

II Encuentro de Jóvenes Investigadores

Métodos Geofísicos aplicados en Glaciares de Escombros

Estudios de la tierra y el espacio

Forte, Ana Paula - Villarroel, Cristian Daniel

INGEO - FCEFyN

1) ANTECEDENTES

El área de estudio se encuentra en la quebrada del río Pachón, correspondiente a la faja plegada y corrida de piel gruesa y vergencia oriental de La Ramada (Ramos *et al.*, 1996a) perteneciente a la provincia geológica de Cordillera Principal (Yrigoyen, 1972).

Entre los antecedentes de aplicación de métodos geoelectricos y sísmica de refracción o tomografía sísmica en glaciares de escombros se puede citar los trabajos de Hauck, 2001, donde reconoce una capa activa de 0,7 a 1,5 metros de espesor y resistividad de 15 a 25 KOhmm y una capa rica en hielo de 25 a 35 metros de espesor de resistividad entre 100 a 900 KOhmm en el glaciar de escombros activo Hiorthfjellet, Noruega; una capa activa con resistividad de 5 a 15 KOhmm y permafrost con resistividad de 50 KOhmm a 2MOhmm y velocidad de V_p de 3400 a 3700 m/s en el glaciar de escombros Murtel, Suiza; una capa activa de 10 KOhmm de resistividad y permafrost de 20 a 500 KOhmm de resistividad en el glaciar de escombros activo Fosagno, Italia. Hausmann *et al.*, 2007 determinan para el glaciar de escombros activo Reichenkar, Austria, velocidades de ondas P de 950 m/s para capa activa, 3300 m/s en permafrost y 4100 m/s en basamento.

El trabajo de Croce y Milana, 2002 en el glaciar de escombros El Paso, ubicado en la cuenca del arroyo de Agua Negra, muestra una configuración del mismo en tres capas. En la capa superior se tiene detrito seco por encima y detrito húmedo por debajo, en la segunda capa existe una mezcla de detrito - hielo (permafrost) y en la tercera capa se distingue detrito húmedo, con un espesor máximo del glaciar de 18,5 metros. El análisis estacional de la capa activa muestra un mayor espesor en verano y el mínimo espesor se presenta en invierno. La capa identificada como permafrost posee una resistividad entre 5500 y 35000 Ohmm y velocidad de ondas P de 3404 m/s.

El trabajo realizado por (Arenson *et al.*, 2010) en el mismo glaciar de escombros objeto de este trabajo indica la presencia de una capa activa de 2,5 metros aproximadamente, deducible a partir de datos de temperatura de subsuelo registrados entre Abril y Agosto de 2008. Una excavación realizada en el centro de un glaciar de escombros, sin nombre, ubicado a unos 800 metros del anterior indica la presencia del techo de permafrost a una profundidad de entre 3 y 4 metros aproximadamente.

En este mismo glaciar se ha realizado estudios de tomografía sísmica y sondeos eléctricos verticales que evidencian una capa activa de 2 a 3 metros de espesor y por debajo una capa altamente resistiva (94 - 1013 KOhmm) de unos 10 metros de espesor, que ha sido interpretada como permafrost. Las velocidades de ondas P, evidencian una zona con velocidades entre 2000 y 4000 m/s que es típica de sedimentos congelados, diferenciando una parte superior con velocidades menores que probablemente corresponden a un suelo rico en hielo ,gravas y areniscas, y una parte inferior con velocidades mayores, que probablemente corresponden a hielo masivo o basamento. Una perforación realizada a 20 metros de la línea de investigación permite calibrar las velocidades de las ondas P, ya que en esta perforación el basamento se encuentra a 11 metros de profundidad. Teniendo en cuenta que el basamento, constituido por andesitas, se encuentra a 11 metros de profundidad y que las velocidades de ondas P son de 3300 m/s, la zona de permafrost queda acotada por valores de velocidad de V_p de 2000 m/s a 3000 m/s aproximadamente, dando un espesor de unos 10 metros.

2) FUNDAMENTACIÓN

La realización de este trabajo se funda en la necesidad de conocer la estructura interna de los glaciares de escombros y de esta forma poder determinar la presencia o no de capa activa y de capas ricas en contenido de hielo (masivo o intersticial), como así también su espesor y variaciones tanto verticales como laterales. La caracterización interna de los glaciares de escombros junto con la descripción morfológica de los mismos, constituyen dos aspectos fundamentales para comprender el grado de actividad que presentan los mismos. Esto permite inferir las condiciones de equilibrio existentes entre dichos glaciares y el medio que los rodea.

3) OBJETIVOS

Objetivo General: _ Determinar el espesor de capa activa y capa rica en hielo en dos glaciares de escombros a través de métodos geofísicos.

Objetivos Específicos: _ Determinar las velocidades de ondas P en capa activa y capa rica en hielo.

_ Determinar los valores de resistividad en capa activa y capa rica en hielo.

4) DESARROLLO

Tomografía sísmica

El método de prospección sísmica de refracción se basa en el registro de los frentes de onda, generados por una fuente artificial de energía, leyendo en los registros los tiempos de los primeros arribos. Estos primeros arribos pueden deberse a la onda directa o bien a aquellas ondas que se refractan en el subsuelo con el ángulo crítico, viajan por la interfaz con la velocidad del medio infrayacente y retornan hacia la superficie como ondas frontales.

Este método es aplicable siempre que se encuentren medios con impedancias acústicas contrastantes y con la condición esencial (según la Ley de Snell) de que el segundo medio sea de mayor velocidad de propagación que el primero.

La profundidad de investigación a la que se puede prospectar es aproximadamente 1/3 de la longitud del tendido de los sismómetros en superficie.

El objetivo de este método es poder determinar espesores de las capas del subsuelo (capa activa y capa rica en hielo en glaciares de escombros) y las velocidades de propagación de las ondas en dichas capas.

El instrumental necesario para aplicar este método consiste en una fuente de energía (de impacto), receptores (geófonos) y un sismógrafo donde se graba y grafica la información.

Trabajo de campo

El método de tomografía sísmica ha sido aplicado en dos glaciares de escombros activos denominados El Colorado y El Negro, donde se han realizado 3 tendidos sísmicos de 120 metros cada uno (Figuras N° 1 y 2). Cada tendido consta de 12 geófonos con una separación de 10 metros entre los mismos e incluye cinco perfiles sísmicos registrados para las posiciones de Tiro (T1) en el sentido ascendente de la progresiva, Contratiro con punto de disparo en (T5) de registro en sentido opuesto y otros tres perfiles disponiendo el punto de emisión de energía en puntos intermedios (T2, T3 y T4) y registro a ambos lados de este punto. Para la generación de las ondas de compresión se emplearon golpes verticales de martillo en una placa solidaria al suelo. Cada disparo debe ser conectado al equipo registrador para tomar una señal de

referencia del tiempo cero a partir del cual se miden los tiempos de arribos de las distintas ondas sísmicas. Los impactos fueron repetidos para un mismo punto de disparo con el objeto de superponer la energía en la fuente sísmica (stacking) y aumentar la relación señal/ruido en los canales registrados. El equipo utilizado es un sismógrafo EG-S 1225 GEOMETRICS con registro de 12 canales.



Figura N° 1: Ubicación de los 3 tendidos sísmicos en el glaciar de escombros activo El Colorado. En rojo se observa la posición de los 5 tiros y en verde la posición de los 12 geófonos por cada tendido. El punto central de la imagen posee coordenadas de Latitud 31,7435 sur y Longitud 70,4209 oeste.



Figura N° 2: Ubicación de los 3 tendidos sísmicos en el glaciar de escombros activo El Negro. En rojo se observa la posición de los 5 tiros y en verde la posición de los 12 geófonos por cada tendido. El punto central de la imagen posee coordenadas de Latitud 31,7475 sur y Longitud 70,4543 oeste.

La combinación de la información obtenida para el tiempo de arribo del tendido de Tiro (correspondiente al punto de disparo T1), de Contratiro (correspondiente al punto de disparo T5) y de los disparos intermedios (correspondiente a los disparos T2, T3 y T4) bajo un determinado geófono permite obtener la profundidad bajo el mismo. Esto se debe a que la energía proviene de un refractor común situado en profundidad, el cual es iluminado desde múltiples caminos de ondas sísmicas a

ambos lados del geófono por las líneas de tiro, contratiro y otras que utilizaron puntos de disparo en sentido opuesto. Este método de tomografía sísmica permite obtener mayor detalle que la refracción sísmica en las variaciones tanto verticales como laterales de las diferentes capas.

Trabajo de Gabinete

Los registros de campo correspondientes a ondas P han sido analizados en gabinete para las diferentes posiciones de Tiro de cada tendido desplegado en el terreno. Por cada uno de estos registros se realizaron las siguientes tareas:

- Análisis de los registros sísmicos: Cada sismograma fue inspeccionado canal por canal, a los fines de evaluar la calidad de la señal de los mismos y la coherencia entre ellos.
- Determinación de los primeros arribos: A través del programa ixseg2segy se marcaron los primeros arribos de ondas compresivas en cada geófono y para cada tiro.
- Gráfico de las curvas Tiempo - Distancia (Dromocronas): A partir de los tiempos de llegada de los primeros arribos y las distancias desde el punto de disparo donde fueron detectados, se procedió a construir a través del programa Plotrefa las curvas tiempo - distancia denominadas dromocronas (Figura N° 3).
- Perfiles sísmicos: A partir del análisis de las dromocronas se obtuvieron los valores de velocidades sísmicas para las distintas capas del subsuelo y las profundidades de estos cambios de velocidades a lo largo del perfil. En las Figuras N° 4 y 5 se observa el perfil longitudinal de la tomografía sísmica realizada en los dos glaciares de escombros.

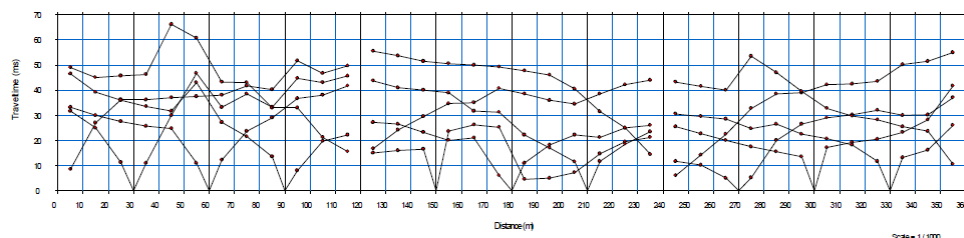


Figura N° 3: Dromocronas generadas a través del programa Plotrefa para los tres tendidos del glaciar de escombros activo El Colorado. Se puede observar que por cada tendido se han generado 5 dromocronas correspondientes a las 5 posiciones de tiro.

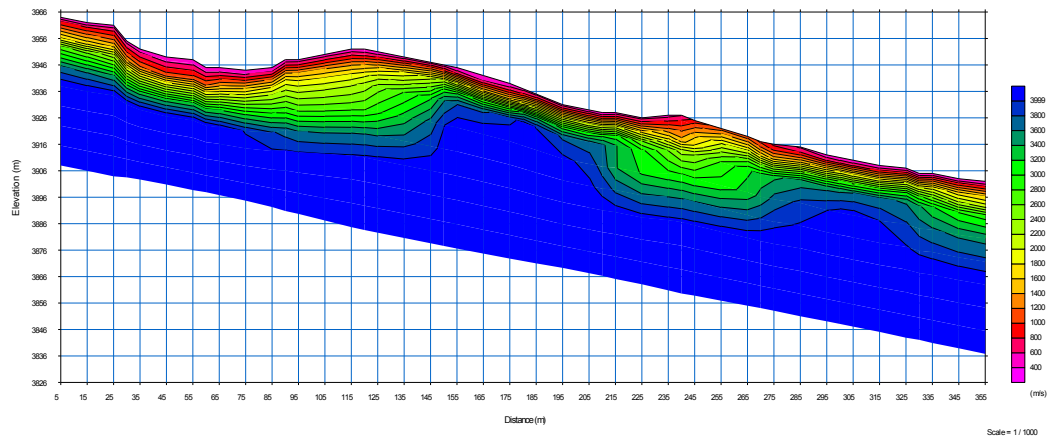


Figura N° 4: Perfil longitudinal de Tomografía Sísmica en el glaciar de escombros activo El Colorado. Se observan los valores de velocidad de ondas P en subsuelo

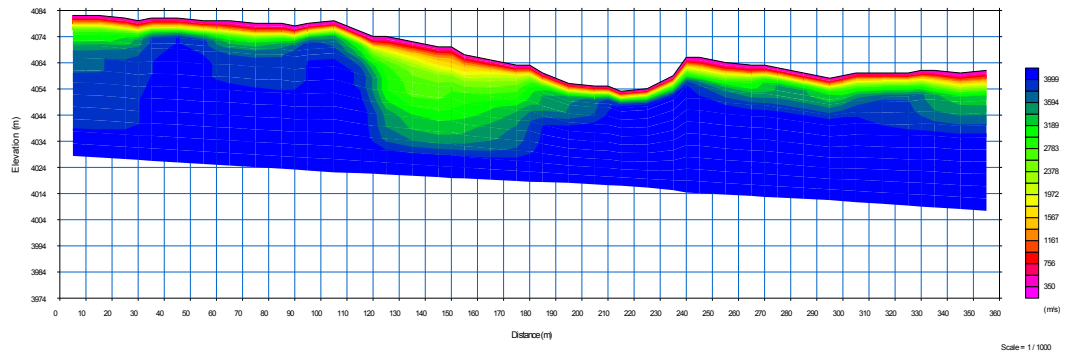


Figura N° 5: Perfil longitudinal de Tomografía Sísmica en el glaciar de escombros activo El Negro. Se observan los valores de velocidad de ondas P en subsuelo

Prospección Geoeléctrica

Los métodos geoeléctricos utilizan las variaciones de las propiedades eléctricas, de las rocas, y minerales, en especial su resistividad. Generalmente emplean un campo artificial eléctrico, creado en la superficie, por el paso de una corriente en el subsuelo (Cantos Figuerola, 1974).

La resistividad de la mayoría de las rocas y sedimentos secos es elevada, por lo que actúan como semiconductores, o conductores de baja capacidad. Este comportamiento cambia significativamente cuando las fisuras o los poros están ocupados por agua, lo que genera una disminución de la resistividad. Además del grado de saturación también incide en la resistividad del medio, el contenido salino

del agua, ya que a mayor salinidad menor resistividad. Los contrastes en las resistividades son los que permiten aplicar exitosamente los métodos de prospección geoelectrica mediante la inyección de corriente continua y permiten identificar los diferentes materiales geológicos en un perfil geoelectrico. El método para generar un perfil geoelectrico lo constituye el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), el cual se define como una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción.

La configuración Schlumberger corresponde a un dispositivo electrónico lineal simétrico, donde los cuatro electrodos A M N B, se encuentran sobre una misma recta y se disponen simétricamente respecto de un centro.

Trabajo de campo y gabinete

Se ha realizado un Sondeo Eléctrico Vertical en el glaciar de escombros activo El Negro. El punto central de este SEV posee coordenadas de Latitud $31^{\circ} 44' 53,6''$ sur y Longitud $70^{\circ} 27' 13,7''$ oeste (Figura N° 6) con una separación máxima de AB de 120 metros y MN de 3 metros. Para la realización de este SEV se ha utilizado un Resistivímetro digital mpx-400 con corriente de salida pulsante, potencia máxima de 400 watts y alimentación de 12 vcc.



Figura N° 6: Ubicación del Sondeo Eléctrico Vertical en el glaciar de escombros El Negro. El punto central de la imagen posee coordenadas de Latitud $31,7475$ sur y Longitud $70,4543$ oeste.

Los datos de campo han sido procesados con el programa ipi2win. En la Figura N° 7 se observa la curva de resistividad obtenida en el campo y la curva modelo a la cual

mejor se ajusta. El perfil geoelectrico está indicando 2 capas, de las cuales, la primera posee en promedio un valor de resistividad de 142 Ohmm y un espesor de 2,67 metros, mientras que la segunda capa es altamente resistiva, con valores de resistividad promedio de 23655 Ohmm y un espesor de 8,39 metros.

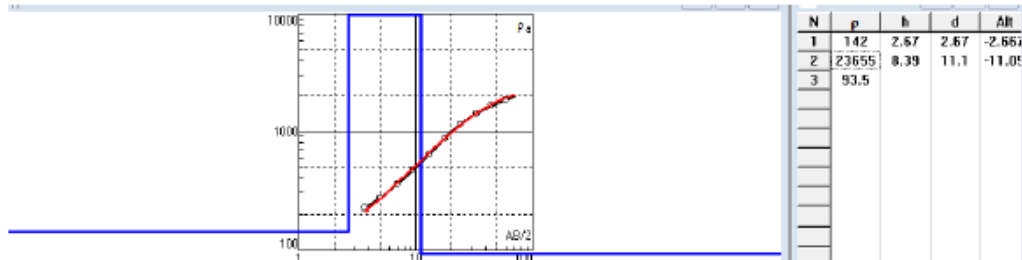


Figura N° 7: A la izquierda se observa, en negro, la curva de resistividad aparente obtenida en el campo, y en rojo, la curva modelo a la cual mejor ajusta. A la derecha se observa el perfil geoelectrico.

5) CONSIDERACIONES FINALES

Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados, en especial (Arenson *et al*, 2010) y los estudios geofísicos realizados sobre los dos glaciares de escombros podemos determinar que el glaciar de escombros El Colorado posee una capa activa de unos 3 metros aproximadamente. Por debajo de esta capa activa se encuentra una zona rica en hielo (permafrost) de un espesor aproximado de 14 metros. Según se puede observar de los perfiles de la tomografía sísmica, en los sectores donde se produce un engrosamiento de la capa rica en hielo, se produce un adelgazamiento en la capa activa y a la inversa. En los sectores donde se produce un engrosamiento de la capa rica en hielo, se tienen espesores máximos de 18 metros. Por otro lado, el glaciar de escombros El Negro posee una capa activa de 3 metros en promedio. Por debajo de esta capa activa se encuentra una zona rica en hielo de espesor promedio de 7 metros. En la parte central del perfil se encuentra un engrosamiento de la capa rica en hielo dando un espesor de 20 metros.

Debido a los valores de resistividad y velocidades de ondas P de las distintas capas del subsuelo y a las características geomorfológicas superficiales, se puede confirmar que tanto el glaciar de escombros El Colorado como El Negro son activos.

Es importante destacar la importancia en la combinación de los métodos geofísicos para determinar la estructura interna (capa activa y capa rica en hielo) de los glaciares de escombros.

6) BIBLIOGRAFÍA

Arenson, L., Pastore, S., Trombotto, D., Bolling, S., Quiroz, M. y Ochoa, L., 2010. Characteristics of two Rock Glaciers in the Dry Argentinean Andes Based on Initial Surface Investigations. GEO2010. Calgary, Alberta.

Cantos Figuerola, J., 1974. Tratado de Geofísica Aplicada. Ciencia 3 Distribución S.A. Madrid. España,

Croce, F. y Milana, J.P. 2002. Internal Structure and Behaviour of a Rock Glacier in the Arid Andes of Argentina. Permafrost Periglacial Processes. 13: 289-299.

Hauck, C., 2001. Geophysical methods for detecting permafrost in high mountains. A dissertation submitted to the Swiss Federal Institute Of Technology Zurich for the degree of Doctor of Natural Sciences.

Hausmann, H., Krainer, K., Bruckl, E. and Mostler, W., 2007. Internal Structure and Ice Content of Reichenkar Rock Glacier (Stubai Alps, Austria) Assessed by Geophysical Investigations. Permafrost and Periglacial Processes. 18: 351-367.

Ramos, V.A., Aguirre-Urreta, M.B., Alvarez, P.P., Cegarra, M., Cristallini, E.O., Kay, S.M., Lo Forte, G.L., Pereyra, F. y Pérez, D., 1996a. Geología de la región del Aconcagua, provincia de San Juan y Mendoza. Subsecretaría de Minería de la Nación. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Anales 24: 1-510.

Yrigoyen, M.R., 1972. Cordillera Principal. En A.F. Leanza (ed.). Geología Regional Argentina. Academia Nacional Ciencias: 345-364, Córdoba.