



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

USO DE RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE (GPR) PARA CARACTERIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE SEDIMENTO VOLCÁNICO Y MADERA MUERTA ENTERRADA: APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO BLANCO, CHAITÉN, CHILE

Tesis para optar al Título de:
Ingeniero Civil en Obras Civiles

Profesor Patrocinante:
Ing. David Alvarado C.

Profesor Co-Patrocinante:
Dr. Galo Valdebenito M.
Dr. Andrés Iroume A.

CARLOS FRANCISCO FUENTES ISLA
VALDIVIA – CHILE

2016



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Trabajo de Titulación - Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

USO DE RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE (GPR) PARA CARACTERIZACIÓN DE DEPÓSITOS DE SEDIMENTO VOLCÁNICO Y MADERA MUERTA ENTERRADA: APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO BLANCO, CHAITÉN, CHILE.

Autores

Estudiante: Carlos Francisco Fuentes Isla

Profesor Patrocinante: David Alvarado

Profesor Co-Patrocinante: Galo Valdebenito M., Andrés Iroume Arrau

RESUMEN

La erupción del volcán Chaitén en Mayo de 2008, afectó severamente el proceso de reclutamiento de material leñoso de gran tamaño (Large Wood, LW) sobre el río Blanco (Chaitén, Chile). A siete años de la erupción, la hidráulica, morfología y ecología de este sistema fluvial, aún se ven severamente afectadas por los nuevos procesos de reclutamiento de LW.

La técnica de prospección geofísica basada en Radar de Penetración Terrestre (GPR), es un método rápido y no invasivo, que podría ser adecuado para el estudio de la morfología y de la estructura interna de las capas de sedimento volcánico, permitiendo también la cuantificación de madera muerta enterrada dentro de un área de control definida.

Esta investigación tiene como objetivo caracterizar la morfología interna y evidenciar la presencia de LW enterrado en depósitos volcánicos sobre un tramo del río Blanco, aplicando la técnica geofísica basada en el uso del GPR. Para esto, se realizó una campaña en la ribera noroeste del río Blanco, donde en primer lugar, se calibraron los parámetros de adquisición de campo mediante la obtención de Radargramas sobre perfiles con presencia de troncos de distintos diámetros en posiciones rigurosamente conocidas. Posterior a esto, se levantaron dos grillas cuadriculadas para la recopilación de datos, definiendo el área de control. Luego, a través del post-proceso y la representación tridimensional de los datos de campo, se buscó caracterizar los depósitos de sedimento, e identificar y relacionar entre sí las singularidades asociadas a madera muerta enterrada.

Los resultados arrojan que es posible utilizar la técnica basada en el GPR para identificar capas de depósito de sedimentos que se han acumulado en el tiempo. Además a través de un Mapping 3D es posible determinar la distribución espacial y la longitud de piezas de madera muerta enterrada, lo que permite una primera evaluación del volumen de esta, sobre la base de la evidencia de madera presente en la superficie del área de control.

Palabras Claves: Radar de Penetración Terrestre (GPR), Madera Muerta Enterrada, Depósitos de sedimento Volcánico, Río Blanco, Volcán Chaitén.

ABSTRACT

The eruption of Chaitén Volcano in May 2008, severely affected the recruitment process of Large Wood (LW) in the Blanco River (Chaitén, Chile). Seven years since the eruption, the hydraulics, morphology and ecology of this river system are still severely affected by the new LW recruitment processes.

The prospecting geophysics technique based on Ground Penetrating Radar (GPR), is a fast and non-invasive method that may be appropriate for the morphology and the internal structure study of the volcanic sediment layer, allowing also the quantification of death buried wood within a defined control area.

This study aims to characterize the internal morphology and demonstrate the presence of LW buried in volcanic deposits over a part of the Blanco River, applying a geophysical technique based on the use of the GPR. This was achieved by undergoing a campaign on the northwest banks of the Blanco River, where in first place, the acquisition field parameters were calibrated by obtaining Radargrams profiles with the presence of tunks with different diameters in rigorously positions. Also, two square grids were established for the data collection, defining the control area. Then, through the post-process and the tridimensional representation of the field data, is to characterize the sediment deposits, and identify and interrelate singularities associated to buried dead wood.

The results showed that it is possible use the technique based on GPR to identify deposit layers of sediment that have accumulated over time. Moreover, through a mapping 3D, it is possible to determinate the spatial distribution and the length of dead buried wood pieces, allowing a first assessment of it, based on the evidence of wood presence on the surface of the control area.

Keywords: Ground Penetrating Radar (GPR), Dead buried Wood, Volcanic Sediment Deposits, Blanco River, Chaitén Volcano, Chile.

1. Introducción.

En territorios de clima templado, la presencia de madera en ríos es una señal significativa de ambientes poco alterados (Hering et al., 2000; Mutz et al., 2006) y ejerce variadas e importantes funciones geomorfológicas y ecológicas (A. M. Gurnell, 2013; Piégay, 2003; Seo, Nakamura, & Chun, 2010). El material leñoso puede afectar la complejidad estructural de los sistemas fluviales, cambiando los flujos hidráulicos, controlando el almacenamiento y transporte de sedimentos, y favoreciendo el desarrollo de pozas e islas (A. Gurnell, Tockner, Edwards, & Petts, 2005; Keller & Swanson, 1979; Swanson & Lienkaemper, 1978). Por otra parte, la madera puede ser transportada aguas abajo durante eventos de crecida (Ravazzolo, Mao, Picco, & Lenzi, 2015), aumentando el peligro de inundaciones y daños a estructuras urbanas (Mazzorana, Zischg, Largiader, & Hübl, 2009).

En cuencas forestales de cabecera y gran pendiente, el aporte de madera hacia los cauces está dominado por avalanchas de nieve, deslizamientos, y flujo de detritos, mientras que en cuencas más grandes la mortalidad de árboles y el proceso de erosión de las orillas son relativamente más importantes en el reclutamiento de material leñoso de gran tamaño (Large Wood, LW) (Bilby & Bisson, 1998; Hairston-Strang & Adams, 1998; Keller & Swanson, 1979; Martin & Benda, 2001; May & Gresswell, 2003; Reeves, Burnett, & McGarry, 2003; Robinson & Beschta, 1990). La distribución longitudinal y la cantidad total de madera en un tramo dado de río, es una consecuencia del balance entre la cantidad de madera almacenada y reclutada, y de la capacidad del río para transportarla desde tramos de aguas arriba hacia tramos de aguas abajo, moviéndola desde un canal activo a llanuras aluviales (Benda & Bigelow, 2014; Martin & Benda, 2001; Schenk, Moulin, Hupp, & Richter, 2014). La descomposición y rotura de madera es una componente adicional para el cálculo de madera disponible, especialmente cuando se realizan balances de masas para periodos de tiempo extensos (Wohl, 2013). En este ámbito, (Martin & Benda, 2001) definieron la variación (ΔS) de la cantidad de LW almacenado dentro de un intervalo de tiempo (Δt) a lo largo de un tramo de río (Δx) como las diferencias entre la entrada (I), salida (O) y la descomposición (D) de LW (Eq. 1).

$$\Delta S = (I_{\Delta x} - O_{\Delta x} - D) * \Delta t \quad (\text{Eq. 1})$$

Erupciones volcánicas explosivas tienen la capacidad de destruir y arrasar rápidamente cientos de hectáreas de bosques en islas y riberas, junto con rellenar los valles de los ríos generando depósitos de sedimento piroclástico y madera de varios metros de espesor (Pierson & Major, 2014; Ulloa, Iroumé, Picco, et al., 2015). Los ajustes post-erupción del canal erosionan estos depósitos, produciendo el traspaso de madera hacia el



Fig. 1 – Material leñoso de gran tamaño previamente enterrado en sedimento volcánico, ahora expuesto por la erosión del río. [Fuente: Elaboración Propia]

río. Este es el caso del Río Blanco en el sur de Chile (Fig. 1), que fue severamente afectado por la erupción del volcán Chaitén el 2008 (Lara, 2009; Major & Lara, 2013; Major, Pierson, Hoblitt, & Moreno, 2013; Pierson, Major, & Amigo, 2013; Swanson, Jones, Crisafulli, & Lara, 2013; Ulloa, Iroumé, Mao, et al., 2015; Ulloa, Iroumé, Picco, et al., 2015).

La repentina erupción se produjo a través de dos cráteres contiguos de 400 y 200 m de diámetro (Duhart, Moreno, Basualto, Mella, & Muñoz, 2009), ubicados en el segmento norte del domo ancestral, expulsando explosivamente una gran cantidad de material piroclástico y gases a la atmósfera, formando una columna eruptiva de entre 10 a 15 km de altura. Posteriormente, en la mañana del 6 y 9 de Mayo se generaron dos explosiones mayores, con columnas de erupción que alcanzaron ~20 km de altura.

Luego de la fase explosiva inicial, sucesivos colapsos de los domos y lahares dirigidos principalmente al norte, este y sur, generados por periodos prolongados de lluvia intensa, fueron sepultando a la ciudad de Chaitén y generando gran impacto en los cauces presentes en los alrededores del volcán. Además explosiones laterales, colapsos gravitacionales y el rápido crecimiento y reactivación de los domos, generaron flujos piroclásticos de bloques y cenizas, donde el más importante fue generado el 19 de Febrero de 2009 (Duhart et al., 2009; Muñoz, Mella, & Moreno, 2009).

La madera muerta almacenada en los depósitos volcánicos en el fondo del valle de la cuenca del Río Blanco, puede ser una fuente de reclutamiento importante. Sin embargo, como la identificación visual de esta madera no es posible, la técnica geofísica basada en el Radar de Penetración Terrestre (GPR) surge como una posible solución para el estudio de la morfología y de la estructura interna de las capas de sedimento volcánico (Gomez, Lavigne, Lespinasse, Hadmoko, & Wassmer, 2008; Jara, 2015), permitiendo la posibilidad de cuantificar la madera enterrada, con el fin de definir de mejor manera la cantidad de madera en un tramo del río, como lo

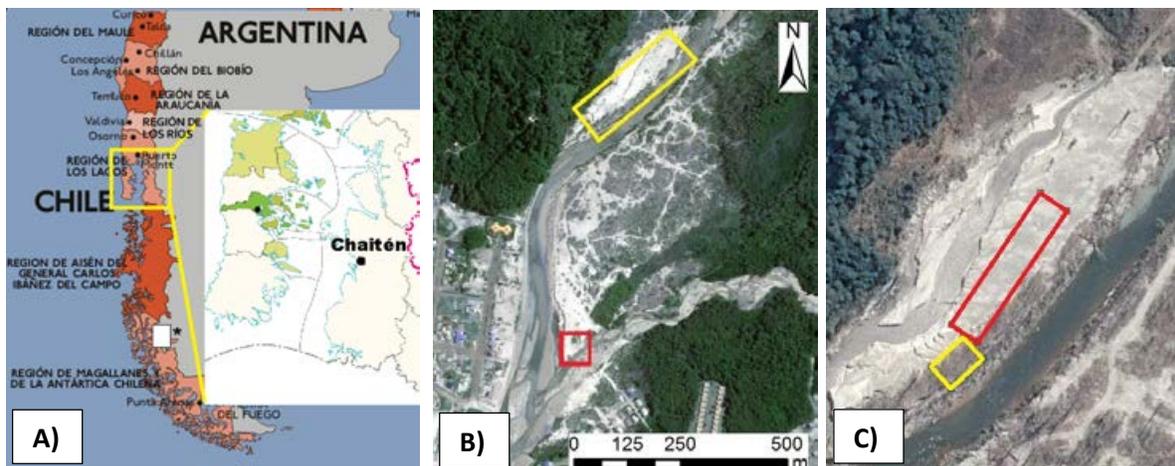


Fig. 2 – A) Ubicación de Chaitén, Chile. B) Rectángulo amarillo muestra la zona de estudio. Rectángulo rojo, muestra zona de calibración. [Fuente: Elaboración propia] C) Ampliación de la zona de estudio. En rojo se indica la Grilla Norte, en amarillo la Grilla Sur. [Fuente: Image © 2015 Digital Globe].

propone Martin y Benda (2001). En estudios dirigidos a identificar la distribución espacial de raíces y al cálculo de biomasa de estas para árboles vivos, el GPR ha demostrado ser una técnica rápida y no invasiva comparada con otros métodos tradicionales que son altamente destructivos y producen daños irreparables (Butnor, Doolittle, Kress, Cohen, & Johnsen, 2001; Gertisser, Cassidy, Charbonnier, Nuzzo, & Preece, 2012; Gomez et al., 2008; Satriani, Loperte, Proto, & Bavusi, 2010; Wohl, 2013). Sin embargo, hasta la fecha, esta técnica no ha sido usada para estimar el volumen de madera muerta en depósitos volcánicos, al menos de forma aproximada. Por otro lado, el GPR ha sido utilizado para realizar la caracterización geomorfológica y evaluar la evolución de las condiciones sedimentológicas (Botha et al., 2003; Bristow & Pucillo, 2006), pudiendo así determinar espesores de capas superficiales de sedimento, lo que sin duda es imprescindible para la definición de un volumen de control.

El objetivo de esta investigación es evaluar el potencial de los estudios geofísicos basados en la técnica del GPR para caracterizar la estratigrafía superficial de depósitos volcánicos, en este caso aplicada al Río Blanco, y la distribución espacial de la madera muerta enterrada. Considerando lo anterior, y tomando como base la aplicación de técnicas basadas en el uso del GPR, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible descubrir la morfología interna y la estructura de depósitos de sedimento volcánico, identificando una distribución espacial que permita una primera aproximación a la cuantificación de volúmenes de madera muerta?

2. Materiales y métodos.

2.1. Área de Estudio.

El estudio se concentra en un depósito de sedimento de origen volcánico ubicado en el borde noroeste del Río Blanco, inmediatamente aguas arriba de la ciudad de Chaitén, Chile ($43^{\circ} 29' 48.803''$ S $72^{\circ} 31' 13.738''$ W) (Fig. 1), la erosión y los ajustes del río exponen la madera enterrada de la zona (Fig. 2). Información más detallada de la erupción volcánica y los procesos sedimentológicos asociados al Río Blanco y la ubicación del área estudiada, pueden ser encontradas en Major & Lara, 2013; Pierson et al., (2013); Swanson et al., (2013); Ulloa, Iroumé, Mao, et al., (2015); Ulloa, Iroumé, Picco, et al. (2015).

2.2. Radar de Penetración Terrestre (GPR).

El radar de penetración terrestre es una técnica de prospección geofísica, basada en la detección de cambios en la permitividad dieléctrica de los materiales (este parámetro indica que tan bien la energía electromagnética es transmitida por un medio), a través de la emisión y posterior recepción de pulsos de ondas electromagnéticas que se propagan en un medio, como se aprecia en la Fig. 3.

La velocidad de propagación (v) de la onda electromagnética, está relacionada con la constante dieléctrica (ϵ) propia de cada material, según la eq.2 (Davis & Annan, 1989), donde c corresponde a la velocidad de propagación de onda en el aire $c = 3 * 10^8$ [m s⁻¹].

$$\sqrt{\epsilon} = \frac{c}{v} \quad (\text{eq. 2})$$

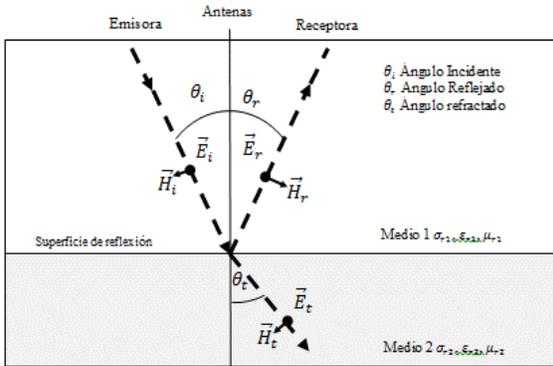


Fig. 3 - Refracción y reflexión de la onda incidente. [Fuente: Jara, 2015]

Lo anterior, junto con el parámetro del tiempo transcurrido entre la emisión y recepción de cada pulso electromagnético, permite (Por medio del Post-Proceso) definir la profundidad del objeto reflectante.

Para este estudio, se utilizó un equipo GPR MALA RAMAC X3M monocanal. Se utilizaron dos antenas blindadas de 250 y 500 MHz con 36 y 18 cm de separación entre antena emisora y receptora respectivamente.

El sistema es compacto, liviano, de bajo consumo de energía, versátil y fácil de usar, posee una unidad de control de radar integrado, montado directamente sobre la antena y con alimentación externa. (Jara, 2015).

Para el postproceso de datos se utilizó el Software alemán ReflexW V5.0.8 (Sandmeier, 2009).

El post-proceso posee gran importancia para una interpretación correcta de datos, normalmente los radargramas están contaminados con reflexiones extrañas y desordenadas. Por esta razón se deben limpiar y ajustar previo a una interpretación (Guo, Chen, Cui, Fan, & Lin, 2013).

En este estudio, el post-proceso consistió en una corrección estática, corrección del desplazamiento DC, reducción del ruido en una y dos dimensiones y ganancia.

En este sentido, la corrección estática se aplicó con el objetivo de eliminar el registro anticipado que se genera en la toma de datos. Es así como cada traza registra en primera instancia la amplitud de la onda aérea, seguida por la amplitud de la onda directa. Es debido a esto que es necesario modificar el origen de tiempos de propagación o tiempo cero de cada traza. El desplazamiento de tiempo necesario Δt se calcula como la diferencia entre el tiempo de llegada de la onda aérea (t_A) determinado según las amplitudes en los radargramas, menos el tiempo de llegada de la onda

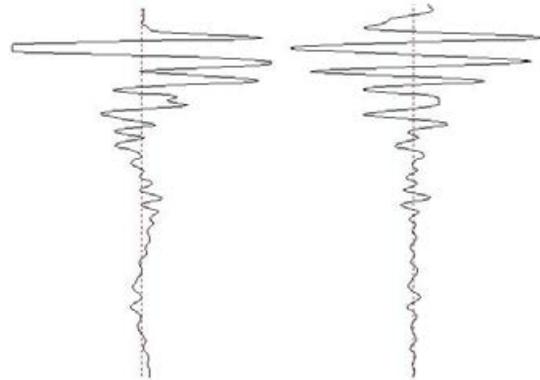


Fig. 4 – Izquierda: Traza extraída de un radargrama generado con una antena de 250 [MHz], se puede apreciar el desplazamiento DC de baja frecuencia a lo largo de la traza. Derecha: Mismo radargrama, con Bandpass Butterworth. [Fuente: Elaboración Propia].

directa, que depende de la separación entre antenas (d), y la velocidad de propagación de onda en el aire (eq.3).

$$\Delta t = - \left(t_A - \frac{d}{c} \right) \quad \text{eq. 3}$$

El desplazamiento DC es producido por ruido de baja frecuencia, que es capaz de desplazar el cero de una traza completa (Ver Fig. 4). Para corregir este desplazamiento basta aplicar un filtro de 1D, es decir que actúe independiente en cada traza.

En esta investigación se utilizó el filtro Band Pass Butterworth para corregir el desplazamiento DC, con valor de corte inferior de la mitad de la frecuencia central de la antena y un valor de una vez y media veces la frecuencia central de la antena para la frecuencia de corte superior, con esto se redujo tanto el ruido de alta y de baja frecuencia.

El filtrado bidimensional, es necesario para eliminar el ruido en común de todas las trazas, es habitual que este ruido se genere a partir de las ondas aéreas y directas, sin embargo puede también provenir del propio radar u otras fuentes.

A medida que la señal proveniente del pulso electromagnético se propaga por un medio, sufre una atenuación producto de la absorción de energía, la dispersión, y la divergencia esférica (Neto & De Medeiros, 2006). Lo anterior se traduce en una pérdida información en cada traza a medida que aumenta el tiempo, es por esta razón que en ocasiones se hace necesario aplicar una función de ganancia a la señal, esto es amplificar la amplitud de onda para cada traza, en especial para aquellas muestras alejadas del tiempo cero. No obstante, un abuso de la ganancia podría contaminar el radargrama

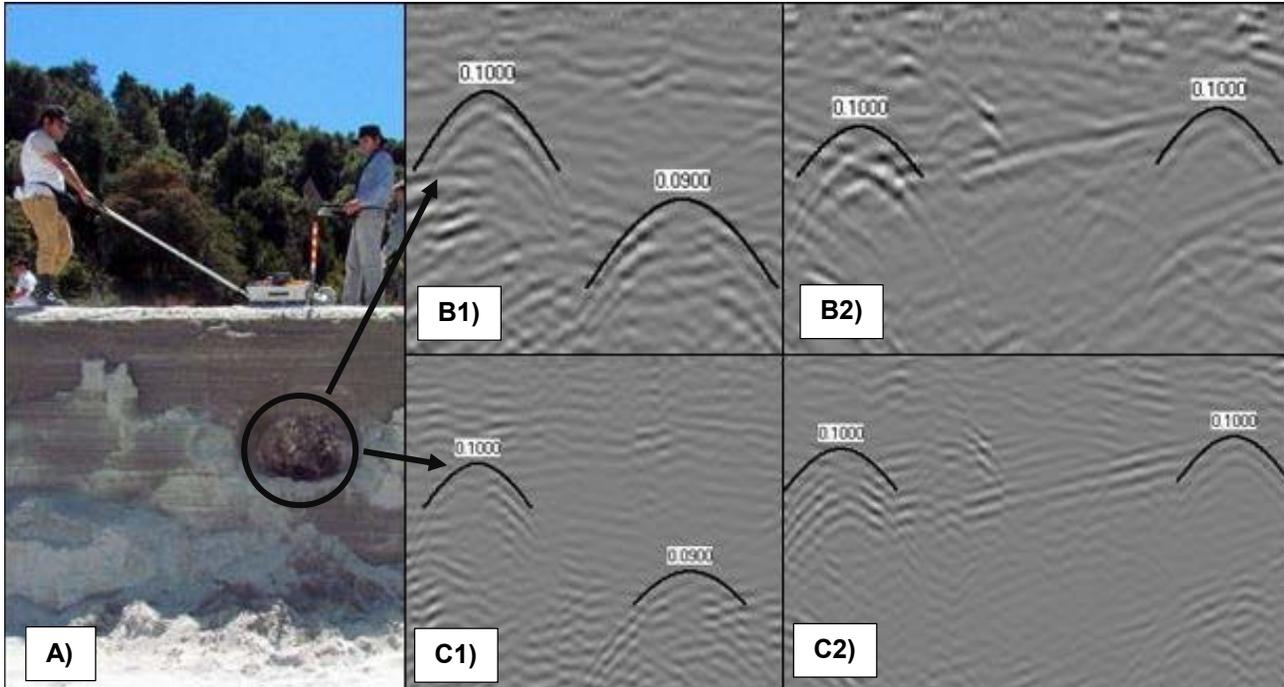


Fig. 5 – La imagen A, muestra el GPR justo en el instante en que pasa sobre un objeto de control. Los perfiles B1 y B2, fueron generados con la antena de 250 [MHz], sobre la misma porción de suelo que los perfiles C1 y C2 respectivamente, generados con antena de 500. [MHz]. En todos se pueden apreciar el ajuste hiperbólico correspondiente a reflexiones generadas por objetos de control similares al de la imagen A. [Fuente: Elaboración Propia].

generando ruido indeseado, empeorando la calidad de la imagen.

Para la interpretación de los radargramas obtenidos, se busca mantener una amplitud de onda similar a lo largo de cada traza, que permita analizar las capas más profundas de sedimento en las que la señal del radargrama es demasiado débil.

2.3. Campaña de Campo

2.3.1. Calibración de Terreno.

En la etapa inicial se busca fijar parámetros de campo, obtener la “firma” de lo que prospecta, y definir patrones de búsqueda, con el objetivo de caracterizar los radargramas a partir de objetos de control. Se utilizaron antenas de 250 y 500 [MHz] para obtener un primer grupo de radargramas, denominado “Grupo A”, con el propósito de determinar la velocidad de propagación de onda en la ceniza volcánica seca y húmeda, mediante la detección de elementos de control (Perfiles de acero), insertados a distancia y profundidad conocida en la ceniza, aprovechando las cárcavas naturales del lugar. Por otra parte, una vez obtenidos los radargramas, se comprueba la velocidad y la profundidad de dichos elementos a través un ajuste hiperbólico de velocidad y una conversión de tiempo-profundidad.

Posteriormente se obtiene un segundo grupo de radargramas, denominado “Grupo B” sobre perfiles con presencia de troncos de distintos diámetros en posiciones rigurosamente conocidas, puestos artificialmente (Fig. 5), con el fin de controlar que la distribución espacial de los elementos de control en terreno corresponde a las reflexiones obtenidas en los radargramas. Esto es lo que se define como la “firma” de LW, y permite definir los patrones de búsqueda que se utilizarán en los radargramas provenientes de las grillas.

A partir del grupo A de radargramas obtenidos y los objetos de control enterrados, se calculó una velocidad de propagación de onda de 90 [$m/\mu s$] para ceniza húmeda, y de 100 [$m/\mu s$] para ceniza seca. Esto se debe tener en consideración al momento de la interpretación de radargramas obtenidos cercanos (Mayor contenido de humedad) y alejados (Menor contenido de humedad) al río.

Por otra parte a través del ajuste hiperbólico se obtuvieron valores similares y la conversión tiempo-profundidad indica valores de profundidad que coinciden con los valores reales. No obstante, al realizar un ajuste hiperbólico para el grupo B de radargramas que posee objetos de control a mayores profundidades (hasta 2,0 m), se puede observar una disminución de velocidad a medida que aumenta la profundidad. En zonas superficiales se logró una velocidad de 100 [$m/\mu s$] que luego disminuye hasta 90 [$m/\mu s$] a una profundidad de 2

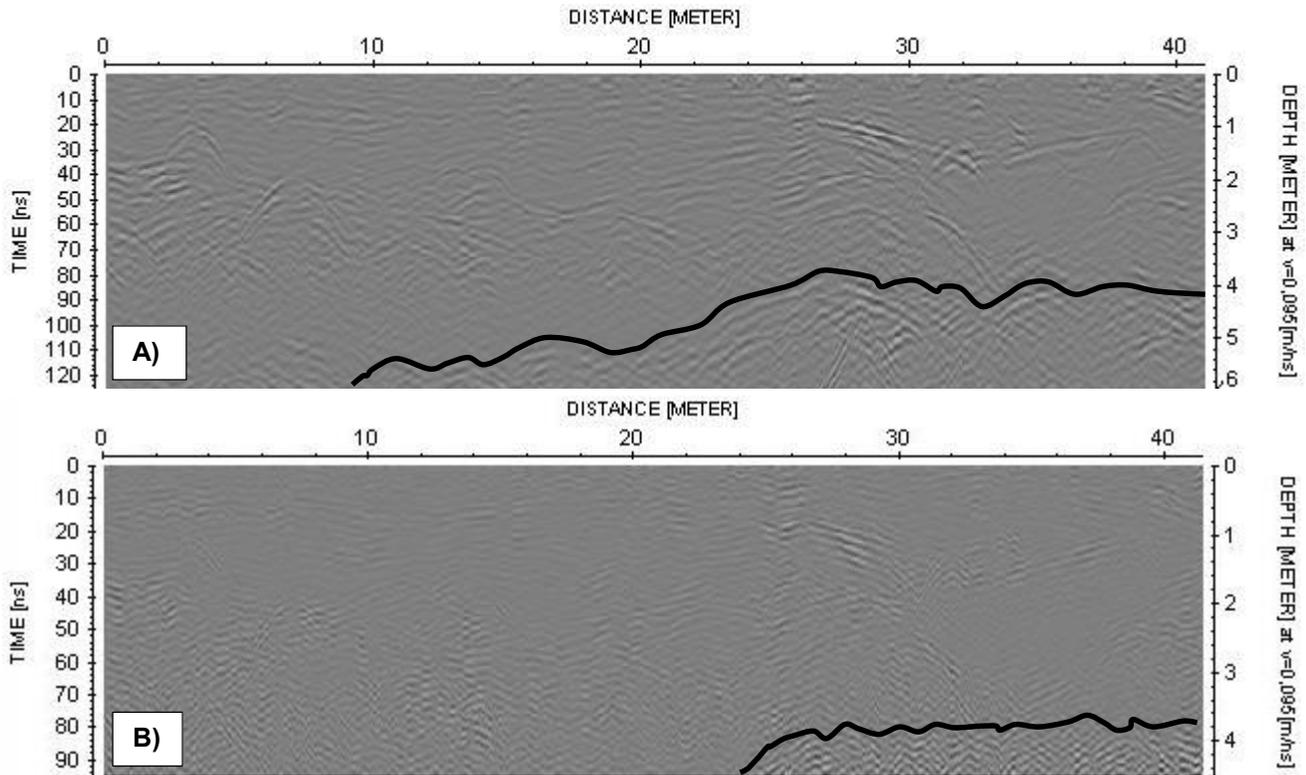


Fig. 6 - A) Radargrama generado con antena de 250 [MHz]. B) Radargrama generado con antena de 500 [MHz]. En negro se indica la separación entre ambos estratos. [Fuente: Elaboración Propia.]

[m]. Se asume que la disminución de velocidad está netamente relacionada a un aumento del contenido de humedad, que aumenta la constante dieléctrica del suelo, aumentando el tiempo de viaje de onda y causando un retraso de las reflexiones (Haarder et al., 2011; Truss et al., 2007).

Despejando la constante dieléctrica de la eq. 2 para el rango de velocidad conseguido, se obtiene $9 < \epsilon < 10$. Lo que está dentro de los rangos de correspondientes a un suelo Arcilloso ($5 < \epsilon < 30$) o limoso ($5 < \epsilon < 30$) (Davis & Annan, 1989).

No se percibieron diferencias significativas de velocidad entre los radargramas obtenidos con la antena de 250 y 500 MHz.

En los radargramas del grupo B fue posible distinguir de manera clara las reflexiones generadas por los elementos de control tanto para la antena de 250 como para la de 500 [MHz]. La Fig. 5 muestra una breve comparación entre lo obtenido entre las reflexiones adquiridas con antenas de 250 y 500 [MHz] para los mismos elementos de control.

2.3.2. Levantamiento de las Grillas

Se trazaron dos grillas cuadrículadas para la obtención de datos. Primero la “Grilla Sur”, más reducida,

de 27 x 18 [m], con perfiles separados cada 3 [m], con el objetivo (Aparte de los objetivos propios de la investigación) de evaluar y comparar la visualización de los radargramas generados con la antena de 250 y 500 [MHz].

Al comparar radargramas de ambas antenas, tanto con la de 250 [MHz], como con la de 500 [MHz] fue posible identificar hipérbolas asociadas a reflexiones de material leñoso, sin embargo, debido que la antena de 500 [MHz] tiene una mayor resolución a cambio de una pérdida en la capacidad de penetración, es que la función de ganancia que se debe aplicar es más potente que la aplicada sobre los radargramas obtenidos con la antena de 250 [MHz], lo que se traduce también en un aumento de ruido.

Considerando lo anterior, para la “Grilla Norte”, de 100 x 20 [m], con perfiles separados cada 5 [m], se utilizó sólo la antena de 250 [MHz], teniendo presente que el análisis de los radargramas usando esta antena, generó una resolución óptima y una profundidad de penetración máxima de 6 [m], mientras que la de 500 [MHz] penetró alrededor de 4-5 [m].

Los radargramas obtenidos fueron procesados según lo descrito en la sección 2.2 referida al GPR y su Post-proceso, incorporando además un modelo en 3D generado a partir de los radargramas de cada grilla,

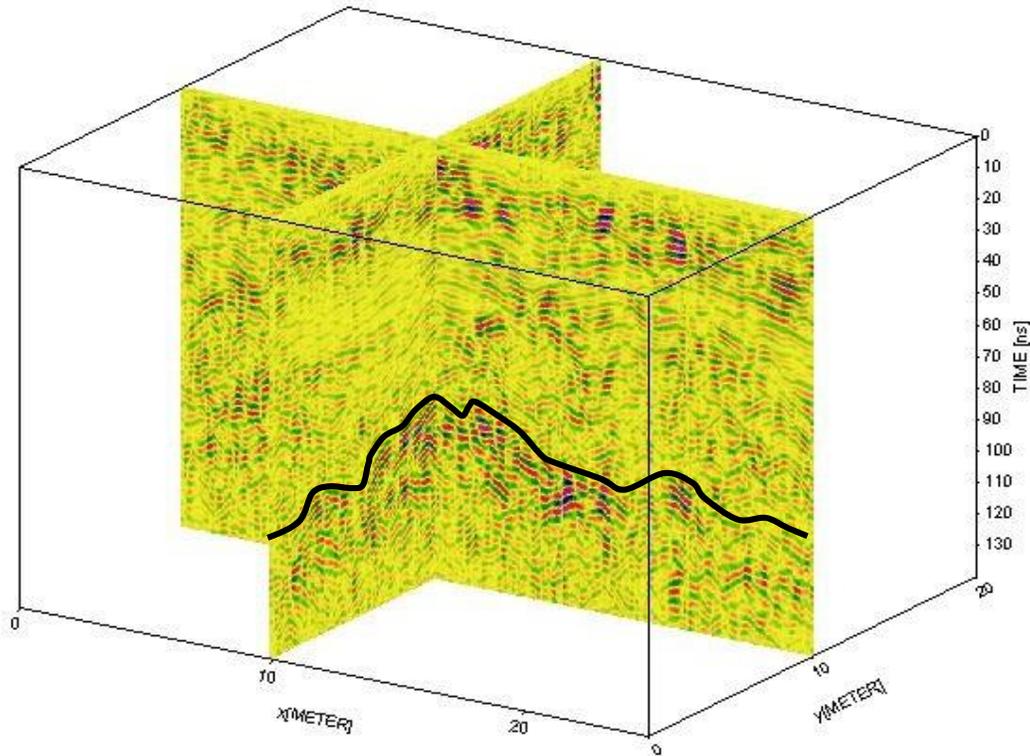


Fig. 7 – Representación tridimensional de dos perfiles perpendiculares pertenecientes a la grilla Norte (Antena 250 [MHz]). Línea negra indica la separación entre estratos. [Fuente: Elaboración Propia.]

aportando información acerca de la distribución espacial de la madera enterrada dentro del área de control.

3. Resultados

3.1. Caracterización de la Geometría Sedimentaria.

Si bien, tanto con la antena de 250 como con la de 500 [MHz], fue posible estimar la profundidad del sedimento volcánico más reciente, con la primera se logra una mejor definición, y una diferencia más notoria entre estratos (Ver Fig. 6)

A partir del grupo B de radargramas, se estimó que la capa superficial de sedimento volcánico, posee un espesor que varía entre los 4 y 6 [m] (Fig. 6). Por otra parte, a partir de los radargramas de la grilla Norte, se llega a un valor similar. Además, al momento de analizar tridimensionalmente radargramas transversales y longitudinales pertenecientes a esta grilla, es posible afirmar que la profundidad del sedimento volcánico tiende a converger a un mismo punto, como lo muestra la Fig.7.

3.2. Madera enterrada

Tanto en la Grilla Sur como en la Grilla Norte, se pudieron observar hipérbolas asociadas a reflexiones de

material leñoso, sin embargo, sólo en la Grilla Sur es posible relacionar en bastantes casos dos hipérbolas de radargramas paralelos a la presencia de un mismo trozo de madera. Para que esto suceda, no sólo debe coincidir la ubicación espacial de las hipérbolas en el radargrama, sino que deben también tener características geométricas similares.

Debido a que la Grilla Norte posee una separación entre radargramas mayor (5 m.) que la Grilla Sur (3 m), las reflexiones no fueron lo suficientemente consistentes como para relacionar hipérbolas de radargramas paralelos a un mismo trozo de madera.

Observando los radargramas post-procesados, es posible afirmar que el número de hipérbolas relacionadas a material leñoso es similar con ambas antenas, y en su mayoría corresponden a las mismas singularidades. Así también fue posible estimar un promedio de 6 hipérbolas relacionables a LW por cada 10 [m] de avance lineal por radargrama.

Además, con los radargramas procesados de la Grilla Sur, se crearon varios modelos tridimensionales. Uno de ellos es el mostrado en la Fig.8 A, creado a partir de la superposición de todos los radargramas longitudinales y transversales de dicha Grilla, donde se puede observar una posible distribución espacial de trozos de madera muerta enterrada para una porción de la Grilla Sur. Tanto en Fig. 8 B, en Fig. 8 B, como en Fig. 8 C, es posible

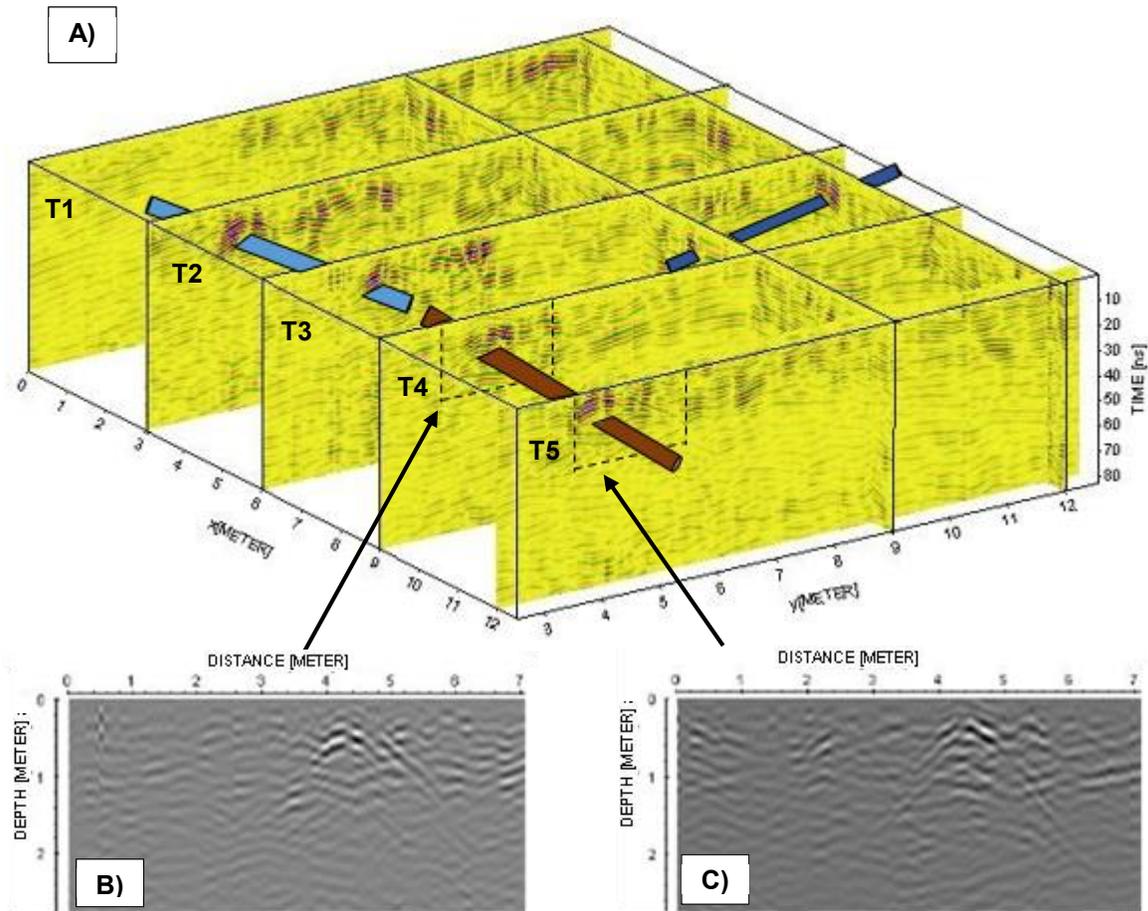


Fig. 8 – A) Porción de la grilla Sur representada tridimensionalmente, los cilindros de colores representan posible ubicación de material leñoso de gran tamaño enterrado. B) Radargrama correspondiente a la sección T4. C) Radargrama correspondiente a la sección T5. [Fuente: Elaboración Propia]

apreciar reflexiones asociadas a un mismo trozo de madera, representado tridimensionalmente en la Fig. 8 A.

Finalmente se calculó una primera aproximación al volumen de madera muerta enterrada en la grilla Sur. Con la ayuda de los modelos tridimensionales se estimó la longitud de los trozos de LW, que junto con el diámetro medio de los troncos observados en la superficie del área de control, entregaron la información necesaria para estimar los volúmenes. En base a esto, se tiene que bajo la superficie de 486 [m²], perteneciente al área de control definida por la Grilla Sur, el volumen de madera muerta enterrada es de 0,8 [m³], lo que representa que un 0,04% del total del volumen de control está compuesto por LW.

Este estudio permite validar el potencial de los estudios geofísicos basados en la técnica del radar de penetración terrestre. Los resultados demuestran que es posible utilizar esta técnica como una forma de estudiar el subsuelo desde el punto de vista de la geomorfología y sedimentología sobre suelos volcánicos. Además, en

general, la metodología aplicada puede ser extendida a otros tipos de suelos. Sin embargo, para que esto ocurra, es necesario conocer las limitaciones del método, y los factores, principalmente del entorno, que pueden influir en el levantamiento de los datos de campo, como por ejemplo el contenido de humedad del suelo.

Por otra parte, el método permite observar ciertos patrones de la distribución interna de madera muerta enterrada en ceniza, sin embargo para ir más allá y calcular directamente el volumen de esta, es necesario realizar campañas en que se desarrollen estudios paramétricos que relacionen detalladamente los datos obtenidos en terreno con la realidad del subsuelo.

4. Conclusiones.

La presente investigación muestra la eficacia del método basado en el Radar de Penetración Terrestre (GPR) para el estudio de la morfología interna y la

estructura de depósitos de sedimentos post-eruptivos. Demuestra ser un método rápido, económico y no invasivo para caracterizar el material leñoso de gran tamaño en depósitos volcánicos. En este sentido, las conclusiones obtenidas son las siguientes:

Es totalmente factible aplicar esta técnica a la geomorfología y detección de madera muerta enterrada, sin embargo se requiere realizar previamente una calibración de parámetros de campo adecuada al lugar de estudio y una discretización fina del área de control estudiada.

Respecto a las antenas utilizadas, ambas demostraron ser útiles, sin embargo los radargramas generados con la antena de 250 [MHz] poseen una resolución suficiente tanto para el estudio de la geomorfología, como para identificar el material leñoso de gran tamaño, mientras que la antena de 500 [MHz] puede llegar a generar en ocasiones demasiado ruido.

La caracterización geomorfológica del suelo es posible estudiarla en radargramas individuales, sin embargo la generación de un modelo tridimensional, que relacione un radargrama con otro, sin duda facilita la comprensión de la geomorfología de la porción de suelo estudiada.

Si bien es posible el estudio de la distribución espacial de la madera muerta enterrada a partir de perfiles puntuales, queda mejor representada mediante el análisis de los modelos tridimensionales, con los que es posible caracterizar trozos de LW, buscando patrones de búsqueda de singularidades para obtener una primera aproximación a los volúmenes de madera.

Para este caso en particular, con una profundidad asociada a la depositación sedimentaria de material volcánico que varía entre los 4 y 5 [m], la estimación de las longitudes de trozos de LW enterrados y el valor medio de los diámetros de troncos observados sobre el área de estudio, se estimó que existen 0,0004 [m³] por cada 1 [m³] de sedimento volcánico, lo que representa en términos porcentuales que un 0,04% del sedimento volcánico corresponde a madera muerta enterrada.

Trabajos futuros estarán orientados a la exploración de la sub-superficie mediante el mapeo tridimensional de alta resolución para obtener la distribución espacial y el volumen de madera muerta enterrada de manera más precisa, junto con el estudio de la estratigrafía asociada a los cambios geomorfológicos.

5. Agradecimientos.

El autor de esta investigación agradece el financiamiento otorgado bajo el marco del proyecto FONDECYT 1141064.

Se agradece también al Núcleo de Investigación en Riesgos Naturales y Antropogénicos (RINA) y a la Dirección de Investigación y de Desarrollo de la Universidad Austral de Chile.

6. Referencias

- Benda, L., & Bigelow, P. (2014). On the patterns and processes of wood in northern California streams. *Geomorphology*, 209, 79–97. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.11.028>
- Bilby, R. E., & Bisson, P. A. (1998). Function and Distribution of Large Woody Debris. In R. J. Naiman & R. E. Bilby (Eds.), *River Ecology and Management: Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*. (pp. 324–346). New York: Springer.
- Botha, G. A., Bristow, C. S., Porat, N., Duller, G., Armitage, S. J., Roberts, H. M., Schoeman, P. (2003). Evidence for dune reactivation from GPR profiles on the Maputaland coastal plain, South Africa. *Geological Society London Special Publications*, 211(1), 29–46. <http://doi.org/10.1144/GSL.SP.2001.211.01.03>
- Bristow, C. S., & Pucillo, K. (2006). Quantifying rates of coastal progradation from sediment volume using GPR and OSL: the Holocene fill of Guichen Bay, south-east South Australia. *Sedimentology*, 53(4), 769–788. <http://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2006.00792.x>
- Butnor, J. R., Doolittle, J. A., Kress, L., Cohen, S., & Johnsen, K. H. (2001). Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree Physiology*, 21(17), 1269–1278.
- Davis, J. L., & Annan, A. P. (1989). Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37(5), 531–551.
- Duhart, P., Moreno, H., Basualto, D., Mella, M., & Muñoz, J. (2009). Erupción en curso del volcán Chaitén: productos, impactos y colapso parcial de domos del 19 de febrero de 2009. In *XII Congreso Geológico Chileno*. Santiago.
- Gertisser, R., Cassidy, N. J., Charbonnier, S. J., Nuzzo, L., & Preece, K. (2012). Overbank block-and-ash flow deposits and the impact of valley-derived, unconfined flows on populated areas at Merapi volcano, Java, Indonesia. *Natural Hazards*, 60(2), 623–648. <http://doi.org/10.1007/s11069-011-0044-x>
- Gomez, C., Lavigne, F., Lespinasse, N., Hadmoko, D. S., & Wassmer, P. (2008). Longitudinal structure of pyroclastic-flow deposits, revealed by GPR survey, at Merapi Volcano, Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(4), 439–447. <http://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.04.012>
- Guo, L., Chen, J., Cui, X., Fan, B., & Lin, H. (2013). Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: a review. *Plant and Soil*, 362(1), 1–23. <http://doi.org/10.1007/s11104-012-1455-5>
- Gurnell, A. M. (2013). Wood in Fluvial Systems. In J. F. Shroder (Ed.), *Treatise on Geomorphology* (Academic P, pp. 163 – 188). San Diego, CA. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00236-0>
- Gurnell, A., Tockner, K., Edwards, P., & Petts, G. (2005). Effects of deposited wood on biocomplexity of river corridors. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3(7), 377 – 382.
- Haarder, E. B., Looms, M. C., Jensen, K. H., & Nielsen, L. (2011). Visualizing Unsaturated Flow Phenomena Using High-Resolution Reflection Ground Penetrating Radar. *Vadose Zone Journal*, 10(1), 84–97. <http://doi.org/10.2136/vzj2009.0188>
- Hairston-Strang, A. B., & Adams, P. W. (1998). Potential large woody debris sources in riparian buffers after harvesting in Oregon, USA. *Forest Ecology and Management*, 112(1-2), 67–77.

- [http://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00311-9](http://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00311-9)
- Hering, D., Kail, J., Eckert, S., Gerhard, M., Meyer, E. I., Mutz, M., ... Weiss, I. (2000). Coarse Woody Debris Quantity and Distribution in Central European Streams. *International Review of Hydrobiology*, 85(1), 5–23.
- Jara, C. (2015). *Exploración Geofísica Mediante la Técnica del Radar de Penetración Terrestre. Un Estado del Conocimiento*. Universidad Austral de Chile.
- Keller, E. A., & Swanson, F. J. (1979). Effects of large organic material on channel form and fluvial processes. *Earth Surface Processes*, 4(4), 361–380. <http://doi.org/10.1002/esp.3290040406>
- Lara, L. E. (2009). The 2008 eruption of the Chaitén Volcano , Chile : a preliminary report. *Andean Geology*, 36(1), 125–129.
- Major, J. J., & Lara, L. E. (2013). Overview of Chaitén Volcano , Chile , and its 2008-2009 eruption. *Andean*, 40(2), 196–215. <http://doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a01>
- Major, J. J., Pierson, T. C., Hoblitt, R. P., & Moreno, H. (2013). Pyroclastic density currents associated with the 2008-2009 eruption of Chaitén Volcano (Chile): Forest disturbances , deposits , and dynamics. *Andean Geology*, 40(2), 324–358. <http://doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a09>
- Martin, D. J., & Benda, L. E. (2001). Patterns of instream wood recruitment and transport at the watershed scale. *Transactions of the American Fisheries Society*, 130(5), 940–958. [http://doi.org/10.1577/1548-8659\(2001\)130<0940:POIWR>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1577/1548-8659(2001)130<0940:POIWR>2.0.CO;2)
- May, C. L., & Gresswell, R. E. (2003). Processes and rates of sediment and wood accumulation in headwater streams of the Oregon Coast Range, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 409–424. <http://doi.org/10.1002/esp.450>
- Mazzorana, B., Zischg, A., Largiader, A., & Hübl, J. (2009). Hazard index maps for woody material recruitment and transport in alpine catchments. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(1), 197–209.
- Muñoz, J., Mella, M., & Moreno, H. (2009). Petrogénesis del magma riolítico de la fase inicial explosiva de mayo 2008 del volcán Chaitén , Andes del Sur. In *XII Congreso Geológico Chileno*. Santiago.
- Mutz, M., Piégay, H., Gregory, K. J., Borchardt, D., Reich, M., & Schmieder, K. (2006). Perception and evaluation of dead wood in streams and rivers by German students. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 36(2), 110–118. <http://doi.org/10.1016/j.limno.2006.01.001>
- Neto, P. X., & De Medeiros, W. E. (2006). A practical approach to correct attenuation effects in GPR data. *Journal of Applied Geophysics*, 59(2), 140–151. <http://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.09.002>
- Piégay, H. (2003). Dynamics of wood in large rivers. In S. V. Gregory, K. L. Boyer, & A. M. Gurnell (Eds.), *The ecology and Management of Wood in World Rivers* (1st ed., p. 444). Bethesda, Maryland. Retrieved from <http://andrewsforest.oregonstate.edu/pubs/pdf/pub3728.pdf>
- Pierson, T. C., & Major, J. J. (2014). Hydrogeomorphic Effects of Explosive Volcanic Eruptions on Drainage Basins. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42, 436 – 507. <http://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054913>
- Pierson, T. C., Major, J. J., & Amigo, Á. (2013). Acute sedimentation response to rainfall following the explosive phase of the 2008 – 2009 eruption of Chaitén volcano , Chile. *Bulletin of Volcanology*, 75(5), 1–17. <http://doi.org/10.1007/s00445-013-0723-4>
- Ravazzolo, D., Mao, L., Picco, L., & Lenzi, M. A. (2015). Tracking log displacement during floods in the Tagliamento River using RFID and GPS tracker devices. *Geomorphology*, 228, 226–233. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.012>
- Reeves, G. H., Burnett, K. M., & McGarry, E. V. (2003). Sources of large wood in the main stem of a fourth-order watershed in coastal Oregon. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(8), 1363–1370. <http://doi.org/10.1139/x03-095>
- Robinson, E. G., & Beschta, R. L. (1990). Characteristics of coarse woody debris for several coastal streams of southeast Alaska, USA. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 47(9), 1684–1693. <http://doi.org/10.1139/f90-193>
- Sandmeier, K. J. (2009). ReflexW V 5.0.8. Karlsruhe, Germany.
- Satriani, A., Loperte, A., Proto, M., & Bavusi, M. (2010). Building damage caused by tree roots: laboratory experiments of GPR and ERT surveys. *Advances in Geosciences*, 24, 133–137. <http://doi.org/10.5194/adgeo-24-133-2010>
- Schenk, E. R., Moulin, B., Hupp, C. R., & Richter, J. M. (2014). Large wood budget and transport dynamics on a large river using radio telemetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(4), 487–498. <http://doi.org/10.1002/esp.3463>
- Seo, J. II, Nakamura, F., & Chun, K. W. (2010). Dynamics of large wood at the watershed scale : a perspective on current research limits and future directions. *Landscape and Ecological Engineering*, 6(2), 271–287. <http://doi.org/10.1007/s11355-010-0106-3>
- Swanson, F. J., Jones, J. A., Crisafulli, C. M., & Lara, A. (2013). Effects of volcanic and hydrologic processes on forest vegetation : Chaitén Volcano , Chile. *Andean Geology*, 40(2), 359–391. <http://doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a10>
- Swanson, F. J., & Lienkaemper, G. W. (1978). *Physical consequences of large organic debris in pacific northwest streams*. Portland, Oregon.
- Truss, S., Grasmueck, M., Vega, S., & Viggiano, D. A. (2007). Imaging rainfall drainage within the Miami oolitic limestone using high-resolution time-lapse ground-penetrating radar. *Water Resources Research*, 43(3). <http://doi.org/10.1029/2005WR004395>
- Ulloa, H., Iroumé, A., Mao, L., Andreoli, A., Diez, S., & Lara, L. E. (2015). USE OF REMOTE IMAGERY TO ANALYSE CHANGES IN MORPHOLOGY AND LONGITUDINAL LARGE WOOD DISTRIBUTION IN THE BLANCO RIVER AFTER THE 2008 CHAITÉN VOLCANIC ERUPTION , SOUTHERN CHILE. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 97(36), 523–541. <http://doi.org/10.1111/geoa.12091>
- Ulloa, H., Iroumé, A., Picco, L., Korup, O., Aristide, M. A., Mao, L., & Ravazzolo, D. (2015). Massive biomass flushing despite modest channel response in the Rayas River following the 2008 eruption of Chaitén volcano , Chile. *Geomorphology*, 250, 397–406. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.019>
- Wohl, E. (2013). Floodplains and wood. *Earth Science Reviews*, 123, 194–212. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.009>