'13.53394"O</td></tr> </table>		Norte UTM (m)	6147902.683	Este UTM (m)	353293.345	Altura Elipsoidal (m)	961.852	Cota S.N.M.M (m)	933.663	Latitud	34°48'01.08437"S	Longitud	70°36'13.53394"O
Norte UTM (m)	6147902.683														
Este UTM (m)	353293.345														
Altura Elipsoidal (m)	961.852														
Cota S.N.M.M (m)	933.663														
Latitud	34°48'01.08437"S														
Longitud	70°36'13.53394"O														
		Ubicación													
		Región	Del Libertador Bernardo O'higgins												
		Secbr	Termas del Flaco												
		Vértice Par más cercano													
		APV3													
Descripción:															
El vértice se encuentra en localidad de Puente Negro, comuna de San Fernando, por la ruta I-45 hacia Termas del Flaco, a 12.61 Km al oriente de la central hidroeléctrica la Higuera por la ruta y a 3 m del eje al costado derecho en dirección a Termas del Flaco, existe un memorial. Al pie de dicho memorial se encuentra el fierro estriado empotrado en base de hormigón de 30x30 Cm.															