

GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS

**RADIO ECO-SONDAJE
EN LA CUENCA DEL RIO MAIPO Y
MEDICIONES GLACIOLÓGICAS EN EL
GLACIAR TYNDALL, CAMPO DE HIELO SUR**

**REALIZADO POR :
UNIVERSIDAD DE MAGALLANES
DIRECCIÓN DE PROGRAMAS ANTÁRTICOS Y SUBANTÁRTICOS**

S.I.T. N° 204

Punta Arenas, Diciembre 2009

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Sr. Sergio Bitar C.

Director General de Aguas
Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.

Jefe Unidad de Glaciología y Nieves
Geógrafo Sr. Gonzalo Barcaza S.

Inspectores Fiscales
Ingeniero Civil Cristóbal Cox
Ingeniero Civil Fernando Escobar

UNIVERSIDAD DE MAGALLANES

Jefe de Proyecto
Dr. -Ing. Carlos Cárdenas Mansilla
Investigador asociado al CEQUA

Profesionales:
MSc. Rubén Carvallo Barrientos
Ing. Geomensor Jorge Hernández

MENCIÓN DE RESPONSABILIDAD

Dr. -Ing. Carlos Cárdenas Mansilla
(**Director del proyecto, Radio Echo Sounding, RES**)
e-mail: carlos.cardenas@umag.cl

MSc. Rubén Carvallo Barrientos
(**Radio Echo Sounding, RES**)

Ing. Geomensor Jorge Hernández Inostroza
(**Georeferenciación, GPS**)

Índice general

AGRADECIMIENTOS	XII
PRESENTACIÓN	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
2.2.1. Cuenca del río Maipo, Zona Central de Chile	3
2.2.2. Mediciones glaciológicas sobre el glaciar Tyndall	4
3. ANTECEDENTES	5
3.1. Recopilación de antecedentes y análisis de resultados previos	5
3.1.1. Análisis de trabajos y mediciones mediante RES en zona del glaciar San Francisco	5
3.1.2. Análisis de trabajos y mediciones mediante RES en la zona del glaciar Echaurren Norte	6
3.1.3. Análisis de trabajos y mediciones mediante RES en zona del glaciar Tyndall	6
3.2. Ubicación geográfica y descripción de las zonas de estudio	8

3.2.1.	Cuenca del río Maipo:	8
3.2.2.	Cuenca del río Serrano:	10
4.	MEDICIONES DE RADIO ECO SONDAJE	12
4.1.	Sistema de Radio Eco Sondaje	12
4.2.	Captura y análisis de datos de radar	16
4.2.1.	Cálculo del espesor del hielo	16
4.3.	Radio Eco Sondaje en el Glaciar San Francisco, Zona Central	17
4.4.	Radio Eco Sondaje en el Glaciar Echaurren Norte, Zona Central	21
4.5.	Radio Eco Sondaje sobre las estaciones (balizas) instaladas en el Glaciar Tyn- dall, Campo de Hielo Sur (CHS)	25
5.	GPS - GEORREFERENCIACIÓN	31
5.1.	Descripción del método GPS de georreferenciación	31
5.2.	Georreferenciación de datos de las campañas de terreno	32
5.2.1.	Instrumental	33
5.2.2.	Metodología y configuración en la recolección de datos	33
5.3.	Sistemas de coordenadas	33
5.4.	Procesamiento de datos	34
5.5.	Velocidad superficial del hielo en el glaciar Echaurren Norte y San Francisco	35
5.6.	Precisión de datos GPS	35
5.7.	Presentación de los resultados	36
6.	GENERACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GLACIAR	37
6.1.	Proyección, datum y escalas	37
6.1.1.	Proyección universal (UTM)	37

6.1.2. Escala	38
6.2. Visualización de puntos	38
6.3. Superficie y Perfiles de Terreno	38
6.3.1. Generación de un TIN	38
6.3.2. Perfiles de Terreno (Topografía Superficial y Subglaciar)	39
7. CONCLUSIONES	40
8. RECOMENDACIONES	42
A. Grupo de trabajo	47
B. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES E INGRESO A LAS ZONAS DE ESTUDIO	49
B.1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	49
B.1.1. Cronograma de actividades,Glaciares San Francisco y Echaurren Norte	49
B.1.2. Cronograma de actividades, Primera Campaña al Glaciar Tyndall . .	51
B.1.3. Cronograma de actividades, Segunda Campaña al Glaciar Tyndall . .	52
B.2. INGRESO A LAS ZONAS DE ESTUDIO	52
B.2.1. Ingreso a la zona del glaciar San Francisco	52
B.2.2. Ingreso a la zona del glaciar Echaurren Norte	53
B.2.3. Ingreso a la zona del glaciar Tyndall	56
C. RADARGRAMAS Y PERFILES DE RADAR DE LAS ZONAS DE ESTUDIO	60
C.1. Radargramas obtenidos en glaciar Echaurren Norte	61
C.2. Radargramas obtenidos en glaciar San Francisco	75
C.3. Perfiles de radar obtenidos en glaciar Tyndall	85

D. RUTAS GEORREFERENCIADAS	91
D.1. Glaciar Echaurren Norte	92
D.2. Glaciar San Francisco	93
D.3. Glaciar Tyndall	94
E. REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA	95

Índice de figuras

3.1. Ubicación geográfica del glaciar San Francisco sobre la cuenca del río Maipo	9
3.2. Ubicación geográfica del glaciar Echaurren Norte sobre la cuenca del río Aconcagua	10
3.3. Ubicación geográfica del glaciar Tyndall, cuenca del río Serrano.	11
4.1. Sistema de radio eco sondaje junto a un perfil del fondo subglaciar.	12
4.2. Sistema de radar de impulso.	13
4.3. Sistema de radar, transmisor, receptor y sus antenas instaladas sobre crochet para ser transportado a pie sobre la superficie del glaciar junto a la antena móvil de uno de los GPS's	14
4.4. Personal de la Universidad de Magallanes sobre el glaciar Echaurren Norte, realizando mediciones de espesor utilizando el sistema de Radio Eco-sondaje	15
4.5. Perfiles del glaciar San Francisco obtenidos mediante radio eco sondaje. . . .	18
4.6. Desplazamiento del sistema de radar sobre el glaciar San Francisco (Etapa transmisora)	19
4.7. Evacuación del glaciar San Francisco vía aérea	21
4.8. Perfiles del glaciar Echaurren Norte, obtenidos mediante radio eco sondaje. .	22
4.9. Disposición del equipo de radio eco sondaje sobre la superficie del glaciar Echaurren Norte junto a la antena móvil del GPS, para comenzar a realizar las mediciones	23
4.10. Topografía superficial y subglaciar de la transecta ubicada sobre la zona de ablación del glaciar Tyndall del año 2008, obtenido por medio de radio eco sondaje de acuerdo a la tabla 4.6.	26

4.11. Topografía superficial y subglaciar de la transecta ubicada sobre la zona de ablación del glaciar Tyndall obtenida en la primera campaña del 2009 por medio de radio eco sondaje de acuerdo a la tabla 4.7	27
4.12. Movimiento de las balizas instaladas durante el periodo 2008 - 2009, sobre el glaciar Tyndall	29
4.13. Perfil de espesor sobre la zona de ablación del glaciar Tyndall	30
B.1. Sector de acopio en las cercanías del embalse El Yeso, lugar donde aterrizó el helicóptero para portear la carga transportada desde Santiago, por el vehículo doble tracción.	53
B.2. Acceso al lugar de acopio de equipos ubicado en el embalse El Yeso. Se muestra el camino a seguir desde la ciudad de Santiago	54
B.3. Vista panorámica del glaciar San Francisco y del campamento	54
B.4. Campamento Base 1 (CB1), en zona central del glaciar San Francisco.	55
B.5. Campamento Base 2 (CB2), ubicado en la zona central del glaciar Echaurren Norte	55
B.6. Vista panorámica del glaciar Echaurren Norte y del campamento	56
B.7. Sendero entre la guardería Grey y el cañadón Doña Rosa	57
B.8. Vista general del cañadón Doña Rosa, donde se instaló el campamento base y ruta hacia el glaciar Tyndall.	58
B.9. Campamento base ubicado en cañadón Doña Rosa a orillas de glaciar Tyndall, Noviembre 2009	58
B.10. Vista panorámica del glaciar Tyndall, Parque Nacional Torres del Paine (Diciembre 2009).	59
C.1. Radargrama obtenido en la transecta, E7 - E1 de la zona del glaciar Echaurren Norte.	61
C.2. Radargramas obtenidos en las transectas, E3 - E2 y E1 - E3 respectivamente en la zona del glaciar Echaurren Norte.	62
C.3. Radargramas obtenidos en las transectas E1 - E3 y E7 - E4 respectivamente en la zona del glaciar Echaurren Norte.	63

C.4. Radargramas obtenidos en la transecta, E7 - E4, en la zona del glaciar Echaurren Norte.	64
C.5. Radargrama obtenido en la transecta E2 - E5, en la zona del glaciar Echaurren Norte	65
C.6. Radargrama obtenido en la transecta CB - E7, en la zona del glaciar Echaurren Norte	66
C.7. Radargramas obtenidos en las transecta CB - E7, en la zona del glaciar Echaurren Norte.	67
C.8. Radargramas obtenidos en las transectas E5 - E8 y E10 - E9 respectivamente en la zona del glaciar Echaurren Norte.	68
C.9. Radargrama obtenido en la transecta E10 - E9, en la zona del glaciar Echaurren Norte	69
C.10. Radargrama obtenido en la transecta E10 - E9, en la zona del glaciar Echaurren Norte	70
C.11. Radargrama obtenido en la transecta E10 - E9, en la zona del glaciar Echaurren Norte	71
C.12. Radargramas obtenidos en la transecta, E11 - E10, en la zona del glaciar Echaurren Norte.	72
C.13. Radargrama obtenido en la transecta E5 - E11, en la zona del glaciar Echaurren Norte	73
C.14. Radargrama obtenido en la transecta E5 - E11, en la zona del glaciar Echaurren Norte	74
C.15. Radargrama obtenido en la transecta SLN06 - SLN09, en la zona del glaciar San Francisco	75
C.16. Radargrama obtenido en la transecta SLN06 - SLN09, en la zona del glaciar San Francisco	76
C.17. Radargrama obtenido en la transecta SLN05 - SNN01, en la zona del glaciar San Francisco	77
C.18. Radargrama obtenido en la transecta SLN05 - SNN01, en la zona del glaciar San Francisco	78
C.19. Radargramas obtenidos en la transecta SLN01 - SNN05, en la zona del glaciar San Francisco	79

C.20. Radargramas obtenidos en la transecta SNS05 - SNS01, en la zona del glaciar San Francisco	80
C.21. Radargramas obtenidos en la transecta SNS05 - SNS01, en la zona del glaciar San Francisco	81
C.22. Radargramas obtenidos en la transecta SNS05 - SNS01, en la zona del glaciar San Francisco	82
C.23. Radargramas obtenidos en la transecta SNS05 - SNS01, SLN09 - SNS05 en la zona del glaciar San Francisco	83
C.24. Radargrama obtenido en la transecta SLN06 - SLN05, en la zona del glaciar San Francisco	84
C.25. Perfil obtenido en la zona de ablación del glaciar Tyndall, correspondiente a la estacion B01 de la transecta de la figura 4.13	85
C.26. Perfil obtenido en la zona de ablación del glaciar Tyndall, correspondiente a la estacion B02 de la transecta de la figura 4.13	86
C.27. Perfil obtenido en la zona de ablación del glaciar Tyndall, correspondiente a la estacion B03 de la transecta de la figura 4.13	87
C.28. Perfil obtenido en la zona de ablación del glaciar Tyndall, correspondiente a la estacion B04 de la transecta de la figura 4.13	88
C.29. Perfil obtenido en la zona de ablación del glaciar Tyndall, correspondiente a la estacion B05 de la transecta de la figura 4.13	89
C.30. Perfil obtenido en la zona de ablación del glaciar Tyndall, correspondiente a la estacion B06 de la transecta de la figura 4.13	90
D.1. Desplazamiento efectuado sobre el glaciar Echaurren Norte	92
D.2. Desplazamiento realizado sobre el glaciar San Francisco	93
D.3. Desplazamiento realizado sobre la zona de ablación del glaciar Tyndall.	94

Índice de cuadros

4.1.	Resumen de los parámetros del sistema de radar de impulso	14
4.2.	Ubicación geográfica de las estaciones sobre el glaciar San Francisco en UTM y altitudes obtenidas mediante el método diferencial.	19
4.3.	Resumen de archivos capturados: trayecto, número de trazas y distancias recorridas a través de estos perfiles sobre el glaciar San Francisco.	20
4.4.	Ubicación geográfica de las estaciones sobre el glaciar Echaurren Norte en UTM y altitudes obtenidas mediante el método diferencial. En algunas estaciones por pérdida de señal no se realizó el procesamiento diferencial.	23
4.5.	Resumen de los archivos de radar capturados, trayecto, número de trazas y distancias recorridas a través de los perfiles obtenidos sobre el glaciar Echaurren Norte.	24
4.6.	Posición de las balizas instaladas el año 2008 en UTM, cota de superficie y espesor del hielo en cada punto.	26
4.7.	Posición inicial geográfica aproximada de cada baliza en UTM instalada el 2008, cota de superficie y espesor del hielo en cada punto	27
4.8.	Posición de las balizas (UTM) instaladas el año 2008 y las balizas encontradas el año 2009 , junto a la distancia recorrida por cada una de ellas, en un periodo de 380 días y sobre la zona de ablación del glaciar Tyndall.	28
4.9.	Velocidad y dirección del flujo glaciar, junto a la tasa de ablación anual en la zona de ablación del glaciar Tyndall, obtenida en un periodo de 380 días.	28
5.1.	Georeceptores GPS utilizados.	32
5.2.	Desplazamiento diario del flujo glaciar de la estación base instalada sobre el glaciar Echaurren Norte y San Francisco. (VE: Velocidad en dirección Este, VN: Velocidad en dirección Norte, VZ :Velocidad del eje de elevación)	35

AGRADECIMIENTOS

La Corporación Nacional Forestal, CONAF apoyó las actividades realizadas dentro del Parque Nacional Torres del Paine. A la Universidad de Magallanes en especial al personal administrativo. Este estudio fue financiado por la Dirección General de Aguas, (DGA), del Ministerio de Obras Públicas (MOP).

PRESENTACIÓN

La presente propuesta, bajo el alero del convenio suscrito con fecha 4 de septiembre de 2009 entre la Dirección General de Aguas (DGA) y la Universidad de Magallanes para la ejecución de la acción de apoyo denominada **RADIO ECO-SONDAJE EN LA CUENCA DEL RIO MAIPO Y MEDICIONES GLACIOLÓGICAS EN EL GLACIAR TYNDALL, CAMPO DE HIELO SUR**, con el objetivo de desarrollar estudios técnicos y científicos en dos glaciares de la cuenca del río Maipo y un tercer glaciar en la zona sur de Chile. La Universidad de Magallanes (UMAG), la cual tiene un amplio conocimiento y prestigio en estudios glaciológicos de esta naturaleza desarrollará las actividades propuestas por la Dirección General de Aguas, DGA enfocadas en los siguientes temas:

- Mediciones de espesor de hielo utilizando Radio Eco Sondaje terrestre, para estimar el espesor de glaciares representativos de la cuenca del río Maipo ubicados en la zona central de Chile.
- Prosección del monitoreo de las principales variables glaciológicas en el Glaciar Tyndall, Campo de Hielo Sur (CHS).

PROYECTO:

**”RADIO ECO-SONDAJE
EN LA CUENCA DEL RIO MAIPO Y
MEDICIONES GLACIOLÓGICAS EN EL
GLACIAR TYNDALL, CAMPO DE HIELO SUR”**

UNIDAD DE GLACIOLOGÍA Y NIEVES

Resumen

El presente informe describe el total de las actividades desarrolladas como acción de apoyo encomendadas por la Dirección General de Aguas, DGA¹ a través de su Unidad de Glaciología y Nieves y realizadas por un equipo multidisciplinario de la Universidad de Magallanes pertenecientes a la DPA² entre los meses de Octubre y Diciembre del 2009, periodo en el cual se realizaron tres campañas de terreno a los glaciares San Francisco y Echaurren Norte en la Zona Central del país y al glaciar Tyndall en Campos de Hielo Sur, región de Magallanes.

Sobre los tres glaciares antes mencionados se realizaron mediciones mediante un sistema de radar terrestre que fue transportado en forma manual sobre cada superficie glaciar con el objetivo de obtener las topografías subglaciares de cada uno de ellos en complemento con mediciones de georreferenciación, mediante equipos GPS's de calidad topográfica.

En el área de estudios del glaciar San Francisco se estimaron valores de espesor de su masa glaciar que oscilan entre los 58 m y los 120 m de profundidad. Junto a estos valores medidos se estimaron velocidades del flujo glaciar en su zona central de 26,8 cm/día.

En referencia al glaciar Echaurren Norte se estimaron espesores de su masa glaciar entre los 46 m y los 89 m y velocidades del flujo en su zona central de aproximadamente 12,6 cm/día.

Las mediciones realizadas en el glaciar Tyndall permitieron establecer espesores que oscilan entre los 94 m y los 550 m, estableciendo además una tasa de ablación anual en su zona de ablación de 8,36 m y velocidades del flujo glaciar que oscila entre los 49 y 80 cm/día.

¹Ministerio de Obras Públicas (MOP)

²Dirección de Programas Antárticos, DPA

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Conscientes de los cambios que actualmente están experimentando las grandes masas de hielo a nivel mundial como consecuencia de su gran sensibilidad al calentamiento global, la Dirección General de Aguas (DGA) se planteó el desafío de conocer la realidad nacional de nuestros glaciares y su respuesta actual y futura en este contexto.

Un parámetro básico para determinar las variaciones de la masa glaciar es la medición del espesor del hielo. Este espesor puede ser obtenido mediante el uso de un sistema de radio eco sondaje (RES) operando en el espectro de las radio frecuencias, como lo demuestran estudios realizados en zonas de similares características. A través de este parámetro es posible estimar la cantidad de recursos hídricos equivalentes en agua almacenados en los glaciares.

La Dirección General de Aguas creó la Unidad de Glaciología y Nieves con objetivos específicos, como por ejemplo dimensionar los recursos hídricos contenidos en los glaciares del país y sus variaciones en respuesta al cambio climático y otros factores que los afectan; por ello, se están realizando estudios, inventarios e investigaciones con diferentes instituciones del país.

La Universidad de Magallanes (UMAG) a través de su Dirección de Programas Antárticos (DPA) tiene un amplio conocimiento, capacidad técnica y prestigio en estudios glaciológicos de esta naturaleza, que le permite el desarrollo de las actividades propuestas como acción de apoyo de acuerdo a las bases técnicas estructuradas por la DGA. En este contexto el año 2008 la Universidad de Magallanes y la Dirección General de Aguas suscribieron un convenio para la ejecución de una acción de apoyo denominada **Estimaciones de volúmenes de hielo mediante sistemas de radar para usos Glaciológicos en el Norte Chico y zona Central de Chile, y mediciones Glaciológicas en el Glaciar Tyndall, Campo de Hielo Sur**, la cual tenía por objetivo general realizar estudios de Radio Eco-Sondaje en las zonas antes mencionadas, para estimar volúmenes de hielo contenidos en glaciares representativos, además de la caracterización de las principales variables glaciológicas del glaciar Tyndall.

Continuando con los trabajos efectuados el año 2008 la Universidad de Magallanes y la Dirección General de Aguas suscribieron un nuevo convenio para la ejecución de una segunda acción de apoyo para el año 2009, denominada **RADIO ECO-SONDAJE EN LA CUENCA DEL RIO MAIPO Y MEDICIONES GLACIOLÓGICAS EN EL GLACIAR TYNDALL, CAMPO DE HIELO SUR**. Los glaciares estudiados en esta oportunidad fueron tres: los glaciares Echaurren Norte y San Francisco ubicados en la cuenca del río Maipo y el glaciar Tyndall, ubicado en la cuenca del río Serrano en la región de Magallanes, contexto en el cual se desarrolló el trabajo detallado a continuación.

Capítulo 2

OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

El objetivo general de la presente acción de apoyo es realizar estudios de radio eco sondaje (RES) terrestre sobre la cuenca del río Maipo, ubicada en la Zona Central de Chile para estimar el espesor del hielo contenido en glaciares representativos de esa cuenca, como así también la prosecución del monitoreo de las principales variables glaciológicas del glaciar Tyndall, Campo de Hielo Sur (CHS).

2.2. Objetivos específicos

2.2.1. Cuenca del río Maipo, Zona Central de Chile

La zona central de Chile alberga la mayor cantidad de población del país, por ello es necesario cuantificar las reservas de agua futura para el riego y consumo poblacional. Por esta razón se ha comenzado a estudiar glaciares específicos de la cuenca del río Maipo ubicada en la Zona Central de Chile.

Las mediciones están orientadas a conocer el espesor de dos glaciares pertenecientes a esta cuenca. En esta oportunidad se estudiaron el glaciar San Francisco y glaciar Echaurren Norte, para ello las mediciones se realizaron mediante un sistema de radar de impulso descrito en la figura 3.1, que fue transportado a pie sobre el glaciar por dos personas, haciendo uso cada uno de ellos, de cañas de fibra de vidrio instaladas sobre crochet que a su vez sirvieron de soporte para el transporte del trasmisor, el receptor y sus antenas según se describe en la figura 4.4.

2.2.2. Mediciones glaciológicas sobre el glaciar Tyndall

Esta segunda acción de apoyo tiene por objeto continuar las actividades que comenzaron el 2008 a través del proyecto **”Estimaciones de volúmenes de hielo mediante sistemas de radar para usos glaciológicos en el Norte Chico y zona Central de Chile y mediciones glaciológicas en el Glaciar Tyndall, Campo de Hielo Sur”**, que permitirán determinar a mediano plazo las tasas de adelgazamiento y/o engrosamiento del glaciar Tyndall.

Capítulo 3

ANTECEDENTES

3.1. Recopilación de antecedentes y análisis de resultados previos

3.1.1. Análisis de trabajos y mediciones mediante RES en zona del glaciar San Francisco

En relación a la literatura referente a este glaciar, y más específicamente a trabajos realizados con la utilización de radar en el lugar surge el estudio titulado Mediciones de espesor en glaciares de Chile centro-sur [28], el cual entre los glaciares observados menciona al glaciar San Francisco. En el año 1998, específicamente en el periodo estival, se realizó una campaña a la zona de ablación de este glaciar en la que se midieron perfiles utilizando un sistema de radar montado en cañas de fibra de vidrio con antenas en paralelo midiéndose espesores cada 10 m. Se empleó una velocidad de ondas de $161(m/\mu s)$ para hielo temperado. El espesor máximo que se determinó en el perfil longitudinal fue de 94 m. La última parte de este glaciar está recubierta, por una importante capa de detritos¹ en superficie, la que no impidió la penetración de las señales de radar, obteniéndose espesores del orden de 60 m de hielo [28]. Con la velocidad antes mencionada y el largo de las antenas, fue posible determinar una frecuencia central de 5 MHz. Posteriormente fueron medidos dos perfiles transversales al inicio y final del perfil longitudinal obteniéndose valores máximos de 91 m y 71 m respectivamente. Las intersecciones entre los perfiles resultantes fueron poco precisas debido a la pobre cobertura satelital para la obtención de datos GPS.

¹Cada una de las partículas que resultan de la descomposición de una roca

3.1.2. Análisis de trabajos y mediciones mediante RES en la zona del glaciar Echaurren Norte

En este caso es de suma importancia mencionar que la DGA a través de un programa de monitoreo del balance de masa de este glaciar registra observaciones desde 1975. Haciendo mención a la revisión de la literatura referente al glaciar Echaurren Norte, surge el estudio denominado Variaciones de un glaciar de montaña en los Andes de Chile Central en las últimas dos décadas, en el que se concluye que existe una variación interanual en el balance de masa del glaciar, el cual se debería mayormente a cambios anuales en la precipitación [15], posiblemente por la presencia del fenómeno de El Niño, el cual estaría ligado a cambios en las precipitaciones y no a cambios en el régimen térmico [28]. El estudio abarca un rango de 18 años de mediciones comprendidos entre los años 75-93, en que existía un balance neto positivo para el periodo, contrastando con el retroceso que experimentaban los glaciares de la zona central del país. Los científicos encargados del estudio argumentaban que la morfología propia del glaciar protegería a éste de la radiación solar y favorecería la acumulación de nieve por efecto del viento, razones por las cuales en conjunto con la presencia del fenómeno de El Niño, permitirían un balance de masa positivo de éste. Si se considera el período de tiempo comprendido entre los años 75-89 como lo hace el estudio titulado Variaciones recientes de glaciares en Chile, se reconoce el balance de masa positivo del que se habló anteriormente, pero se hace mención a la ocurrencia de fenómenos extremos de La Niña en el segundo período de mediciones denotando una tendencia claramente regresiva [28]. También es importante señalar que al revisar la información del balance de masa disponible actualmente de la DGA hasta el año 2008, se puede observar que, contrastando con el período antes señalado (75-93), en el período 1993-2008 hay un balance altamente negativo, al igual que muchos glaciares de la región.

3.1.3. Análisis de trabajos y mediciones mediante RES en zona del glaciar Tyndall

Al igual que en las otras zonas de estudio, para el análisis preliminar del glaciar Tyndall se contempla la revisión de la topografía superficial mediante el uso de cartografía IGM, imágenes satelitales e imágenes IKONOS de acceso libre en Internet. El glaciar Tyndall es un glaciar representativo de la zona del Campo de Hielo Sur (CHS) debido a su gran tamaño y su similar comportamiento a otros grandes glaciares del campo de hielo, al igual que su cuenca que corresponde a una de las cuatro cuencas más significativas del Campo de Hielo Sur, siendo uno de los mayores aportes hídricos a la región de Magallanes. El glaciar Tyndall de acuerdo a la lista preliminar de glaciares patagónicos compilado por Liboutry en el año 1956 es el octavo glaciar más grande del campo de hielo patagónico Sur.

Por su gran tamaño y representatividad, en un contexto mayor existe un gran interés científico al poder ser considerado como un glaciar de referencia para estudiar las variaciones climáticas a nivel global. A continuación se presentan algunos de los trabajos realizados en este glaciar:

- **1985:** Científicos japoneses liderados por R. Naruse comienzan a estudiar las características de la superficie glaciar en la zona de ablación por medio de la instalación de balizas a lo largo de una transecta de 2,5 Km desde el margen derecho de este glaciar [25].
- **1990:** Casassa realiza por primera vez mediciones mediante el uso de un sistema de Radio Eco Sondaje sobre la misma transecta, obteniendo información referente al espesor del hielo en esta zona, alcanzando una profundidad de hasta 600 metros en la zona central del glaciar Tyndall [8].
- **1993:** La zona de ablación fue nuevamente medida por un equipo chileno-japones con resultados similares pero obteniendo menores profundidades a las obtenidas anteriormente por Casassa [8].
- **1999:** Se realiza por primera vez mediciones sobre el glaciar Tyndall utilizando un sistema de radar aerotransportado perteneciente a un grupo de investigación del instituto de geociencias y recursos naturales de Hannover (BGR), Alemania. Las mediciones fueron realizadas con apoyo de un helicóptero, alcanzando espesores máximos de 800 m en la zona central y 462 m en su lengua principal, frente al lago pro-glaciar Geikie [7].
- **1999-2000:** Un equipos de la Universidad de Ohio, U.S.A. liderado por Ch. Raymond realiza mediciones utilizando otro sistema de radar, obteniendo nuevamente 600 m de espesor en la zona de ablación [27].
- **2001:** La UMAG, el CECS, y el Instituto Niels Bohr de Dinamarca realizaron vuelos de prueba utilizando un sistema de radar instalado sobre un avión del tipo Twin Otter, cuyos resultados no fueron muy satisfactorios [5].
- **2003:** La NASA, con apoyo del CECS y la Armada de Chile realizaron vuelos de prueba sobre el glaciar con otro sistema de radar a bordo de un avión cuadrimotor, modelo Orión P3, perteneciente a la Armada de Chile, sin obtener grandes resultados.
- **2003-2006:** Se realizan nuevas expediciones por parte de la Universidad de Magallanes en cooperación con el Centro de Estudios del Cuaternario (CEQUA) utilizando radio eco sondaje superficial, esta vez se extienden las mediciones sobre una superficie mayor en la zona de ablación, obteniendo mediciones de hasta 700 metros de espesor [9].
- **2006-2007:** Se realizan mediciones de prueba utilizando un nuevo sistema de radar aerotransportado desarrollado por CECS, que se instaló en un avión caza del ejército de Chile, obteniendo mediciones aproximadas hasta los 600 metros en la zona central del glaciar (Comunicación personal).
- **2007-2008:** Se realizan nuevas prospecciones mediante el uso de un sistema de radar aerotransportado perteneciente a la Universidad de Münster, Alemania en cooperación con la Universidad de Magallanes, el CECS y Armada de Chile y cuyos resultados preliminares muestran profundidades del glaciar entre los 200 a 700 m (Comunicación personal).
- **2008:** La Universidad de Magallanes con el financiamiento de la Dirección General de Aguas realizan mediciones para determinar el volumen de masa del glaciar a través de Radio Eco-Sondaje y entender a mediano plazo la dinámica del glaciar [14].

Como resultado de esta última acción de apoyo [14] se estimó un volumen total de hielo equivalente en agua de $25.130 \times 10^6 \text{ m}^3$ asumiendo una densidad relativa de 900 kg/m^3 [24]. El área total estudiada se estimó en $92,55 \text{ km}^2$.

Las mediciones realizadas mediante GPS y Radar permitieron establecer topografía superficial y subglaciar de una transecta de $3,2 \text{ Km}$ de longitud, comenzando desde el borde rocoso en dirección hacia el centro del glaciar. Se obtuvieron registros que indican retornos del fondo rocoso que van entre los 126 metros y los 548 metros. La información obtenida coincide con la recabada en campañas anteriores.

Para el estudio de la dinámica en la zona de ablación de este glaciar se instalaron 8 balizas sobre la transecta ya mencionada, con el objeto de estimar la velocidad de desplazamiento, dirección del movimiento superficial del glaciar y determinar el estado del balance de masa del área [14].

3.2. Ubicación geográfica y descripción de las zonas de estudio

3.2.1. Cuenca del río Maipo:

La cuenca hidrográfica del río Maipo, donde se ubican los glaciares, San Francisco y Echaurren Norte, abarca prácticamente la totalidad del territorio de la Región Metropolitana y parte de la V y VI regiones, extendiéndose entre los $33^\circ 55'$ - $34^\circ 15'$ de latitud Sur y los $69^\circ 55'$ - $71^\circ 33'$ de longitud Oeste, drenando una superficie total de 15.304 Km^2 .

El río Maipo tiene una longitud de 250 Km . y es la principal fuente de agua de la Región Metropolitana. Atiende alrededor del 70% de la demanda actual de agua potable y cerca de un 90% de las demandas de regadío. Otro aprovechamiento intensivo es el hidroeléctrico [13].

- Glaciar San Francisco

El glaciar San Francisco está ubicado al Este de la ciudad de Santiago en la Región Metropolitana (5860 m.s.n.m. , $33^\circ 45'$ S, $70^\circ 04'$ O), en la cuenca alta del río Maipo dentro del Monumento Natural El Morado. El glaciar tiene una extensión de $1,9 \text{ Km}^2$ y su zona de ablación se ubica por sobre los 2.500 m.s.n.m.

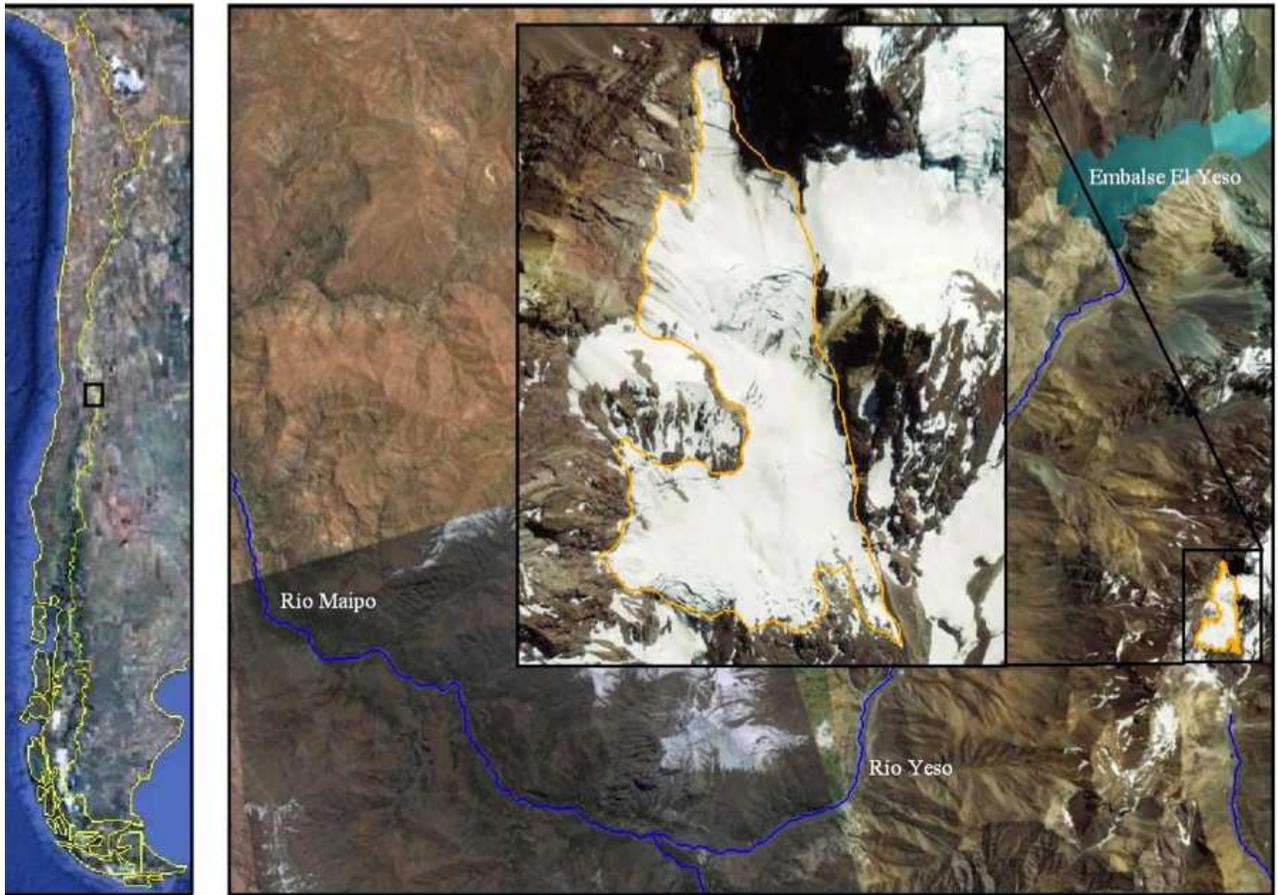


Figura 3.1: Ubicación geográfica del glaciar San Francisco sobre la cuenca del río Maipo

- Glaciar Echaurren Norte

El glaciar Echaurren Norte está ubicado al Este de la ciudad de Santiago, Región Metropolitana ($33^{\circ}35' S$, $70^{\circ}08' O$), en la vertiente occidental de la cadena montañosa de Los Andes. El glaciar tiene una extensión de $0,4 \text{ Km}^2$ y se ubica sobre los 3.800 m.s.n.m.

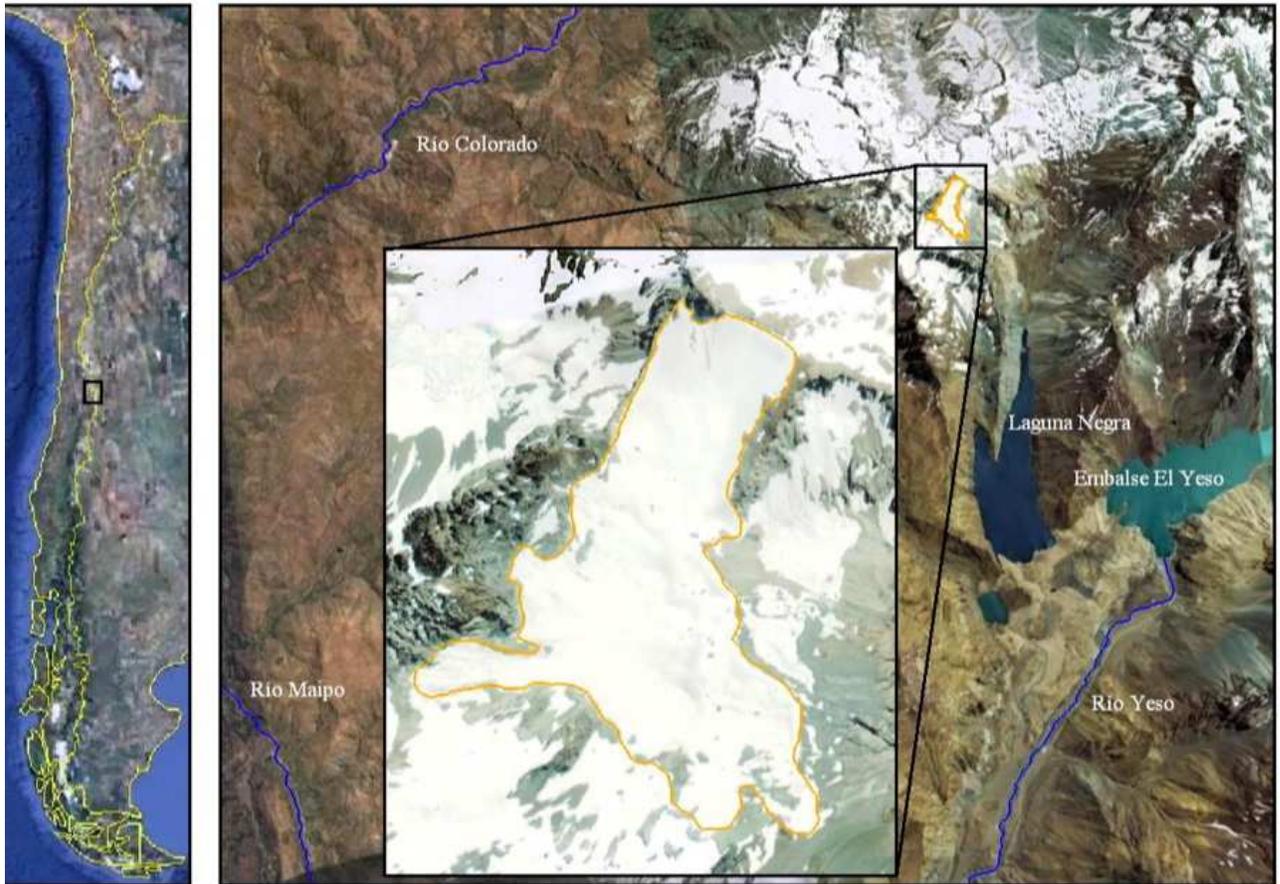


Figura 3.2: Ubicación geográfica del glaciar Echaurren Norte sobre la cuenca del río Aconcagua

3.2.2. Cuenca del río Serrano:

La cuenca hidrográfica del río Serrano es del tipo trasandino y de régimen mixto, pertenece a la Región de Magallanes y abarca una extensión de 6.673 Km². Este río se forma a partir de importantes derrames del Campo de Hielo Sur y de una serie de grandes y pequeños lagos conectados y otros situados en paralelo. El río Serrano tiene 38 Km de largo y se genera como desagüe del lago Toro en el extremo más occidental de este gran cuerpo de agua. Uno de sus más importantes tributarios por su ribera derecha, con un desarrollo de 20 Km, es el río Grey, emisario del lago homónimo. El río Serrano recibe, por la misma ribera, el emisario del lago Tyndall, casi conjuntamente con el río Geikie, que también desagua un par de lagos provenientes del mismo glaciar Tyndall [12].

- Glaciar Tyndall

El glaciar Tyndall es uno de los más grandes glaciares del Campo de Hielo Sur (CHS). Está ubicado en el interior del Parque Nacional Torres del Paine en el sector sudoriental del CHS, región de Magallanes (51°09' S, 73°20' O). Este glaciar fluye en dirección sur y a lo largo de 32 Km., sobre una superficie aproximada de 331 km², dando paso a dos

lagos proglaciares, el Geikie y el Tyndall, integrando a su vez a la cuenca de drenaje del río Serrano uno de los mayores aportes hídricos de Magallanes [12].

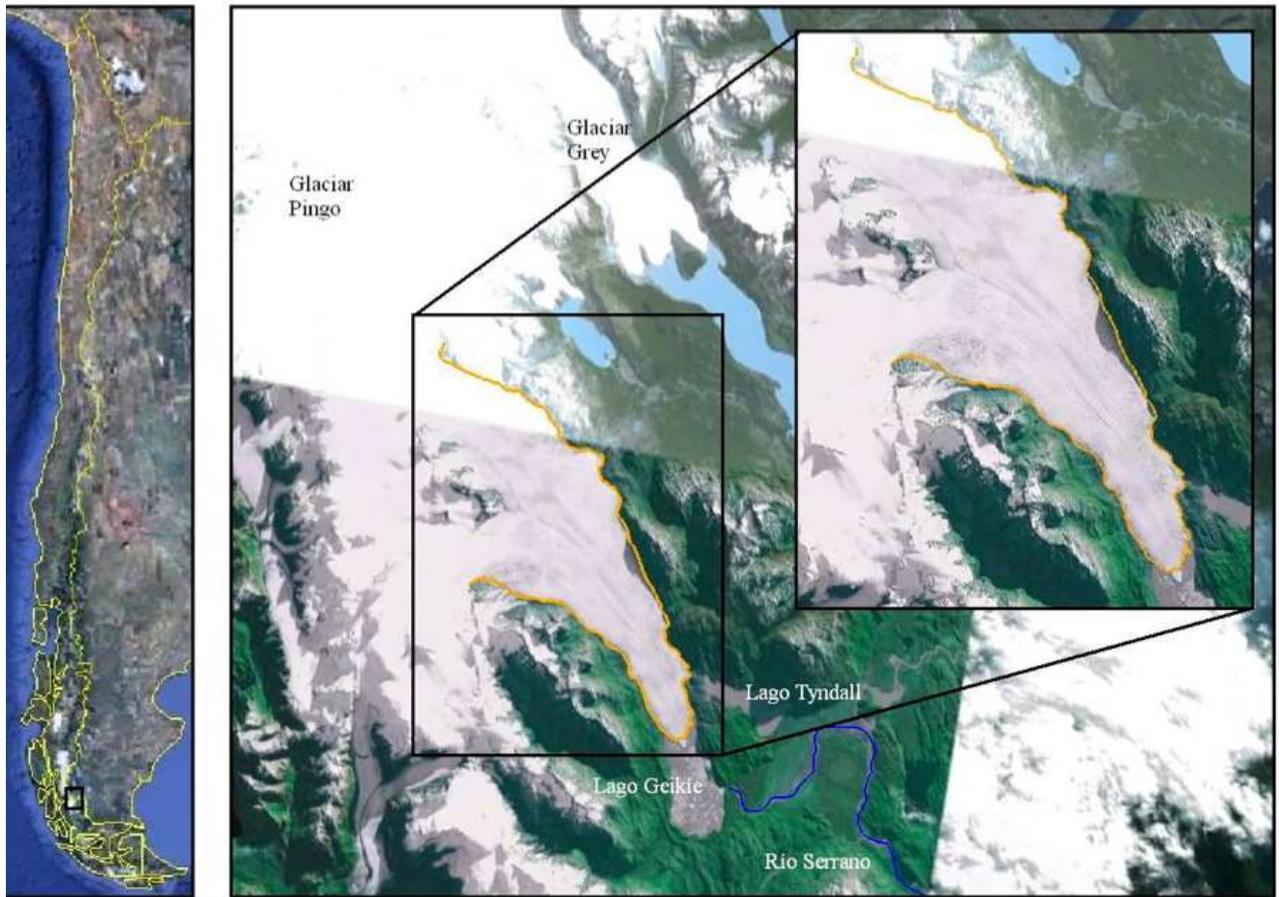


Figura 3.3: Ubicación geográfica del glaciar Tyndall, cuenca del río Serrano.

Capítulo 4

MEDICIONES DE RADIO ECO SONDAJE

4.1. Sistema de Radio Eco Sondaje

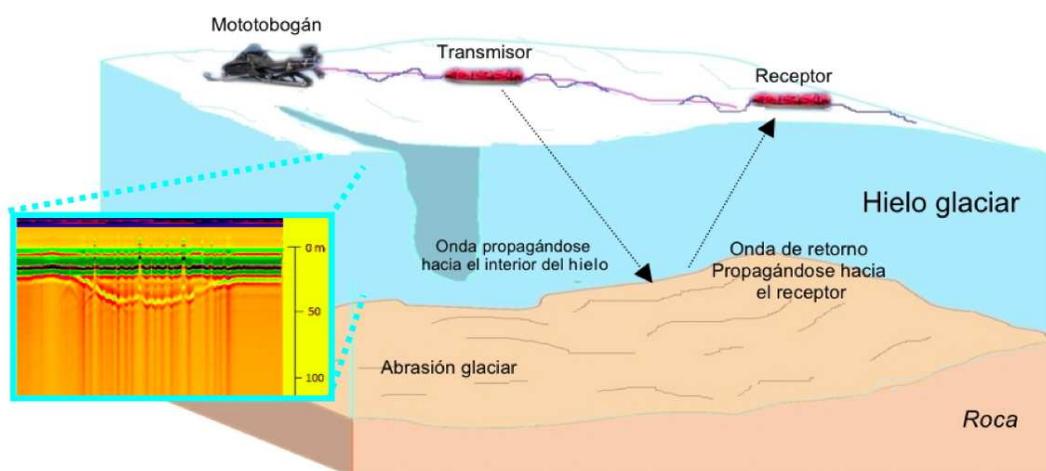


Figura 4.1: Sistema de radio eco sondaje junto a un perfil del fondo subglaciar.

Radio eco sondaje (RES) en la actualidad es una herramienta eficiente y ampliamente utilizada en investigaciones glaciológicas. Esta herramienta puede servir para realizar mediciones glaciológicas en forma superficial sobre la masa glaciar o desde una plataforma aerotransportada, permitiendo caracterizar la topografía subglaciar, espesor del hielo y su estructura o estratigrafía interna. RES es un instrumento de sensado remoto no invasivo que está constituido principalmente de un transmisor, un receptor, sus antenas y un sistema de adquisición de datos. El transmisor genera una señal de radio frecuencias que es propagada a través de la antena transmisora en dirección a un blanco. Cuando esta señal alcanza la

frontera entre dos medios de diferentes constantes dieléctricas (blanco), parte de la señal es reflejada y la otra es transmitida a través del medio, luego la antena receptora captura la señal reflejada y conociendo la velocidad de propagación de la onda en el medio, la distancia entre la antena y el blanco puede ser determinada. La figura 4.1 muestra como ejemplo el sistema de radar instalado sobre dos trineos arrastrados por un mototobogán junto a un perfil longitudinal capturado por el sistema.

El sistema de radar que se utilizó en los estudios es del tipo de radar de impulso, que consta de un transmisor generador de una señal de gran amplitud y corta duración del orden de unos cuantos nanosegundos, un receptor constituido por un adaptador de impedancias denominado BALUN ¹, un osciloscopio digital, una antena transmisora, y una receptora, como también un sistema de adquisición de datos (computador personal y un software). El transmisor genera un pulso angosto de aproximadamente 100 ns pero de gran amplitud, alrededor de 1600 volt peak-to-peak. La energía electromagnética es propagada a través de la antena transmisora del tipo dipolo. La antena transmisora como la receptora son de 5 metros de longitud y su frecuencia central es de 1,25 MHz, ambas están cargadas resistivamente. Finalmente la señal de retorno es procesada por el sistema de adquisición de datos para su posterior análisis. Los principales parámetros del sistema de radar de impulso son descritos en el cuadro 4.1.

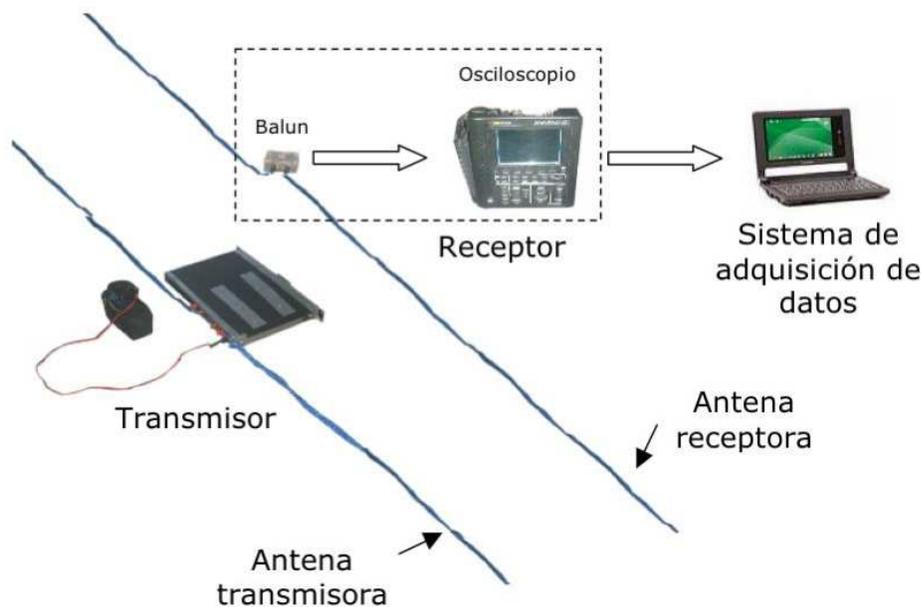


Figura 4.2: Sistema de radar de impulso.

¹Acrónimo de balanced unbalanced

Parámetros	Valor
Frecuencia central	1,25 MHz
Longitud de la antena	5 m
Potencia de salida	51,2 Kw
Tensión de salida	1600 Volts peak to peak
Tiempo de subida	100 ns
Tasa de pulsos	200-400-800 p.p.s.
Temperatura de operación	+30°C / -35°C
Rango (Hielo temperado, práctico)	900 metros
Resolución (Hielo temperado)	10 metros
Peso	20 Kg

Cuadro 4.1: Resumen de los parámetros del sistema de radar de impulso



Figura 4.3: Sistema de radar, transmisor, receptor y sus antenas instaladas sobre crochet para ser transportado a pie sobre la superficie del glaciar junto a la antena móvil de uno de los GPS's



Figura 4.4: Personal de la Universidad de Magallanes sobre el glaciar Echaurren Norte, realizando mediciones de espesor utilizando el sistema de Radio Eco-sondaje

Las mediciones de espesor fueron realizadas mediante el sistema de radar de impulso mostrado en la figura 4.2 y dispuesto sobre crochet y cañas de fibra de vidrio descritos en la figura 4.3.

El sistema de radar fue transportado por dos investigadores como es mostrado en la figura 4.4, tanto la etapa transmisora, la etapa receptora como el sistema de adquisición de datos. En cuanto a la información, los datos fueron capturados en forma discreta a lo largo de cada una de las transectas planificadas.

Las mediciones de topografía superficial fueron realizadas en el glaciar San Francisco y en el glaciar Echaurren Norte mediante el uso de GPS's de calidad topográfica utilizando dos receptores GPS's marca NOVATEL, modelo Smart Antenna, uno utilizado como estación base y el segundo como estación móvil. Ambos receptores capturaron posiciones simultáneamente a intervalos de 1 segundo mientras se desarrollaban los trabajos de terreno. Las posiciones capturadas por el equipo base, localizado en las cercanías del campamento base y las del móvil fueron almacenadas en un data-logger de igual forma como se obtuvieron las posiciones en el equipo móvil.

4.2. Captura y análisis de datos de radar

Una vez capturados los datos en terreno mediante el uso del sistema de radar estos datos son almacenados en forma digital en un computador personal. La captura y almacenamiento de los datos es realizado por medio de programas específicos ejecutables en lenguaje Quick-Basic®. Por medio de estos programas es posible ajustar los parámetros de captura y almacenamiento. La información es capturada definiendo el número de disparos, formato de los datos, tiempo y amplitud, entre otros. Los datos capturados mediante el sistema de radar son almacenados, en donde el registro de tiempo de cada dato capturado permite sincronizar esta información con datos de georreferenciación obtenidos mediante los receptores GPS's. La información es capturada y almacenada en trazas con extensión dzt, correspondiente a información en lenguaje ASCII que es transformable a información vectorial la cual permite el manejo y despliegue de los datos con el objetivo de su interpretación. Esta vectorización es posible realizarla luego de una serie de conversiones mediante el software Idrisi32®, desplegando la información en pantalla donde los datos son analizados y procesados con diferentes filtros para adecuar la imagen y observar de mejor forma las características de interés, por ejemplo la determinación del fondo subglaciar o su estratigrafía interna. Una vez que la información está desplegada claramente en pantalla es posible reconocer el fondo subglaciar siendo necesario realizar una nueva conversión de la imagen, esta vez información vectorial a Raster². Este proceso se realiza en el mismo software Idrisi32®, que permite el traspaso de la información a una planilla EXCEL®, para finalmente obtener valores reales de espesor por cada traza con un determinado tiempo de captura, para luego en conjunto con la información de los equipos GPS's de georreferenciación, obtener el valor real de espesor del glaciar y su posición, mediante la sincronización de los tiempos de medición entre el sistema de radar y el sistema de georreferenciación.

4.2.1. Cálculo del espesor del hielo

La interpretación del espesor del hielo se define mediante la relación 4.1

$$D = \sqrt{\left(t + \frac{s}{c}\right)^2 \frac{c^2}{4\epsilon_i} - \frac{s^2}{4}} \quad , \quad (4.1)$$

Donde

$$t = \frac{t_{escala}}{n_{puntos}} n_{divisiones} (P_{Eco} - P_{Disparo}) \quad , \quad (4.2)$$

²Estructura de datos que representa una grilla rectangular de pixeles.

En la ecuacion 4.1,

D : Espesor del hielo (m)

s : Distancia entre el transmisor y el receptor (m)

c : Velocidad de la señal en el vacío (m/s)

ϵ_i : Permitividad dieléctrica del hielo

En la ecuación 4.2,

t_{escala} : Escala de tiempo (s)

n_{puntos} : Número de puntos de la pantalla

$n_{divisiones}$: Número de divisiones de la pantalla

P_{Eco} : Píxel de inicio del eco

$P_{Disparo}$: Píxel de inicio del disparo

El valor de la permitividad dieléctrica utilizada para el cálculo de todos los espesores fue de 3.17 (adimensional) obteniéndose un valor de velocidad de propagación de la señal de radiofrecuencias del orden de 168 (m/ μ s) [3].

4.3. Radio Eco Sondaje en el Glaciar San Francisco, Zona Central

En el glaciar San Francisco se realizaron mediciones de espesor en su zona central y a lo largo de la transecta que comienza en el punto de referencia SLN01 y que termina en el punto SLN09 y de dos líneas transversales determinadas por los puntos de referencia SNN01 al SNN05 para la primera y SNS1 al SNS05 para la segunda transversal como puede ser apreciado en la figura 4.5.

Estas mediciones fueron efectuadas sobre una elevación aproximada entre los 3.300 m.s.n.m. y los 3.600 m.s.n.m., cuyos trayectos fueron georeferenciados utilizando dos receptores GPS's, utilizados en modo cinemático. La figura 4.3 muestra el equipo GPS utilizado como estación móvil junto al sistema de radar. El sistema de radar se desplegó sobre la superficie del glaciar y se transportó en forma manual sobre la ruta indicada en la figura 4.5.

Las mediciones mediante el sistema de radar utilizaron dipolos de 5 metros de longitud dispuestos en forma paralela y separados a una distancia de 10 metros. La figura 4.6 muestra la etapa transmisora del sistema transportado por una persona en el área del glaciar San Francisco.

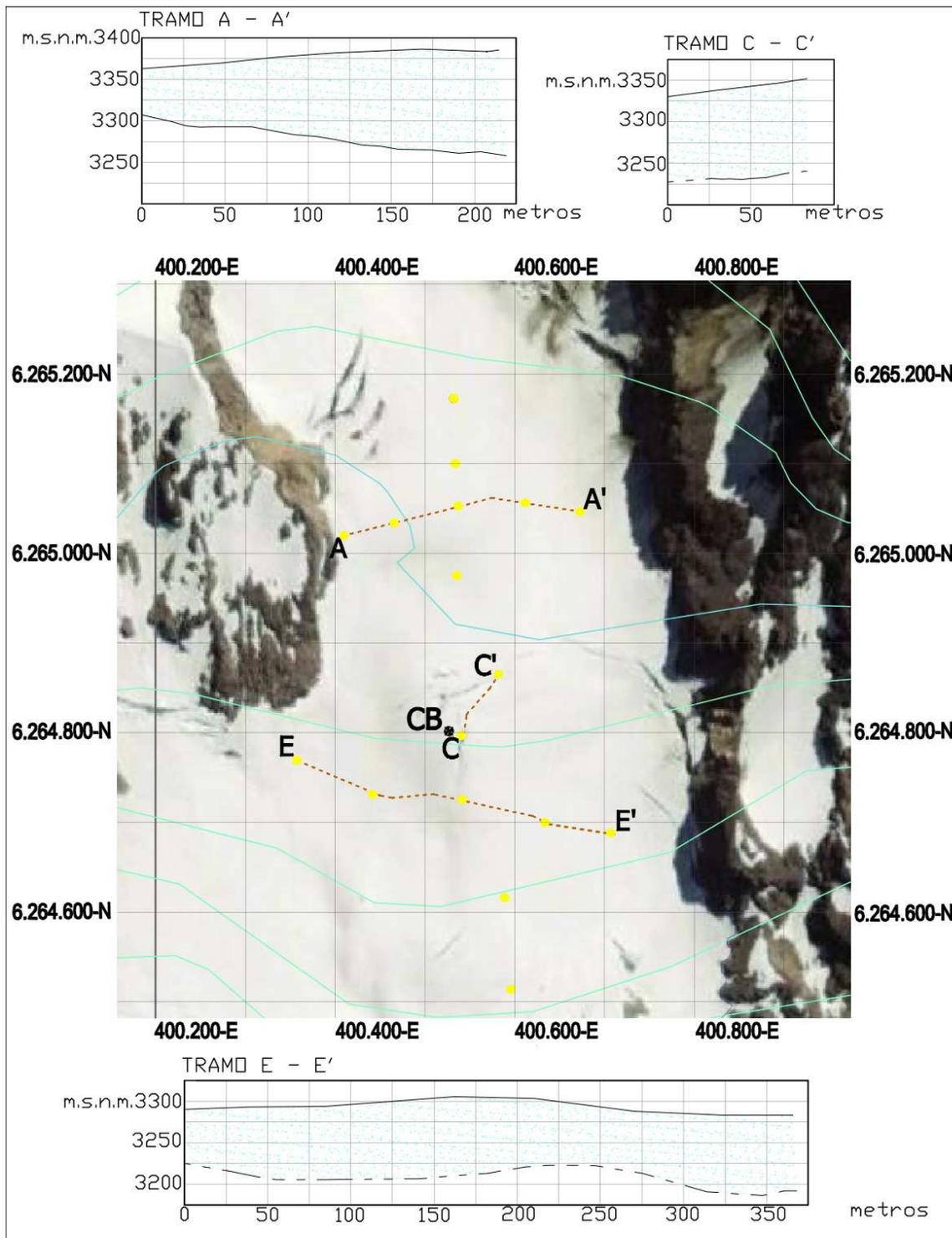


Figura 4.5: Perfiles del glaciar San Francisco obtenidos mediante radio eco sondaje.



Figura 4.6: Desplazamiento del sistema de radar sobre el glaciar San Francisco (Etapa transmisora)

Estación	Este	Norte	Altitud GPS diferencial m.s.n.m.
SLN01	400536,80	6265172,34	3416,23
SLN02	400536,06	6265100,19	3398,40
SLN03	400539,93	6265052,63	3386,79
SLN04	400540,43	6264968,20	3374,19
SLN05	400581,86	6264864,98	3351,66
SLN06	400540,70	6264796,82	3330,61
SLN07	400541,65	6264726,36	3309,81
SLN08	400591,75	6264612,53	3277,83
SLN09	400596,08	6264513,53	3255,93
SNN01	400410,47	6265020,32	3367,12
SNN02	400464,89	6265035,66	3375,56
SNN04	400611,78	6265055,70	3387,02
SNN05	400675,21	6265047,17	3388,82
SNS01	400360,48	6264768,28	3286,77
SNS02	400464,89	6265035,66	3375,56
SNS04	400634,07	6264700,62	3297,12
SNS05	400711,05,4	626468,82	3294,39

Cuadro 4.2: Ubicación geográfica de las estaciones sobre el glaciar San Francisco en UTM y altitudes obtenidas mediante el método diferencial.

Archivos	Trayecto Inicio - Término	Número de trazas ³	Distancia Recorrida (m)	Profundidad promedio (m)
ai9e	SLN06 - SLN09	236	132,7	104,84
ai9f	SLN06 - SLN09	76	65,3	98,6
ai9h	SLN06 - SLN09	56	30,8	84,63
an1b	SLN05 - SNN01	158	76,7	67,87
an1c	SLN05 - SNN01	102	42,9	80,38
an5a	SNN01 - SNN05	187	51,7	73,86
an5b	SNN01 - SNN05	84	42,1	92,16
an5c	SNN01 - SNN05	276	85,6	120,32
as1a	SNS05 - SNS01	25	25,8	76,21
as1c	SNS05 - SNS01	26	23,9	94,45
as1d	SNS05 - SNS01	386	135,4	99,53
as1e	TSNS05 - SNS01	103	33,1	51,28
an1b	T10-JU-EN	2141	253	
as1g	SNS05 - SNS01	182	73,4	72,26
as1h	SNS05 - SNS01	58	9,5	95,94
al5an1	SLN09 - SNS05	167	212,7	58,34
sfla5	SLN06 - SLN05	94	44,6	103,79
TOTAL RECORRIDO			1086,1 (m)	

Cuadro 4.3: Resumen de archivos capturados: trayecto, número de trazas y distancias recorridas a través de estos perfiles sobre el glaciar San Francisco.



Figura 4.7: Evacuación del glaciar San Francisco vía aérea

4.4. Radio Eco Sondaje en el Glaciar Echaurren Norte, Zona Central

Al término de las mediciones en el glaciar San Francisco la evacuación del personal y su equipamiento se realizó en forma aérea utilizando un helicóptero para realizar el desplazamiento hacia el glaciar Echaurren Norte.

Las mediciones de radio eco sondaje se efectuaron sobre las transectas descritas en la figura 4.8, cuyos trayectos al igual que en el glaciar San Francisco fueron georreferenciados utilizando dos receptores GPS's en modo cinemático. Por problemas de recepción de la señal GPS en la zona de estudio del glaciar Echaurren Norte, del total de las transectas donde se realizaron mediciones de espesor, fue posible realizar el procesamiento diferencial en solo tres de esos perfiles, los cuales están representados sobre la figura 4.8.

En esta zona se realizaron mediciones utilizando el mismo sistema de radar de impulso utilizado en el glaciar San Francisco. Estas mediciones se efectuaron a lo largo de tres perfiles longitudinales ubicados en el centro del glaciar, a elevaciones que cubren desde los 3400 m.s.n.m. a los 3800 m.s.n.m. Junto a esto se realizaron perfiles transversales y oblicuos como son descritos en la figura 4.8.

El total del recorrido realizado es representado por las líneas de color azul sobre la figura 4.8. A partir de la información capturada por el sistema de radar fue posible obtener el espesor del hielo a lo largo de cada uno de los perfiles, caracterizando de esta forma el fondo subglaciar que en complemento con la topografía superficial permite obtener un modelo del sector en estudio.

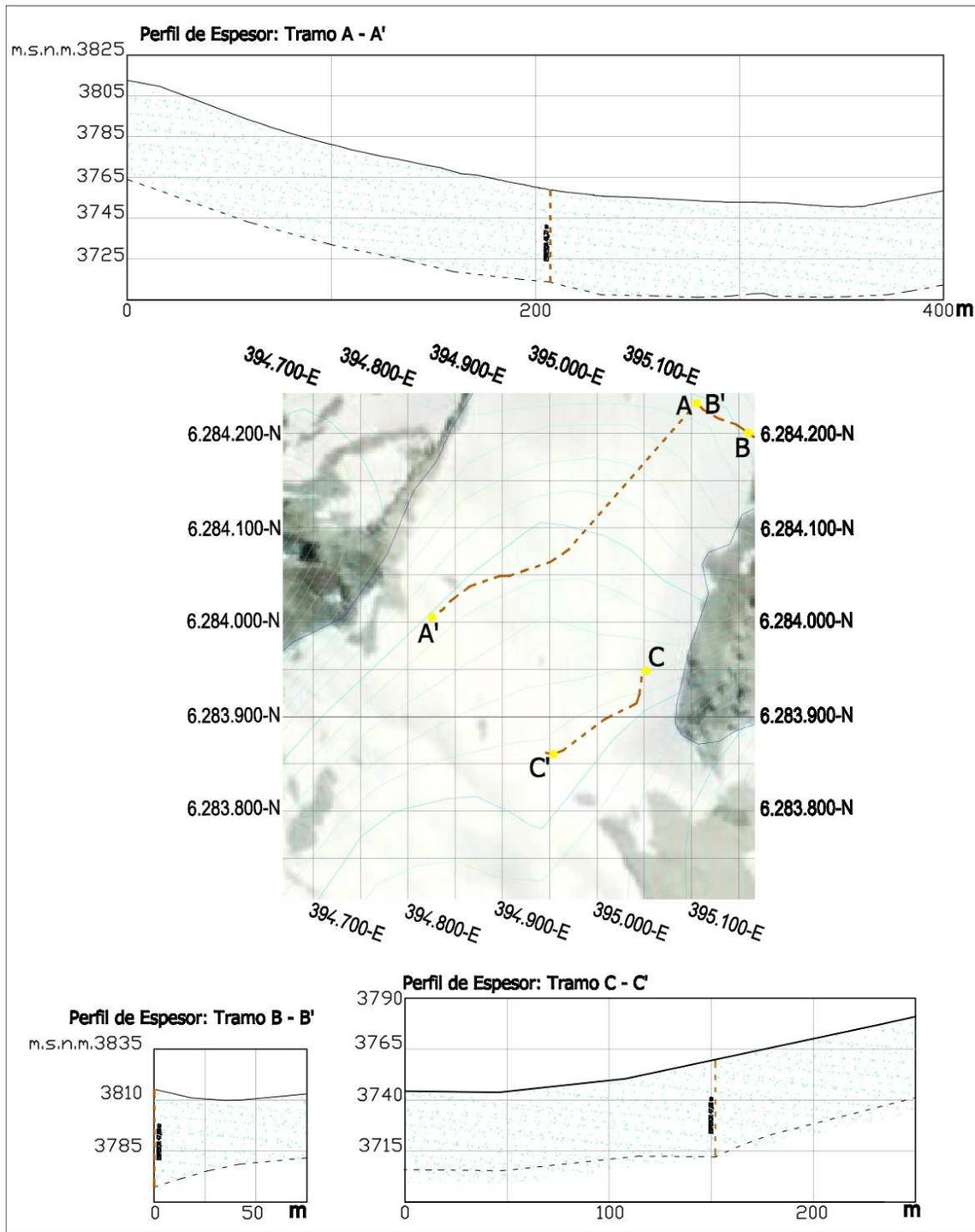


Figura 4.8: Perfiles del glaciar Echaurren Norte, obtenidos mediante radio eco sondaje.



Figura 4.9: Disposición del equipo de radio eco sondaje sobre la superficie del glaciar Echaurren Norte junto a la antena móvil del GPS, para comenzar a realizar las mediciones

Estación	Este	Norte	Altitud GPS diferencial (m.s.n.m.)
E1	394916,92	6284138,27	3777,42
E2	395105,68	6284232,19	3814,78
E3	395183,12	6284172,61	3815,89
E4	395137,0	6284134,1	
E5	394825,16	6284004,88	3753,17
E6	394864,54	6283988,21	3740,39
E7	395051,18	6283948,59	3742,06
E8	394953,65	6283860,73	3716,83
E9	394699,88	628386,18	3765,37
E10	394786,6	6283755,1	
E11	394630,6	6283715,3	
CBASE	394941,8	6283890,3	Campamento Base Echaurren

Cuadro 4.4: Ubicación geográfica de las estaciones sobre el glaciar Echaurren Norte en UTM y altitudes obtenidas mediante el método diferencial. En algunas estaciones por pérdida de señal no se realizó el procesamiento diferencial.

Archivos	Trayecto Inicio - Término	Número de trazas	Distancia Recorrida (m)	Profundidad promedio (m)
AE1A	E7 - E1	232	201,8	45,27
AE1B	E7-E1	99	51,9	38,45
AE2A	E3 - E2	98	96,4	30,72
AE3A	E1 - E3	272	257,1	37,02
AE3B	E1 - E3	56	36,3	30,58
AE4E	E7 - E4	197	211,9	45,45
AE4F	E7 - E4	24	31,9	45,48
AE4G				
AE5A	E2- E5	298	381,4	47,68
AE7A	CB - E7	206	200,7	38,99
AE7E				
AE7F				
AE8A	E5 - E8	98	161,1	35,8
AE9A	E10 - E9	25	19,4	38,85
AE9B	E10 - E9	141	133,8	40,55
AE9E				
AE9G				
AE10A	E11 - E10	157	273,6	40,55
AE10B				
AE11A	E5 - E11	498	459,3	45,13
CBEZE5A				
TOTAL RECORRIDO				560,52 (m)

Cuadro 4.5: Resumen de los archivos de radar capturados, trayecto, número de trazas y distancias recorridas a través de los perfiles obtenidos sobre el glaciar Echaurren Norte.

4.5. Radio Eco Sondaje sobre las estaciones (balizas) instaladas en el Glaciar Tyndall, Campo de Hielo Sur (CHS)

Los trabajos efectuados sobre el glaciar Tyndall se concentraron al igual que el año 2008 en su zona de ablación. En esta oportunidad se realizaron dos campañas de terreno, la primera en el mes de Noviembre de 2009 y la segunda en Diciembre de 2009. En la primera campaña se realizaron mediciones de espesor del hielo mediante las técnicas de radio eco sondaje junto a la búsqueda de las balizas instaladas el año 2008. En esta oportunidad sólo se encontró una de ellas, correspondiente a la baliza B01, que fue instalada aproximadamente a 400 m del borde glaciar. Luego se ubicó sobre el glaciar el lugar geográfico aproximado del lugar donde se instalaron las balizas inicialmente, para luego mediante radio eco sondaje determinar el espesor del glaciar bajo cada uno de estos puntos geográficos, obteniendo el perfil del glaciar, representado en la figura 4.11.

El objetivo de las estaciones (balizas), junto con determinar un perfil transversal de la profundidad del glaciar en la zona de ablación, es poder establecer estaciones de control para estimar la velocidad, dirección del flujo superficial y el estado del balance de masa del glaciar en esta área, a través de la remediación de las balizas en diferentes épocas del año por medio del uso de sistemas GPS's.

En la segunda campaña realizada en el mes de Diciembre de 2009 se lograron ubicar 4 balizas del año 2008, correspondientes a las balizas B03, B04, B05 y B06, cuyas nuevas posiciones fueron georreferenciadas (ver tabla 4.8). Luego se pudo determinar la tasa de ablación anual en la zona, obteniéndose un promedio de 8,36 m/año. Finalmente las balizas encontradas se reinstalaron nuevamente en el interior del hielo glaciar y se georreferenciaron en coordenadas geográficas expresadas en UTM⁴ cuyas posiciones se muestran sobre el cuadro 4.8, para luego continuar el estudio en una futura campaña.

Las balizas corresponden físicamente a tubos de plástico tipo Valco, de 12 m de largo y en cuyo interior se instaló un tubo de acero que actúa como contrapeso. Cada baliza fue instalada en el interior del hielo glaciar mediante el uso de una sonda o taladro a vapor, compuesto de un estanque de aluminio, una manguera diseñada para alta presión y una punta de lanza. En el interior del estanque la presión es aumentada mediante un quemador el cual eleva la temperatura del agua hasta convertirla en vapor, luego el vapor es canalizado a través de la manguera en cuya punta de lanza irriga el vapor a alta presión hacia el exterior, permitiendo de esta manera perforar el hielo para después introducir la baliza a una profundidad de 10 metros.

⁴Proyección Universal Transversal de Mercator

Balizas	Fecha D/M/A	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Espesor (m)
B01	25/10/2008	618566,837	4334747,881	539	126,9
B02	25/10/2008	618319,207	4334479,015	580,356	265,1
B03	25/10/2008	617926,558	4334351,400	592,925	398,2
B04	25/10/2008	617530,309	4334175,926	597,439	487,5
B05	25/10/2008	617163,802	4333963,419	597	524,6
B06	25/10/2008	617163,802	4333788,993	601	548,2
B07	25/10/2008	616332,091	4333489,183	605	
B08	25/10/2008	615997,314	4333181,100	594,5	

Cuadro 4.6: Posición de las balizas instaladas el año 2008 en UTM, cota de superficie y espesor del hielo en cada punto.

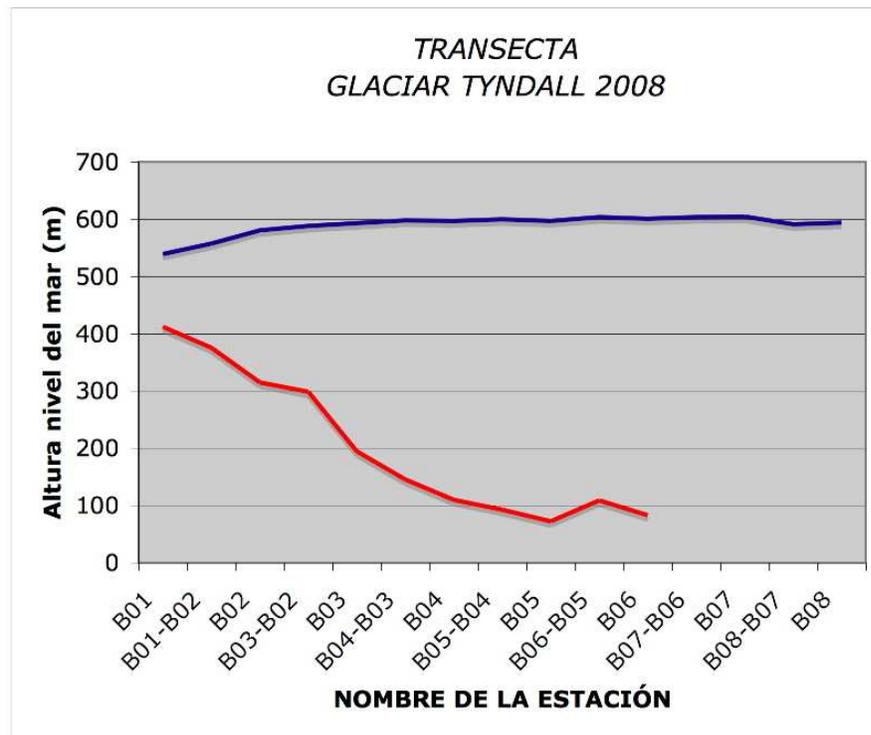


Figura 4.10: Topografía superficial y subglaciar de la transecta ubicada sobre la zona de ablación del glaciar Tyndall del año 2008, obtenido por medio de radio eco sondaje de acuerdo a la tabla 4.6.

Balizas	Fecha M/D/A	Este (m)	Norte (m)	Cota (m)	Espesor (m)
B01'	11/11/2009	618472,0	4334632,1	536	94,73
B02'	11/11/2009	618298,9	4334490,5	534	199,5
B03'	11/11/2009	618117,2	4334412,2	531	298,6
B04'	11/11/2009	617751,3	4334207,4	544	433,5
B05'	11/11/2009	617350,1	4333931,0	521,2	550

Cuadro 4.7: Posición inicial geográfica aproximada de cada baliza en UTM instalada el 2008, cota de superficie y espesor del hielo en cada punto

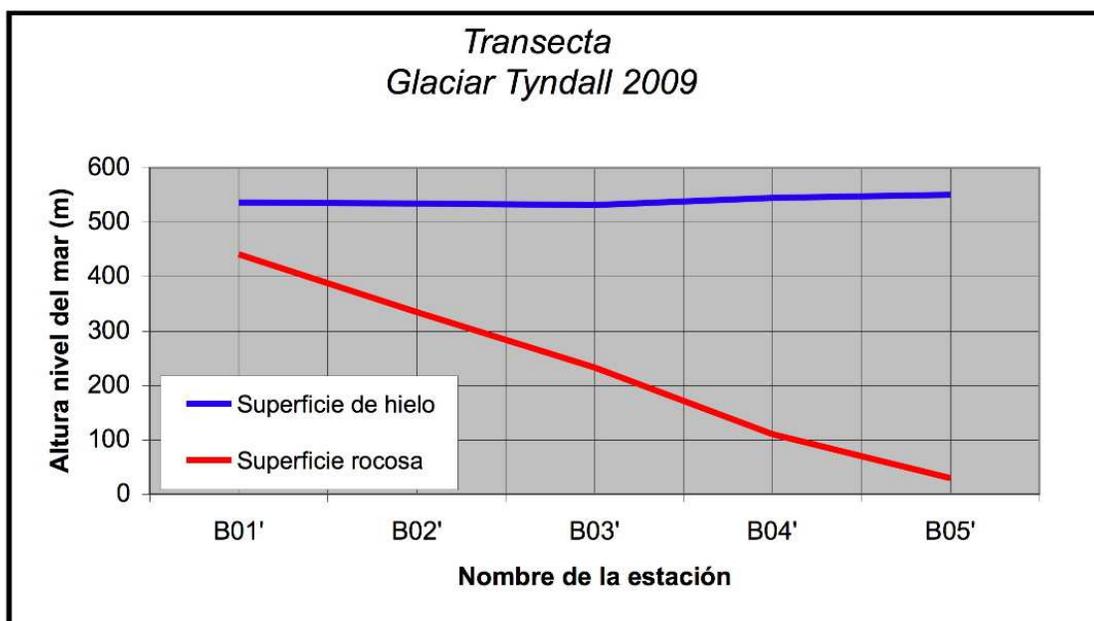


Figura 4.11: Topografía superficial y subglaciar de la transecta ubicada sobre la zona de ablación del glaciar Tyndall obtenida en la primera campaña del 2009 por medio de radio eco sondaje de acuerdo a la tabla 4.7

Baliza	Posición baliza 2008		Posición baliza 2009		Distancia recorrida (Baliza)(m)
	UTM Norte	UTM Este	UTM Norte	UTM Este	
B01	4334747,9	618566,9			
B02	4334479,1	618319,1			
B03	4334350,9	617925,9	4334412,2	618117,2	200,88
B04	4334176,0	617530,0	4334207,4	617751,3	223,52
B05	4333963,9	617163,9	4333931,0	617350,1	189,08
B06	4333788,8	616732,6	4333734,6	617035,3	307,51
B07	4333489,9	616332,9			
B08	4333181,0	615996,9			

Cuadro 4.8: Posición de las balizas (UTM) instaladas el año 2008 y las balizas encontradas el año 2009 , junto a la distancia recorrida por cada una de ellas, en un periodo de 380 días y sobre la zona de ablación del glaciar Tyndall.

Baliza	Velocidad (m/día)	Dirección del flujo glaciar	2008	2009	Tasa ablación (m/año)
			Altura baliza(m)	Altura baliza(m)	
B01					
B02			0,54		
B03	0,528	Este	0,52	8,50	7,98
B04	0,588	Este	0,54	7,30	6,76
B05	0,497	Este - Sureste	0,52	8,80	8,28
B06	0,8	Este - Sureste	0,50	8,90	8,40
B07			0,59		
B08			0,47		
			Ablación anual		8,36 m

Cuadro 4.9: Velocidad y dirección del flujo glaciar, junto a la tasa de ablación anual en la zona de ablación del glaciar Tyndall, obtenida en un periodo de 380 días.

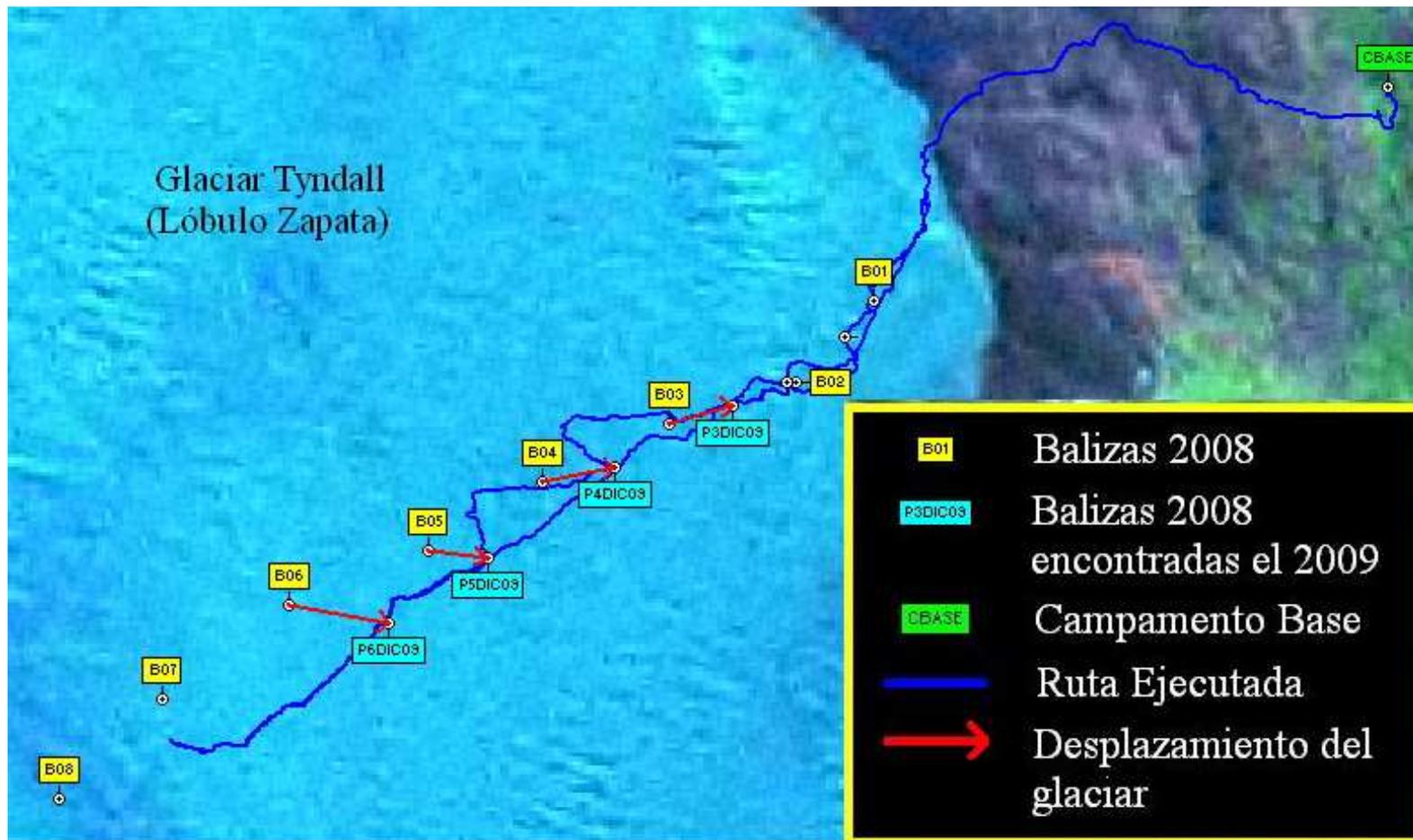


Figura 4.12: Movimiento de las balizas instaladas durante el periodo 2008 - 2009, sobre el glaciar Tyndall

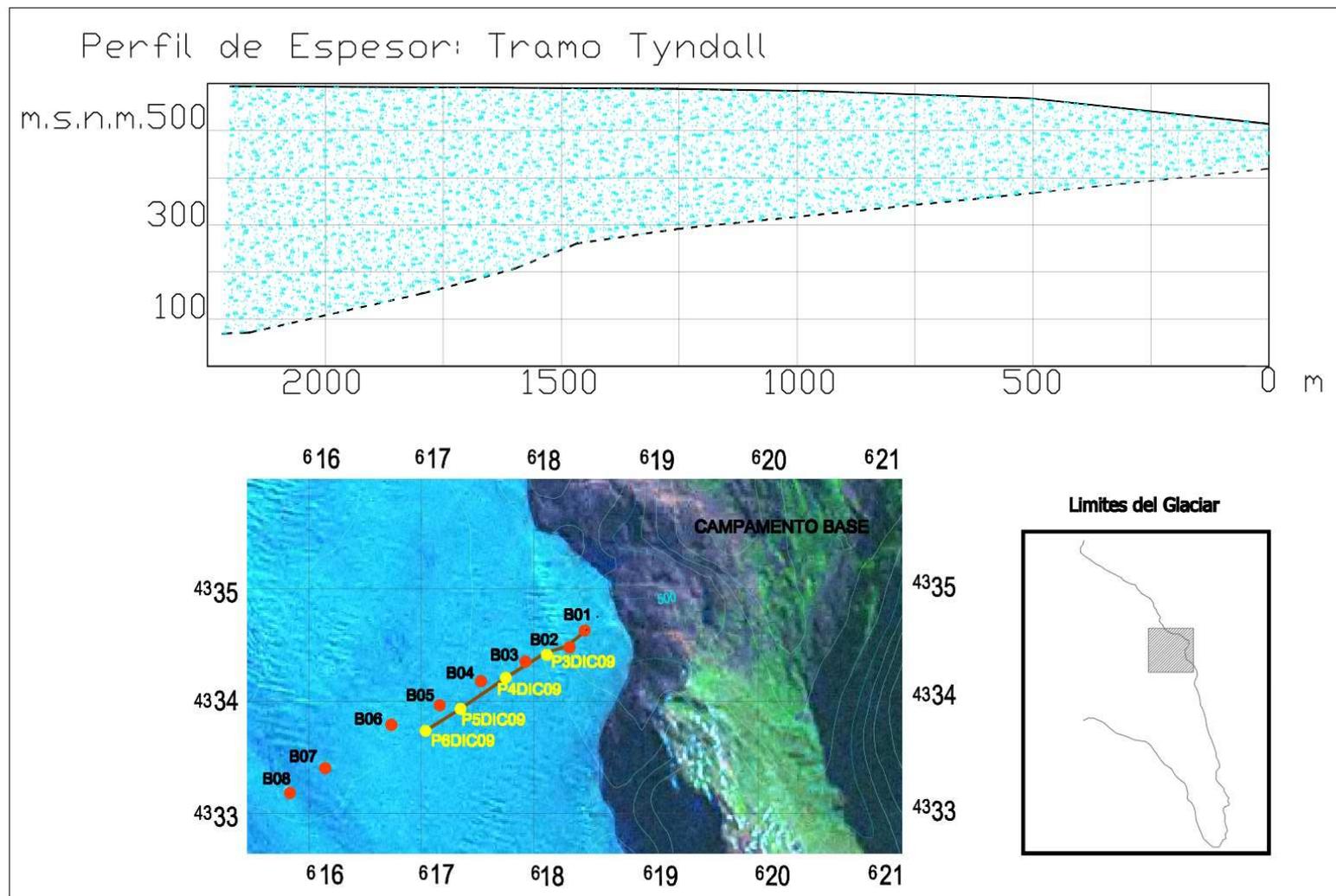


Figura 4.13: Perfil de espesor sobre la zona de ablación del glaciar Tyndall

Capítulo 5

GPS - GEORREFERENCIACIÓN

5.1. Descripción del método GPS de georreferenciación

El Sistema Global de Posicionamiento (GPS) es un sistema de radio navegación, desarrollado por los Estados Unidos. El servicio de posicionamiento estándar - SPS (Standard Positioning Service) facilita las señales de uso civil 24 horas por día, en cualquier lugar del planeta, posibilitando la obtención continua de tiempo (fecha/hora) y coordenadas (latitud, longitud y altura) con alta precisión. Mientras que el GPS al principio fue para fines de navegación militar, ahora predominan múltiples aplicaciones civiles, tales como: navegación, geodésia, topografía, conversión de hora con precisión, entre otros.

Durante las campañas de terreno a los glaciares San Francisco, Echaurren Norte y Tyndall se utilizaron georeceptores GPS's geodésicos y navegadores.

Las estaciones base fueron ligadas con los vértices de referencia de la Red Geodésica Nacional (RGN-Chile) e Internacional (Vértices del International GPS Service - IGS). Para ello se utilizó el punto SANT para los glaciares San Francisco y Echaurren Norte y RIO2 para los puntos medidos en glaciar Tyndall

Los trabajos geodésicos de medición de flujo glaciar, topografía superficial, georreferenciación de los perfiles de radar, fueron realizados con equipos GPS's geodésicos de frecuencia L1, logrando precisiones de algunos centímetros(ver cuadro 5.1).

Como en anteriores proyectos desarrollados en Campo de Hielo Sur, durante las campañas de terreno en los glaciares San Francisco, Echaurren Norte y Tyndall se aplicó el método de operación “**cinemático**” para el enlace geodésico del campamento base, y el método “**Stop & Go**” para georreferenciar todas las estaciones de radar sobre el glaciar. Mientras que en modo “**cinemático**” los receptores GPS's van rastreando satélites en forma continua a medida que se desplazan entre estaciones, por ejemplo para los perfiles de radar y recorridos para topografía superficial, en modo “**Stop & Go**” , en cada estación se debe dar un comando al geo-receptor para indicar el inicio y término de la detención. Este método se

utilizó para cada medición puntual del radar en forma estática.

Marca	Modelo	Tipo	Precisión	Característica	Cantidad	Propietario
Novatel	Smart Antenna	Geodésico	1 cm + 1 ppm	Frecuencia L1	3	UMAG
Garmin	Colorado	Navegador	3 m	Código C/A	1	UMAG
Garmin	Etrex	Navegador	5 m	Código C/A	1	UMAG
Garmin	Emap	Navegador	8 m	Código C/A	1	Particular
Garmin	otros	Navegador		Código C/A	1	Particular

Cuadro 5.1: Georeceptores GPS utilizados.

5.2. Georreferenciación de datos de las campañas de terreno

Durante la ejecución de la etapa de terreno en los glaciares San Francisco, Echaurren Norte y Tyndall, el GPS ha constituido una herramienta esencial para georreferenciar en forma continua, en tiempo real y post-proceso, todas las actividades y capturas de datos en terreno. La totalidad de los recorridos registrados con GPS se encuentran indicados como trayectos georreferenciados en el Anexo D y sobre las cartas de cada zona en el Anexo E.

Todos los datos GPS recolectados, en terreno fueron transferidos a un computador PC y procesados en gabinete con software especializado.

Dependiendo de las diferentes aplicaciones se proyectaron las siguientes precisiones para el posicionamiento con GPS:

- Enlace a la Red Geodésica Nacional : precisión geodésica (centimétrica)
- Radar estático y velocidad del hielo : precisión geodésica (centimétrica)
- Perfiles de Radar : precisión topográfica (centi- a decimétrica)
- Topografía superficial : precisión topográfica (centi- a decimétrica)
- Replanteo de puntos planificados : precisión de navegación (varios metros)

5.2.1. Instrumental

Durante las campañas de terreno, se emplearon tres georeceptores GPS geodésicos de frecuencia simple marca Novatel Smart-Antenna. Estos equipos poseen características de “Alta precisión” en “L1”. Para fines de navegación y replanteo, se trabajó con varios equipos GPS’s navegadores (ver cuadro 5.1).

5.2.2. Metodología y configuración en la recolección de datos

Para realizar la georreferenciación se utilizaron dos receptores geodésicos utilizados en forma diferencial, estableciendo una estación de referencia fija y otra móvil. En el glaciar Echaurren Norte y San Francisco la estación fija se instaló sobre la superficie glaciar, y en el glaciar Tyndall sobre una roca cercana al campamento base. Los equipos georeceptores móviles fueron utilizados en forma “estática” para el enlace a la red geodésica de referencia.

Para la georreferenciación de los trabajos de topografía superficial y mediciones mediante el sistema de radar, se utilizaron hasta dos georeceptores geodésicos los cuales fueron montados sobre jalones Porta-prismas. De esta forma prácticamente todos los recorridos y cada una de las mediciones de radar fueron registrados y monitoreados en modo “cinemático”, siendo utilizados como antecedentes para la modelación de la topografía en el área de estudio (Anexo E). En algunas mediciones se aplicó el método “Stop & Go”.

La frecuencia de grabación de los datos satelitales GPS fue de 1 segundo, tanto para mediciones de tipo “cinemático” “Stop & Go”, como también para el modo “estático”.

En las presentes campañas de terreno, debido a las dificultades de acceso a otros vértices de la RGN, se ocupó para la ligazón a la RED SIRGAS (Sistema Internacional de Referencia Geocéntrica para las Américas), estaciones del IGS (SANT - RIO2) , cuyos datos están disponibles vía Internet, (<http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/dbDataBySite.cgi>).

Los receptores GPS de navegación fueron utilizados para la localización y replanteo de los vértices de medición programados previamente, además sirvieron de respaldo para la georreferenciación de las actividades, en caso de algún problema de energía o de contacto de los receptores geodésicos.

5.3. Sistemas de coordenadas

Actualmente en Chile el **Instituto Geográfico Militar, IGM** edita su Cartografía en el Datum geodésico SIRGAS. Para fines prácticos el SIRGAS puede ser considerado equivalente al conocido sistema WGS-84 y fue considerada como marco de referencia geodésica del presente proyecto.

Para todos los procesamientos de datos y las representaciones gráficas de los resultados, se utilizaron los parámetros del Sistema Geodésico Global WGS-84 y la proyección Universal Transversal de Mercator (UTM). En los sectores Echaurren Norte y San Francisco se aplicó el Huso 19, con el meridiano central de 69° Oeste y, en el sector Tyndall corresponde el Huso 18 con el meridiano central de 75° Oeste respectivamente.

5.4. Procesamiento de datos

Diariamente, los datos recolectados con los receptores GPS, fueron traspasados a un computador PC-Notebook y, para mayor seguridad se respaldaron en los discos duros de un segundo computador. Con fines de validación y revisión de los datos, en períodos de mal tiempo se realizó un pre-procesamiento en terreno. El procesamiento definitivo de todas las observaciones satelitales GPS se efectuó posteriormente en gabinete con un computador PC-Desktop tipo Pentium IV utilizando el software **GrafNav/GrafNet®**, Vers. 7.0, de Waypoint Consulting Inc.

Las fases del procesamiento de los datos GPS se caracterizan por la siguiente secuencia:

1. Colección de datos en terreno, y traspaso a computador con software **GrafNav®**.
2. Conversión de datos originales (*.txt y *.log) a formato intermedio. Mediante el programa **GrafNav®** se generan 3 archivos (*.sta, *.gpb, *.epp) por cada archivo original o por cada estación ocupada dependiendo de la opción de conversión seleccionada.

Mientras que las observaciones del modo “estático”, “cinemático” y “Stop & Go” fueron procesadas con el programa **GrafNav®**, adicionalmente las mediciones efectuadas en modo “estático” fueron procesadas con **GrafNet®** y, además convertidas con el mismo programa al formato RINEX ¹. Se generaron dos archivos por cada estación (*.08O y *.08N). Los archivos RINEX *.08O contienen los antecedentes de las estaciones levantadas, como su nombre, altura de antena, modo de operación, coordenadas aproximadas y los parámetros observados (observables satelitales), mientras los archivos *.08N contienen la información de navegación para cada uno de los satélites GPS, es decir sus parámetros orbitales actuales (efemérides). Finalmente los archivos RINEX, generados por cada estación fija fueron procesados con el sistema **GrafNav/GrafNet®**, Vers.7.0 para comprobar las coordenadas finales en datum geodésico WGS-84, con cotas elipsoidales y ortométricas (m.s.n.m.), considerando el modelo geoidal EGM96.

¹Receiver Independent Exchange Format

5.5. Velocidad superficial del hielo en el glaciar Echaurren Norte y San Francisco

De acuerdo a los cálculos de enlace con la estación perteneciente a la red “SIRGAS” (SANT, ubicada en Peldehue, Región Metropolitana) en gabinete se determinaron dos posiciones distintas para el vértice de referencia en el Campamento Base ubicado sobre cada uno de los glaciares.

El lugar donde se estableció el campamento tanto sobre el glaciar Echaurren Norte como en el San Francisco presenta pendientes superficiales suaves, por lo que se esperaba que las velocidades fueran del orden de pocos centímetros a pocos decímetros por día [20].

El cuadro 5.2 indica las magnitudes de velocidad superficial alcanzada en la zona estudiada del glaciar Echaurren Norte y San Francisco, donde su magnitud varía en centímetros.

Vertice	VE (cm/día)	VN (cm/día)	VZ (cm/día)	Desplazamiento (cm/día)
Base Echaurren Norte	24,20	11,50	-20,7	26,79
Base San Francisco	1,00	-12,60	2,5	12,63

Cuadro 5.2: Desplazamiento diario del flujo glaciar de la estación base instalada sobre el glaciar Echaurren Norte y San Francisco. (VE: Velocidad en dirección Este, VN: Velocidad en dirección Norte, VZ :Velocidad del eje de elevación)

5.6. Precisión de datos GPS

Las líneas base² medidas y procesadas durante el presente estudio, arrojaron generalmente precisiones del orden de unos pocos centímetros en sus componentes planimétricos y altimétricos respectivamente. También el procesamiento de los datos registrados en modo “Stop & go” indica precisiones de algunos centímetros.

²Vectores generados entre cada punto

5.7. Presentación de los resultados

En total se generaron mediante el uso de GPS's geodésicos en modo estático, “**Stop & go**” y “**cinemático**”, más de 25 archivos GPS con un total superior a 185 MB de observaciones satelitales. La distribución espacial de las estaciones y de los recorridos en forma cinemática, se puede visualizar en el Anexo D. Las coordenadas y el desplazamiento de los vértices de velocidad en hielo se indican en el cuadro 5.2.

Las posiciones GPS de las estaciones y de todos los recorridos conforman la base de datos para el modelo de topografía superficial representada en la respectiva carta. Asimismo la georreferenciación de todas las mediciones de Radar de espesor del Hielo permite generar los perfiles y modelos topográficos subglaciales en las cartas respectivas.

Capítulo 6

GENERACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GLACIAR

A partir de la recopilación de información de los glaciares Echaurren Norte, San Francisco y Tyndall, se generó la cartografía correspondiente a la topografía superficial y subglacial, sobre la base del procesamiento de datos GPS y Radar, en complemento con la cartografía proporcionada por el Instituto Geográfico Militar (IGM) e imágenes satelitales SRTM.

6.1. Proyección, datum y escalas

6.1.1. Proyección universal (UTM)

La proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) es una proyección muy utilizada para la representación en mapas de la superficie terrestre tomando como base la proyección Gauss-Kruger.

Con el objetivo de evitar excesivos errores de escala o deformaciones en los bordes de cada huso, como consecuencia que la proyección UTM no es equidistante en el meridiano central, sino que aplica un factor de escala (K_0) de 0,9996.

Para que los valores numéricos de las coordenadas en cualquier cuadrante sean siempre positivos y aumenten en las direcciones Este y Norte, se considera como origen de cada sistema de coordenadas planas el Ecuador y el Meridiano Central, y se les asigna los valores Falso Este (FE) de 500.000 m y Falso Norte (FN) de 0 m para el hemisferio Norte y 10.000.000 m para el hemisferio Sur. La cuadrícula ortogonal UTM está formada por las paralelas a las proyecciones del Ecuador y del meridiano Central (MC).

El sistema (UTM), divide la Tierra entre las latitudes 84° Norte y 80° Sur en 60 husos de 6° de ancho en longitud. El meridiano de Greenwich, o meridiano 0, es el límite entre las

zonas 30 y 31. El caso de Chile continental, por su ubicación geográfica, se encuentra en los husos 18 (meridiano central de longitud -75°) y 19 (meridiano central de longitud -69°).

6.1.2. Escala

En tanto la escala en cada cartografía se basó de acuerdo a la cantidad de información recopilada en cada una de las zonas de interés, por lo tanto:

- Escala 1 : 1.500 Glaciar Echaurren Norte.
- Escala 1 : 2500 Glaciar San Francisco.
- Escala 1 : 50.000 Glaciar Tyndall

6.2. Visualización de puntos

La visualización de los puntos determinados en terreno, se realizó mediante el software “**Autocadland 2004®**”, que permite importar ficheros en formato ASCII, los cuales contienen las coordenadas y cotas respectivas de cada punto.

La información generada fue mediante puntos medidos en campañas de octubre y noviembre de 2009.

6.3. Superficie y Perfiles de Terreno

6.3.1. Generación de un TIN

Una de las variables más importantes de Autocadland es sin duda, la posibilidad de generar superficies de terreno. En el caso del Glaciar Echaurren, San Francisco y Tyndall generados a partir de los puntos que fueron importados.

Se optó por utilizar el método **TIN**¹ para calcular el Modelo Digital del Terreno, y realizar una digitalización en detalle en las zonas de trabajo. El método de TIN genera una red irregular de triángulos, a partir de los puntos de muestreo.

¹Triangulated Irregular Network

El proceso completo de generación de un TIN es el siguiente:

1. Generación del diagrama de Voronoi: Se genera un número de polígonos proporcional al número de puntos medidos.
2. Triangulación de Delaunay: A partir de las mediatrices de los lados que definen los polígonos de Voronoi, se trazan semirrectas que unen los puntos muestrales, obteniendo una triangulación.

Las condiciones necesarias para que un TIN sea representativo de la topografía son:

- El número de triángulos ha de ser máximo
 - El área de los triángulos ha de ser mínima
 - Los triángulos han de ser lo más equiláteros posible
3. A partir de la red obtenida por interpolación, la altitud de un punto Z_i en coordenadas (X_i, Y_i) dentro de un triángulo definido por sus vértices $(X_a, Y_a, Z_a; X_b, Y_b, Z_b; X_c, Y_c, Z_c)$ se calcula estableciendo la siguiente ecuación 6.1

$$Z_1 = AY_1 + BX_1 + C \quad , \quad (6.1)$$

A, B y C son valores definidos por las coordenadas de los vértices del triángulo. Este método supone que la altura varía linealmente dentro del triángulo.

4. Una vez obtenida la triangulación, se generó el Modelo Digital del Terreno, proyectando los vértices del TIN sobre una malla de paso M y N, inferior al área media de los triángulos dada por Land Desktop.

Para mejorar la proyección de las cotas de los vértices de los triángulos sobre una malla cuadrada, dado que la muestra de puntos fuente es una matriz rectangular con paso de malla constante, se ha optado por corregir esa redundancia de posiciones mediante un giro y una traslación del origen de la malla final. De esta manera, evitamos que coincidan los vértices de la malla con los de los triángulos.

6.3.2. Perfiles de Terreno (Topografía Superficial y Subglaciar)

A partir de los modelos de terreno superficial y subglaciar (TIN), generados de los recorridos GPS y RADAR en las diferentes campañas, los perfiles de terreno son una clara fuente de visualización del espesor de hielo calculado. Estos perfiles fueron creados mediante el software Autocadland®, el cual provee, a partir de una muestra de puntos, ya sean regular o irregularmente distribuidos, la estimación del perfil de terreno. Los productos obtenidos por medio de las técnicas antes descritas están contenidos en el ANEXO E.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

En esta acción de apoyo se desarrollaron tres campañas científicas orientadas a determinar espesores de hielo, velocidad y dirección del flujo de hielo sobre tres glaciares específicos, el glaciar Echaurren Norte y el San Francisco ubicados en la cuenca del río Maipo, región Metropolitana, y un tercer glaciar correspondiente al glaciar Tyndall ubicado en el Campo de Hielo Sur, región de Magallanes.

Sobre estos tres glaciares se realizaron mediciones utilizando un sistema de radar con el objetivo de obtener las topografías subglaciares de cada uno de ellos en complemento con equipos de georreferenciación que permiten de igual forma determinar la topografía superficial por cada medición realizada. El funcionamiento de los equipos GPS's como así también el de radar resultaron satisfactorios, permitiendo obtener características importantes de las tres zonas englaciadas.

El sistema de radar de impulso permitió obtener información del fondo rocoso del glaciar utilizando antenas de 5 y 8 metros de largo, las que fueron transportadas sobre cañas de fibra de vidrio adheridas a crochet facilitando de gran forma el desplazamiento del sistema en general sobre la cubierta glaciar. El rango del sistema de radar permitió sin problemas determinar el espesor del glaciar en cada punto donde se realizaron las mediciones.

La captura de información fue satisfactoria, sin embargo por problemas de hardware la señal no fue capturada en forma continua en el caso del glaciar Echaurren Norte y Tyndall, obteniendo mediciones puntuales para ambos casos. Sobre el glaciar San Francisco fue posible obtener perfiles continuos de la zona.

En el área de estudios del glaciar San Francisco se estimaron valores de espesor de su masa glaciar que oscilan entre los 58 m y los 120 m de profundidad. La distancia recorrida se estimó en 1.086,1 m. En referencia al glaciar Echaurren Norte se estimaron espesores de su masa glaciar entre los 46 m y los 89 m.

El resultado del procesamiento de datos GPS indica que las magnitudes de la velocidad del flujo glaciar alcanza aproximadamente a 26,79 cm/día en el caso del glaciar Echaurren

Norte y a 12,63 cm/día para el glaciar San Francisco . Las líneas base medidas y procesadas durante el presente estudio, arrojaron generalmente precisiones del orden centimétrico en sus componentes planimétricos y altimétricos respectivamente como también el procesamiento de los datos registrados en modo “**Stop & Go**”.

Las mediciones realizadas sobre el glaciar Tyndall mediante GPS y Radar permitieron establecer nuevamente la topografía superficial y subglaciar en la transecta trazada el 2008. Se obtuvieron registros que indican claramente retornos del fondo rocoso. Los resultados obtenidos oscilan entre los 94,73 metros y 550 metros cuyo máximo espesor fue obtenido sobre la baliza B5. De igual forma se encontraron las balizas instaladas el 2008 procediendo a georeferenciarlas nuevamente cuyo resultado muestra una tendencia al desplazamiento en dirección Este-Sureste con un movimiento promedio de 214 m anuales.

Para el estudio de la dinámica en el sector de ablación del glaciar Tyndall se instalaron el 2008 ocho balizas sobre una transecta de 3,2 Km de longitud con el objetivo de estimar la velocidad de desplazamiento, dirección del movimiento superficial y determinar el estado del balance de masa del área glaciar en estudio. Cada baliza fue instalada en el interior del hielo glaciar y georeferenciada para el monitoreo con respecto a la altura y posición de cada una de ellas en diferentes expediciones en un periodo determinado. En este contexto por medio de la remediación de la altura de las balizas sobre el glaciar, se determinó una tasa de ablación anual (en un periodo de 380 días) correspondiente a 8,36 m y velocidades que oscilan entre 49 y 80 cm/día. Se aprecia una tendencia del flujo glaciar en dirección Este - Sureste con un aumento de su velocidad en dirección al centro del glaciar en referencia a la zona de ablación del glaciar Tyndall.

En términos generales el uso del sistema de radar y equipos GPS's cumplieron con los rangos y precisiones esperadas. Por otra parte la versatilidad demostrada por el sistema para obtener información sobre glaciares de pequeña envergadura establecen el sistema utilizado como una herramienta eficiente para lograr los objetivos trazados. En el caso de glaciares pequeños (aproximadamente $0,12 \text{ km}^2$) los tiempos para realizar las mediciones sobre su superficie son cortos, por ello campañas de 4 a 5 días son suficientes aún cuando dependiendo de las condiciones meteorológicas este periodo podría aumentar.

La posibilidad de caracterizar de mejor forma glaciares de pequeña envergadura utilizando radio eco sondaje superficial, es posible abarcando mayor superficie, lo que es factible de realizar mediante el sistema de radar utilizado en este estudio, sin embargo el caso de glaciares de gran envergadura como es el caso del glaciar Tyndall, la información sólo podría ser obtenida mediante un sistema de radio eco sondaje aerotransportado.

Capítulo 8

RECOMENDACIONES

Los estudios realizados en las zonas descritas permiten conocer aún más la realidad glaciológica nacional, de otra forma, contar con mayor información en esta línea es indispensable y urgente. Nuestro país tiene la tercera masa glaciaria más grande del planeta, como lo es el Campo de hielo Patagónico, por ello es nuestra responsabilidad conocer aún más estas grandes masas glaciares.

En general es necesario establecer estudios glaciológicos mediante un programa de monitoreo o de otra forma continuar estudiando glaciares a lo largo del país, como los ya realizados. Esto permitirá concluir tendencias y/o relaciones en un contexto regional, nacional y global, asociado a los cambios climáticos.

Es indispensable contar con mayor información de la topografía superficial de las masas glaciares, esto a su vez ayudaría a establecer modelos más precisos de la topografía subglaciaria, por ello la posibilidad de incorporar altimetría láser es sugerida para futuros trabajos.

Bibliografía

- [1] ANALOG DEVICES CATALOG. (2006) Online unter: http://www.analog.com/en/prod/0,770_843_AD9858,00.html, Fecha de consulta 14.03.2006.
- [2] BAUMGARTNER, Albert; LIEBSCHNER, Hans-Jürgen. (1996): *Allgemeine Hydrologie*. Gebrüder Borntraeger, 694 p.
- [3] BOGORODSKY, V.V.; BENTLEY, C.R and GUDMANDSEN, P. E. (1985): *Radioglaciology*. D. Reidel Publishing Company, 272 p.
- [4] BYRON, Edde. (1993): *Radar, Principle, Technology, Applications*. PTR Prentice Hall, Inc., 717 p.
- [5] CÁRDENAS, Ramón. (2002) : *Trabajo de titulación: Uso de un sistema digital de radar, altimetría láser, video y fotografía a bordo de un avión para medir propiedades de glaciares* Universidad de Magallanes, 90 p
- [6] CASASSA, Gino; DAMM, Volkmar; EISENBURGER, Dieter; JENETT, Martin, CÁRDENAS, Carlos; ACUÑA, Cesar; RIVERA, Andrés and LANGE, Heiner. (2001) : *Estudios glaciológicos en patagonia y Chile central utilizando un sistema aerotransportado de radio eco sonda*je Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Cs, Nat. (Chile), Vol. 29:25-44.
- [7] CASASSA, Gino; RIVERA, Andrés, ANIYA, Masamu, and NARUSE, Renji. (2000): *Características glaciológicas del campo de Hielo Patagónico Sur* Anales del Instituto de la Patagónia, Serie Cs, Nat. (Chile), Vol. 28:5-22.
- [8] CASASSA, Gino. (1992): *Radio Echo sounding of Tyndall Glacier, southern Patagonia*, Bulletin of Glacier Research 10, 69-74.
- [9] CARVALLO, Rubén., (2003): *Informe Expedición Tyndall 2004, Estudios Glaciológicos en la Zona de Ablación del glaciar Tyndall, Parque Nacional Torres del Paine*.
- [10] *CUMBRE DE JOHANNESBURG (2002)*: press official notice, August 26 of 2002.
- [11] GONIT P., C. KULL., U. SCHOTTERER, M . SCHWIKOWSKI and H. W. GÄGGLER (2006): *Glacier mass balance reconstruction by sublimation induced enrichment of chemical species on Cerro Tapado (Chilean Andes)*, Clim Past, 2. 21-30.

- [12] DIRECCION GENERAL DE AGUAS. (2004): *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Serrano, 95 p.*
- [13] DIRECCION GENERAL DE AGUAS. (2004): *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Maipo, 2004, 195 p.*
- [14] DIRECCION GENERAL DE AGUAS. (2008): *Estimaciones de volúmenes de hielo mediante sistemas de radar para usos Glaciológicos en el Norte Chico y zona Central de Chile y mediciones Glaciológicas en el glaciar Tyndall, Campo de Hielo Sur, 2008, 94 p.*
- [15] ESCOBAR, Fernando; CASASSA, Gino y POZO, Verónica (1995): *Variaciones de un glaciar de montaña en los Andes de Chile Central en las últimas dos décadas.* Bull. Inst. fr. etudes andines, 24 (3):683-695.
- [16] GRAHAM M. (2005): *Understanding Millimetre FMCW Radars*, International Conference on Sensing and Technology.
- [17] HODGE, S.M. (1978): *USGS mono-pulse radar report, 9 pp*, unpublished.
- [18] KINGSLEY, Simon; QUEGAN, Shuan. (1992): *Understanding Radar Systems.* Mcgraw-Hill, 384 p.
- [19] KORZUN, V. (1978): *World water balance and water resources of the earth*, UNESCO, 663 p.
- [20] PATERSON, W.S.B. (1981): *The physics of glaciers.* Pergamon Press Ltd., 481 p.
- [21] PELLICCIOTTI, Francesca; HELBING, Jakob; RIVERA, Andrés; FAVIER, Vincent; CORRIPIO, Javier; ARAOS, José; SICART, Jean-Emmanuel; and CARENZO, Marco. (2008): *A study of the energy balance and melt regime on Juncal Norte Glacier, semi-arid Andes of central Chile, using melt models of different complexity*, Hydrological Processes, 22. 3980-3997.
- [22] PECOLICCIOTTI, Francesca; BROCK, Ben; STRASSER, Ulrich; BURLANDO, Paolo; FUNH, Martin and CORRIPIO, Javier. (2005): *An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: development and testing for Haut Glacier d’Arolla, Switzerland* J. Glaciology, 51 (175), 573-587.
- [23] RIVERA, Andrés; CASASSA, Gino; ACUÑA, Cesar y LANGE, Heiner (2000): *Variaciones recientes de glaciares en Chile.* Invest. Geogr., Chile, 34. 29 a 60.
- [24] TAKEUCHI, Yukari; NARUSE, Renji; SATOW, Kazuhide (1995): *Characteristics of heat balance and ablation on Moreno and Tyndall glaciers, Patagonia, in the summer 1993/94*, Bulletin of Glacier Research 13, 45-46
- [25] NARUSE, Renji; PEÑA, Humberto; ANIYA, Masamu and INOUE, Jiro (1987) : *Flow and surface structure of Tyndall Glacier, The Southern Patagonia Icefiels* Bulletin of Glacier Research 4, 133-140.
- [26] NOON, Davis Andrew. (1996): *thesis of the University of Queensland: Stepped-Frequency Radar Design and Signal Processing Enhances Ground Penetrating Radar Performance.* The University of Queensland, 180 p.

- [27] RAYMOND, Charles; NEUMAN, Thomas; RIGNOT, Eric; RIVERA, Andrés and CASASSA, Gino. (2000): *Retreat of Tyndall Galciers, Patagonia , Chile*, EOS Transactions, American geophysical Union 81(48): F427, H61g-02.
- [28] RIVERA, Andrés; CASASSA, Gino; ACUÑA, Cesar (2001): *Mediciones de espesor en glaciares de Chile centro-sur* ; Invest Geogr., Chile 2001, 35:67-100.
- [29] SERIES OF THE CENTRO DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS. (2000):*Proceeding of a meeting on the Patagonian icefields, held March 24-28*, 192 p.
- [30] WOLLNY, K. (2002); *Umweltgipfels in Johannesburg*. Press. www.trinkwasser.ch , 5.10.2006.
- [31] ZAHN, Markus (1991): *Electromagnetic Field Theory*. McGRAW-HILL book Company, 746 p.

ANEXOS

Anexo A

Grupo de trabajo

1. Campaña Zona Central, glaciares Echaurren Norte y San Francisco.

- Dr. Ing. Carlos Cárdenas Mansilla.
- MSc. Rubén Carvallo Barrientos.
- Apoyo logístico, Roberto Quiroz Palma.

2. Primera campaña de Hielo Sur, glaciar Tyndall

- Dr. Ing. Carlos Cárdenas Mansilla
- Ing. Erling Johnson Gavilán
- Ing. Juan Crisostomo Barria
- Apoyo logístico, Americo Mariangel Águila

3. Segunda campaña de Hielo Sur, glaciar Tyndall

- Dr. Ing. Carlos Cárdenas Mansilla
- Ing. Erling Johnson Gavilán
- Ing. Juan Crisóstomo Barría
- Apoyo logístico, Fernando Bravo Oyarzún

4. Trabajo de gabinete

- Dr. Ing. Carlos Cárdenas Mansilla
- MSc. Rubén Carvallo Barrientos
- Ing. Geodesta, Heiner Lange
- Ing. Geodesta, Jorge Hernández Inostroza
- Ing. Erling Johnson Gavilán
- Geógrafo Cristian Dodman Correa
- Ing. Juan Crisóstomo Barría

Anexo B

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES E INGRESO A LAS ZONAS DE ESTUDIO

Luego de analizar la accesibilidad y logística de cada una de las zona de estudio se establecieron los periodos necesarios de terreno para desarrollar las actividades de acuerdo a las objetivos trazados. Las fechas para realizar las campañas de terreno fueron fijadas de acuerdo al siguiente calendario: Campaña a los glaciares San Francisco y Echaurren Norte, entre el 11 y el 19 de Octubre de 2009; Primera campaña al glaciar al glaciar Tyndall entre el 08 y el 14 de Noviembre de 2009; y segunda campaña al glaciar Tyndall entre el 07 al 10 de Diciembre de 2009.

B.1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

B.1.1. Cronograma de actividades,Glaciares San Francisco y Echaurren Norte

- **11 Octubre 2009:** Traslado de los equipos y carga en general desde la bodega de acopio en Santiago hasta el lugar de acopio ubicado en el embalse El Yeso por vía terrestre. Traslado de los expedicionarios por vía aérea desde el Aeródromo Tobalaba hacia el embalse El Yeso. Traslado de los expedicionarios equipos y carga en general hacia la zona central del glaciar San Francisco. Establecimiento del campamento base 1 (CB1).
- **12 y 13 de Octubre 2009:** Realización de mediciones RES y Georreferenciación GPS en glaciar San Francisco.
- **14 Octubre 2009:** Realización de mediciones RES y Georreferenciación GPS. Termino de actividades en el glaciar San Francisco.

- **15 Octubre 2009:** Desarme del campamento base. Traslado de los expedicionarios, equipos y carga en general por vía aérea hacia el glaciar Echaurren Norte. Establecimiento del campamento base 2 (CB2).
- **16 y 17 de Octubre 2009:** Realización de mediciones RES y Georreferenciación GPS en glaciar Echaurren Norte.
- **18 Octubre 2009:** Realización de mediciones RES y Georreferenciación GPS. Termino de actividades en el glaciar Echaurren Norte.
- **19 Octubre 2009:** Desarme del campamento base. Traslado de los expedicionarios, equipos y carga en general hacia el lugar de acopio en el ambalse El Yeso, en donde fueron dejados los equipos y carga en general para ser transportada desde allí a la bodega de acopio en Santiago por vía terrestre. Los expedicionarios por su parte continúan viaje vía aérea hacia el Aeródromo Tobalaba y posteriormente son trasladados hacia la bodega mencionada.

B.1.2. Cronograma de actividades, Primera Campaña al Glaciar Tyndall

- **08 Noviembre 2009:** Viaje de los expedicionarios, equipos y carga en general por vía terrestre desde Punta Arenas hasta la administración (Guardería Grey) del Parque Nacional Torres del Paine. Se pernocta en la administración.
- **09 Noviembre 2009:** Los expedicionarios ingresan a pie cargando equipaje personal hasta el sector denominado cañadon Doña Rosa. Establecimiento del campamento base. Se organiza el campamento base y se realiza una exploración preliminar de la ruta al glaciar Tyndall. Se preparan los equipos de medición.
- **10 Noviembre 2009:** Realización de mediciones RES y Georreferenciación GPS.
- **11 Noviembre 2009:** Realización de mediciones RES y Georreferenciación GPS. Búsqueda y medición de balizas instaladas en campaña anterior.
- **12 Noviembre 2009:** Realización de mediciones RES y Georreferenciación GPS. Se intenta llegar al lugar donde son almacenadas las balizas para instalar nuevas sobre el glaciar, pero las condiciones climáticas no lo permiten.
- **13 Noviembre 2009:** Realización de mediciones RES y Georreferenciación GPS. Terminación de actividades en este glaciar
- **14 Noviembre 2009:** Desarme de campamento base. Salida de los expedicionarios a pie desde el cañadon Doña Rosa hacia la guardería Grey. Traslado de los expedicionarios hacia la ciudad de Punta Arenas

B.1.3. Cronograma de actividades, Segunda Campaña al Glaciar Tyndall

- **07 Diciembre 2009:** Viaje de los expedicionarios, equipos y carga en general por vía terrestre desde Punta Arenas hasta la administración (Guardería Grey) del Parque Nacional Torres del Paine. Entrada al cañadon Doña Rosa haciendo uso de caballos. Establecimiento del campamento base.
- **08 Diciembre 2009:** Búsqueda de Balizas instaladas el 2008 y georreferenciación mediante equipos GPS. Re-instalación de balizas sobre el glaciar.
- **09 Diciembre 2009:** Georreferenciación de balizas mediante equipos GPS. Termino de actividades en este glaciar.
- **10 Diciembre 2009:** Desarme de campamento base. Salida del cañadon Doña Rosa hacia guardería Grey por medio de la utilización de caballos. Traslado de los expedicionarios hacia la ciudad de Punta Arenas.

B.2. INGRESO A LAS ZONAS DE ESTUDIO

B.2.1. Ingreso a la zona del glaciar San Francisco

El acceso del grupo de expedicionarios se realizó en un Helicóptero Bell modelo 407 de la empresa Andes Helicópteros S.A. desde el aeródromo Tobalaba en la comuna de La Reina, Santiago. El helicóptero cuenta con capacidad para trasladar a 6 pasajeros más piloto y dispone de un amplio compartimiento de equipaje más un canastillo externo portaequipaje. El vuelo tuvo una duración estimada de 30 minutos entre el aerodromo Tobalaba y el embalse El Yeso. En esta ocasión se contó con un lugar de acopio para el equipamiento técnico en las cercanías del embalse El Yeso, hacia donde fueron transportados vía terrestre en una camioneta doble tracción 4x4 desde Santiago. En este lugar aterrizó el helicóptero que transportó al grupo científico para recoger los equipos y continuar viaje hacia el glaciar San Francisco, específicamente a la zona alta de este glaciar o Domo, lugar donde fueron realizadas las actividades presupuestadas. Al llegar a la superficie del glaciar se procedió a establecer el campamento base contemplándose la utilización de carpas y equipos de terreno para pernoctar y desarrollar todas las actividades de preparación y posteriores mediciones en terreno.

El acceso al lugar de acopio fue vía terrestre saliendo desde el área metropolitana de Santiago por la ruta pavimentada G-25. El trayecto por esta ruta abarca una distancia aproximada de 63 Km., comprendidos entre la autopista concesionada 70 y el cruce con la ruta de ripio G-455. Luego, por la ruta secundaria, se recorre una distancia aproximada de 28 Km. hasta llegar al extremo sur del embalse El Yeso.

Finalizadas las actividades correspondientes a este lugar se procedió al desarme del campamento base y posteriormente el grupo y los equipos fueron trasladados del mismo

modo hacia el glaciar Echaurren, para continuar con las actividades propias del proyecto.



Figura B.1: Sector de acopio en las cercanías del embalse El Yeso, lugar donde aterrizó el helicóptero para portear la carga transportada desde Santiago, por el vehículo doble tracción.

B.2.2. Ingreso a la zona del glaciar Echaurren Norte

El ingreso al glaciar Echaurren Norte se realizó por vía aérea en un helicóptero Bell modelo 407 de la empresa Andes Helicópteros S.A., el cual recogió al grupo de expedicionarios y su equipamiento en el glaciar San Francisco una vez terminadas las actividades en dicho lugar. El vuelo tuvo una duración estimada de 15 minutos. Una vez en el glaciar se procedió a establecer el campamento base en las cercanías del refugio que la Dirección General de Aguas (DGA) posee en el lugar, contemplándose la utilización de carpas y equipos de terreno para pernoctar y desarrollar todas las actividades de preparación y posteriores mediciones en terreno. Terminados los trabajos en el glaciar Echaurren Norte, se contactó al helicóptero para retirar al grupo y su equipamiento del lugar. Los equipos, al igual como ocurrió en un inicio fueron dejados en el lugar de acopio ubicado en el embalse El Yeso para ser llevados vía terrestre en una camioneta 4x4 a la bodega de acopio en Santiago. Por su parte el grupo continuó viaje hacia el Aeródromo Tobalaba.

El operativo de entrada al glaciar se realizó el día martes 23 de Septiembre del 2008 con el transporte de carga vía terrestre desde la ciudad de Santiago hasta la intersección de la ruta internacional 60 CH con el camino secundario que se interna hacia el cajón del río Juncal. Luego se procedió a realizar el porteo de la carga en general y de los cuatro integrantes de la campaña con sus respectivos equipos personales. Ellos correspondían a dos encargados de los equipos de radio eco sondaje, un geodesta y un encargado de logística y seguridad en montaña. El helicóptero despegó desde un helipuerto particular ubicado en el sector de las



Figura B.2: Acceso al lugar de acopio de equipos ubicado en el embalse El Yeso. Se muestra el camino a seguir desde la ciudad de Santiago



Figura B.3: Vista panorámica del glaciar San Francisco y del campamento



Figura B.4: Campamento Base 1 (CB1), en zona central del glaciar San Francisco.



Figura B.5: Campamento Base 2 (CB2), ubicado en la zona central del glaciar Echaurren Norte



Figura B.6: Vista panorámica del glaciar Echaurren Norte y del campamento

Huaitatas en Santiago para posteriormente cruzar la cordillera de los Andes y luego descender y aterrizar junto a la carga transportada vía terrestre, ocupando un tiempo aproximado de vuelo de Santiago de 20 minutos. El sector de aterrizaje del helicóptero fue en la entrada del cajón del río Juncal ($32^{\circ}52' S$, $70^{\circ}09' O$), desde ese punto se realizaron cuatro vuelos, permitiendo transportar a los expedicionarios y la carga en general con un peso aproximado de 200 Kg correspondientes a equipos de medición y campamento en general. La operación de traslado a la zona de estudio ubicada en el sector de ablación del glaciar Juncal Norte se realizó en aproximadamente dos horas. Posteriormente se estableció el campamento base a una altura aproximada de 3300 m, con coordenadas $32^{\circ}59' S$, $70^{\circ}05' O$, desde donde se realizaron las operaciones de medición (fig B.5).

B.2.3. Ingreso a la zona del glaciar Tyndall

Se inició el viaje vía terrestre desde la ciudad de Punta Arenas hacia la ciudad de Puerto Natales a través de la ruta 9 para continuar viajando hacia el Parque Nacional Torres del Paine, el cual alberga una serie de glaciares entre los que se encuentra el Tyndall, cuyo acceso puede ser realizado normalmente a través de dos rutas.

La primera de estas rutas de acceso al glaciar Tyndall se puede realizar vía terrestre hasta llegar al sector denominado cañadón doña Rosa. Esta ruta puede ser realizada desplazándose a pie desde el sector de la guardería Grey a través de un sendero cuyo trayecto atraviesa bosques, ríos entre otros, con una duración aproximada de 6 horas. Se debe tener en cuenta el apoyo de caballos para el transporte.



Figura B.7: Sendero entre la guardería Grey y el cañadón Doña Rosa

La segunda posibilidad es acceder directamente a la lengua del glaciar Tyndall que puede ser realizada vía marítima desde la localidad de Puerto Natales, iniciando la navegación en una embarcación mayor en dirección al glaciar Balmaceda, lugar donde se realiza el trasbordo del personal y equipos en general para continuar viaje en un bote del tipo Zodiac navegando a través del río Serrano y desembarcando en un sector privado. En este sector se ofrece el servicio de caballos para el transporte de equipos, junto a ellos se prosigue a pie, por un periodo aproximado de 3 horas, atravesando también bosques y ríos, luego alcanzar la orilla del lago Geikie. Este lago es alimentado principalmente por tributarios y continuos desprendimientos de las grandes masas de hielos del glaciar Tyndall.

Para las dos campañas de terreno realizadas en este glaciar, se optó por hacer ingreso al glaciar por vía terrestre hacia el sector de cañadón Doña Rosa, lugar en que se asentó el campamento base. En la primera campaña el tramo entre la guardería y el cañadón se realizó a pie a diferencia de la segunda campaña, la cual se hizo utilizando caballos debido principalmente que el grupo de expedicionarios fue reducido y además por el corto tiempo que comprendía esta misma.

En ambas campañas el primer objetivo fue establecer un campamento base ubicado en el sector denominado cañadón Doña Rosa, aproximadamente a 1 Km del glaciar Tyndall. Una vez establecido, se accedió a pie a la zona de ablación. El porteo de los equipos de medición y de campamento se realizó a pie desde el campamento base.

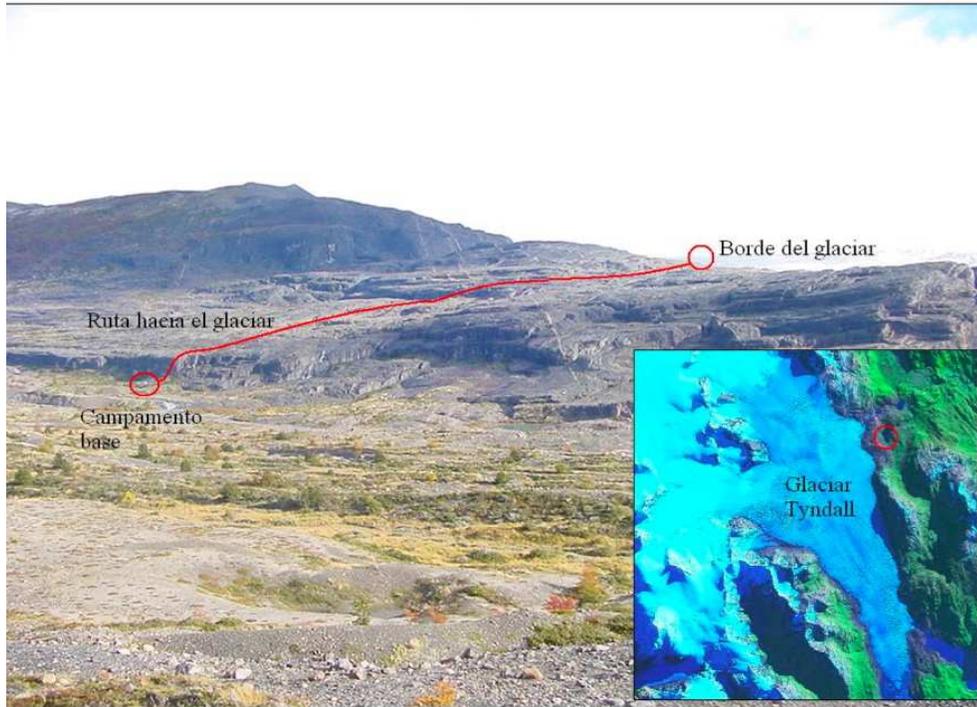


Figura B.8: Vista general del cañadón Doña Rosa, donde se instaló el campamento base y ruta hacia el glaciar Tyndall.



Figura B.9: Campamento base ubicado en cañadón Doña Rosa a orillas de glaciar Tyndall, Noviembre 2009

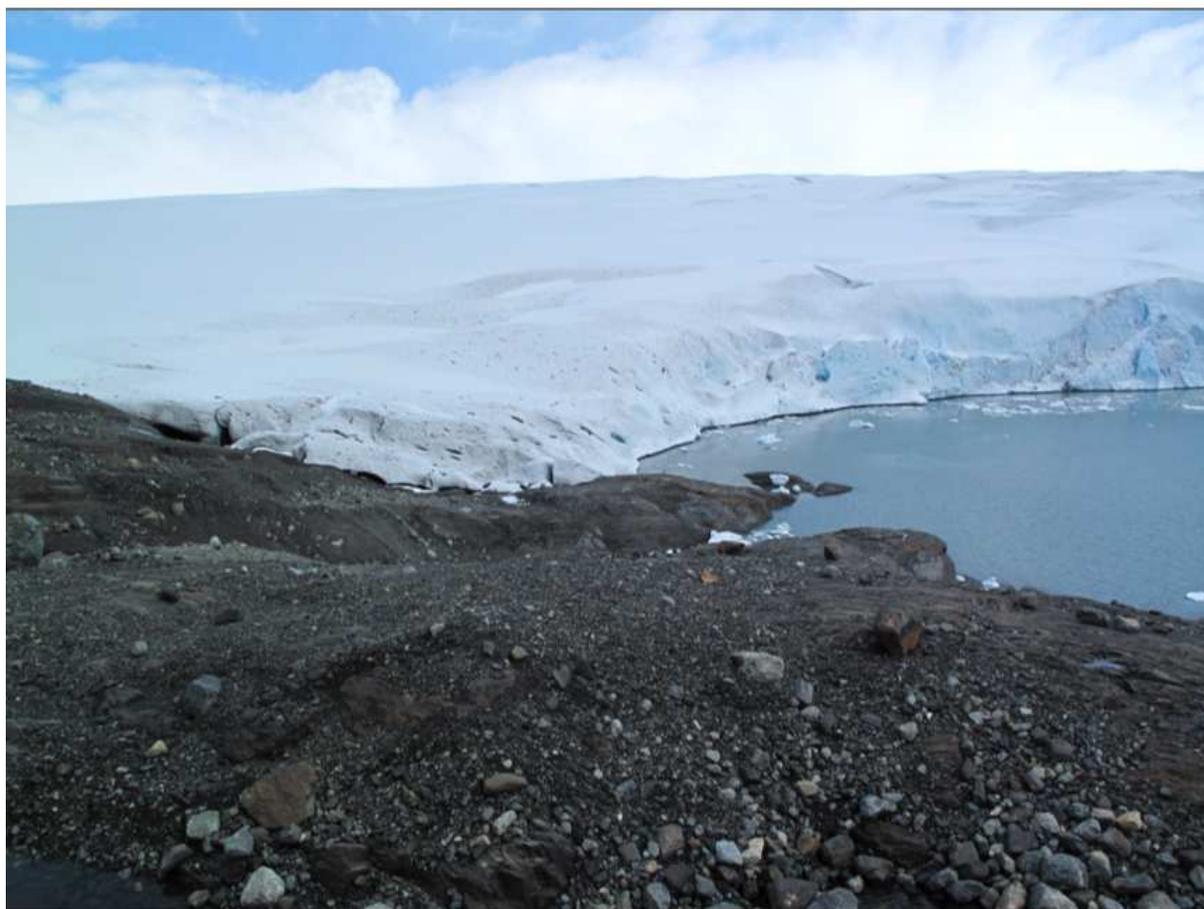


Figura B.10: Vista panorámica del glaciar Tyndall, Parque Nacional Torres del Paine (Diciembre 2009).

Anexo C

RADARGRAMAS Y PERFILES DE RADAR DE LAS ZONAS DE ESTUDIO

C.1. Radargramas obtenidos en glaciar Echaurren Norte

En este anexo se muestran los radargramas¹ de radar obtenidos en forma continua² sobre los recorridos proyectados en la zona del glaciar Echaurren Norte

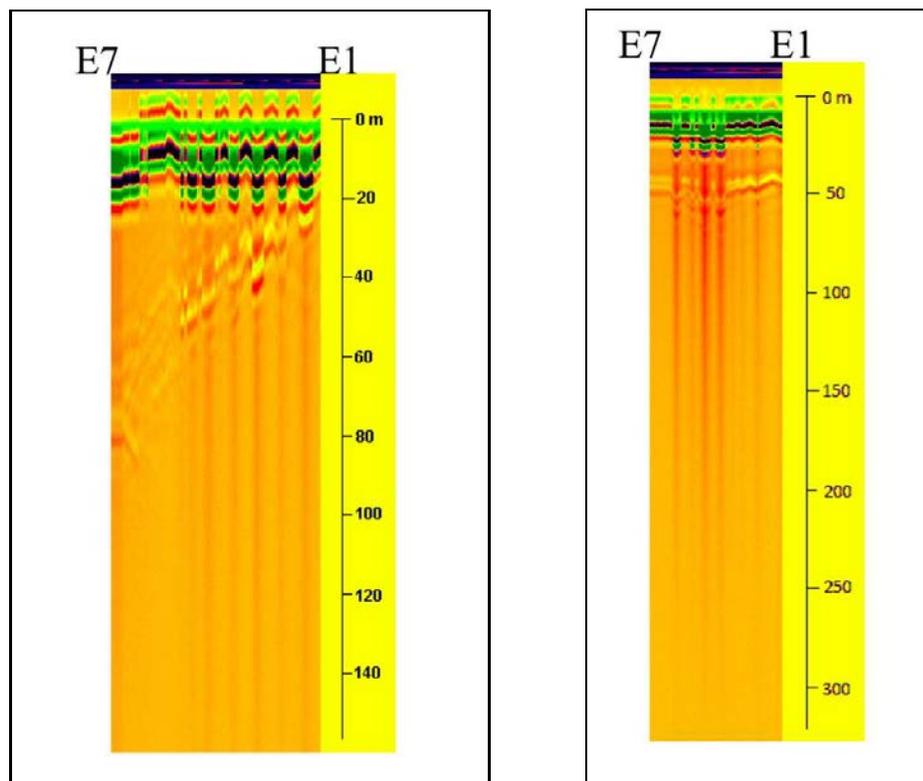


Figura C.1: Radargrama obtenido en la transecta, E7 - E1 de la zona del glaciar Echaurren Norte.

¹Conjunto de perfiles de radar presentados en un diagrama continuo.

²Medición realizada con el sistema de radar en forma continua.

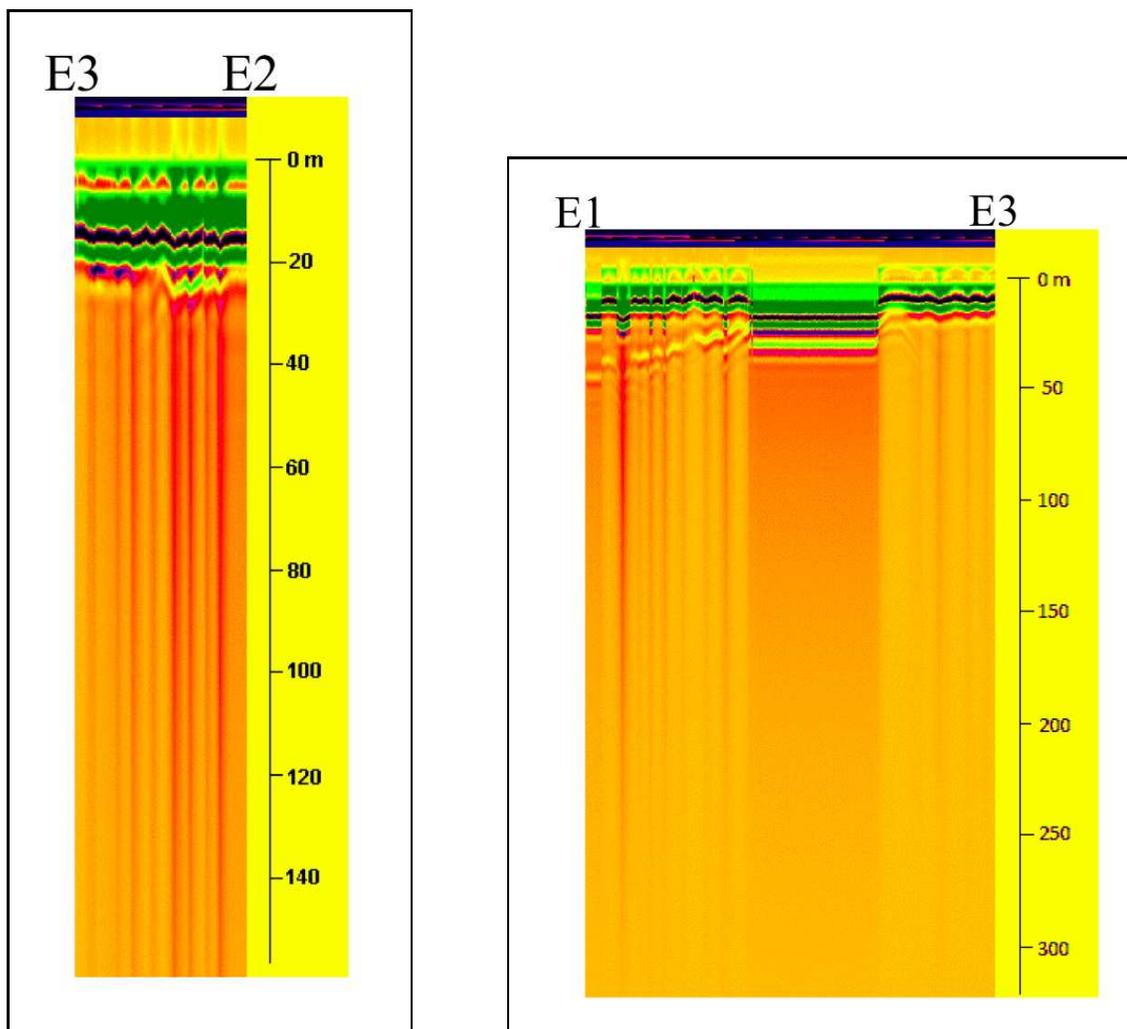


Figura C.2: Radargramas obtenidos en las transectas, E3 - E2 y E1 - E3 respectivamente en la zona del glaciar Echaurren Norte.

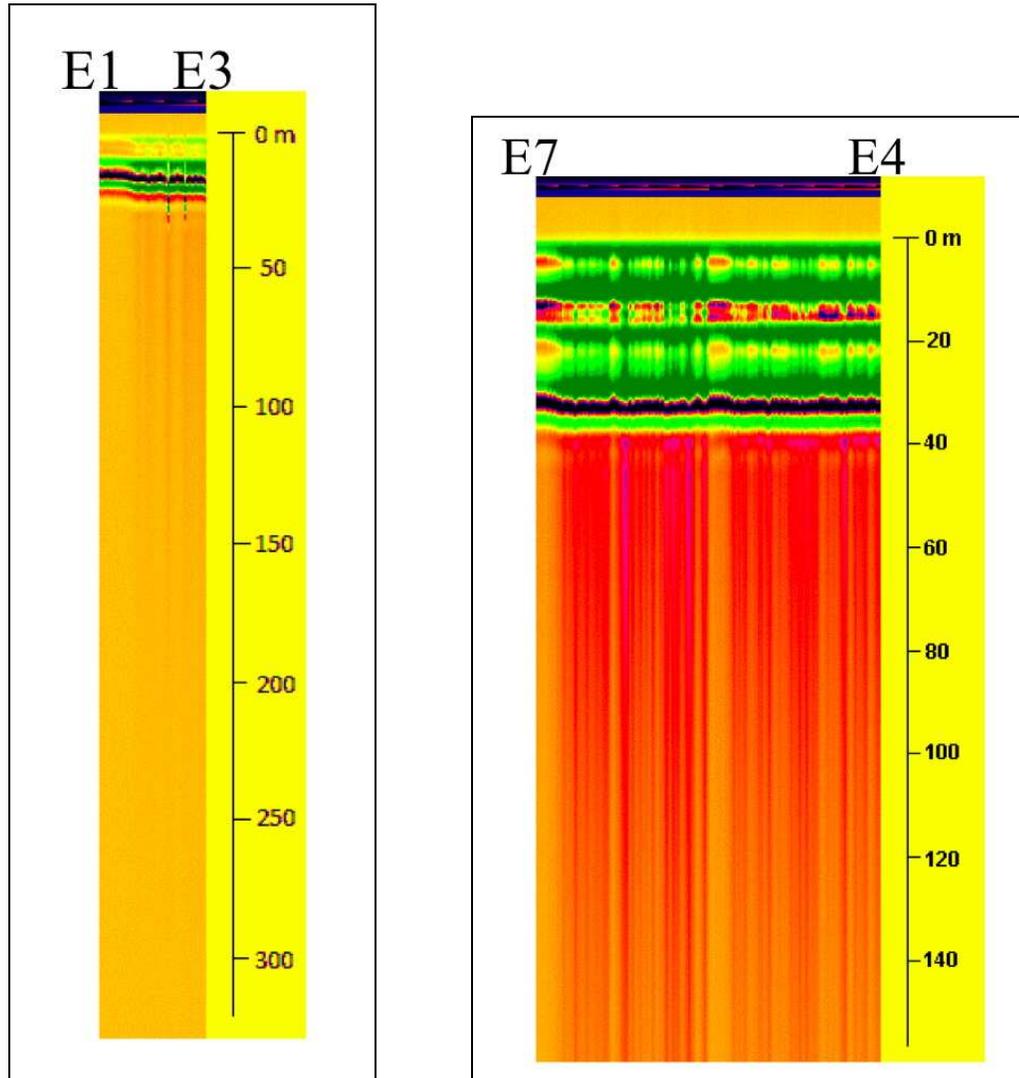


Figura C.3: Radargramas obtenidos en las transectas E1 - E3 y E7 - E4 respectivamente en la zona del glaciar Echaurren Norte.

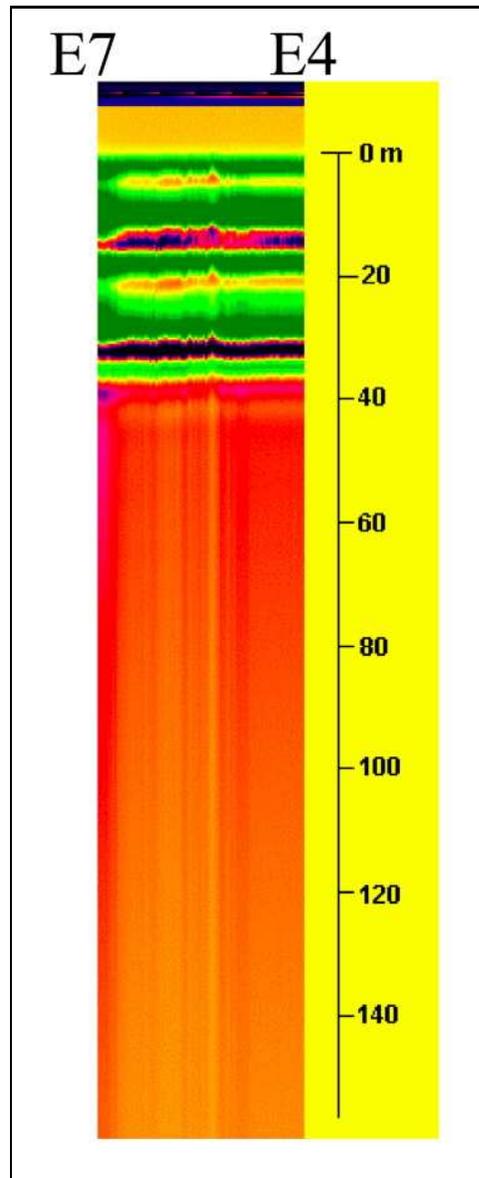
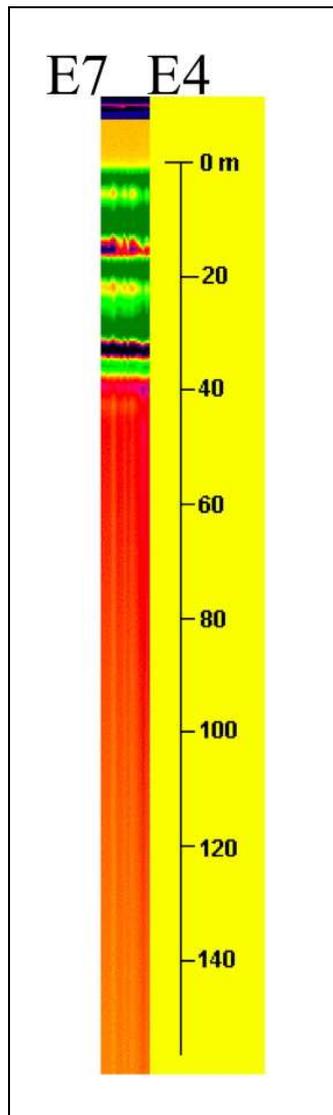


Figura C.4: Radargramas obtenidos en la transecta, E7 - E4, en la zona del glaciar Echaurren Norte.

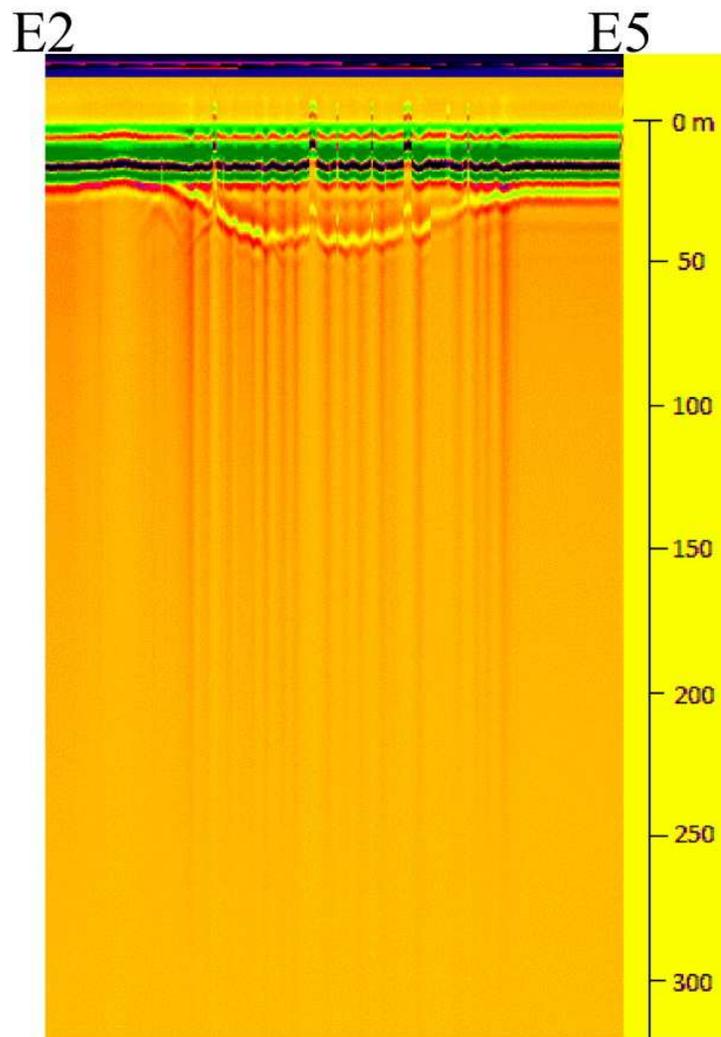


Figura C.5: Radargrama obtenido en la transecta E2 - E5, en la zona del glaciar Echaurren Norte

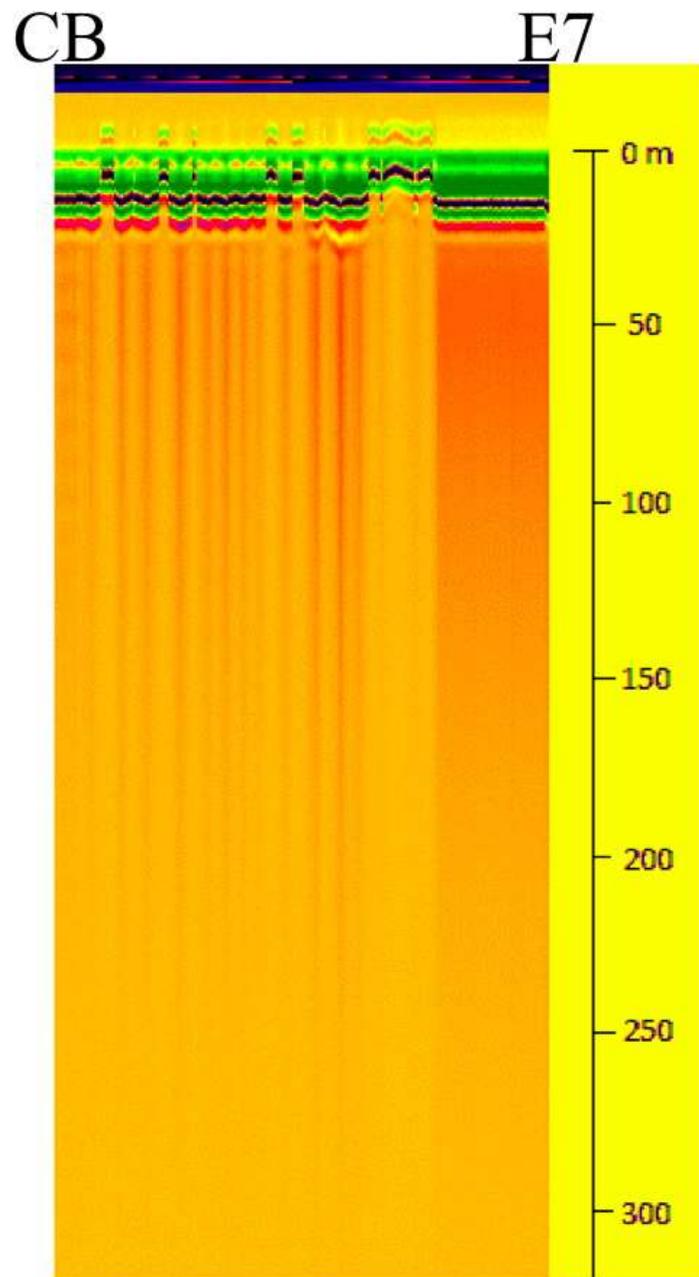


Figura C.6: Radargrama obtenido en la transecta CB - E7, en la zona del glaciar Echaurren Norte

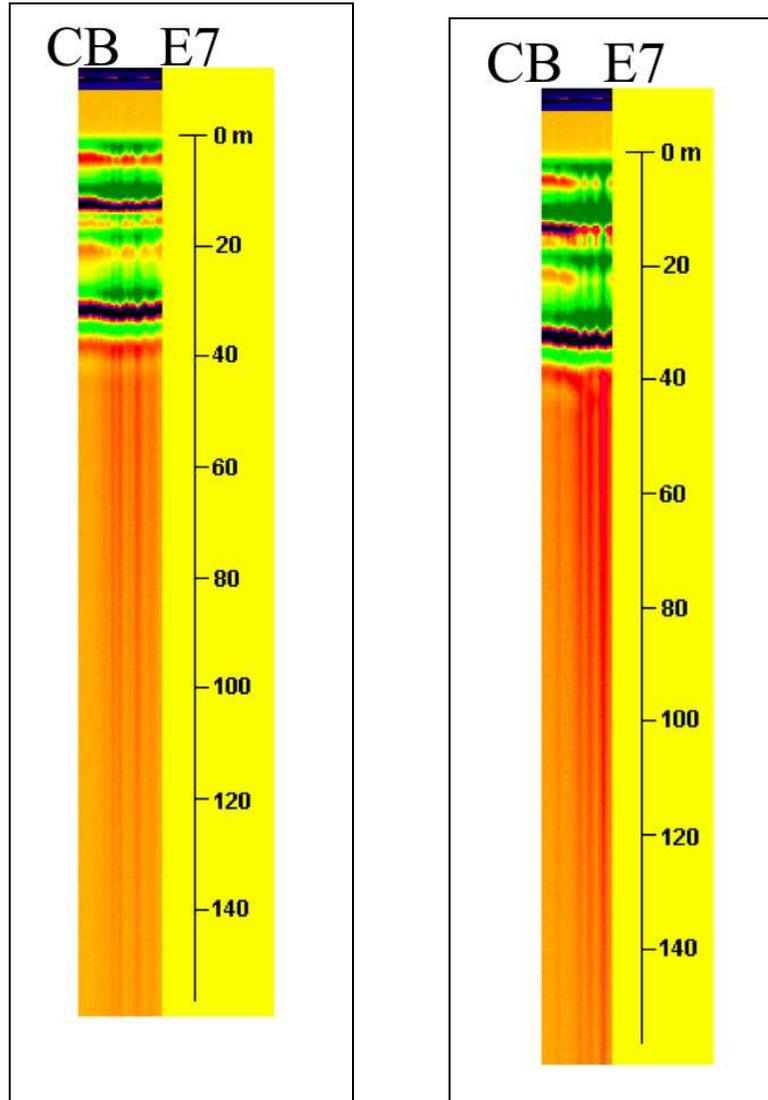


Figura C.7: Radargramas obtenidos en las transecta CB - E7, en la zona del glaciar Echaurren Norte.

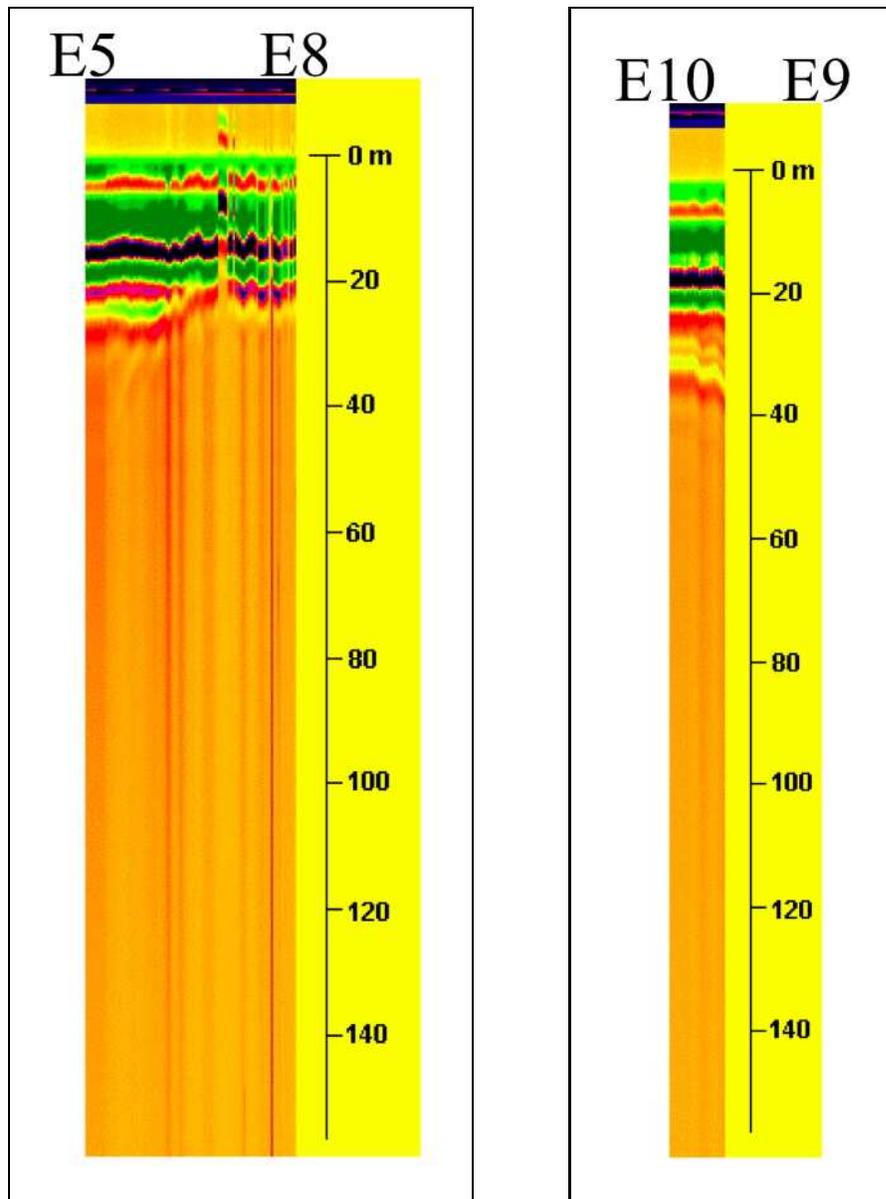


Figura C.8: Radargramas obtenidos en las transectas E5 - E8 y E10 - E9 respectivamente en la zona del glaciar Echaurren Norte.

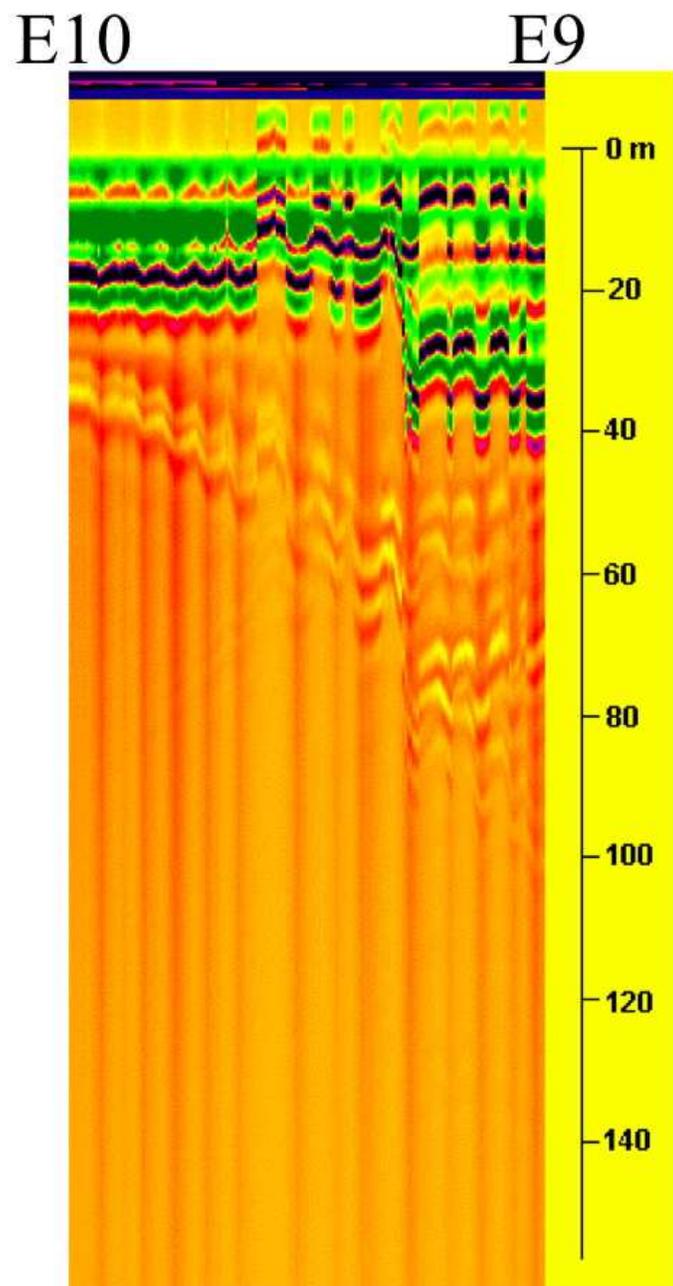


Figura C.9: Radargrama obtenido en la transecta E10 - E9, en la zona del glaciar Echaurren Norte

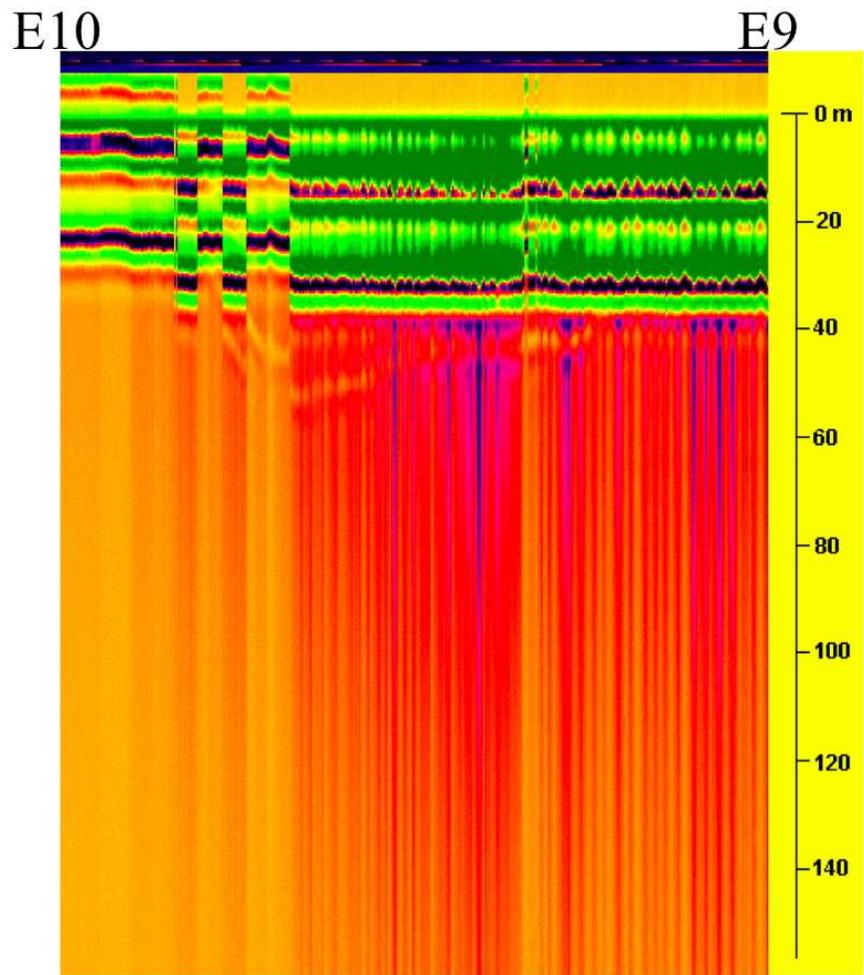


Figura C.10: Radargrama obtenido en la transecta E10 - E9, en la zona del glaciar Echaurren Norte

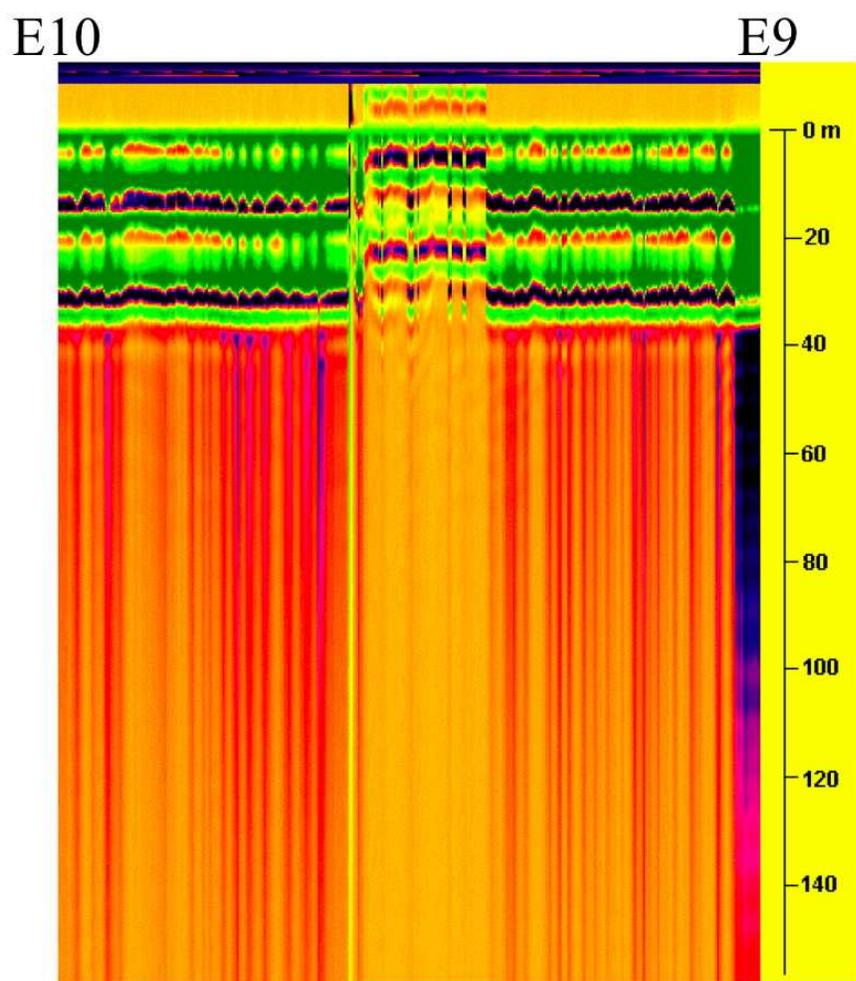


Figura C.11: Radargrama obtenido en la transecta E10 - E9, en la zona del glaciar Echaurren Norte

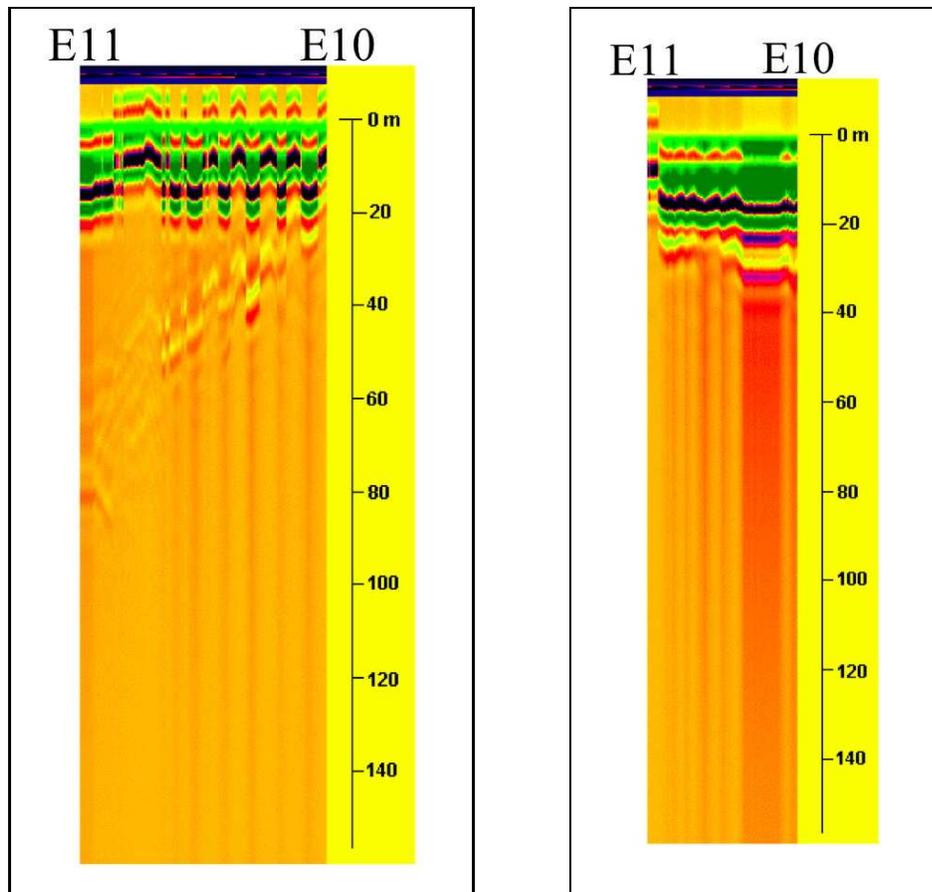


Figura C.12: Radargramas obtenidos en la transecta, E11 - E10, en la zona del glaciar Echaurren Norte.

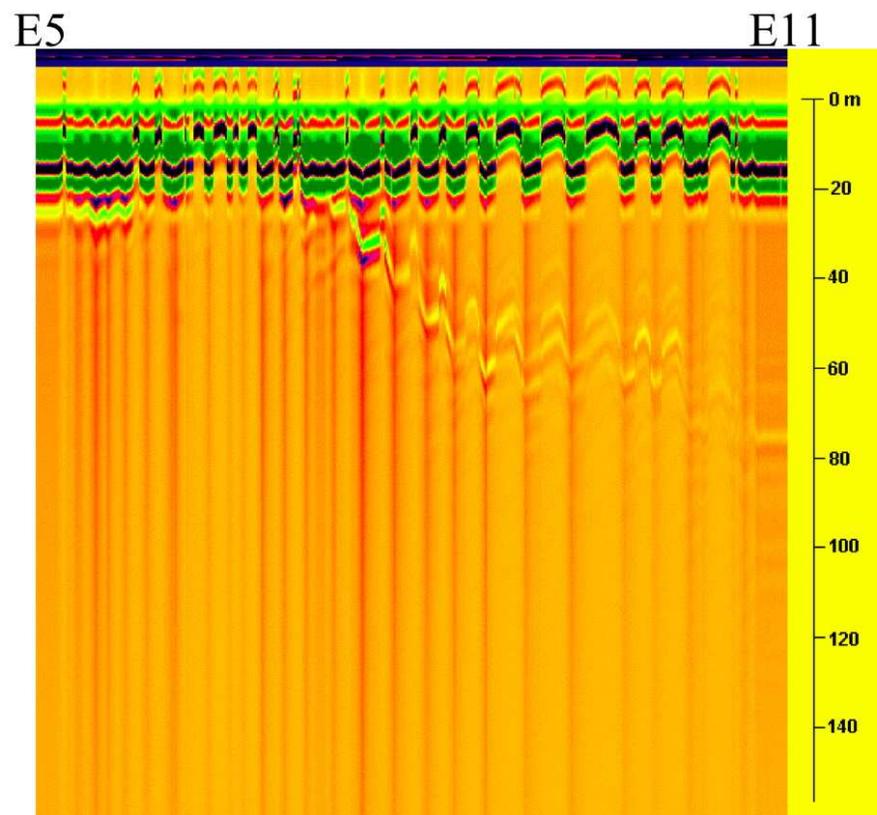


Figura C.13: Radargrama obtenido en la transecta E5 - E11, en la zona del glaciar Echaurren Norte

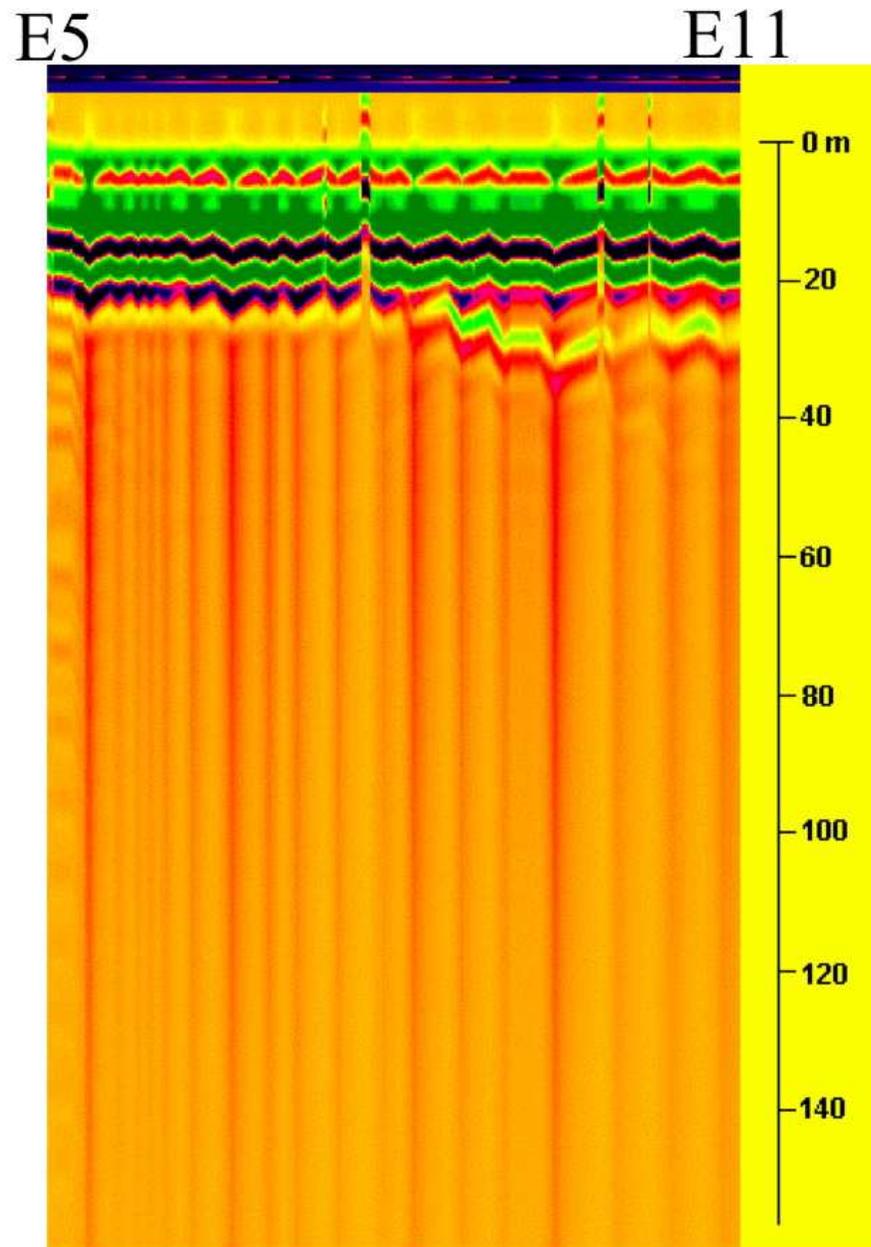


Figura C.14: Radargrama obtenido en la transecta E5 - E11, en la zona del glaciar Echaurren Norte

C.2. Radargramas obtenidos en glaciar San Francisco

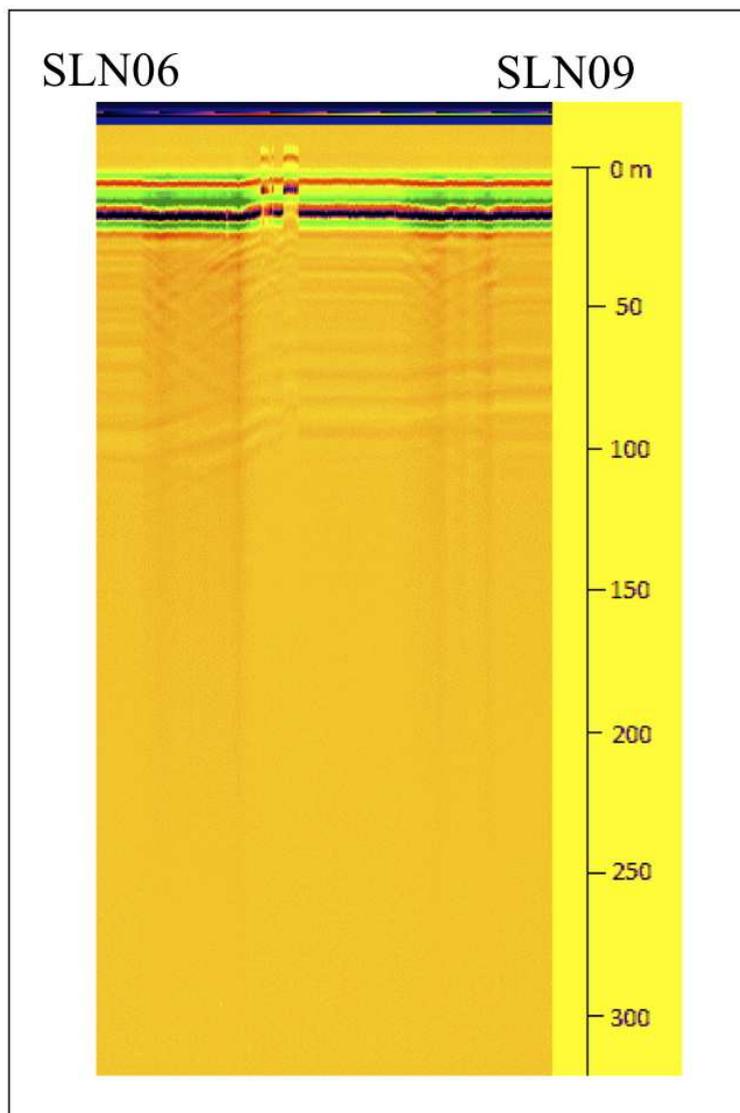


Figura C.15: Radargrama obtenido en la transecta SLN06 - SLN09, en la zona del glaciar San Francisco

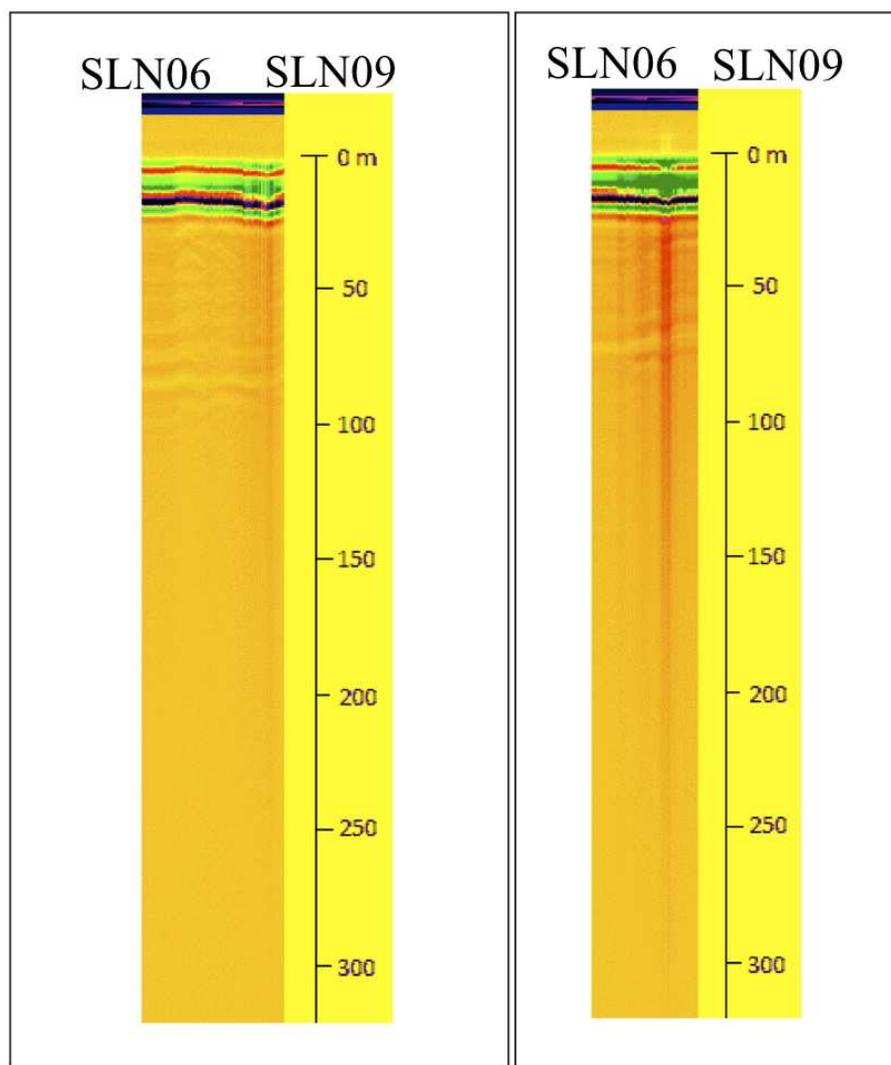


Figura C.16: Radargrama obtenido en la transecta SLN06 - SLN09, en la zona del glaciar San Francisco

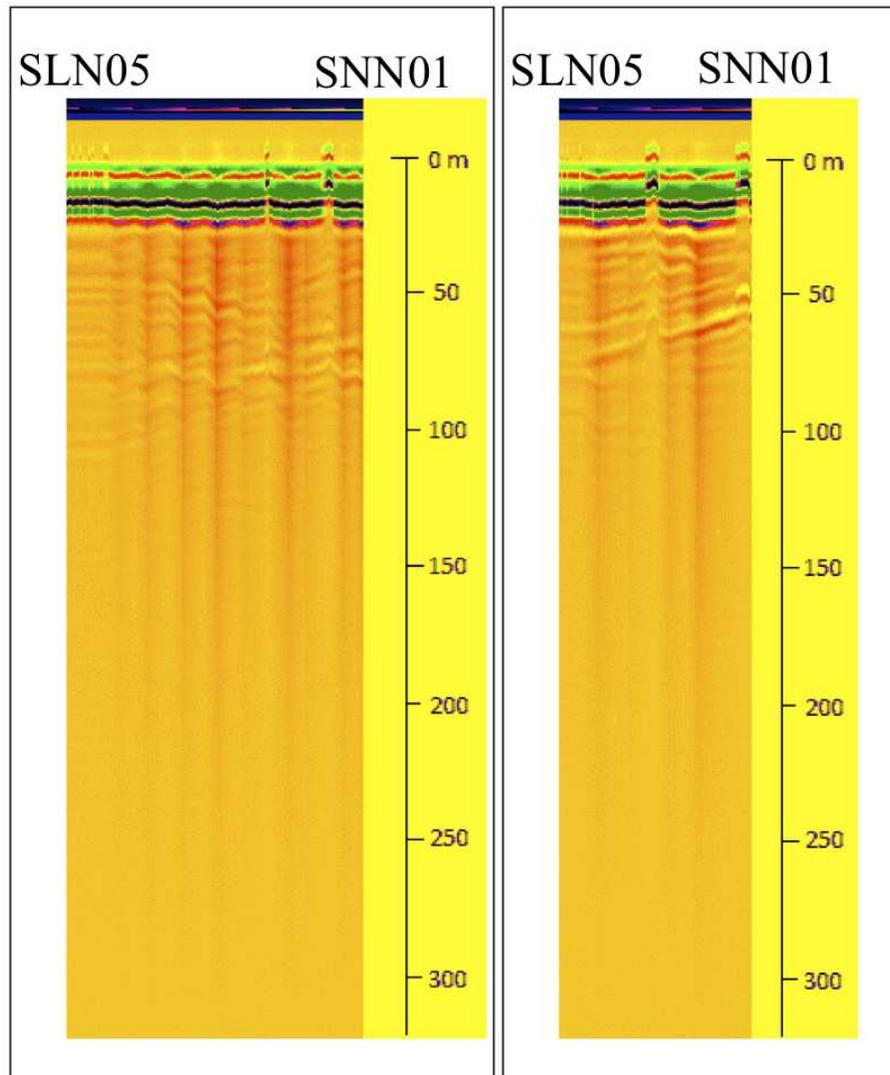


Figura C.17: Radargrama obtenido en la transecta SLN05 - SNN01, en la zona del glaciar San Francisco

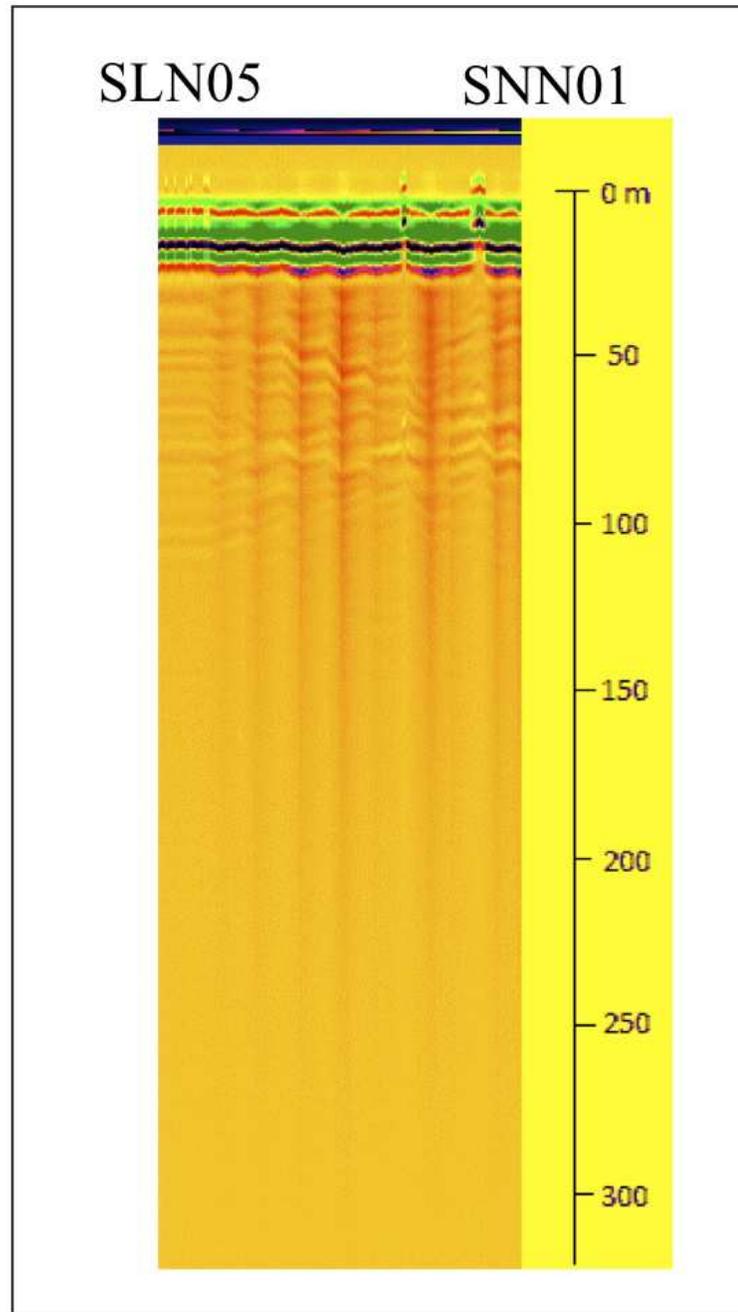


Figura C.18: Radargrama obtenido en la transecta SLN05 - SNN01, en la zona del glaciar San Francisco

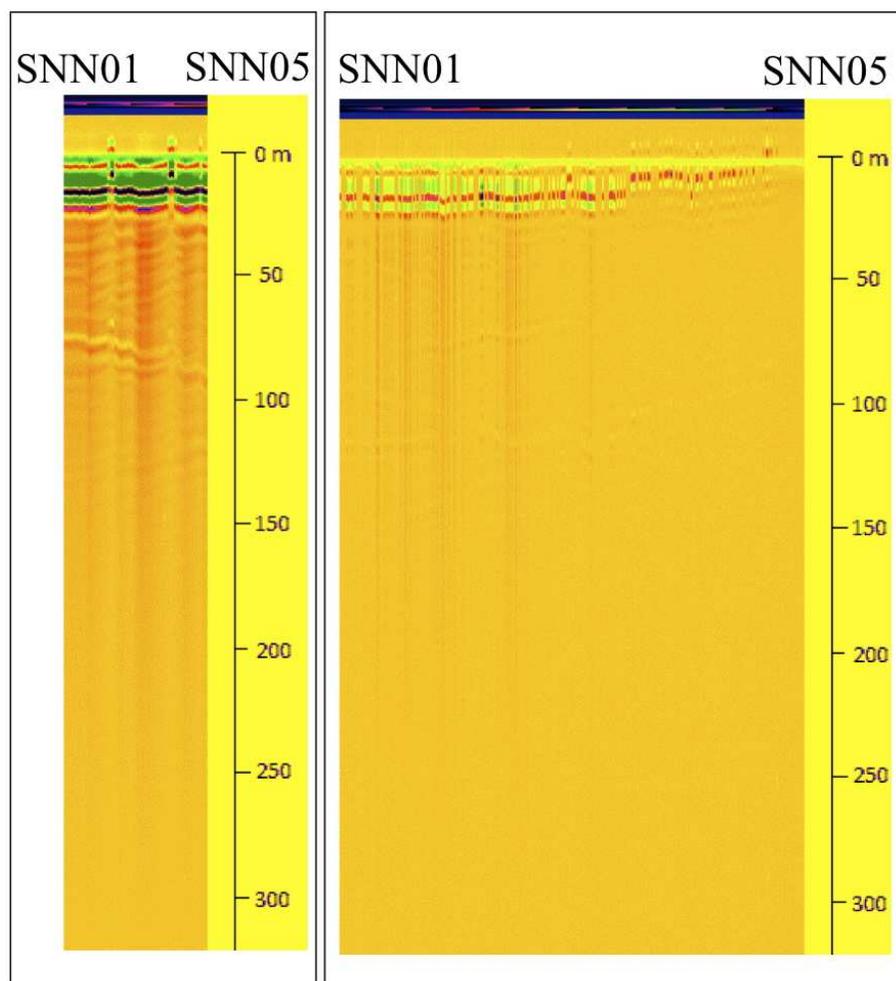


Figura C.19: Radargramas obtenidos en la transecta SLN01 - SNN05, en la zona del glaciar San Francisco

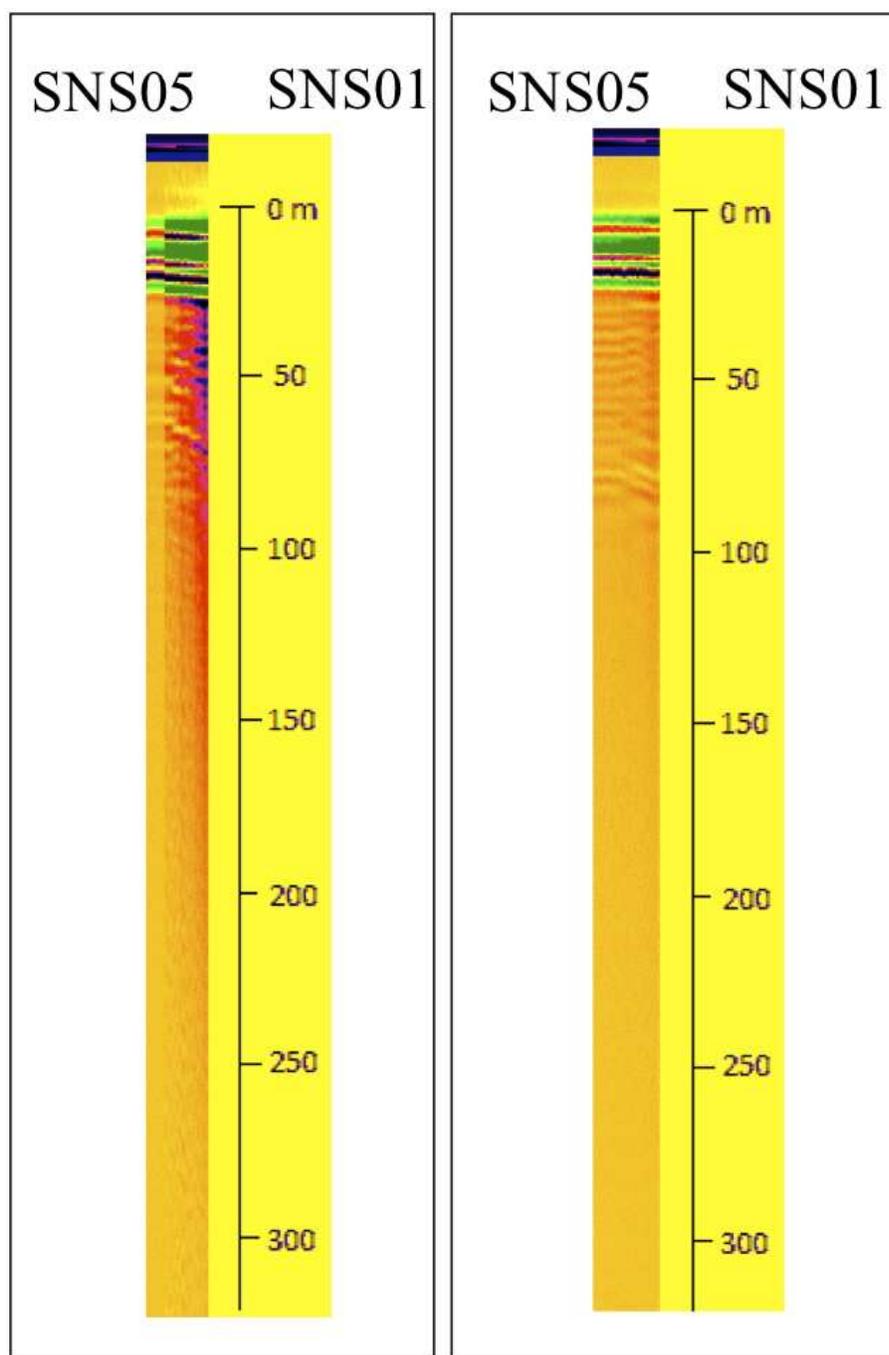


Figura C.20: Radargramas obtenidos en la transecta SNS05 - SNS01, en la zona del glaciar San Francisco

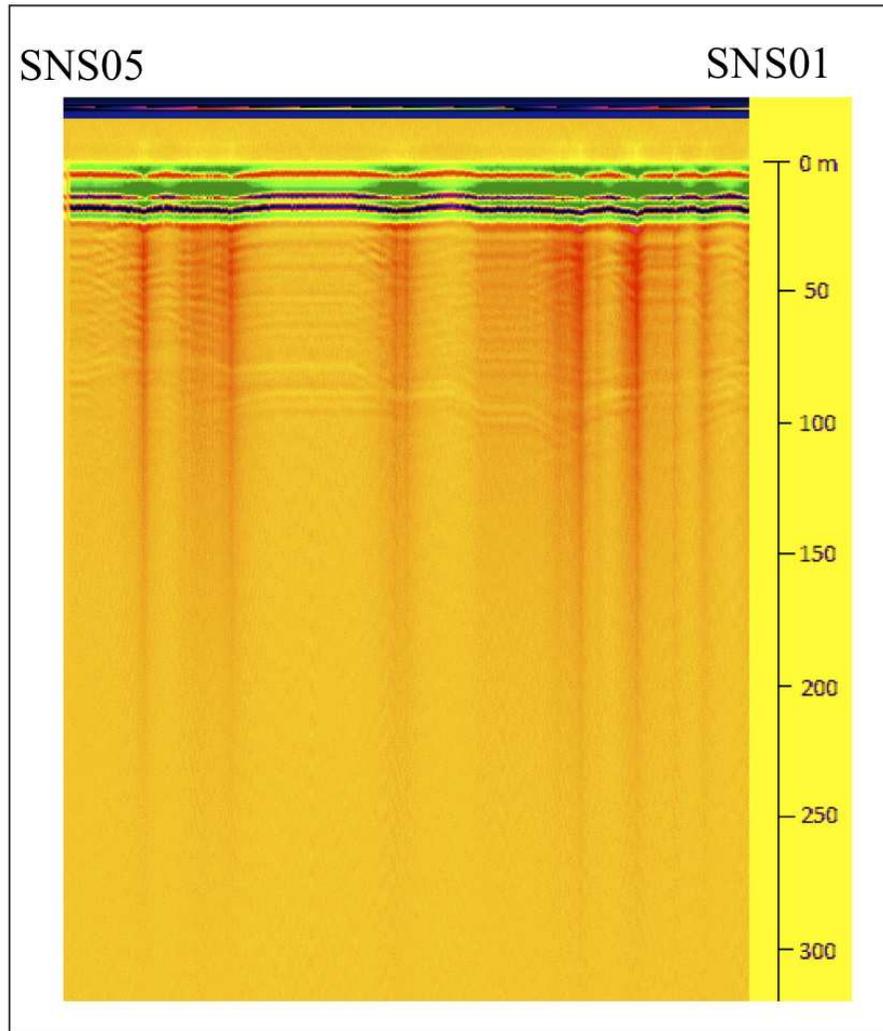


Figura C.21: Radargramas obtenidos en la transecta SNS05 - SNS01, en la zona del glaciar San Francisco

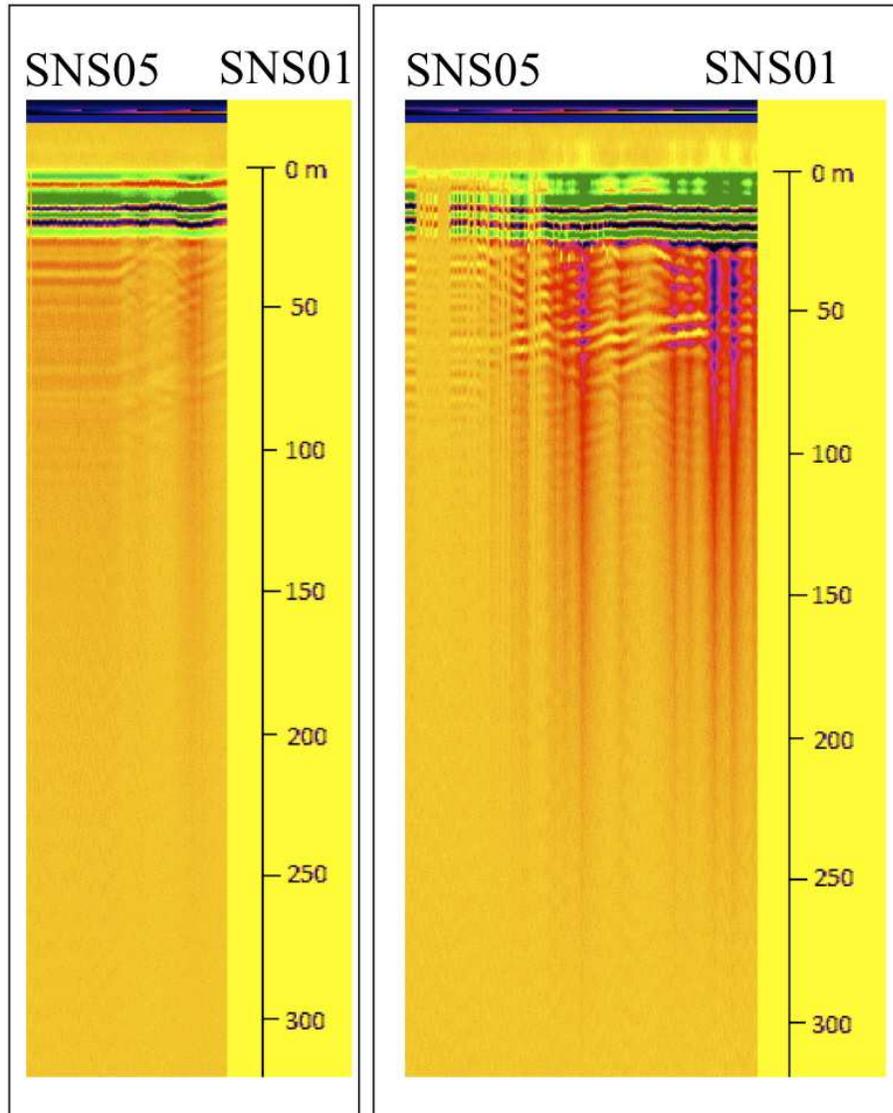


Figura C.22: Radargramas obtenidos en la transecta SNS05 - SNS01, en la zona del glaciar San Francisco

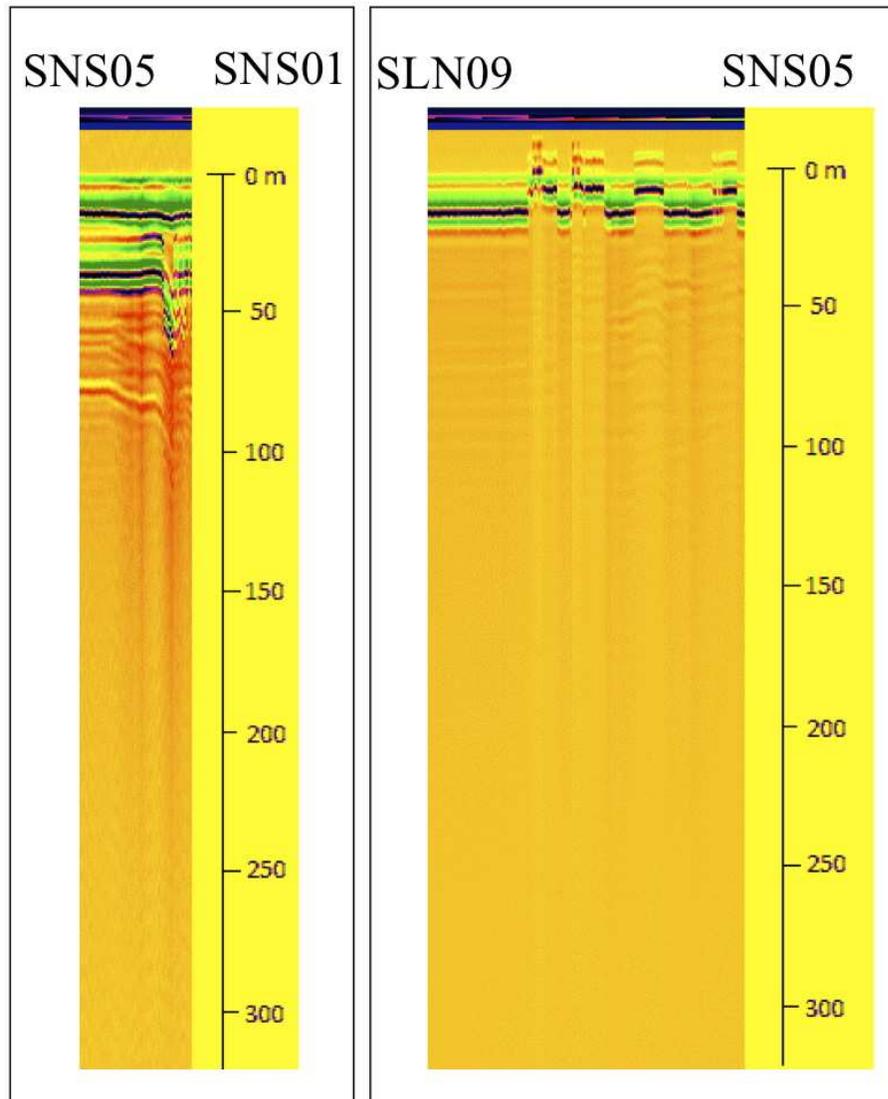


Figura C.23: Radargramas obtenidos en la transecta SNS05 - SNS01, SLN09 - SNS05 en la zona del glaciar San Francisco

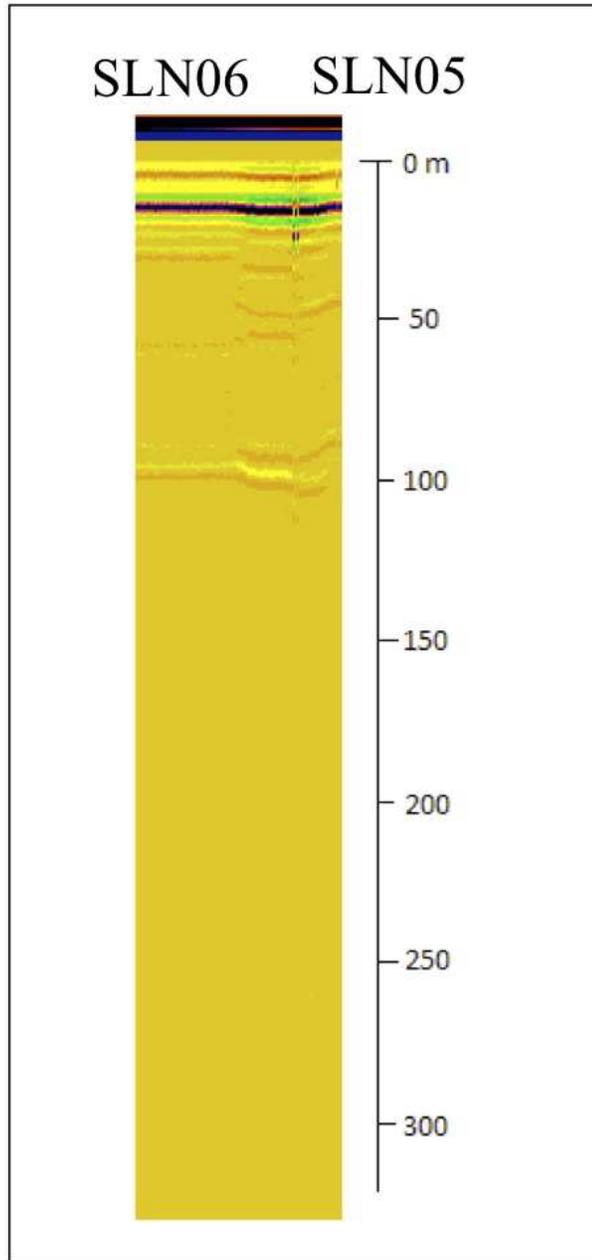


Figura C.24: Radargrama obtenido en la transecta SLN06 - SLN05, en la zona del glaciar San Francisco

C.3. Perfiles de radar obtenidos en glaciar Tyndall

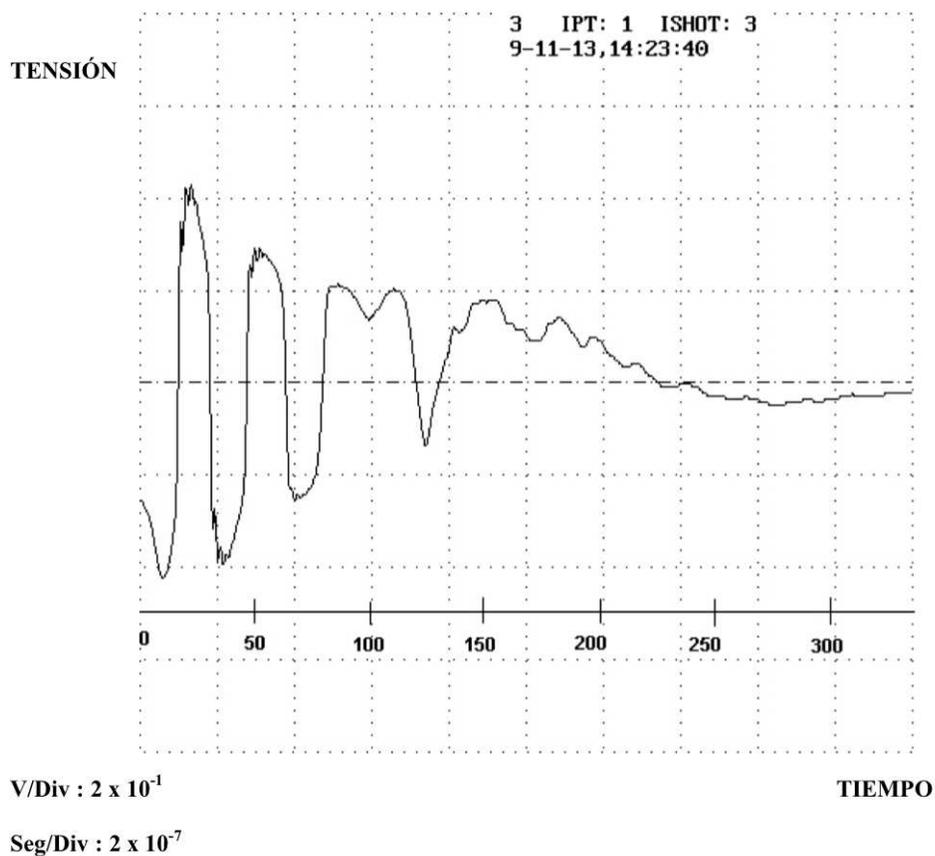


Figura C.25: Perfil obtenido en la zona de ablación del glaciar Tyndall, correspondiente a la estación B01 de la transecta de la figura 4.13

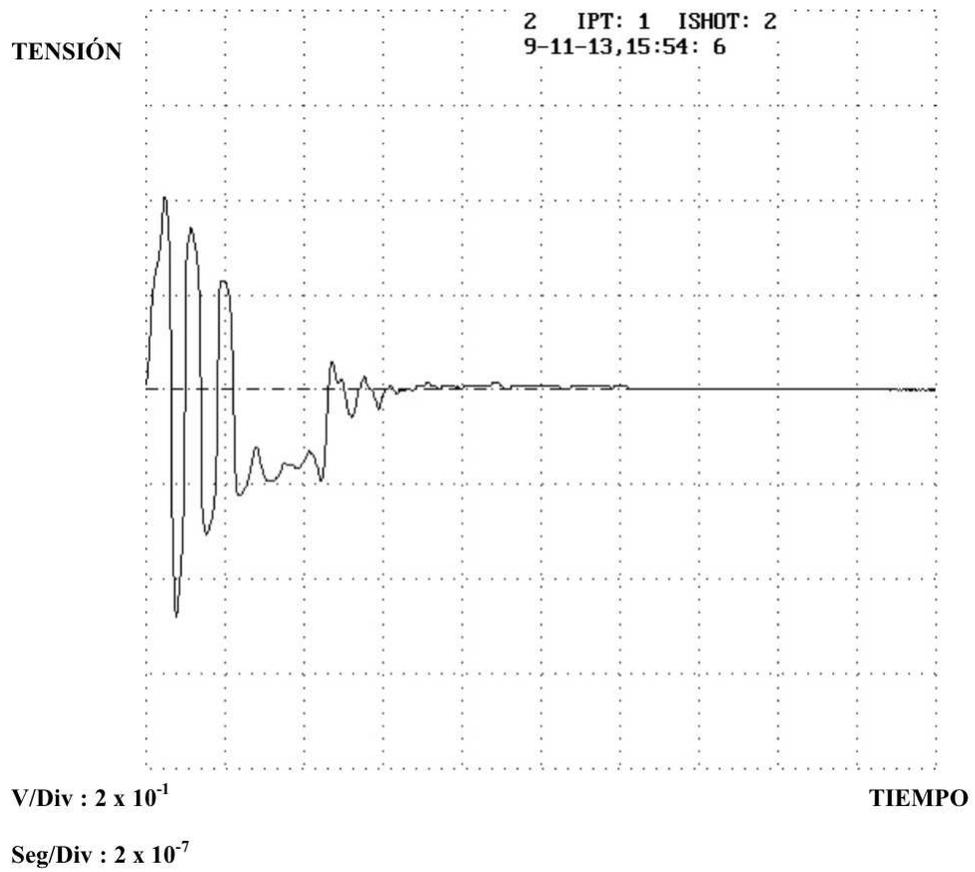


Figura C.26: Perfil obtenido en la zona de ablación del glaciar Tyndall, correspondiente a la estación B02 de la transecta de la figura 4.13

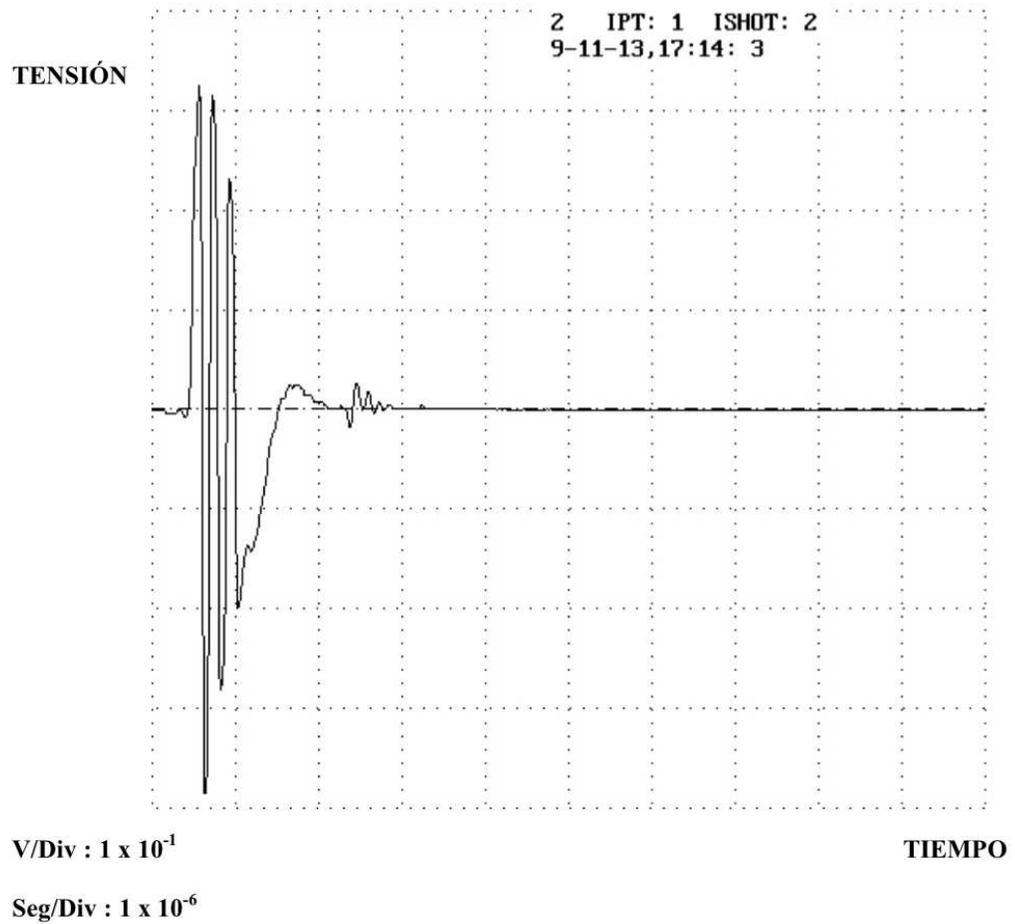


Figura C.27: Perfil obtenido en la zona de ablación del glaciar Tyndall, correspondiente a la estación B03 de la transecta de la figura 4.13

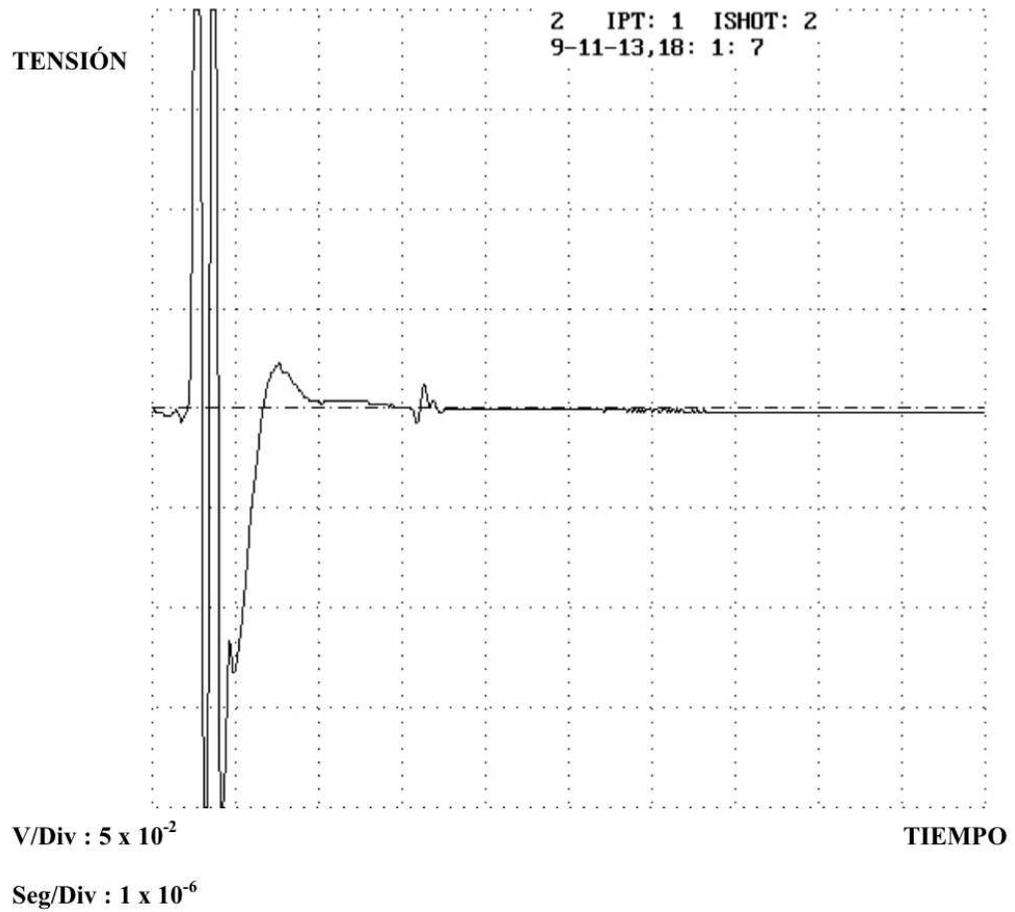


Figura C.28: Perfil obtenido en la zona de ablación del glaciar Tyndall, correspondiente a la estación B04 de la transecta de la figura 4.13

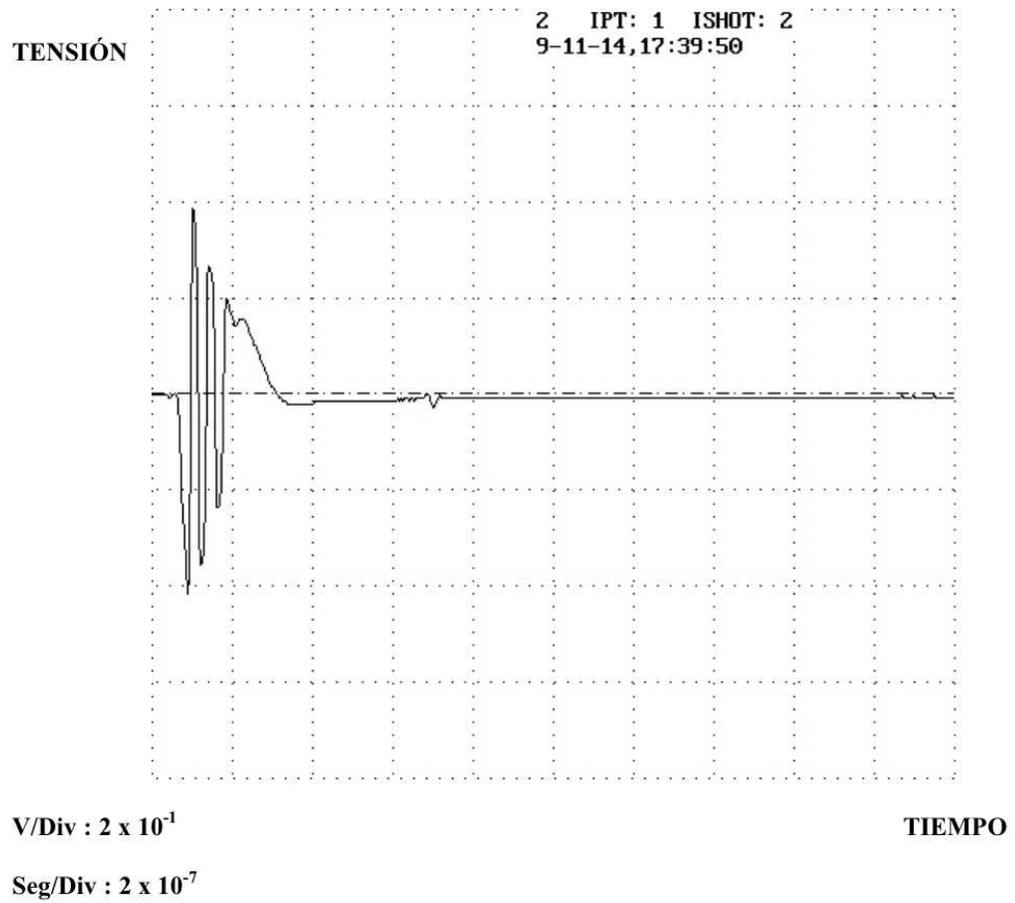


Figura C.29: Perfil obtenido en la zona de ablación del glaciar Tyndall, correspondiente a la estación B05 de la transecta de la figura 4.13

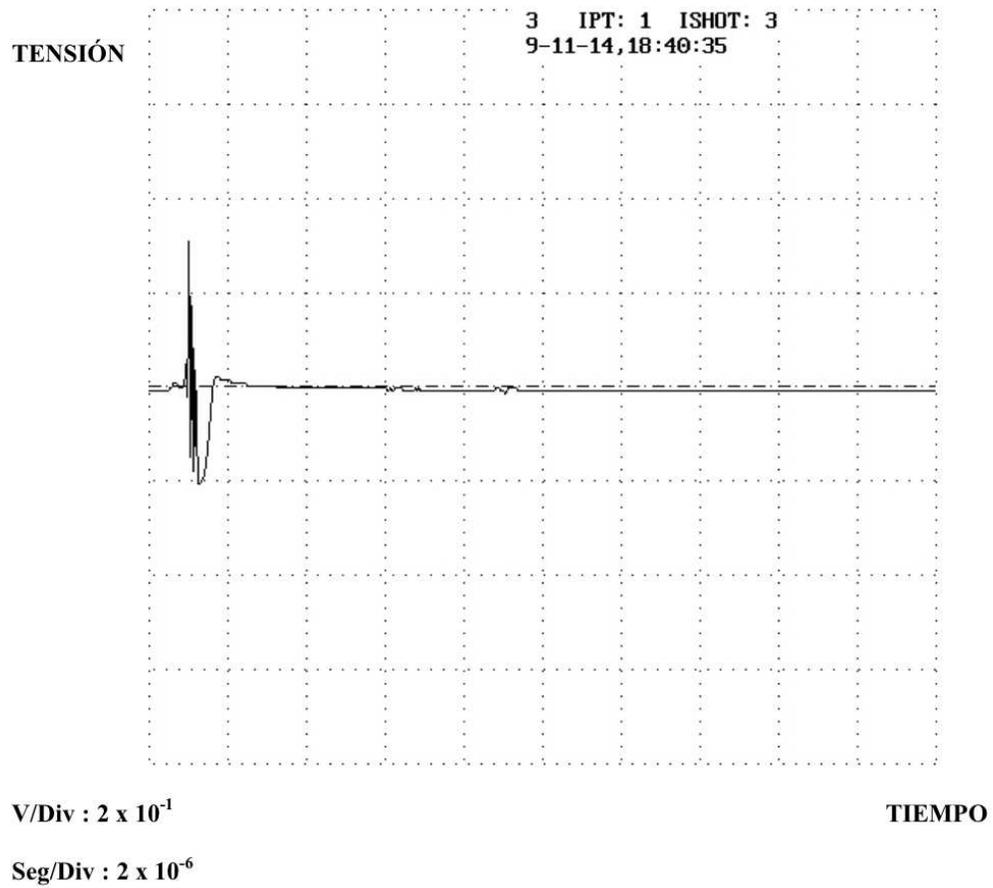


Figura C.30: Perfil obtenido en la zona de ablación del glaciar Tyndall, correspondiente a la estación B06 de la transecta de la figura 4.13

Anexo D

RUTAS GEORREFERENCIADAS

En este anexo se muestran las rutas de aproximación realizadas a cada una de las zonas de estudio, las cuales fueron georreferenciadas mediante el uso de sistemas GPS's topográficos.

- **Glaciar Echaurren Norte**
- **Glaciar San Francisco**
- **Glaciar Tyndall**

D.1. Glaciar Echaurren Norte

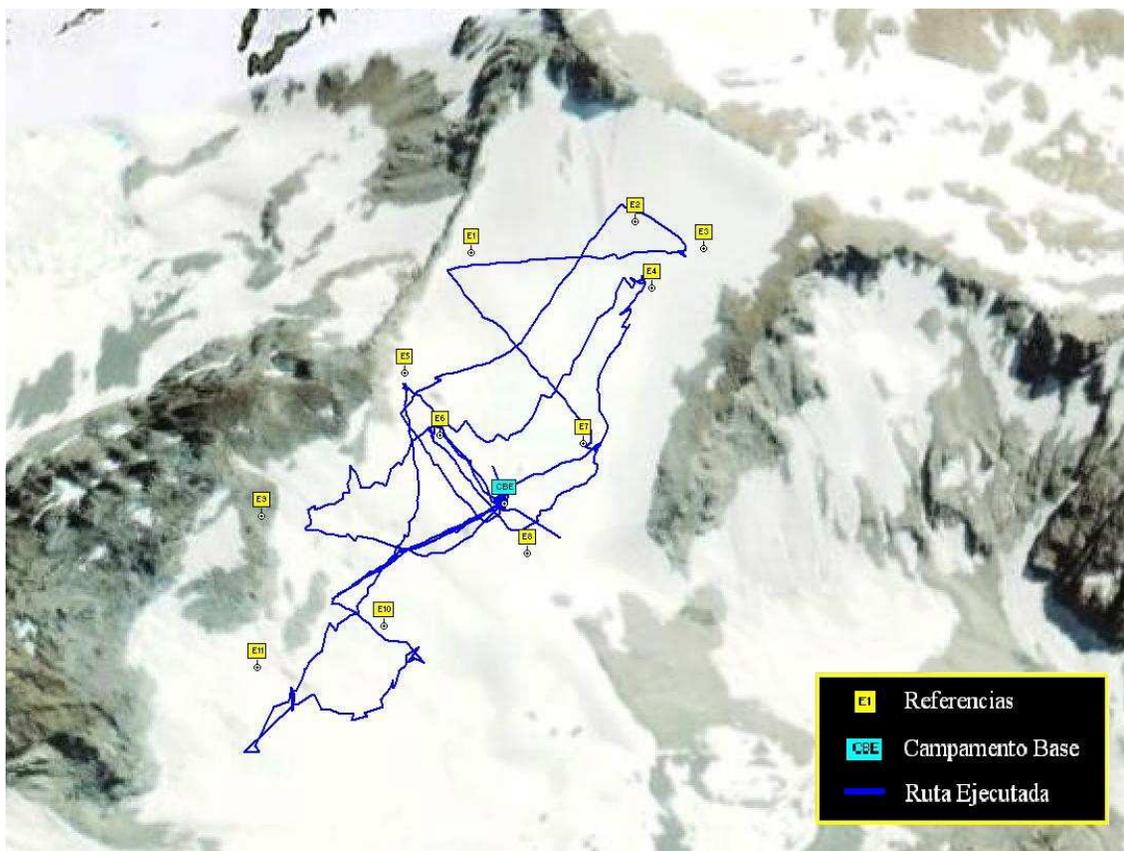


Figura D.1: Desplazamiento efectuado sobre el glaciar Echaurren Norte

D.2. Glaciar San Francisco

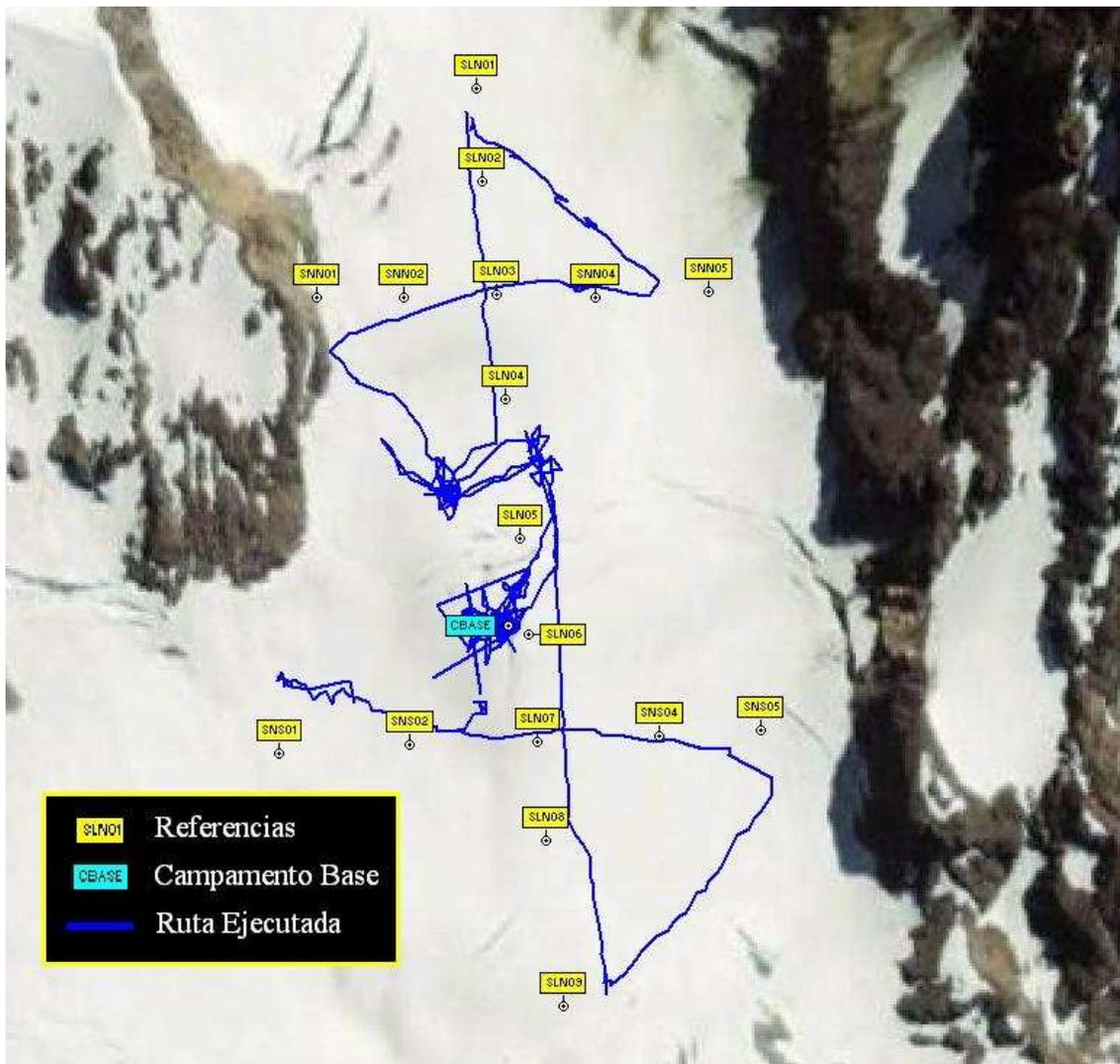


Figura D.2: Desplazamiento realizado sobre el glaciar San Francisco

D.3. Glaciar Tyndall

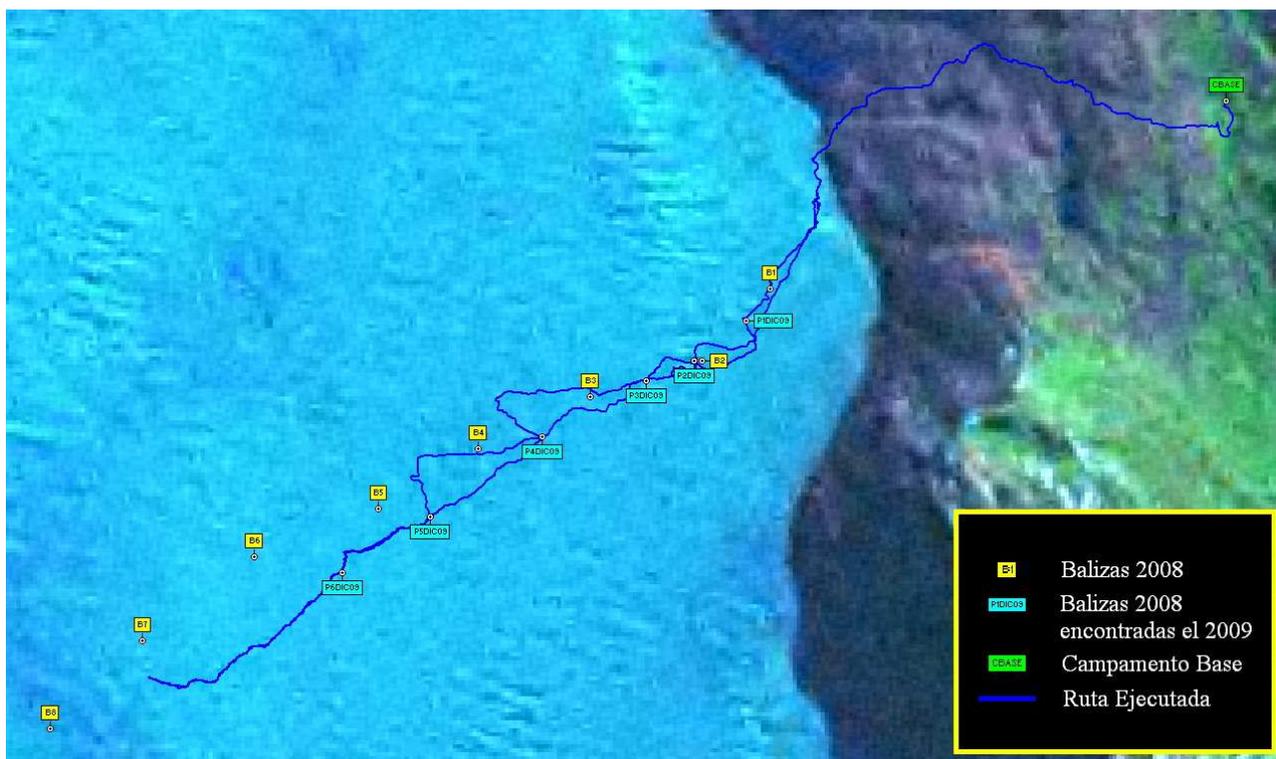


Figura D.3: Desplazamiento realizado sobre la zona de ablación del glaciar Tyndall.

Anexo E

REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA

Este anexo contiene la cartografía generada por el proyecto cuyo formato en papel se adjunta en su correspondiente escala

- **Glaciar Echaurren Norte**
- **Glaciar San Francisco**
- **Glaciar Tyndall**