

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y  
PETRÓLEOS**

**ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE LOS GLACIARES  
ANTISANA 12 Y ANTISANA 15  
MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE RADAR  
DE PENETRACIÓN DE SUELO (GPR).**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
GEÓLOGO**

**MARCO CAMILO ZAPATA TAPIA**

[camilomk@yahoo.es](mailto:camilomk@yahoo.es)

**DIRECTOR: DR. SANTIAGO DANIEL ANDRADE VARELA**

[dandrade@igepn.edu.ec](mailto:dandrade@igepn.edu.ec)

**Quito, Diciembre 2015**

## **DECLARACIÓN**

Yo, Marco Camilo Zapata Tapia, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Marco Camilo Zapata Tapia

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Marco Camilo Zapata Tapia, bajo mi supervisión.

---

Dr. Santiago Daniel Andrade Varela

DIRECTOR DEL PROYECTO

## **AGRADECIMIENTO**

A mi ALMA MÁTER, la Escuela Politécnica Nacional, institución que me formó profesionalmente.

Al Instituto Geofísico y a su personal, quienes han sido mi referente de calidad científica y humana.

Al Departamento de Glaciología del INAMHI, al Departamento de Ingeniería Civil EPN y a LMI GREATICE del IRD de Francia; y a sus técnicos que participaron activamente durante todo el proceso de esta investigación.

A la EPMAPS de Quito y a la Reserva Ecológica Antisana del MAE; y a su personal, quienes brindaron todas las facilidades de acceso y hospedaje, durante las misiones de campo.

A mis padres, Eugenia y Marco; que me enseñaron el sentido de la vida. Gracias a su trabajo, esfuerzo y dedicación, pude gozar de una existencia plena y llena de amor. A mis hermanos Joanna y Antonio; quienes con su ejemplo me han impulsado a superarme profesionalmente. A mi cuñado Carlos y a mi Sobrino Matías, quienes me han apoyado en los momentos difíciles.

Al Doctor Daniel Andrade, quien no solo fue mi director de tesis, sino también mi amigo; a quien agradezco infinitamente el haber apoyado mis ideas y proyectos, convirtiéndose en un pilar esencial durante mi proceso de aprendizaje.

Al grupo humano, que trabajó desinteresadamente durante las arduas labores en alta montaña, a quienes no les importó trabajar toda la noche y en ocasiones fines de semana, para levantar la información base para este proyecto. A Juan Carvajal, que gracias a su experiencia, nos guió seguros en los glaciares del Antisana. A Jorge Córdova (JC) y a su inacabable energía, que nos permitió recorrer cientos de metros por los glaciares. A Marlon Calispa quien se convirtió en mi mentor en el uso de QGIS.

A los doctores, Luis Maisincho y Marcos Villacis, por haber confiado en mí, y haberme brindado su apoyo en una iniciativa que inicialmente fue mi pasantía y se convirtió en mi proyecto de titulación.



A mis amigos, Francisco Vásconez, Marco Almeida, Stefanie Almeida, Diego Narváez, con quienes he compartido valiosos momentos en el campo, y que fueron partícipes de las primeras pruebas con del equipo GPR en el Antisana.

A la Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos, a sus directivos, trabajadores, profesores y alumnos, quienes representaron mi segunda familia durante mi transcurrir por la universidad.

A mis amigos Shirley, Maya, Michu, Mateo, Juver, Johnny, Karen, Diego C., Taty, Daya, Santiago, Mary, Marjorie, Marco C. , Edwin, Mile, Niky, Vale y Danny. Con quienes pude compartir una aula de clases y gratos momentos.

## **DEDICATORIA**

A la memoria de mi amigo Huguito

## Índice General

<b>ÍNDICE GENERAL.....</b>	<b>I</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS.....</b>	<b>IX</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>X</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XI</b>
CAPÍTULO 1 .....	1
1 INTRODUCCIÓN .....	2
1.1. ANTECEDENTES .....	2
1.2 JUSTIFICATIVOS .....	3
1.3 OBJETIVOS .....	5
1.3.1 Objetivo General .....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 ALCANCE .....	5
1.5 METODOLOGÍA .....	5
CAPÍTULO 2 .....	7
2 CONTEXTO TEÓRICO .....	8
2.1 GEOLOGÍA LOCAL DEL VOLCÁN ANTISANA .....	8
2.1.1 Introducción .....	8
2.1.2 Edificio volcánico .....	10
2.1.3 Edad .....	12
2.1.4 Actividad .....	12

2.1.5 Glaciares del Antisana .....	13
2.2 Fundamentos Glaciológicos .....	16
2.2.1 Glaciar .....	16
2.2.2 Partes de un glaciar .....	16
2.3 Fundamentos de la Técnica Radar de Suelo .....	17
2.3.1 Introducción .....	17
2.3.2 Principio Geofísico y Operativo.....	19
2.4 Fundamentos Geoestadísticos.....	26
2.4.1 Introducción a la Geoestadística.....	26
2.4.1 Kriging.....	26
2.4.3 Variograma .....	28
2.4.5 Cálculo del Kriging.....	30
CAPÍTULO 3 .....	32
3 Desarrollo de la Investigación .....	33
3.1 INTRODUCCIÓN .....	33
3.2 Toma de Mediciones.....	34
3.2.1 Elección de sitios de medición.....	34
3.2.2 Misiones de Campo .....	36
3.2.3 Equipo Utilizado .....	38
3.2.4 Valores de los parámetros utilizados .....	39
3.2.5 Levantamiento de Perfiles .....	40
3.2.7 Obtención de valores de profundidad - aproximación a malla geoestadística.....	53
Capítulo 4.....	56
4 Resultados .....	57
4.1 Análisis Estadístico .....	57
4.2 Procesamiento Geoestadístico .....	60

4.2.1 Mapa de Puntos de Espesor.....	60
4.1.2 Variogramas .....	64
4.4 Mapas de Espesor glaciar.....	69
4.5 Perfiles Longitudinales .....	70
4.5 Cálculo de volumen glaciar .....	74
4.6 Cálculo de volumen equivalente en agua. ....	77
CAPÍTULO 5 .....	79
5 Discusión , conclusiones y recomendaciones. ....	80
5.1 Discusión de metodología y resultados.....	80
5.1.1 Utilización del radar de penetración de suelo y equipo empleado. ....	80
5.1.3 Mapas de profundidad .....	85
5.1.4 Incertidumbre relacionada a los límites glaciares .....	86
5.1.5 Comparación con otras metodologías empleadas en cálculos volumétricos de glaciares ecuatorianos .....	86
5.2 Conclusiones.....	89
5.3 Recomendaciones .....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Volcanes Cuaternarios del Ecuador. Con el número 44 se muestra la ubicación geográfica del volcán Antisana .....	9
<b>Figura 2.2</b> Ubicación del volcán Antisana (ANT) con respecto a la provincia riolítica Ecuatoriana y a la Caldera del Chacana. A:Chacana, B: Cotopaxi, C: Chalupas, D: Huañuna, E: Chaupiloma, F:Aliso, G: Putzalahua, H: Talag, SIN: Sincholahua.....	10
<b>Figura 2.3</b> Rasgos remanentes del volcán Antisana I. ....	11
<b>Figura 2.4</b> Cobertura Glaciar 2005 y límites Glaciares según Vallejo D. 2008. ...	14
<b>Figura 2.5</b> <i>Fotografía volcán Antisana retratada desde la Sur Occidente. Fuente Camilo Zapata 2013.</i> .....	15
<b>Figura 2.6</b> Partes de un glaciar de montaña.....	17
<b>Figura 2.7</b> Collage de varias Aplicaciones técnicas del Método GPR. ....	19
<b>Figura 2.8</b> Emisión y recepción del impulso electromagnético , principio físico y operativo del GPR. ....	19
<b>Figura 2.9</b> Radragrama filtrado donde se indica con flechas amarillas la base de un depósito volcánico sobre un paleosuelo, el contraste de materiales es importante. El primer material es ceniza y otros productos volcánicos no consolidados y en la parte baja un paleo suelo bien compactado con granulometría tipo arena fina a limosa. La fotografía indica el lugar de estudio..	21
<b>Figura 2.10</b> Radar XPro Mala con una antena blindada de 200Mhz empleada en investigación estratigráfica. ....	23
<b>Figura 2.11</b> Radar ProEx Mala 25Mhz, utilizada en medición de espesor de glaciares. ....	24
<b>Figura 2.12</b> Ejemplo de Semivariograma (Biswas and Cheng, 2013). ....	27
<b>Figura 3.1</b> Mapa ubicación de los Glaciares # 12 y # 15, con sus respectivos ejes y límites laterales.....	34
<b>Figura 3.2</b> Mapa de ubicación de los perfiles GPR en el Glaciar # 15. Las curvas de nivel corresponden a la topografía. ....	35
<b>Figura 3.3</b> Mapa de ubicación de los perfiles GPR en el Glaciar # 12. Las curvas de nivel corresponden a la topografía. ....	36

<b>Figura 3.4</b> Disposición del equipo de trabajo, por delante la cordada que guía a la expedición seguidos de la cordada que opera el equipo.....	37
<b>Figura 3.5</b> Componentes del GPR ProEx. 1) Mochila donde se guarda la Unidad de Control, 2) Antena no blindada, 3) Monitor, 4)Unidad de control , 5)Hilo para registrar distancia. ....	38
<b>Figura 3.6</b> Ensayos de Factibilidad de Uso de GPR ProEx Mala en la zona de ablación del Glaciar #12 Antisana, Febrero 2013.....	39
<b>Figura 3.7</b> Punto final un levantamiento de un perfil en el glaciar #15 Antisana. En este sitio se procede a la toma del punto GPS y codificación del radargrama. ....	41
<b>Figura 3.8</b> Ventana emergente donde se muestran los archivos.....	42
<b>Figura 3.9</b> Pestaña de Herramientas.....	42
<b>Figura 3.10</b> Venta de opciones de unidades de los ejes. ....	43
<b>Figura 3.11</b> Barra de Herramientas, botón de control de contraste. ....	43
<b>Figura 3.12</b> Control de Escala de Color.....	44
<b>Figura 3.13</b> Pestaña de visualización, opción filtro.....	44
<b>Figura 3.14</b> Catálogo de Filtros y filtros escogidos.....	44
<b>Figura 3.15</b> Ventana de parámetros del filtro y Radargrama corregido con esa configuración de filtro. ....	45
<b>Figura 3.16</b> Venta de parámetros del filtro y Radargrama corregido con esa configuración de filtro. Glaciar Antisana #12. ....	45
<b>Figura 3.17</b> a) Radargrama en bruto. b) Radargrama aplicado el filtro Delete mean trace. Perfil 2 Glaciar #15.....	46
<b>Figura 3.18</b> a) Radargrama en bruto. b) Radargrama aplicado el filtro Average . Perfil 2 Glaciar #15.....	46
<b>Figura 3.19</b> a) Radargrama en bruto. b) Radargrama aplicado el filtro Thershold. Perfil 2 Glaciar #15.....	47
<b>Figura 3.20</b> a) Radargrama en bruto. b) Radargrama aplicado el filtro FIR. Perfil 2 Glaciar #15.....	47
<b>Figura 3.21</b> a) Radargrama en bruto. b) Radargrama aplicado el filtro Triangular FIR. Perfil 2 Glaciar #15. ....	48
<b>Figura 3.22</b> a) Radargrama en bruto. b) Radargrama aplicado los filtros Delete mean trace, Average, Thershold, FIR y Triangular FIR. Con flecha amarilla se	

muestra la superficie reflectiva interpretada como contacto hielo-roca. Con flecha verde se muestra el primer arribo. Perfil 2 Glaciar #15. ....	48
<b>Figura 3.23</b> Radargrama del perfil 2 del Glaciar # 12 luego de la aplicación de filtros, donde se indica con flechas amarillas un reflector generado por el contacto entre hielo y roca; y con flecha roja se muestra la señal de primer arribo. ....	49
<b>Figura 3.24</b> En este radargrama podemos observar la onda de primer arribo en la parte superior, recta y continua en todo perfil (flecha blanca); y abajo de ella un falso reflector generado por ruido ambiental, que se lo visualiza con buena definición, muy recto y continuo por todo el radargrama (Flecha roja). ....	51
<b>Figura 3.25</b> Radargrama filtrado del Glaciar # 12, donde se muestra con flechas amarillas el reflector generado por el contacto hielo-roca, debajo de este reflector se puede observar un eco, mientras que por encima se observa hielo estratificado que se señala con flechas rojas. En el rectángulo azul se indica una zona del radargrama que presenta interferencia y ruido, posiblemente generado por la presencia de un flujo de agua líquida bajo la superficie. ....	52
<b>Figura 3.26</b> Mapa de ubicación de Nódulos en el Glaciar #12. ....	54
<b>Figura 3.27</b> Mapa de ubicación de Nódulos en el Glaciar #15. ....	54
<b>Figura 4.1</b> Diagrama de Distribución Normal de los puntos de muestreo en el Glaciar #12. ....	57
<b>Figura 4.2</b> Diagramas de dispersión en: a) Este-Oeste (X) y b) Norte - Sur (Y), de los puntos de muestreo en el Glaciar #12. ....	58
<b>Figura 4.3</b> Diagrama Distribución Normal de los puntos de muestreo en el Glaciar #15. ....	59
<b>Figura 4.4</b> Diagramas de dispersión en las direcciones Norte - Sur (Y) y Este-Oeste (X), de los puntos de muestreo en el Glaciar #15. ....	59
<b>Figura 4.5</b> Ventana de conexión WMS de QGIS ....	61
<b>Figura 4.6</b> Ventana de servidor WMTS. ....	62
<b>Figura 4.7</b> Mapa de puntos de espesor de hielo, Glaciar Antisana # 12. ....	63
<b>Figura 4.8</b> Mapa de puntos de espesor de hielo, Glaciar Antisana # 15. ....	63
<b>Figura 4.9</b> Ventana emergente donde se seleccionan los campos de las columnas para la construcción del semivariograma. ....	64
<b>Figura 4.10</b> Ventana para la selección de modelo de variograma. ....	65



<b>Figura 4.11</b> Modelo de variograma para el glaciar #12, a)Esférico, b) Exponencial, c) Gaussiano y d) Lineal.....	65
<b>Figura 4.12</b> Modelo de variograma para el glaciar #15, a)Esférico, b) Exponencial, c) Gaussiano y d) Lineal.....	66
<b>Figura 4.13</b> Ventana emergente donde debemos escoger los campos de posición y valor interpolar, además del modelo de variograma a ser utilizado.....	67
<b>Figura 4.14</b> Mapa de Contorno del Glaciar #12.....	68
<b>Figura 4.15</b> Mapa de Contorno del Glaciar #15.....	68
<b>Figura 4.16</b> Mapa de espesor de hielo del Glaciar #12. ....	69
<b>Figura 4.17</b> Mapa de espesor de hielo del Glaciar #15. ....	70
<b>Figura 4.18</b> Creación del perfil topográfico con la herramienta Terrain Profile. ...	71
<b>Figura 4.19</b> Perfil longitudinal del Glaciar #12. ....	73
<b>Figura 4.20</b> Perfil longitudinal del Glaciar #15. ....	73
<b>Figura 4.21</b> Ventana de Surfer 10, donde se muestra para cálculos de volumen. ....	74
<b>Figura 4.22</b> Captura de pantalla del reporte generado por Surfer 10, donde se muestran los valores calculados de áreas y volúmenes. ....	75

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Propiedades eléctricas de los materiales comunes en la superficie terrestre. (Hubbard and Glasser, 2005).....	22
<b>Tabla 3.1</b> Características técnicas del GPR ProEx , fuente :Manual MALA ProEx Control Unit , página 57.....	38
<b>Tabla 4.1</b> Cota de superficie y Cota de Bedrock, perfil Glaciar #12.....	72
<b>Tabla 4.2</b> Cota de superficie y Cota de Bedrock, perfil Glaciar #15.....	72
<b>Tabla 4.3</b> Volúmenes y áreas calculadas en Surfer 10, para el Glaciar #12.....	76
<b>Tabla 4.4</b> Volúmenes y áreas calculadas en Surfer 10, para el Glaciar #15.....	76
<b>Tabla 4.5</b> Volúmenes de agua líquida contenida en los Glaciares #12 y #15. ....	77
<b>Tabla 5.1</b> Algunas características de los equipos GPR empleados en diferentes investigaciones para estimar el espesor de hielo en Glaciares Andinos. Las primeras investigaciones realizadas en Chile corresponden a Rivera et al. (2002). Los estudios efectuados en Colombia, Ecuador y Bolivia hasta 2005 , corresponden a la publicación de López y Ramírez (2010). Por último las mediciones de 2013-2014 efectuadas en el Glaciar Antisana pertenecen a este proyecto de investigación.....	82

**ÍNDICE DE ANEXOS**

<b>Anexo 1</b> , Procesamiento e Interpretación de Radar-gramas en los Glaciares Crespos y 15 del Volcán Antisana.....	100
<b>Anexo 2</b> , Tabla de valores de ubicación y espesor de hielo, de Nodos en el Glaciar # 12.....	126
<b>Anexo 3</b> , Tabla de valores de ubicación y espesor de hielo, de Nodos en el Glaciar # 15.....	128
<b>Anexo 4</b> , Datos puntuales de espesor de hielo en el Glaciar Antisana #12. ....	129
<b>Anexo 5</b> , Datos puntuales de espesor de hielo en el Glaciar Antisana #15 .....	132
<b>Anexo 6</b> , Abstract Asamblea Viena-2014, Unión Europea de Geociencias.....	134
<b>Anexo 7</b> , Poster Asamblea General Viena-2014, Unión Europea de Geociencias .....	135

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación presenta una nueva metodología para la estimación de volúmenes glaciares, basada en tres pasos principales: 1) la obtención de la mayor cantidad de perfiles de profundidad a lo largo del contexto geométrico de los glaciares estudiados, mediante el uso de un Radar de Penetración de Suelo (GPR) con una antena de 25 MHz para perfilaje continuo; 2) interpolación y extrapolación de los datos obtenidos mediante el método de kriging ordinario; 3) finalmente, el cálculo volumétrico a partir de integraciones numéricas mediante varios modelos matemáticos (Regla de trapecio, Simpson y Simpson 3/8 ).

Los sitios seleccionados para el estudio fueron las zonas de ablación y parte baja de las zonas de acumulación de los Glaciares #12 y #15 del volcán Antisana, ubicado a 50 km al Sureste de la ciudad de Quito-Ecuador. Como resultado para los glaciares anteriormente mencionados, empleando límites glaciares de 0 metros y 10 metros respectivamente, se obtuvieron volúmenes en el rango de 28.3 Mm<sup>3</sup> a 37.4 Mm<sup>3</sup> para el caso del glaciar #12; y 1.9 Mm<sup>3</sup> a 4.0 Mm<sup>3</sup> para el glaciar #15. Estas estimaciones son significativamente diferentes a las que se obtendrían con otros métodos, como por ejemplo el uso de un espesor promedio para toda la superficie glaciar.

## ABSTRACT

In this research a new method for estimating volumes glaciers is presented, which is based on three main steps: 1) obtaining as much depth profiles along the geometric context of the glaciers studied, by using a Ground Penetrating Radar (GPR) with an antenna 25 MHz for continuous logging; 2) interpolation and extrapolation of the data obtained by the ordinary kriging method; 3) finally, the volumetric calculation from numerical integrations by diverse mathematical models (trapezoid rule, Simpson and Simpson 3/8).

The sites selected for the study were the ablation zones and start of accumulation zones from Glacier # 12 and # 15 of the Antisana volcano, located 50 km southeast of Quito-Ecuador. As a result of the above glaciers, using limits of 0 meters and 10 meters respectively, volumes were obtained in the range of 28.3 Mm<sup>3</sup> to 37.4 Mm<sup>3</sup> in the case of Glacier # 12; and 1.9 Mm<sup>3</sup> to 4.0 Mm<sup>3</sup> for Glacier # 15. These estimates are significantly different from those obtained with other methods such as the use of an average thickness for the entire ice surface.



## **CAPÍTULO 1**

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1. ANTECEDENTES

En Ecuador todos los Glaciares se encuentran en volcanes activos, representan un reservorio de agua dulce para las principales ciudades de la región Sierra, siendo fundamental la investigación científica en ellos, para entender su comportamiento, dinámica, retroceso, así como los efectos que puede causar su derretimiento durante una erupción volcánica.

Instituciones gubernamentales como extranjeras investigan desde mediados de los años noventa los glaciares del Volcán Antisana. Este volcán ha sido seleccionado por sus características climáticas, vulcanológicas y geográficas, como laboratorio de Glaciares tropicales.

En el Ecuador Desde 1994 el Instituto de Investigaciones para el Desarrollo de Francia (IRD) a través del Laboratorio Mixto Internacional (LMI) GREAT ICE y de las contrapartes nacionales como: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) y la facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional (EPN); monitorean el glaciar Antisana (Francou et al., 2000).

Los glaciares del Antisana permiten entender el cambio climático ya que son parte del observatorio glaciológico financiado por Francia, Glaciares, Observatorio Climatológico (GLACIOCLIM), que incluye la cordillera de los Andes, los Himalayas y la Antártida.

Por otra parte el Instituto Geofísico de la EPN realiza el monitoreo de la actividad sísmica y volcánica de todo país. En el caso del Antisana se cuenta con varias estaciones sísmicas en sus laderas, para registrar en tiempo real posibles sismos de origen volcánico, y además varias veces al año se realizan sobrevuelos con cámaras térmicas para localizar posibles anomalías de temperatura en el edificio volcánico.

La mayoría de los estudios realizados en los glaciares ecuatorianos son realizados en la interfaz glaciar-atmósfera (Francou et al., 2000; Favier et al.,



2004a; Rabatel et al., 2013) , y se tiene información muy limitada sobre lo que sucede bajo la cobertura glaciar.

La técnica de Radar de Penetración de Suelo (GPR) ha sido utilizada desde la década de 1930 en investigaciones glaciológicas con el fin de determinar el espesor de las capas glaciares (Ortiz y Crespo, 2012), así como la posible estratificación interna de las mismas. Un equipo de este tipo se encuentra disponible en el Instituto Geofísico y será utilizado para obtener medidas del espesor de los glaciares #12 y #15a del volcán Antisana.

## **1.2 JUSTIFICATIVOS**

El conocimiento preciso del volumen de los glaciares es importante para diversos campos. Por ejemplo en el caso del Antisana se necesita esta información para:

a) Modelar con datos fiables el área de amenaza por lahares del Volcán Antisana.

Considerando que en dicha área se asientan las parroquias de Cuyuja, Papallacta, Archidona, Cosanga y Baeza; con una población aproximada de 28.494 habitantes (INEC 2010). Además 26.7 Km del Oleoducto de Crudos Pesado (OCP), arteria principal de la Economía Ecuatoriana, atraviesan el área en antes mencionada.

b) Calcular las reservas de agua dulce de este nevado.

Los glaciares del Ecuador representan una fuente de agua dulce para varias de las principales ciudades de la región Sierra, en el caso de la ciudad de Quito unos 11733.06 m<sup>3</sup> de agua fueron captados desde enero de 2014 a diciembre 2014 en el Sistema la Mica ubicado en la cuenca del Volcán Antisana; abasteciendo de líquido vital a unos 45000 habitantes de los barrios de Guajaló medio, Guajaló alto y Ferroviaria. El agua utilizada en este sistema de agua potable también es aprovechada para generar electricidad en la planta Hidroeléctrica El Carmen , que emplea la caída bruta de 611 m para obtener una potencia nominal de 9.49 Mw (EPMAPS 2015).

c) Calibrar el modelo dinámico de retroceso glaciar debido al Cambio Climático en el volcán Antisana.

A inicios de 2015 se preparaban las tesis doctorales de Luis Mainsincho y Rubén Basantes, sobre Glaciología en el Volcán Antisana, dichos trabajos necesitaban la información de espesor de hielo en los Glaciares 12 y 15 para calibrar el modelo dinámico de retroceso glaciar debido al Cambio Climático, como parte de las investigaciones que realiza la cooperación científica internacional GREATICE del IRD de Francia y su contraparte Nacional INAMHI en los Glaciares Ecuatorianos. El conocimiento científico sobre el retroceso de los glaciares del Antisana tiene un impacto político apreciable en cuanto a las medidas de adaptación al cambio climático a ser adoptadas por instituciones gubernamentales nacionales e internacionales de planificación y desarrollo.

Las investigaciones llevadas a cabo actualmente por el IRD, INAMHI, EPN entre otras instituciones nacionales y extranjeras; han conseguido grandes avances en el mapeo 2D (vista en planta) de glaciares, balances de masa, energía e hídricos (Francou et al., 2000; Favier et al., 2004a; Rabatel et al., 2013; Favier et al., 2008 Villacis, 2008, Maisincho, 2009, Cáceres, 2010, Basantes, 2015); pero escasa información de espesores de hielo. Esto implica que las estimaciones de volumen actuales tienen mucha incertidumbre, lo cual significa que los resultados obtenidos con este proyecto de titulación tienen un impacto científico y técnico relevante.

En el presente estudio se utilizará el Radar de Penetración de Suelo y la geoestadística para estimar el espesor de la cobertura de hielo en los glaciares 12 y 15 para seguidamente estimar su volumen; y a su vez el agua almacenada en los glaciares del volcán Antisana; siendo un dato clave para la adaptación frente al cambio climático, la gestión de riesgos hidrovulcánicos y para el manejo sustentable de recursos hídricos.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo General**

Contribuir al conocimiento de las reservas de agua almacenadas en los glaciares del volcán Antisana

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- I. Determinar el espesor de los Casquetes Glaciares en zonas accesibles por el Radar de Penetración de Suelo (GPR).
- II. Emplear un modelo geoestadístico que permita hacer estimaciones de la profundidad del lecho rocoso en sitios inaccesibles de los glaciares, a partir de los datos obtenidos por geofísica.
- III. Desarrollar una metodología para el levantamiento geofísico y procesamiento geoestadístico, con el propósito de determinar volúmenes glaciares en otros volcanes del Ecuador

## **1.4 ALCANCE**

- I. Levantamiento de perfiles GPR en los glaciares #12 y #15 del volcán Antisana, en zonas accesibles por el equipo.
- II. Aplicación de modelos geoestadísticos para interpolar datos de profundidad en zonas no medidas.
- III. Diseño de mapas de espesor y perfiles glaciares.
- IV. Cálculo de volumen en los glaciario Antisana #12 y #15; y de su equivalente en agua líquida.

## **1.5 METODOLOGÍA**

Para estimar el volumen de los glaciares #12 y #15 del Antisana se siguió la lógica de una investigación geofísica:

- I. Etapa de Gabinete:
  - Recopilación teórica del método GPR, manuales del equipo, etc.
  - Agrupación de información geológica del volcán Antisana.
  - Recopilación de material cartográfico; mapas, imágenes satelitales, modelos digitales del terreno, ortofotografías, etc.

## II. Etapa de trabajo de Campo

- Planificación de salidas de campo en fechas más propicias para ascender a alta montaña.
- Ejecución de varias misiones de campo para llegar a lugares accesibles por el equipo GPR.
- Interpretación de primeros resultados y selección de zonas para completar la información.

## III. Etapa de Gabinete Final:

- Interpretación de datos geofísicos.
- Preparación de mapas de profundidad en zonas medidas.
- Implementación de Modelos Geoestadísticos para inferir medidas de profundidad en lugares no alcanzados en las misiones de campo.
- Generación de mapas de isolíneas de espesor (isópacas), diseño de perfiles a través del eje glaciar.
- Cálculo de volúmenes glaciares y equivalente de agua líquida.
- Redacción de informes y resultados del proyecto de investigación .

La mayoría de las actividades mencionadas anteriormente fueron realizadas durante la ejecución del Proyecto de Investigación Semilla PSI-1326 de la EPN : "UTILIZACIÓN DEL RADAR DE PENETRACIÓN DEL SUELO (GPR) PARA LA DETERMINACIÓN DE ESPESORES DE GLACIARES EN VOLCANES DEL ECUADOR"; proyecto en el cual trabajé como asistente de investigación durante un año, finalizando mis labores en septiembre de 2014. Como producto del proyecto antes mencionado se presentó un Abstract (Anexo 6) y un poster (Anexo 7 ) con los resultados preliminares en la asamblea anual Vienna- 2014, de la Unión Europea de Geociencias.

## **CAPÍTULO 2**

## **2 CONTEXTO TEÓRICO**

### **2.1 GEOLOGÍA LOCAL DEL VOLCÁN ANTISANA**

#### **2.1.1 Introducción**

El volcán Antisana se ubica a aproximadamente a 50 km al sureste de la ciudad de Quito, en la Reserva Ecológica que lleva su nombre; este volcán forma parte de la fila andesítica de estratovolcanes de la cordillera Oriental (Fig. 2.1), conjuntamente con otros volcanes como el Cotopaxi (40 km al Sur), Cayambe (60 km al Norte), Tungurahua (115 km al Suroeste), y Sangay (170 Km al Sur) (Hall et., al 2012).

Según Hall y Mothes (2006), el centro volcánico joven de composición andesítica Antisana, pertenece a la provincia volcánica Riolítica Ecuatoriana (Fig. 2.2), la cual alcanza 140 km de largo , 50 km de ancho, con una orientación NNE-SSO, extendiéndose desde la población de Cangahua en el Norte hasta cerca de la ciudad de Baños en El Sur. Esta provincia riolítica contiene varios centros eruptivos del Pleistoceno al Holoceno, de los cuales el complejo caldérico Chacana, es considerado el mayor, con una caldera de 35 km de diámetro, formada en sus flancos exteriores por secuencias de ignimbritas, brechas, flujos de lava y tobas soldadas. Gran parte del edificio volcánico del Antisana yace sobre el límite Sureste de la Caldera Chacana, pero al parecer no está relacionado con su historia magmática ( Hall et al., 2012).



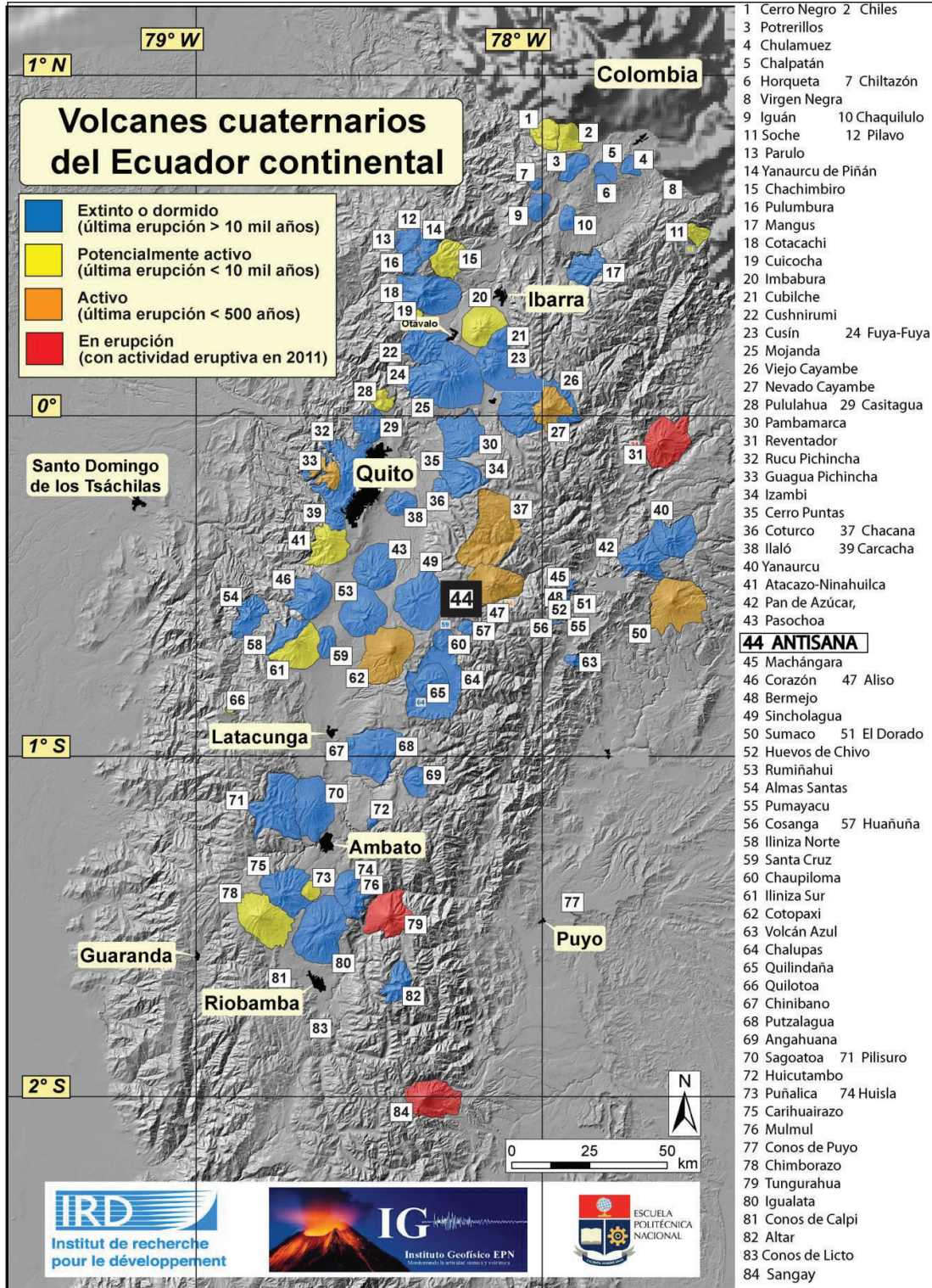
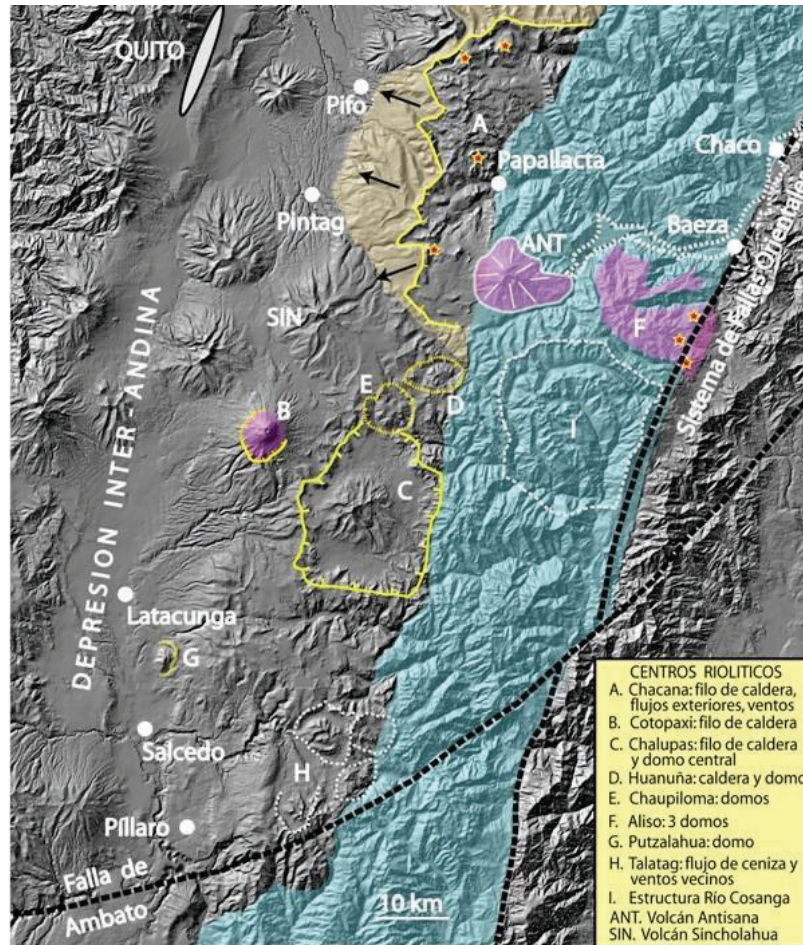


Figura 2.1 Volcanes Cuaternarios del Ecuador. Con el número 44 se muestra la ubicación geográfica del volcán Antisana





*Figura 2.2 Ubicación del volcán Antisana (ANT) con respecto a la provincia riolítica Ecuatoriana (franja verde) y a la Caldera del Chacana. A:Chacana, B: Cotopaxi, C: Chalupas, D: Huañuna, E: Chaupiloma, F:Aliso, G: Putzalahua, H: Talag, SIN: Sincholagua. Se resalta con color violeta los volcanes activos.*

### 2.1.2 Edificio volcánico

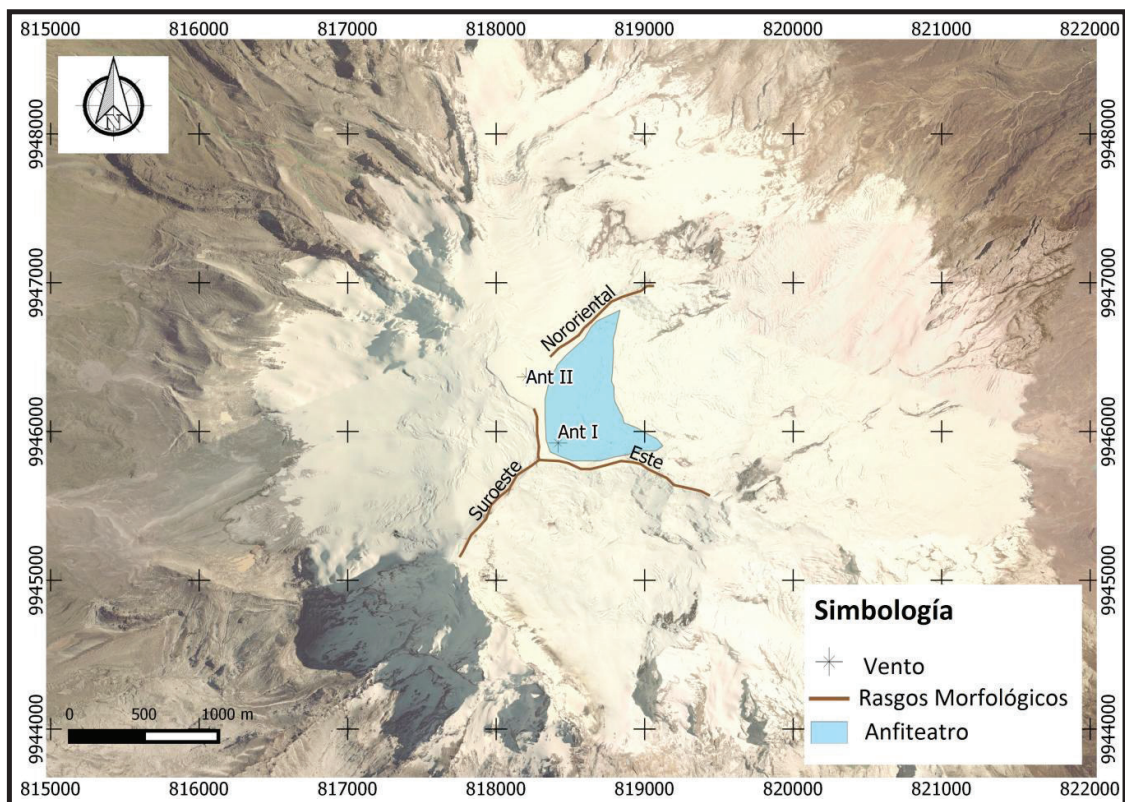
El edificio volcánico del Antisana mide 13 km de diámetro, su forma es levemente alargada en dirección Este-Oeste, sus flancos tienen una inclinación promedio entre 25° y 30°. Se identifican dos edificios; Antisana I es el edificio viejo y erosionado, en el occidente sobre yace Antisana II, el estrato volcán joven. (Hall et al., 2012).

Rasgos remanentes de Antisana I, son tres cuchillas de hielo y peñas verticales, que se unen en proximidad del edificio más joven (Fig. 2.3). La Cuchilla nororiental, une los picos norte y noreste del Edificio, sus capas de lavas y



brechas volcánicas con buzamiento norte, se interpretan como remanente del flaco norte. La segunda cuchilla inicia en el cono joven y se curva al Suroeste, constituyendo el pico sur a los 5600 msnm. , formado de capas de lavas y brechas volcánicas que buzan al sur-suroeste, se explica cómo remanente del flaco Sur del edificio antiguo. La tercera cuchilla de acantilados verticales recorre 1.5km hacia el este, separando el valle glaciar del norte y la cara rocosa del sur. La disposición de los tres rasgos remanentes del Antisana I sugieren que el cráter antiguo fue centralizado hacia el sur de la cumbre actual. ( Hall et al., 2012)

El Edificio Antisana II tienen una altura máxima de 5757 msnm, desde donde desciende glaciares en forma radial, se creó que el cono ascendió gradualmente desde las cuchillas Norte y sur de Antisana I; su cráter aparenta estar centrado más al norte que el antiguo, y su cumbre es plana, posiblemente porque el cráter está lleno de hielo. En base a estudios estratigráficos se creó que el crecimiento de Antisana II se efectuó durante la última glaciación del Plesitoceno.( Hall et al., 2012).



*Figura 2.3 Rasgos remanentes del volcán Antisana I.*

### 2.1.3 Edad

La historia del Antisana inicia con magmatismo andesítico básico, el cual fue evolucionando paulatinamente a magmatismo andesítico e incluso dacítico. (Hall et al., 2012).

El control de edad en el Volcán Antisana es limitado, apenas cinco muestras han sido datadas por el método radiométrico Argón/Argón por J.P. Eissen, dichas muestras fueron tomadas en la base sur del Edificio actual, considerando que estas lavas serían las más antiguas del volcán. En el centro sur del edificio se coleccionó una muestra de Andesítica Básica ( $\text{SiO}_2 \leq 56\%$ ) siendo la muestra más vieja con  $378 \pm 38$  Ka, sugiriendo que el volcán podría ser cien o doscientos mil años más viejo. En el rincón Suroriental del edificio se dataron lavas más diferenciadas ( $\text{SiO}_2 = 59\%$ ) con edades de  $253 \pm 23$  Ka,  $276 \pm 22$  Ka y  $190 \pm 23$  Ka. En el sector Suroeste del Antisana hasta el cañón del río Quijos se dató lavas químicamente similares con edad de  $280 \pm 33$  Ka.

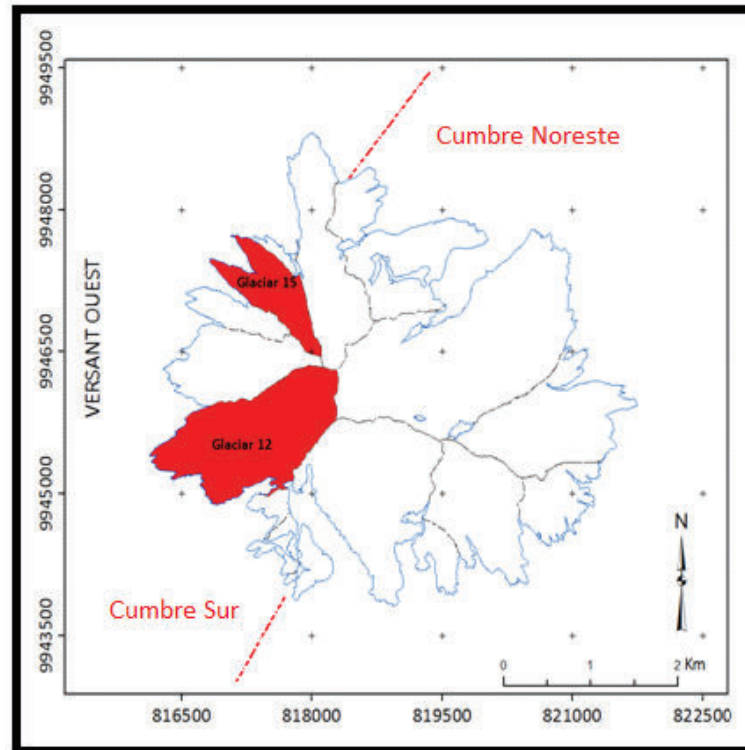
### 2.1.4 Actividad

Como evento más importante de Antisana I, casi a finales de su actividad hace 210 ka aproximadamente, se produjo por el flanco Este el flujo de Cuyuja, emisión de lava andesítica olivínica de 73 km de largo a través del cauce del río Quijos, formando numerosas terrazas de lava donde se asientan los actuales poblados de Baeza y el Chaco. Posiblemente asociado a este evento o posterior a él, al parecer Antisana I sufrió un colapso del flanco Nororiental, como evidencia morfológica tenemos un gran anfiteatro sobre el cual reposa actualmente un gran valle glaciar (Fig. 2.3), siendo esta evidencia la única ya que no se han encontrado los depósitos de la avalancha de escombros. Posterior a este colapso de edificio, Antisana no evidencia actividad por unos 150 mil años, hasta que Antisana II inicia su actividad hace unos 50 Ka aproximadamente. La mayor actividad eruptiva sucede posiblemente en los últimos 14 mil años. Durante el Pleistoceno Tardío y Holoceno, sucedieron más de 40 erupciones andesíticas y dacíticas, la mayoría de ellas de magnitud  $\text{VEO} = 3$ . Al parecer no se han experimentado erupciones importantes en los últimos mil años. (Hall et al., 2012).

Cuatro erupciones habrían sucedido en el período histórico, pero no existen relatos detallados de estos eventos; una erupción de 1802 corresponde al un relato de Alexander Von Humbolt, en el cual se hace referencia a presencia de humo en las cercanías del volcán, dicho fenómeno no está confirmado hasta la actualidad; en 1760 y 1773 se produjeron flujos de lava en las cercanías al volcán Antisana, pero actualmente se los asocia más bien a actividad de la Caldera del Chacana . Para diciembre de 2014 la actividad en el volcán se la consideraba baja, sin cambios en la actividad superficial (IG-EPN 2015).

### **2.1.5 Glaciares del Antisana**

El último inventario de glaciares realizado en el Ecuador sitúa al macizo glaciar del volcán Antisana como el más extenso del país, con una superficie de 11.9 km<sup>2</sup> ( Cáceres. 2010), la cobertura glaciar del flanco Oeste del Antisana inicia aproximadamente en la cota de 4850 msnm hasta 5750 msnm (Cáceres. 2010). El macizo glaciar ha sido dividido en 17 lenguas glaciares según la clasificación de Stefan Hastenrath (1981), dicha clasificación ha sido adoptada en el marco del Convenio IRD-EMMAP-Q (Arias 2010).



*Figura 2.4 El glaciar Antisana: Cobertura Glaciar 2009 y límites glaciares según Basantes 2015. En Rojo las lenguas Glaciares #12 y #15.*

Debido a su ubicación geográfica, entre el Trópico de Cáncer ( $23^{\circ} 26'N$ ) y Trópico de Capricornio ( $23^{\circ} 26'S$ ) el macizo glaciar Antisana es clasificado como Glaciar Tropical. En esta región de alta homogeneidad térmica, las variaciones anuales de temperatura son menores que las variaciones diurnas (Maisincho. 2010). Además por su ubicación en los Andes, cercana a la línea ecuatorial y a pocos kilómetros de la costa pacífica es muy sensible a los fenómenos de EL Niño y La Niña, por estas razones se convierte en un excelente indicador de la evolución de las precipitaciones y de la temperatura atmosférica (Maisincho 2010). Este Glaciar ha sido estudiado desde 1994 por el programa LMI- GREATICE del IRD, quien paulatinamente ha vinculado en sus investigaciones a varias instituciones nacionales como el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la EPN (desde el año 2004 hasta el presente), INAMHI (desde el año 1994 hasta el presente), EPMAPS (desde el año 1997 hasta 2011), entre otras. Los glaciares Antisana #12 (SO) y Antisana #15 (NO) (Fig. 2.4), son los más estudiados y

monitoreados por instrumentación meteorológica y por ende de los cuales se tiene un mejor registro e información. Un par de datos de importancia técnica-científica que merecen ser mencionado son el retroceso de 350 metros de la lengua #15 alfa desde 1996 a 2011 (Franco et al., 2011) y la pérdida del 50 % de la superficie del macizo glaciar desde 1956 hasta la actualidad (Rabatel et al., 2013).

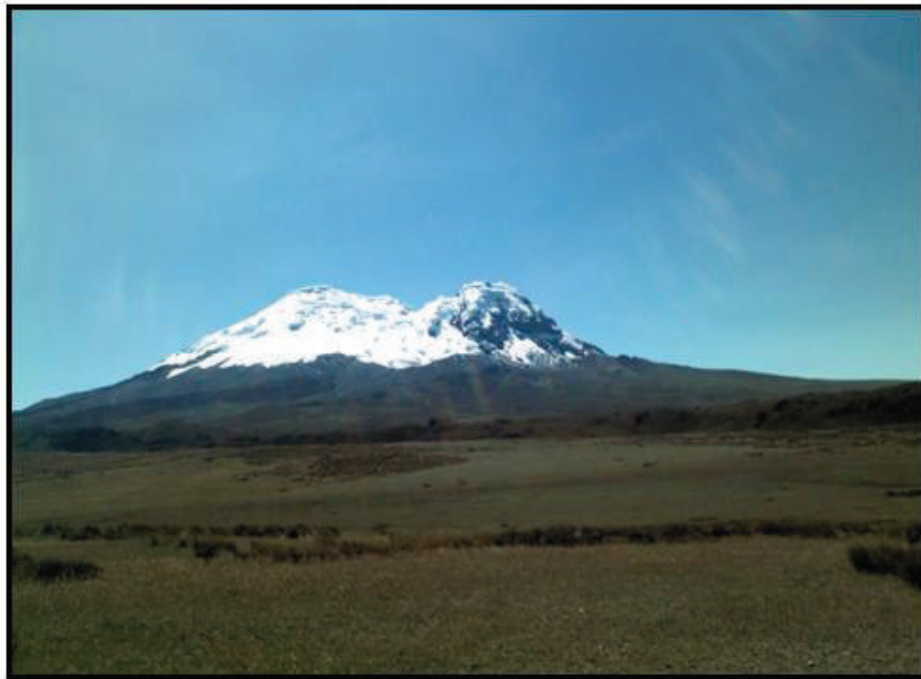


Figura 2.5 *Fotografía volcán Antisana retratada desde la Sur Occidente. Fuente Camilo Zapata 2013.*

De los deshielos de los glaciares del Antisana se originan varios afluentes a ríos de importancia nacional, en el flanco norte nacen aportes al río Papallacta en los glaciares 1, 16,17; en los flancos oriente y sur , los deshielos de los glaciares 2,3,4,5,6,7,8,9,10 y 11 fomentan al río Quijos; en el flanco occidental, la fusión de los glaciares 12,13,14 y 15 aportan a los ríos Papallacta y Antisana, este último desemboca en la laguna Mica Cocha (Arias 2010).

## **2.2 Fundamentos Glaciológicos**

### **2.2.1 Glaciar**

Un glaciar es un cuerpo masivo de agua en estado sólido originado a partir de la acumulación de precipitaciones de nieve, escarcha o granizo; que se compactan y forman hielo. Dicha agua puede volver nuevamente a su estado líquido o gaseoso, en procesos de sublimación o fusión. La precipitación sólida que se deposita, se agrupa en estratos y existe modificación física en los copos de nieve; a mayor acumulación el espesor de las capas subyacentes disminuye y por ende también su porosidad; en este proceso de compactación la densidad de la nieve fresca aumenta de  $100 \text{ kg/m}^3$  a  $920 \text{ kg/m}^3$  en el hielo. (Arias 2010).

Los glaciares pueden ser clasificados de acuerdo a su tamaño, relación con la geografía y a su temperatura, siendo este parámetro físico el que mejor nos permite hacer distinciones entre los cuerpos de hielo: a) Masa Polar, caracterizada por hielo perenne en condiciones térmicas de "hielo frio". b) Masa de Hielo Temperado, en hielo se encuentra "cálido" durante al menos una parte del año. c) Masa de hielo Politemperado, situado entre las dos clasificaciones anteriores, experimente fusión durante o todo el año sin afectar a toda la masa de hielo. (Hubbard an Glasser 2005)

### **2.2.2 Partes de un glaciar**

#### **2.2.2.1 Zona de Acumulación**

Zona del glaciar donde se deposita la precipitación sólida, y la acumulación de ella supera a la cantidad de agua que se funde o sublima; para el caso de glaciares de montaña esta zona se asocia al perímetro cercano a la cumbre del nevado. (Fig. 6).

#### **2.2.2.2 Zona de Ablación**

Área donde las pérdidas de agua por sublimación o fusión superan a la cantidad de agua sólida precipitada; en los glaciares montañosos esta zona se ubica en la parte de las lenguas glaciares (Fig. 2.6).



### 2.2.2.3 Línea de Equilibrio

Línea que separa la zona de acumulación y ablación, sobre ella el glaciar tendrá un balance de masa positivo, mientras que bajo de ella será negativo. Para el volcán Antisana esta línea ha sido ubicada aproximadamente a los 5100 msnm (Francou et al., 2011).

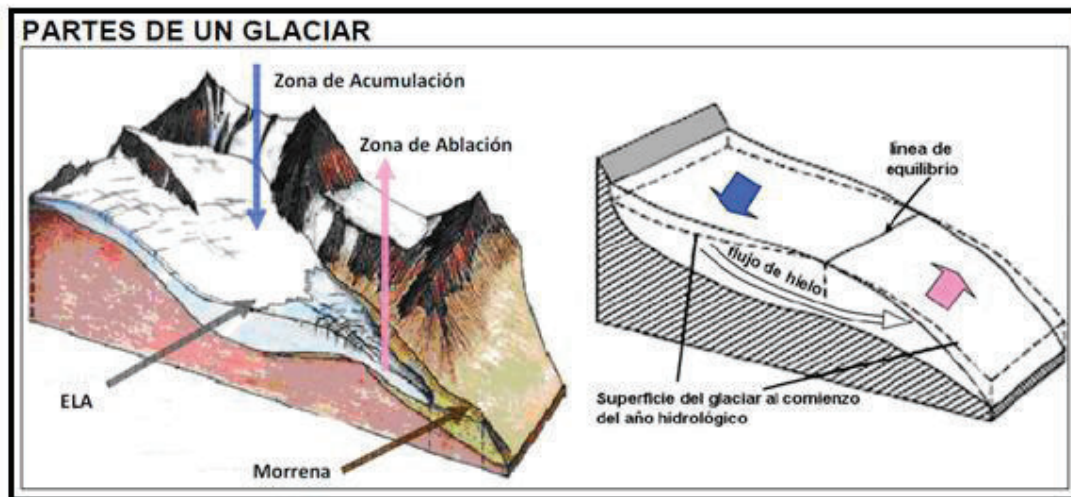


Figura 2.6 Partes de un glaciar de montaña (Arias 2010).

## 2.3 Fundamentos de la Técnica Radar de Suelo

### 2.3.1 Introducción

El Radar Geológico, Radar de Penetración de Suelo, Georadar o GPR, es una técnica geofísica de baja profundidad (profundidad máxima de penetración decenas de metros), que se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos de corta duración (1-20 ns) con una frecuencia regulable según el objetivo y alcance del estudio entre los 10MHz y 2.5GHz (Biskup et al., 2010). El objetivo final es obtener radargramas, que son imágenes del subsuelo muy similares a las obtenidas por los métodos clásicos de sísmica de reflexión. Las principales bondades de esta técnica son la rápida obtención/procesamiento de datos y su alta resolución. Se puede decir que es uno de los métodos más modernos de prospección geofísica no destructiva, comenzando su uso cerca 1930 con la

medición de espesor de glaciares , logrando gran desarrollo desde 1970 hasta la actualidad (Ortiz y Crespo, 2012). Las aplicaciones más frecuentes son:

#### Geología:

- Prospección minera de baja profundidad para delimitar vetas mineralizadas.
- Estudio de suelos para describir la estratigrafía y mapear la roca madre.
- Localización de niveles freáticos .
- Localización de fracturas y discontinuidades en las rocas.

#### Medio ambiente

- Localización de plumas contaminantes
- Localización de servicios enterrados y depósitos enterrados
- Delimitación de vertederos

#### Riesgos geológicos:

- Localización de procesos de disolución y subsidencia.
- Estructura subsuperficial de deslizamientos.

Otras ciencias donde tienen cabida sus aplicaciones son la arqueología y geotecnia (Fig. 2.7) (Ortiz y Crespo, 2012).

Las principales ventajas del método geofísico GPR con respecto a otros son: la rapidez de obtención de datos y procesamiento, no genera impactos ambientales así que puede ser empleado en áreas naturales protegidas, versatilidad para diversos entornos, recolección continua de datos, además de que es un buen complemento para otro tipo de métodos como la tomografía sísmica. Claro está que tiene sus limitaciones relacionadas a la profundidad, la saturación de agua en el suelo y la litología. (Ortiz y Crespo, 2012).

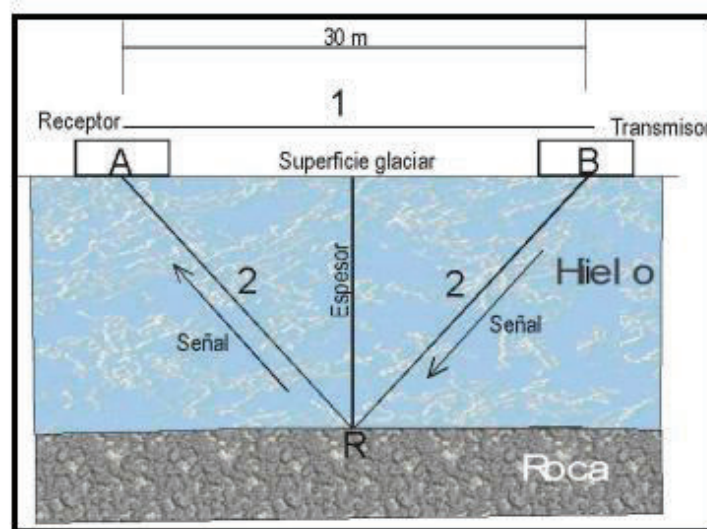




*Figura 2.7 Collage de varias Aplicaciones técnicas del Método GPR. (Mala Science 2015).*

### 2.3.2 Principio Geofísico y Operativo

Se fundamenta en la capacidad de las ondas de radar de baja frecuencia (10 MHz - 2,5 GHz) para propagarse a través de medios poco conductivos. El método emplea una antena emisora para dirigir pulsos electromagnéticos de corta duración (1-20 ns), hacia el interior del terreno. Este frente de ondas es parcialmente reflejado al encontrar una discontinuidad o un cambio de material en el subsuelo, pudiendo ser detectado en la superficie mediante una antena receptora dispuesta a tal efecto (Fig. 2.8) (Bizkup 2010).



*Figura 2.8 Emisión y recepción del impulso electromagnético , principio físico y operativo del GPR. (Cáceres et al., 2004).*

Un equipo de Georadar en esencia consta de los siguientes elementos:

- Antena emisora.
- Antena receptora.
- Unidad de control
- Pantalla

El funcionamiento de forma simplificada es el siguiente: La antena emisora genera sobre el suelo pulsos de señal electromagnética de determinada frecuencia, en el trayecto pueden sufrir tres procesos, atenuación, reflexión o refracción; los dos últimos suceden en la interface entre materiales con diferentes propiedades electromagnéticas, y la atenuación ocurre como consecuencia de la pérdida de energía de las ondas electromagnéticas al transitar los materiales, y por ende entre más distancia recorrida será mayor la atenuación (Ortiz y Crespo, 2012). Las ondas reflejadas retornan a superficie donde son recolectadas por la antena receptora, la cual registra el tiempo de viaje y la intensidad de la señal recibida. Esta información se transfiere a la unidad de control, que procesa los datos, para luego transmitirlos a la pantalla donde puedan ser visualizados en tiempo real.

Como se mencionó anteriormente, las ondas electromagnéticas son reflejadas al existir un cambio en las propiedades electromagnéticas de los materiales, que podrían ser causadas por variaciones en el contenido de agua, presencia de superficies o discontinuidades estratigráficas, cambios de densidad en los materiales, o presencia de cavidades, entre otras; de tal manera el éxito del método GPR depende de que exista en el suelo superficies con contraste dieléctrico suficiente para que genere el fenómeno de reflexión. La profundidad y resolución de los datos depende de la constante dieléctrica y la longitud de onda, por ende profundidad y resolución son inversamente proporcionales, a mayor profundidad menor resolución y viceversa. (Ortiz y Crespo, 2012).

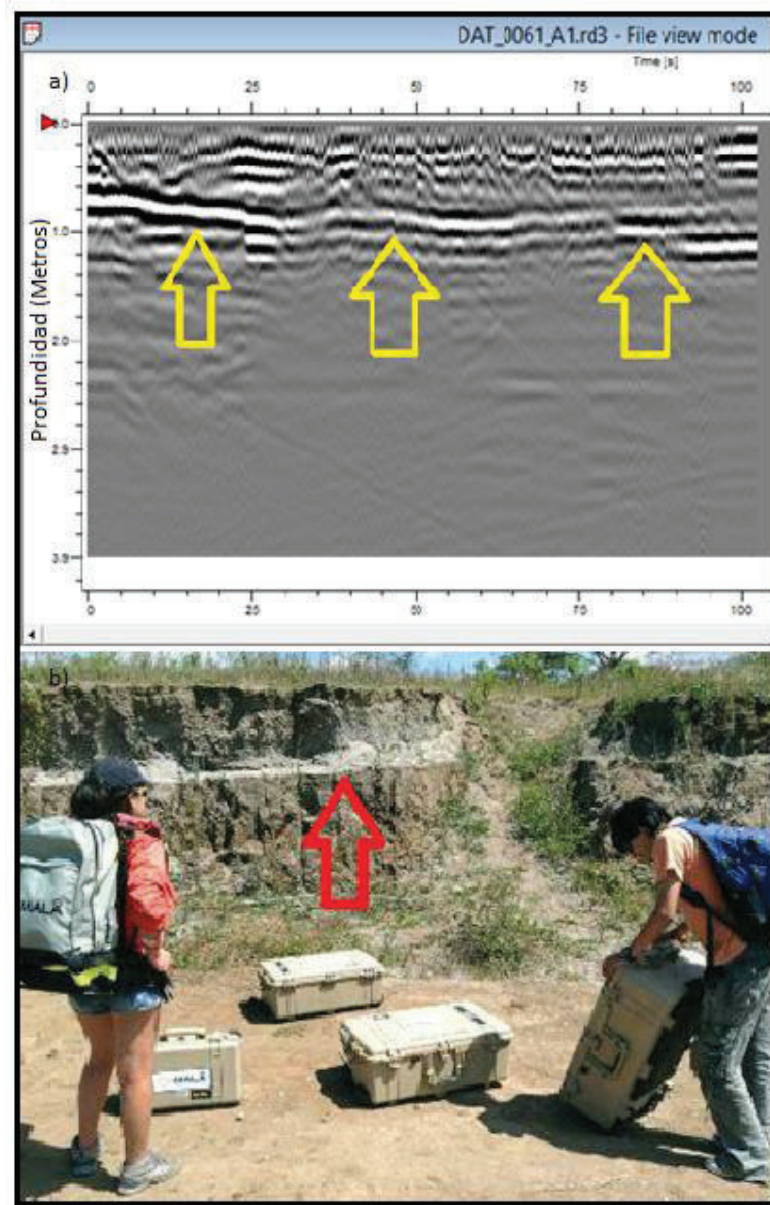


Figura 2.9 a) Radargrama filtrado donde se indica con flechas amarillas la base de un depósito volcánico sobre un paleosuelo, el contraste de materiales es importante. El primer material es ceniza y otros productos volcánicos no consolidados y en la parte baja un paleo suelo bien compactado con granulometría tipo arena fina a limosa. b) La fotografía indica parte de la estudio

Los parámetros que controlan el comportamiento de las ondas electromagnéticas en su viaje por el suelo son los siguientes:

**Constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ )**, factor adimensional que depende de la conductividad eléctrica de un material y el espesor del mismo. Se lo obtiene al evaluar la permitividad al paso de un impulso electromagnético por un material con respecto a la permitividad del vacío. Esta es la principal magnitud física en la que se basa el método GPR.

La **conductividad eléctrica ( $\sigma$ )**, es la capacidad de un medio para conducir un impulso electromagnético a través de él; numéricamente se expresa como la inversa de la resistencia en Siemens/m en el sistema internacional de medidas.

Material	Permitividad Eléctrica Relativa ( $\epsilon_r$ )	Conductividad Eléctrica ( $\sigma$ ) [ $mS m^{-1}$ ]	Velocidad (V) [ $\times 10^8 ms^{-1}$ ]	Atenuación( $\alpha$ ) [ $sBm^{-1}$ ]
Aire	1	0	3.0	0
Agua destilada	80	0.01	0.33	0.002
Agua Fresca	80	0.5	0.33	0.1
Agua Salada	80	3000	0.1	1000
Arena seca	3 - 5	0.01	1.5	0.01
Arena Saturada	20 - 30	0.1 - 1.0	0.6	0.03 / 0.3
Limo	5 - 30	1 - 100	0.7	1 - 100
Arcilla	5 - 40	2 - 1000	0.6	1 - 300
Granito	4 - 6	0.01 - 1	1.3	0.01 - 1
Hielo	3 - 4	0.01	1.67	0.01

*Tabla 2.0.1 Propiedades eléctricas de los materiales comunes en la superficie terrestre. (Hubbard and Glasser, 2005).*

La atenuación de la señal, y por ende la disminución en la penetración de las ondas electromagnéticas GPR, es directamente proporcional a la conductividad del suelo y de las rocas (suelos arcillosos y saturados con sales y agua son altamente conductivos). Por otra parte a mayor constante dieléctrica (p.e. mayor

contenido de agua) menor capacidad de propagación de la ondas electromagnéticas.

Cuando analizamos la capacidad de penetración, también se debe considerar la frecuencia de la antena utilizada, antenas de baja frecuencia, menor a 100 MHz tienen mayor capacidad de penetración, superior a los 9 metros, pero menor resolución, el tamaño de los objetos que pueden ser detectados con este tipo de antenas debe ser mayor a los 6 metros. ( Mala Science. 2012).

### 2.3.2.1 Tipos de antenas

Los equipos Radar de Penetración de Suelo de última tecnología se caracterizan por la compatibilidad con diversos tipos de antenas, a continuación serán mencionadas las más comunes:

**Antenas blindadas:** se emplean en estudios estratigráficos-sedimentológicos y geotécnicos (Fig. 2.10), dichas antenas tienen una cobertura aislante que dirige la señal de radar al suelo, para que no sea afectada por objetos superficiales. Además estas antenas funcionan con señales en el rango de 200Mhz y 500 Mhz, permitiendo tener mayor susceptibilidad a cambios litológicos moderados, permitiendo realizar un análisis estratigráfico detallado. (Mala Science 2015).



*Figura 2.10 Radar XPro Mala con una antena blindada de 200Mhz empleada en investigación estratigráfica. (Mala Science. 2015).*



**Antenas no blindadas todo terreno RTA:** se utilizan principalmente para investigaciones geológicas profundas, algunas aplicaciones incluyen: cartografía de aguas subterráneas, localización de roca madre, medición de espesor de depósitos volcánicos; y en ciencias afines puede ser utilizado en glaciología para medir el espesor de hielo en montes y volcanes nevados (Fig. 2.11), investigaciones arqueológicas y antropológicas, para localizar construcciones enterradas; entre otros usos.



*Figura 2.11 Radar ProEx Mala 25Mhz, utilizada en medición de espesor de glaciares. (Mala Science. 2015)*

Las antenas todo terreno RTA utilizan una faz de baja frecuencia para proporcionar una penetración más profunda, tienen un diseño de serpiente para facilitar su movilización por terrenos agrestes y con topografía pronunciada. Comúnmente se tiene tres tipos de antenas RTA, de 25, 50 o 100 MHz, en particular la de 25 MHz permite llegar a mayores profundidades y es menos susceptible al ruido ambiental y al ruido generado por la saturación de agua en el suelo, con respecto a las otras dos antenas; sin embargo las antenas de 50 MHz y 100 Mhz nos permiten discriminar cuerpos con menor contraste con respecto al

medio, pero su vez esta mayor definición les convierte en más vulnerables a ruido ambiental y facilita la recepción de falsos reflectores.

La principal desventaja de este tipo de antenas es que emiten su señal radar en tres dimensiones, y en ocasiones objetos superficiales pueden aparecer en los radargramas.

### 2.3.2.2 Velocidad de la onda de Radar y profundidad de superficies reflectivas.

La velocidad propagación (V) de las ondas Radar en los materiales está definida por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\left(\frac{\epsilon}{2}\right)[(1+P^2)+1]}} ;$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz =  $3.0 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ,  $\epsilon$  es la Permitividad Eléctrica del medio, P es el factor de pérdida de la señal radar.

Para el caso específico del hielo, el factor de reducción es prácticamente nulo, por lo que la ecuación se reduce a :

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} ;$$

Con un valor aproximado de  $1.67 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$  o  $167 \text{ m us}^{-1}$  para condiciones optimas de temperatura y humedad (Hubbard and Glasser, 2005).

El espesor de una capa de hielo (Fig. 2.8) puede ser calculado a partir del viaje de la onda desde su emisión, reflexión y retorno como una distancia total de  $2d$ , empleando el tiempo (t) de two-way travel, con la velocidad de propagación (V) de las ondas; se incorporan estas variables en la siguiente ecuación:

$$d = \frac{tc}{2\sqrt{\epsilon}} ;$$

## 2.4 Fundamentos Geoestadísticos

### 2.4.1 Introducción a la Geoestadística

Es una rama de Geografía matemática, que puede explicar la variabilidad espacial y los patrones de una variable desde el punto de vista de su autocorrelación, describe la relación entre las medidas de diferentes ubicaciones o tiempos, separados por cierta distancia o tiempo. (Biswas and Cheng, 2013).

La Geoestadística realiza Interpolaciones empleando modelos matemáticos para predecir valores desconocidos a partir de valores medidos espacialmente localizados, uno de estos métodos es el Kriging, que es posiblemente el más empleado en las Ciencias de la Tierra.

### 2.4.1 Kriging

Método de interpolación lineal desarrollado inicialmente a mediados del siglo pasado por Danie G. Grigie a partir de análisis de regresión entre muestras y bloques de mena, los cuales fijaron las bases para la geoestadística (Wikipedia.org, 2015).

El método de Kriging puede ser explicado como una predicción lineal o inferencia bayesiana<sup>1</sup>, fundamentada en el principio de variables regionalizadas: puntos cercanos en el espacio tienden a tener valores más parecidos entre sí, que con los puntos más lejanos; asumiendo que los datos recolectados de una población se correlacionan espacialmente de acuerdo a funciones homogéneas para toda el área estudiada. Las funciones se deducen analizando la correlación espacial entre datos en función de la distancia entre ellos midiendo la semivarianza entre datos separados por distancias diferentes (SpacialAnalyst.net,2015).

### 2.4.2 Semivarianza y semivariograma

La semivarianza (s) se define como la medida del grado de dependencia entre dos muestras. La distancia entre muestras gobierna la magnitud de la semivarianza, en distancias menores menor semivarianza y por ende a mayores

---

<sup>1</sup> La inferencia bayesiana es un tipo de inferencia estadística en la que las evidencias u observaciones se emplean para actualizar o inferir la probabilidad de que una hipótesis pueda ser cierta (Wikipedia.org 2015)



distancias será mayor la semivarianza. Gráficamente la semivarianza se representa a partir de gráficos bidimensionales llamados semivariogramas, donde se representa la semivarianza ( $\gamma$ ) en función de la distancia ( $h$ ).

La semivarianza se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i + h) - z(x_i)]^2$$

Donde  $n$ : número de pares,  $Z(x_i + h)$  y  $z(x_i)$  son muestras separadas una distancia  $h$ .

Este tipo de gráficos tienen esencialmente tres partes (Fig. 2.12): **Sill** ( $C + C_0$ ) es la zona donde la función se estabiliza en el valor de la varianza media y la semivarianza no aumentará más con la distancia, dicho de otra manera, a partir de ese valor con el aumento de la distancia no variará la relación entre datos. **Range** ( $a$ ) es la distancia entre el inicio del semivariograma y el Sill, es la distancia a partir de la cual la relación entre datos se estabiliza y no varía más. La intersección de la curva del variograma con el eje Y (semivarianza) se llama **Nugget** ( $C_0$ ), representa la variación causada por errores de muestreo o por la microvariabilidad entre los datos.

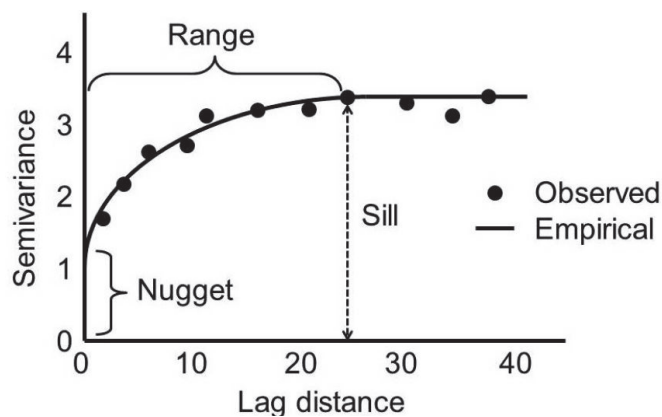


Figura 2.12 Ejemplo de Semivariograma (Biswas and Cheng, 2013).

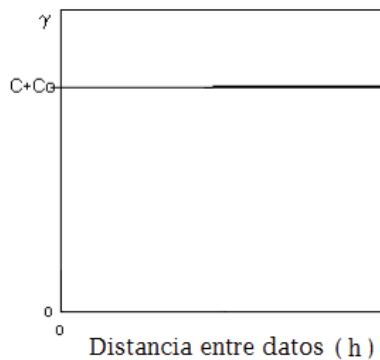
### 2.4.3 Variograma

El primer paso para realizar una interpolación por Kriging es construir un semivariograma, calculando la semivarianza para cada punto en relación a los demás, se parte de este gráfico para aproximar al modelo de variograma que mejor representa a la curva obtenida.

Generalmente se emplean cinco tipos de variogramas para analizar el comportamiento espacial de la variable:

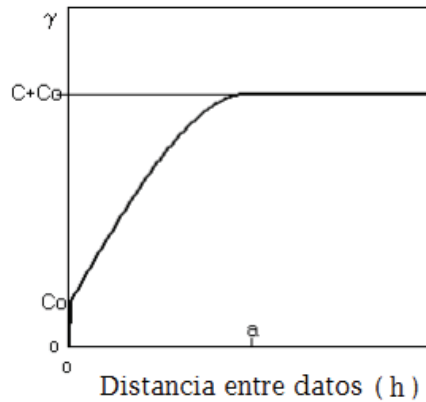
- **Modelo Efecto Nugget** , representa un fenómeno completamente aleatorio, no existe correlación espacial, sin importar la distancia entre los valores nunca estarán relacionados.

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } |h|=0 \\ s & \text{si } |h| \neq 0 \end{cases}$$



- **Modelo Esférico**, representa fenómenos sumamente continuos, sin que sean diferenciables, es apropiado para el caso de tres dimensiones (Diaz, 2002)

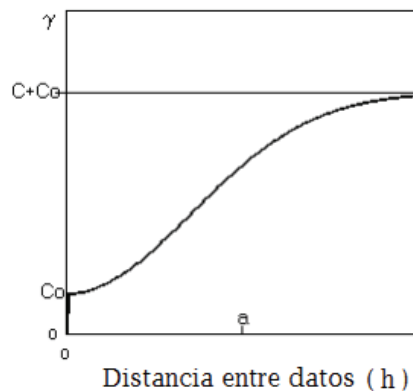
$$\gamma(h) = \begin{cases} \frac{s}{2} \left\{ 3 \left( \frac{h}{a} \right) - \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right\} & \text{para } 0 \leq h \leq a \\ s & \text{para } h > a \end{cases}$$



- **Modelo Gaussiano**, representa fenómenos bastante continuos e infinitamente diferenciables.

$$\gamma(h) = S \left( 1 - e^{-\left(\frac{h}{r}\right)^2} \right) \text{ para } h \geq 0 ;$$

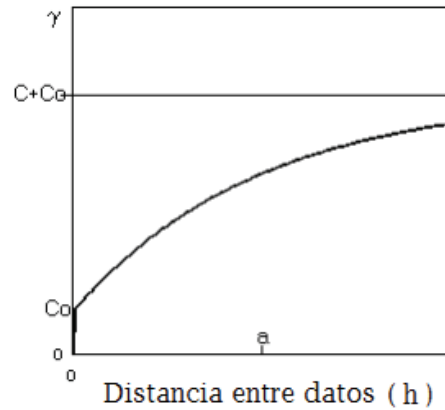
Donde  $r$  es un parámetro no lineal que determina la escala espacial de la variación, como rango efectivo de considera  $a = \sqrt{3r}$ .



- **Modelo Exponencial**, representa fenómenos continuos pero no diferenciables.

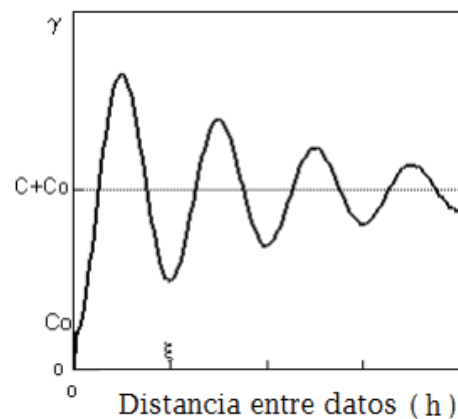
$$\gamma(h) = S \left( 1 - e^{-\frac{h}{r}} \right) \text{ para } h \geq 0 ;$$

Donde  $r$  es un parámetro no lineal y el rango efectivo es  $a = 3r$ .



- **Modelo Seno Cardial**, se utiliza para representar fenómenos cíclicos y continuos.

$$\gamma(h) = s \left( 1 - \frac{\text{seno}(|h|/a)}{|h|/a} \right)$$



#### 2.4.5 Cálculo del Kriging.

El Kriging es una técnica de promedio móvil, que emplea los parámetros del variograma para obtener la relación entre datos puntuales, siendo un variograma un prerequisite para realizar este proceso geoestadístico. (P. Duque, comunicación personal 2010).

Una vez obtenido el modelo de variograma que mejor se adapte a los datos empleados, se procede a realizar el Kriging, a partir de la siguiente fórmula general:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f_i$$

Donde :  $n$  es el número de muestras,  $f_i$  es el valor obtenido para cada punto  $i$  y  $w_i$  es el peso designado al punto  $i$  ; el cálculo de peso dependerá del tipo de Kriging utilizado.

Tipos más frecuentes de Kriging:

**Kriging Ordinario**, el peso de los puntos muestreados es obtenido a partir de normalizar el peso de cada punto a la media de todos los puntos de una población. Es el tipo de Kriging más utilizado. (Díaz 2002)

**Kriging Simple**, normaliza la ubicación promedio de los pesos.

**Kriging Universal**, variante de kriging ordinario, que necesita un mapa de puntos para generar mapas raster con las estimaciones realizadas (spatial analyst.net)

Uno de los aspectos de mayor utilidad en el estudio de las variables espaciales y la predicción de valores en puntos no muestreados a través del uso de las interpolaciones, son las herramientas SIG muy utilizadas en conjunto con las metodologías de muestreo (Henriquez et al.,2005). El manejo de datos geoestadísticos, la aplicación de variogramas y Kriging, se realizan de una manera rápida y versátil a través de varios sistemas de información geográfica disponibles en el mercado.

## **CAPÍTULO 3**

## **3 Desarrollo de la Investigación**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

En este proyecto se siguió la lógica de un trabajo de exploración geofísica :

En una primera fase de gabinete se recogió la información bibliográfica y cartográfica del volcán Antisana, para fijar las zonas de estudio en los glaciares #12 y #15 (Fig. 3.1). En varias reuniones de trabajo con el personal del departamento de Glaciología del INAMHI, se analizaron ortofotografías e imágenes satélites, y se establecieron las zonas más propicias para realizar los perfilajes con GPR. Por otra parte también se consultó los parámetros del equipo adecuados para las condiciones ambientales propias de glaciares de montaña en la bibliografía y publicaciones sobre el método GPR. Dichos valores fueron comparados con los empleados en las pruebas realizadas en la zona baja del Glaciar #12 en mayo de 2013 , y así se establecieron los parámetros a ser utilizados en el equipo GPR.

En una segunda fase que se llevó a cabo entre diciembre de 2013 y marzo de 2014 se efectuaron las distintas salidas de campo para realizar el levantamiento de perfiles. Este proceso fue intercalado con trabajo de gabinete para filtrar y procesar los datos, evaluar el trabajo realizado y así optimizar los labores en glaciar para futuras misiones.

La tercera fase, fue una etapa de gabinete donde se procesaron todos los datos obtenidos y como producto se generaron los mapas de puntos de profundidad, que son la base para el procesamiento geoestadístico.

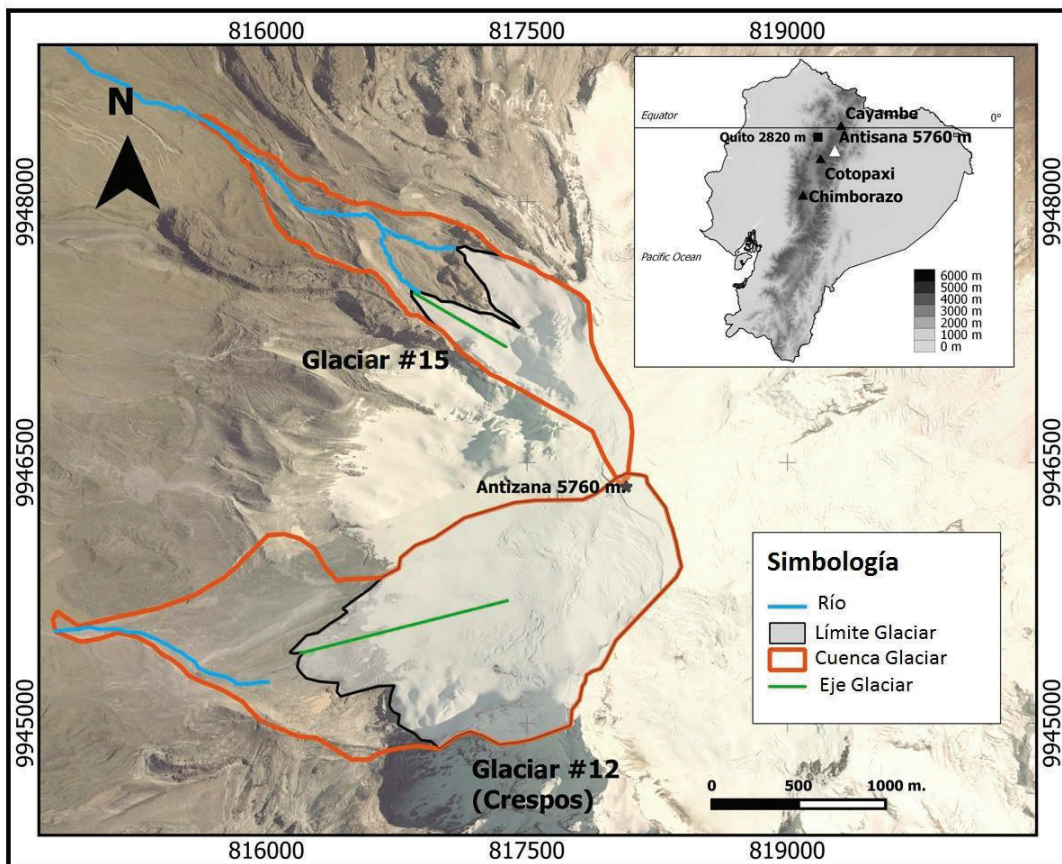


Figura 3.1 Mapa ubicación de los Glaciares # 12 y # 15, con sus respectivos ejes y límites laterales. Diseño realizado a partir de la Ortofotografía del Volcán Antisana generada por el Instituto Geográfico Militar. En la esquina superior derecha se presenta el mapa de ubicación del Volcán Antisana en el contexto nacional

### 3.2 Toma de Mediciones

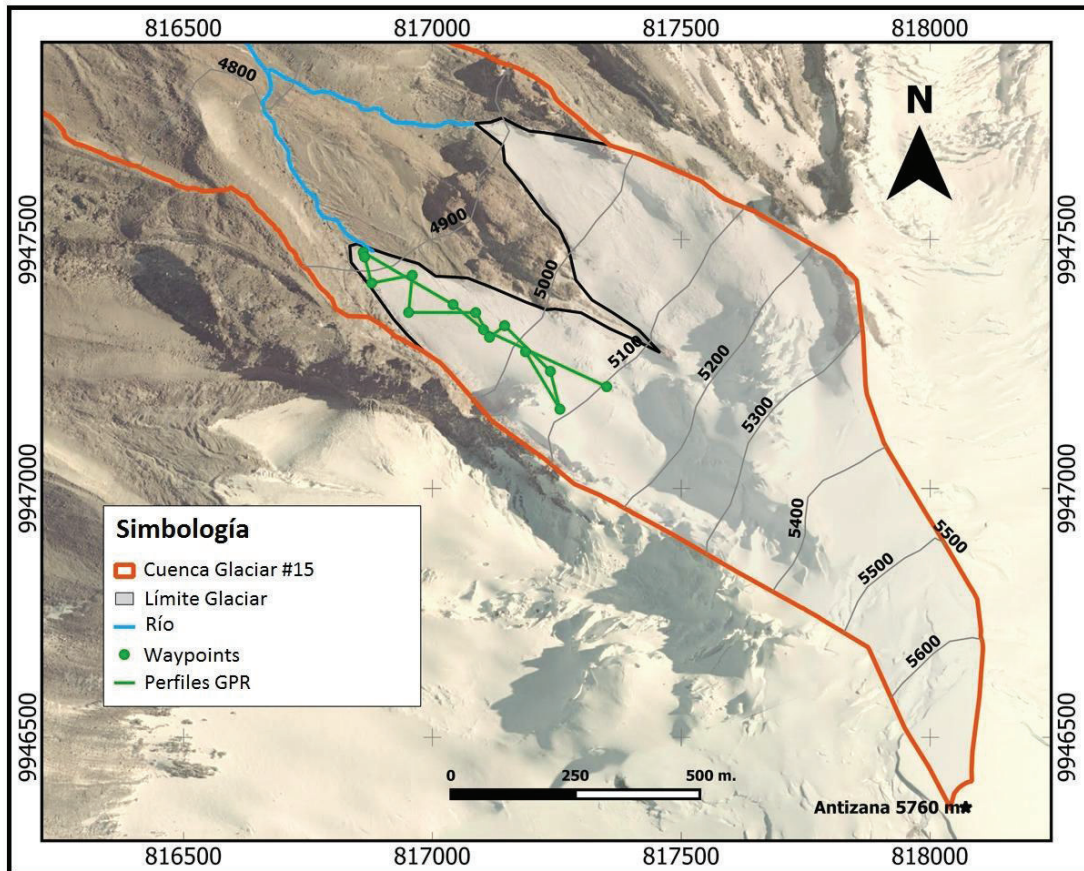
#### 3.2.1 Elección de sitios de medición

Las premisas que se consideraron para seleccionar los sitios donde se ubicarían los perfiles GPR fueron las siguientes:

- Ubicación con respecto a la morfología del glaciar.
- Zonas accesibles, con el mínimo riesgo ante avalanchas de nieve y grietas en el hielo.
- Los perfiles deben cruzarse entre sí, y deben atravesar el eje del glaciar (Fig. 3. 1).

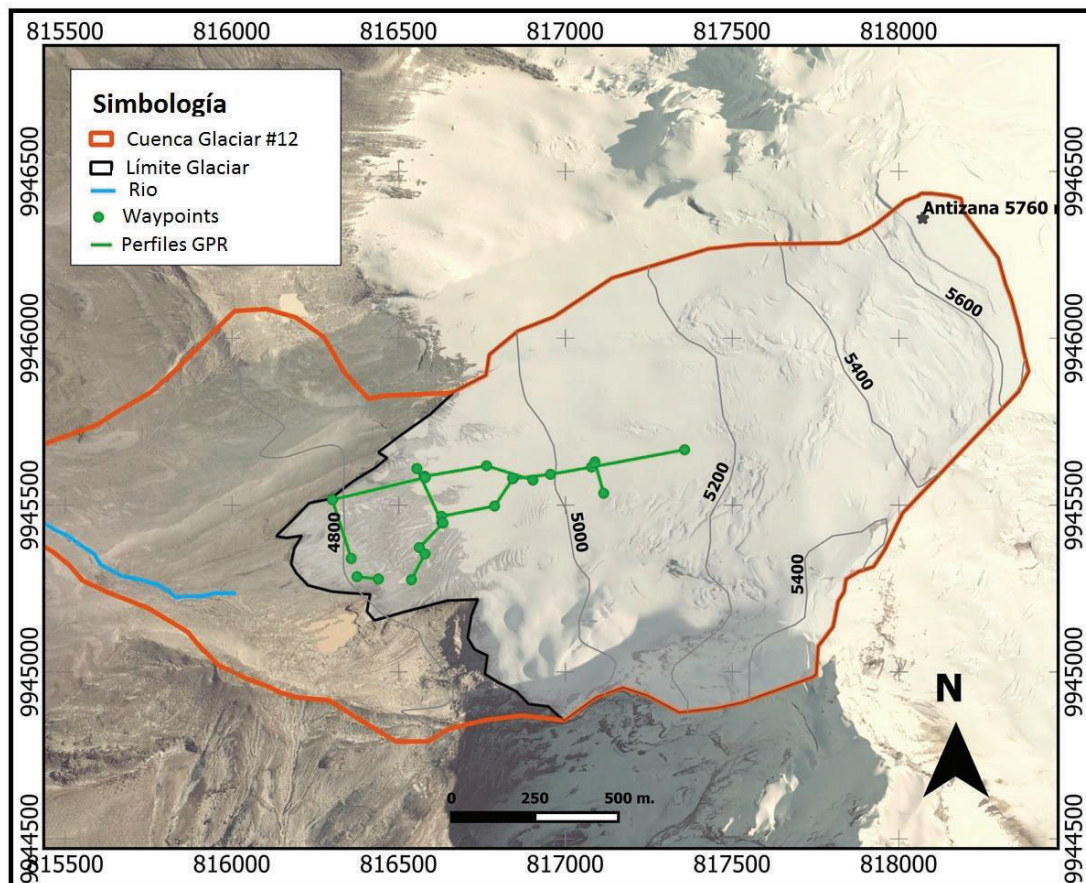


En el caso del Glaciar #15, al tener una forma alargada, se trazó un perfil siguiendo el eje del glaciar y varios perfiles que cruzarían en diagonal dicho eje de simetría. (Fig. 3.2).



*Figura 3.2 Mapa de ubicación de los perfiles GPR en el Glaciar # 15. Las curvas de nivel corresponden a la topografía.*

Para el caso del Glaciar # 12 , los perfiles fueron ubicados de manera irregular, siguiendo más bien las zonas accesibles y seguras. En este glaciar el acceso es complicado y riesgoso, debido a la gran cantidad de grietas, de hecho por la presencia de estas los andinistas lo llaman comúnmente "Crespos", refiriéndose a las trenzas que se forman por la acumulación de nieve en las grietas ubicadas aproximadamente desde los 4800 hasta los 4900 msnm en este glaciar. ( Fig. 3.3).



*Figura 3.3 Mapa de ubicación de los perfiles GPR en el Glaciar # 12. Las curvas de nivel corresponden a la topografía.*

### 3.2.2 Misiones de Campo

Las condiciones del trabajo de campo para la toma de mediciones representaron un desafío logístico y técnico, debido al riesgo que implican las labores en alta montaña, así que se debió crear protocolos y una metodología de trabajo, la cual se resume a continuación:

El equipo humano debe estar formado por mínimo cinco miembros (Fig. 3.4). La primera cordada<sup>2</sup> está compuesta de al menos 2 personas y su misión es guiar la expedición y definir una ruta segura sobre el glaciar. Detrás viene la cordada Principal que llevará el equipo GPR, y debe estar conformada por tres personas, delante el jefe de la cordada, quien da seguridad y registra la ruta mediante un

<sup>2</sup> Cordada: Grupo de alpinistas sujetos por una misma cuerda. WordReference.com

GPS de mano, seguido del operario del GPR en el medio, y finalmente un alpinista ubicado aproximadamente a 15 metros por detrás, que suministra seguridad adicional al operario y ayuda a mantener la antena en posición recta, adecuada para obtener mejores registros. Es de suma importancia contar con uno o varios guías expertos en el glaciar estudiado, para conducir al equipo por el camino más seguro.



*Figura 3.4 Disposición del equipo de trabajo, por delante la cordada que guía a la expedición seguidos de la cordada que opera el equipo.*

### 3.2.3 Equipo Utilizado

El equipo empleado fue un GPR del Fabricante MALA GEOSCIENCE modelo ProEx , propiedad del Instituto Geofísico.



Figura 3.5 Componentes del GPR ProEx. 1) Mochila donde se guarda la Unidad de Control, 2) Antena no blindada, 3) Monitor, 4) Unidad de control , 5) Hilo para registrar distancia.

A continuación se citan algunas especificaciones técnicas del Equipo:

<b>Frecuencia de muestreo</b>	0.2 - > 400 GHz
<b>Interface de comunicación</b>	Ethernet
<b>Velocidad de comunicación</b>	100Mbit/s
<b>Modos de adquisición</b>	Distancia, tiempo, manual
<b>Tiempo de operación</b>	5 horas dependiendo de la antena
<b>Software</b>	GroundVision 2
<b>Antenas</b>	Manufactura de Mala
<b>Temperatura de operación</b>	-20°C a + 50°C
<b>Intervalo de muestreo</b>	Regulable

Tabla 3.1 Características técnicas del GPR ProEx , fuente :Manual MALA ProEx Control Unit , página 57.



En una fase de prueba, anterior a este proyecto de titulación se realizaron varios ensayos de factibilidad de uso de este equipo en la zona de ablación del Glaciar 12 del Antisana, en los meses de febrero y mayo de 2013. Durante dichas pruebas se utilizaron tres antenas, de 100 MHz, 50 Mhz y 25 MHz; llegándose a la conclusión de que el GPR ProEx Mala con una antena de 25 MHz puede ser utilizado para medir el espesor de hielo en las condiciones ambientales y topográficas de los glaciares de montaña; ya que los resultados obtenidos fueron coherentes y comprobables.



*Figura 3.6 Ensayos de Factibilidad de Uso de GPR ProEx Mala en la zona de ablación del Glaciar #12 Antisana, Febrero 2013.*

#### **3.2.4 Valores de los parámetros utilizados**

**Velocidad de Propagación** .- Como se mencionó en el capítulo # 2, el principio físico en el que se basa el método GPR es la propagación de ondas electromagnéticas en el suelo, para ello es importante fijar con la mayor exactitud posible la velocidad de propagación de las ondas radar en los distintos materiales. Dicha información suele estar disponible en forma de tablas publicadas por distintas fuentes. Para esta investigación utilizaremos los valores recomendados por Ramírez et al., (2010) :

Velocidad de la señal radar en el aire: 300 m/us

velocidad de la señal radar en hielo: 168 m/us

**Sampling Frequency (fs).**- La Frecuencia de muestreo es el intervalo en el que se toman muestras de las señales entrantes, medido por el número medio de muestras obtenidas en un segundo, de tal manera ,  $fs = 1 / T$  en Hz. Según el teorema de muestreo de señal (Yilmaz , 1987 ; Dobrin y Savit , 1988 ); el criterio que debe ser adoptado para la frecuencia de muestreo debe ser al menos dos veces tan alta como la frecuencia máxima del pulso , es decir :  $fs > 2f_{max}$ . ( GeoSence 2015) .Para el Caso de las mediciones de espesor de hielo en el Antisana se emplearon fs entre los 200 y 300 Mhz , es decir casi 10 veces más alta que el pulso de la antena de 25 MHz.

**Intervalo de tiempo .-** Es el intervalo de tiempo entre disparos de la señal radar, por ende entre menos tiempo se utilice más señales serán emitidas. En nuestro caso de estudio al tener que levantar perfiles de larga distancia y debido a que la velocidad de marcha es reducida, se optó por utilizar un intervalo de tiempo de disparo de 2 segundos, así no se saturaría la memoria del equipo y no sobrepondríamos datos.

### 3.2.5 Levantamiento de Perfiles

El proceso de perfilaje GPR inicia una vez alcanzada la zona del glaciar preestablecida , en este lugar se arma el equipo y se lo programa con los valores mencionados con anterioridad. Luego las cordadas se aseguran y comienza el levantamiento de información con la toma del punto GPS, posteriormente se pone en marcha al Radar de Penetración de Suelo; el ascenso se lo realizó a velocidad lo más constante posible y pretendiendo que la antena se deslice en posición recta y estirada; al llegar al punto final del perfil se detiene el levantamiento de señales radar en el GPR, se codifica el radargrama obtenido y se toma el punto GPS final.

Los levantamientos de perfiles se realizaron en horas de la noche y madrugada (Fig. 3.7) debido a que en ese período de tiempo el hielo se encuentra "frio". Esto

se debe a que durante el día el glaciar se funde levemente, lo cual provoca interferencia de la señal radar por agua en estado líquido; además de que el riesgo de caída de bloques de hielo y avalanchas es mayor en horas del día.



*Figura 3.7 Punto final un levantamiento de un perfil en el glaciar #15 Antisana. En este sitio se procede a la toma del punto GPS y codificación del radargrama.*

Como resultado en el Glaciar # 12 se levantaron en total 14 perfiles con una longitud total de 1915 metros (Fig. 3.2), y en el Glaciar # 15 se efectuaron 11 perfiles con una longitud total de 1382 metros (Fig. 3.1).

### **3.2.6 Procesamiento de Radargramas y filtrado**

Para esta tarea se utilizó el programa provisto por el fabricante Mala GeoScience, GroundVision 2.0, el cual es de acceso libre. Dicho software presenta una plataforma sencilla, permite calibrar filtros y realizar correcciones de profundidad

fijando la velocidad de propagación en el medio estudiado, pero no permite corregir distancia horizontal. Estas características los convierten en un software de fácil uso y aprendizaje

### 3.2.6.1 Uso de Ground Vision 2.0 para trabajar con radargramas

Una vez descargados los archivos en una terminal Windows, los pasos a seguir para tratar los radargramas son los siguientes:

1. Se abren los archivos , dando click en File , luego en Open , y aparece una ventana emergente donde seleccionamos el radargrama a ser tratado , estos archivos se presentan con la extensión \*.rd3

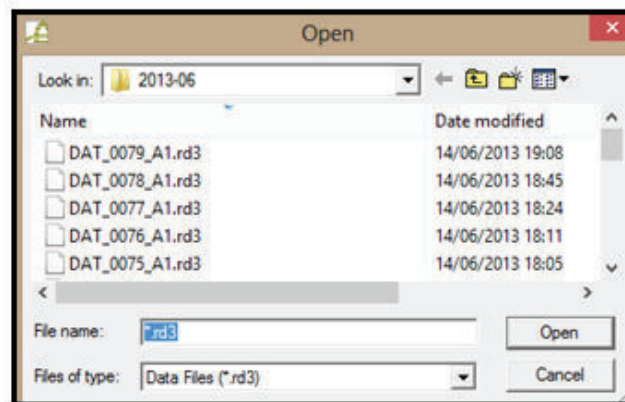


Figura 3.8 Ventana emergente donde se muestran los archivos

2. Se Ajusta las unidades de los ejes. Para ello vamos a la opción Tools de la barra de herramientas , luego damos click en Options.

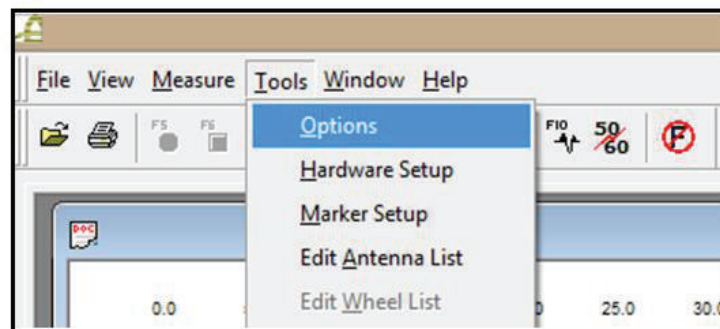


Figura 3.9 Pestaña de Herramientas.



Emerge una ventana donde elegimos las unidades de los ejes del radargrama. Por comodidad y para mayor facilidad en la interpretación ,tanto el eje X y el eje Y son puestos en metros. Además en esta ventana podemos definir la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el medio que fue hecho el estudio, en nuestro caso 168 m/us para el hielo.

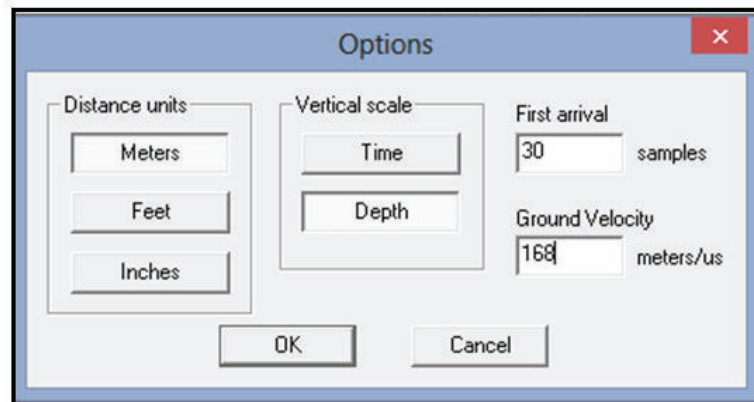


Figura 3.10 Venta de opciones de unidades de los ejes.

3. Ajustamos el color de contraste, aplastando la tecla F8 o dando click en la opción "Contrast Control"

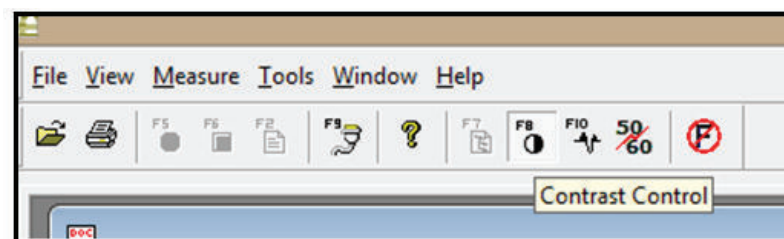


Figura 3.11 Barra de Herramientas, botón de control de contraste.

Aparecerá una pequeña ventana donde podemos escoger el color de contraste negro-blanco , según nos convenga y facilite la visualización del radargrama.

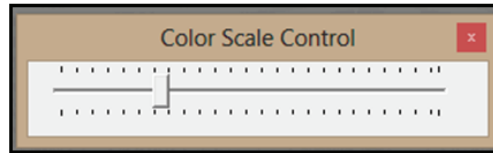


Figura 3.12 Control de Escala de Color

4. Lo siguiente es el proceso de filtrado. Para esto se accede a los diferentes filtros escogiendo la opción View de la barra de herramientas, y luego seleccionando Filter Manager.

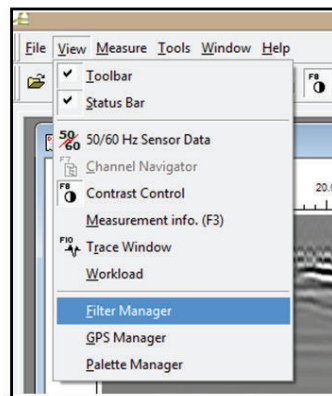


Figura 3.13 Pestaña de visualización, opción filtro.

Aparecerá una ventana donde están todos los filtros disponibles y los que se utilizan en ese momento. Para cada radargrama será necesario una diferente combinación de filtros, por lo que se debe ir probando uno a uno los filtros hasta obtener el mejor resultado posible.

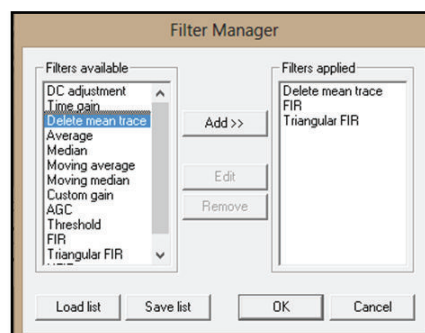
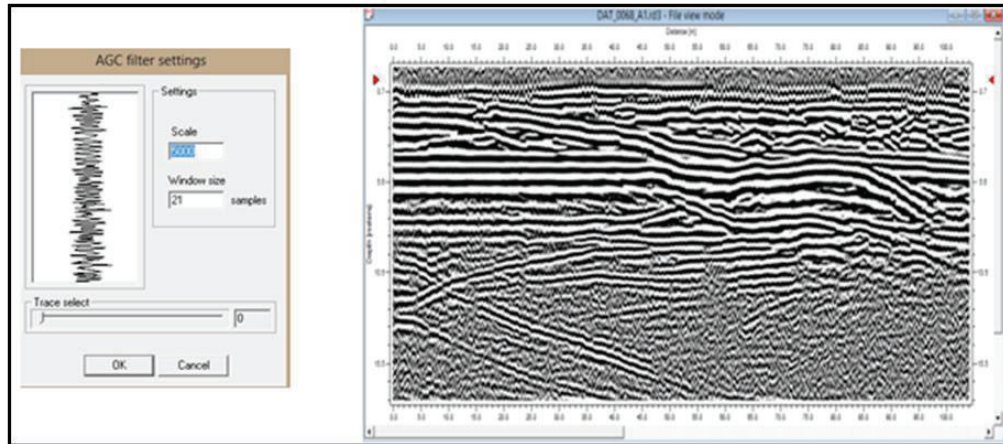


Figura 3.14 Catálogo de Filtros y filtros escogidos.

Al escoger un filtro aparece una nueva ventana donde se muestra lo que el filtro está realizando sobre la señal radar recibida, entonces esta imagen servirá para ver cual filtro va a ser útil o no para nuestro radargrama.

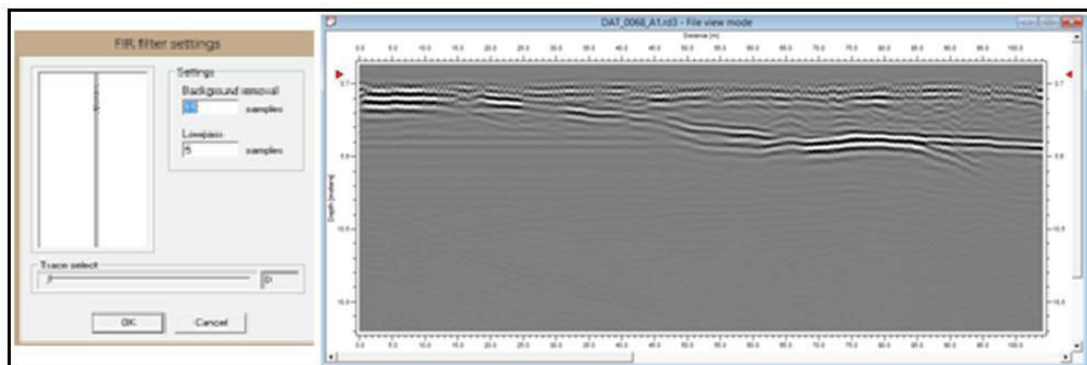
Ejemplo:

- Filtro que va a distorsionar el radargrama, maximizando el ruido:



*Figura 3.15 Ventana de parámetros del filtro y Radargrama corregido con esa configuración de filtro.*

-Filtro que va a mejorar el radargrama, elimina ruidos y resalta superficie reflectiva.



*Figura 3.16 Venta de parámetros del filtro y Radargrama corregido con esa configuración de filtro. Glaciar Antisana #12.*

Como se mencionó anteriormente , se debe ir probando y variando la conjugación de filtros para ver cual combinación de ellos nos genera una mejor imagen, para este caso específico de espesor de glaciares se empleó la siguiente miscelánea de filtros:

- **Delete mean Trace.-** Elimina características horizontales y casi horizontal en el radargrama restando un rastro medio calculado a partir de todos los rastros, suprimiendo así la señal del primer arribo.

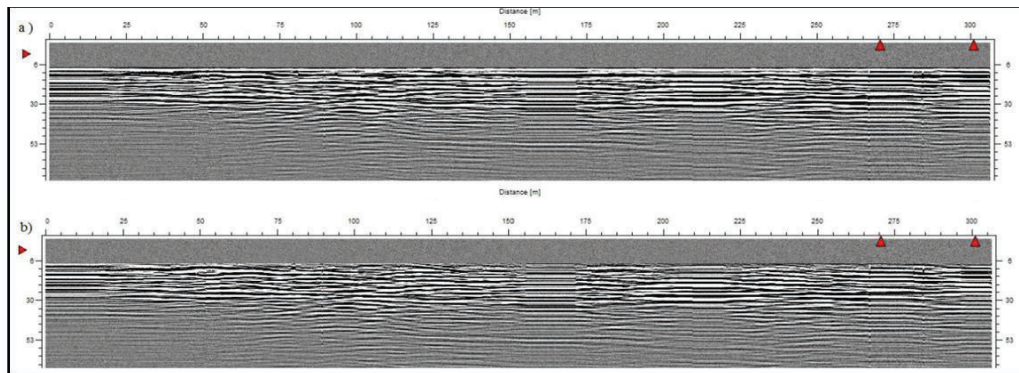


Figura 3.17 a) Radargrama en bruto. b) Radargrama aplicado el filtro Delete mean trace. Perfil 2 Glaciar #15.

- **Average.-** Calcula la media a lo largo de un número dado de muestras y trazas. La muestra en el medio de la red se sustituye por la media. Este da una imagen más suave.

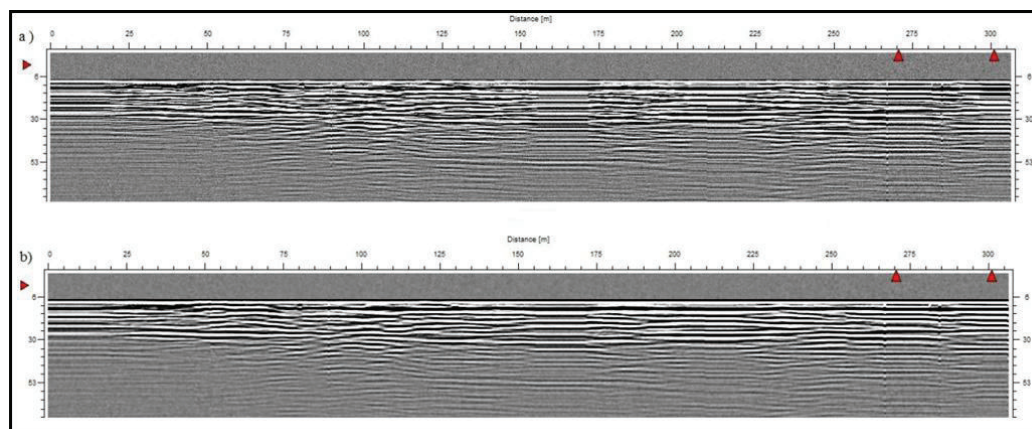


Figura 3.18 a) Radargrama en bruto. b) Radargrama aplicado el filtro Average . Perfil 2 Glaciar #15



- **Thershold.-** Fija en cero a todas las muestras por debajo del umbral.

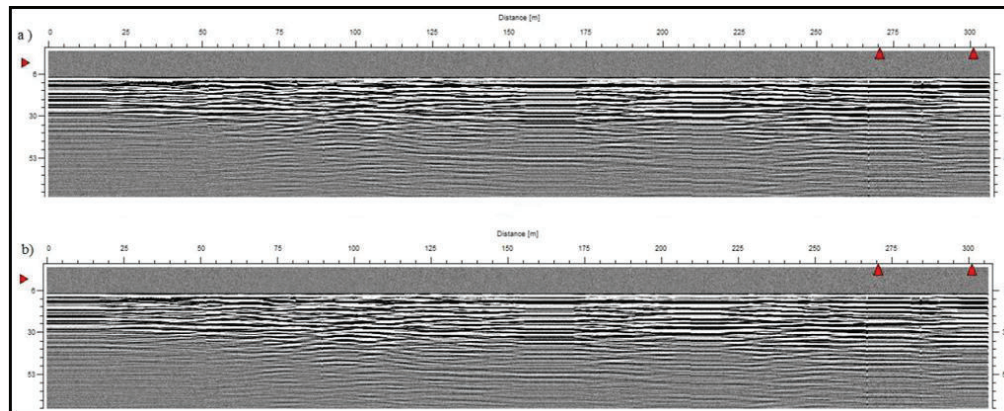


Figura 3.19 a) Radargrama en bruto. b) Radargrama aplicado el filtro Thershold. Perfil 2 Glaciar #15.

- **FIR.-** Es un filtro de banda rápida, trabaja con la combinación de dos algoritmos (en promedio) . En primer lugar las frecuencias más bajas se atenúan restando el promedio de las muestras. A continuación, las frecuencias más altas se atenúan mediante la sustitución de cada muestra con la media calculada luego del primer algoritmo. En esencia elimina las frecuencias más bajas y más altas.

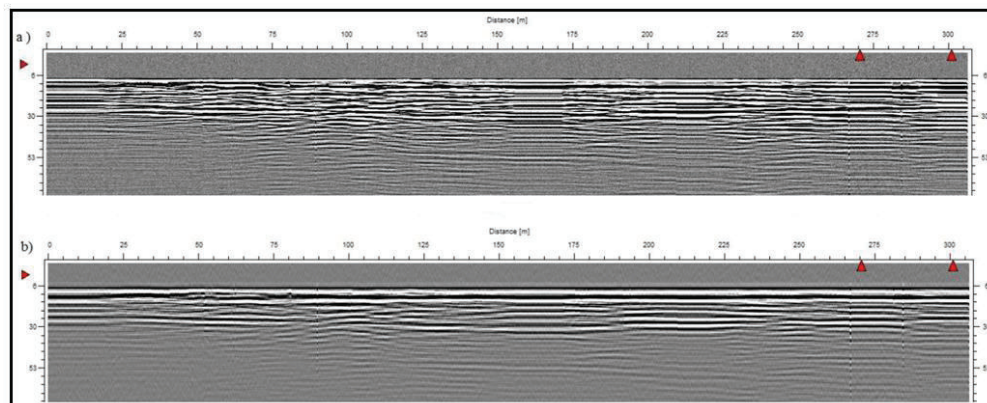


Figura 3.20 a) Radargrama en bruto. b) Radargrama aplicado el filtro FIR. Perfil 2 Glaciar #15.

- **Triangular FIR.**- Trabaja como el filtro FIR, con la diferencia que los promedios son calculados por triangulación.

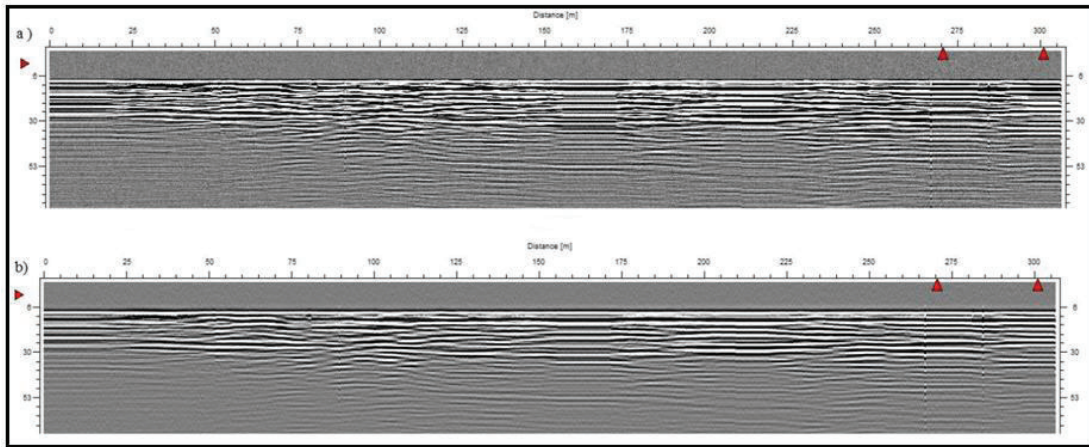


Figura 3.21 a) Radargrama en bruto. b) Radargrama aplicado el filtro Triangular FIR. Perfil 2 Glaciar #15.

Para generar los radargramas procesados se empleó en conjunto todos los filtros anteriormente descritos (Fig. 3.22)

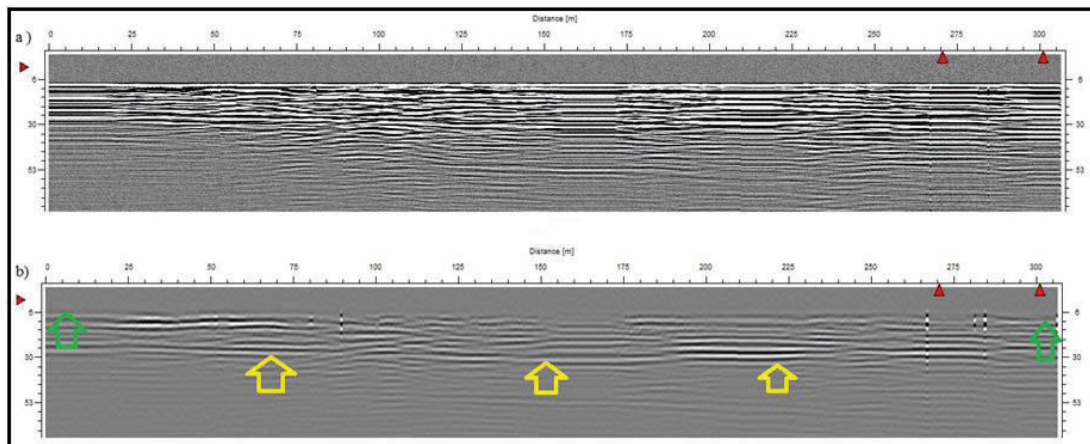


Figura 3.22 a) Radargrama en bruto. b) Radargrama aplicado los filtros Delete mean trace, Average, Thershold, FIR y Triangular FIR. Con flecha amarilla se muestra la superficie reflectiva interpretada como contacto hielo-roca. Con flecha verde se muestra el primer arribo. Perfil 2 Glaciar #15.

Una desventaja que presenta el software GroundVision 2.0, es no permitir guardar el trabajo realizado sobre los radargramas y tampoco exportarlos como imágenes, así que se procedió a realizar capturas de pantallas de los radargramas procesados (Anexo 1).

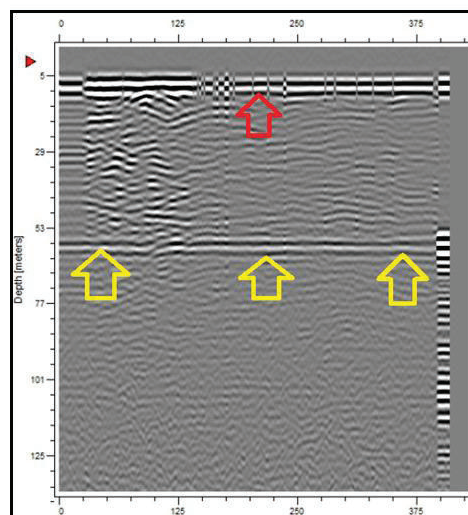
### 3.2.6.1 Interpretación de Radargramas

Los radargramas son imágenes del subsuelo muy similares a las obtenidas en los métodos clásicos de sísmica de reflexión, y constan de las siguientes partes esenciales:

**Eje Y:** muestra la profundidad expresada en metros o segundos.

**Eje X:** es la distancia recorrida en el perfilaje. Si se levanta información a una velocidad de marcha constante no es un problema convertir esta información en metros recorridos

**Reflectores:** son superficies donde existe un cambio relevante en las propiedades electromagnéticas, de manera que se produce una reflexión de la onda radar. Mientras mayor sea dicho contraste, mayor energía será reflejada y la superficie reflectora se visualizará más definida, continua y con forma congruente con la realidad (Fig. 3.23).



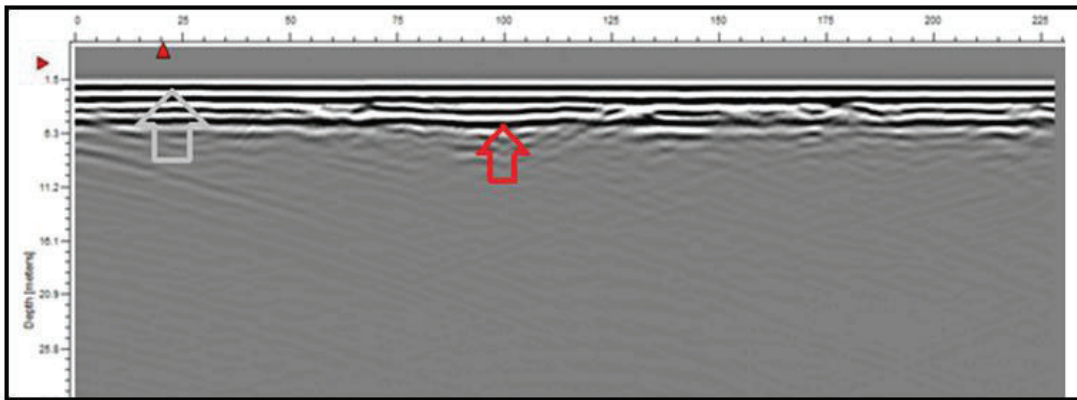
*Figura 3.23 Radargrama del perfil 2 del Glaciar # 12 luego de la aplicación de filtros, donde se indica con flechas amarillas un reflector generado por el contacto entre hielo y roca; y con flecha roja se muestra la señal de primer arribo.*

**Primer arribo, Ruido Ambiental y Falsos Reflectores.-** En los radargramas es muy común encontrar superficies que aparentan ser reflectores, pero que se los puede reconocer como falsos mediante varias características, por ejemplo: su poca continuidad lateral, baja definición o por ser demasiado rectos y geométricos.

Cuando nos referimos al primer arribo, se considera a la onda directa que viaja por superficie desde la antena emisora a la receptora, se la visualiza como una línea totalmente recta, muy definida y continua, que aparece justo por debajo de la superficie a lo largo de todo el perfil (Fig. 3.23). Esta falsa superficie sirve para realizar la corrección de profundidad; debe ser utilizada para definir la profundidad cero.

En el caso de ruido ambiental (Fig. 3.24), este puede ser generado por señales electromagnéticas en un rango muy cercano al espectro electromagnético de las ondas radar. Pueden ser señales emitidas por cables de alta tensión, señales de telefonía celular, equipos electrónicos o eléctricos en funcionamiento; estas señales se las visualiza en la parte alta del Radargrama como una superficie recta, regular y continua con alta definición en todo el largo del perfil (Fig. 3.24). Este tipo de interferencias son de origen antrópico, y por lo tanto no se presentan o su impacto es mínimo en los trabajos de alta montaña debido a que nos encontramos en un sitio aislado y lejos de centros poblados.



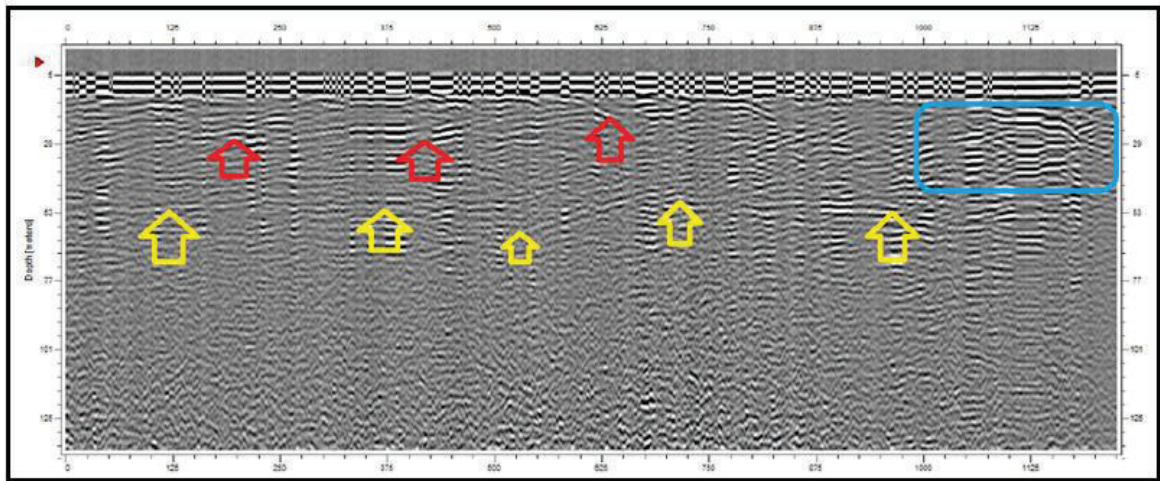


*Figura 3.24 En este radargrama podemos observar la onda de primer arribo en la parte superior, recta y continua en todo perfil (flecha blanca); y abajo de ella un falso reflector generado por ruido ambiental, que se lo visualiza con buena definición, muy recto y continuo por todo el radargrama (Flecha roja).*

Un falso reflector puede ser un objeto superficial de gran tamaño, que se presente en el radargrama. En nuestro caso pueden ser paredes cercanas verticales de hielo o de roca. Esto ocurre en vista de que las antenas emiten las ondas en todas las direcciones, lo que genera reflexiones en cualquier objeto, que son registradas porque las antenas empleadas no son blindadas. La onda radar al propagarse en el aire tiene una velocidad de  $300\text{m}/\mu\text{s}$ , velocidad muy superior a que puede transmitirse en cualquier material del suelo, por ello estas superficies se reflejan primero y se las visualiza en la parte superior del radargrama. El filtrado de estas superficies es realizado por la persona encargada de la interpretación de datos, y debe tener en cuenta la localización espacial del perfil levantado, las relaciones de distancia de objetos cercanos, para poder calcular la posición que podrían manifestar estos elementos distractores.

En el caso específico de los glaciares de montaña tenemos como un falso reflector importante a los glaciares poli-temperados. Estos glaciares se caracterizan por contener capas de hielo de distinta temperatura, densidad y grado de compactación; tales que pueden generar reflexiones que, al momento de la interpretación pueden provocar confusiones. Aquí es muy importante el criterio del técnico encargado del procesamiento de los datos, ya que deberá relacionar entre radargramas y considerar la posición relativa del perfil para

discriminar un glaciar poli-temperado del ruido generado por el eco de las ondas radar



*Figura 3.25 Radargrama filtrado del Glaciar # 12, donde se muestra con flechas amarillas el reflector generado por el contacto hielo-roca , debajo de este reflector se puede observar un eco, mientras que por encima se observa hielo estratificado que se señala con flechas rojas. En el rectángulo azul se indica una zona del radargrama que presenta interferencia y ruido, posiblemente generado por la presencia de un flujo de agua líquida bajo la superficie.*

Una interferencia muy común en los glaciares de montaña, es generada por cuerpos de agua en estado líquido (Fig. 3.25) , si bien nos encontramos en un macizo glaciar, este suele presentar flujos de agua líquida bajo la superficie; y las ondas radar no se transmiten a través de este medio, ocasionando pérdidas de señal, falsos reflectores e interferencias, que debe ser consideradas en la interpretación.

En resumen varios reflectores pueden presentarse en un radargrama, como : superficies reflectantes, primeros arribos, ruido, eco e interferencia; discriminar entre una u otra es un proceso parcialmente subjetivo. Si bien existen ciertas normas o recomendaciones para la interpretación, depende mucho del criterio y experiencia del técnico encargado que trabaje sobre estos datos geofísicos.

Los radargramas filtrados e interpretados, de los glaciares #12 y # 15 se presentan en el anexo 1 de este trabajo de titulación.

### 3.2.7 Obtención de valores de profundidad - aproximación a malla geoestadística

Una de las virtudes del equipo Mala Science ProEx, configurado con una antena RTA de 25 Mhz, es la obtención de datos de manera continua a lo largo de los perfiles. Así obtenemos un perfil completo con valores en cada punto. Esto es muy útil para diversas aplicaciones, incluyendo nuestro caso, en el cual utilizaremos los valores de profundidad para realizar una interpolación por Kriging, mediante una malla regular ubicada en el espacio cubierto por el glaciar.

Este proceso se lo realizó en el sistema de información geográfica QGIS (Quantum GIS), donde se construyeron de manera arbitraria mallas teóricas para los glaciares # 12 y # 15; a las cuales se solapó una capa que contiene los perfiles levantados para cada glaciar. Así en los nodos<sup>3</sup> donde las mallas se intersecan con los perfiles se asignó los valores correspondientes de ubicación geográfica ( latitud, longitud y cota de altura) y de espesor del glaciar medido con GPR. La sobreposición de las mallas con los perfiles puede ser observado en las figuras 3.20 y 3.21, mientras que los valores de posición y de espesor medido para cada punto de intersección están en los Anexo 2 y Anexo 3, para los glaciares #12 y #15, respectivamente.

---

<sup>3</sup> Nudo.- Punto de intersección de dos líneas en una malla.

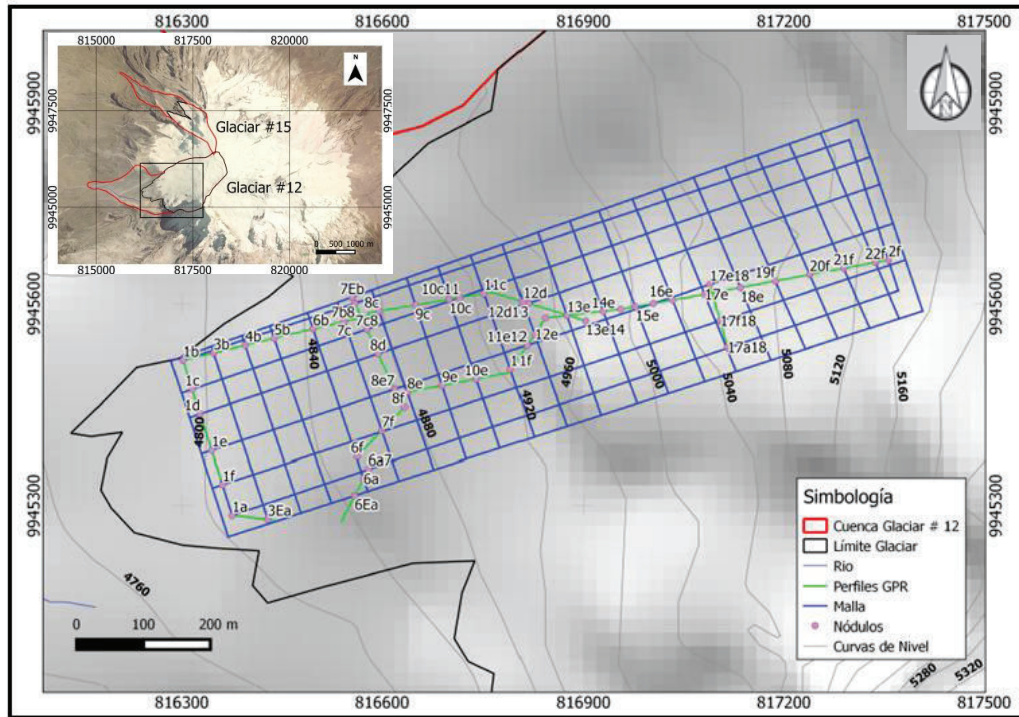


Figura 3.26 Mapa de ubicación de Nodos en el Glaciar #12.

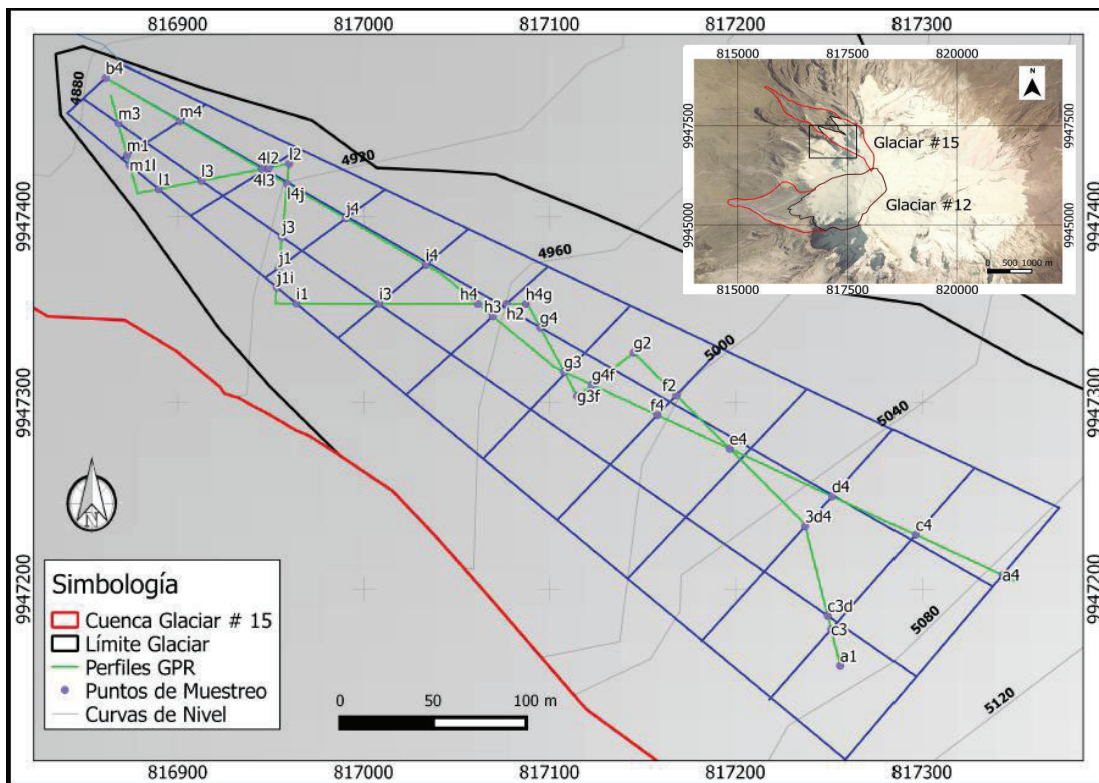


Figura 3.27 Mapa de ubicación de Nodos en el Glaciar #15.

Los datos puntuales de posición geográfica y profundidad del lecho rocoso presentados en los Anexos 2 y 3 son la base principal para el procesamiento geostadístico de interpolación por medio de kriging ordinario, que se presentará en el siguiente capítulo.

## Capítulo 4



## 4 Resultados

### 4.1 Análisis Estadístico

Utilizando los valores de espesor glaciar en los sitios de muestreo obtenidos en la sección 3.2.7 se realizó el análisis estadístico tradicional empleando una hoja de cálculo Excel, con los siguientes resultados:

En el glaciar #12 se obtuvo un total de 53 puntos de muestreo del espesor del glaciar, con un promedio de 59m , una desviación estándar de 16m, moda de 65m, el mínimo valor es 6m y el máximo 77m. La distribución normal <sup>4</sup>de los datos no genera una campana de Gauss <sup>5</sup>normal (Figura 4.1), esto podría explicarse porque las medidas no abarcan toda la superficie del glaciar de manera sistemática, debido a que existen zonas del glaciar a las cuales no se tuvo acceso para realizar mediciones.

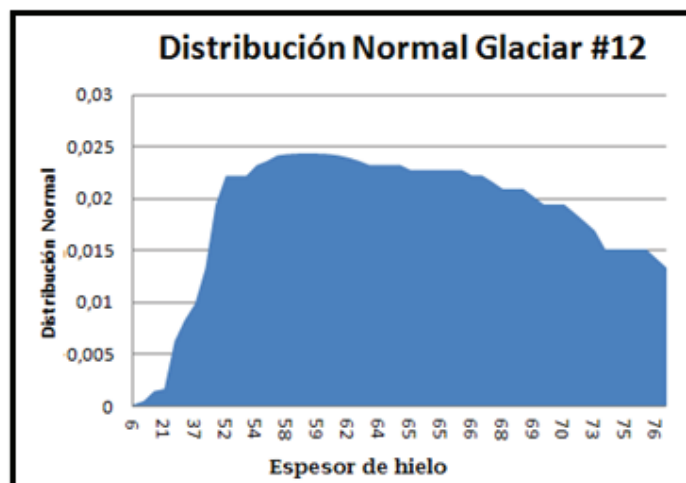


Figura 4.1 Diagrama de Distribución Normal de los puntos de muestreo en el Glaciar #12.

<sup>4</sup> **Distribución Normal.**- [Distribución de probabilidad](#) de [variable continua](#) que con mayor frecuencia aparece en fenómenos reales. Las desviaciones de la normalidad se interpretan como indicaciones de errores sistemáticos que no han sido tomados en cuenta. Cualquier desviación de la normalidad necesita ser explicada (Wikipedia.org 2015).

<sup>5</sup> **Campana de Gauss.**- Función matemática de [densidad](#) de una [variable aleatoria](#) con [distribución normal](#).

Se generaron diagramas de dispersión espacial (Figura 2), donde se pudo visualizar que existe tendencia en dirección Este-Oeste (eje X); el espesor aumenta progresivamente, luego se estabiliza a una profundidad de aproximadamente 65m. Esto se explica por la orientación del eje glaciar en sentido Este-Oeste, y además por la forma cóncava del lecho rocoso. En efecto, en dichos glaciares se tiene un aumento de espesor de hielo desde la zona de ablación hasta aproximadamente la línea de equilibrio, a partir de la cual su espesor se estabiliza. (Capítulo 2, Fig. 2.6)

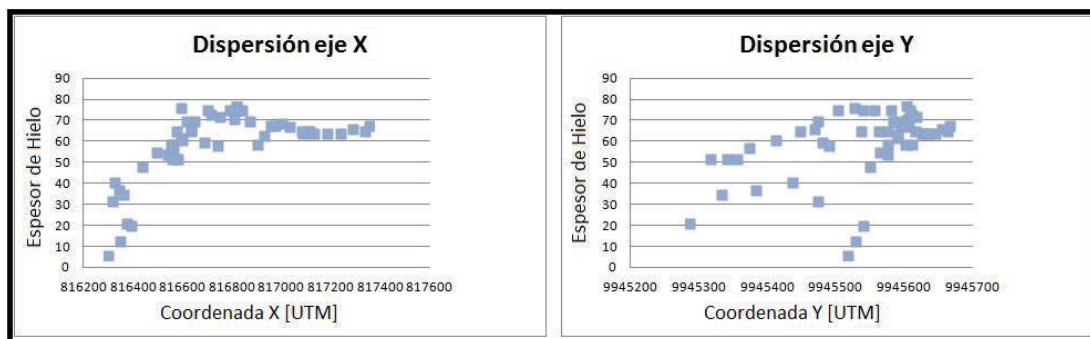
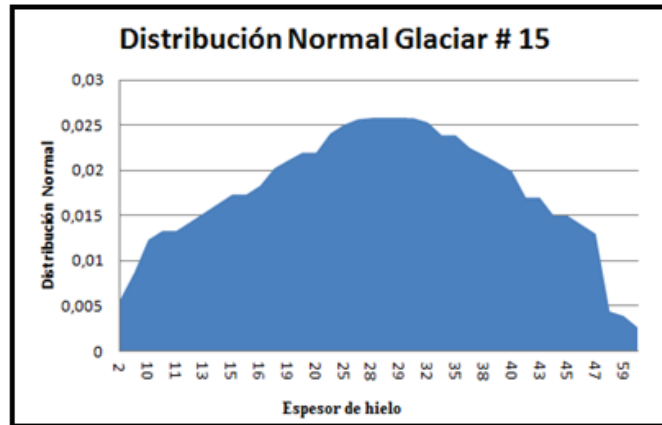


Figura 4.2 Diagramas de dispersión en: a) Este-Oeste (X) y b) Norte - Sur (Y), de los puntos de muestreo en el Glaciar #12.

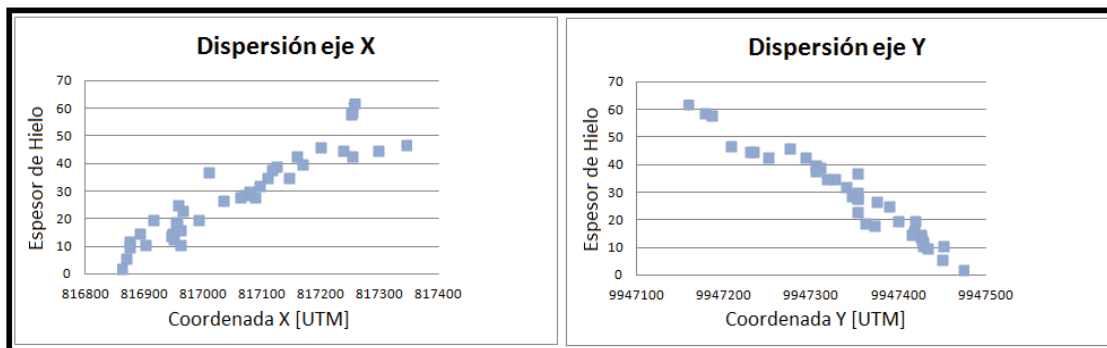
Para el Caso del Glaciar #15 se adquirieron 38 puntos de muestreo con un promedio de 29m, una desviación estándar de 15m, el mínimo valor es 2m y el máximo 62 m; al analizar la distribución de los datos se observó que la misma se aproxima a una campana de Gauss normal (Figura 4.3), donde los valores se distribuyen de manera similar a los dos lados de la media. Esto indica que las medidas representan un fenómeno natural, además de que las mediciones fueron tomadas cubriendo casi la totalidad de la superficie glaciar hasta la cota de 5100 msnm.





*Figura 4.3 Diagrama Distribución Normal de los puntos de muestreo en el Glaciar #15.*

Los gráficos de dispersión de la profundidad con respecto a los ejes Este-Oeste (Coordenada X) y Norte-Sur (Coordenada Y), muestran que el Glaciar #15 presentan una tendencia al aumento en dirección Sureste (Figura 4.4). Esto se explica simplemente por la dirección del eje glaciar orientada en dirección Noroeste-Sureste.



*Figura 4.4 Diagramas de dispersión en las direcciones Norte - Sur (Y) y Este-Oeste (X), de los puntos de muestreo en el Glaciar #15.*

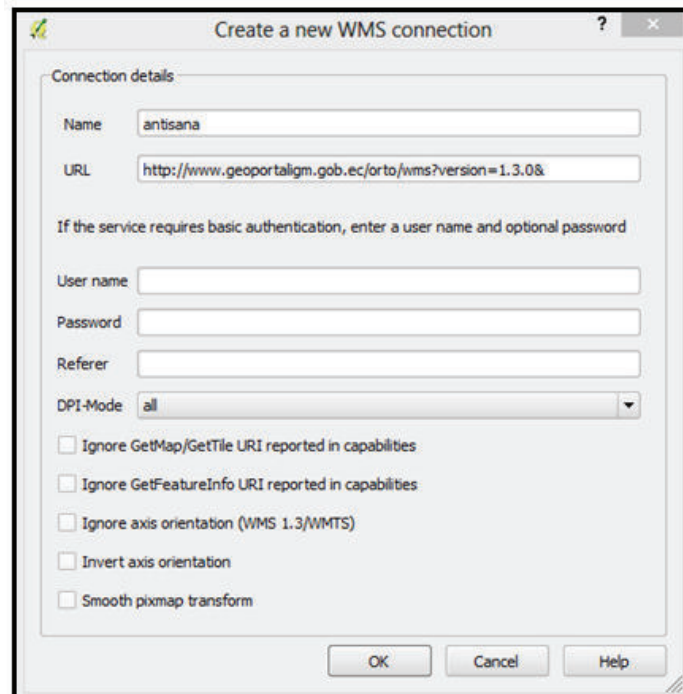
Los resultados del análisis estadístico, nos permiten a priori obtener dos conclusiones. La primera es que existe una mejor colección de datos en el Glaciar #15 que en el Glaciar #12, lo cual se deduce de la distribución gaussiana normal en los datos del glaciar #15, mientras que en el glaciar # 12 la campana de Gauss no está completa. Los gráficos de dispersión direccional de espesor de hielo son congruentes con la dirección de los ejes glaciares en ambos casos.

## 4.2 Procesamiento Geoestadístico

### 4.2.1 Mapa de Puntos de Espesor

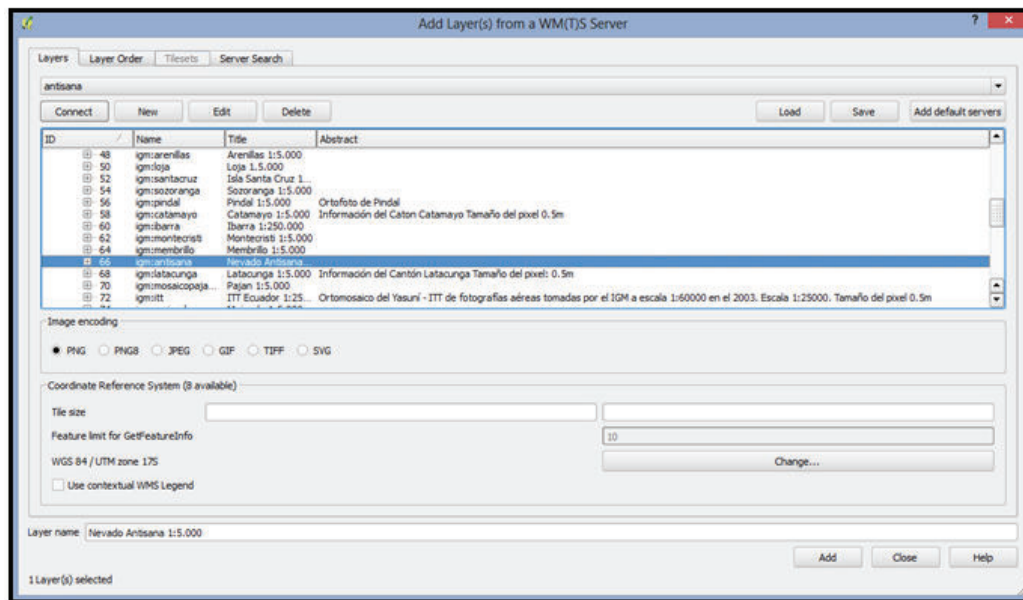
Como se mencionó en párrafos anteriores ( sección 2.4.1), la Geoestadística emplea modelos matemáticos para predecir valores desconocidos a partir de valores medidos espacialmente localizados. El método geoestadístico empleado en esta investigación fue la interpolación por Kriging ordinario. Como información base para el proceso de kriging ordinario, se necesita puntos de muestreo georeferenciados, presentados en una hoja de cálculo, donde se presente el nombre del punto, las coordenadas X e Y en UTM, la cota de altura y el espesor de hielo (Anexo 4 y Anexo 5).

Con respecto a los puntos de muestreo, se consideró también los límites glaciares, a los cuales se atribuyó inicialmente un valor de 0 m al espesor de hielo (nodos 11 al 62 del glaciar #12; nodos I1 al I28 del glaciar #15; Figura 4.7 y Figura 4.8 ). Sin embargo, se debe mencionar que para el cálculo del volumen del glaciar se realizaron dos modelajes adicionales, en los cuales se utilizaron valores de 1m y de 10m para el espesor del hielo en los puntos correspondientes al límite del glaciar (ver sección 4.5). Estos puntos fueron obtenidos a partir de la Ortofografía del Volcán Antisana, publicada en la página web oficial del Instituto Geográfico Militar (IGM), la cual puede ser utilizada directamente desde QGIS. Para ello se debe primero dar click izquierdo en el ícono de la herramienta "Add WMS/WMTS Layer" (Figura 4.5); a continuación emerge una ventana donde es necesario vincular la página del IGM a QGIS, ingresando en la pestaña URL la siguiente dirección: <http://www.geoportalligm.gob.ec/orto/wms?version=1.3.0&>. (Figs. 6 y 7)



*Figura 4.5 Ventana de conexión WMS de QGIS*

Al realizar el proceso antes mencionado, se puede acceder a las Ortofotografías de todo el país obtenidas por el Instituto Geográfico Militar (IGM) y disponibles libremente online. Estas fotografías con escala de 1:50 000, son de gran detalle y definición, pudiéndose observar con claridad objetos de dimensiones decimétricas; también cabe mencionar que estas fotografías están listas para ser utilizadas ya que al descargarse se encuentran georeferenciadas. Una desventaja que presentan estas imágenes es que únicamente se las puede utilizar con conexión a internet.



*Figura 4.6 Ventana de servidor WMTS.*

Se almacenaron los valores espacialmente localizados, tanto de las medidas de espesor, como del límite glaciario, de los Glaciares Antisana #12 y #15 (Tabla 4.1 y Tabla 4.2) en archivos de tipo shapefile. Con estos archivos se generaron mapas de puntos de espesor de hielo, siendo estos el primer producto de este trabajo de investigación (Figura 4.7 y Figura 4.8).

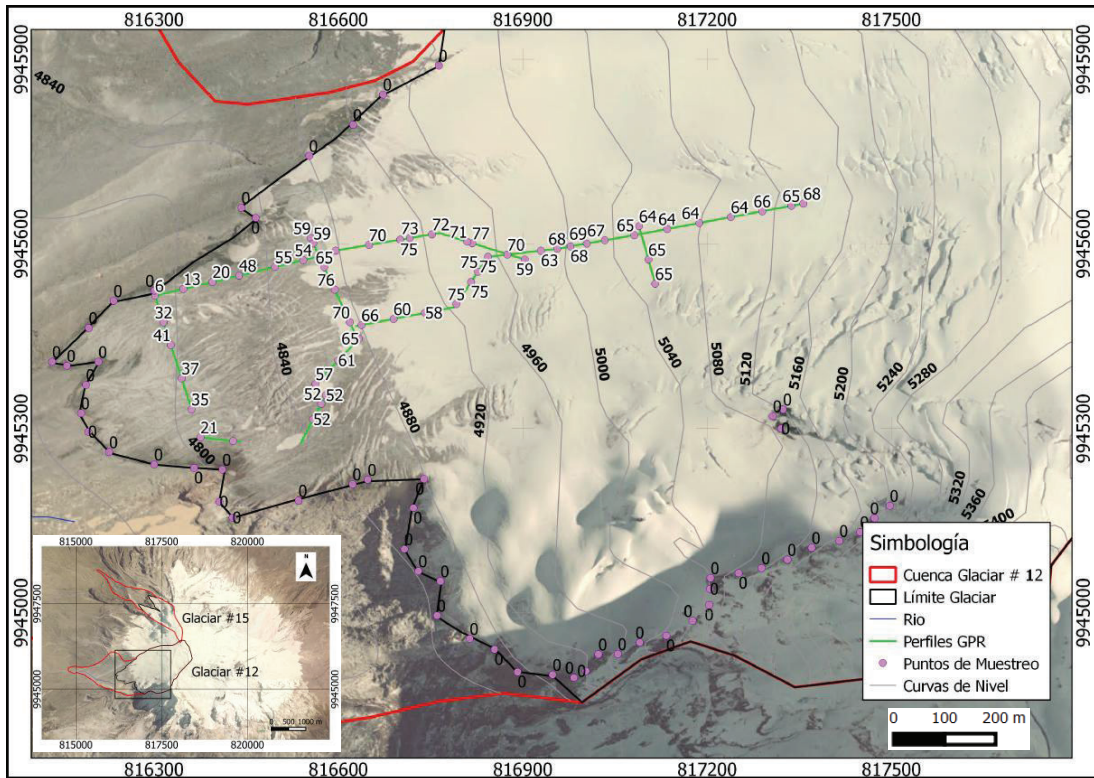


Figura 4.7 Mapa de puntos de espesor de hielo, Glaciar Antisana # 12.

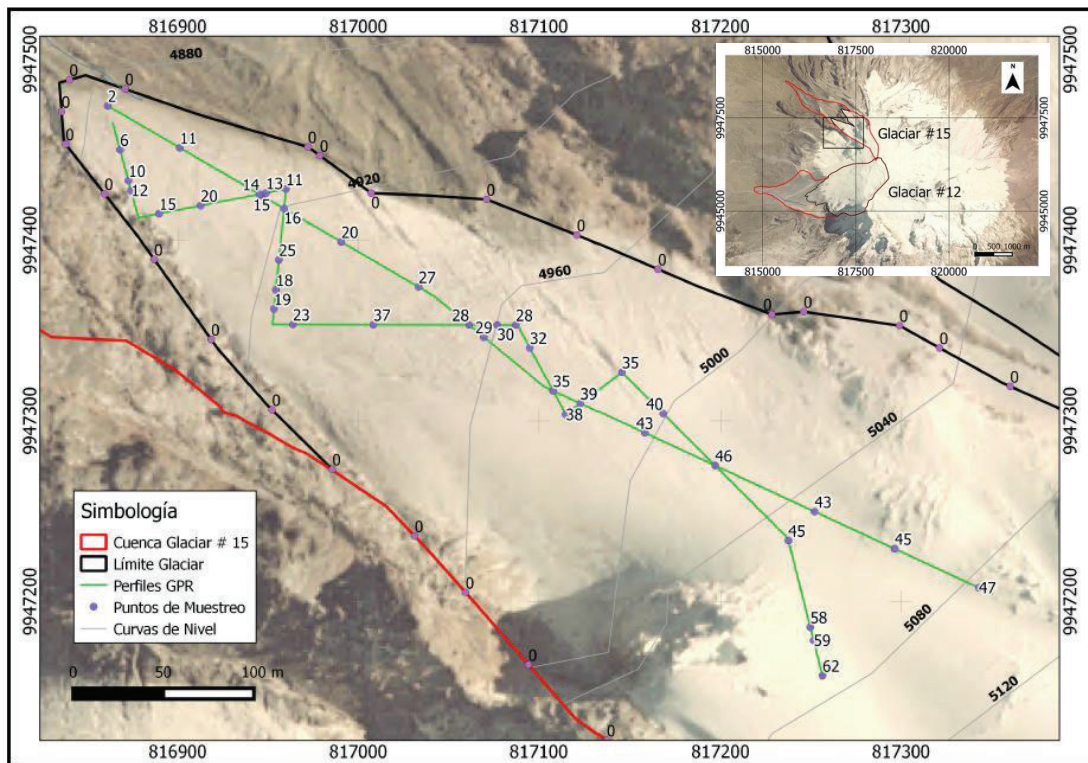
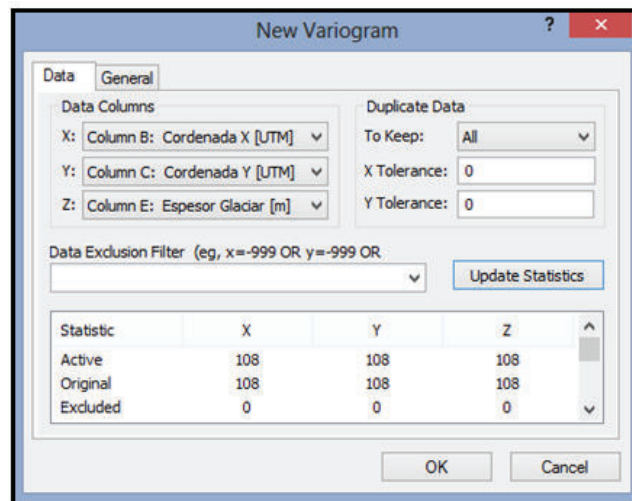


Figura 4.8 Mapa de puntos de espesor de hielo, Glaciar Antisana # 15.



#### 4.1.2 Variogramas

Se analizó la relación espacial de los datos de espesor glaciar y límite glaciar (Anexo 4 y Anexo 5), usando la herramienta de variograma del programa Surfer 10. Para emplear esta plataforma, primero se debe dar click izquierdo sobre la pestaña "Grid" < "Variogram" < "New Variogram" <. Aparece una ventana donde es necesario seleccionar la Hoja de Excel donde están almacenados los datos, luego emerge una segunda ventana, donde se seleccionan los campos de valores (Fig. 4.9), la columna X corresponde a la coordenada en X [UTM], la columna Y a la coordenada Y [UTM], y en Z el valor de la muestra, en este caso el espesor de hielo para cada punto. Se finaliza este proceso dando click en "OK". Al utilizar el resto de valores por defecto, se permite que el programa tenga una tolerancia angular de 90°, accediendo a que analice los valores en todas las direcciones, sin descartar ninguna en particular.



*Figura 4.9 Ventana emergente donde se seleccionan los campos de las columnas para la construcción del semivariograma.*

Como resultado del proceso anterior, se obtiene un semivariograma y se genera automáticamente un modelo de variograma, aunque éste no siempre es el que mejor se acopla a los datos. Por ello es importante experimentar con algunos modelos. Cuando se hace doble click sobre la imagen, aparece una ventana (Fig. 4.10) que permite ajustar valores y distintos modelos de variogramas.

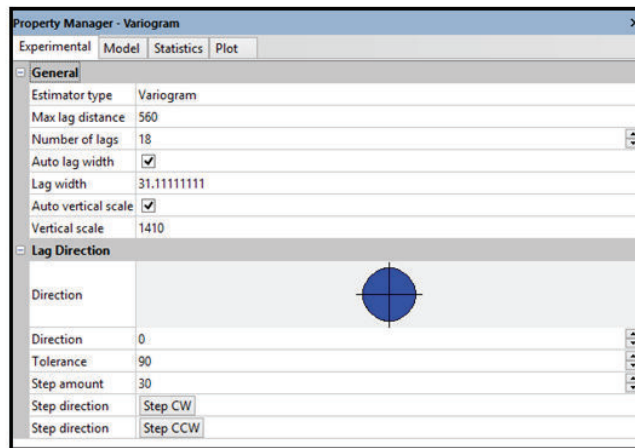


Figura 4.10 Ventana para la selección de modelo de variograma.

En el caso del Glaciar # 12, se ajustaron 4 modelos de variogramas de manera aceptable al grupo de datos: el modelo Esférico, Exponencial, Gaussiano y Lineal (Fig. 4.1). De ellos, el modelo de variograma Lineal es el que guardó mejor relación con los datos, ya que el cálculo de error entre el modelo y los datos fue el menor (0.2496627).

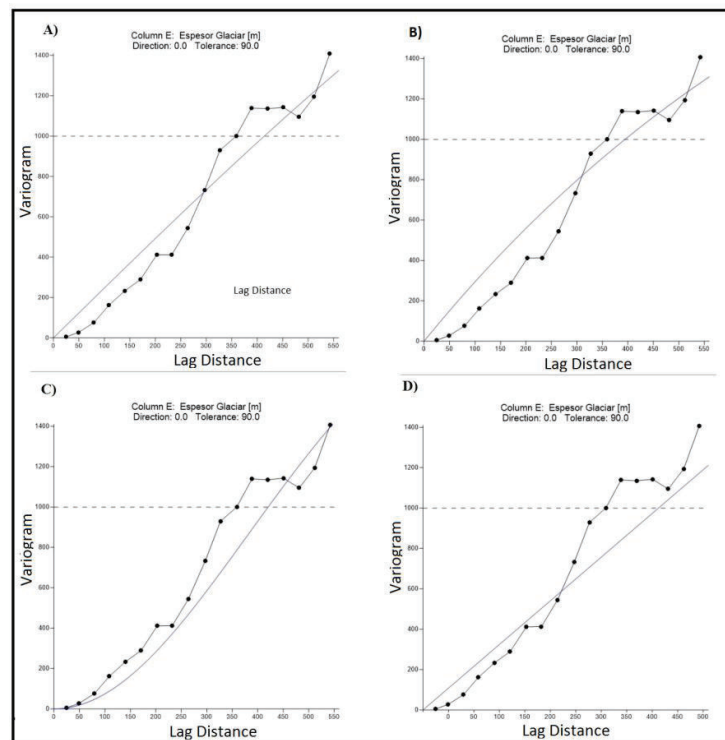


Figura 4.11 Modelo de variograma para el glaciar #12, a) Esférico, b) Exponencial, c) Gaussiano y d) Lineal.



Para el glaciar # 15 de manera similar se generaron 4 modelos de variograma: Esférico, Exponencial, Gaussiano y Lineal, siendo este último el que se acopló mejor a los datos de espesor de hielo (Fig. 4.12 ).

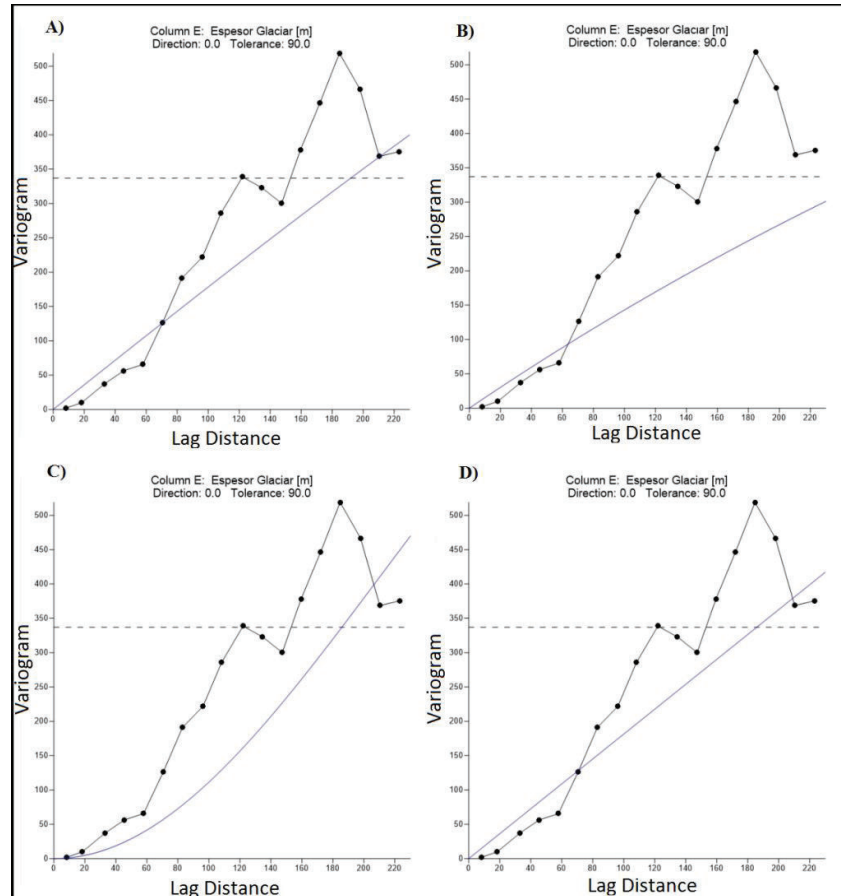
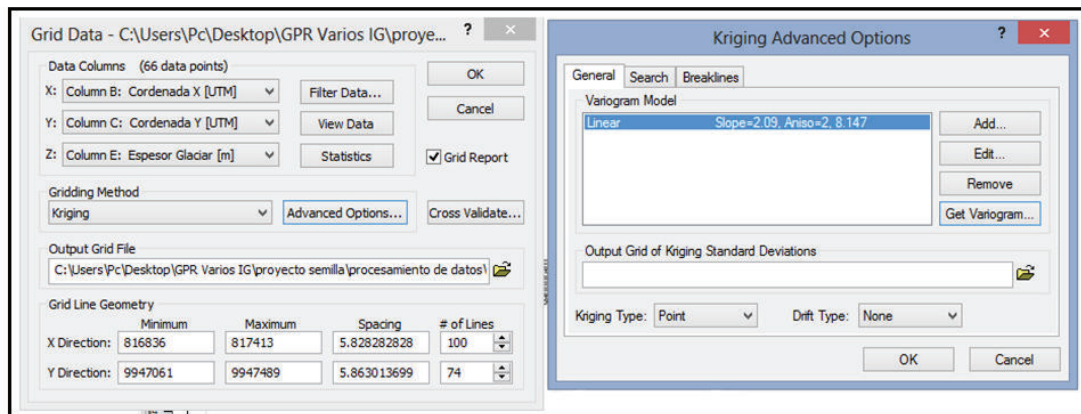


Figura 4.12 Modelo de variograma para el glaciar #15, a) Esférico, b) Exponencial, c) Gaussiano y d) Lineal.

### 4.3 Kriging

Este proceso se lo efectuó en el programa Surfer 10. El primer paso es dar click izquierdo en la pestaña "Grid" de la barra de herramientas, luego pulsar nuevamente click en la opción "Data", se selecciona la hoja de Cálculo de contiene a los datos (Tabla 4.1 y Tabla 4.2). A continuación aparece una ventana donde se seleccionan los campos de posición y valor a interpolar. Además existe la posibilidad de escoger el modelo de variograma anteriormente elaborado para los datos estudiados, dando click en "Advanced Options" (Fig. 4.13).



*Figura 4.13 Ventana emergente donde debemos escoger los campos de posición y valor interpolar, además del modelo de variograma a ser utilizado.*

Este proceso se lo realizó por separado para cada Glaciar , creando así mapas de contorno (Fig. 4.14 y Fig. 4.15), los cuales se guardan automáticamente como archivos \*.grd. Para que estos mapas puedan ser utilizados en cualquier sistema de información geográfica, simplemente utilizamos la herramienta "Export" de la pestaña "File" donde se presenta la opción de guardar el archivo de salida en formato \*.shapefile (.shp).

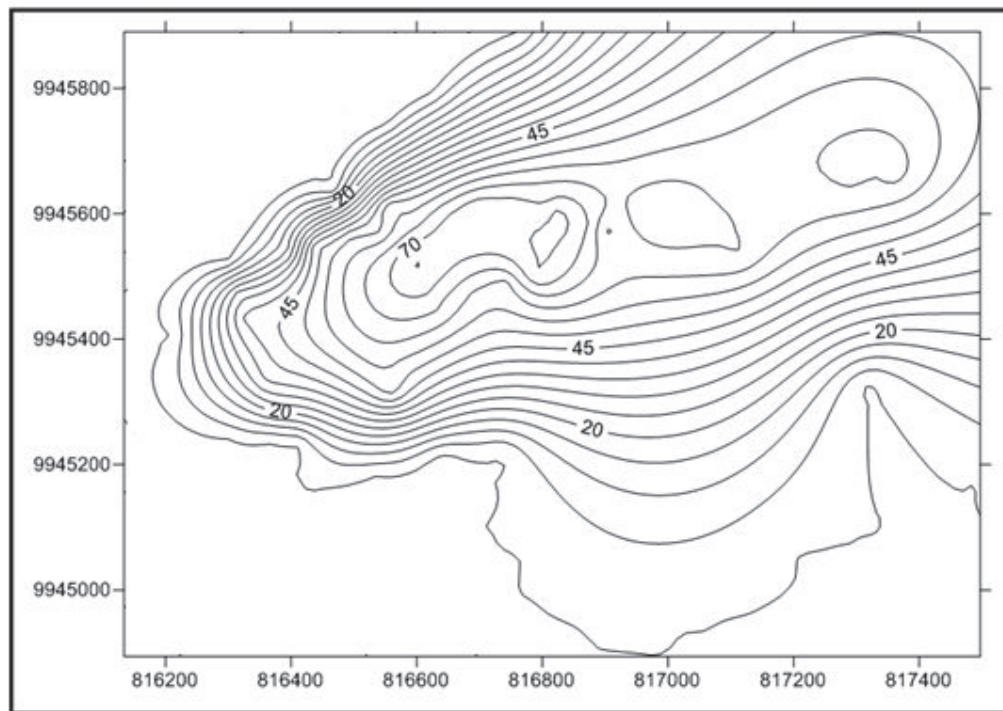


Figura 4.14 Mapa de Contorno del Glaciar #12.

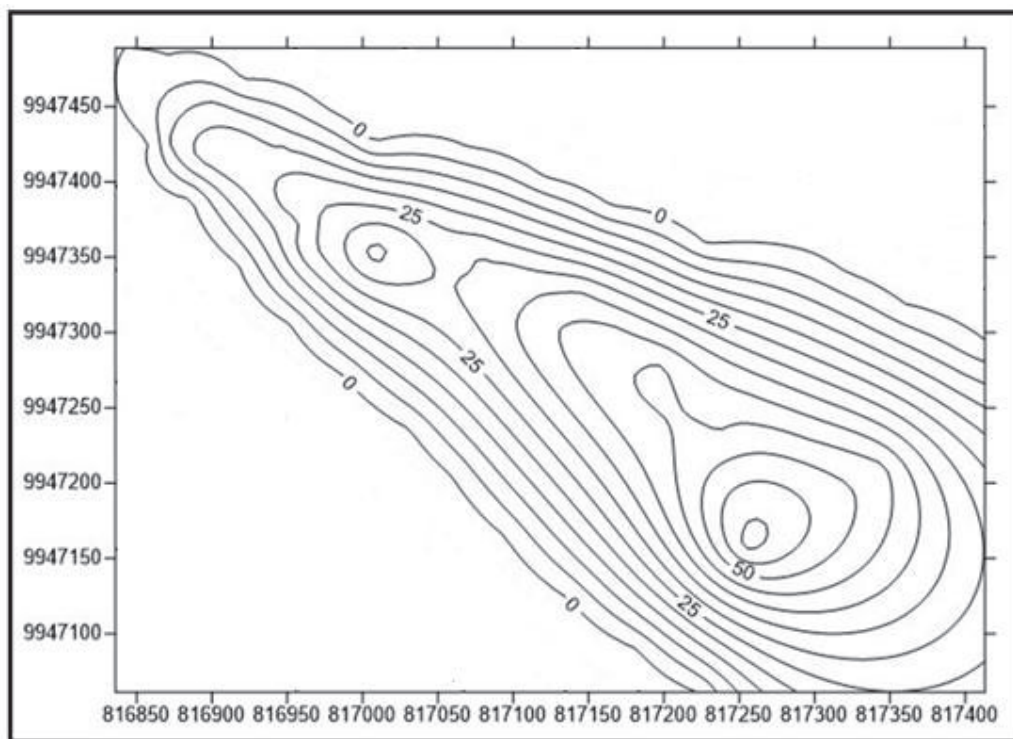


Figura 4.15 Mapa de Contorno del Glaciar #15.

#### 4.4 Mapas de Espesor glaciar

Los mapas de contorno elaborados en la sección 4.3 fueron combinados en QGIS con la ortofotografía del volcán Antisana para diseñar mapas espesor de hielo de los Glaciares #12 y #15 (Figs. 4.16 y 4.17) ; estos mapas muestran isolíneas de espesor glaciar, las cuales fueron en algunos casos moldeadas y corregidas manualmente para adaptarse de mejor manera a las superficie glaciar, acoplándose así a paredes de roca y límites glaciares donde el espesor de la capa de hielo es cero.

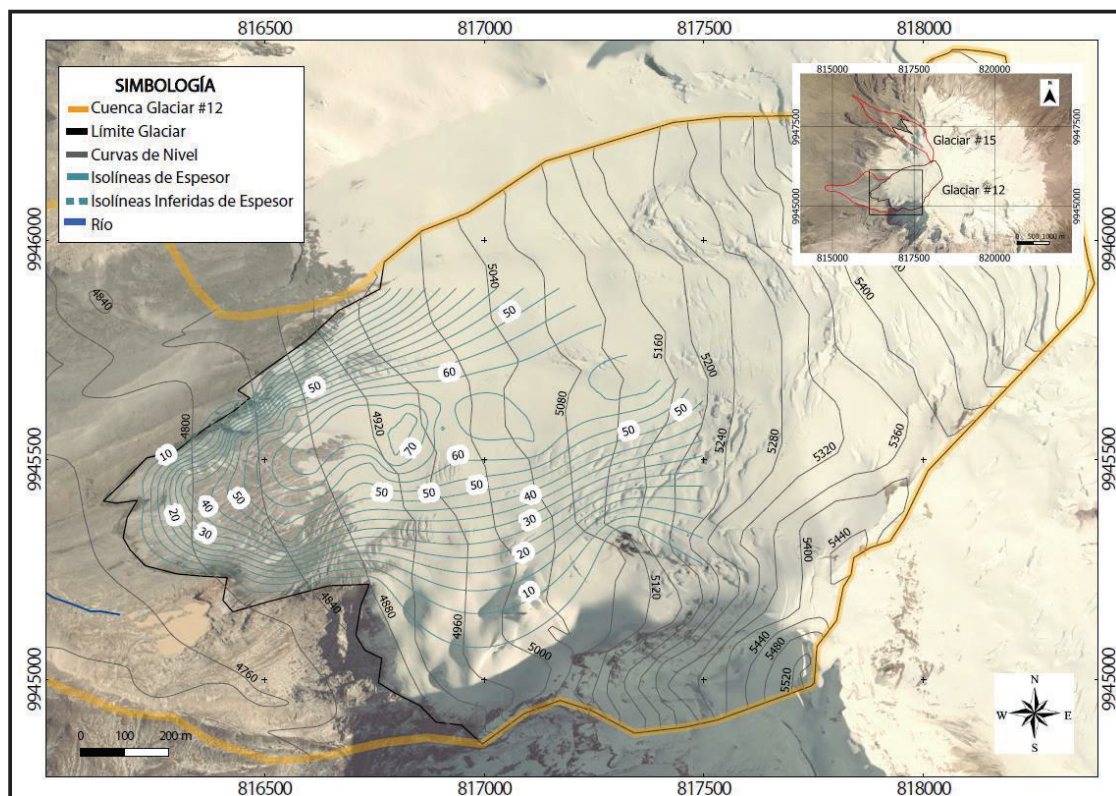
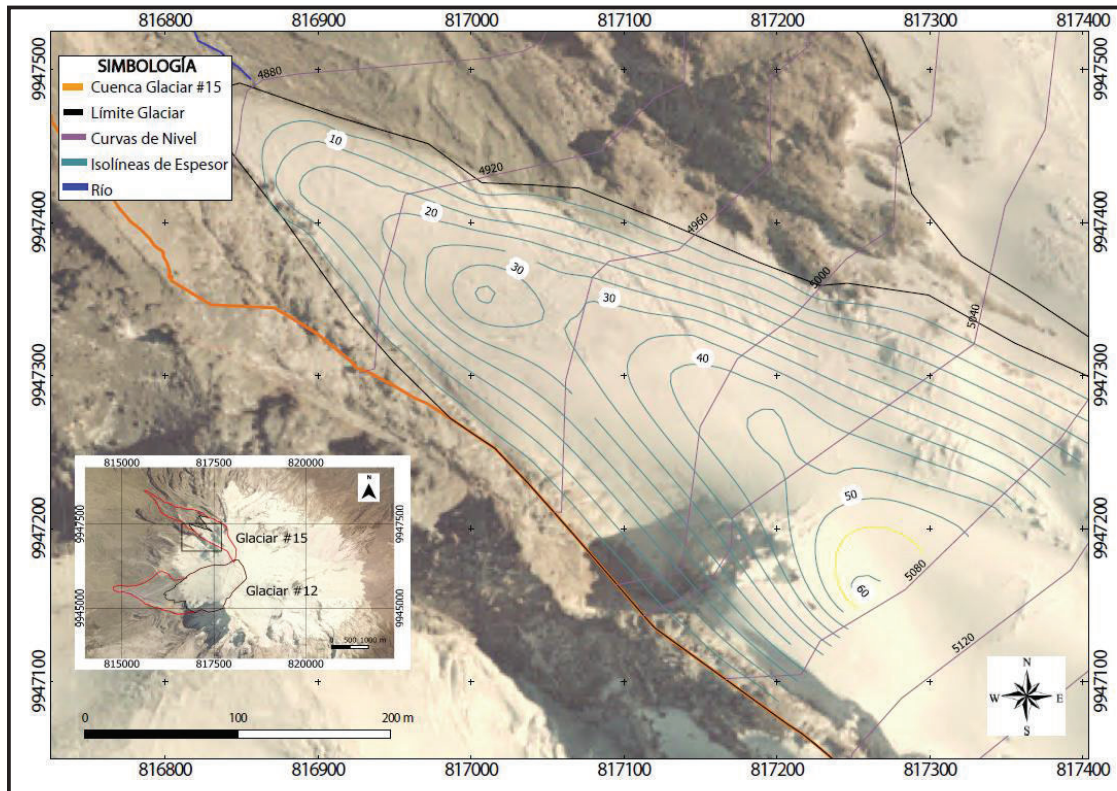


Figura 4.16 Mapa de espesor de hielo del Glaciar #12.

Es importante señalar que en el caso del mapa de espesor de hielo del Glaciar #12 (Fig. 4.16), se presenta una zona con isolíneas entrecortadas, las cuales significan que la profundidad tiene alta incertidumbre, debido a que no se tomaron medidas en esta área por el alto riesgo de avalanchas y caídas de bloques; por lo tanto los valores son extrapolados a partir de las medidas obtenidas cercanas al eje glaciar.





*Figura 4.17 Mapa de espesor de hielo del Glaciar #15.*

Por otra parte el mapa de espesor de hielo del glaciar #15 tiene menor incertidumbre (Fig. 4.17), diseñado con isótopos continuas, producto de la mejor distribución espacial de datos en toda la lengua glaciar.

#### **4.5 Perfiles Longitudinales**

Los cortes o perfiles longitudinales a lo largo del eje de un glaciar, son necesarios para conocer su forma, y entender la relación que existe entre el bedrock y la capa de hielo. Estos perfiles pueden ser realizados a partir de las interpolaciones y mapas obtenidos en las secciones anteriores.

En la construcción de perfiles se realizaron los siguientes pasos en QGIS:

1. Extracción del perfil topográfico siguiendo el eje glaciar (Capítulo 3 Fig. 3.1) con la ayuda de la herramienta "Terrain Profile". Se selecciona el punto inicial y final del perfil que se desea crear, luego de lo cual el programa

genera el perfil y presenta los datos de distancia vs cota (Fig. 4.18). Esta información puede ser exportada a una hoja de Excel.

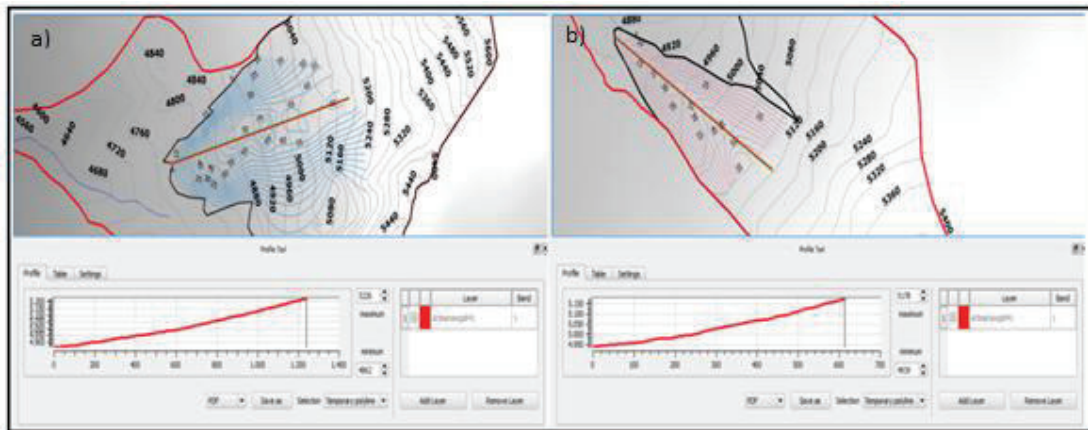


Figura 4.18 Creación del perfil topográfico con la herramienta Terrain Profile.  
a) Glaciar #12. b) Glaciar #15

2. Extraer los valores de profundidad a partir del mapa de espesor; para ello otra vez se utiliza la herramienta "Terrain Profile", pero ahora los datos que se extraen son la distancia desde el inicio del perfil hasta su intersección con cada isolínea de espesor de hielo. Estos datos son insertados en una hoja de Excel en una tabla de distancia vs profundidad. Este proceso debe ser realizado para cada punto de intersección entre el eje glaciar y las isolíneas de espesor (Fig. 4.18). Para que este valor de profundidad pueda ser utilizado en el diseño de un perfil, debe ser transformado a cota del bedrock, lo cual se realiza con una simple resta de cota de superficie menos profundidad de bedrock (Tablas 4.1 y 4.2).

<b>Distancia</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Cota Superficie</b>	<b>Cota Bedrock</b>
29	5	4868	4863
47	10	4871	4861
61	15	4871	4856
75	20	4874	4854
89	25	4877	4852
102	30	4876	4846
116	35	4880	4845
130	40	4885	4845
205	45	4901	4856
235	50	4911	4861
265	55	4917	4862
293	60	4927	4867
329	65	4930	4865
370	70	4940	4870
480	70	4968	4898
538	70	4983	4913
604	75	4999	4924
656	75	5011	4936
692	70	5027	4957
711	65	5034	4969
765	65	5056	4991
901	65	5098	5033
1079	65	5170	5105

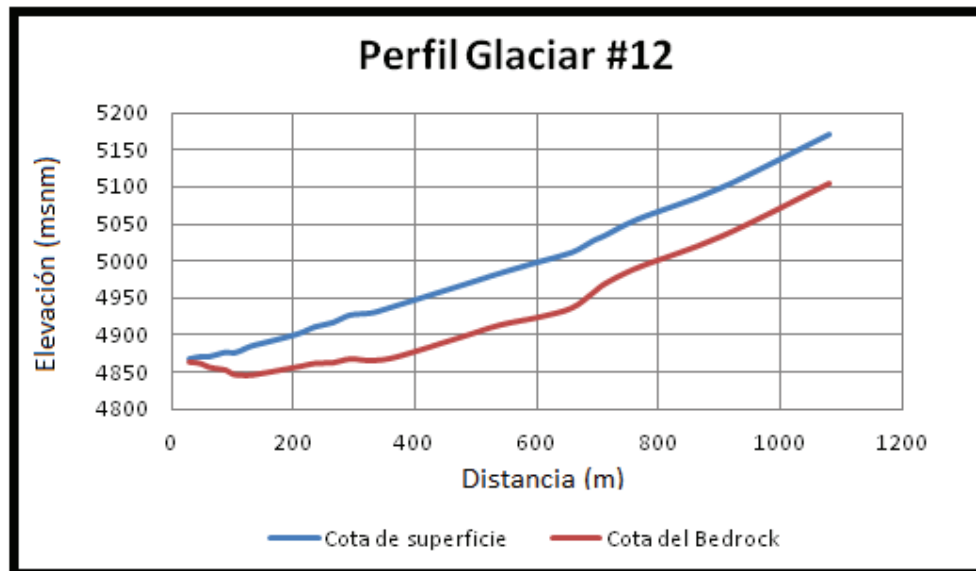
*Tabla 4.1 Cota de superficie y Cota de Bedrock, perfil Glaciar #12.*

<b>Distancia</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Cota Superficie</b>	<b>Cota Bedrock</b>
35	5	4947	4942
51	10	4953	4943
70	15	4954	4939
129	20	4969	4949
168	25	4980	4955
192	30	4983	4953
243	30	5000	4970
266	30	5007	4977
310	35	5031	4996
344	40	5045	5005
401	45	5071	5026
435	45	5084	5039
465	45	5090	5045
494	50	5114	5064

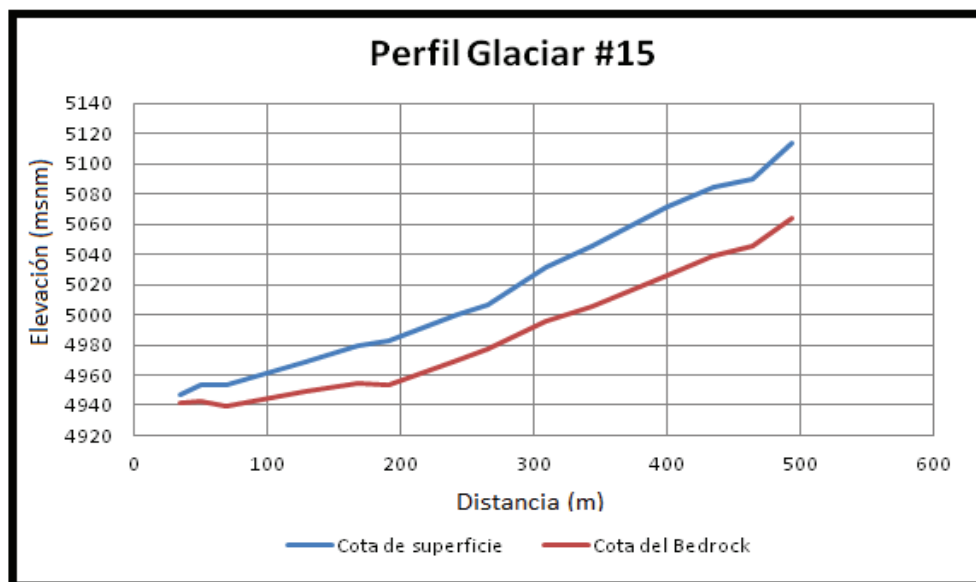
*Tabla 4..2 Cota de superficie y Cota de Bedrock, perfil Glaciar #15.*



Como resultado del proceso anteriormente descrito se obtuvieron los valores de distancia, cota y cota del bedrock, con los cuales se crearon los perfiles longitudinales de los Glaciares #12 y #15 (Figs. 4.19 y 4.20).



*Figura 4.19 Perfil longitudinal del Glaciar #12.*



*Figura 4.20 Perfil longitudinal del Glaciar #15.*

## 4.5 Cálculo de volumen glaciar

Para este cálculo también se empleó el programa Surfer 10. Los pasos a seguir son sencillos, una vez generados los mapas de contorno (espesor glaciar) en la sección 4.3. Se procede a dar click izquierdo en la pestaña "Grid" de la barra de herramientas, se despliega un menú, donde se elige la opción "Volumen" (Fig. 4.21), luego aparece una nueva ventana, donde es necesario escoger el archivo tipo \*.grd que contiene el mapa de contornos del glaciar en cuestión. Finalmente aparece una nueva venta que permite modificar el factor de escala, pero es preferible emplear los valores por defecto.

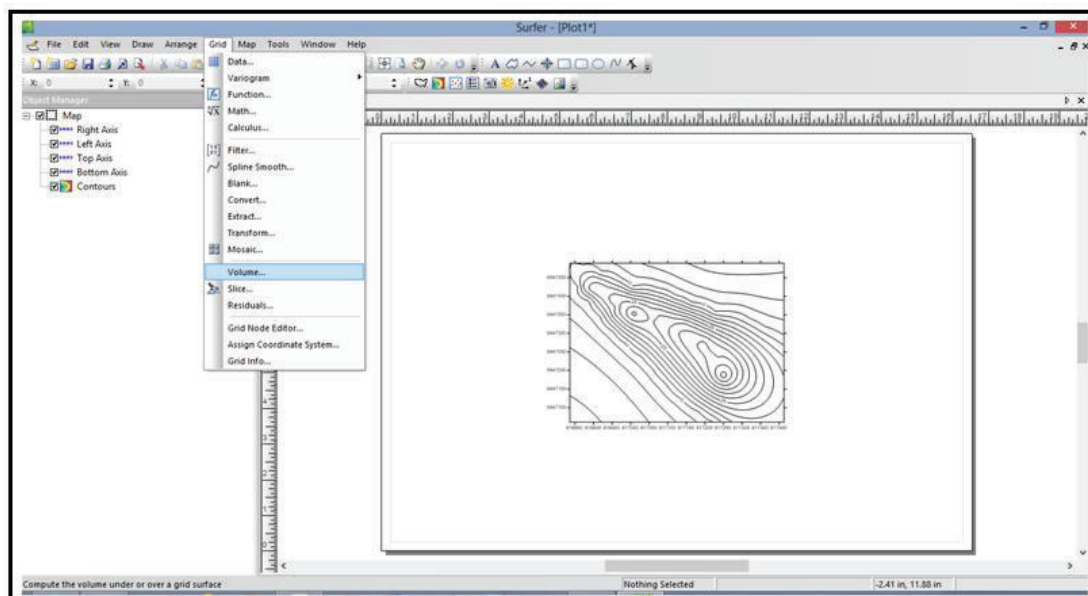


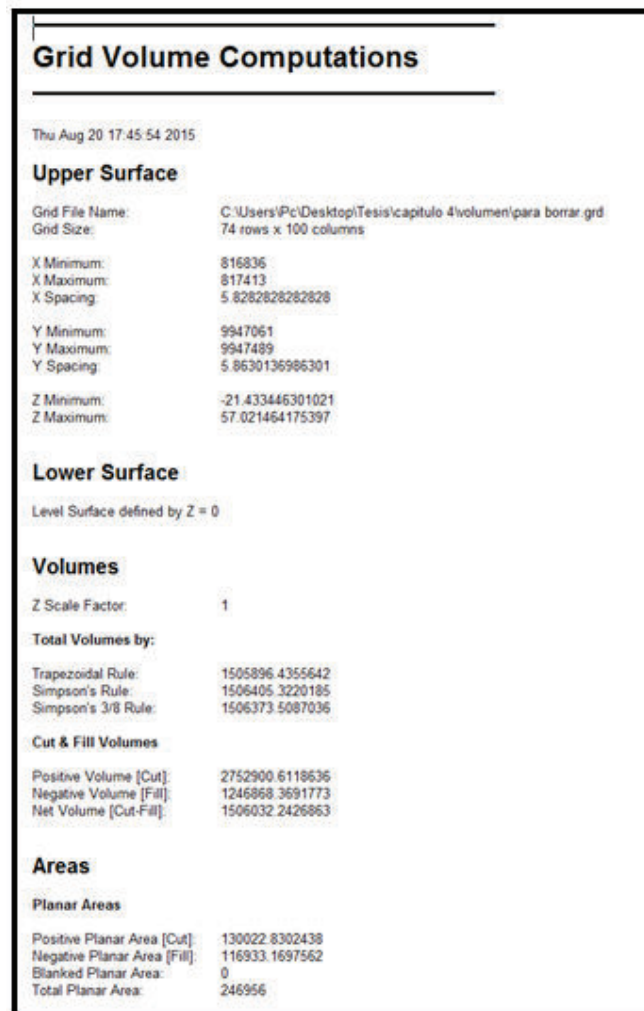
Figura 4.21 Ventana de Surfer 10, donde se muestra para cálculos de volumen.

Como resultado del proceso anterior se genera un reporte donde se presentan los valores de áreas y volumen calculados (Fig. 22). Una de las bondades que muestra el programa Surfer 10 es que realiza el cálculo volumétrico por medio de tres procedimientos matemáticos: Regla del Trapecio<sup>(6)</sup>, Regla de Simpson<sup>(7)</sup>,

<sup>6</sup> Regla del Trapecio.- Método de integración donde la integral es igual al área bajo del trapecio bajo la gráfica de la función lineal

<sup>7</sup> Regla de Simpson y Simpson 3/8.- Métodos de Integración numérica que calculan el valor de integrales definidas de manera más exacta que la Regla del Trapecio, empleando polinomios de

Regla de Simpson 3/8; esto permite comparar las tres respuestas y eventualmente elegir un método analítico en particular.



*Figura 4.22 Captura de pantalla del reporte generado por Surfer 10, donde se muestran los valores calculados de áreas y volúmenes.*

Vale recordar que una hipótesis utilizada en todo el proceso descrito anteriormente, fue asignar arbitrariamente valores de 0 metros a los límites, en la Anexo 4 para el glaciar #12, y en el Anexo 5 para el glaciar #15 (sección 4.2.1).

---

segundo grado, tercer grado y polinomios de Lagrange en el caso de Simpson 3/8 (Wikipedia 2015).

Esta hipótesis es sin duda incorrecta, y en realidad sería necesario adquirir medidas de profundidad de bedrock con el GPR o con cualquier método disponible, en los límites de los glaciares #12 y #15. En vista de que no se realizó dicho proceso en campo, se ha considerado repetir los cálculos utilizando valores arbitrarios de espesor de hielo en los límites glaciares. Por lo tanto se procedió a calcular volúmenes, asignando valores de límite glaciar de 1 y 10 metros. Los resultados de estos cálculos están presentados

Glaciar #12			
Límite	Método	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Área [m <sup>2</sup> ]
0	Trapezoide	28'258.265	1'357.548
	Simpson	28'260.835	
	Simpson 3/8	28'260.974	
1	Trapezoide	29'173.935	1'357.548
	Simpson	29'176.441	
	Simpson 3/9	29'176.615	
10	Trapezoide	37'414.968	1'357.548
	Simpson	37'416.891	
	Simpson 3/10	37'417.377	

Tabla 4.3 Volúmenes y áreas calculadas en Surfer 10, para el Glaciar #12.

Glaciar #15			
Límite	Método	Volumen	Área
0	Trapezoide	1'915.038	246.956
	Simpson	1'915.629	
	Simpson 3/8	1'915.593	
1	Trapezoide	2'125.316	246.956
	Simpson	2'125.879	
	Simpson 3/9	2'125.842	
10	Trapezoide	4'017.826	246.956
	Simpson	4'018.128	
	Simpson 3/10	4'018.090	

Tabla 4.4 Volúmenes y áreas calculadas en Surfer 10, para el Glaciar #15.

.Se puede observar que el resultado del cálculo volumétrico por medio de los tres métodos matemáticos es similar; se escogió como resultado final para cada caso el valor generado por el método de Simpson siendo el que muestra un valor

intermedio de los tres métodos. En consecuencia el volumen de una superficie que cubre 1'357.548 m<sup>2</sup> de la parte inferior del Glaciar #12 se encuentra entre 28.3 Mm<sup>3</sup> (límites 0m) y 37.4 Mm<sup>3</sup> (límite 10m); y el volumen de la parte inferior del glaciar #15 que cubre una superficie de 246.956 m<sup>2</sup> está en el rango entre 1.9 Mm<sup>3</sup> (límites 0m) y 4.0 Mm<sup>3</sup> (límites 10m) . Cabe recalcar que el rango de valores calculados para los volúmenes glaciares nos indica que los valores medidos con GPR tienen más peso estadístico que los límites glaciares inferidos, es así que al aumentar 10 veces el valor del límite glaciar , el volumen aumenta alrededor del doble, y más no 10 veces como se esperaría.

#### 4.6 Cálculo de volumen equivalente en agua.

Para este análisis se utilizó la siguiente relación; el agua en estado líquido y bajo condiciones estándar tiene una densidad de 1 [g/cm<sup>3</sup>], mientras que para el hielo la densidad es 0.9 [g/cm<sup>3</sup>] (Rivera et al., 2002) . Entonces, se procedió a multiplicar el volumen de los glaciares Antisana #12 y Antisana #15 por 0.9 para conocer la cantidad de agua líquida almacena en dichos macizos glaciares. Además se realizó una comparación con el volumen de una piscina olímpica reglamentaria de 2500 m<sup>3</sup>, para que estos valores puedan ser asimilados más fácilmente (Tabla 4.5).

	Límite [m]	Volumen Glaciar [m <sup>3</sup> ]	Agua [m <sup>3</sup> ]	Equivalente a piscinas olímpicas
Glaciar #12	0	28'260.835	25'434.752	10.174
	10	37'416.891	33'675.202	13.470
Glaciar #15	0	1'915.629	1'724.066	690
	10	4'018.128	3'616.315	1.447

Tabla 4.5 Volúmenes de agua líquida contenida en los Glaciares #12 y #15.

Como resultado podemos observar que el volumen de agua líquida contenida en la zona de estudio del Glaciar #12 se encuentra en el rango de 25.4 Mm<sup>3</sup> (10.174 piscinas olímpicas) y 33.6 Mm<sup>3</sup> (13.470 piscinas olímpicas). Y para el caso de la zona de medición del Glaciar #15, el agua almacenada está entre 1.7 Mm<sup>3</sup> (690 piscinas olímpicas) y 3.6 Mm<sup>3</sup> (1.447 piscinas olímpicas).

## **CAPÍTULO 5**



## **5 Discusión , conclusiones y recomendaciones.**

### **5.1 Discusión de metodología y resultados**

A partir del método Geofísico Radar de Penetración de Suelo o GPR (secciones 2.3 y 3.2.3) se obtuvieron medidas del espesor de hielo en los glaciares #12 y #15 del Volcán Antisana (sección 4.2), datos que al ser tratados mediante Geoestadística sirvieron para generar mapas de espesor glaciar (sección 4.4), y posteriormente se efectuaron cálculos de volumen glaciar y volumen equivalente de agua (secciones 4.5 y 4.6), que son los productos finales de esta investigación. A continuación se realizará una discusión tanto de la metodología empleada como de los resultados obtenidos.

#### **5.1.1 Utilización del radar de penetración de suelo y equipo empleado.**

El método geofísico GPR fue desarrollado aproximadamente desde inicios de 1930 y una de sus primeras aplicaciones fue la medición de espesor de glaciares (Ortiz y Crespo, 2012). En la actualidad, el GPR es uno de los métodos geofísicos más utilizados en glaciología, superando en este campo a la Resistividad 2D y a la Sísmica de Reflexión, debido a la portabilidad de los equipos y a la producción de imágenes más detalladas de la interfaz de hielo y roca subyacente (Otto y Sass, 2006. Rivera et al., 2002).

Como es de esperar en un método geofísico de vanguardia, existen varios fabricantes en todo el mundo y una gran cantidad de tipos y clases de equipos GPR. Los GPRs más empleados en Glaciología, son los GPRs con antenas no blindadas separables para perfilaje puntual y los GPRs con antenas no blindadas juntas (RTA) para perfilaje continuo. Estos últimos presentan resultados no muy satisfactorios en zonas agrietadas y en pendientes verticales, debido a la complejidad de sortear grietas y escalar paredes mientras los operarios cargan a sus espaldas largas antenas de fibra de vidrio (Rivera et al., 2002).

En la presente investigación se utilizó un GPR modelo ProEx del fabricante MalaScience con una antena RTA de 25MHZ, y por ende se experimentó las complicaciones antes mencionadas. Por tal motivo se realizó el levantamiento de perfiles solamente en zonas del glaciar que fueron accesibles para el equipo

GPR. Con respecto a los equipos utilizados en investigaciones de espesor de la cobertura glaciar en la Cordillera de los Andes, anteriores al presente estudio (Tabla 5.1), se puede mencionar que en los Andes Chilenos se han empleado GPRs con antenas separas para perfile puntual y unidas para perfilaje continuo; tanto en glaciares fríos como en glaciares temperados, según se muestra en la publicación de Rivera et al. (2002). Por el contrario, en las investigaciones en glaciares de Colombia, Ecuador y Bolivia, se han empleado hasta el momento antenas separadas para medidas puntuales; como se indica en Ramírez et al. (2010). La presente investigación es la primera en emplear un GPR con antena unida para perfilaje continuo para estudiar el lecho rocoso bajo cobertura glaciar en los Andes Norte.

<b>Nombre del Glaciar</b>	<b>Tipo de Glaciar</b>	<b>Sistema GPR</b>	<b>Frecuencia Antenas</b>	<b>Velocidad de Propagación</b>	<b>Fecha de Medición</b>
Tapado (Chile)	Frio	Perfilaje Continuo	8.3 MHz	167 m/us	Febrero 1999
Juncal Norte (Chile)	Temperado	Perfilaje Continuo	5 Mhz	161 m/us	Enero 1999/ Enero 2001
San Francisco (Chile)	Temperado	Perfilaje Continuo	5 Mhz	161 m/us	Enero 1998
Esmeralda (Chile)	Frio	Perfilaje Continuo	5 Mhz	170 m/us	Diciembre 2000
Casa Pangué (Chile)	Temperado	Perfilaje Puntual	5 Mhz	161 m/us	Julio 2000
Nevado del Ruiz (Colombia)	Temperado	Perfilaje Puntual	0.1 - 3kHz	168 m/us	2002 / 2006
Nevado Santa Isabel (Colombia)	Temperado	Perfilaje Puntual	0.1 - 3kHz	168 m/us	2006
Nevado de Tolima (Colombia)	Temperado	Perfilaje Puntual	0.1 - 3kHz	168 m/us	1998
Antisana #15	Temperado	Perfilaje	0.1 - 3kHz	168 m/us	2002

(Ecuador)		Puntual			
Volcán Cotopaxi (Ecuador)	Temperado	Perfilaje Puntual	0.1 - 3kHz	168 m/us	2004
Glaciar del Zongo (Bolivia)	Temperado	Perfilaje Puntual	0.1 - 3kHz	168 m/us	2005
Antisana #15 (Ecuador)	Temperado	Perfilaje Continuo	25 MHz	168 m/us	2013-2014
Antisana #12 (Ecuador)	Temperado	Perfilaje Continuo	25 MHz	168 m/us	2013-2014

*Tabla 5.0.1 Algunas características de los equipos GPR empleados en diferentes investigaciones para estimar el espesor de hielo en Glaciares Andinos. Las primeras investigaciones realizadas en Chile corresponden a Rivera et al. (2002). Los estudios efectuados en Colombia, Ecuador y Bolivia hasta 2005, corresponden a la publicación de López y Ramírez (2010). Por último las mediciones de 2013-2014 efectuadas en el Glaciar Antisana pertenecen a este proyecto de investigación.*

En síntesis de lo expuesto con anterioridad, hasta la primera década del siglo veintiuno se empleaban equipos GPR de antenas separadas para medidas puntuales para medir espesores glaciares en los Andes. Ligado al desarrollo tecnológico del los equipos GPR, en los últimos años se ha popularizado el uso de GPRs con antenas unidas para perfilaje continuo, para citar algunos ejemplos tenemos a : Dávila L. (2014) donde se expone el monitoreo de varios glaciares de los Andes Peruanos empleando un equipo GPR de perfilaje continuo; en el caso de Bolivia se midieron los espesores de los glaciares de Zongo y Charquini (Réveillet et al., 2015) con un GPR de perfilaje continuo con características similares al empleado en la presente investigación.

Un factor trascendental que también debe ser considerado al momento de elegir el equipo GPR para labores en Glaciar, es la frecuencia de la antena. En varios glaciares de todo el mundo se han empleado antenas con frecuencias entre los 30 y 700 MHz, siendo exitosas en la prospección de hielo frío ( temperaturas por debajo del punto de fusión), el cual es muy permeable a la penetración de ondas electromagnéticas; pero en el caso de hielo temperado (hielo con temperaturas cercanas al punto de fusión), donde pueden existir cuerpos de agua de

dimensiones métricas dentro del glaciar, que pueden generar significativa dispersión y absorción de las ondas electromagnéticas; se recomienda utilizar antenas con frecuencias entre 3 a 30 MHz (Watts & England, 1976). En el Caso de los glaciares Andinos se han empleado antenas entre 8.6 MHz a 5 MHz, en el Caso de Chile (Rivera et al., 2002) y antenas de 0.3kHz en Glaciares de Colombia, Ecuador y Bolivia (Ramírez et al. 2010). En el caso particular de este estudio, se empleó una antena de 25 MHz (Tabla 5.1), la cual se encuentra dentro del rango de frecuencias recomendables para glaciares temperados según Watts & England (1976); además cabe mencionar que en un proceso previo a esta investigación se realizó una fase de factibilidad donde se comprobó que dicha antena funcionaba de manera confiable en las condiciones ambientales y topográficas del volcán Antisana.

Por último un factor adicional que debe ser analizado respecto al método utilizado es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el hielo. De manera estandar se recomienda que la velocidad que se debe utilizar en hielo es de 170[m/us] (Hubbard & Glasser, 2005). Pero en la práctica varios autores emplean distintas velocidades, a partir de medidas de campo y de laboratorio sobre muestras de hielo. Por citar algunos ejemplos, tenemos a Jezek et al. (1978) que indica que la velocidad de propagación en glaciares fríos de es 167[m/us]. En glaciares temperados se midieron velocidades de  $161 \pm 6.9$  [m/us] en zonas de ablación de la ex URSS por Macharet et al. (1993). En el caso de los Andes, por ejemplo Rivera et al. (2002) para el caso de glaciares fríos emplea velocidades de 168 [m/us] y para glaciares temperados 161[m/us] ; en cambio Ramírez et al., (2010) utiliza una velocidad de 168 [m/us] en los glaciares temperados de Colombia, Bolivia y Ecuador, incluyendo al Glaciar Antisana #15 (Tabla 5.1). En la presente investigación se usó una velocidad de 168 [m/us]. A partir de esta situación se genera una incertidumbre, si se debe usar el valor de velocidad de 161 [m/us] según Rivera et al. (2002) o el valor 168 [m/us] de Ramírez et al.(2010), para el Glaciar Temperado del Antisana. Para resolver esta pregunta se debe realizar ensayos de campo, para definir de manera experimental cual es la velocidad exacta de propagación de las ondas electromagnéticas en las condiciones ambientales del Volcán Antisana.

Por lo anteriormente expuesto, también es importante mencionar que existe una diferencia del 4% entre utilizar una velocidad de propagación de ondas electromagnéticas en hielo de 168 [m/us] y de 161 [m/us]. Porcentaje que no es significativo al momento de la interpretación de radargramas. Por ejemplo, la medida mínima de espesor del glaciar #15 es de 2 metros, utilizando una velocidad de 168 [m/us]; y este valor sería de 1.9 metros si se hubiera empleado una velocidad de 161 [m/us]. Un caso similar sucede para el valor de espesor máximo en el Glaciar #12, donde el valor de 77 metros se obtuvo con una velocidad de 168 [m/us], el cual sería de 74 metros al emplear una velocidad de 161 [m/us].

### **5.1.2 Medidas de profundidad**

A partir de perfiles GPR continuos, se extrajo medidas puntuales siguiendo una malla Geoestadística regular con un espaciamiento entre nodos cercano a los 50 metros, obteniendo así 38 puntos de muestreo en el Glaciar #15 y 53 puntos en el Glaciar #12 (sección 4.2.1) ; valores que duplican la cantidad de puntos de muestreo de la publicación de Ramírez et al. (2010), donde en promedio por glaciar se obtienen 20 puntos de muestreo utilizando un GPR con antenas separables para perfilaje puntual. En la investigación antes mencionada, por ejemplo, para el Glaciar #15 Antisana se extrajeron 15 puntos de muestreo, lo que representa menos de la mitad de los 38 puntos obtenidos en el presente trabajo.

Los puntos de muestreo en los glaciares #12 y #15 del Antisana, pueden ser multiplicados, al maximizar la malla Geoestadística teórica empleada, reduciendo el espaciamiento entre nodos, así se obtendría mayor cantidad de puntos de muestreo. Sin embargo al momento de la interpolación no será un aporte significativo. En realidad, lo que serviría para mejorar los resultados es la obtención de datos en lugares donde actualmente se carece de información y que no pudieron ser muestreados por no haber podido acceder a ellos.

Por otra parte, no tiene sentido comparar las medidas puntuales de espesor de hielo de Ramírez et al.,(2010) en el Glaciar #15 Antisana y los resultados del presente estudio, debido a que la altura mínima de muestro en el primer trabajo

inicia a los 4803 msnm y finaliza en 5005 msnm (Ramírez et al., 2010). Por efecto del retroceso glaciar aproximado de 25-30 m promedio anual, desde 2002 hasta 2014, el glaciar #15 habría retrocedido alrededor de 300 metros, por ende para 2014 el límite glaciar inferior inicia a los 4850msnm (L. Maisincho, comunicación personal, septiembre 2015) y las medidas de espesor fueron recolectadas entre los 4940 msnm y los 5200msnm. Es decir, prácticamente no hay intersección entre las zonas estudiadas en ambos trabajos.

### **5.1.3 Mapas de profundidad**

Los mapas de profundidad fueron creados a partir de un proceso de interpolación por medio de Kriging ordinario, que es uno de los métodos geoestadístico más empleados en Ciencias de la Tierra. Este proceso matemático inició con la estructuración de variogramas para encontrar el mejor modelo que represente la relación entre los valores muestreados, como se observa en la sección 4.1.2. Cuatro modelos de variogramas (Esférico, Exponencial, Gaussiano y Lineal) se adaptaron de manera coherente a los datos de profundidad de los Glaciares #12 y #15, siendo seleccionado el modelo de variograma Lineal, debido a que es el que mejor se adapta a los datos y tiene un menor error estándar. De igual manera se pudo emplear cualquiera de los otros 3 modelos de variograma, debido a que también representan de manera eficaz la relación espacial entre valores de muestreo, sin generar cambios muy significativos en el proceso de Kriging.

Como ya se ha mencionado antes, se considera que un aspecto que ayudaría de manera significativa en el proceso de Kriging, es la obtención de datos en zonas que no fueron accesibles por el equipo GPR, con lo que se conseguiría datos mejor distribuidos en el contexto geométrico de los glaciares. En el caso del Glaciar #15 se podría levantar perfiles a mayor altura y de ser posible cercanos a la cima del Glaciar. En cambio en el Glaciar #12 es necesario levantar perfiles en la zona Sur-Oriental donde no se pudo ingresar con el equipo por encontrarse esta zona agrietada y susceptible a caídas de seracs (bloques de hielo); y también es necesario el levantamiento de perfiles en zonas más altas y próximas a la cima.



También se debe considerar que un aspecto que aumentaría la fiabilidad matemática del proceso geoestadístico, es la realización de una validación cruzada de los datos empleados, con la cual se podría estimar la precisión de los resultados producto de la extrapolación mediante Kriging ordinario. Dicho proceso no fue realizado debido a que estaba fuera del alcance previsto para esta investigación, pero que podría ser realizado a posterior.

#### **5.1.4 Incertidumbre relacionada a los límites glaciares**

Para realizar un cálculo volumétrico eficiente, y al no contar con mediciones en los límites glaciares, se optó por generar puntos limítrofes con medidas de espesor glaciar de 0, 1 y 10 metros, a partir de fotografías aéreas. A pesar de que estos espesores son arbitrarios, los resultados obtenidos muestran que estadísticamente tienen menos peso que las medidas reales de profundidad. Por ejemplo al utilizar como límite glaciar medidas de 1 metros y de 10 metros, se observa que los resultados volumétricos únicamente se duplican y no aumentan 10 veces como habría de esperarse si los valores de límite glaciar tuvieran más importancia en contexto dimensional de los glaciares (sección 4.5).

#### **5.1.5 Comparación con otras metodologías empleadas en cálculos volumétricos de glaciares ecuatorianos**

En el presente trabajo de investigación se presenta una nueva metodología de estimación de volúmenes glaciares, la cual se basa en tres pasos principales: 1) la obtención de la mayor cantidad de perfiles posibles a lo largo del contexto geométrico de los glaciares estudiados, para así reducir la incertidumbre por falta de medidas de espesor glaciar; 2) interpolación y extrapolación de los datos obtenidos mediante el método de kriging ordinario; 3) finalmente, el cálculo volumétrico a partir de integraciones numéricas mediante varios modelos matemáticos (Regla de trapecio, Simpson y Simpson 3/8 ). Esta metodología será comparada a continuación con estudios precedentes.

##### **5.1.5.1 Comparación con Ramírez et al. (2010)**

Ramírez et al. (2010) , sigue la siguiente metodología para calcular el volumen del glaciar Antisana #15: 1) digitalización de curvas de nivel y creación de un

modelo digital de la superficie. 2) Creación de un modelo digital subglaciar a partir de las medidas de espesor de hielo (un total de 15 medidas obtenidas por medio de un GPR de medidas puntuales). 3)El cálculo volumétrico se efectuó a partir de la generación de un matriz de paralelepípedos entre los modelos digitales de superficie y subglaciar; dichos paralelepípedos tienen como base el tamaño del pixel y como altura el espesor de hielo. El volumen glaciar se obtiene de la suma de los volúmenes de los paralelepípedos.

Proceso similar se efectuó en la presente investigación, donde se calculó los volúmenes de los glaciares #12 y #15 del Antisana a partir de una integración numérica (por medio de tres modelos matemáticos: regla de trapecio, Simpson y Simpson 3/8), considerando la curvatura de la superficie modelada en el proceso de kriging (modelo digital subglaciar), pero no considera la curvatura superficial, es decir que se simplificó el relieve topográfico de los glaciares #12 y #15 aproximándolos a una superficie plana. En particular la regla del trapecio calcula el volumen del trapecio bajo la curva, de manera similar a calcular el volumen del paralelepípedo efectuado en Ramírez et al. (2010). Es decir que la regla de los trapecios equivale a utilizar el método de Ramírez et al. (2010).

Sin embargo no podemos hacer una comparación directa con Ramírez et al. (2010), que estudió 92.335 m<sup>2</sup> del glaciar #15 obteniendo un volumen total de 1.6 Mm<sup>3</sup>, iniciando la toma de medidas a los 4803 msnm y finalizando en 5005msnm. En cambio en la presente investigación se estudiaron 246.957 m<sup>2</sup> del glaciar #15, obteniendo un volumen en el rango de 1.9 a 4.0 Mm<sup>3</sup>, teniendo como punto de partida para el muestreo los 4850 msnm y concluyendo a los 5135 msnm . Por lo expuesto anteriormente la superficie de intersección del glaciar #15 es limitada para realizar comparación entre ambos estudios.

### 5.1.5.2 Comparación con Cáceres et al. (2004)

Cáceres et al. (2004) calculó el volumen del macizo glaciar del Cotopaxi, a partir de multiplicar el área de cobertura glaciar (obtenida por fotogrametría) por el espesor promedio de unas pocas mediciones puntuales obtenidas con GPR (alrededor de 21 puntos de espesor glaciar). Este método será llamado como "espesor promedio".

Para comparar entre el método de Cáceres et al. (2004) y el utilizado en el presente estudio, se procedió a adoptar la metodología del "espesor promedio" con los datos obtenidos en el presente trabajo; los resultados se muestran a continuación. En el Caso del Glaciar #15 si se toman solamente 10 mediciones arbitrariamente distribuidas por el glaciar, se obtiene un espesor promedio de 31 metros; multiplicando dicho promedio por la superficie de estudio ( 246.956 m<sup>2</sup>), se obtiene un volumen de 7.7 Mm<sup>3</sup>, lo que es aproximadamente el doble del obtenido por Regla de Simpson con un límite glaciar de 10 metros (4.0 Mm<sup>3</sup>). Situación similar se observa en el Glaciar #12, donde igualmente se utilizaron 10 puntos de medida para todo el glaciar, con lo que se obtuvo un espesor promedio de 50 metros; al multiplicar este valor por la superficie estudiada de 1'357.548 m<sup>2</sup>, se obtuvo un volumen de 67.9 Mm<sup>3</sup>, el cual nuevamente es casi el doble del valor calculado por integración por Simpson con un valor de límite glaciar de 10m (37.4 Mm<sup>3</sup>).

Estos resultados sugieren que la metodología con estadística tradicional para cuantificar volúmenes glaciares, utilizando un espesor promedio, sobreestima sus resultados en alrededor del doble, con respecto a los resultados que se obtienen con la metodología descrita en esta investigación.

## 5.2 Conclusiones

- Se probó que el GPR Mala ProEx con una antena RTA de 25 MHz de perfilaje continuo, funciona de manera confiable en las condiciones ambientales del Glaciar Temperado Antisana, produciendo datos válidos y comprobables de espesor de hielo. Resaltando como ventajas la portabilidad del equipo a través de topografía pronunciada y la obtención de datos en tiempo real.
- La logística de trabajo en alta montaña, con un equipo mínimo de 6 personas divididas en 2 cordadas, resultó exitosa, permitiendo levantar más de 3297 m divididos en 25 perfiles GPR, en los Glaciares #12 y #15 del volcán Antisana; trabajo realizado en 5 misiones de campo y alrededor de 35 horas de labores en glaciar.
- El análisis estadístico (sección 4.1) de 53 puntos de muestreo en el Glaciar #12 y 38 puntos en el Glaciar #15, nos permiten concluir que existe una mejor colección de datos en el Glaciar #15 que en el Glaciar #12, observado en la distribución gaussiana normal en los datos del glaciar #15, mientras que en el glaciar # 12 la campana de Gauss no está completa. Además Los gráficos de dispersión direccional de espesor de hielo son congruentes con la dirección de los ejes glaciares en ambos casos (Glaciar#12 Este-Oeste, Glaciar #15 Noroeste-Sureste) y con las implicaciones de forma de bedrock de los glaciares tropicales en retroceso.
- En las medidas de puntos de espesor en el Glaciar #12 (Figura 7 sección 4.2) , se obtuvo una profundidad promedio 59m, una desviación estándar de 16m, una moda de 65m, el mínimo valor es 6m y el máximo 77m. Para el Glaciar #15 (Figura 8 sección 4.2) el espesor promedio es de 29m , con una desviación estándar de 15m, el mínimo valor es 2m y el máximo 62 m.
- A partir del análisis geoestadístico (sección 4.1.2) de los datos de espesor de los Glaciares #12 y #15, se generaron 4 modelos de variogramas: Esférico, Exponencial, Gaussiano y Lineal; que representa de manera fiable la relación espacial de datos, siendo escogido el modelo de variograma Lineal para realizar el proceso de interpolación por Kriging ordinario.

- Como resultado del proceso de Kriging ordinario, se generaron mapas de espesor Glaciar de los Glaciares #12 y #15 (sección 4.4 ) que representan la proyección del modelo tridimensional de dichos glaciares al plano horizontal.
- Se calculó por medio de integración numérica con la Regla de Simpson ( sección 4.5) un volumen en el rango de 28.3 Mm<sup>3</sup> (límites 0m) y 37.4 Mm<sup>3</sup> (límite 10m) para 1'357.548 m<sup>2</sup> del Glaciar #12; iniciando desde la cota de 4855 msnm hasta los 5280 msnm, correspondientes a la zona de Ablación, línea de equilibrio (5100msnm), e inicio de la zona de acumulación de dicho glaciar. En el caso del Glaciar #15 el volumen estimado se encuentra entre los 1.9 Mm<sup>3</sup> (límites 0m) y 4.0 Mm<sup>3</sup> (límites 10m) en una área de 246.956 m<sup>2</sup>, desde la cota de 4945 msnm hasta los 5145 msnm, pertinentes a la zona de ablación, línea de equilibrio e inicio de la zona de acumulación.
- El volumen de agua líquida almacenada en el área estudiada del glaciar #12 se estimó entre 25.4 Mm<sup>3</sup>(límites 0m) y los 33.6 Mm<sup>3</sup>(límites 10m), que equivalen respectivamente a un rango de 10.174 y 13.470 piscinas olímpicas estándar. En el Caso del Glaciar #15 se estima que la cantidad de agua almacenada es de 1.7 Mm<sup>3</sup> (límites 0m) a 3.6 Mm<sup>3</sup> (límites 10m), que equivalen entre 690 y 1.447 piscinas olímpicas estándar, correspondientemente.
- El proceso de la presente investigación: el levantamiento de perfiles en alta montaña, el método geofísico y el análisis geoestadístico; en conjunto representan una metodología rápida, económica y versátil, para el estudio de espesores de hielo en grandes macizos glaciares de volcanes de Ecuador y de la región Andina.

### 5.3 Recomendaciones

- Para futuras investigaciones geofísicas por medio de GPR en glaciares del Ecuador, se recomienda realizar perforaciones en hielo con el fin de calcular de manera experimental la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en las condiciones ambientales propias de esta región.
- Para obtener una mejor distribución espacial de datos en el contexto geométrico de los glaciares se recomienda levantar perfiles GPR en la mayoría de zona accesibles, sin importar que sean perfiles de corta extensión. Esto permitirá en el proceso de Kriging abarcar zonas más amplias y una interpolación más confiable. Puntualmente para el Glaciar #12 se deberían levantar perfiles en la zona de ablación Suroriental y en la zona de acumulación sobre los 5300 msnm; y para el glaciar #15 obtener perfiles sobre los 5200msnm.
- Levantar perfiles GPR en la en la cumbre del Volcán Antisana permitirá resolver una incertidumbre vulcanología sobre este volcán; se asume en Hall et al., (2012) que el cráter actual del volcán está ubicado en el flanco norte y está lleno de hielo, razón por la cual su cumbre plana. Además nos permitiría localizar vestigios del cráter antiguo de Antisana I y aportar a la teoría de colapso de edificio de hace 210 Ka, presentes en la publicación anteriormente mencionada.

## Referencias Citadas:

Arias Margarita. (2010). Modelación de crecidas glaciares a distintas escalas de tiempo en los ríos Humboldt y los Crespos a partir de la meteorología del volcán Antisana. *Proyecto de Titulación Maestría. Escuela Politécnica Nacional, 9,23-24.*

Basantes, Rubén. (2015). Contribution à l'étude de l'évolution des glaciers et du changement climatique dans les Andes équatoriennes depuis les années 1950. *PhD Thesis, Univ. Grenoble, Grenoble, France, pp., 191.*

Biswas Asim & Cheng Bing Si. (2013). Model averaging for semivariogram model parameters. *INTECH,82-90.*

Biskup K., Lorenzo H., Arias P. (2010). Aplicabilidad del radar de subsuelo para el estudio de la zona no saturada del suelo: ejemplos en ambientes arenosos costeros. *Departamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente, Universidade de Vigo.*

Cáceres B., Ramírez J., Francou B., Eissen J., Taupin J., Jordan E., Ungerechts L., Maisincho L., Barba D., Cadier E., Bucher R., Peñafiel A., Samaniego P., Mothes P. (2004) Determinación del volumen del casquete de hielo del volcán Cotopaxi. *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI, Institut de Recherche pour le Développement IRD, Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional IG-EPN, Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas,29-48.*

Cáceres Bolivar. (2010). Actualización del inventario de tres casquetes glaciares del Ecuador. *Master's thesis, Université de Nice Sofia Antipolis.*

Dávila Luzmila. (2014). Actividades Glaciológicas en el Perú. *Word Glacier Monitoring Service, SENAMHI.* [ Extraído en noviembre 2015]

[http://globalcryospherewatch.org/meetings/sacryonet2014/presentations/UGRH\\_PERU.pdf](http://globalcryospherewatch.org/meetings/sacryonet2014/presentations/UGRH_PERU.pdf)



Diaz Martin. (2002). Geoestadística aplicada. *Instituto de Geofísica, y astronomía, CITMA, CUBA*, 31-40. [Extraído en junio 2015].

<http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/geoest/GeoEstadistica.pdf>

Dobrin M., Savit C., (1988). Introduction to geophysical prospecting. Fourth Edition.

Favier, V., P. Wagnon, J. P. Chazarin, L. Maisincho, et A. Coudrain. (2004a). One-year measurements of surface heat budget on the ablation zone of Antizana Glacier 15, Ecuadorian Andes, *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, No. D18, D18105,.

Favier, V., Coudrain, A., Cadier, E., Francou, B., Ayabaca, E., Maisincho, L., Praderio, E., Villacis, M., and Wagnon, P. (2008). Evidence of groundwater flow on Antizana ice-covered volcano, Ecuador, *Hydrolog. Sci. J.*, 53(1), 278-291,.

Francou, B., E. Ramirez, B. Cáceres, and J. Mendoza. (2000). Glacier evolution in the tropical Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, and Antisana, Ecuador. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 29:416-422.

Francou B., Cáceres B., Villacis M., Basantes R., Maisincho L., Galarraga R., Romero J.C. (2011). Analizando el cambio climático a partir de los glaciares del Ecuador. *IRD, SENESCYT, EPMAPS, INAMHI, EPN. QUITO-ECUADOR*.

Francou, B., Rabatel, A., Soruco, A., Sicart, J.E., Silvestre, E.E., Ginot, P., Cáceres, B., Condom, T., Villacís, M., Ceballos, J.L., Lehmann, B., Anthelme, F., Dangles, O., Gomez, J., Favier, V., Maisincho, L., Jomelli, V., Vuille, M., Wagnon, P., Lejeune, Y., Ramallo, C., & Mendoza, J. (2013). Glaciares de los andes tropicales, víctimas del cambio climático. *Comunidad Andina, PRAA, IRD*. 35,65-78.

- Hall M., Mothes P., Aguilar J., Bustillos J., Ramón P., Eissen J., Monzier M., Robin C., Egred J., Militzer A., Yepes H. (2012). Peligros volcánicos asociados con el Antisana. *IG-EPN, IRD. Quito-Ecuador.*
- Henriquez, C., Killorn, R., Bertsch, F., Sancho, F. (2005). La Geostatística en el Estudio de la variación espacial de la fertilidad del suelo mediante el uso del Interpolador Kriging. *Agronomía Costarricense*, 24-25.
- Hubbard B. and Glasser N. (2005). Field techniques in glacial geomorphology. *Centre for Glaciology University of Wales, Aberystwuth*, 148-177.
- JEZEK, K., J. CLOIJGH, C. BENTIXY & S. SHABTAIE. (1978) . Dielectric permittivity of glacier ice measured insitu by radar wide-angle reflection. *Journal of Glaciology*, 21(85 J: 199-208).
- Macharet, Y., Moskalevsky, M. & Vasilenko, E. (1993). Velocity of radio waves in glaciers as an indicator of their hydrothermal state, structure and regime. *Journal of Glaciology*, 29(132): 373-384
- Mala GeoScience. (2012). MANUALES Y PRESENTACIONES DE EQUIPOS GPR.
- Maisincho Luis. (2008). Reconstrucción y predicción de la evolución del balance de masa y la línea de nieve del glaciar 15 \_ del Antisana usando un modelo degree-day. Master's thesis, Université de Nice Sophia Antipolis.
- Ortiz G. y Crespo T.M. (2012). Aplicación de la técnica de georadar a los riesgos litorales: fundamentos, metodología, procesamiento e interpretación de datos . *Departamento de Biología y Geología, Universidad Rey Juan. Madrid, España.*
- Otto J.C., Sass O., (2006). *Comparing geophysical methods for talus slope investigations in Turtmann valley (Swiss Alps). ELSEVIER.*
- Rabatel, A., B. Francou, A. Soruco, J. Gomez, B. Cáceres, J. Ceballos, R. Basantes, M. Vuille, J. Sicart, C. Huggel, C. Huggel, M. Scheel, Y. Lejeune, Y. Arnaud, M. Collet, T. Condom, G. Consoli, V. Favier, V. Jomelli, R. Galarraga, P. Ginot, L. Maisincho, J. Mendoza, M. Ménégoz, E. Ramirez, P.

- Ribstein, W. Suarez, M. Villacis, and P. Wagnon. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere* 7:81-102.
- Ramírez J., Francou B., Cadier E., Soruco A., Ramírez É., Soruco Á., Gómez, J., Cáceres B., Maisincho L., Guarnizo L., Vargas C., Naranjo J. (2010). Uso de un GPR (Ground Penetrating Radar) en glaciares tropicales: Colombia, Ecuador y Bolivia. Artículo publicado en compilación de López C., Ramírez J., (2010). Glaciares, nieves y hielos de América Latina. Cambio climático y amenazas. *Instituto Colombiano de Geología y Minería*, 137-164.
- Réveillet M., Rabatel A, Gillet-Chaulet F, Soruco A. (2015). Simulations of changes to glacier Zongo, Bolivia (16°S), over the 21st century using a 3-D full Stokes model and CMIP5 climate projections. *Annals of Glaciology*, 56(70).
- Rivera A., Casassa G., Acuña C. (2002). Mediciones de espesor en Glaciares de Chile Centro-Sur. *Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Centro de Estudios Científicos, Valdivia, University of Bristol, UK*. 90-93.
- Ruiz, J.C., Villacís, M. (2012) Mediciones de espesor de glaciar con Radar - Antisana y Cotopaxi (Ice Penetrating Radar). Informe inédito. *Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental - EPN JEAI*.
- Villacis, Marcos. (2008). Ressources en eau glaciaire dans les Andes d'Equateur en relation avec les variations du climat : Le cas du volcan Antisana. *PhD Thesis, Univ. Montpellier II, Montpellier, France*, 231pp.
- Watts, R. & England, R. (1976). Radio-echo sounding of temperature glaciers> ice properties and sounder design criteria. *Journal of Glaciology*, 17(75): 39-48.
- Yilmaz, O. (1987). Seismic Data Processing. SEG.
- Zapata, C., Andrade, D., Córdova, J., Maisincho, L., Carvajal, J., Calispa, M., & Villacís, M. (2014). New high-definition thickness data obtained at tropical glaciers: preliminary results from Antisana volcano (Ecuador)

using GPR. *Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU General Assembly 2014.*

<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-14205.pdf>

### **Bibliografía Online.-**

INEC. Censo de Población y vivienda 2010. [ Fecha de consulta 29 de enero 2015]. Disponible en:  
<http://www.siise.gob.ec/siiseweb/siiseweb.html?sistema=5#>.

Empresa Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento. Agua Captada, Producida y Distribuida. [Fecha de Consulta 11 de Enero del 2015].

Disponible en:  
[www.aguaquito.gob.ec/sites/default/files/documentos/capta\\_anualizado\\_e-ic\\_2014.pdf](http://www.aguaquito.gob.ec/sites/default/files/documentos/capta_anualizado_e-ic_2014.pdf).

European Space Agencia. Dinámica de los Glaciares. [ Fecha de consulta 11 de enero 2015].

Disponible en :  
[//www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_Global\\_ES/SEM4OL22ECH\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_ES/SEM4OL22ECH_0.html)

Propiedades Electromagnéticas. [ Fecha de consulta 03 de febrero 2015].

Disponible en : <https://iupsm.files.wordpress.com/2010/08/permitividad.pdf>.

Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL ANTISANA. [Extraído en junio 2015].

<http://www.igepn.edu.ec/antisana>

Wikipedia. ULTIMA GRAN GLACIACIÓN.

[Extraído en junio 2015].  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Last\\_Glacial\\_Maximum](http://en.wikipedia.org/wiki/Last_Glacial_Maximum)

Universidad de Chile. KRIGING.

[Extraído en junio 2015].  
[https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=16&cad=rja&uact=8&ved=0CEYQFjAFOApqFQoTCIyA3vuahMYCFQQ3rAodZLIAPg&url=https%3A%2F%2Fwww.u-cursos.cl%2Fingenieria%2F2008%2F1%2FMI54A%2F1%2Fmaterial\\_docente%2Fbajar%3Fid\\_material%3D169140&ei=gLJ3VYzAF4TusAXk5ILwAw&usg=AFQjCNGF-A4KR8BDFh-q-hny9MqJT5ef9Q&bvm=bv.95039771,d.b2w](https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=16&cad=rja&uact=8&ved=0CEYQFjAFOApqFQoTCIyA3vuahMYCFQQ3rAodZLIAPg&url=https%3A%2F%2Fwww.u-cursos.cl%2Fingenieria%2F2008%2F1%2FMI54A%2F1%2Fmaterial_docente%2Fbajar%3Fid_material%3D169140&ei=gLJ3VYzAF4TusAXk5ILwAw&usg=AFQjCNGF-A4KR8BDFh-q-hny9MqJT5ef9Q&bvm=bv.95039771,d.b2w)

Spacial Analyst.net. KRIGING UNIVERSAL. [Extraído en junio 2015].

[http://spatial-analyst.net/ILWIS/htm/ilwisapp/universal\\_kriging\\_functionality.htm](http://spatial-analyst.net/ILWIS/htm/ilwisapp/universal_kriging_functionality.htm)

Geo-sense.com,. 'Teoría GPR'. [Extraído en Nov. 2015].

<http://www.geo-sense.com/GPRmore.htm>

Mala GeoScience. (2015). Página oficial de productos y servicios. [Extraído en junio 2015]

<http://www.malags.com/>

Instituto Geográfico Militar. (2015) Catálogo de Ortofotografía Nacional. [Extraído en Septiembre 2015]

# ANEXOS



## ***Anexo 1, Procesamiento e Interpretación de Radar-gramas en los Glaciares Crespos y 15 del Volcán Antisana***

### **PRESENTACION**

En el siguiente trabajo se presentan los radargramas procesados y filtrados, obtenidos en los glaciares #12 y #15 del volcán Antisana. Los datos en bruto fueron recolectados en las campañas de campo del proyecto semilla **PIS- 1326** de la Escuela Politécnica Nacional, en los meses de diciembre 2013, Enero 2014 y Marzo 2014.

Los radargramas en bruto fueron tratados en el programa GroundVision 2.0, del fabricante Mala GeoScience. Se utilizó una velocidad propagación de las ondas electromagnéticas en el hielo, de  $168\text{m}/\mu\text{s}$ . El eje Y se presenta en profundidad (m) y el eje X en distancia (el cual solo presenta un valor relativo debido a que la velocidad de marcha en las misiones de campo no se puede definir con exactitud). Los filtros que fueron empleados fueron: Delete mean trace, Average, Thershold, FIR y Triangular FIR .

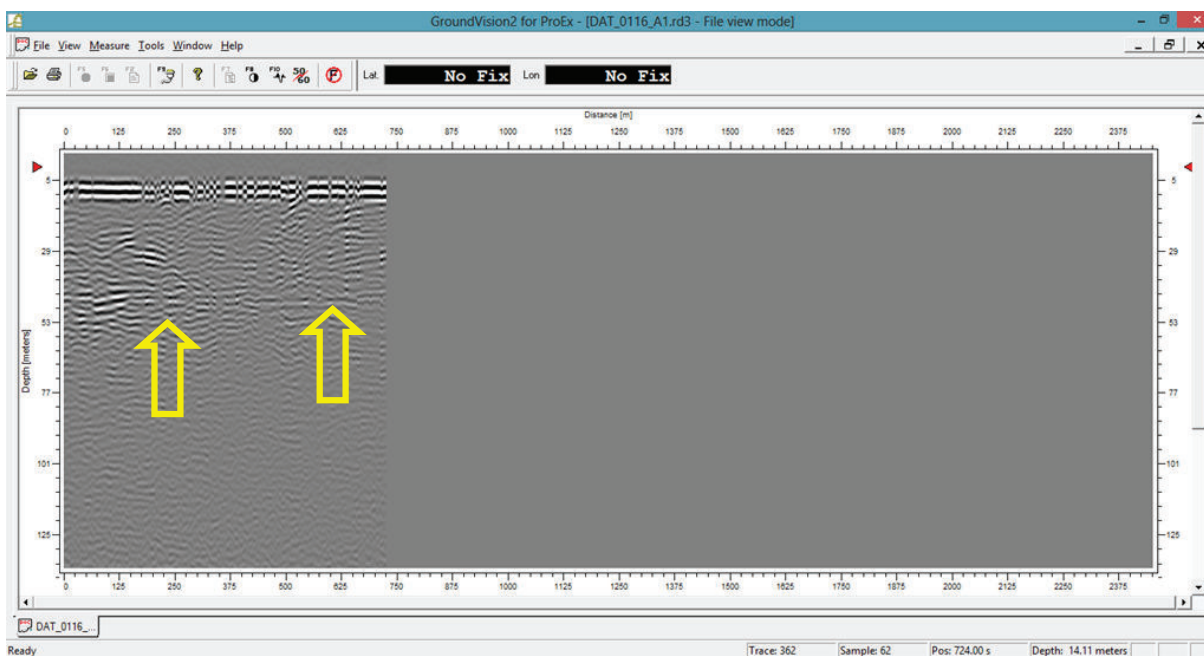
Una vez finalizado el proceso de filtrado de radargramas se efectuó la etapa de interpretación , donde se pretendió localizar la superficie de contacto entre roca-hielo , esta superficie en algunas ocasiones puede ser subjetiva y depende del criterio de la persona encargada del analices, para ello las propiedades básicas que deben presentar las superficies de contacto hielo-roca en los radargramas son las siguientes : 1)continuidad atreves de todo el perfil; 2) mayor definición y profundidad concordante con otros radargramas. Las superficies que se interpretaron contacto hielo y roca se resaltan con una flecha amarilla.

## DESARROLLO

### *Glaciar Crespos( 12).-*

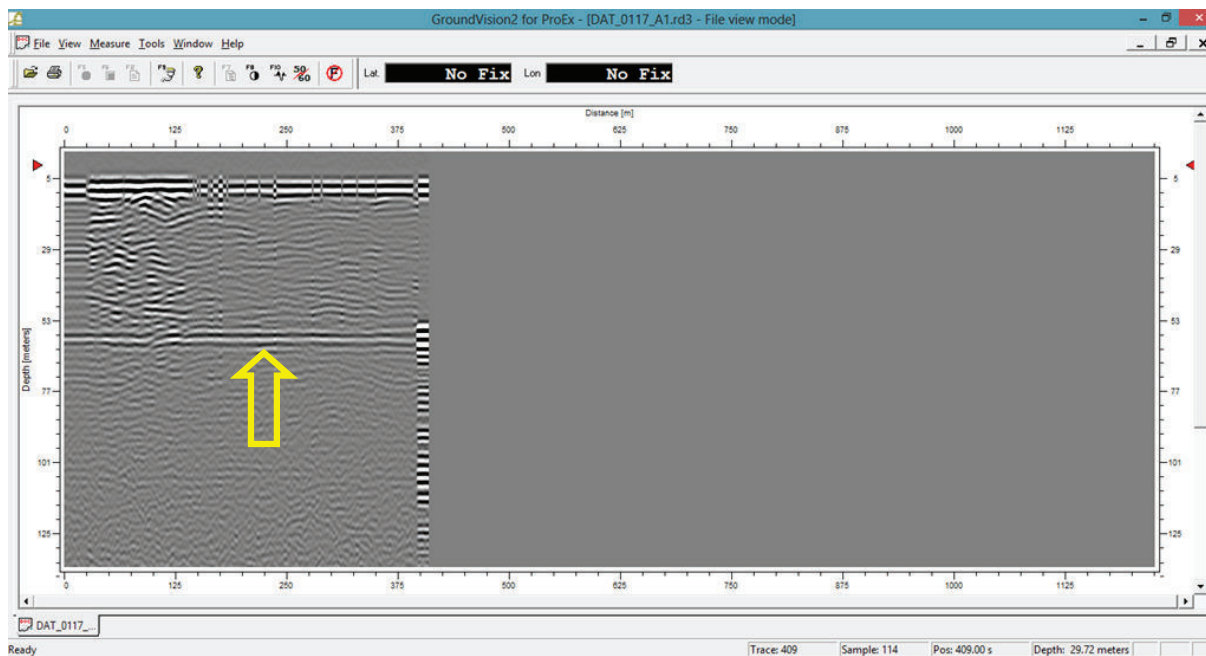
#### Perfil # 1:

# Perfil:	1		
Código de Radiograma:	DAT_0116		
Fecha:	18/12/2013		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816628-9945466	Posición Final:	17M0816788-9945497
Posición en mapa:	A01	A02	
Largo del perfil:	162.1 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	168 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	2.0 s		
Observaciones:			



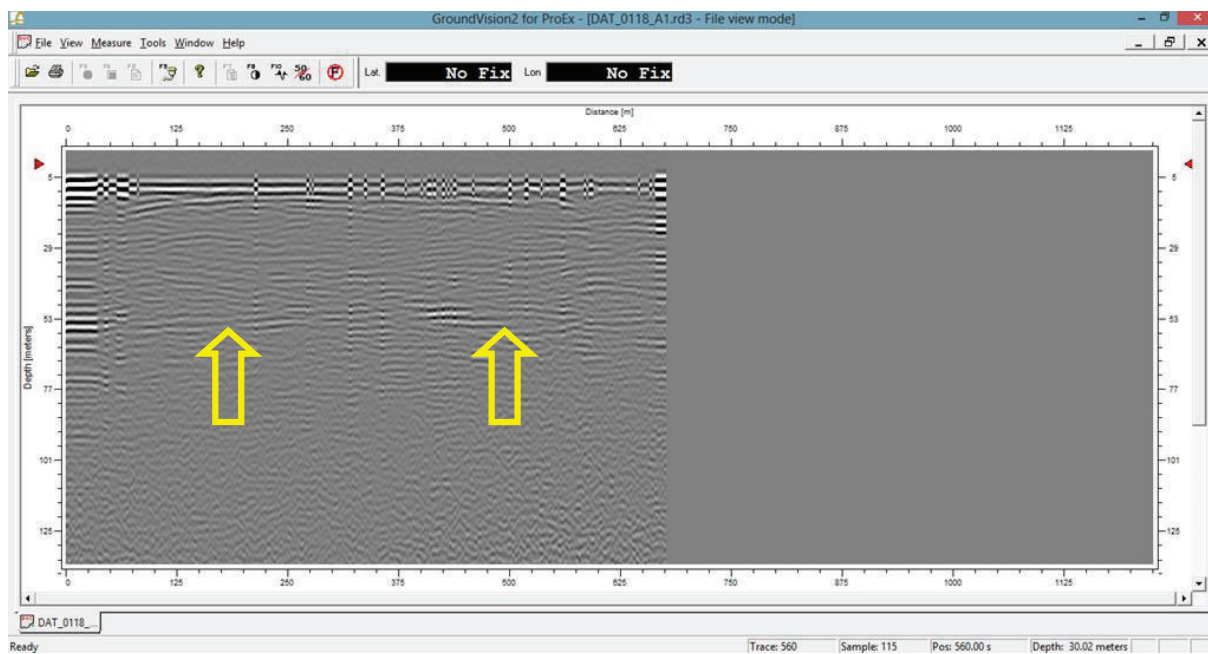
**Perfil # 2:**

# Perfil:	2		
Código de Radiograma:	DAT_0117		
Fecha:	18/12/2013		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816788-9945497	Posición Final:	17M0816844-9945578
Posición en mapa:	A02	A03	
Largo del perfil:	98.9 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	168 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	1.0 s		
Observaciones:			



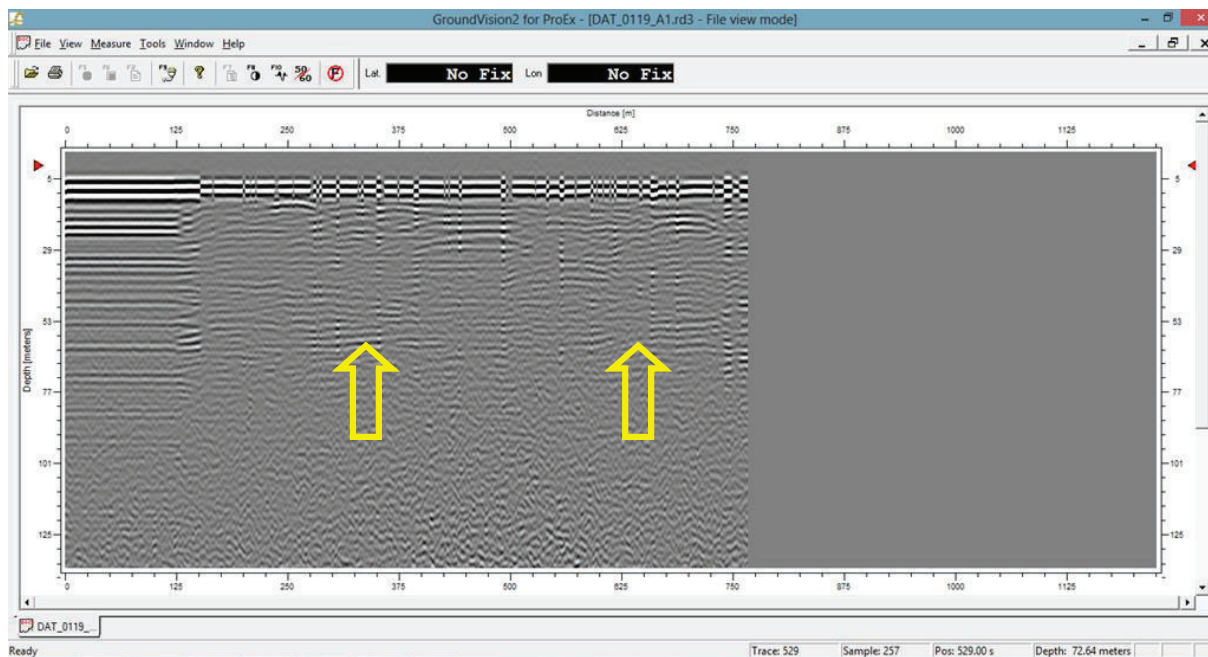
**Perfil #3**

# Perfil:	3		
Código de Radiograma:	DAT_0118		
Fecha:	18/12/2013		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816844-9945578	Posición Final:	17M0816955-9945592
Posición mapa:	A03	A04	
Largo del perfil:	113,3 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	1.0 s		
Observaciones:			



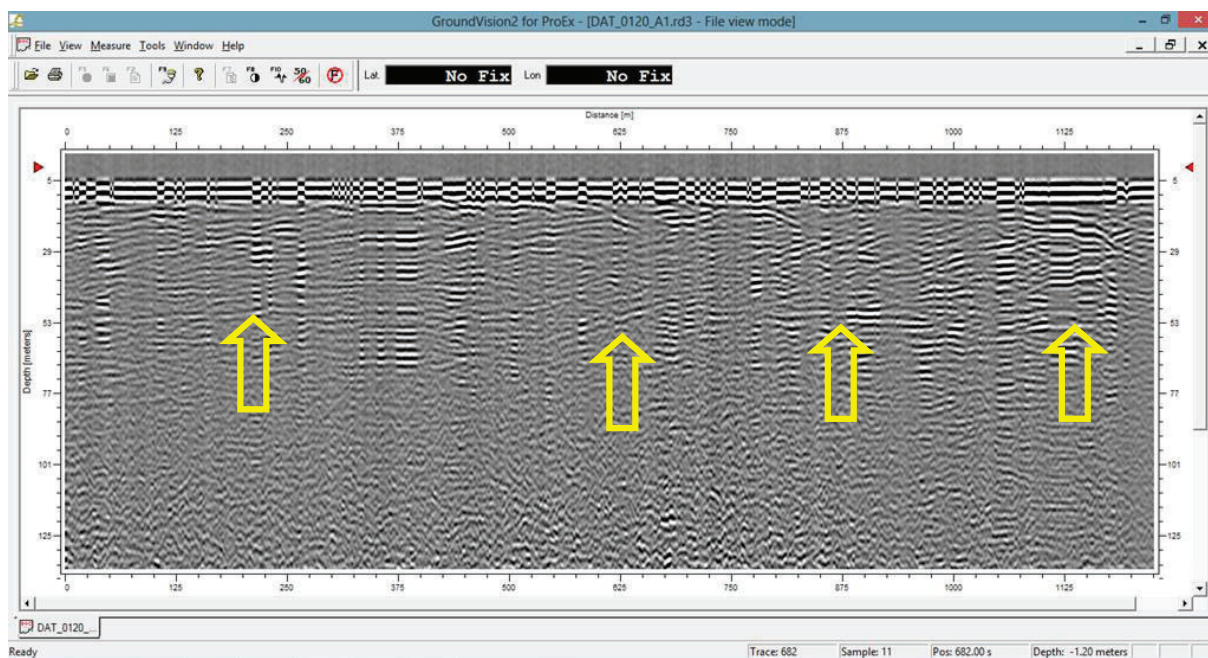
**Perfil # 4:**

# Perfil:	4		
Código de Radiograma:	DAT_0119		
Fecha:	18/12/2013		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816955-9945592	Posición Final:	17M0817081-9945614
Posición mapa:	A04	A05	
Largo del perfil:	124.9 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	168 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	1.0 s		
Observaciones:			



**Perfil # 5:**

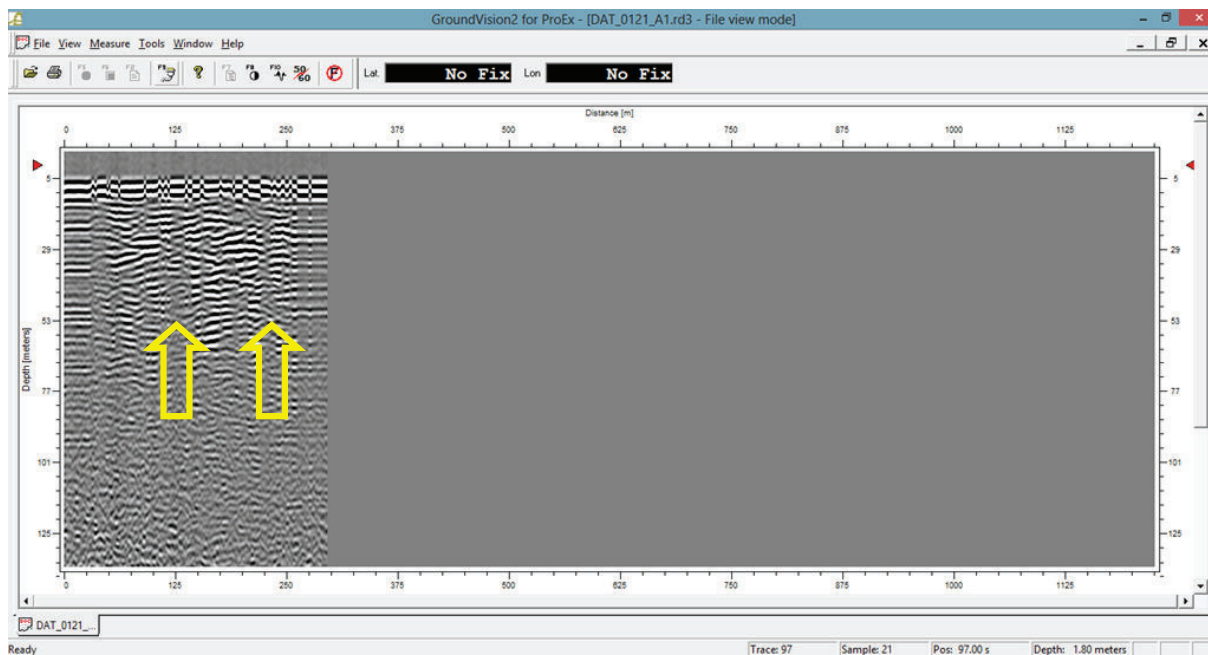
# Perfil:	5		
Código de Radiograma:	DAT_0120		
Fecha:	18/12/2013		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0817081-9945614	Posición Final:	17M0817358-9945666
Posición mapa:	A05	A06	
Largo del perfil:	284.13 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	168 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	1.0 s		
Observaciones:			





**Perfil # 6:**

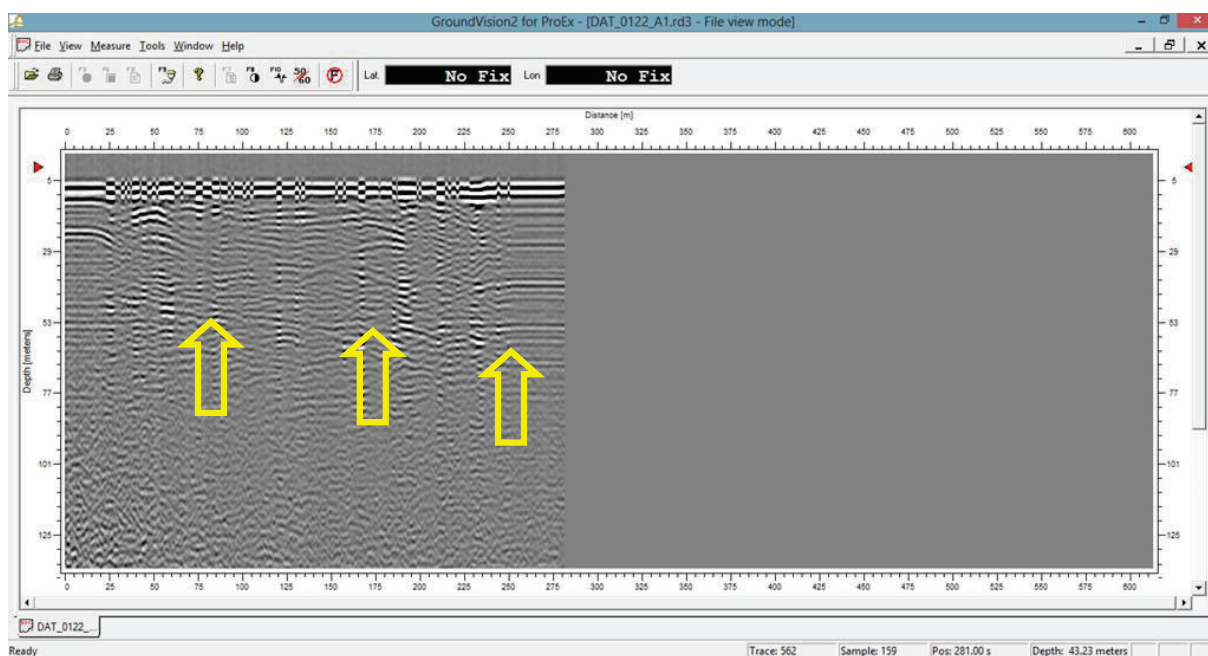
# Perfil:	6		
Código de Radiograma:	DAT_0121		
Fecha:	18/12/2013		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0817089-9945629	Posición Final:	17M0817115-9945535
Posición mapa:	A10	A11	
Largo del perfil:	97.81 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	168 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	1.0 s		
Observaciones:			





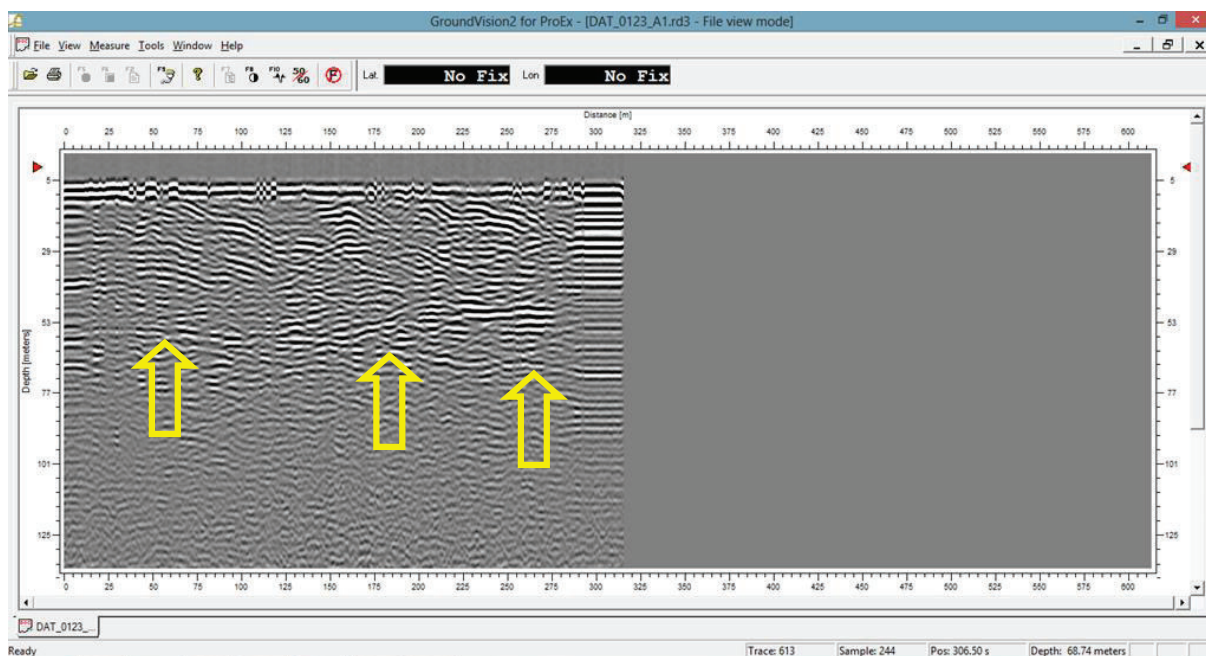
**Perfil # 7:**

# Perfil:	7		
Código de Radiograma:	DAT_0122		
Fecha:	18/12/2013		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816903-9945574	Posición Final:	17M0816764-9945617
Posición mapa:	A21	A23	
Largo del perfil:	145.31 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	168 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.50 s		
Observaciones:			



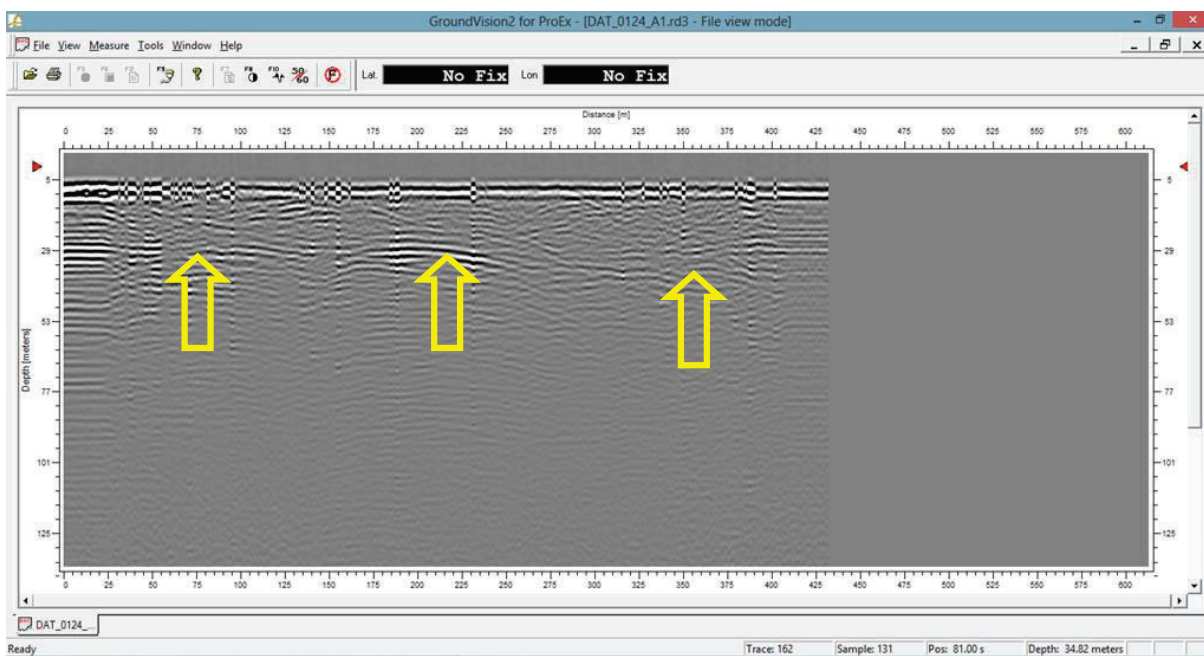
**Perfil # 8:**

# Perfil:	8		
Código de Radiograma:	DAT_0123		
Fecha:	18/12/2013		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816764-9945617	Posición Final:	17M0816578-9945586
Posición mapa:	A23	A31	
Largo del perfil:	188.47 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	168 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.50 s		
Observaciones:			



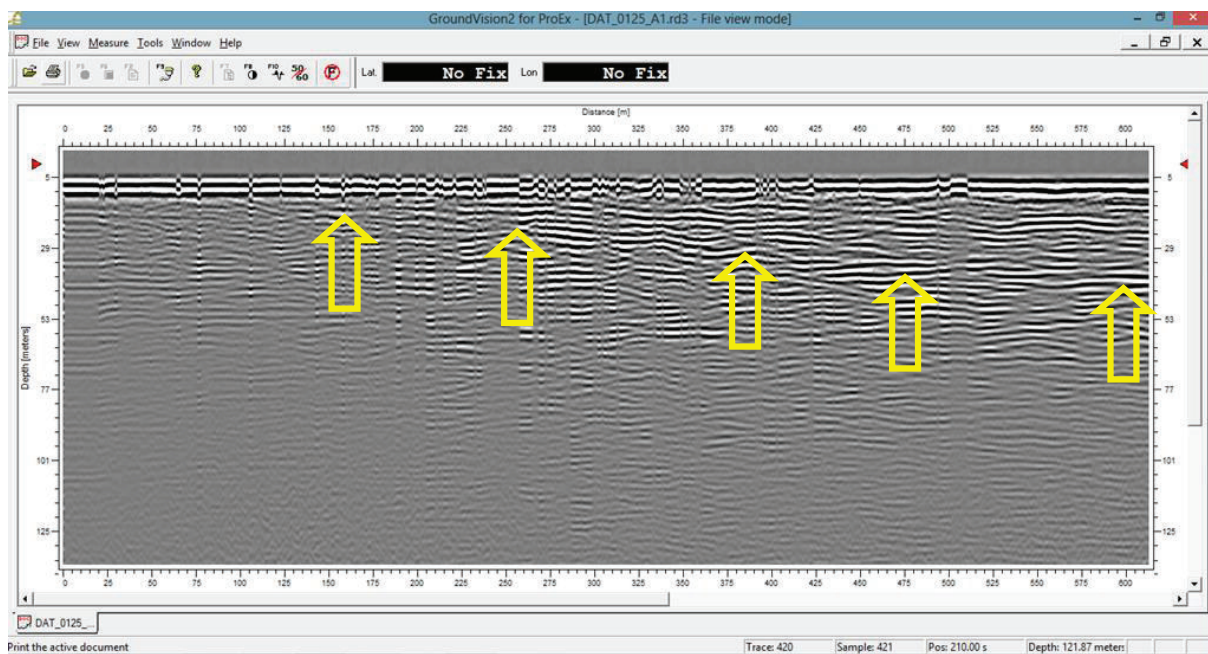
**Perfil # 9:**

# Perfil:	9		
Código de Radiograma:	DAT_0124		
Fecha:	19/12/2013		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816358-9945340	Posición Final:	17M0816301-9945516
Posición mapa:	B001	B002	
Largo del perfil:	184.77 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	168 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.50 s		
Observaciones:			



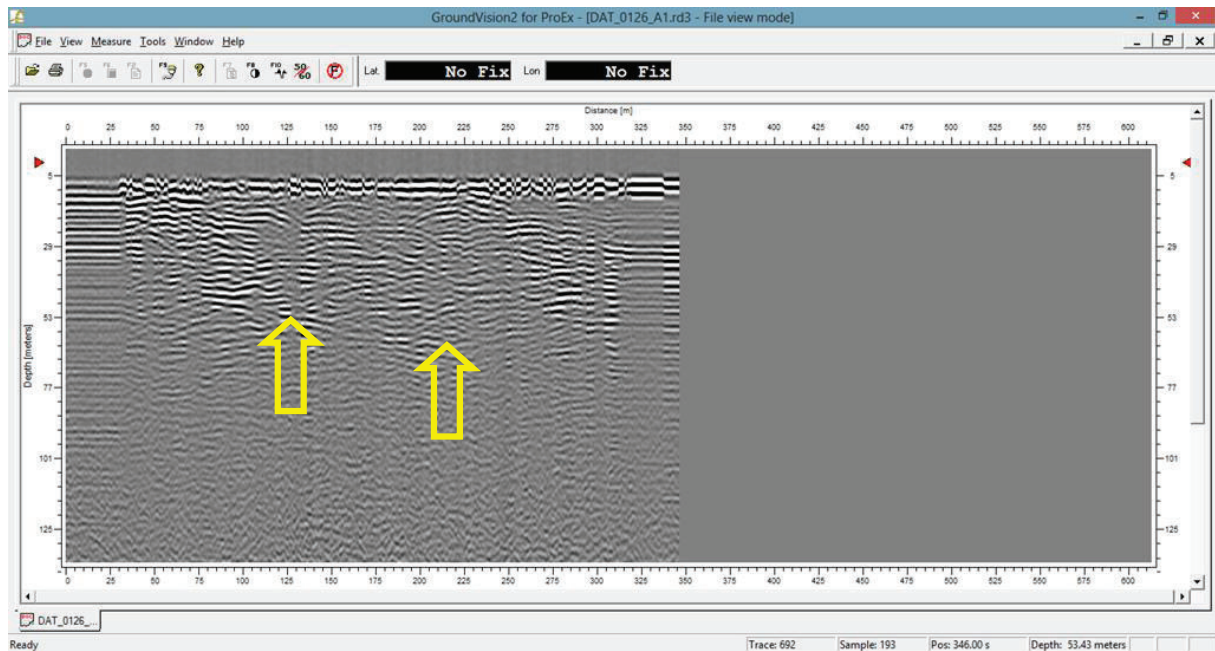
**Perfil # 10:**

# Perfil:	10		
Código de Radiograma:	DAT_0125		
Fecha:	19/12/2013		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816301-9945516	Posición Final:	17M0816581-9945583
Posición mapa:	B02	B03	
Largo del perfil:	287.13 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.50 s		
Observaciones:			



**Perfil #11:**

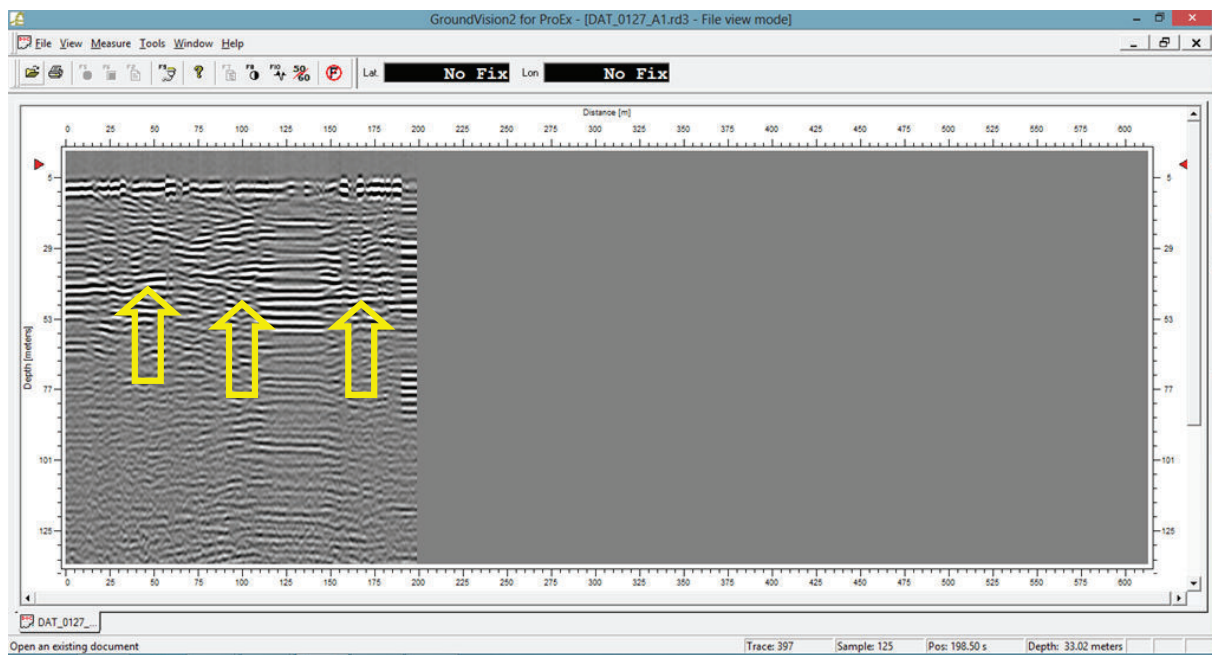
# Perfil:	11		
Código de Radiograma:	DAT_0126		
Fecha:	19/12/2013		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816555-9945609	Posición Final:	17M0816630-9945447
Posición mapa:	B05	B06	
Largo del perfil:	178.81		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.50 s		
Observaciones:			





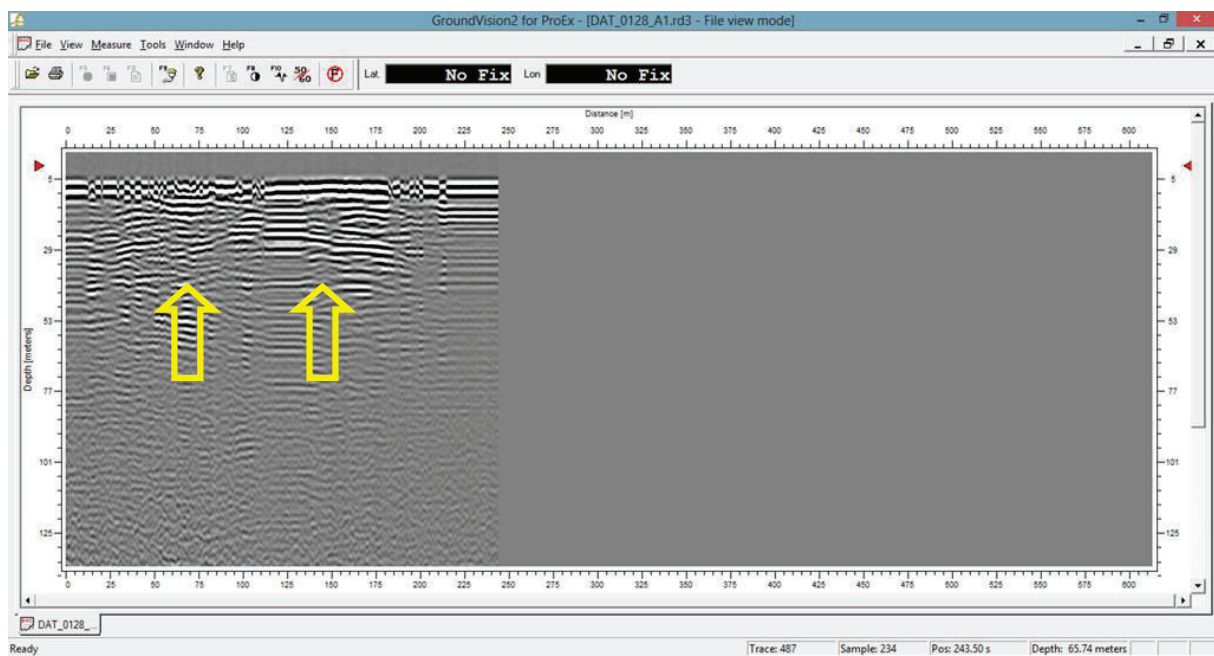
**Perfil # 12:**

# Perfil:	12		
Código de Radiograma:	DAT_0127		
Fecha:	19/12/2013		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816633-9945446	Posición Final:	17M0816562-9945372
Posición mapa:	B10	B11	
Largo del perfil:	102.08 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.50 s		
Observaciones:			



## Perfil # 13:

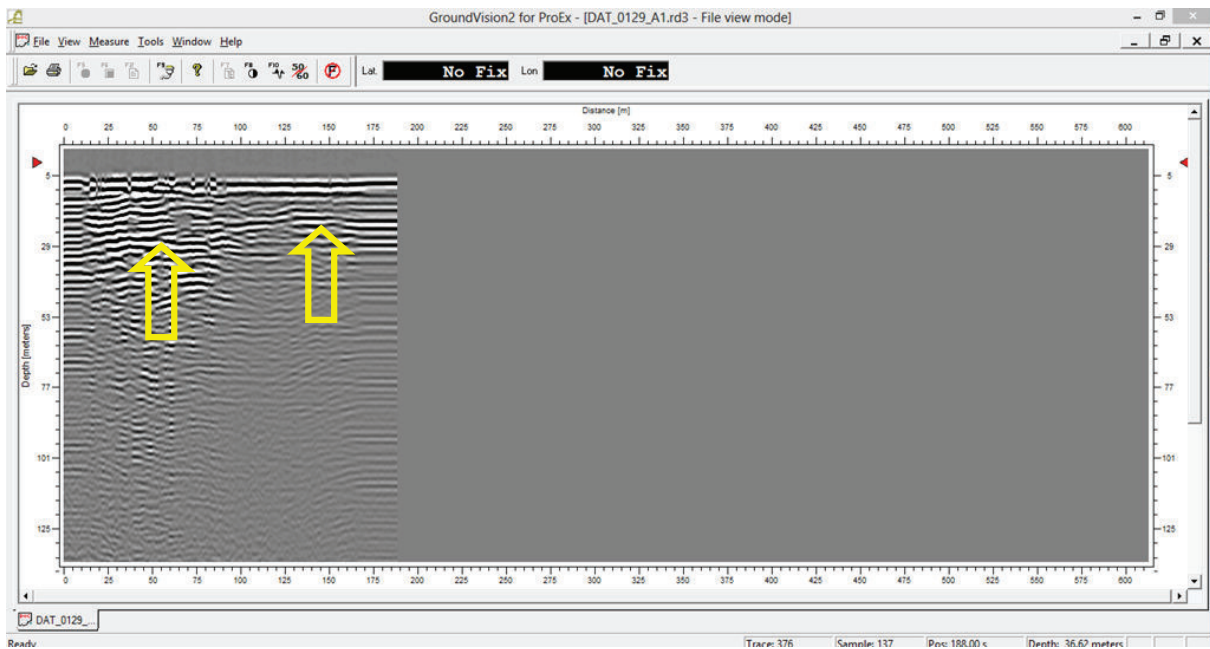
# Perfil:	13		
Código de Radiograma:	DAT_0128		
Fecha:	19/12/2013		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816579-9945354	Posición Final:	17M0816538-9945276
Posición mapa:	B15	B16	
Largo del perfil:	87.94 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.50 s		
Observaciones:			





**Perfil # 14:**

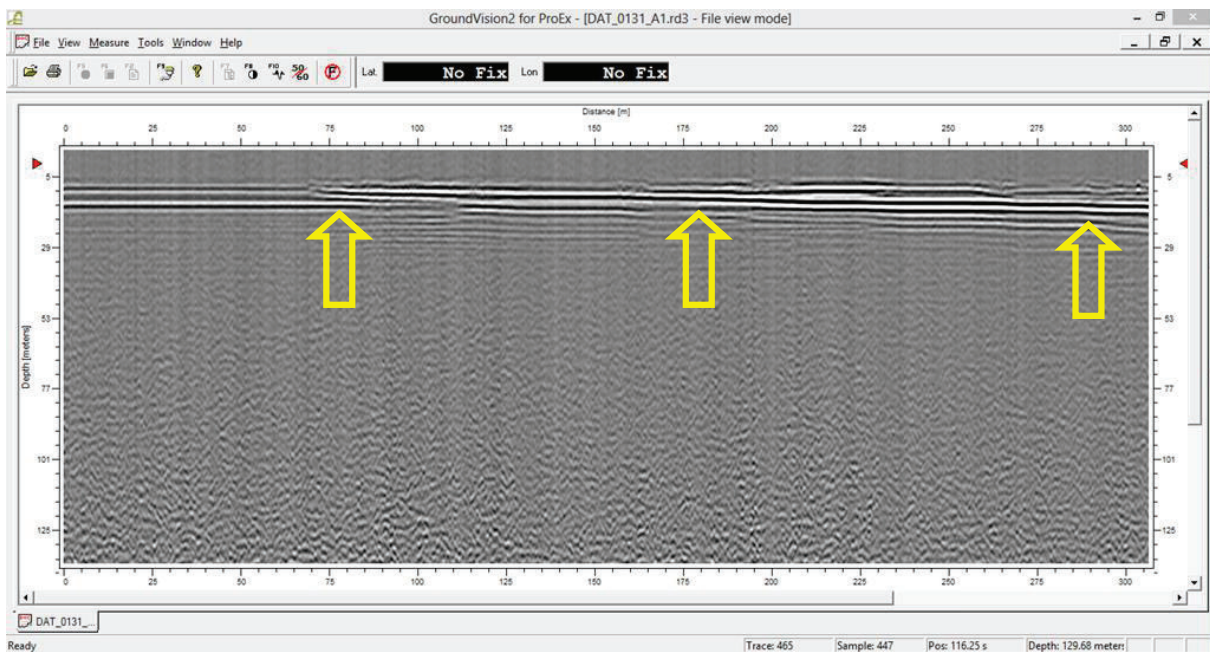
# Perfil:	14		
Código de Radiograma:	DAT_0129		
Fecha:	19/12/2013		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816439-9945278	Posición Final:	17M0816375-9945285
Posición mapa:	B17	B18	
Largo del perfil:	64.67 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.50 s		
Observaciones:			



**Glaciar Antisana 15.-**

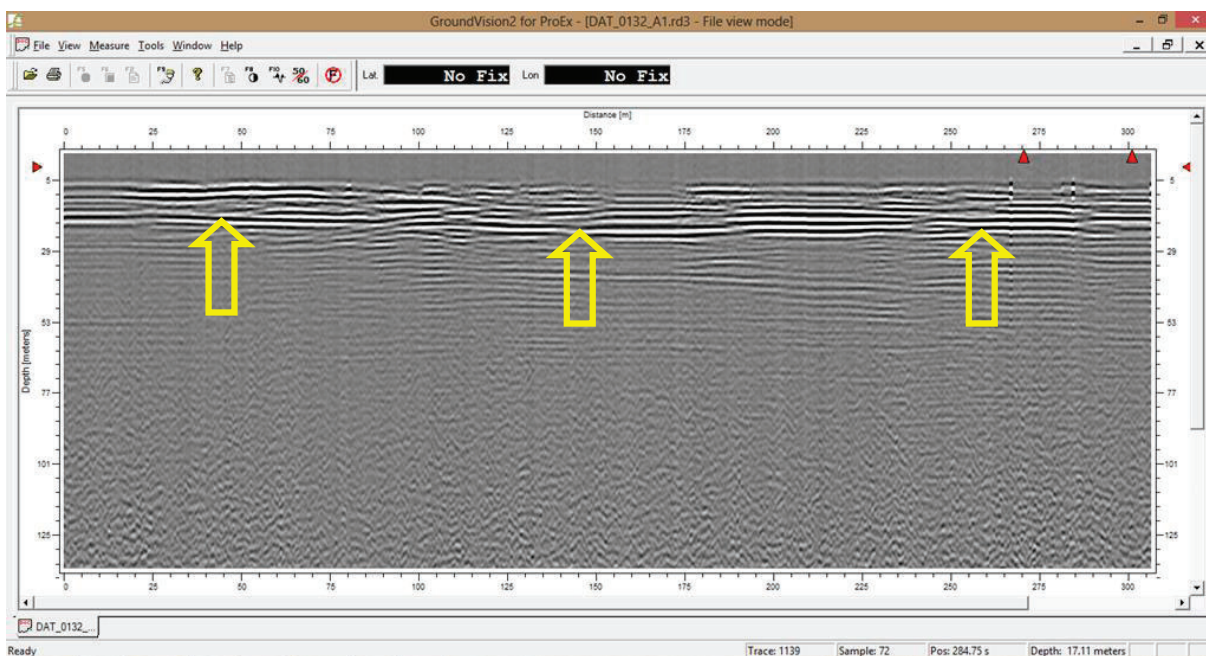
Perfil # 1:

# Perfil:	1		
Código de Radiograma:	DAT_0131		
Fecha:	10/01/2014		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816864-9947465	Posición Final:	17M0816878-9947412
Posición mapa:	C01	C02	
Largo del perfil:	54.25 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.250 s		
Observaciones:			



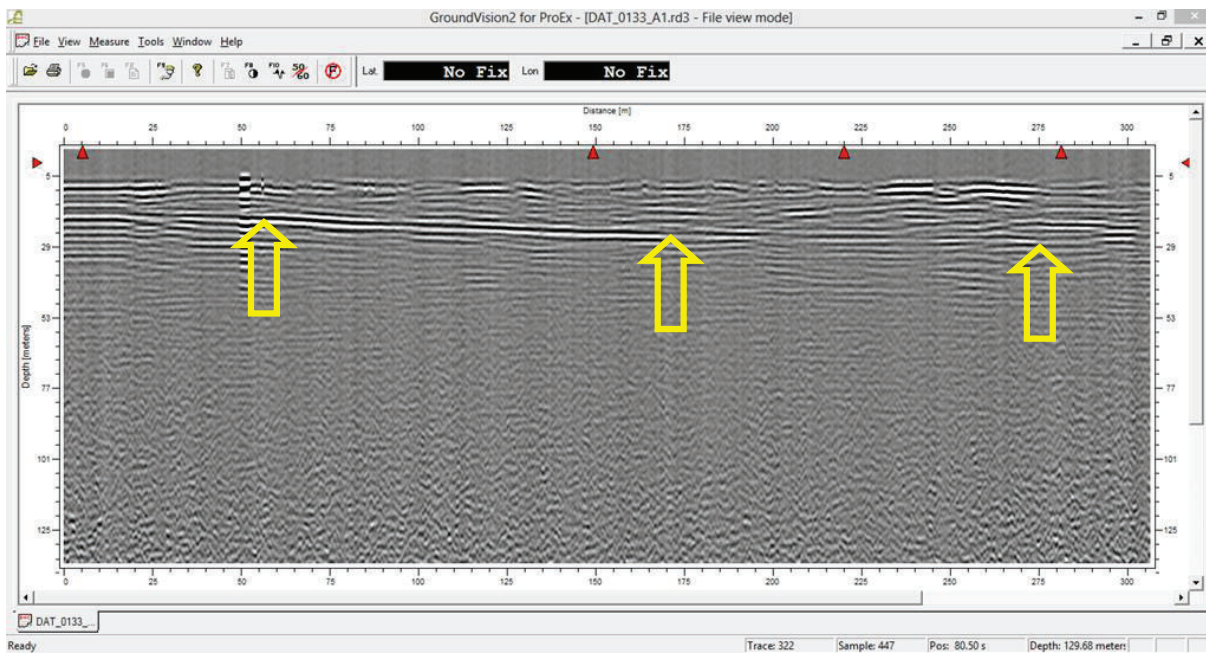
## Perfil # 2 :

# Perfil:	2		
Código de Radiograma:	DAT_0132		
Fecha:	10/01/2014		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816878-9947412	Posición Final:	17M0816960-9947428
Posición mapa:	C02	C03	
Largo del perfil:	83.18 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.250 s		
Observaciones:			



## Perfil # 3 :

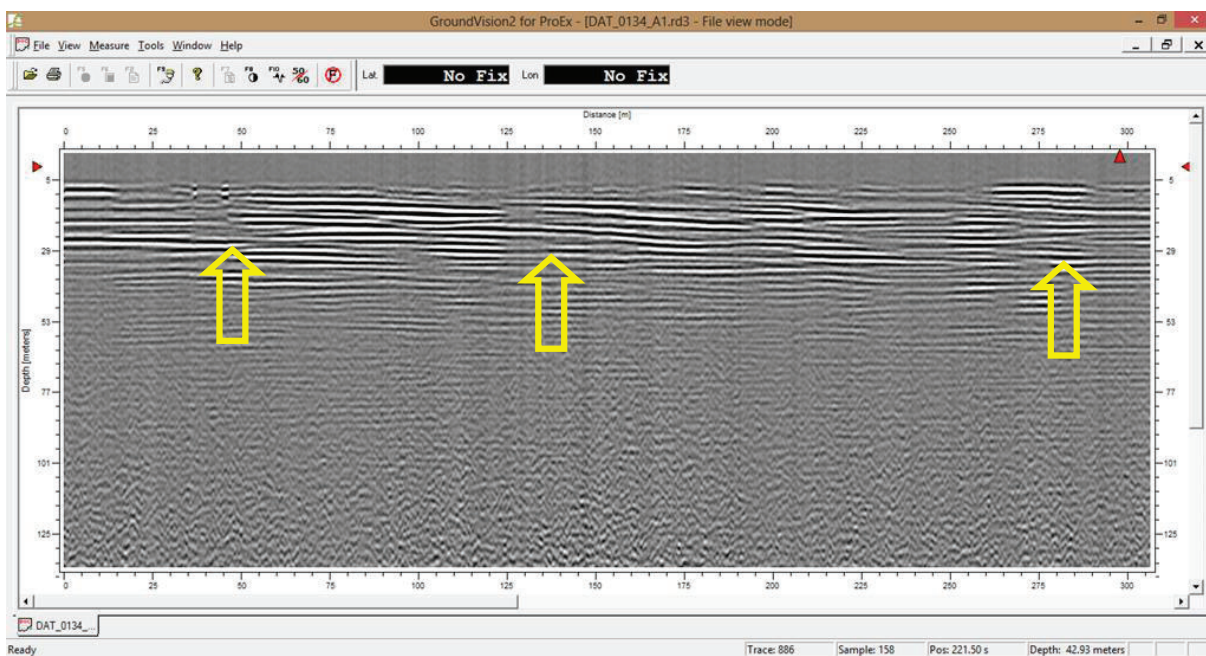
# Perfil:	3		
Código de Radiograma:	DAT_0133		
Fecha:	10/01/2014		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816960-9947428	Posición Final:	17M0816952-9947353
Posición mapa:	C03	C04	
Largo del perfil:	75.29 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.250 s		
Observaciones:			





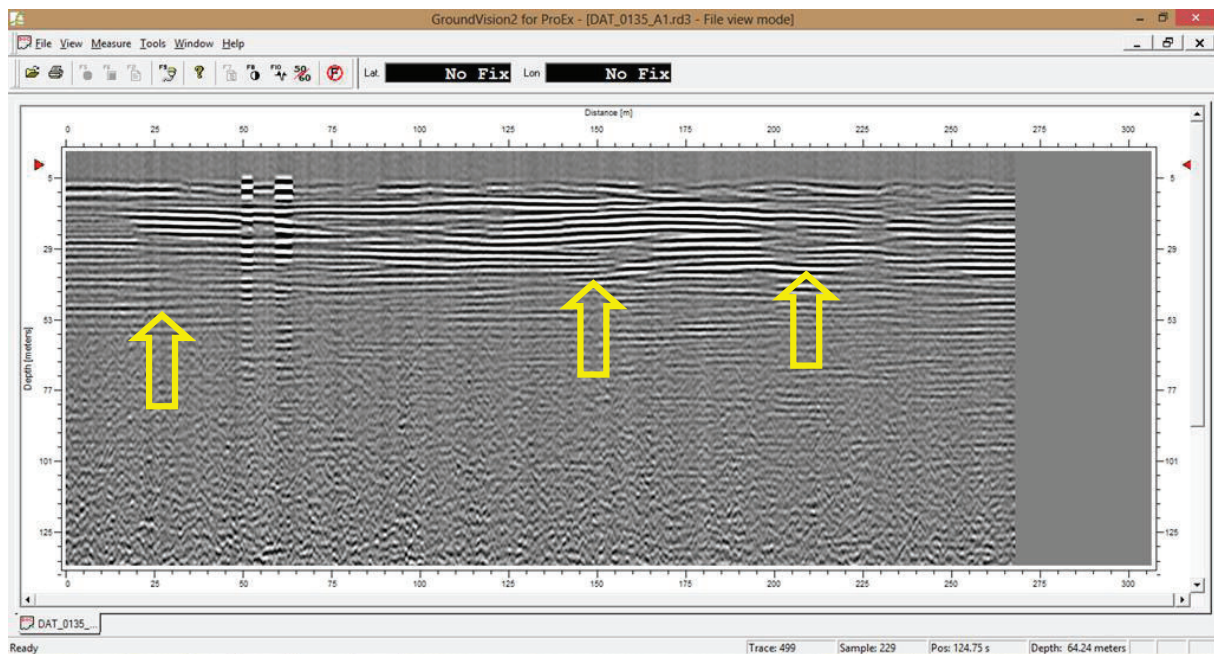
## Perfil # 4 :

# Perfil:	4		
Código de Radiograma:	DAT_0134		
Fecha:	10/01/2014		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0816952-9947353	Posición Final:	17M0817087-9947353
Posición mapa:	C04	C05	
Largo del perfil:	134.81 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.250 s		
Observaciones:			



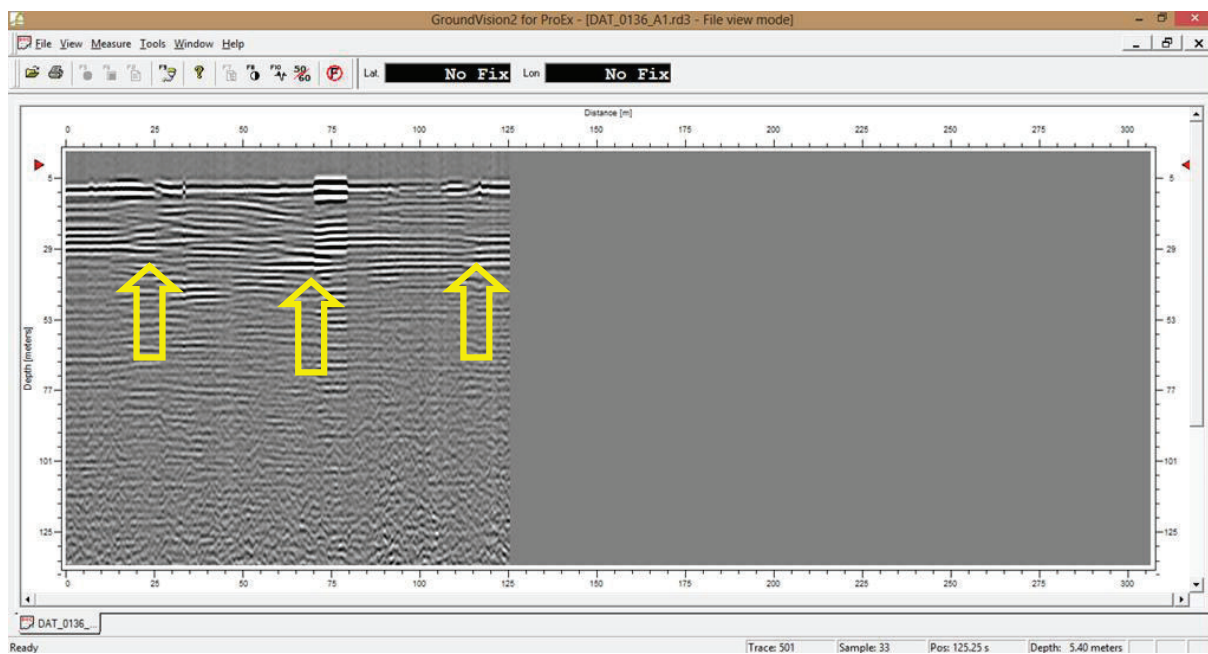
## Perfil # 5:

# Perfil:	5		
Código de Radiograma:	DAT_0135		
Fecha:	10/01/2014		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0817087-9947353	Posición Final:	17M0817115-9947304
Posición mapa:	C05	C06	
Largo del perfil:	56.72 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.250 s		
Observaciones:			



## Perfil # 6:

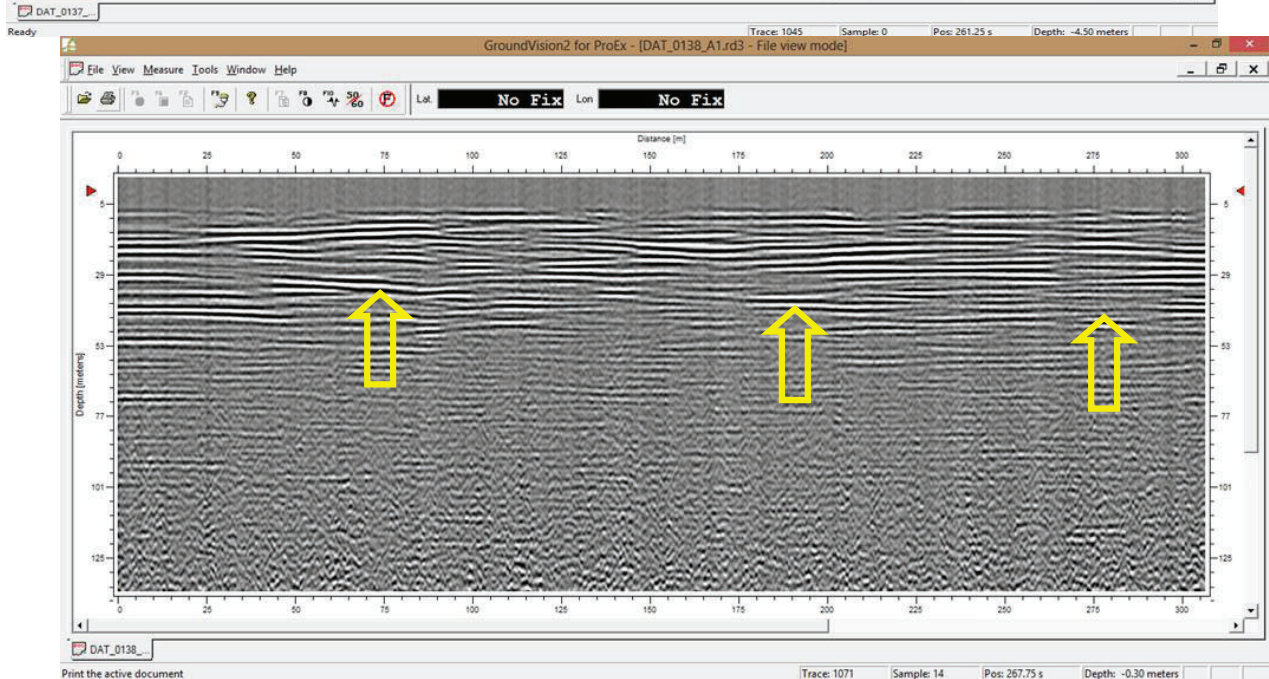
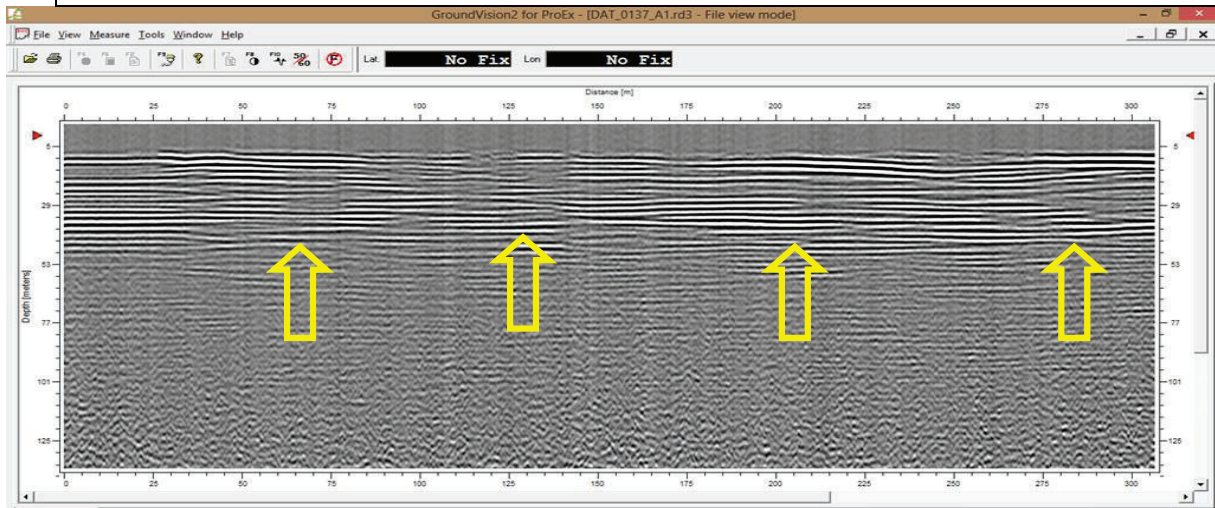
# Perfil:	6		
Código de Radiograma:	DAT_0136		
Fecha:	10/01/2014		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0817115-9947304	Posición Final:	17M0817145-9947327
Posición mapa:	C06	C07	
Largo del perfil:	38.34 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.250 s		
Observaciones:			





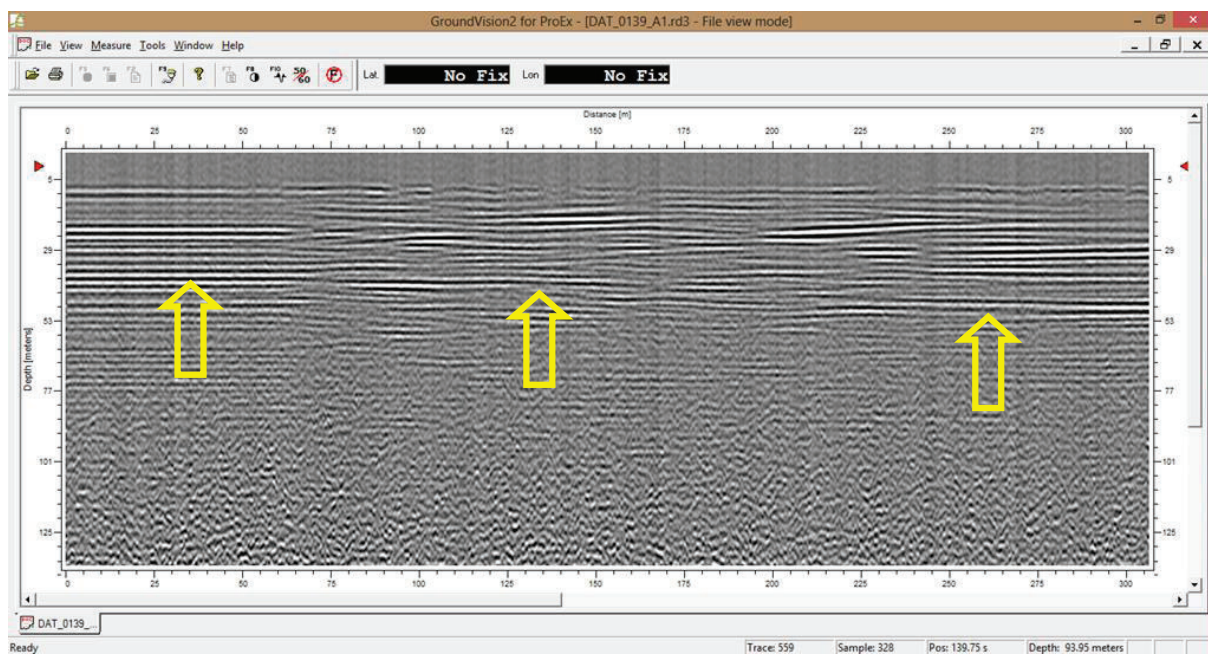
## Perfil # 7:

# Perfil:	7		
Código de Radiograma:	DAT_0137 - DAT_0138		
Fecha:	10/01/2014		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0817145-9947327	Posición Final:	17M0817237-9947235
Posición mapa:	C07	C08	
Largo del perfil:	129.86 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.250 s		
Observaciones:			



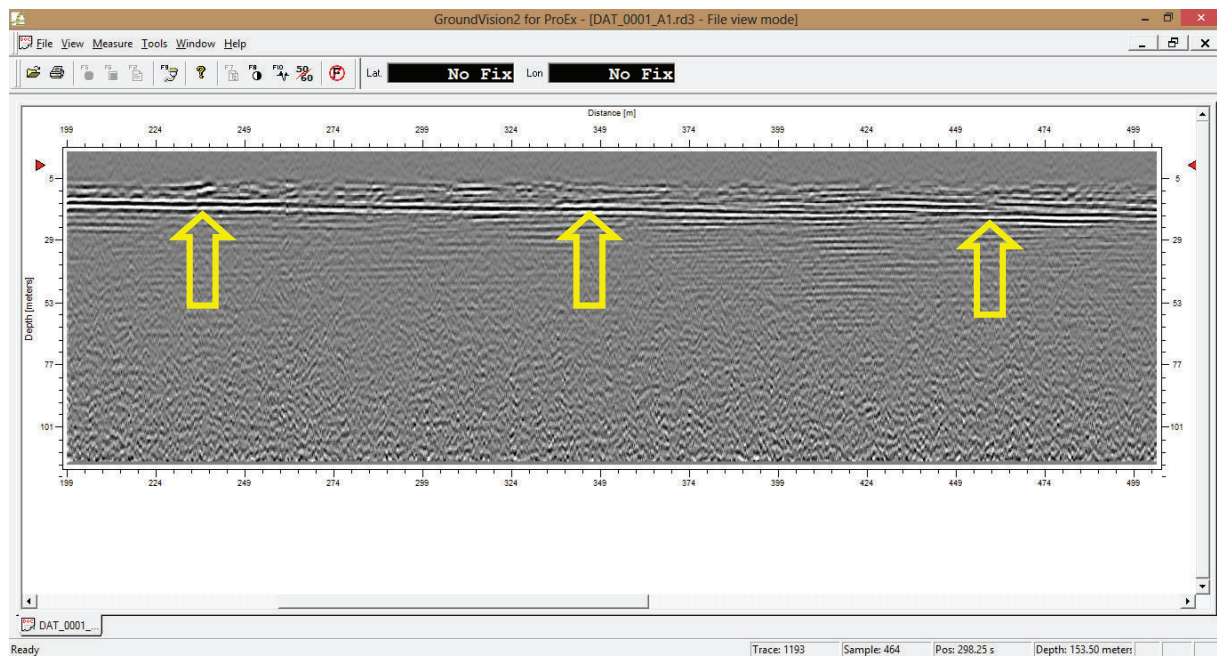
**Perfil # 8:**

# Perfil:	8		
Código de Radiograma:	DAT_0139		
Fecha:	10/01/2014		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:	17M0817237-9947235	Posición Final:	17M0817256-9947159
Posición mapa:	C08	C09	
Largo del perfil:	78.54 m		
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	199.88 MHz		
Time Window:	3482.031318 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.250 s		
Observaciones:			



**Perfil # 10:**

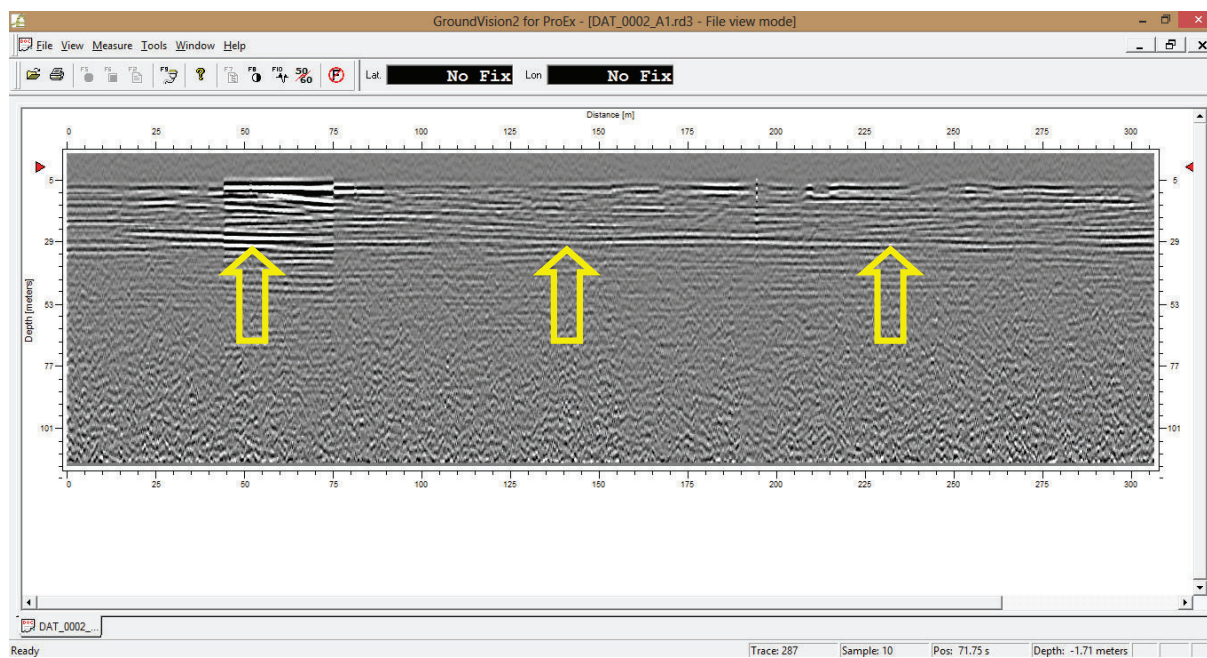
# Perfil:	10		
Código de Radiograma:	DAT_001		
Fecha:	12/03/2014		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:		Posición Final:	
Posición mapa:	M01	M02	
Largo del perfil:			
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	175.5 MHz		
Time Window:	2005.614463 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.250 s		
Observaciones:			





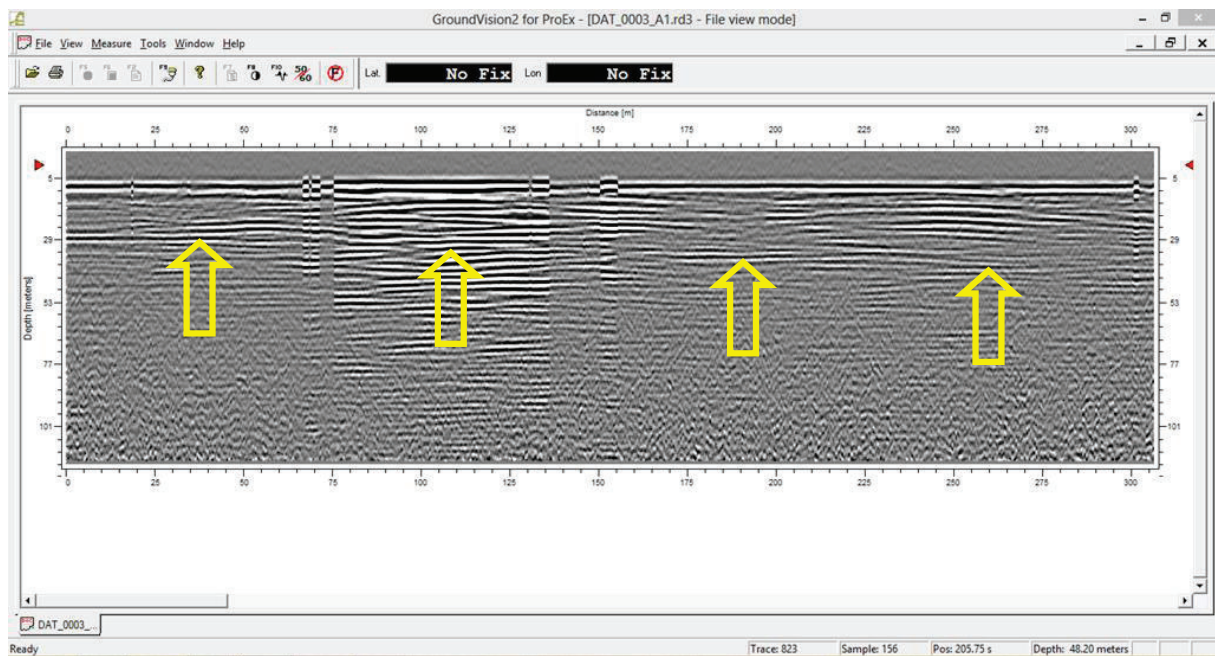
**Perfil # 11:**

# Perfil:	11		
Código de Radiograma:	DAT_002		
Fecha:	12/03/2014		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:		Posición Final:	
Posición mapa:	M02	M03	
Largo del perfil:			
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	175.5 MHz		
Time Window:	2005.614463 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.250 s		
Observaciones:			



**Perfil # 12:**

# Perfil:	12		
Código de Radiograma:	DAT_003		
Fecha:	12/03/2014		
Zona de Estudio	Glaciar de montaña		
Posición Inicio:		Posición Final:	
Posición mapa:	M03	M04	
Largo del perfil:			
Antena:	25 MHz		
Sampling Frequency:	175.5 MHz		
Time Window:	2005.614463 ns		
Velocidad:	170 m/us		
Tipo de Adquisición:	tiempo		
Intervalo de Adquisición:	0.250 s		
Observaciones:			



**Anexo 1 , Tabla de valores de ubicación y espesor de hielo, de Nodos en el Glaciar # 12.**

Nódulo	Coordenada X [UTM]	Coordenada Y [UTM]	Cota [msnm]	Espesor Glaciar [m]
1a	816375	9945285	4890	21
1b	816301	9945516	4883	6
1c	816315	9945472	4881	32
1d	816327	9945435	4885	41
1e	816344	9945381	4888	37
1f	816361	9945331	4892	35
9e	816689	9945478	4967	60
9c	816649	9945598	4974	70
7Eb	816555	9945609	4949	59
7b8	816559	9945601	4949	59
8c	816595	9945589	4957	62
7c8	816577	9945562	4950	65
8d	816594	9945525	4951	76
8_e7	816618	9945472	4951	70
8e	816637	9945468	4953	66
8f	816633	9945446	4951	65
6a7	816579	9945354	4936	52
7f	816599	9945411	4945	61
7c	816542	9945573	4948	54
6b	816496	9945562	4932	55
6f	816562	9945372	4934	57
6a	816572	9945340	4930	52
6Ea	816559	9945315	4924	52
5b	816438	9945548	4916	48
4b	816395	9945538	4905	20
3b	816347	9945527	4894	13
10e	816741	9945488	4980	58
2f	817356	9945665	5209	68
22f	817337	9945662	5203	65
21f	817289	9945653	5187	66
20f	817238	9945643	5161	64
19f	817187	9945634	5144	64
18e	817134	9945624	5119	64
17a18	817115	9945535	5114	65
17f18	817104	9945574	5113	65
17e18	817089	9945629	5105	64
17e	817081	9945614	5105	65
16e	817033	9945606	5085	67

15e16	817004	9945600	5077	69
15e	816977	9945596	5063	68
14e15	816956	9945592	5056	68
14e	816929	9945589	5049	63
13e14	816903	9945574	5041	59
13e	816875	9945583	5027	70
12e13	816843	9945579	5020	75
12d13	816817	9945601	5010	77
12d	816809	9945603	5010	71
12e	816827	9945554	5011	75
11e12	816815	9945538	5001	75
11f	816791	9945502	4991	75
11c	816752	9945615	4999	72
10c11	816716	9945609	4988	73
10c	816700	9945607	4988	75



**Anexo 2, Tabla de valores de ubicación y espesor de hielo, de Nodos en el Glaciar # 15.**

<b>Nódulo</b>	<b>Coordenada X [UTM]</b>	<b>Coordenada Y [UTM]</b>	<b>Cota [msnm]</b>	<b>Espesor Glaciar [m]</b>
a1	817256	9947159	5131	62
a4	817343	9947208	5158	47
c3	817252	9947178	5125	59
c4	817296	9947229	5121	45
d4	817252	9947250	5097	43
e4	817197	9947275	5066	46
f4	817158	9947293	5050	43
f2	817168	9947304	5055	40
g2	817145	9947327	5044	35
g4f	817123	9947310	5044	39
g3f	817115	9947304	3039	38
g3	817108	9947317	5031	35
g4	817095	9947340	5016	32
h4g	817087	9947353	5009	28
h3	817069	9947346	5007	29
h2	817077	9947353	5001	30
h4	817061	9947353	5001	28
i3	817008	9947353	4988	37
i4	817033	9947374	4987	27
j4	816990	9947399	4975	20
i1	816964	9947353	4981	23
j1i	816953	9947362	4979	19
j1	816954	9947372	4974	18
j3	816956	9947389	4973	25
l4j	816959	9947417	4967	16
l2	816960	9947428	4967	11
l13	816946	9947425	4964	15
l12	816949	9947426	4964	13
l4	816945	9947425	4964	14
l3	816913	9947419	45959	20
l1	816890	9947415	4958	15
m4	816901	9947451	4950	11
m1l	816874	9947427	4956	12
m1	816873	9947433	4952	10
m3	816868	9947450	4947	6
b4	816861	9947474	4943	2
c3d	817250	9947186	5125	58
3d4	817237	9947234	5090	45

**Anexo 3, Datos puntuales de espesor de hielo en el Glaciar Antisana #12.**

Nódulo	Cordenada X [UTM]	Cordenada Y [UTM]	Cota [msnm]	Espesor [m]	Glaciar
1a	816375,174	9945285,39	4890		21
1b	816301,298	9945515,63	4883		6
1c	816315,243	9945472,2	4881		32
1d	816326,836	9945435,41	4885		41
1e	816344,374	9945381,38	4888		37
1f	816360,544	9945331,12	4892		35
9e	816689,351	9945477,91	4967		60
9c	816649,406	9945598,14	4974		70
7Eb	816554,679	9945609,25	4949		59
7b8	816558,661	9945600,68	4949		59
8c	816595,152	9945588,99	4957		62
7c8	816576,761	9945561,74	4950		65
8d	816593,637	9945525,42	4951		76
8_e7	816618,305	9945472,39	4951		70
8e	816637,132	9945467,87	4953		66
8f	816633,15	9945445,76	4951		65
6a7	816579,083	9945354,04	4936		52
7f	816599,242	9945410,62	4945		61
7c	816542,466	9945573,44	4948		54
6b	816496,245	9945562,36	493		55
6f	816562,266	9945372,31	493		57
6a	816571,769	9945340,08	4930		52
6Ea	816558,506	9945314,77	4924		52
5b	816437,864	9945548,36	4916		48
4b	816394,628	9945538	4905		20
3b	816347,197	9945526,63	4894		13
10e	816740,571	9945487,75	4980		58
2f	817356,11	9945665,35	521		68
22f	817336,531	9945661,71	5203		65
21f	817289,264	9945652,91	5187		66
20f	817238,179	9945643,4	5161		64
19f	817186,89	9945633,85	5144		64
18e	817134,449	9945624,08	5119		64
17a18	817115,036	9945535,08	5114		65
17f18	817104,023	9945574,43	5113		65
17e18	817088,833	9945628,7	5105		64
17e	817081,05	9945614,14	5105		65
16e	817033,027	9945605,63	5085		67
15e16	817003,873	9945600,47	5077		69
15e	816977,281	9945595,77	5063		68

14e15	816955,521	9945591,93	506	68
14e	816929,121	9945588,87	5049	63
13e14	816902,707	9945574,46	5041	59
13e	816874,531	9945582,56	5027	70
12e13	816842,993	9945578,91	5020	75
12d13	816817,283	9945600,92	501	77
12d	816809,355	9945603,38	501	71
12e	816826,558	9945554,46	5011	75
11e12	816815,38	9945537,85	5001	75
11f	816791,361	9945502,1	4991	75
11c	816751,984	9945615,45	4999	72
10c11	816715,802	9945609,34	4988	73
10c	816700,018	9945606,68	4988	75
11	816763	9945890	5043	0
12	816672	9945843	5008	0
13	816624	9945793	4992	0
14	816552	9945743	4964	0
15	816442	9945659	4924	0
17	816465	9945642	4929	0
18	816300	9945524	4883	0
19	816234	9945507	4869	0
20	816193	9945463	4863	0
21	816134	9945408	4854	0
22	816158	9945402	4857	0
23	816209	9945408	4865	0
24	816189	9945371	4862	0
25	816181	9945325	4861	0
26	816193	9945295	4860	0
27	816226	9945262	4866	0
28	816300	9945241	4877	0
29	816365	9945236	4888	0
30	816411	9945233	4895	0
31	816406	9945181	4892	0
32	816427	9945155	4894	0
33	816535	9945183	4908	0
34	816623	9945209	4919	0
35	816647	9945217	4928	0
36	816739	9945217	4952	0
37	816722	9945171	4949	0
38	816707	9945104	4939	0
39	816730	9945068	4946	0
40	816766	9945052	4961	0
41	816760	9944996	4960	0
42	816813	9944958	4966	0

43	816854	9944941	4973	0
44	816948	9944899	4969	0
44	816891	9944904	4988	0
45	816983	9944894	4998	0
46	817002	9944906	5003	0
47	817023	9944933	5024	0
48	817054	9944933	5030	0
49	817090	9944952	4053	0
50	817133	9944963	5076	0
51	817176	9944987	5102	0
52	817203	9945013	5145	0
53	817204	9945039	5145	0
54	817205	9945057	5141	0
55	817251	9945065	5168	0
56	817288	9945073	5176	0
57	817330	9945087	5195	0
58	817370	9945106	5206	0
59	817415	9945117	5221	0
60	817448	9945131	5242	0
61	817472	9945154	5262	0
62	817497	9945174	5279	0

#### Anexo 4, Datos puntuales de espesor de hielo en el Glaciar Antisana #15

Nódulo	Cordenada X [UTM]	Cordenada Y [UTM]	Cota [msnm]	Espesor Glaciar [m]
l28	816921	9947467	4953	0
l27	816972	9947452	4958	0
l26	816979	9947447	4962	0
l25	817007	9947426	4975	0
l24	817071	9947423	4989	0
l23	817121	9947403	5013	0
l22	817165	9947384	5034	0
l21	817228	9947359	5055	0
l20	817246	9947360	5061	0
l19	817299	9947353	5077	0
l18	817321	9947340	5090	0
l17	817360	9947319	512	0
l16	817413	9947295	5152	0
l15	817223	9947061	5144	0
l14	817182	9947090	5128	0
l13	817137	9947123	510	0
l12	817094	9947165	5067	0
l11	817059	9947205	5048	0
l10	817031	9947236	5025	0
l9	816986	9947273	500	0
l8	816952	9947306	4993	0
l7	816918	9947345	4979	0
l6	816887	9947389	4968	0
l5	816859	9947426	4957	0
l4	816838	9947453	4944	0
l3	816836	9947471	4939	0
l2	816840	9947489	4941	0
l1	816871	9947484	4943	0
a1	817256	9947159	5131	62
a4	817343	9947208	5158	47
c3	817252	9947178	5125	59
c4	817296	9947229	5121	45
d4	817252	9947250	5097	43
e4	817197	9947275	5066	46
f4	817158	9947293	5050	43
f2	817168	9947304	5055	40
g2	817145	9947327	5044	35
g4f	817123	9947310	5044	39
g3f	817115	9947304	3039	38

g3	817108	9947317	5031	35
g4	817095	9947340	5016	32
h4g	817087	9947353	5009	28
h3	817069	9947346	5007	29
h2	817077	9947353	5001	30
h4	817061	9947353	5001	28
i3	817008	9947353	4988	37
i4	817033	9947374	4987	27
j4	816990	9947399	4975	20
i1	816964	9947353	4981	23
j1i	816953	9947362	4979	19
j1	816954	9947372	4974	18
j3	816956	9947389	4973	25
l4j	816959	9947417	4967	16
l2	816960	9947428	4967	11
l3	816946	9947425	4964	15
l2	816949	9947426	4964	13
l4	816945	9947425	4964	14
l3	816913	9947419	4595	20
l1	816890	9947415	4958	15
m4	816901	9947451	4950	11
m1l	816874	9947427	4956	12
m1	816873	9947433	4952	10
m3	816868	9947450	4947	6
b4	816861	9947474	4943	2
c3d	817250	9947186	5125	58
3d4	817237	9947234	5090	45



## **Anexo 5, Abstract Asamblea Viena-2014, Unión Europea de Geociencias**

Geophysical Research Abstracts  
 Vol. 16, EGU2014-PREVIEW, 2014  
 EGU General Assembly 2014  
 © Author(s) 2014. CC Attribution 3.0 License.



### **New high-definition thickness data obtained at tropical glaciers: preliminary results from Antisana volcano (Ecuador) using GPR prospection**

Camilo Zapata (1), Daniel Andrade (1), Jorge Córdova (1), Luis Maisincho (2), Juan Carvajal (2), Marlon Calispa (3), and Marcos Villacís (1)

(1) Escuela Politécnica Nacional, Instituto Geofísico, Quito, Ecuador (dandrade@igepn.edu.ec), (2) Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Quito, Ecuador, (3) Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador


The study of tropical glaciers has been a significant contribution to the understanding of glacier dynamics and climate change. Much of the data and results have been obtained by analyzing plan-view images obtained by air- and space-borne sensors, as well as depth data obtained by diverse methodologies at selected points on the glacier surface. However, the measurement of glacier thicknesses has remained an elusive task in tropical glaciers, often located in rough terrains where the application of geophysical surveys (i.e. seismic surveys) requires logistics sometimes hardly justified by the amount of obtained data.

In the case of Ecuador, however, where most glaciers have developed on active volcanoes and represent sources/reservoirs of fresh water, the precise knowledge of such information is fundamental for scientific research but also in order to better assess key aspects for the society. The relatively recent but fast development of the GPR technology has helped to obtain new highdefinition thickness data at Antisana volcano that will be used to: 1) better understand the dynamics and fate of tropical glaciers; 2) better estimate the amount of fresh water stored in the glaciers; 3) better assess the hazards associated with the sudden widespread melting of glaciers during volcanic eruptions.


The measurements have been obtained at glaciers 12 and 15 of Antisana volcano, with the help of a commercial GPR equipped with a 25 MHz antenna. A total of 30 transects have been obtained, covering a distance of more than 3 km, from the glacier ablation zone, located at ~ 4600 masl, up to the level of 5200 masl. The preliminary results show a positive correlation between altitude and glacier thickness, with maximum and minimum calculated values reaching up to 80 m, and down to 15 m, respectively.

The experience gained at Antisana volcano will be used to prepare a more widespread GPR survey in the glaciers of Cotopaxi volcano, whose implications in terms of volcanic hazards are largely more significant. Other ice-clad ed Ecuadorian volcanoes, like Cayambe or Chimborazo, could also be considered in future research..

# anexo 6, Poster Asamblea General Viena-2014, Unión Europea de Geociencias



IG  
Instituto Geológico y Minero de España



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

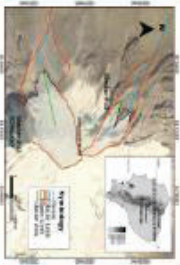
ESU General Assembly - Vienna 2014

## New high-definition thickness data obtained at tropical glaciers: preliminary results from Antisana volcano (Ecuador) using GPR prospecting

Daniel Andrade (1), Jorge Córdova (1), Luis Malincho (2), Juan Cervajal (2), Marlon Calajup (3), and Marcos Villacis (4)

(1) Escuela Politécnica Nacional, Ecuador; (2) Instituto Geológico y Minero de España, España; (3) Universidad Católica de Loja, Ecuador; (4) Universidad de Loja, Ecuador

### 1. Location and Context





Antisana volcano, located in the Andes range at ~0°S, inner tropics, is a young ice-capped volcanic center of andesitic composition, with diameter of ~13 km and its summit at 5,753 msl (Fig. 1). The last historic eruption probably occurred in 1802, but stratigraphic studies indicate the the last important eruption occurred ~1,000 years ago (Hall et al., 2012). The glacier coating begins from ~4,700-5100 msl, but has been receding hundreds of meters in the last 20 years (Cárceles et al., 2004).

In the case of Ecuador, where all existing glaciers have developed on active volcanoes and require source/reservoirs of fresh water, the precise knowledge of information such as surface thickness and volume is fundamental for scientific research but also in order to better assess key aspects for the society.

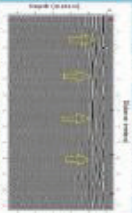
### 2. Geophysical Study: GPR method

Thickness measurements have been obtained at glaciers #12 (Capeño) and #15 of Antisana volcano (Figs. 2 and 3), with the help of a commercial GPR equipped with a 25 MHz antenna. A total of 20 transects have been cleared until present, covering a total distance of more than 3 km from the glacier ablation zone (located at ~4600 msl) up to the level of 5000 msl (Figs. 2 and 3). The software provided by the GPR manufacturer was used for data processing. The propagation velocity of electromagnetic waves employed was 168 m/ps (Schieffelin Instrument Inc., 1997).






### 3. Results

The preliminary results show a positive correlation between altitude and glacier thickness, with maximum and minimum calculated values of glacier thickness reaching up to 80 m, and down to 15 m, respectively.

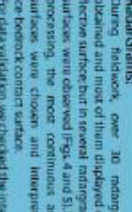


**Longitudinal Profile: Capeño**





**Longitudinal Profile: Capeño**



Longitudinal Profile: Capeño #15	
Distance (m)	Thickness (m)
0	15
10	25
20	35
30	45
40	55
50	65
60	75
70	80
80	80

Longitudinal Profile: Capeño #12	
Distance (m)	Thickness (m)
0	15
10	25
20	35
30	45
40	55
50	65
60	75
70	80
80	80

### 4. Conclusions

The ice thickness data of Antisana volcano display similar magnitude and behavior to the results obtained at complex volcano (80 km SE) (Cárceles et al., 2004). Axis slope and thickness of glaciers #12 and #15, are typically of a polythermal glacier (30-100m) described by Daniels (2004). We observed a direct relationship between slope and glacier thickness, at more slope more thickness.

### Radargrams:


During fieldwork, over 30 radargrams were obtained and most of them displayed only one reflective surface but in several radargrams multiple surfaces were observed (Figs. 4 and 5). During data processing, the most continuous and defined surfaces were chosen and interpreted as the ice bedrock contact surface.

For data validation, we checked the intersection-radargram points, in which we found same depth values.


### Profiles:

As the most important information is the topography of the glacier axis, the transects were concentrated around that same.

15 points of real measurements for each site were obtained for both glaciers #12 and #15, which allowed to plan detailed profiles of the studied glaciers (Fig. 6 and 7).



NAMHI



GEOEXCE

