



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS**

LEVANTAMIENTO LÁSER AEROTRANSPORTADO Y TOPOGRAFÍA SUPERFICIAL DE GLACIARES EN CHILE CENTRAL

**REALIZADO POR:
DIGIMAPAS CHILE AEROFOTOGRAMETRÍA LTDA**

S.I.T. N° 283

Santiago, Agosto de 2012

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Sr. Laurence Golborne R.

Director General de Aguas
Abogado Sr. Matías Desmadryl L.

Jefe Unidad Glaciología y Nieves
Dr. Gonzalo Barcaza S.

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sr. Armando Peña.

DIGIMAPAS CHILE AEROFOTOGRAMETRIA LTDA.

Jefe de Proyecto
Técnico Superior en Aerofotogrametría Sr. Fulvio Cortes O.

Profesionales

Ingeniero Geomensor Sr. Jonathan Molina M.
Ingeniero de Ejecución en Geomensura Sr. Aníbal Stormezan S.
Ingeniero de Ejecución en Geomensura Srta. Daniela Norambuena G.
Geógrafa Srta. Carolina Rebolledo A.
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables Sr. Ciro Castro G.
Ingeniero Forestal Sr. David Pavez M.
Geógrafa Srta. Paula González C.
Geoinformación y Trabajo Público Sr. Markus Keusch.
Cartógrafo Sr. Luis Hernández N.
Cartógrafo Sr. Cristian Vera O.
Geógrafo Sr. Franco De Luca N.
Ingeniero de Ejecución en Geomensura Sr. Gabriel Meza B.
Ingeniero en Aviación Comercial Srta. Paula Ballesteros C.

INDICE

1. GENERAL	4
1.1. INTRODUCCIÓN	4
1.2. ALCANCE	5
1.3. OBJETIVO GENERAL	5
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2. METODOLOGÍA	7
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE METODOLOGÍA DE TRABAJO	7
3. DESARROLLO	9
3.1. ANTECEDENTES GEODÉSICOS	9
3.2. METODOLOGÍA DE VUELO	10
4. PRODUCTOS	22
4.1. GENERACIÓN DE NUBE DE PUNTOS	22
4.2. MODELO DIGITAL DE TERRENO	23
4.3. AJUSTE REALIZADO A LOS MODELOS DIGITALES DE TERRENO	25
4.4. IMAGEN DE INTENSIDAD	28
4.5. IMÁGENES RGB	28
4.6. CURVAS DE NIVEL	29
5. CONTROL DE CALIDAD	30
5.1. PRODUCTOS LÁSER	30
5.2. IMÁGENES RGB	32
6. CONCLUSIÓN	34
APENDICE I: REPORTE METEOROLÓGICO	35
APENDICE II: DISTRIBUCIÓN Y ENTREGA DE PRODUCTOS	41
PRODUCTOS ALTIMETRÍA	41
PRODUCTOS LIDAR	42
PRODUCTOS IMÁGENES RGB	43
APENDICE III: RECEPTORES SATELITALES GNSS (L1/L2), TOPCON, HIPER + GGD, 32 MB	44

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 2- 1: Parámetros Sensor LiDAR _____	13
Tabla 2- 2: Resumen de Vuelos Realizados _____	15
Tabla 3- 1: Detalle de Mediciones de Altura de Nieve – Glaciar Monos de Agua _____	27
Tabla 4-1: Resumen Resultados Obtenidos Perfil Glaciar Monos de Agua _____	31
Figura 2-1: Ubicación General Área de Levantamiento _____	9
Figura 2-2: Líneas de vuelo LiDAR/Cámara - Grupo Tinguiririca _____	10
Figura 2-3: Líneas de vuelo LiDAR/Cámara - Grupo el Yeso _____	11
Figura 2-4: Líneas de vuelo LiDAR/Cámara - Grupo Maipo _____	11
Figura 2-5: Líneas de vuelo LiDAR/Cámara- Glaciar Cipreses _____	12
Figura 2-6: Líneas de vuelo LiDAR/Cámara - Glaciar Monos de Agua _____	12
Figura 2-7: Cobertura Láser - Grupo Tinguiririca _____	16
Figura 2-8: Cobertura Láser - Grupo el Yeso _____	16
Figura 2-9: Cobertura Láser - Grupo Maipo _____	17
Figura 2-10: Cobertura Láser- Glaciar Cipreses _____	17
Figura 2-11: Cobertura Láser - Glaciar Monos de Agua _____	18
Figura 2-12: Cobertura Cámara - Grupo Tinguiririca _____	18
Figura 2-13: Cobertura Cámara - Grupo el Yeso _____	19
Figura 2-14: Cobertura Cámara - Grupo Maipo _____	19
Figura 2-15: Cobertura Cámara- Glaciar Cipreses _____	20
Figura 2-16: Cobertura Cámara - Glaciar Monos de Agua _____	20
Figura 2-17: Distribución de Polígonos Densidad de Puntos – Grupo Tinguiririca _____	21
Figura 2-18: Distribución de Polígonos Densidad de Puntos – Glaciares Bello, Yeso 1, Yeso 2 _____	22
Figura 3-1: Nube de Puntos - Sector El Yeso 1 _____	23
Figura 3-2: Diagrama de Flujo de Procesos LiDAR _____	24
Figura 3-3: Modelo Digital de Terreno – Glaciar Tinguiririca 3 _____	25
Figura 3-4: Imagen RGB – Glaciar El Plomo _____	25
Figura 3-5: Imagen Diferencias de Cota Datos Antiguos / Datos Nuevos – Glaciar Tinguiririca 3 _____	26
Figura 3-6: Modelo de Intensidad – Glaciar Tinguiririca 3 _____	28
Figura 3-7: Imagen RGB – Glaciar Tinguiririca 3 _____	29
Figura 4-1: Ubicación puntos de control proyecto Glaciar Monos de Agua _____	30
Figura 4-2: Ubicación puntos de control proyecto Glaciar Cipreses Norte _____	32
Figura 4-3: Superposición Imágenes RGB (Izquierda) – Modelo Digital de Terreno (Derecha) _____	33

1. GENERAL

1.1. Introducción

El Ministerio de Obras Publicas de Chile (MOP), a través de la Dirección General de Aguas (DGA), encargó a Digimapas Chile Ltda. (DMCL) el estudio denominado **“Levantamiento Láser Aerotransportado y Topografía Superficial de Glaciares en Chile Central”**, el cual corresponde al levantamiento topográfico de 15 Glaciares distribuidos en las Regiones de Valparaíso, O`Higgins y Metropolitana. Mediante el Sistema LiDAR “TRIMBLE 68i” que incorpora una cámara fotogramétrica Rolley de 60mp.

La DGA, mediante su Unidad de Glaciología y Nieve (UGN), ha desarrollado una Estrategia Nacional de Glaciares, la cual entrega las directrices a seguir para un monitoreo a nivel nacional. Esta estrategia contempla un modelo escalonado o de observación jerarquizada basado en el World Glacier Monitoring Service (WGMS), el cual consiste en niveles de estudio que varían en complejidad y extensión espacial, pasando de estudios locales de gran detalle, hasta investigaciones generales que abarcan la totalidad de glaciares del país.

En la actualidad la UGN se encuentra implementando en nivel 3, el cual está orientado a determinar detalles de la dinámica glaciaria, de forma tal, proveer indicadores a escala regional. Por este motivo, es que DGA, ha establecido estudiar 15 glaciares ubicados en la cuenca del río Aconcagua y la cuenca del río Rapel determinando, mediante tecnología LiDAR, la topografía superficial de detalle requerida para generar modelos de terreno que permitan obtener los indicadores del nivel 3.

El sistema LiDAR, acrónimo de Light Detection And Ranging, es un sistema de teledetección activa que emite pulsos de luz láser en el espectro electromagnético, para posteriormente capturar la señal reflejada (eco) por la superficie topográfica barrida, obteniendo de esta forma las elevaciones del terreno lo más fiel a la realidad mediante el sistema ALS (Airborne Laser Scanning).

El LiDAR además está compuesto por un georreceptor satelital que proporciona la posición y la altura del avión en cada momento de emisión del pulso láser, siendo este el Sistema GNSS y por último incorpora un Sistema Inercial de Navegación “INS”, el cual entrega información de los giros y trayectoria del avión en vuelo.

De esta forma se resume que el Sistema LiDAR está compuesto por tres subsistemas (ALS, GNSS e INS), los que de forma independiente registran sus propias observaciones, siendo el parámetro en común para su sincronización y post proceso el tiempo GPS que registra en cada medida.

1.2. Alcance

El alcance del presente informe corresponde a informar las principales etapas del proyecto y el resultado final del mismo después de su ejecución.

Las etapas corresponden a:

- Etapas de terreno (toma de datos)
- Generación de Productos (Gabinete)

1.3. Objetivo General

El presente proyecto tiene por objetivo obtener información topográfica, para la generación de planos cartográficos, modelos digitales de elevación y ortofotos digitales de las áreas de estudio por medio de un sensor Laser aerotransportado. De esta manera la Dirección General de Aguas (DGA) podrá gestionar la información territorial levantada y así obtener los antecedentes necesarios para realizar los estudios que estime conveniente en cada uno de los glaciares, además de inventariarlos y monitorearlos por su Unidad de Glaciología y Nieves (UGN).

1.4. Objetivos Específicos

Proveer a la unidad de Glaciología y Nieves de los Modelos Digitales, imágenes de intensidad LiDAR, Ortofotos Digitales y curvas de nivel con una equidistancia de un metro, de la superficie de los glaciares que se muestran a continuación:

N°	Glaciar	Superficie (Km ²)
1	Monos de Agua	1,96
2	Esmeralda	5,78
3	La Paloma	1,2
4	Del Rincón	0,79
5	Cerro El Plomo	1,44
6	Yeso	2,03
7	Bello	4,21
8	Yeso 1	1,46
9	Yeso 2	1,17
10	Pirámide	3,98
11	Mesón Alto	1,34
12	Cipreses Norte	5,61
13	Tinguiririca 1	4,51
14	Tinguiririca 3	3,56
15	Tinguiririca 4	2,08

2. METODOLOGÍA

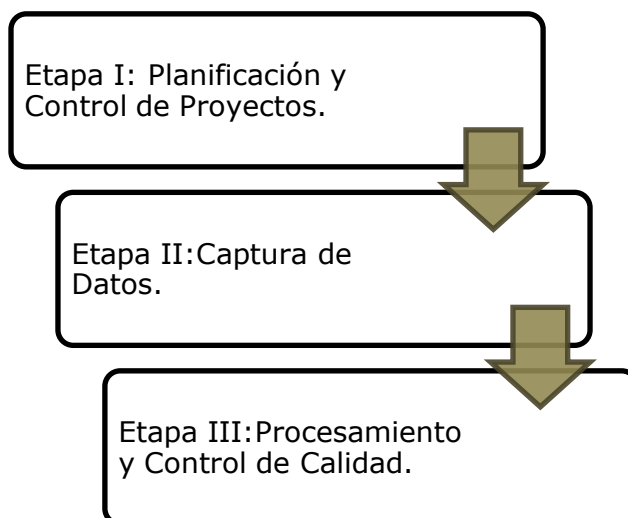
Desde el año 2005, DMCL ha desarrollado y perfeccionando la metodología de trabajo y la capacidad de procesamiento necesarias para llevar a cabo las operaciones de gran magnitud que realiza en Chile.

Estas mejoras han sido impulsadas y diseñadas por nuestro staff técnico en conjunto con la colaboración de los equipos de soporte de los fabricantes de cada uno de los componentes del sistema LiDAR, contando además con el respaldo de reconocidos científicos y académicos de las distintas áreas que comprenden nuestros productos.

A su vez, el desarrollo de la metodología de trabajo de DMCL, es consecuencia directa del esfuerzo invertido en la ejecución del aerolevantamiento de más de 8,5 millones de hectáreas desde el año 2006, repartidas entre el sur de Chile (ciudades, embalses, ríos, zonas de alta vegetación, bosques nativos y en producción), y en proyectos de ingeniería para mineras, hidroeléctricas, líneas de transmisión, proyectos viales, catastro de glaciares, ciudades y predios agroforestales, entre otros.

2.1. Descripción General de Metodología de Trabajo

La Metodología de Trabajo, se compone de tres etapas principales correspondientes a:



Cada uno de los procesos se compone de etapas o tareas que pueden ser desarrolladas en paralelo y contribuyen a la ejecución exitosa de cada proceso.

2.1.1. Etapa I: Control y Planificación de Proyectos

El desarrollo de esta etapa contempla, especialmente, la planificación de vuelo y trabajo en campo, considerando como input los requerimientos previamente definidos por el cliente.

2.1.2. Etapa II: Captura de Datos

En esta etapa se ejecutan los vuelos requeridos para la captura de datos y el soporte de los mismos mediante la red de apoyo geodésica, asegurando de esta forma la georreferenciación de los productos. Dentro de esta última se ejecuta un pre-procesamiento los datos capturados por las misiones de vuelo de cámara y láser, el cual se realiza en el software PosPAC desarrollado por nuestros socios canadienses de Applanix Corporation.

2.1.3. Etapa III: Procesamiento y Control de Calidad

Al llegar la información al centro de procesamiento de DMCL, se comienza con el procesamiento de datos, el cual se compone de las siguientes tareas:

- Procesamiento Geodésico.
- Procesamiento Láser.
- Procesamiento Cámara.
- Procesamiento Planimetría.
- Control de Calidad.

El procesamiento de láser y de cámara se realiza con los software de procesamiento LiDAR, TopPIT (TopoSys Processing and Imaging Tools), desarrollado por el fabricante del sensor LIDAR, TopoSys GMBH¹. TopPIT ha sido programado para plataformas LINUX, debido a la estabilidad, capacidad de procesamiento y robustez de del mismo.

¹ Para mayor información <http://www.toposys.com>

3. DESARROLLO

3.1. Antecedentes Geodésicos

Para la planificación de vuelos fue utilizado el Sistema de referencia SIRGAS UTM WGS84 Huso19 S y Modelo de Elevación Global Geoidal EGM08.

De acuerdo a lo acordado con el mandante el polígono a cubrir se muestra en la **Figura 2-1: Ubicación General Área de Levantamiento** la vista del polígono obtenido.



Figura 2-1: Ubicación General Área de Levantamiento
Referencia: DMCL & Red Vial, MOP.

3.2. Metodología de Vuelo

3.2.1. Elaboración de los Planes de Vuelo

Tomando como base el polígono mencionado anteriormente, se procedió a planificar el vuelo, de manera de asegurar:

- Cobertura del área total.
- Recubrimiento, para evitar que zonas del proyecto queden sin puntos o imagen (**Figuras 2-2 a la Figura 2-6, Líneas de Vuelo LiDAR/Cámara**).

Cobertura Láser Realizada	Código Vuelo	Total de Líneas Voladas LiDAR/Cámara
2.791,2 ha Tinguiririca	Boot 1.526 - 1.527	23

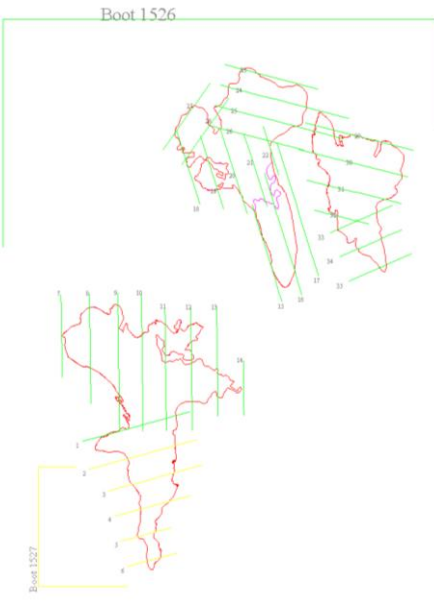


Figura 2-2: Líneas de Vuelo LiDAR/Cámara - Grupo Tinguiririca
Fuente: DMCL.

Cobertura Láser Realizada	Código Vuelo	Total de Líneas Voladas LiDAR/Cámara
2.922,7 ha El Yeso	Boot 1.528 - 1.529	50

Figura 2-3: Líneas de Vuelo LiDAR/Cámara - Grupo el Yeso
Fuente: DMCL

Cobertura Láser Realizada	Código Vuelo	Total de Líneas Voladas LiDAR/Cámara
2.195,7 ha El Maipo	Boot 1.530 - 1.531	32

Figura 2-4: Líneas de Vuelo LiDAR/Cámara - Grupo Maipo
Fuente: DMCL

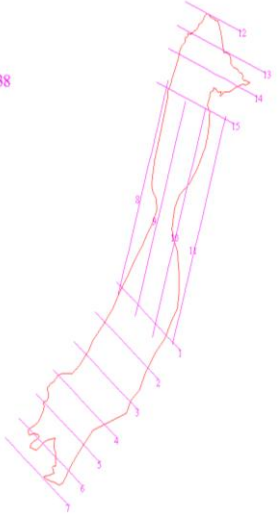
Cobertura Láser Realizada	Código Vuelo	Total de Líneas Voladas LiDAR/Cámara
1.818,3 ha Cipreses	Boot 1.538	14
		

Figura 2-5: Líneas de Vuelo LiDAR/Cámara- Glaciar Cipreses
Fuente: DMCL

Cobertura Láser Realizada	Código Vuelo	Total de Líneas Voladas LiDAR/Cámara
732 ha Monos de Agua	Boot 1.532	8
		

Figura 2-6: Líneas de Vuelo LiDAR/Cámara - Glaciar Monos de Agua
Fuente: DMCL

- c. Densidad de puntos por metro cuadrado, para cumplir con especificaciones técnicas.
- d. Tamaño de píxel para cumplir con especificaciones técnicas.
- e. Precisión para cumplir con estándar 1:1.000 según especificaciones técnicas.

Conforme a la experiencia del equipo de especialistas y el conocimiento de sus sistemas de medición, equipamiento y características de fábrica se definieron los siguientes parámetros:

Datos Técnicos	Valor
Ángulo de escaneo	60°
Frecuencia de escaneo	240 kHz
Scan Line Rate	105 Hz
Ancho de barrido	250-950 m
Altura de vuelo	1.000m AGL
Velocidad de vuelo	39 m/s promedio
Densidad de puntos obtenidos por metro cuadrado	3,5 promedio
Cantidad de puntos medidos por metro cuadrado en función de la altura de vuelo, velocidad de vuelo y frecuencia de barrido	2
Precisión relativa altimétrica de los datos puros	2 a 7 cm
Píxel de captura Cámara	12 cm

Tabla 2- 1: Parámetros Sensor LiDAR

Estos parámetros se establecieron con el fin de asegurar la producción de ortofotos con 25 cm de píxel. Considerando las características de distancia focal y tamaño de píxel de la cámara digital empleada, las imágenes crudas (sin ortorrectificar) se capturaron con un tamaño de píxel de 12 cm (**ver Tabla 2- 1: Parámetros Sensor LiDAR**), lo que permitió cumplir con los 25 cm al ser ortorrectificadas. En el caso del sensor LiDAR, la altura planificada y la frecuencia de escaneo permitieron obtener 5,1 puntos por metro cuadrado promedio en el producto final.

3.2.2. Verificación de las Condiciones Meteorológicas

Desde los días previos a la ejecución del vuelo, se monitoreó la posibilidad de una ventana de buen tiempo, logrando determinar que la mejor opción de vuelo correspondía a los días 21, 22, 24 y 30 de abril, 2 y 23 de mayo del presente año (**APENDICE I: REPORTE METEOROLÓGICO**).

El control meteorológico es realizado hora a hora ya que existe la posibilidad de que se abran ventanas locales de buen tiempo y permitan en un par de horas avanzar en el proyecto.

3.2.3. Operaciones de Vuelo y Control de Calidad de los Vuelos Realizados

Según lo anteriormente mencionado para realizar la toma de datos se ejecutó los días 21, 22, 24 y 30 de abril, 2 y 23 de mayo del presente año. Como sistema de autocontrol de los vuelos, cada vez que se aterriza para la carga de combustible del avión, se genera un archivo para revisar los datos tomados y comprobar que la planificación fue efectiva, esto es, que no hay zonas sin datos entre líneas y que se haya cubierto el cien por ciento del polígono (**Tabla 2- 2: Resumen de Vuelos Realizados**).

Glaciar	Código de Vuelo	Línea	Fecha de Vuelo
Bello	1.528	18 a 24 / 27 a 33	22-Abril
	1.529	25 a 26	24-Abril
Cerro El Plomo	1.530	21 a 24	30-Abril
Cipreses Norte	1.538	1 a 15	23-Mayo
Del Rincón	1.530	27 a 30	30-Abril
	1.531	30 y 33	30-Abril
Esmeralda	1.530	2 a 20	30-Abril
La Paloma	1.530	26 a 30	30-Abril
	1.531	31 a 32	30-Abril
Monos de Agua	1.532	1 a 9	02-Mayo
Pirámide	1.528	1 a 17	22-Abril
Tinguiririca 1	1.526	1 y 7 a 14	20-Abril
	1.527	2 a 6	21-Abril
Tinguiririca 3	1.526	15 a 28	20-Abril
Tinguiririca 4	1.526	29 a 35	20-Abril
Yeso	1.528	25 a 26	22-Abril
	1.529	18 a 24 y 34 a 43	24-Abril
Yeso 1	1.529	44 a 52	24-Abril
Yeso 2	1.529	47 a 52	24-Abril

Tabla 2- 2: Resumen de Vuelos Realizados
Fuente: DMCL

Este proceso da como resultado un archivo en formato ASCII, generado sólo con la navegación en tiempo real, con una resolución de 5 metros que es suficiente para tomar la decisión de repetir líneas de vuelo a modo de cubrir áreas que no hayan sido cubiertas (Figuras 2-7 a la 2-11, Cobertura LiDAR).

Para el mismo control pero con imágenes digitales, se confecciona un mosaico de baja resolución que se usa solamente para comprobar que toda la zona levantar cuenta con la cobertura necesaria para confeccionar posteriormente las ortofotos (Figura 2-12 a la Figura 2-16, Cobertura Cámara).

Para el presente proyecto tanto los datos láser como los datos de imágenes cubrieron 100% cada polígono volado por lo que no hubo que repetir líneas de vuelo. Los resultados de estos controles se muestran a continuación:

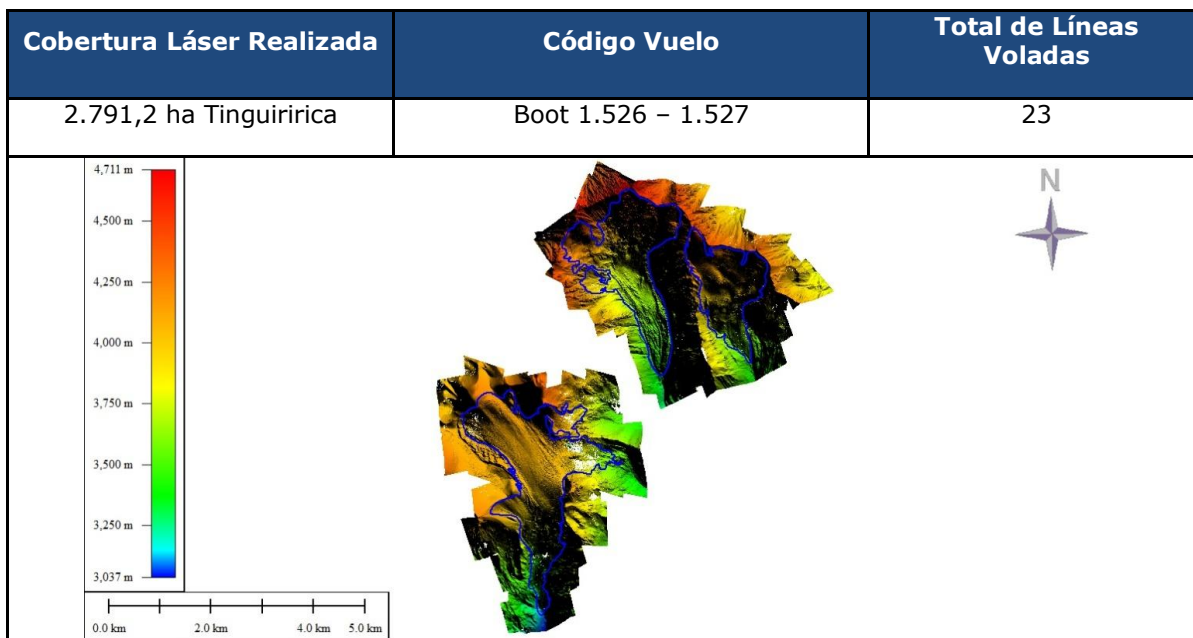


Figura 2-7: Cobertura Láser - Grupo Tinguiririca
Fuente: DMCL

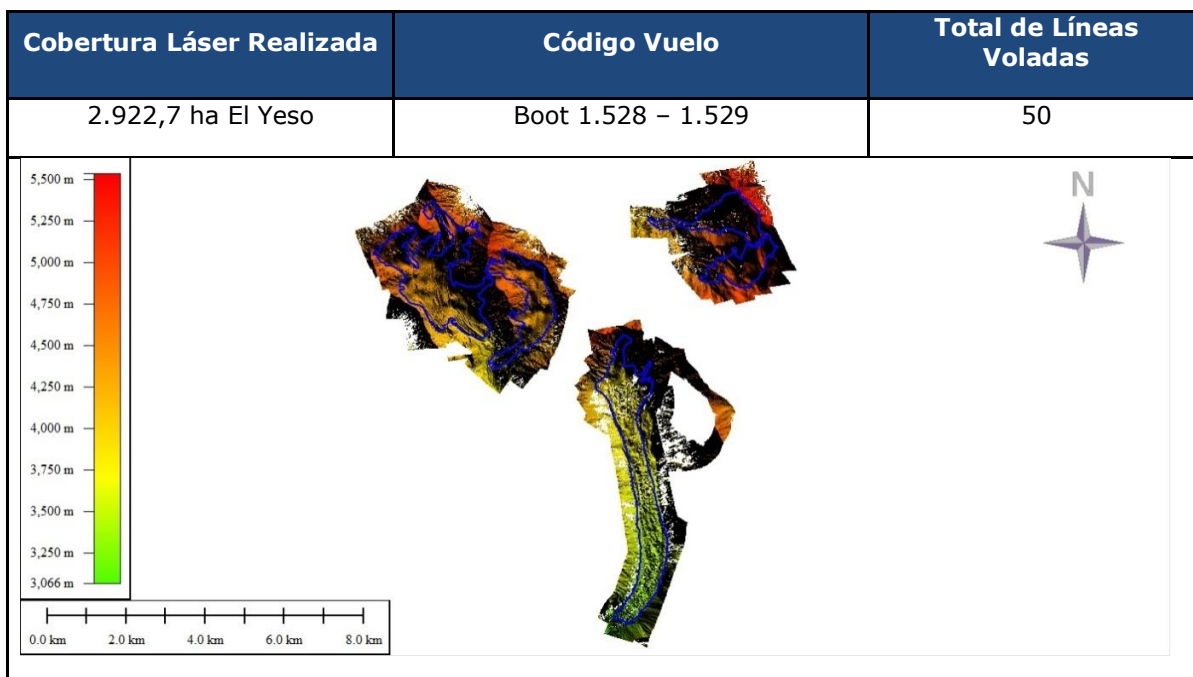


Figura 2-8: Cobertura Láser - Grupo el Yeso
Fuente: DMCL

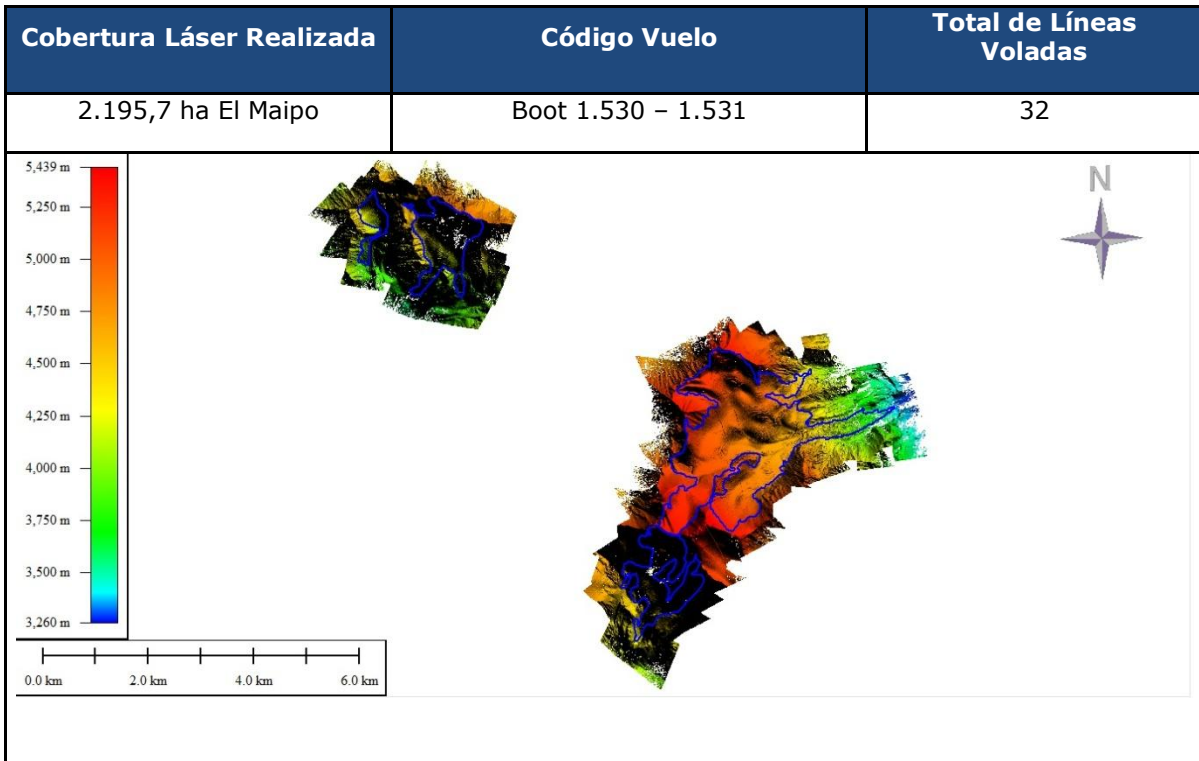


Figura 2-9: Cobertura Láser - Grupo Maipo
Fuente: DMCL

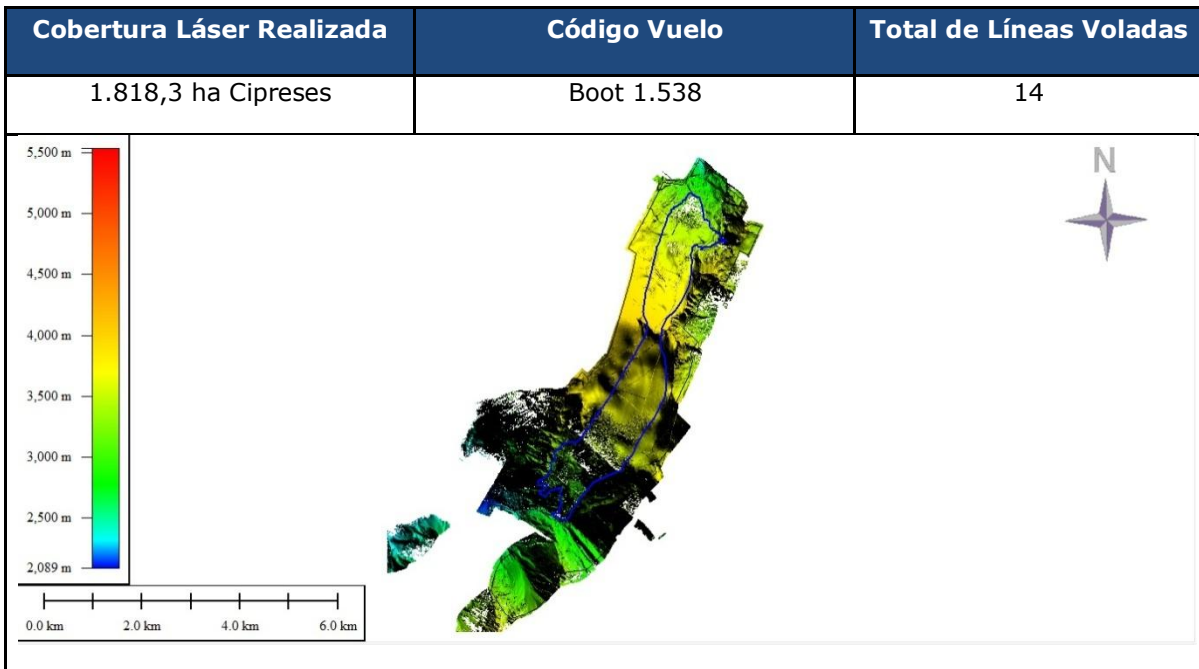


Figura 2-10: Cobertura Láser- Glaciar Cipreses
Fuente: DMCL

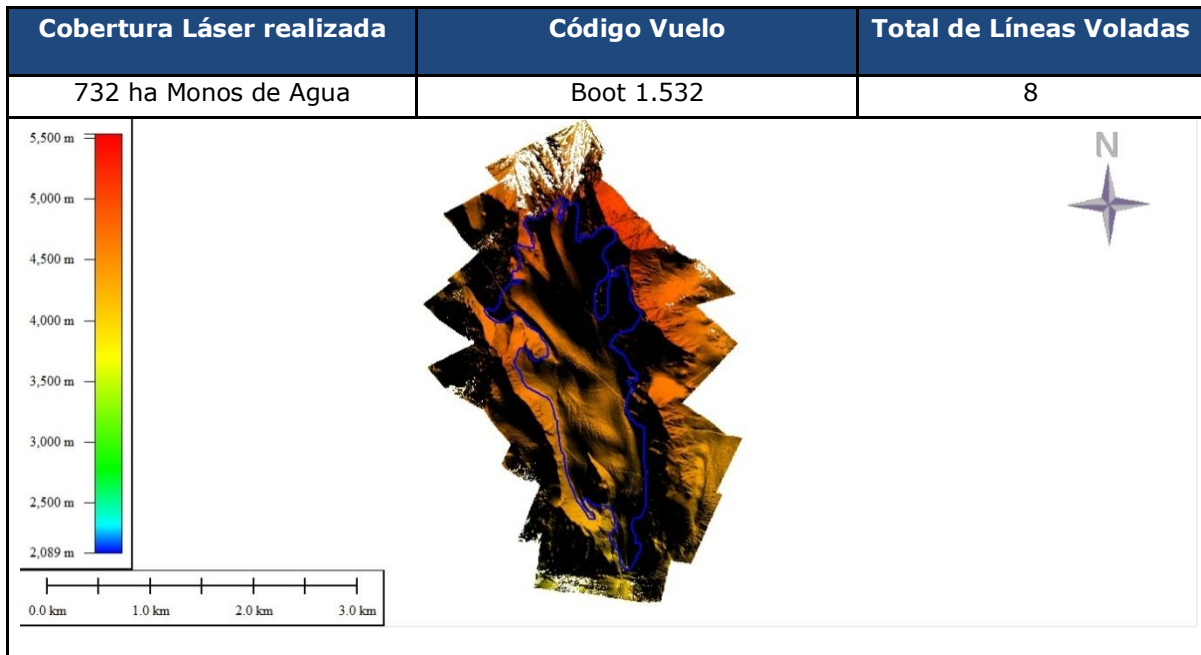


Figura 2-11: Cobertura Láser - Glaciar Monos de Agua
Fuente: DMCL

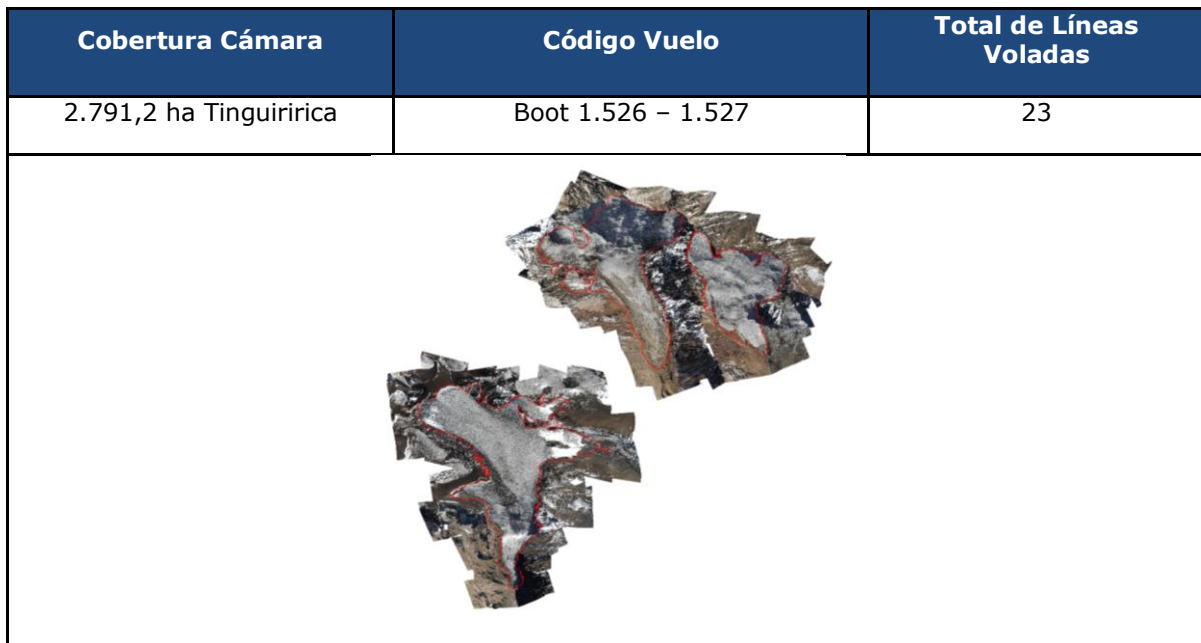


Figura 2-12: Cobertura Cámara - Grupo Tinguiririca
Fuente: DMCL

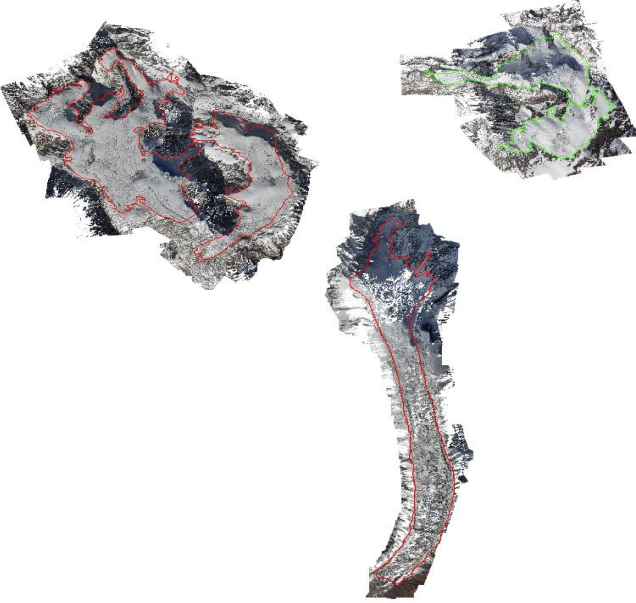
Cobertura Cámara	Código Vuelo	Total de Líneas Voladas Cámara
2.922,7 ha El Yeso	Boot 1.528 - 1.529	50
		

Figura 2-13: Cobertura Cámara - Grupo El Yeso
Fuente: DMCL

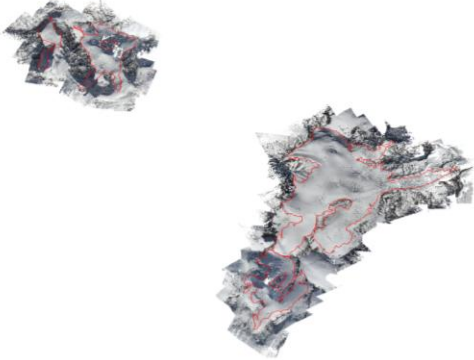
Cobertura Cámara	Código Vuelo	Total de Líneas Voladas Cámara
2.195,7 ha El Maipo	Boot 1.530-1.531	32
		

Figura 2-14: Cobertura Cámara - Grupo Maipo
Fuente: DMCL


Cobertura Cámara	Código Vuelo	Total de Líneas Voladas Cámara
1.818,3 ha Cipreses	Boot 1.538	14
		

Figura 2-15: Cobertura Cámara- Glaciar Cipreses
Fuente: DMCL

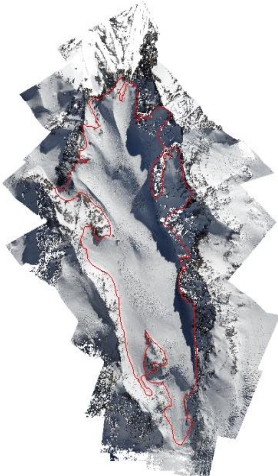
Cobertura Cámara	Código Vuelo	Total de Líneas Voladas Cámara
732 ha Monos de Agua	Boot 1.532	8
		

Figura 2-16: Cobertura Cámara - Glaciar Monos de Agua
Fuente: DMCL

Al ser la ejecución de vuelo un proceso controlado, también se verificó la densidad de los puntos levantados, de acuerdo al siguiente procedimiento:

Para verificar si la densidad de puntos captados por el sensor láser cumplió con los 2 puntos/m² promedio, exigidos en las bases de licitación, se realizaron 9 muestreos en la zona correspondiente a los glaciares Tinguiririca 1, Tinguiririca 3 y Tinguiririca 4 y 8 muestreos en los glaciares Bello, Yeso 1, Yeso 2. Mediante las áreas seleccionadas representativamente para todas las posibles superficies de cada glaciar, de aproximadamente 1 hectárea, se obtuvieron como resultado 5,1 puntos/m² (área observada 90.345 m² con 460.759 puntos en total) y 3,31 puntos/m² (área observada 80.235 m² con 265.577 puntos total), respectivamente.

Estas se definieron arbitrariamente en zonas sin traslape entre líneas, ya que en esas zonas la densidad de puntos se duplica o triplica. La cantidad de información capturada hizo imposible estimar los puntos por el polígono de forma global, por este motivo se debió generar estas muestras. Posteriormente se procedió a calcular la densidad de puntos por m² a partir de la cantidad total de puntos por hectárea, la distribución de estos puntos se presenta en las siguientes figuras.

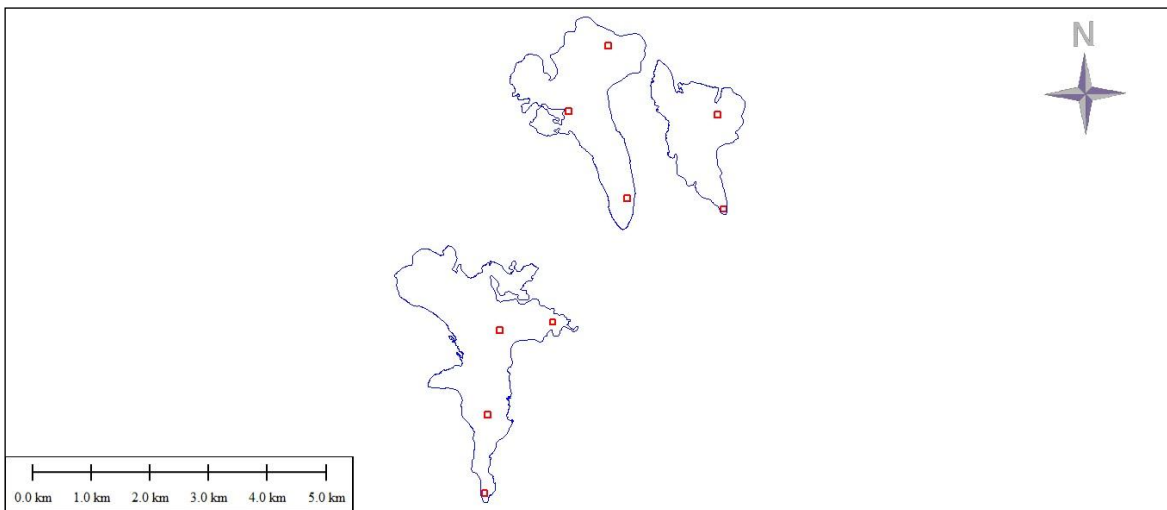
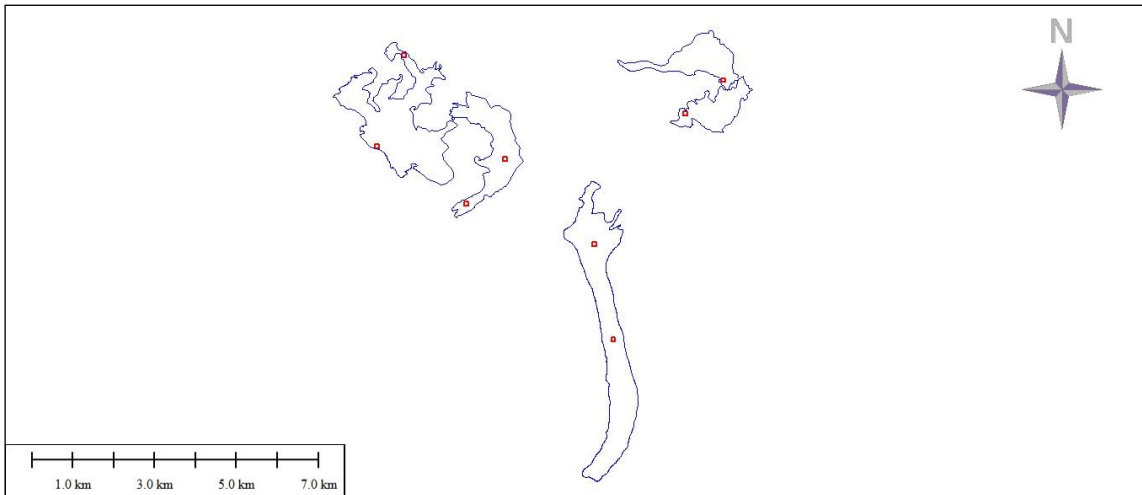


Figura 2-17: Distribución de Polígonos Densidad de Puntos – Grupo Tinguiririca
Fuente: DMCL



**Figura 2-18: Distribución de Polígonos Densidad de Puntos –
Glaciares Bello, Yeso 1, Yeso 2
Fuente: DMCL**

Cabe señalar, que la nube de puntos generada por los datos LiDAR, no corresponde a una grilla homogénea de puntos debido, principalmente, a los movimientos de la plataforma de vuelo (avión), producto de cambios de velocidad del viento, turbulencias, maniobras del piloto, entre otros.

Como anteriormente se señaló, existen zonas donde la densidad de puntos se puede duplicar producto del traslape de líneas de vuelo.

4. PRODUCTOS

4.1. Generación de Nube de Puntos

Posterior a la visualización y control de calidad del recubrimiento láser, se procedió a generar los archivos de nubes de puntos con información x , y , z , de todos los retornos registrados y georreferenciados al sistema de referencia del proyecto. Ver **Figura 3-1: Nube de Puntos - Sector El Yeso 1.**

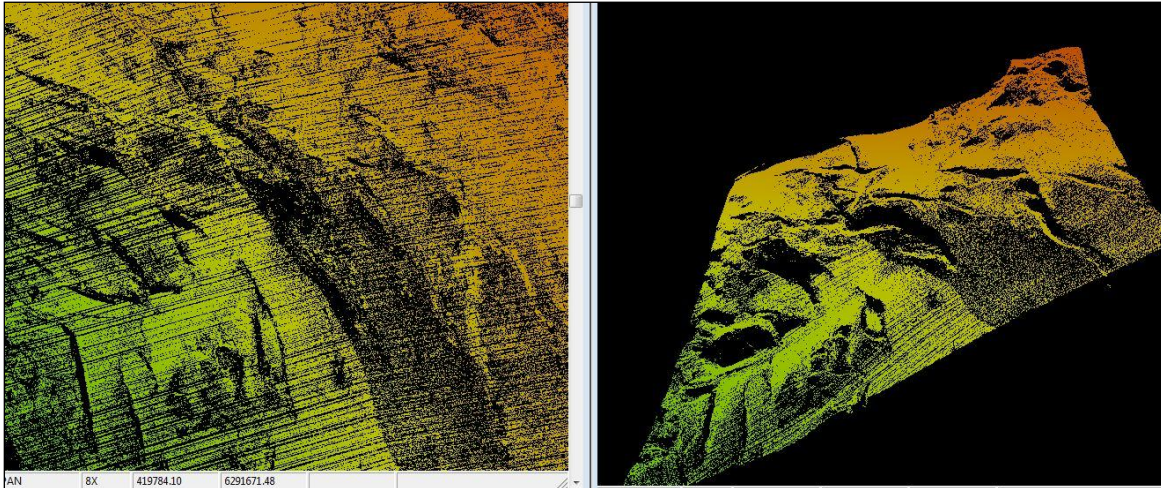


Figura 3-1: Nube de Puntos - Sector El Yeso 1
Fuente: DMCL

4.2. Modelo Digital de Terreno

El Modelo Digital de Terreno, en adelante DTM del inglés Digital Terrain Model, corresponde a la estructura numérica de datos generada a partir del último eco o retorno de cada pulso emitido por el láser. Este modelo representa la distribución espacial de las altitudes del terreno o suelo desnudo. Para obtener este modelo, se separaron todos los retornos que no correspondían al terreno, tales como obras de arte, torres de alta tensión, construcciones, etc. Y se clasificaron como objetos. Para el presente proyecto tanto grietas como penitentes fueron considerados como parte del terreno.

Para el procesamiento de los modelos digitales de terreno fue necesario contar con la solución de navegación de los vuelos y los datos capturados por el sensor LiDAR. Ver **Figura 3-2: Diagrama de Flujo de Procesos LiDAR.**

Estos datos fueron integrados, mediante el software TopPit Versión 2.1, el cual entregó como resultado la nube de puntos, la cual corresponde a todos los puntos georreferenciados captados por el sensor LiDAR.

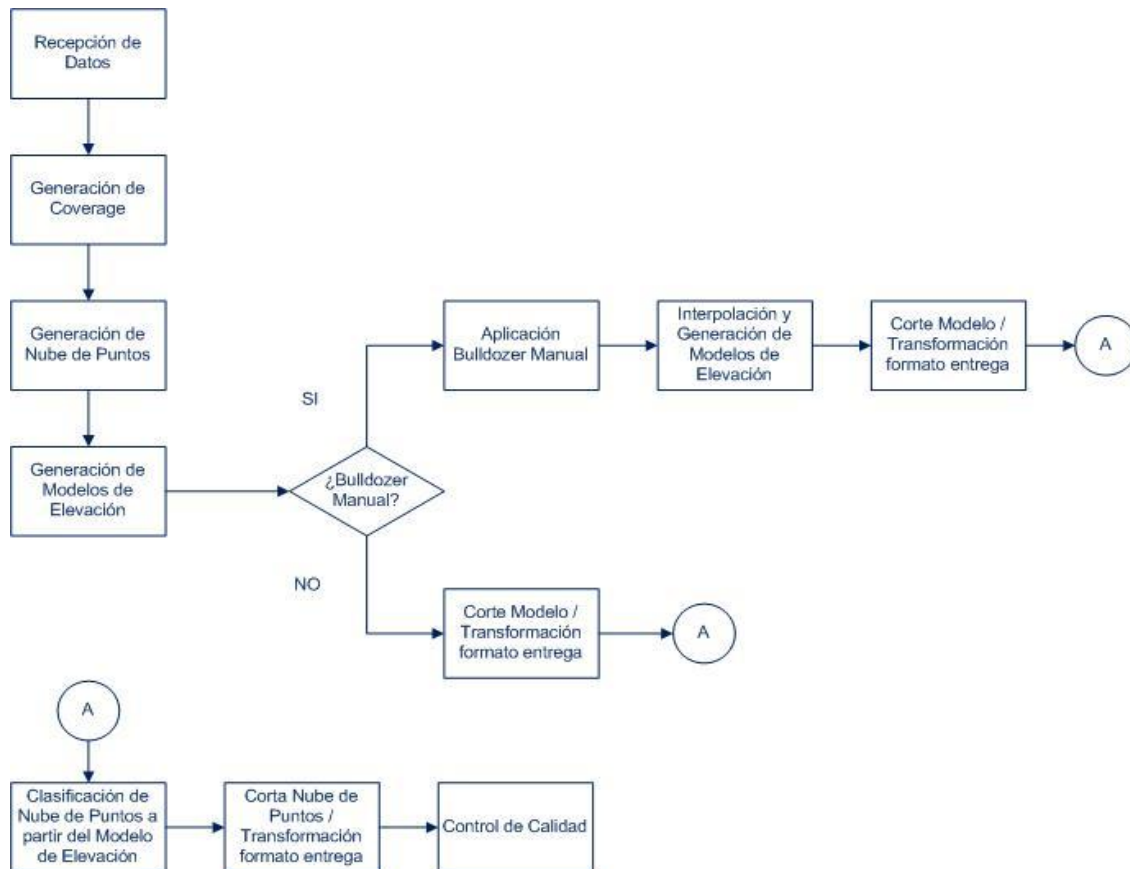


Figura 3-2: Diagrama de Flujo de Procesos LiDAR
Fuente: DMCL

Para llegar al resultado final, fue necesario realizar un proceso llamado clasificación de la nube de puntos, con el fin de depurar los puntos que no se necesitan e interpolar los sectores que quedan sin información, como por ejemplo zonas con agua donde el sensor no captura datos, puesto que el agua absorbe la luz y obviamente no hay retornos. En el caso de los puntos que se eliminan, se encuentran aquellos generados por polvo en suspensión, que el sistema captura, pero que no forman parte del terreno, entre otros casos similares. Ver **Figura 3-3: Modelo Digital de Terreno – Glaciar Tinguiririca 3.**

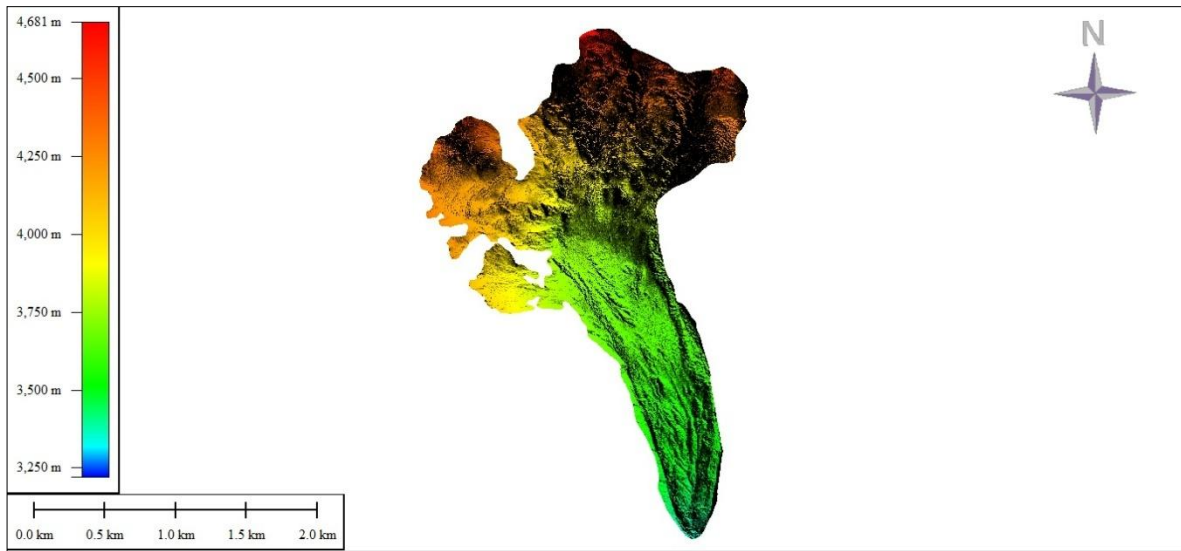


Figura 3-3: Modelo Digital de Terreno – Glaciar Tinguiririca 3
Fuente: DMCL

4.3. Ajuste Realizado a los Modelos Digitales de Terreno

Mediante los reportes meteorológicos se pudo pronosticar precipitaciones en Santiago y Rancagua, lo que se tradujo en nevazones en esas localidades entre los días 24 al 30 de Abril, afectando los glaciares del Grupo Maipo, Glaciar Monos de Agua y Glaciar Cipreses, los cuales fueron cubiertos por nieve como se muestra en el ejemplo de la **Figura 3-4: Imagen RGB – Glaciar El Plomo**.

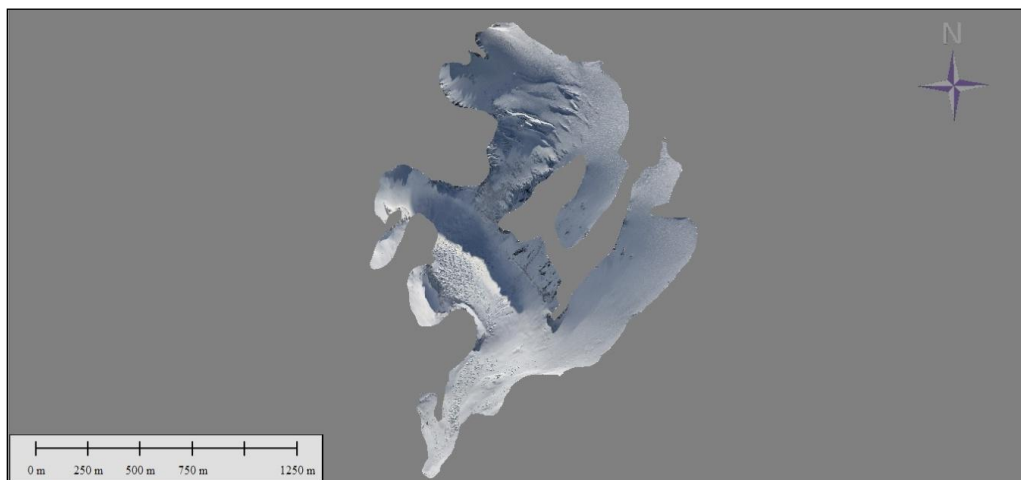


Figura 3-4: Imagen RGB – Glaciar El Plomo
Fuente: DMCL

Para dimensionar y corregir esta situación DMCL contó con información de vuelos LiDAR anteriores, con fecha 03 de Marzo de 2012. Datos que cubren en su totalidad los glaciares de La Paloma y Del Rincón. Con esta información fue posible determinar la variación causada por la nieve, mediante la sustracción de ambos modelos obteniendo con ello la diferencia en cota de estos glaciares **Figura 3-5: Imagen Diferencias de Cota Datos Antiguos / Datos Nuevos – Glaciar Tinguiririca 3**

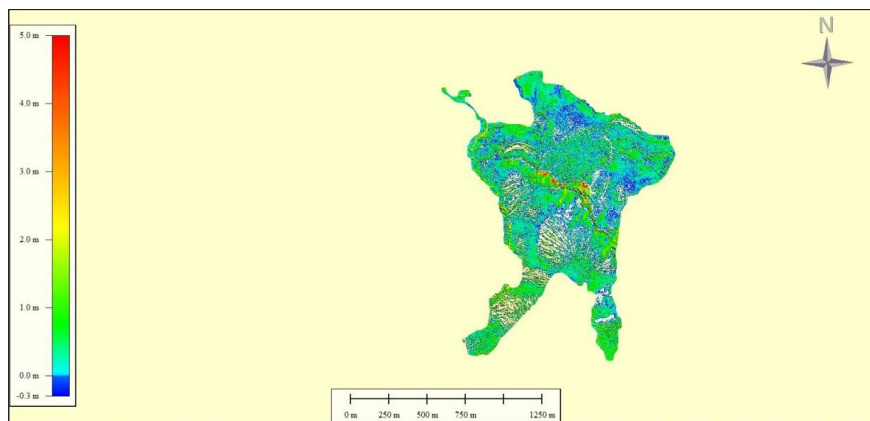


Figura 3-5: Imagen Diferencias de Cota Datos Antiguos / Datos Nuevos – Glaciar Tinguiririca 3
Fuente: DMCL

Una vez obtenido el modelo de diferencias se procedió a aplicarlo a los modelos de los glaciares La Paloma y del Rincón.

En relación a los sectores donde no existen datos precedentes a las nevazones (Cipreses Norte, Monos de Agua, Esmeralda, Cerro el Plomo) se acordó, en conjunto con la DGA, realizar mediciones para determinar la profundidad de la nieve. Este procedimiento se efectuó para el glaciar Monos de Agua, cuyos resultados se presentan a continuación en la siguiente tabla:

N° de Puntos	Medición (cm)
1	51
2	50
3	61
4	61
5	38
6	34
7	56
8	27
9	67
10	50
11	78
12	56
Suma	629
Promedio	52,42
Max	78
Min	27

Tabla 3- 1: Detalle de Mediciones de Altura de Nieve – Glaciar Monos de Agua
Fuente: MOP – DGA

El método para realizar el ajuste de cotas por presencia de nieve, fue extrapolado al resto de los glaciares, de los cuales no se contaba con datos de vuelos anteriores, este procedimiento se describe a continuación :

1. Se generó un modelo de pendientes de cada glaciar a ajustar a partir del modelo original.
2. Se reclasificó el modelo de pendientes en nueve rangos desde los 0° a los 90°.
3. Se estableció una relación de acumulación de nieve de acuerdo a las pendientes, suponiendo que los lugares con menor pendiente acumulan más nieve que los sectores de gran pendiente. Esto es, a partir de la profundidad de la nieve que se presenta en la tabla previamente expuesta, se estableció la máxima acumulación de nieve en 70 cm de profundidad.
4. Se generó un modelo de acumulación de nieve, a partir de la reclasificación descrita anteriormente.
5. Se restó el modelo de acumulación de nieve al modelo original.
6. Se generó un nuevo modelo para cada glaciar, con la corrección de acumulación de la nieve.

Es importante acotar que los productos de los glaciares mencionados, se fueron entregados con su cota real medida sobre la nieve y con la reducción de la nieve aplicando la metodología anteriormente descrita.

4.4. Imagen de Intensidad

Corresponden a imágenes captadas por el sensor LiDAR, en el espectro infrarrojo cercano entre 1.550 y 1.565 nanómetros, a partir de ello se generaran los valores de puntos de las intensidades, es decir fuerza de retorno del pulso láser captados por el sensor. Ver **Figura 3-6: Modelo de Intensidad – Glaciar Tinguiririca 3.**

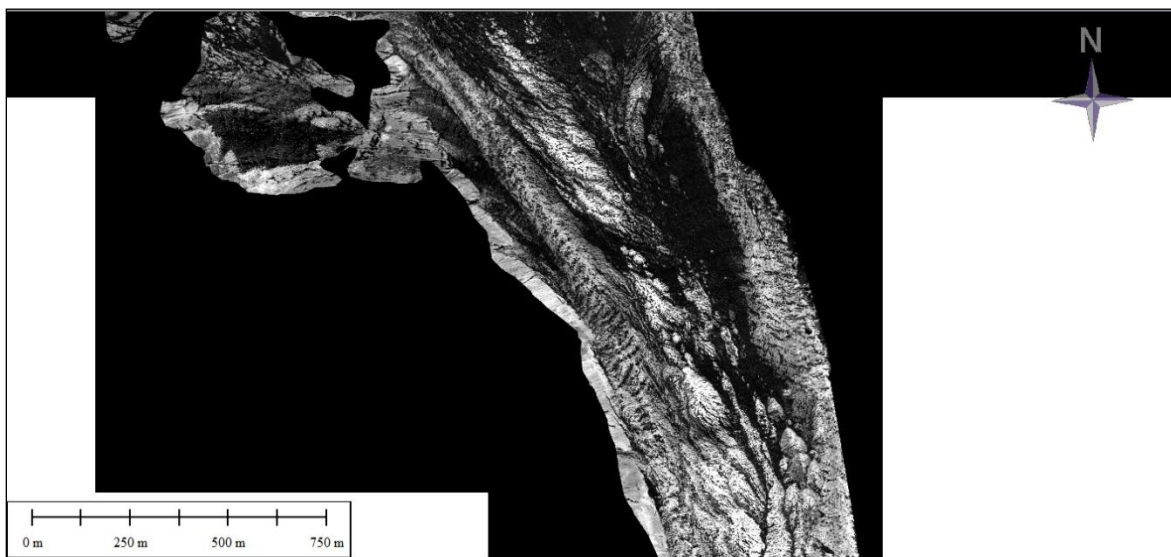


Figura 3-6: Modelo de Intensidad – Glaciar Tinguiririca 3
Fuente: DMCL

4.5. Imágenes RGB

Imágenes correspondientes a ortofotos del tipo verdadera en espectro visible (rojo-verde-azul) entre los 400 y 900 nanómetros con proyección ortogonal.

Luego de revisar la calidad de la información proveniente de la toma de datos en campo se procedió al revelado de las imágenes, el cual permitió tomar los datos crudos (sin procesar) capturados por el sistema y llevarlos al formato requerido (TIF) para la ortorrectificación.

Este proceso se realizó mediante la combinación de un Modelo Digital de Superficie (DSM) y el archivo de navegación, el cual corresponde a la corrección de los movimientos realizados por el avión, siendo éstos necesarios para conocer el ángulo de captura de los datos. Finalmente se procedió a la generación del mosaico general del proyecto y las láminas correspondientes. Ver **Figura 3-7: Imagen RGB – Glaciar Tinguiririca 3**.

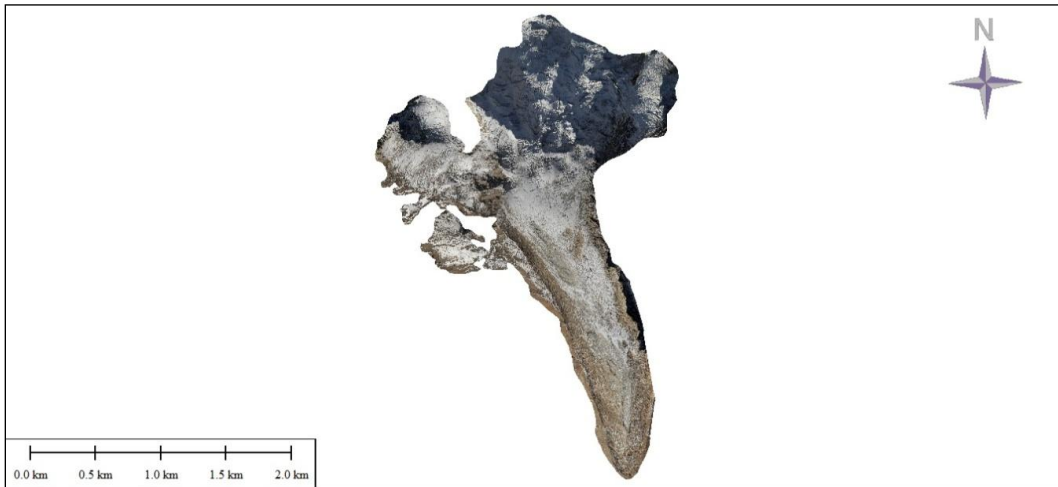


Figura 3-7: Imagen RGB – Glaciar Tinguiririca 3
Fuente: DMCL

4.6. Curvas de Nivel

Para el presente proyecto se solicitó generar curvas de nivel con una equidistancia de 1m. Esto se llevó a cabo utilizando el DTM de resolución 1m de píxel. Dicha resolución es suficiente para la generación de curvas de nivel cada 1m.

5. CONTROL DE CALIDAD

5.1. Productos Láser

Durante la realización del trabajo de campo se tomaron mediciones de 1 perfil realizado con GPS terrestre (Ver **APENDICE III: RECEPTORES SATELITALES GNSS (L1/L2), TOPCON, HiPer + GGD, 32 MB**), el cual se encuentra cercano al Glaciar Monos de Agua. Estas coordenadas se sobrepuso en el DTM para luego extraer la altura del modelo en el mismo punto que fue medido en terreno, y de esta manera comparar ambas medidas. La ubicacion de los puntos en relacion al poligono se aprecia en la siguiente imagen **Figura 4-1: Ubicación puntos de control proyecto Glaciar Monos de Agua.**

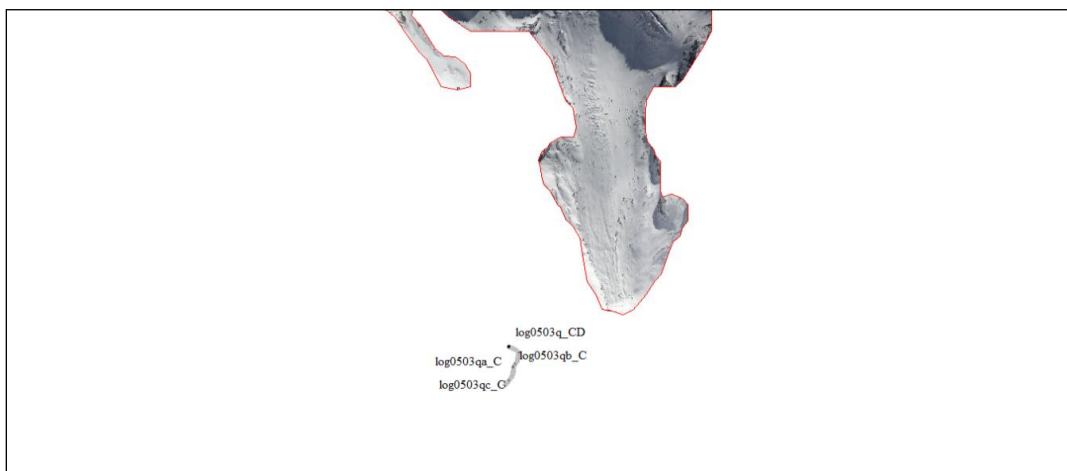


Figura 4-1: Ubicación puntos de control proyecto Glaciar Monos de Agua
Fuente: DMCL

El control de calidad de los DTM se realizó mediante un control altimétrico del modelo, es decir se contrastó un perfil realizado en el glaciar Monos de Agua con puntos extraídos desde el DTM comparándose las alturas ortométricas para ambos casos, de esta manera, fue posible apreciar si la diferencia entre ambas alturas superó la precisión requerida.

En la

Tabla 4-1: Resumen Resultados Obtenidos Perfil Glaciar Monos de Agua se presenta el promedio de las diferencias obtenidas en la zona del proyecto:

ESTADÍSTICAS	VALORES (En base a 2.887 puntos medidos)
Promedio	-0,03 m
Desviación Estándar	0,18 m
Promedio Absoluto	0,14 m
Desviación Estándar Absoluta	0,12 m
Mínimo	-0,9 m
Máximo	0,7 m
Error medio Cuadrático (RMQ)	0,0035 m

Tabla 4-1: Resumen Resultados Obtenidos Perfil Glaciar Monos de Agua
Fuente: DMCL

En el resumen, el resultado obtenido del promedio general se expresó en 3 cm de diferencia entre los puntos medidos en el perfil y la altura del DTM, mientras que la desviación estándar correspondió a 18 cm. El rango de valor mínimo corresponde a la diferencia de altura más amplia existente entre DTM y el perfil, es decir, el DTM se encuentra 90 cm más alto que el perfil. Por otra parte, el valor máximo (representado en 70 cm) corresponde al punto del perfil que esta sobre el DTM, es decir, la altura del DTM en ese punto fue menor que la medida del terreno. De esta manera, es posible confirmar que las medidas en altura se encuentran dentro de la precisión requerida (25 cm en DTM) en cuanto al promedio, desviación estándar y error medio cuadrático, este último debido a su bajo valor confirmó la precisión de los resultados.

5.1.1. Control de Calidad Modelo Digital de Terreno Con Ajuste

Para comprobar que la nieve fue matemáticamente sustraída del DTM en los glaciares ajustados, se realizó una resta de modelos, mediante el Software Global Mapper, en la cual se sustrae al DTM con nieve el DTM sin nieve correspondiente al mismo glaciar.

Como resultado de este proceso se observaron diferencias de altura entre ambos modelos, así como zonas en las cuales no se apreciaron rangos de variación (valor 0), correspondiendo estas a las zonas de mayor pendientes y que no fueron consideradas para el proceso de eliminación de la nieve.

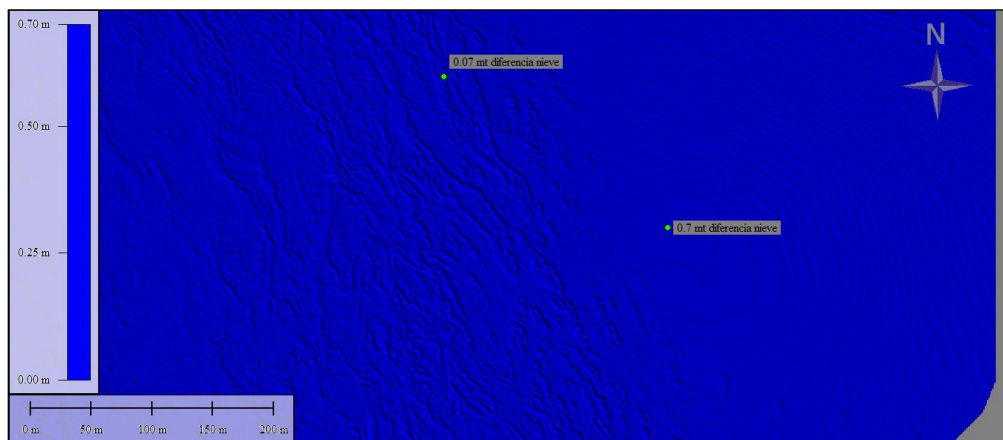
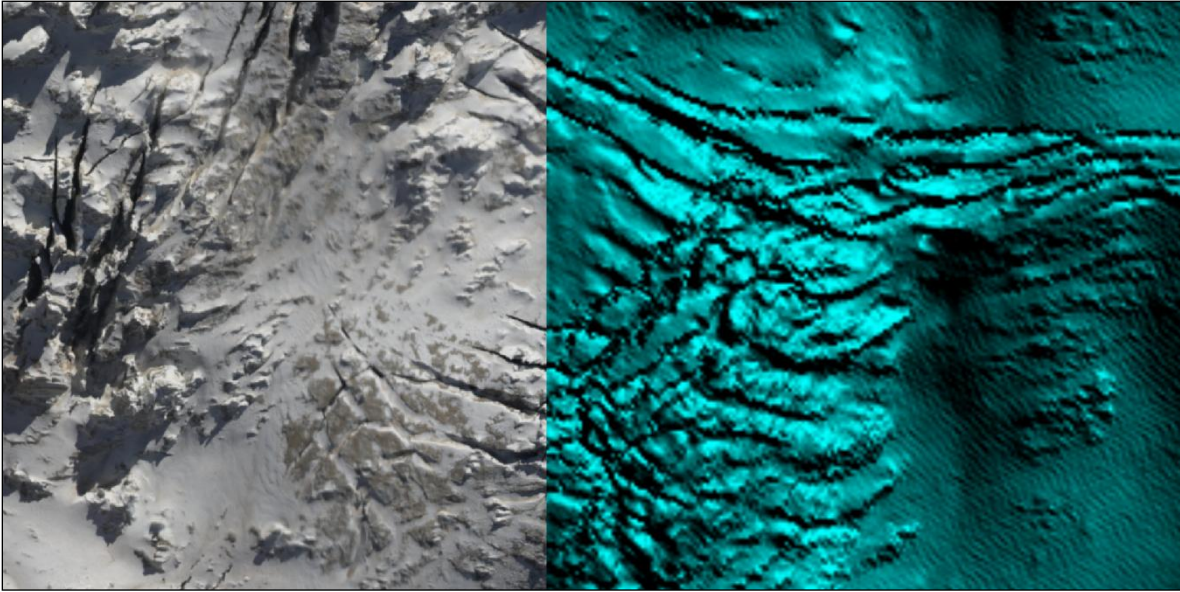


Figura 4-2: Ubicación puntos de control proyecto Glaciar Cipreses Norte
Fuente: DMCL

5.2. Imágenes RGB

Debido a la imposibilidad de contar con puntos fotoidentificables, por la no existencia de estructuras o elementos antrópicos como caminos o construcciones, el control de calidad de imágenes se efectuó mediante la superposición del DTM y las imágenes RGB (Red, Green, Blue), detectando elementos naturales reconocibles en ambos formatos. Para realizar este control, se superpuso los DTM con las imágenes, tal como se aprecia en la siguiente muestra **Figura 4-3: Superposición Imágenes RGB (Izquierda) – DTM (Derecha)**.



**Figura 4-3: Superposición Imágenes RGB (Izquierda) – DTM (Derecha)
Fuente: DMCL**

6. CONCLUSIÓN

Para la ejecución del proyecto se han considerado todos los posibles factores, de forma tal, asegurar la toma de los datos. Esto permite realizar los en quince (15) intentos para los glaciares Bello, Yeso, Yeso 1, Yeso 2, Pirámide, Cerro El Plomo, Del Rincón, Esmeralda, La Paloma, Tinguiririca 1, Tinguiririca 3, Tinguiririca 4, Monos de Agua y Mesón Alto. Y en veintidós (22) intentos para el glaciar Cipreses.

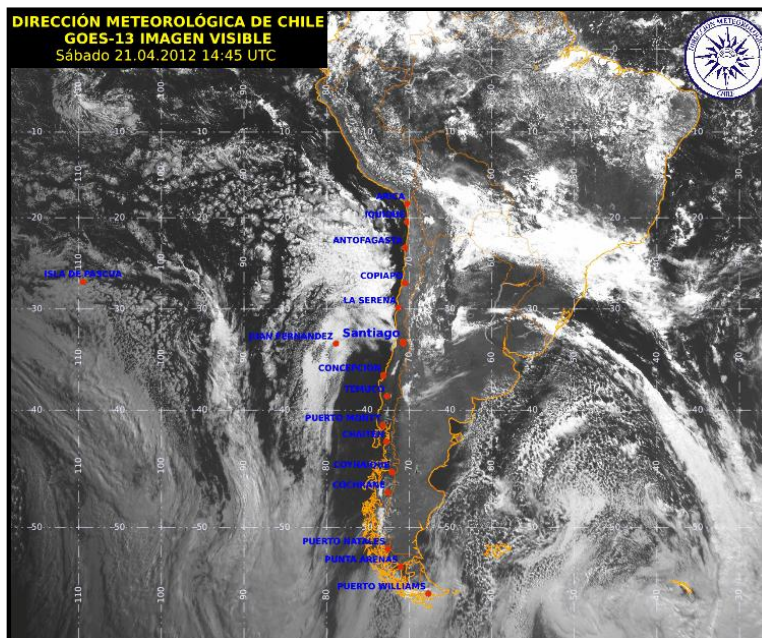
El motivo de la cantidad de intentos se produce por dificultades naturales como turbulencias, condiciones de nubosidad, velocidad del viento excesiva, mala meteorología en general, etc.

De acuerdo a lo planteado en el presente informe, los vuelos planificados para el proyecto se ejecutan en forma satisfactoria, de acuerdo a las exigencias de las bases técnicas, exceptuando el Glaciar Mesón Alto, en el cual, habiendo realizando varios intentos y agotando todas las instancias, se ha dado la circunstancia, por eventos denominados técnicamente de Fuerza Mayor (principalmente meteorológicos), de no concretar el vuelo LiDAR.

La metodología propuesta y su ejecución es la apropiada dando cumplimiento a los requerimientos del proyecto. En el **APENDICE II: DISTRIBUCIÓN Y ENTREGA DE PRODUCTOS** se presenta la distribución y entrega de productos.

APENDICE I: REPORTE METEOROLÓGICO

- Fecha: 21 de Abril 2012
- Localidad: Rancagua, Glaciar Tinguiririca



- Fecha: 22 de Abril 2012
- Localidad: Santiago, Glaciar El Yeso

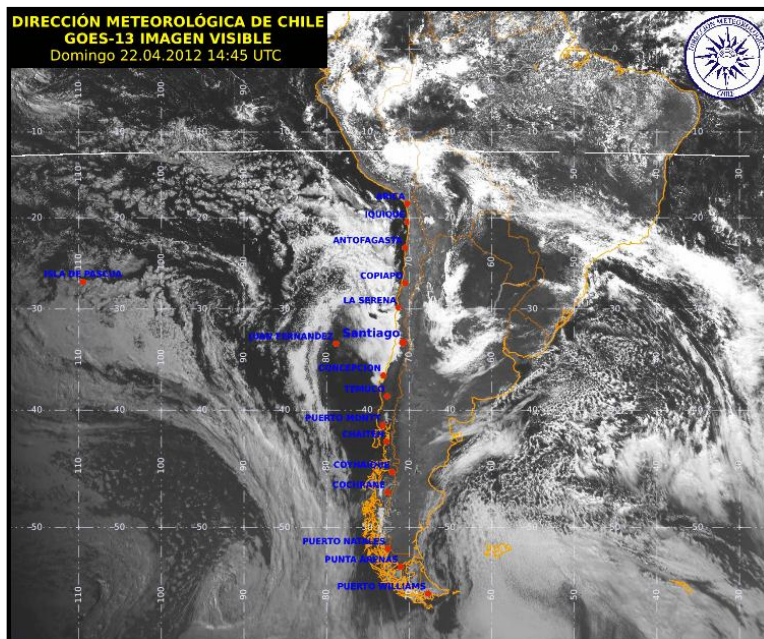
en Santiago de Chile > 22/04/12

El tiempo actual en Santiago de Chile

Por la mañana el sol brilla con 10 °C. Por la tarde el sol brilla con 21 °C. De noche el cielo está estrellado con 14 °C.
Un poco de viento viniendo del oeste.

10 °C / 21 °C

Mañana	Tarde	Noche
		
<i>soleado</i>	<i>soleado</i>	<i>despejado</i>
10 °C	21 °C	14 °C



- Fecha: 24 de Abril 2012
- Localidad: Santiago, Glaciar El Yeso

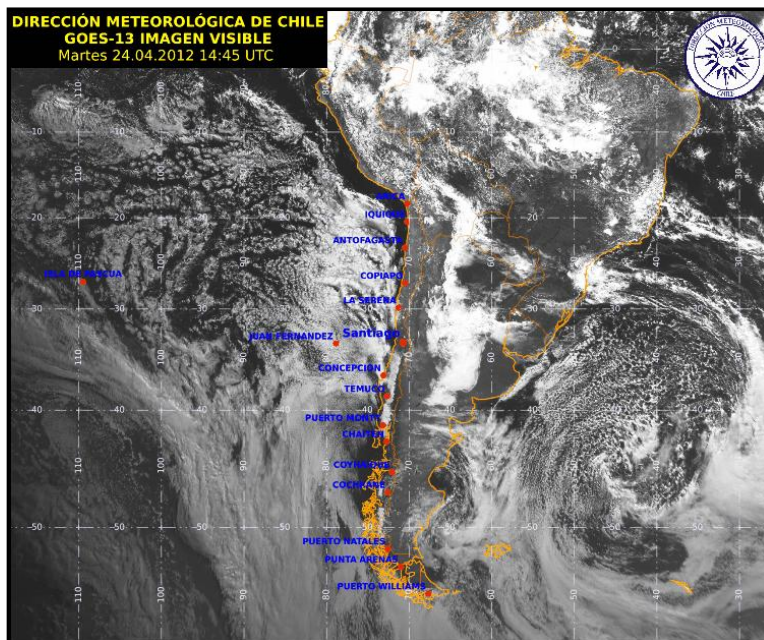
en Santiago de Chile > 24/04/12

El tiempo actual en Santiago de Chile

En la mañana el cielo está ligeramente nublado con 9 °C. En la tarde el sol brilla con 17 °C. En la noche el cielo está estrellado con 12 °C. Una brisa suave viniendo del oeste.

8 °C / 17 °C

Mañana	Tarde	Noche
		
<i>ligeramente nublado</i>	<i>soleado</i>	<i>despejado</i>
9 °C	17 °C	12 °C



- Fecha: 30 de Abril 2012
- Localidad: Santiago, Glaciar Maipo

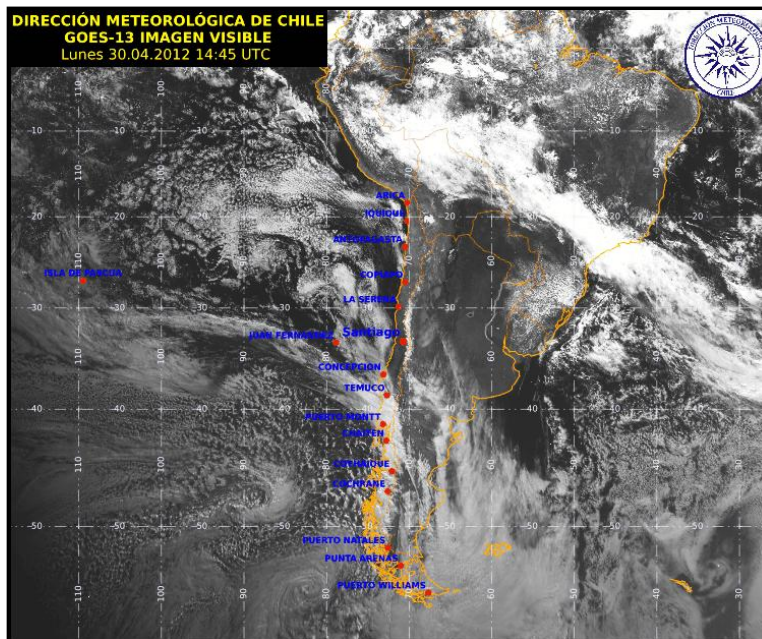
en Santiago de Chile > 30/04/12

El tiempo actual en Santiago de Chile

En la mañana el cielo está estrellado con 7 °C. Por la tarde el sol brilla con 18 °C. De noche el cielo está parcialmente nublado con 12 °C. Un poco de viento viniendo del oeste.

5 °C / 18 °C

Mañana	Tarde	Noche
		
<i>despejado</i>	<i>soleado</i>	<i>parcialmente nublado</i>
7 °C	18 °C	12 °C



- Fecha: 02 de Mayo 2012
- Localidad: Santiago, Monos de Agua

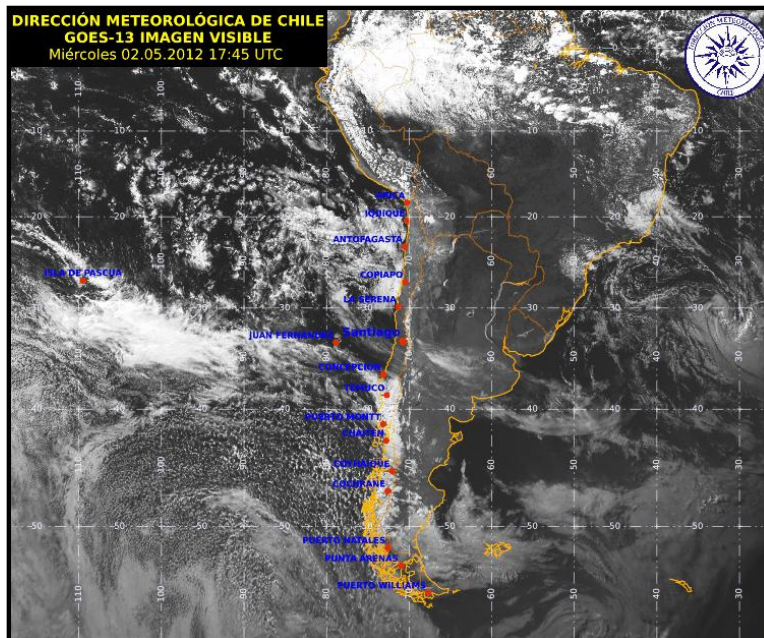
en Santiago de Chile > 02/05/12

El tiempo actual en Santiago de Chile

En la mañana el cielo está parcialmente nublado con 10 °C. En la tarde el cielo está parcialmente nublado con 19 °C. En la noche el cielo está parcialmente nublado con 13 °C.
Un poco de viento viniendo del noroeste.

10 °C / 19 °C

Mañana	Tarde	Noche
		
<i>parcialmente nublado</i>	<i>parcialmente nublado</i>	<i>parcialmente nublado</i>
10 °C	19 °C	13 °C



- Fecha: 23 de Mayo 2012
- Localidad: Rancagua, Glaciar Cipreses

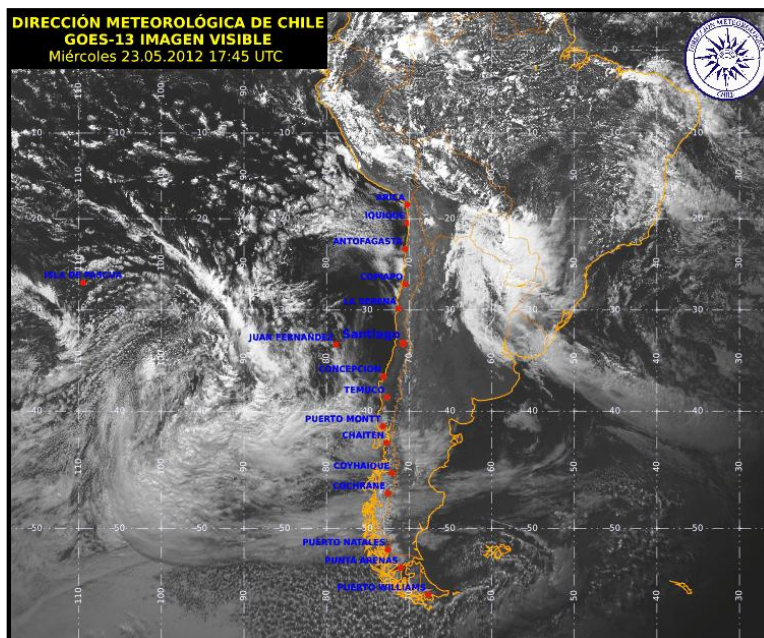
en Rancagua > 23/05/12

El tiempo actual en Rancagua

Por la mañana el cielo está parcialmente nublado con 8 °C. Por la tarde el cielo está parcialmente nublado con 21 °C. De noche el cielo está parcialmente nublado con 13 °C.
Un poco de viento viniendo del oeste.

8 °C / 21 °C

Mañana	Tarde	Noche
		
<i>parcialmente nublado</i>	<i>parcialmente nublado</i>	<i>parcialmente nublado</i>
8 °C	21 °C	13 °C



APENDICE II: DISTRIBUCIÓN Y ENTREGA DE PRODUCTOS

La distribución de productos fue realizada de la siguiente manera:

Productos Altimetría

Glaciar	Producto	Formato
BELLO	Curvas de Nivel intervalo 1m Sistema UTM 19 SUR Sin ajuste	DWG/SHP
CIPRESES NORTE	Curvas de Nivel intervalo 1m Sistema UTM 19 SUR Con Ajuste/Sin ajuste	DWG/SHP
ESMERALDA	Curvas de Nivel intervalo 1m Sistema UTM 19 SUR Con Ajuste/Sin ajuste	DWG/SHP
MONOS DE AGUA	Curvas de Nivel intervalo 1m Sistema UTM 19 SUR Con Ajuste/Sin ajuste	DWG/SHP
TINGUIRIRICA 1	Curvas de Nivel intervalo 1m Sistema UTM 19 SUR Sin ajuste	DWG/SHP
TINGUIRIRICA 3	Curvas de Nivel intervalo 1m Sistema UTM 19 SUR Sin ajuste	DWG/SHP
TINGUIRIRICA 4	Curvas de Nivel intervalo 1m Sistema UTM 19 SUR Sin ajuste	DWG/SHP
YESO 1	Curvas de Nivel intervalo 1m Sistema UTM 19 SUR Sin ajuste	DWG/SHP
YESO	Curvas de Nivel intervalo 1m Sistema UTM 19 SUR Sin ajuste	DWG/SHP
YESO 2	Curvas de Nivel intervalo 1m Sistema UTM 19 SUR Sin ajuste	DWG/SHP
CERRO EL PLOMO	Curvas de Nivel intervalo 1m Sistema UTM 19 SUR Con Ajuste/Sin ajuste	DWG/SHP
DEL RINCON	Curvas de Nivel intervalo 1m Sistema UTM 19 SUR Con Ajuste/Sin ajuste	DWG/SHP
LA PALOMA	Curvas de Nivel intervalo 1m Sistema UTM 19 SUR Con Ajuste/Sin ajuste	DWG/SHP
PIRAMIDE	Curvas de Nivel intervalo 1m Sistema UTM 19 SUR Sin ajuste	DWG/SHP

Productos LiDAR

Glaciar	Producto	Formato
BELLO	Modelo Digital de Terreno Sin ajuste	ASCII GRID/ GEOTIF
	Imagen de Intensidad 1 m	GEOTIF
	Nube de Puntos	XYZ/SHP
CIPRESES NORTE	Modelo Digital de Terreno Con Ajuste/Sin ajuste	ASCII GRID/ GEOTIF
	Imagen de Intensidad 1 m	GEOTIF
	Nube de Puntos	XYZ/SHP
ESMERALDA	Modelo Digital de Terreno Con Ajuste/Sin ajuste	ASCII GRID/ GEOTIF
	Imagen de Intensidad 1 m	GEOTIF
	Nube de Puntos	XYZ/SHP
MONOS DE AGUA	Modelo Digital de Terreno Con Ajuste/Sin ajuste	ASCII GRID/ GEOTIF
	Imagen de Intensidad 1 m	GEOTIF
	Nube de Puntos	XYZ/SHP
TINGUIRIRICA 1	Modelo Digital de Terreno Sin ajuste	ASCII GRID/ GEOTIF
	Imagen de Intensidad 1 m	GEOTIF
	Nube de Puntos	XYZ/SHP
TINGUIRIRICA 3	Modelo Digital de Terreno Sin ajuste	ASCII GRID/ GEOTIF
	Imagen de Intensidad 1 m	GEOTIF
	Nube de Puntos	XYZ/SHP
TINGUIRIRICA 4	Modelo Digital de Terreno Sin ajuste	ASCII GRID/ GEOTIF
	Imagen de Intensidad 1 m	GEOTIF
	Nube de Puntos	XYZ/SHP
YESO 1	Modelo Digital de Terreno Sin ajuste	ASCII GRID/ GEOTIF
	Imagen de Intensidad 1 m	GEOTIF
	Nube de Puntos	XYZ/SHP
YESO	Modelo Digital de Terreno Sin ajuste	ASCII GRID/ GEOTIF
	Imagen de Intensidad 1 m	GEOTIF
	Nube de Puntos	XYZ/SHP
YESO 2	Modelo Digital de Terreno Sin ajuste	ASCII GRID/ GEOTIF
	Imagen de Intensidad 1 m	GEOTIF
	Nube de Puntos	XYZ/SHP
CERRO EL PLOMO	Modelo Digital de Terreno Con Ajuste/Sin ajuste	ASCII GRID/ GEOTIF
	Imagen de Intensidad 1 m	GEOTIF
	Nube de Puntos	XYZ/SHP
DEL RINCON	Modelo Digital de Terreno Con Ajuste/Sin ajuste	ASCII GRID/ GEOTIF
	Imagen de Intensidad 1 m	GEOTIF
	Nube de Puntos	XYZ/SHP

Glaciar	Producto	Formato
LA PALOMA	Modelo Digital de Terreno Con Ajuste/Sin ajuste	ASCII GRID/ GEOTIF
	Imagen de Intensidad 1 m	GEOTIF
	Nube de Puntos	XYZ/SHP
PIRAMIDE	Modelo Digital de Terreno Sin ajuste	ASCII GRID/ GEOTIF
	Imagen de Intensidad 1 m	GEOTIF
	Nube de Puntos	XYZ/SHP

Productos Imágenes RGB

Glaciar	Producto	Formato
BELLO	Imágenes RGB 0,25 cm	GEOTIF
CIPRESES NORTE	Imágenes RGB 0,25 cm	GEOTIF
ESMERALDA	Imágenes RGB 0,25 cm	GEOTIF
MONOS DE AGUA	Imágenes RGB 0,25 cm	GEOTIF
TINGUIRIRICA 1	Imágenes RGB 0,25 cm	GEOTIF
TINGUIRIRICA 3	Imágenes RGB 0,25 cm	GEOTIF
TINGUIRIRICA 4	Imágenes RGB 0,25 cm	GEOTIF
YESO 1	Imágenes RGB 0,25 cm	GEOTIF
YESO	Imágenes RGB 0,25 cm	GEOTIF
YESO 2	Imágenes RGB 0,25 cm	GEOTIF
CERRO EL PLOMO	Imágenes RGB 0,25 cm	GEOTIF
DEL_RINCON	Imágenes RGB 0,25 cm	GEOTIF
LA PALOMA	Imágenes RGB 0,25 cm	GEOTIF
PIRAMIDE	Imágenes RGB 0,25 cm	GEOTIF

APENDICE III: RECEPTORES SATELITALES GNSS (L1/L2), TOPCON, HIPER + GGD, 32 MB

Specifications Tracking

Signal	: GPS and GLONASS L1/L2 C/A,P-Code, Full Code & Carrier
Channel	: 40 channels L1/L2
Cold Tracking	: < 60 seconds
Warm Tracking	: < 10 seconds
Reacquisition	: < 1 seconds

Accuracy

Static	: 3mm+0,5ppm x D horizontal, 5mm+0,5ppm x D vertical
RTK/Kinematic	: 10mm+1ppm x D horizontal, 15mm+1ppm x D vertical
DGPS	: 0,3m Post Processing, < 0,5m Real time

Physical

Enclosure	: Aluminum Extrusion construction
Dimensions	: W:159 x H:173 x D:113 mm
Weight	: 1,65 kg

Environmental

Operating Temperature	: -30 ~ +60 degrees Celsius
Storage Temperature	: -40 ~ +75 degrees Celsius
Humidity	: 95 %
Waterproof	: IPX6

Power

Internal Battery	: Li-ion (4.400mA/7,4V), non-detachable
Operating Time	: 10 TX, 12 RX, 16 static Hours

