

**“Convenio de Cooperación y Transferencia entre la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública y la Universidad de Chile para la Instalación, Operación, Funcionamiento y Mantención de Instrumentos para Monitorear la Falla San Ramón” (Resolución Afecta N°41, de fecha 20 de junio de 2016, de ONEMI)**

**“Monitoreo Sísmico y Potencial Sismogénico de la Falla San Ramón”**

**Realizado por el Centro Sismológico Nacional y el Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile**

**Informe Final Técnico**

**Santiago, 29 de marzo de 2019**

## Resumen Ejecutivo

El presente informe da cuenta de los resultados obtenidos del estudio *“Monitoreo Sísmico y Potencial Sismogénico de la Falla San Ramón”*, en el marco del *“Convenio de Cooperación y Transferencia entre la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública y la Universidad de Chile para la Instalación, Operación, Funcionamiento y Mantenimiento de Instrumentos para Monitorear la Falla San Ramón”* (Resolución Afecta N°41, de fecha 20 de junio de 2016, de ONEMI). El principal objetivo del presente Convenio fue la *“instalación, operación, funcionamiento y mantenimiento de instrumentos para monitorear la Falla de San Ramón”*; en forma adicional, se buscó avanzar en la evaluación del potencial sismogénico de esta falla.

De acuerdo a las actividades comprometidas en el convenio, se adquirieron e instalaron 7 estaciones sismológicas permanentes, que se incorporaron a las de la red del Centro Sismológico Nacional, se instalaron 3 estaciones sismológicas proporcionadas por la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CChEN), se instalaron 5 estaciones GPS de observación permanente, se recolectaron, analizaron y relocalizaron los sismos bajo el frente cordillerano de Santiago y se realizó una trinchera en cerro Calán para la selección de muestras que permitirán datar los últimos eventos sísmicos en la falla.

Por otra parte, el proyecto permitió perforar un pozo en las dependencias de la CChEN, donde se instaló una estación sismológica a 100 m de profundidad (S-2), y realizar un sondaje de 200 m de profundidad en el escarpe de la Falla San Ramón (S-1). Este último permitió ver por primera vez la magnitud de la estructura en profundidad.

Como aporte del Departamento de Geología, se realizó un perfil geofísico que atraviesa por los sitios donde se ejecutaron los sondajes S-1 y S-2.

El estudio sismológico de la sismicidad del frente Cordillerano, realizada en este proyecto, permitió confirmar la actividad de la Falla San Ramón (FSR), con una sismicidad ubicada en el pie de una rampa a unos ~15 km de profundidad. La rampa en sí no presenta sismicidad lo cual sugiere un trabamamiento de la falla con posibilidad de ruptura de gran amplitud. La sismicidad en profundidad interpretada como asociada a la falla, da lugar a pensar que la Falla San Ramón presenta una extensión hacia el sur por una longitud total de ~50 km. El sismo característico que podría romper la Falla San Ramón es de  $M_w=7,5$ . Este sismo generaría aceleraciones en el área metropolitana de Santiago que podrían superar los 0,7 g y ruptura en superficie. Los sectores, en los que se espera una mayor aceleración, son los que se encuentran próximos al escarpe de la falla.

Las mediciones geodésicas sugieren un gradiente en la deformación a lo largo de la FSR. Si bien se puede confirmar que existe deformación residual en torno a la FSR, estos valores están dentro de los

errores de medición de los GPS, lo que obliga necesariamente a remedir las estaciones semi-permanentes en campañas anuales o cada dos años.

En el sondaje S-1, realizado en el escarpe de falla de la Falla San Ramón (FSR), se identificaron tres unidades principales. La unidad más somera, de 40 m de espesor, corresponde a gravas con clastos volcánicos y es asignada a la unidad Cuaternaria Antigua. La unidad intermedia, denominada Secuencia Volcánica tiene un espesor de 141,3 metros y contiene tobas multicolores, lavas e ignimbritas. Esta secuencia se asocia al miembro inferior de la Formación Abanico. La tercera unidad, con un espesor de 18,7 metros en el sondaje, consiste en sedimentos cuaternarios, principalmente gravas con clastos de origen ígneo extrusivo e intrusivos, que se asignan a la unidad Cuaternaria Reciente.

Por otra parte, en el sondaje S-1 se logró distinguir una zona de daño permeable de aproximadamente 50 metros de espesor, ubicada desde los 130 metros de profundidad hasta el contacto de la Secuencia Volcánica con las Gravas Inferiores (181,3 m). En esta zona de daño se ubican pequeñas fallas secundarias que aumentan la permeabilidad del protolito.

Junto a lo anterior, entre los 160,3 y 181,3 m, el sondaje S-1 atravesó un núcleo de falla discontinuo representado por 4 zonas de brechas de falla tipo mosaico, las cuales se encuentran distribuidas en la Secuencia Volcánica e intercaladas con zonas de daño. Estas zonas de brechas de falla mosaico tienen espesores de entre [15 - 130 cm] y en total suman 2,7 metros. La zona de brecha principal tiene un espesor de 130 cm y se encuentra al final de la Secuencia Volcánica en contacto con las Gravas Inferiores.

Lo anterior permite deducir que el sondaje S-1 atravesó la Falla San Ramón (FSR), una falla inversa que produjo el cabalgamiento de la Formación Abanico sobre las Gravas Inferiores.

Entre los minerales encontrados en la salbanda de falla se encuentran laumontita, illita, esmectita y arcillas de capas mixta (mixed-layer). La laumontita tiene un origen hidrotermal, alterando tanto el protolito como la zona de falla. En los espacios vacíos generados por la trituración del protolito se deposita una variedad de arcillas, entre las cuales se pudo reconocer illita y esmectita. La illita, se presenta en ambas gravas (Superiores e Inferiores) y también en la secuencia volcánica en las zonas donde las ignimbritas son el protolito principal.

El porcentaje de esmectita aumenta significativamente en las zonas de núcleo de falla (brechas de falla). La disminución de tamaño de grano y la cristalización de minerales hidrotermales rellenoando espacios, ayudaría a que este núcleo de falla sea una barrera para los fluidos los cuales serían desviados siguiendo la estructura.

Con las muestras extraídas del sondaje S-2 se concluyó que solo atravesó sedimentos pertenecientes a depósitos cuaternarios de la cuenca de Santiago. La información de los resultados obtenidos se acopló de forma muy certera al perfil de resistividad de Díaz et al. (2014), confirmándose una vergencia oeste y un manto estimado de entre [54° - 60°E] para la FSR.

Considerando un manto estimado de 60° la zona de daño tendría un espesor de 25 metros y el núcleo de falla total un espesor de 1,35 metros. El espesor del núcleo de falla principal es de 65 cm.

Los resultados de la caracterización morfotectónica realizada en este proyecto sugieren que las cuencas de los ríos Mapocho y Maipo están afectadas por varios procesos erosionales tales como, los deslizamientos de tierra y las antiguas glaciaciones que localizan la erosión en los sitios de mayor altura. La sinuosidad del frente de montaña, la forma de la cuenca y la pendiente promedio indica que las zonas como Lo Barnechea y Santiago Oriente se ven más afectadas por la tectónica activa. Estas cuencas, más pequeñas y de altura promedio baja, no son afectadas por procesos glaciares y de forma menor por los procesos difusivos.

Los índices geomorfológicos para la zona de Pirque sugieren que está menos afectada por la erosión o la tectónica.

## Monitoreo Sísmico y Potencial Sismogénico de la Falla San Ramón

### Tabla de contenido

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUCCIÓN .....                                                   | 8  |
| 1.1 Equipo de trabajo .....                                             | 9  |
| 1.2 Presupuesto del estudio.....                                        | 9  |
| 1.2 Estructura del informe .....                                        | 10 |
| 2. MARCO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO .....                            | 11 |
| 2.1 Antecedentes .....                                                  | 11 |
| 2.2 Caracterización geológico-estructural de la cuenca de Santiago..... | 12 |
| 2.3 Referencias.....                                                    | 14 |
| 3. INFORME TÉCNICO DE ESTACIONES DE MONITOREO .....                     | 17 |
| 4. CAMPAÑA DE MEDICIONES GPS SEMIPERMANENTE .....                       | 18 |
| 4.1 Introducción .....                                                  | 18 |
| 4.2 Metodología .....                                                   | 18 |
| 4.3 Resultados .....                                                    | 20 |
| 4.4 Consideraciones Finales .....                                       | 24 |
| 4.5 Referencias.....                                                    | 25 |
| 5. REALIZACIÓN DE POZO PARA INSTALACIÓN DE ESTACIÓN SISMOLÓGICA.....    | 27 |
| 5.1 Ubicación y tipo de pozo .....                                      | 27 |
| 5.2 Estratigrafía del pozo (S-2) .....                                  | 28 |
| 6. SONDAJE EN LA FALLA SAN RAMON – SONDAJE S-1 .....                    | 29 |
| 6.1 Ubicación del sondeaje S-1 .....                                    | 29 |
| 6.2 Descripción Sondeaje S-1 .....                                      | 30 |
| 6.2.1. Unidad 1 (Gravas Superiores).....                                | 32 |
| 6.2.2 Unidad 2 (Secuencia Volcánica) .....                              | 34 |
| 6.2.3 Unidad 3 (Gravas Inferiores) .....                                | 37 |
| 6.2.4 Conteo de Clastos.....                                            | 40 |
| 6.2.5 Difractometría de Rayos X (DRX).....                              | 43 |

|       |                                                                |    |
|-------|----------------------------------------------------------------|----|
| 6.2.6 | FTIR.....                                                      | 43 |
| 6.2.7 | SEM.....                                                       | 47 |
| 6.3   | Testigoteca .....                                              | 49 |
| 6.4   | Perfiles.....                                                  | 50 |
| 6.4.1 | Perfil de Resistividad .....                                   | 50 |
| 6.4.2 | Perfil Geológico .....                                         | 53 |
| 6.5   | Conclusiones.....                                              | 56 |
| 6.6   | Referencias.....                                               | 57 |
| 7.    | MONITOREO SÍSMICO DE LA FALLA SAN RAMÓN.....                   | 60 |
| 7.1   | Introducción .....                                             | 60 |
| 7.2   | Metodología .....                                              | 60 |
| 7.3   | Resultados .....                                               | 64 |
| 7.4   | Peligro sísmico.....                                           | 66 |
| 7.5   | Conclusiones.....                                              | 71 |
| 7.6   | Referencias.....                                               | 71 |
| 8.    | MORFOTECTÓNICA .....                                           | 73 |
| 8.1   | Introducción .....                                             | 73 |
| 8.2   | Metodología .....                                              | 73 |
| 8.2.1 | Geomorfología .....                                            | 73 |
| 8.2.2 | Perfiles de los ríos .....                                     | 74 |
| 8.2.3 | Los isótopos cosmogénicos ( $^{10}\text{Be}$ ) .....           | 75 |
| 8.3   | Caracterización de las cuencas.....                            | 82 |
| 8.3.1 | Zona cordillerana de Lo Barnechea.....                         | 84 |
| 8.3.2 | Cuencas de los ríos Mapocho y Maipo.....                       | 86 |
| 8.3.3 | Zona Oriente de Santiago (entre los ríos Mapocho y Maipo)..... | 89 |
| 8.3.4 | Zona de Pirque (al sur del río Maipo).....                     | 92 |
| 8.4   | Correlación entre las variables.....                           | 94 |
| 8.5   | Conclusiones.....                                              | 98 |
| 8.6   | Referencias.....                                               | 98 |

## **ANEXOS**

**Anexo I: Fichas estaciones sismológicas instaladas**

**Anexo II: Resultado mediciones GPS**

**Anexo III: Informe IDIEM construcción pozos**

**Anexo IV: Descripciones geológicas, resultados SEM y DRX**

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente informe da cuenta de los resultados obtenidos del estudio “Monitoreo Sísmico y Potencial Sismogénico de la Falla San Ramón” (Figura 1.1).

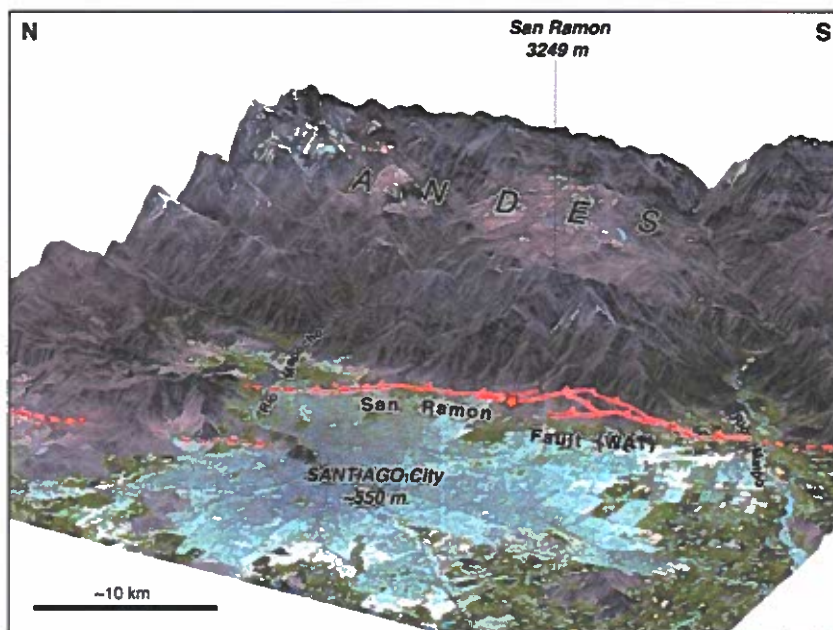


**Figura 1.1.** Ubicación de la Falla San Ramón en el borde oriente de Santiago (Vargas et al., 2014).

El estudio se enmarca en el “Convenio de Cooperación y Transferencia entre la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública y la Universidad de Chile para la Instalación, Operación, Funcionamiento y Mantenimiento de Instrumentos para Monitorear la Falla San Ramón” (Resolución Afecta N°41, de fecha 20 de junio de 2016, de ONEMI).

El principal objetivo del convenio fue la “instalación, operación, funcionamiento y mantenimiento de instrumentos para monitorear la Falla de San Ramón”. En forma adicional se buscó avanzar en la evaluación del potencial sismogénico de esta falla.

Las actividades comprometidas en el convenio se encuentran estipuladas en la carta Gantt del mismo (Figura 1.2), siendo agosto de 2016 el mes de inicio efectivo del estudio.

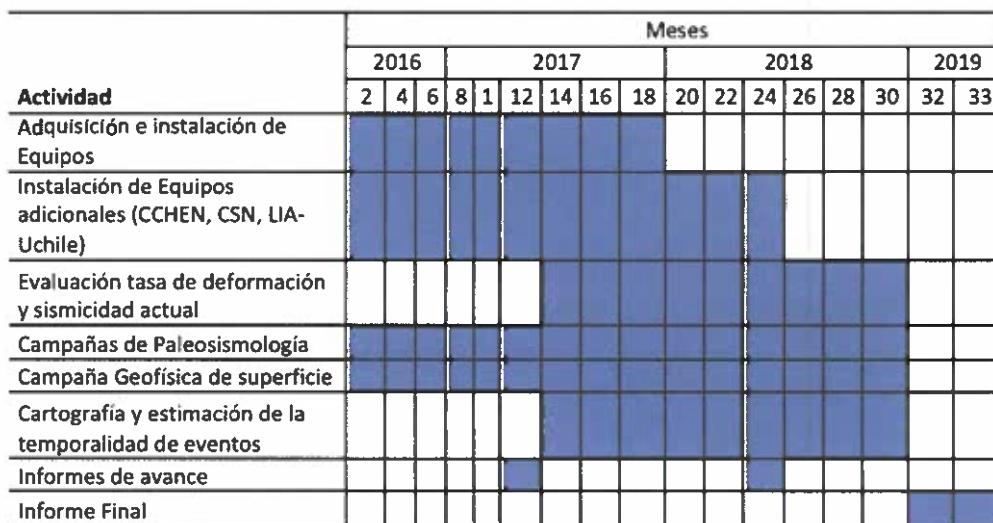


Figura 1.2. Carta Gantt y actividades comprometidas en el Convenio.

### 1.1 Equipo de trabajo

El equipo de trabajo en el área de geología fue liderado por el Dr. Gabriel Vargas (Director) y por la MSc. Sofía Rebolledo (Subdirectora).

De acuerdo con lo planteado en el convenio, se contrató como apoyo, por tiempo completo, a los doctores Jean Baptiste Ammirati en sismología y Rachel Abrahams, en tectónica y paleosismología.

Adicionalmente, en forma temporal se contrató a los geólogos:

- Sebastián Menares, como apoyo para la descripción y el estudio de los sondajes,
- Ángelo Villalobos, como apoyo para la realización de la campaña con GPS semipermanente,
- Verónica Mardones, en el área de tectónica.

### 1.2 Presupuesto del estudio

El presupuesto total del estudio, de \$465.584.558, se encuentra ejecutado en un 100%.

## **1.2 Estructura del informe**

El presente informe corresponde al Informe Final del estudio geológico orientado a avanzar en el potencial sísmico de la Falla San Ramón (FSR). Debido a la variedad de temas tratados se optó por mostrar cada tema en capítulos independientes, cada uno con los aspectos metodológicos, resultados, conclusiones y referencias pertinentes.

El capítulo 2 corresponde al marco geológico del área donde se realizaron las prospecciones durante este proyecto, el capítulo 3 contiene el informe técnico de las estaciones de monitoreo relacionadas con este estudio, el capítulo 4 muestra lo relativo a la campaña de mediciones GPS, el capítulo 5 se refiere a la realización del pozo y a la instalación de una estación sismológica en profundidad en terrenos de la CChEN, el capítulo 6 presenta el estudio de los testigos del sondaje S-1, de 200 m de profundidad, que atravesó la FSR, el capítulo 7 muestra los resultados del estudio sísmico de este proyecto, en particular la sismicidad asociada a la FSR y el capítulo 8 contiene los avances relativos a morfotectónica del frente cordillerano frente a Santiago.

## 2. MARCO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 2.1 Antecedentes

La Cordillera de los Andes es una de las cadenas montañosas más extensas del planeta, alcanzando más de 7000 km de longitud, con su máxima altitud en el monte Aconcagua (6962 m s.n.m). Este orógeno se asocia a una subducción activa y continua desde el Permotriásico (Coloma et al., 2017).

Esta convergencia genera tres zonas sismogénicas principales: a lo largo de la costa, sismos grandes y poco profundos (0-50 km); sismos tensionales y compresionales grandes y profundos (70-100 km) dentro de la placa oceánica; y sismos muy someros (0-35 km) dentro de la placa continental (Barazangi e Isacks, 1976; Cahill e Isacks, 1992; Anderson *et al.*, 2007) (Figura 2.1). Los últimos, corresponden a sismos de intraplaca, comúnmente asociados a fallas activas que, al alcanzar grandes magnitudes pueden generar graves daños estructurales y humanos.

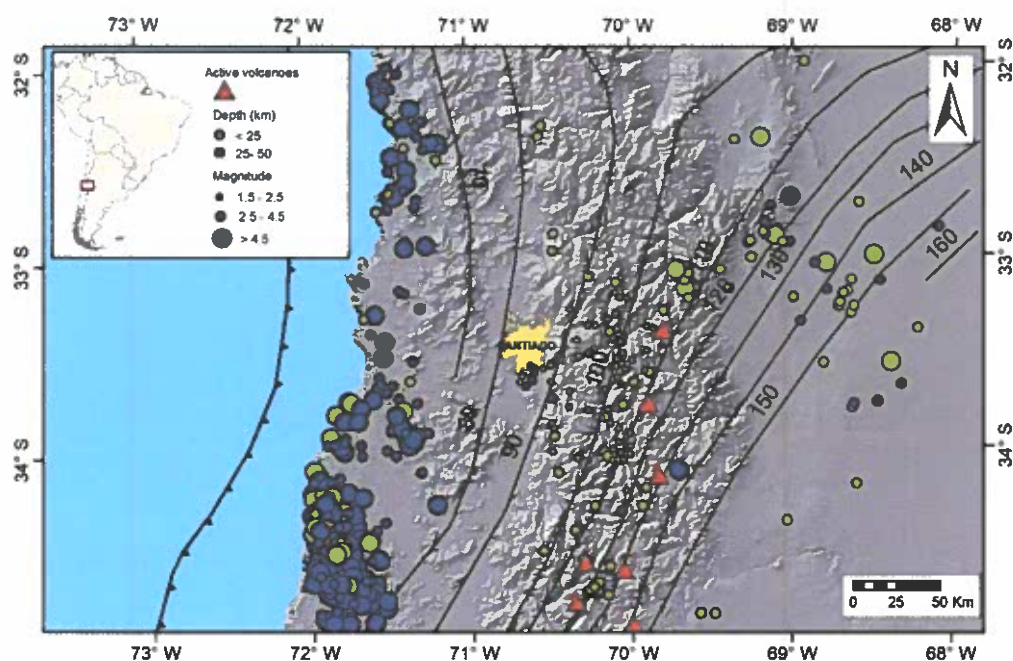


**Figura 2.1.** Sismicidad cortical de intraplaca de la placa Sudamericana reportada por los catálogos del USGS de redes sísmicas de Chile y Argentina durante los últimos 10 años. Contornos negros corresponden a la parte superior aproximada de la Placa de Nazca de Anderson et al. (2007). Los triángulos rojos representan el arco volcánico moderno (Mardones, 2019).

De esta manera, la Cordillera Principal de Chile central se caracteriza por exponer, en los niveles morfotectónicos superiores, una serie de estructuras compresivas de orientación preferencial N-S, con variaciones NNE y NNW. Estas estructuras corresponden, en su mayoría, a pliegues cuya longitud de onda, vergencia y amplitud es variable y fallas con vergencia tanto oriental como occidental.

Entre las fallas vergentes al oeste, posicionadas en el frente cordillerano de Santiago, destacan la falla Cerro Renca-Infiernillo y la Falla San Ramón. Entre las fallas con vergencia al este, podemos consignar la Falla El Diablo, considerada hasta ahora, como borde oriental de la cuenca de Abanico (Farias et al., 2010; Charrier et al., 2002). La falla Chacayes-Yesillo, en cambio, corresponde a un retrocorrimiento asociado a la Falla El Diablo. Esta falla tendría, según Charrier et al. (2005), actividad sísmica reciente, aunque estudios indican que esta actividad se concentra en el sistema de fallas El Diablo-El Fierro (Barrientos et al., 2004; Farías et al., 2010) (Figura 2.2).

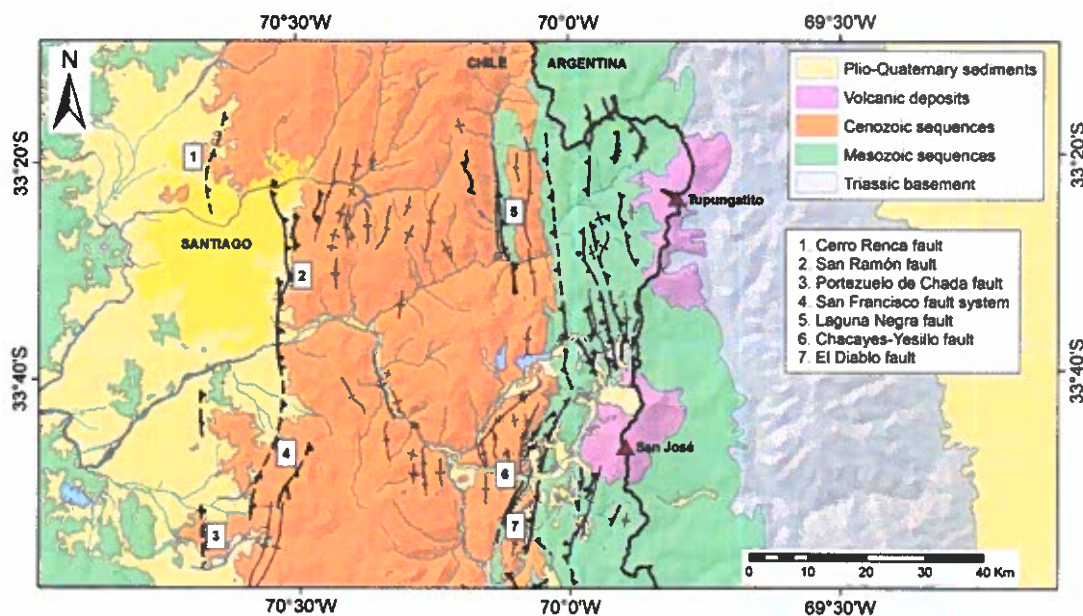


**Figura 2.2.** Mapa regional geológico-estructural de la zona de estudio. Modificado de Rauld (2012).

## 2.2 Caracterización geológico-estructural de la cuenca de Santiago

La geomorfología del área de Santiago se caracteriza por la ocurrencia de extensos abanicos aluviales de los ríos Mapocho y Maipo, en la parte central de la cuenca, y otros abanicos más pequeños, asociados a canales menores en el norte (Colina) y sur (Pirque), interrumpidos por cerros islas (cerro San Cristóbal, cerro Santa Lucía, cerro Renca, cerro Blanco, cerro 18, cerro Chena, entre otros).

Por otra parte, la morfología subterránea del basamento es irregular, compuesta por depresiones y altos topográficos, incluyendo depresiones con profundidades mayores de 500 metros. Las más significativas son aquellas que se observan en los sectores de Rinconada Lo Aguirre, Pudahuel, Santiago Oriente, área entre el cerro Lonquén y cerro Chena e Isla de Maipo (Araneda *et al.*, 2000).

Los resultados morfoestratigráficos muestran una progradación de las unidades cuaternarias hacia el oeste, lo que se puede relacionar directamente a procesos neotectónicos asociados a la Falla San Ramón como a fallas inferidas activas, ubicadas en medio del valle de Santiago, de acuerdo con lo observado en la gravimetría, donde el basamento deformaría la cobertura, como lo sugiere Ormeño (2007).

En la Figura 2.3 se muestra el mapa geológico del sector donde se realizaron las prospecciones y el levantamiento geológico en el marco de este proyecto.

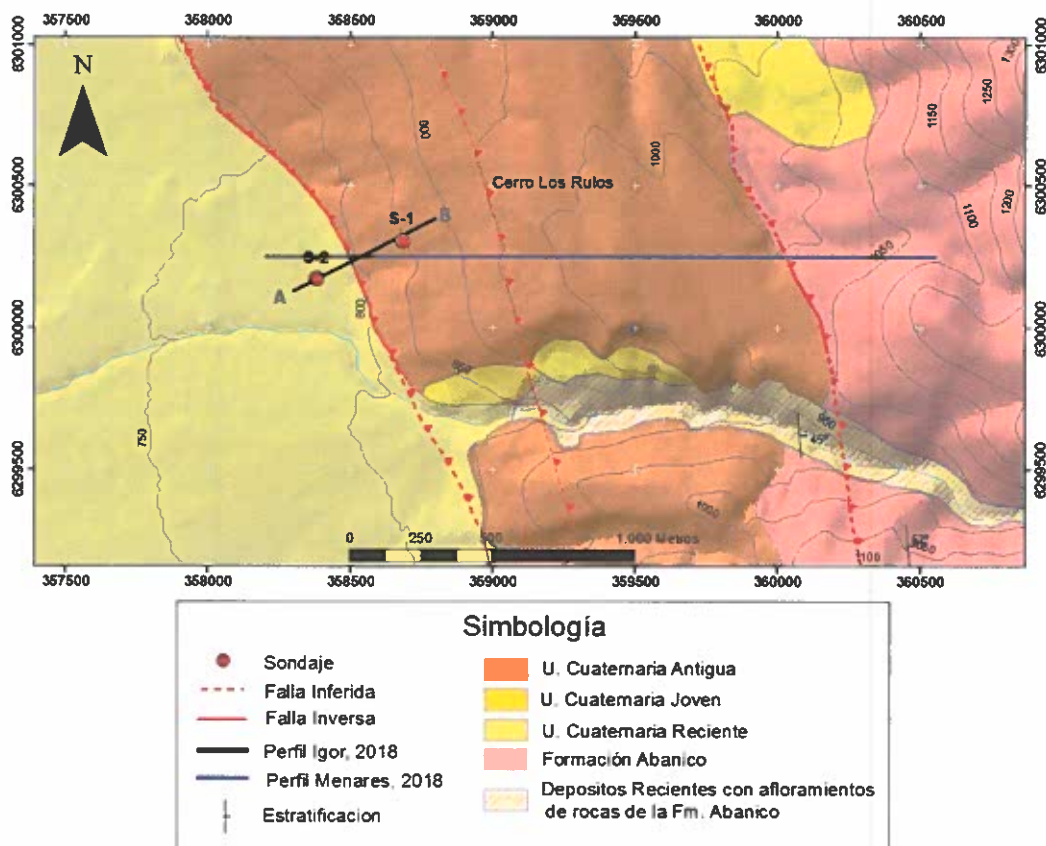


**Figura 2.3. Mapa Geológico sector cerro Los Rulos.**

Como se observa en la Figura 2.3, las unidades geológicas que se diferencian en el sector son cuatro, una correspondiente a roca fundamental y las otras tres a unidades de depósitos no consolidados, asignadas al Cuaternario (Thiele, 1980; Rauld, 2012). Estas unidades, reconocidas en terreno son:

- **Unidad de Roca Fundamental (Formación Abanico)**  
Esta unidad se asocia a la Formación Abanico; aflora al oriente del cerro Los Rulos, más precisamente en la cara poniente del cerro Alto de las Vizcachas. Se pueden apreciar afloramientos de esta unidad en la quebrada de Ramón.
- **Unidad sedimentaria Cuaternaria Antigua**  
Esta unidad corresponde a sedimentos que presentan intercalaciones de capas compuestas por material fino y por material clástico anguloso en matriz fina, los que se encuentran cubriendo la Formación Abanico y tienen un espesor de decenas de metros (Rauld, 2002). En el área de estudio se encuentra en el cerro Los Rulos.
- **Unidad Sedimentaria Cuaternaria Joven**  
Corresponde principalmente a depósitos de material fino, limo arcilloso, con niveles intercalados de arenas, gravillas y gravas arenosas, las que en algunos casos se presentan como lentes y bolsones (Rauld, 2002). En la ladera norte de la quebrada de Ramón los depósitos de esta unidad forman una terraza aluvial que posee un largo superior a 500 m y un ancho inferior a 100 m, su superficie se encuentra inclinada al oeste (Rauld, 2002).
- **Unidad Sedimentaria Cuaternaria Reciente**  
Esta unidad corresponde a depósitos de abanicos aluviales. En la zona de estudio se encuentra el abanico aluvial procedente de la quebrada de Ramón el cual está compuesto por gravas arenosas, gravas limosas y por sedimentos finos con intercalaciones arenosas, los que se alteran con depósitos de flujos de detritos (Rauld, 2002).

## 2.3 Referencias

Anderson, M., Alvarado, P., Zandt, G. y Beck, S. 2007. Geometry and brittle deformation of the subducting Nazca Plate, Central Chile and Argentina. *Geophysical Journal International*, 171(1), 419-434.

Araneda, M., M. Avendaño, and C. Merlo, 2000. Modelo gravimétrico de la cuenca de Santiago, etapa III final, in IX Congreso Geológico Chileno, vol. actas vol. 2, pp. 404-408.

Armijo, R.; Rauld, R.; Thiele, R.; Vargas, G.; Campos, J.; Lacassin, R.; Kausel, E. 2010. The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic Hazard for Santiago, Chile. *Tectonics* 29 (2): TC2007. doi:10.1029/2008TC002427.

Ayala, Cabrera and Associated, 2000. Modelo de simulación hidrológico operacional cuencas de los ríos Maipo y Mapocho, Santiago, Ministerio De Obras Públicas, Dirección General, MOP- DGA, 8 vol. SIT N°62.

Baranzangi, M. y B. Sacks. 1976. Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, 4: 686-692.

Barrientos, S., E. Vera, P. Alvarado, and T. Monfret, 2004. Crustal seismicity in central Chile, J. South Am. Earth Sci., 16, 759–768, doi:10.1016/j.jsames.2003.12.001.

Cahill, T., & Isacks, B. L., 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B12), 17503-17529.

Coloma, F., Valin, X., Oliveros, V., Vásquez, P., Creixell, C., Salazar, E. & Ducea, M.N., 2017. Geochemistry of Permian to Triassic igneous rocks from northern Chile (28°-30°15'S): Implications on the dynamics of the proto-Andean margin. *Andean Geology*, 44(2): 147-178.

Falcón, E., Castillo, O., and Valenzuela, M., 1970. Hidrogeología de la cuenca de Santiago: Contribución de Chile al Decenio Hidrológico Internacional. IIG: 51 p., 21 mapas, Santiago.

Farías, M., Comte, D., Charrier, R., Martinod, J., David, C., Tassara, A., Tapia, F., y Fock, A. 2010. Crustal-scale structural architecture in central Chile based on seismicity and Surface geology: Implications for Andean mountain building: *Tectonics*, v. 29, p. 1-22.

Mardones, V. 2019. Modelo estructural y sismicidad de la Cordillera Principal de Los Andes de Chile central, 33°30'S-34°S. Tesis (Magíster en ciencias mención geología). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Ormeño, A. 2007. Geomorfología dinámica del río Maipo en la zona cordillerana de Chile central e implicancias neotectónicas. Tesis (Magíster en ciencias mención geología). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 147p.

**Rauld, R., 2012. Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33°S). Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, Mención Geología, Universidad de Chile.**

**Thiele, R., 1980. Hoja Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile (29), 21p.**

### 3. INFORME TÉCNICO DE ESTACIONES DE MONITOREO

Se instalaron 7 estaciones sismológicas banda ancha, denominadas MT10, MT12, MT-13, MT-14, MT-15, MT-16 y MT-17 (Figura 3.1), tres de ellas facilitadas por la CChEN (MT-10, MT-12, MT-14) y cuatro fueron adquiridas e instaladas con fondos de este proyecto.

El código, las coordenadas y la fecha de instalación se describen en la Tabla 3.1; las fichas completas de cada una de las estaciones se adjuntan como Anexo I.

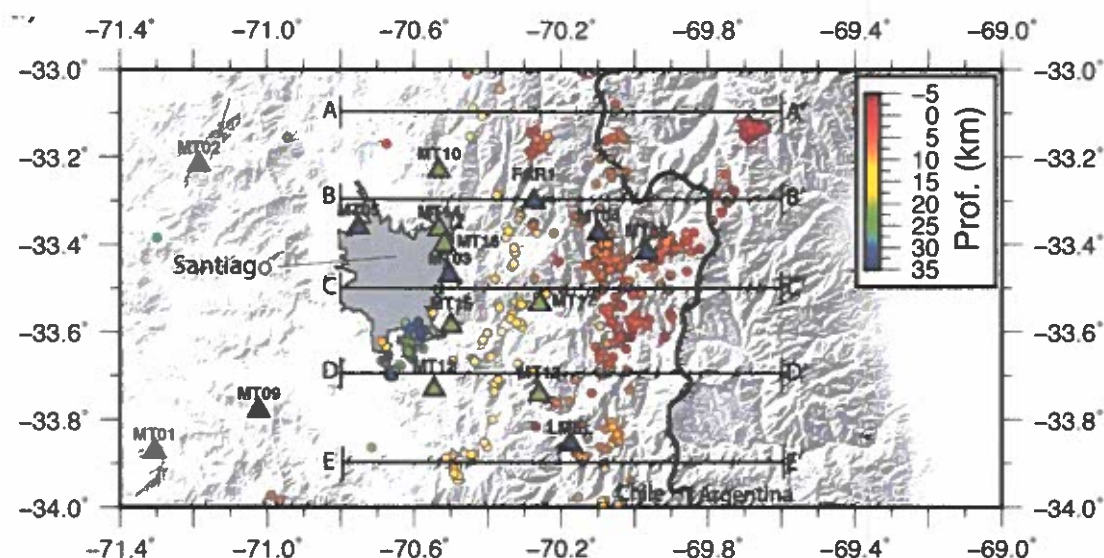


**Figura 3.1.** Mapa de ubicación de las estaciones sismológicas en la región de estudio. El polígono gris delimita la aérea densamente urbanizada de la Región Metropolitana de Santiago. Los triángulos azules muestran la ubicación de las estaciones de la red sismológica nacional. Los triángulos verdes corresponden a las estaciones del proyecto Falla San Ramón. Las líneas negras muestran la ubicación de los perfiles.

**Tabla 3.1.** Identificación y ubicación de las estaciones instaladas.

| Código | Nombre Estación        | Coordenadas Bóveda |             | Altura<br>(m s.n.m.) | Fecha<br>Instalación |
|--------|------------------------|--------------------|-------------|----------------------|----------------------|
|        |                        | Latitud °S         | Longitud °W |                      |                      |
| MT10   | Hacienda Santa Martina |                    |             | 1410                 | 20/01/2017           |
| MT12   | Pirque                 |                    |             | 727                  | 27/01/2017           |
| MT13   | San Alfonso            |                    |             | 1198                 | 16/12/2016           |
| MT14   | Calán                  |                    |             | 855                  | 8/01/2017            |
| MT15   | Las Vizcachas          |                    |             | 784                  | 20/10/2017           |
| MT16   | CChEN                  |                    |             | 780                  | 05/12/2017           |
| MT17   | Los Maitenes           |                    |             | 1159                 | 12/12/2017           |

## 4. CAMPAÑA DE MEDICIONES GPS SEMIPERMANENTE

### 4.1 Introducción

Dada la ubicación de la FSR (Vargas y Rebolledo, 2012), se ha planteado la necesidad de observar la tasa de deformación superficial de la falla, para lo cual usamos receptores GPS en estaciones semi-permanentes y permanentes.

Durante el año 2012 y 2013 se instalaron un total de 10 marcas geodésicas, las cuales fueron medidas con GPS en un periodo de 48 horas en promedio, en dos perfiles que cruzan la Falla San Ramón (FSR). Gracias al Convenio establecido entre la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública y la Universidad de Chile, estas mismas estaciones fueron medidas durante mayo del 2017 lo que nos permite derivar una primera estimación para el campo de deformación local, cercana a la zona FSR.

Durante el año 2018, se instalaron 5 estaciones GPS de observación permanente, las cuales permitirán estimar las características locales del proceso inter-sísmico y, a su vez, derivar residuos que expliquen la dinámica superficial de la FSR. En la tabla 4.1 se detallan las estaciones instaladas por el proyecto de la FSR.

Tabla 4.1 estaciones permanentes instaladas en el proyecto SFR

| Lugar         | Nombre Estación | Latitud | Longitud | Altura aprox. (m) |
|---------------|-----------------|---------|----------|-------------------|
| Santa Martina | SMAR            |         |          | 1450              |
| Cerro Calán   | CALN            |         |          | 895               |
| CCHEN         | CHEN            |         |          | 802               |
| Las Vizcachas | VZCH            |         |          | 811               |
| San Alfonso   | SALF            |         |          | 1226              |

Adicionalmente, sumamos la observación de un grupo de estaciones continuas en la Región, las que nos permiten, a su vez, conocer en detalle la deformación inter-placa y el movimiento continental.

### 4.2 Metodología

Se estima la posición de una estación en forma diaria, suponiendo que se encuentra referida a un mismo Sistema Geodésico de Referencia (SGR), fijo y cuyo origen es el centro de la Tierra (ECEF). Esto es materializado después del proceso diferencial, incluyendo estaciones de la red del International GNSS Service (IGS) (Gurtner et al., 2005), regional y global, realizando un ajuste por mínimos cuadrados

en donde se incluye la posición de las estaciones de referencia, tomado desde IGS, para el SGR ITRF2014. En este punto tenemos la posición diaria de cada estación, en ITRF2014.

La posición relativa de una estación en la región donde se encuentra la FSR varía en función del tiempo por varias razones: a) compresión de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana, b) efecto del sismo del Maule de 2010, c) efecto del sismo de Illapel de 2015, d) efectos estacionales, y e) deformación asociada a la FSR. Se presenta a continuación una metodología para aislar este último término.

Consideramos ahora que la posición de una estación puede ser proyectada en el tiempo, si conocemos la tasa de cambio o variación. Para esto, utilizamos las estaciones permanentes, sobre las cuales tenemos una serie de tiempo más larga, para estimar la velocidad inter-sísmica, como se puede apreciar en la siguiente ecuación:

$$X_i = X_0 + V_0(t_i - t_0) + \Sigma_r$$

Donde:

$X_i$  Posición en un momento determinado

$X_0$  Posición en la época de origen

$V_0$  Velocidad Inter-sísmica

$t_0$  época de origen

$t_i$  época en un momento dado

$\Sigma_r$  sumatoria de otros efectos relativos que varían con el tiempo

Como en las estaciones semi-permanentes no podemos estimar el valor de los efectos co- y post-sísmico de los terremotos recientes, debemos expandir la ecuación anterior, en el término  $\Sigma_r$ , para determinar el valor Co y Post Sísmico (Bevis & Brawn 2014). Asumimos que no existen efectos estacionales ni locales en las estaciones, considerando que no hay dichos efectos en las estaciones cercanas. En la ecuación siguiente presentamos la expansión de los diferentes efectos a estimar.

$$\Sigma_r = C_s + P_s + S_s + L_s + \sigma$$

Donde:

$\Sigma_r$  sumatoria de otros efectos relativos que varían con el tiempo

$C_s$  Co-sísmico

$P_s$  Post-sísmico

$S_s$  Seasonal o efectos estacionales

$L_s$  Efectos locales

$\sigma$  error

Ahora bien, determinados los efectos ya señalados, procedemos a restar todos ellos para obtener solo el movimiento local o residual, sobre el cual podemos inferir deformación debido a la FSR.

### 4.3 Resultados

En el caso de las estaciones GPS semi-permanentes, los resultados de cada campaña fueron ponderados por la desviación estándar, para generar un único punto observado. En la Figura 4.3 se muestra la serie de la estación AVFR (Cerro Alvarado).

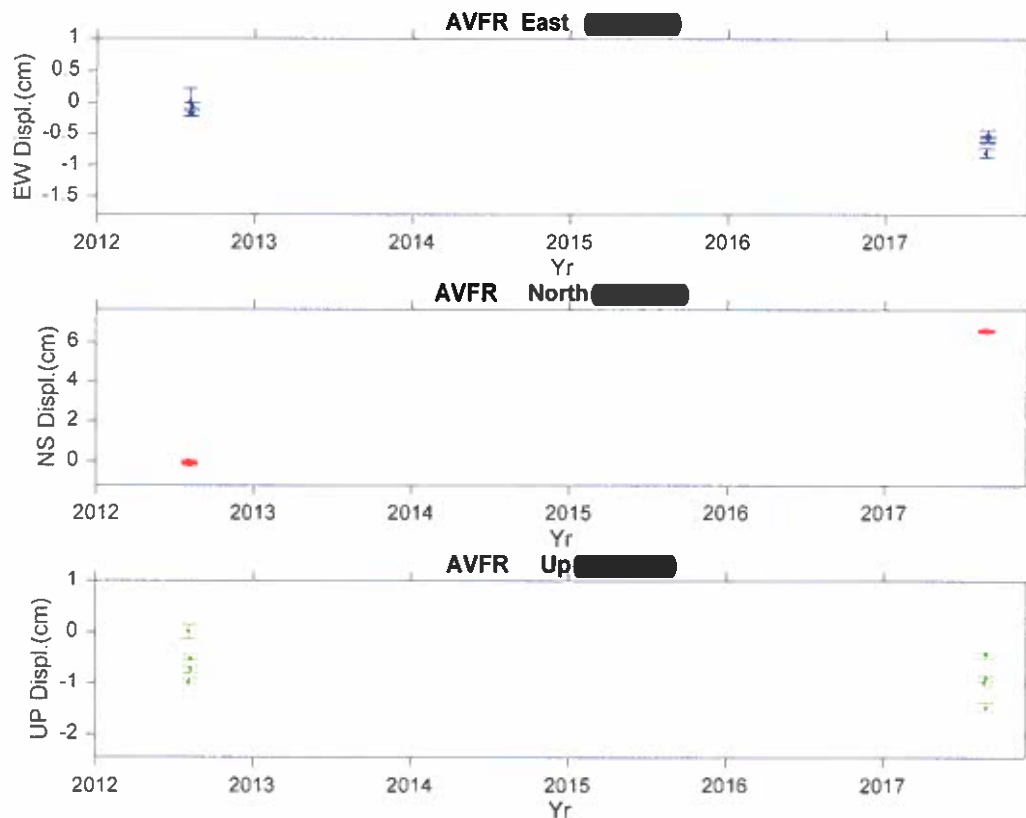


**Figura 4.3.** Serie de tiempo de la estación GPS semi-permanente AVFR (Cerro Alvarado).

Para el caso de las estaciones permanentes, creamos una serie de tiempo más larga, en la cual podemos observar varios efectos de los últimos terremotos ocurridos, tales como Maule 2010 e Illapel 2015. Esto nos ayuda a visualizar y estimar los efectos co-post-inter-sísmico. En la Figura 4.4 se muestra un ejemplo para la estación GPS Peldehue.

Dado que en la componente vertical tenemos generalmente mayor error y existe, además, en cada estación señales locales, el análisis de la tendencia lo haremos solo de las componentes horizontales para cada sitio. De esta forma obtenemos las componentes co-sísmicas para cada estación permanente, para Illapel 2015, lo que se muestra en la Tabla 4.2.

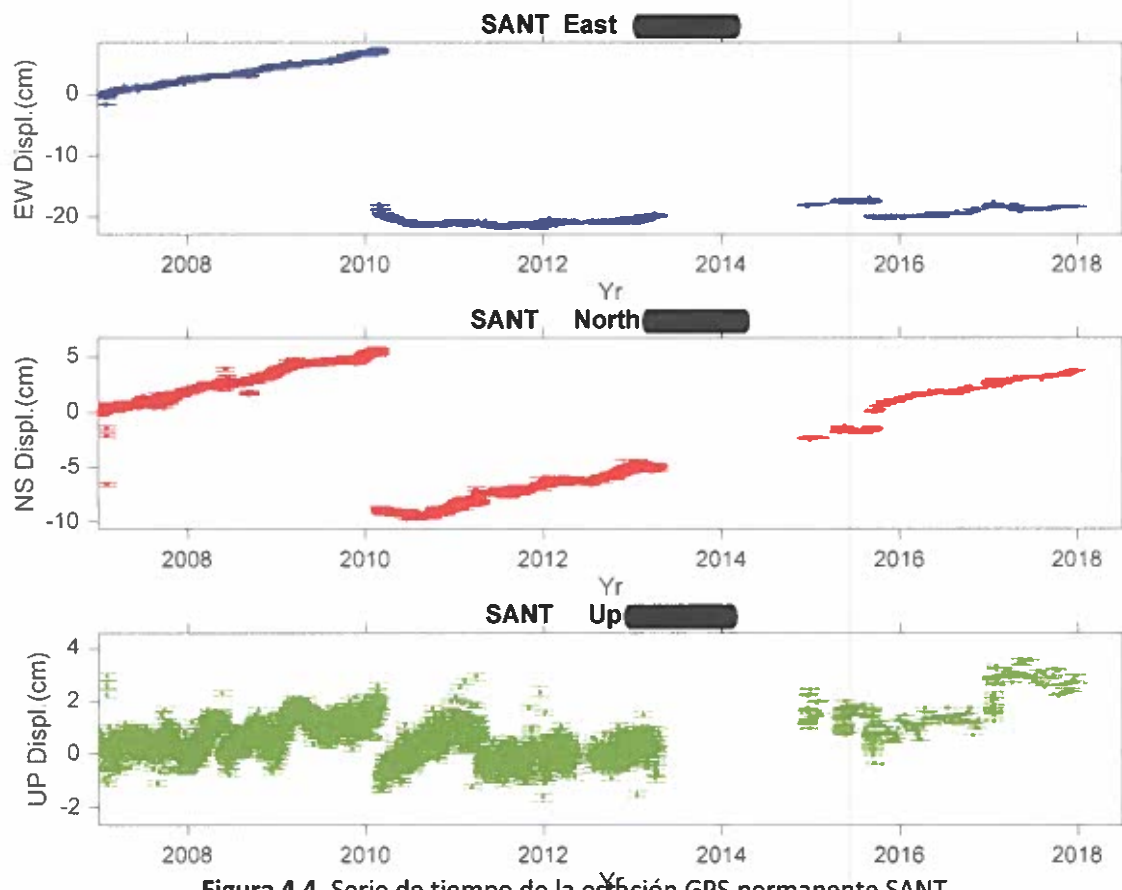


**Figura 4.4.** Serie de tiempo de la estación GPS permanente SANT.

**Tabla 4.2. Co-sísmico estaciones permanentes (Illapel 2015).**

| Estación | Ve (m)   | Vn (m)  | Vup (m) | Longitudº | Latitudº | Altura<br>Elipsoidal (m) |
|----------|----------|---------|---------|-----------|----------|--------------------------|
| VNEV     | -23.4432 | 15.2378 | -4.3177 |           |          | 3097.91                  |
| TLGT     | -5.9292  | -0.4059 | -4.6477 |           |          | 1348.81                  |
| SANT     | -25.8091 | 14.9110 | -5.7541 |           |          | 723.07                   |
| DGF1     | -14.7206 | 7.3918  | -4.4615 |           |          | 581.41                   |
| BAVE     | 0.0      | 0.0     | 0.0     |           |          | 513.92                   |
| ACPM     | -11.0237 | 11.7850 | -9.9214 |           |          | 724.67                   |
| UAIB     | -16.8628 | 8.1494  | -0.9575 |           |          | 1079.5                   |

A partir de estos valores, generamos una interpolación para las estaciones semi-permanentes, incluyendo los co-sísmicos e inter-sísmicos. Los valores se muestran en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3. Inter-sísmico y post-sísmico estimado antes y después de Illapel 2015.**

|      | Pre Illapel 2015 |       |        | Post Illapel 2015 |       |        |          |      |      |         |
|------|------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|----------|------|------|---------|
|      | E                | N     | U      | E                 | N     | U      | Delta t  | lonº | latº | h (m)   |
| AVFR | -1.27            | -1.49 | -6.44  | -6.01             | 65.93 | -8.93  | 5.051221 |      |      | 987.64  |
| BYFR | 10.32            | 2.15  | 11.48  | -7.59             | 73.75 | 18.31  | 5.038900 |      |      | 864.00  |
| CRFR | 32.53            | 5.44  | -2.34  | 17.89             | 68.33 | 1.82   | 4.819986 |      |      | 890.45  |
| LLFR | 0.51             | 1.31  | -2.74  | 2.39              | 75.35 | -34.95 | 4.783025 |      |      | 1305.74 |
| LVFR | 3.73             | -0.15 | 0.57   | -1.09             | 71.63 | 3.91   | 4.783025 |      |      | 1161.91 |
| MCFR | 2.06             | -1.24 | -17.13 | -4.48             | 64.68 | -14.22 | 4.781656 |      |      | 1071.70 |
| MMFR | -3.26            | 2.90  | 8.00   | -16.59            | 66.41 | -22.89 | 4.791239 |      |      | 1049.71 |
| RTFR | 5.40             | 1.26  | 18.57  | -13.13            | 75.89 | 27.81  | 5.069017 |      |      | 693.94  |
| SCFR | 0.40             | -0.43 | 6.61   | -2.06             | 67.45 | 7.95   | 4.301278 |      |      | 739.41  |

Restados los valores regionales de la convergencia inter-sísmica, los valores estimados del co-sísmico para cada estación, nos queda solo el residual, que representa la deformación local. Estos valores son mostrados en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4. Velocidades residuales para las estaciones GPS semi-permanentes.**

|      | Velocidades residuales en mm/yr |       |      |      |         |
|------|---------------------------------|-------|------|------|---------|
|      | vel_E                           | vel_N | lonº | latº | h (m)   |
| AVFR | -4.40                           | -2.70 |      |      | 987.64  |
| BYFR | 2.94                            | 1.60  |      |      | 864.00  |
| CRFR | 3.28                            | 0.65  |      |      | 890.45  |
| LLFR | 0.10                            | 1.13  |      |      | 1305.74 |
| LVFR | -3.20                           | -0.43 |      |      | 1161.91 |
| MCFR | 0.79                            | -0.04 |      |      | 1071.70 |
| MMFR | 3.00                            | 0.72  |      |      | 1049.71 |
| RTFR | 2.54                            | 0.98  |      |      | 693.94  |
| SCFR | -3.41                           | -1.22 |      |      | 739.41  |

Los valores obtenidos muestran que existe una deformación local, no obstante, requerimos de más observaciones de estaciones continuas y de campaña, ya que los valores estimados residuales están dentro del error. En la Figura 4.5 se muestra la distribución de estaciones en torno a la FSR, los vectores residuales de deformación y el error estimado medio.

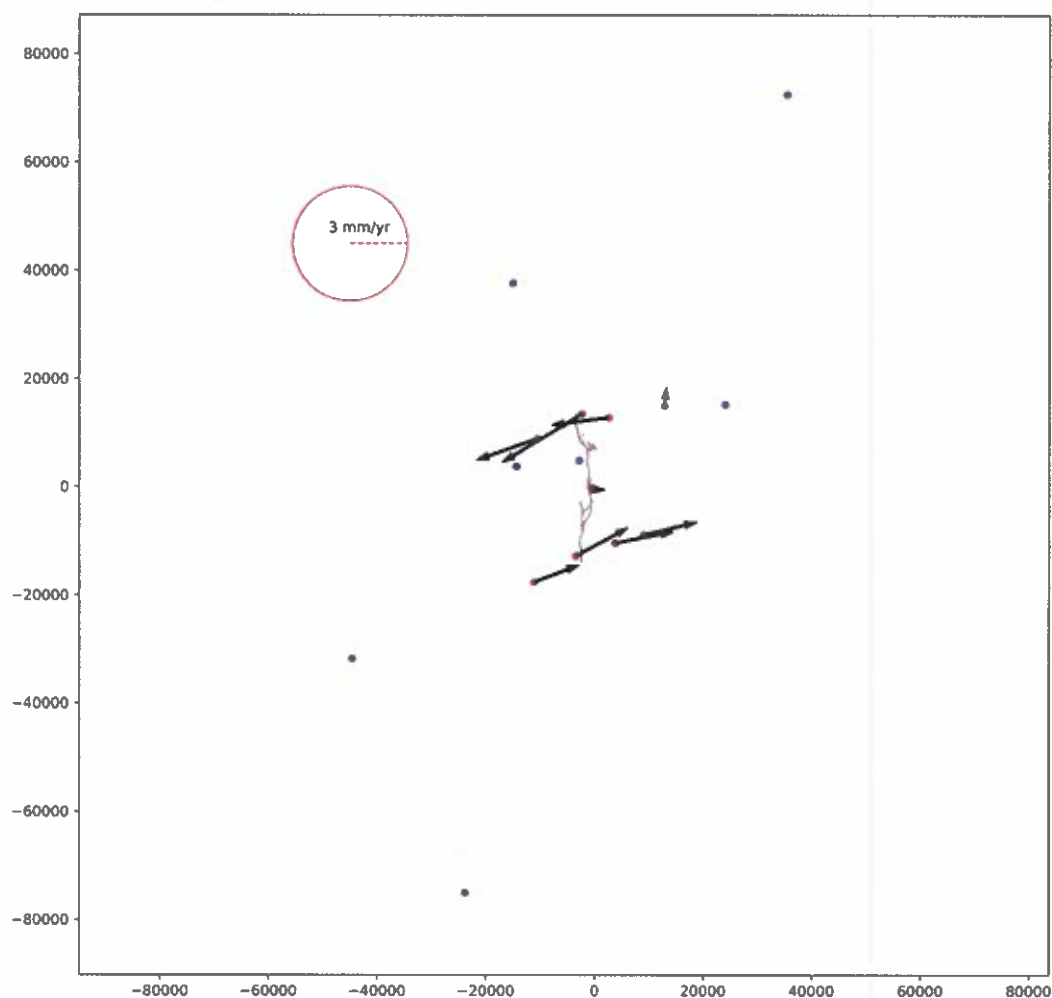


**Figura 4.5.** Distribución de estaciones GPS, en torno a SRF y, residuales de deformación.

El Anexo II.1 muestra las Series de Tiempo de las estaciones observadas, el Anexo II.2 la Repetibilidad de las soluciones, el Anexo II.3 las mediciones 2012 y 2017 y el Anexo II.4 las mediciones del año 2018.

#### 4.4 Consideraciones Finales

Si bien podemos afirmar que existe deformación residual en torno a la FSR, estos valores están dentro de los errores, lo que nos obliga necesariamente a remedir las estaciones semi-permanentes en campañas anuales o cada dos años.

Se debe extender la instalación de estaciones permanentes, en dirección E-W hacia la cordillera, con el objeto de poder estimar posible deformación que se esté acumulando en el plano de despegue de la FSR, el cual se horizontaliza hacia el Este de la traza de la FSR.

A la fecha están en funcionamiento las estaciones permanentes, U. Adolfo Ibáñez (UAIB), CCHEN (CHEN), Observatorio de Cerro Calán (CALN), Santa Martina (STMA), San Alfonso (SANF), Pirque (PIRQ) y Las Vizcachas (VCHS).

En la Figura 4.6a (CCHEN), 4.6b (Universidad Adolfo Ibáñez) y 4.6c (Cerro Calán), tres de los sitios en funcionamiento.

Dados los resultados obtenidos y, considerando que con GPS solo tenemos estimaciones puntuales, sería oportuno la incorporación de observaciones InSar, con imágenes que cubran una mayor ventana de tiempo en la zona.

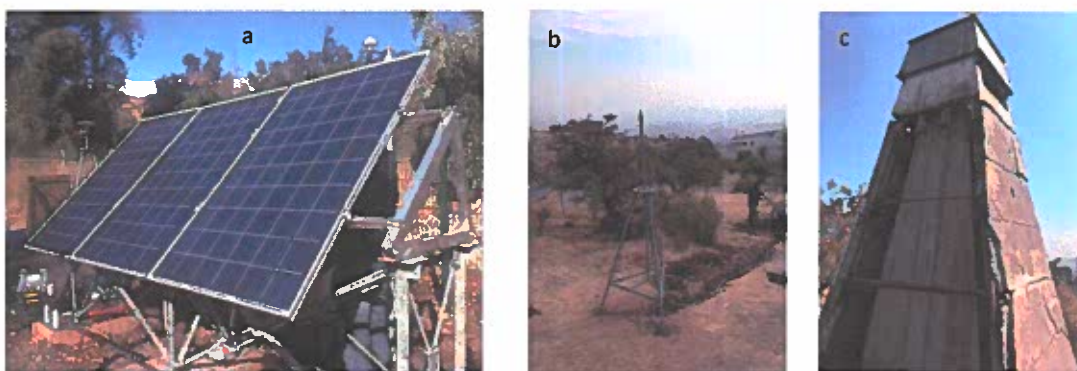


**Figura 4.6.** Estaciones permanentes instaladas para el monitoreo de la FSR.

#### 4.5 Referencias

Báez J.C., Leyton F., Troncoso C., del Campo F., Bevis M., Vigny C., Moreno M., Simons M., Kendrick E., Parra H., Blume F. 2018. The Chilean GNSS Network: Current Status and Progress toward Early Warning Applications, *Seismological Research Letters*, <https://doi.org/10.1785/0220180011>.

Bevis M. & Brown A. 2014. Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy, *J Geod* (2014) 88: 283. <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0685-5>.

Bedford, J., Moreno, M., Li, S., Oncken, O., Baez, J. C., Bevis, M., Heidbach, O., and Lange, D. 2016. Separating rapid relocking, afterslip, and viscoelastic relaxation: An application of the postseismic straightening method to the Maule 2010 cGPS. *Journal of Geophysical Research*, V. 121 N°10, p. 7618-7638. <http://doi.org/10.1002/2016JB013093>.

Bedford, J., Moreno, M., Báez, J.C., Lange, D., Tilmann, F., Rosenau, M., Heidbach, O., Oncken, O., Bartsch, M., Rietbrock, A., Tassara, A., Bevis, M., Vigny, C. 2013. A high-resolution, time-variable afterslip model for the 2010 Maule Mw=8.8. Chile megathrust earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.09.020>.

Melnick, D., Moreno, M., Quinteros, J., Báez, J.C., Deng, Z., Li, S., Oncken, O. 2017. The super-interseismic phase of the megathrust earthquake cycle in Chile. *Geophysical Research Letters* V.44 N°2, <http://dx.doi.org/10.1002/2016GL071845>.

Moreno M., Li S., Melnick D., Bedford J., Báez J.C., Motagh M., Metzger S., Vajedian S., Sippl C., Gutknecht B.D., Contreras-Reyez E., Deng Z., Tassara A., Oncken O. 2018. Chilean megathrust earthquake recurrence linked to frictional contrast at depth, *Nature Geoscience*, <https://doi.org/s41561-018-0089-5>.

Moreno, M., Melnick, D., Rosenau, M., Bolte, J., Klotz, J., Echtler, H., Báez, J.C., Bataille, K., Chen, J., Bevis, M., Hase, H., Oncken, O. 2011. Heterogeneous plate locking in South-Central Chile Subduction Zone: Building up the next great earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, V.305 N°3-4, p.413-424, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.03.025>.

Moreno, M., Bedford, J., Báez, J.C., Klotz, J., Hoffmann, F., Deng, Z., Urrutia, I., Rojas, C., Shrivastava, M., Ortega-Culaciati, F., Contreras-Reyez, E. 2017. Survey Mode GPS data in the IPOC Region. Central Andes. Chile. GFZ Data Service. <http://doi.org/10.58880/GFZ.4.1.2017.003>.

Moreno, M., Melnick, D., Rosenau, M., Báez, J.C., Klotz, J., Oncken, O., Tassara, A., Chen J.P., Bataille, K., Bevis, M., Socquet, A., Bolte, J., Vigny, C., Brooks, B., Ryder, I., Grund, V., Smalley, B., Carrizo, D., Bartsch, M., Hase, H. 2012. Toward understanding tectonic control on the Mw 8.8 2010 Maule Chile earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, V.321-322, p.152-165, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.01.006>.

Ruiz, S., Klein, E., Del-Campo, F., Rivera, E., Poli, P., Metois, M., Vigny, C., Báez, J.C., Vargas, G., Leyton, F., Madariaga, R., Fleitout, L. 2016. The seismic sequence of the September 2015 Mw 8.3 Illapel, Chile, earthquake. *Seismological Research Letters*, V87 N°4, p.789-799, <https://doi.org/10.1785/0220150281>.

Ruiz, S., Moreno, M., Melnick, D., Del Campo, F., Poli, P., Báez, J.C., Leyton, F., Madariaga, R. 2017a. Reawakening of large earthquakes in south central Chile: The 2016 Mw 7.6 Chiloé event. *Geophysical Research Letters*, V.44 N°12, p.6633-6640, DOI: 10.1002/2017GL074133.

Ruiz, S., Aden-Antoniow, F., Baez, J.C., Otarola, C., Potin, B., Campo, F., Poli, P., Flores, C., Satriano, C., Leyton, F. and Madariaga, R. 2017b. Nucleation phase and dynamic inversion of the Mw 6.9 Valparaíso 2017 earthquake in Central Chile. *Geophysical Research Letters*, V.44 N°20, <http://dx.doi.org/10.1002/2017GL075675>.

Vargas G., Rebolledo S., Paleosismología de la Falla de San Ramón e implicancias para el peligro sísmico de Santiago, Congreso Geológico de Chile, 2012. Disponible en: [http://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/14127\\_pp\\_854\\_856.pdf](http://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/14127_pp_854_856.pdf).

## 5. REALIZACIÓN DE POZO PARA INSTALACIÓN DE ESTACIÓN SISMOLÓGICA

### 5.1 Ubicación y tipo de pozo

Con el objetivo de instalar una estación sismológica en profundidad, se encargó a IDIEM la realización de un sondaje en las dependencias de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CChEN).

Esta perforación consistió en la realización de un pozo de 100 m de profundidad junto con la posterior entubación con PVC de 8" desde la cota 0,00 m hasta la cota 100,00 m e inyección de lechada.

La ejecución del sondaje tuvo una duración de 14 días, comenzando la perforación el 14 de febrero de 2017 y finalizando el pozo el día 3 de marzo de 2017.

La instalación de la estación sismológica en el pozo se efectuó en diciembre de 2017.

La Figura 5.1 muestra la ubicación del sondaje y en Anexo III el informe de IDIEM.



**Figura 5.1.** Ubicación sondaje 12" (S-2) en dependencias de CChEN.



## 5.2 Estratigrafía del pozo (S-2)

Durante los 100 m, el sondaje atravesó una sola unidad de grava con diferentes durezas (Figura 5.2).

La Unidad se interpreta como gravas terrígenas continentales, pertenecientes a la cuenca de Santiago. En el sondaje se encontró agua subterránea a los 60 metros de profundidad.

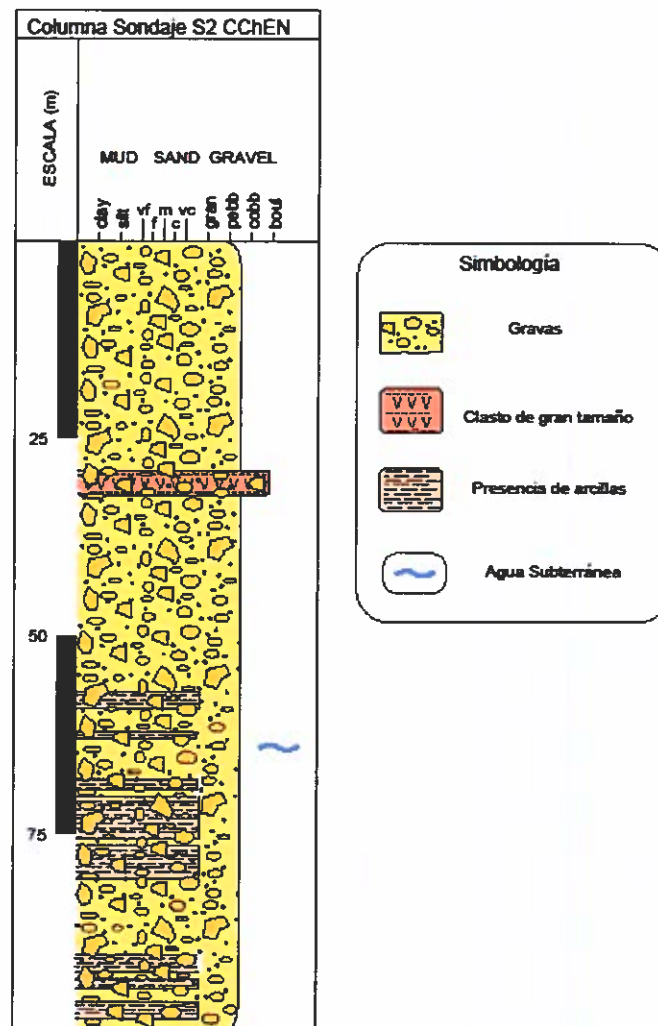


Figura 5.2. Estratigrafía sondaje 12" (S-2).

## 6. SONDAJE EN LA FALLA SAN RAMON – SONDAJE S-1

### 6.1 Ubicación del sondeaje S-1

El sondeaje de diamantina S-1 fue realizado por IDIEM sobre el escarpe de falla, al comienzo del piedemonte cordillerano a una altura de 854 m s.n.m., en una propiedad privada habitacional llamada Laderas del Remanso de las Condes. En este sondeaje se realizaron ensayos Downhole y medición del nivel estático (Anexo III).

El sondeaje tiene un diámetro de 63,5 mm (HQ) y alcanza una profundidad de 200 metros, las coordenadas geográficas del sondeaje se encuentran en la Tabla 6.1.

**Tabla 6.1.** Coordenadas Geográficas Sondeaje S-1.

| Coordenadas Geográficas Sondeaje S-1 (WGS 84) |           |
|-----------------------------------------------|-----------|
| 358683 E                                      | 6300306 S |

La Figura 6.1 muestra la ubicación del pozo S-2, donde se instaló una estación sismológica y del sondeaje S-1 en el escarpe de la Falla San Ramón.



**Figura 6.1.** Ubicación de sondajes S-1 (HQ) y S-2 (12"), Proyecto Falla San Ramón, Región Metropolitana (Google Earth).



## 6.2 Descripción Sondaje S-1

El sondaje permitió identificar tres unidades principales o mayores, una unidad superior de gravas (Unidad 1), una intermedia, correspondiente a una secuencia volcánica (principalmente tobas) y una unidad inferior de gravas.

Los parámetros geotécnicos con los que se evaluaron los materiales recuperados son el grado de meteorización y la resistencia. El grado de meteorización se evaluó en base a la recomendación de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1981) presentada en la Tabla 6.2 y la resistencia en base a lo mostrado en la Tabla 6.3.

En la Secuencia volcánica denominada Unidad intermedia, se evaluó además el *Rock Quality Designation* (RQD) y la frecuencia de fracturas (ff/m).

**Tabla 6.2.** Grado de Meteorización ISRM (1981).

| TERMINO                   | DESCRIPCIÓN                                                                                                                                                                                                                              | GRADO |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Roca Fresca               | No presenta signos visibles de meteorización en la roca; tal vez una leve decoloración en las superficies de las discontinuidades mayores.                                                                                               | I     |
| Levemente Meteorizada     | La decoloración indica meteorización de la roca y en las superficies de las discontinuidades. La roca en su totalidad puede estar decolorada por la meteorización y puede estar externamente algo más débil, que en su condición fresca. | II    |
| Moderadamente Meteorizada | Menos de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada como un suelo. la roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos continuos.                                                                          | III   |
| Muy Meteorizada           | Más de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada como un suelo, la roca fresca o decolorada se puede presentar como colpas o testigos discontinuos                                                                          | IV    |
| Completamente Meteorizada | Toda la roca está descompuesta y/o desintegrada como un suelo. La estructura original del macizo aún se mantiene en gran parte intacta.                                                                                                  | V     |
| Suelo Residual            | Toda la roca está convertida como suelo. la estructura del macizo y la fábrica del material están destruidas. Existe un gran cambio de volumen, sin embargo el suelo no ha sido transportado significativamente.                         | VI    |

**Tabla 6.3. Criterios para la Estimación de Resistencia del Material. Modificado de ISRM, 1981.**

| Grado | Descripción               | Identificación de terreno                                                                                                       | Rango aproximado de resistencia a la compresión uniaxial (MPa) |
|-------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| S1    | Arcilla Muy Blanda        | Fácilmente penetrable varias pulgadas con el puño.                                                                              | <0,025                                                         |
| S2    | Arcilla Blanda            | Fácilmente penetrable varias pulgadas con el pulgar.                                                                            | 0,025-0,05                                                     |
| S3    | Arcilla Firme             | Puede ser penetrada varias pulgadas con el pulgar, con esfuerzo moderado.                                                       | 0,05-0,10                                                      |
| S4    | Arcilla Rígida            | Fácilmente marcada por el pulgar, solamente puede ser penetrada con gran esfuerzo.                                              | 0,10-0,25                                                      |
| S5    | Arcilla Muy rígida        | Fácilmente marcada por la uña.                                                                                                  | 0,25-0,50                                                      |
| S6    | Arcilla Dura              | Marcada con dificultad por la uña.                                                                                              | >0,50                                                          |
| R0    | Roca Extremadamente Débil | Marcada por la uña.                                                                                                             | 0,25-1,0                                                       |
| R1    | Roca Muy Débil            | Se disgrega por un golpe fuerte de la punta del martillo geológico, puede ser escarbada por el cortaplumas.                     | 1,0-5,0                                                        |
| R2    | Roca Débil                | Puede ser escarbada por el cortaplumas con dificultad, se deforma o disgrega por un fuerte golpe de la punta del martillo.      | 5,0-25                                                         |
| R3    | Roca Medianamente Fuerte  | No puede ser escarbada o disgregada por una cortaplumas, la muestra se fractura con un solo golpe firme del martillo geológico. | 25-50                                                          |
| R4    | Roca Fuerte               | La muestra requiere más de un golpe del martillo geológico para ser fracturada.                                                 | 50-100                                                         |
| R5    | Roca Muy Fuerte           | La muestra requiere de muchos golpes del martillo geológico para ser fracturada.                                                | 100-250                                                        |

### 6.2.1. Unidad 1 (Gravas Superiores)

Esta unidad se reconoce desde la superficie (0 m del sondaje) hasta los 40 m de profundidad.

Corresponde a un sedimento de origen continental clástico, polimíctico, de mala selección, sin cemento, matriz soportado, con fragmentos líticos subredondeados. Tiene una granulometría tamaño grava, con clastos de rocas ígneas extrusivas de diferentes composiciones. El porcentaje de líticos es de 35% y de matriz 65% (Figura 6.2). Esta unidad se correlaciona con la Unidad Cuaternaria Antigua descrita por Rauld (2002).



**Figura 6.2.** Unidad 1 (Gravas Superiores).

En los 5 metros más superficiales de esta unidad, el grado de meteorización fue VI (suelo residual), asociado a suelo recientemente depositado y con alto grado de meteorización. En el resto de la unidad el grado de meteorización promedio fue III (moderadamente meteorizada), con los últimos 10 metros de la unidad alcanzando el grado II (levemente meteorizada).

Los clastos presentaron una resistencia R3 (roca medianamente fuerte) y la resistencia de la matriz fue S5 (arcilla muy rígida) la cual es fácilmente marcada con la uña.

Para corroborar la litología de esta unidad se extrajo la muestra C8-01, que se ubicaba a 39,7 metros de profundidad, y a la cual se le realizó el corte transparente que se describe en la Tabla 6.4.

**Tabla 6.4. Corte transparente muestra C8-01.**

|                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Nicoles paralelos</b></p>  <p>C8-01</p> | <p><b>Gravas</b></p> <p>Clastos 30%</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Subredondeados</li> <li>• Fragmentos líticos</li> <li>Traquita</li> <li>Andesita</li> <li>Dacita</li> <li>• Tamaño</li> <li>Hasta 5 mm</li> </ul> <p>Matriz 70%</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamaño</li> <li>Arcilla</li> <li>• Color</li> <li>// Marrón arcilloso</li> <li>X Marrón arcilloso oscuro</li> <li>• Composición</li> <li>Arcillas</li> </ul> <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Epidota</li> <li>• Esnectita</li> </ul> <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>GRAVAS</b></li> </ul> |
| <p><b>Nicoles cruzados</b></p>              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

En el corte transparente (Tabla 6.4), se observan clastos subredondeados con una mala selección. Los clastos son de origen ígneo extrusivos de distintas composiciones en su mayoría traquitas y andesitas. Es matriz soportado, donde la matriz presenta un color marrón y una granulometría fina de arcilla, no se observa cemento. El porcentaje de clastos es 40% y el de matriz es 60%.

### 6.2.2 Unidad 2 (Secuencia Volcánica)

Esta unidad está constituida por rocas de origen volcánico, principalmente lavas y rocas piroclásticas. Tiene un espesor total de 141,3 metros y se encuentra subyacente a las gravas de la unidad anterior (Gravas Superiores). Las litologías presentes en la Unidad 2 corresponden a intercalaciones de lavas, tobas multicolores (Figura 6.3) e ignimbritas. Esta unidad se asocia a la Formación Abanico, de edad oligocena superior – miocena inferior (Charrier y Munizaga, 1979).



**Figura 6.3.** Toba de Lapilli ubicada en Unidad 2 (Secuencia Volcánica).

La secuencia de rocas en esta unidad, de arriba hacia abajo, es la siguiente:

- Intercalación de rocas ígneas extrusivas de composición andesítica a dacítica. Roca con alto grado de meteorización difícil de ver su protolito. Muestras C9-01 y C9-02.  
**12,6 metros**
- Toba de lapilli multicolor. Roca de origen volcánico de color predominantemente verde, con intercalaciones de tobas marrón y rojiza, muestra pequeñas zonas de alteración pervasiva de sílice. Muestras C12-01, C14-01 y C22-01.  
**60 metros**
- Dacita. Roca volcánica extrusiva, afanítica, de color marrón y de composición dacítica. Muestra C23-01.  
**8,4 metros**
- Igual a subunidad B.  
**18,9 metros**



FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



CENTRO SISMOLÓGICO NACIONAL  
UNIVERSIDAD DE CHILE

- Intercalaciones de ignimbritas y tobas multicolores. Porcentaje de ignimbritas 30%, y porcentaje de tobas 70%.

**6,4 metros**

- Andesita criptocristalina. Roca volcánica extrusiva, afanítica, de color gris y composición andesítica. Muestras C30-01.

**3,3 metros**

- Igual a subunidad E. Subunidad con mayor porcentaje de ignimbrita. Porcentaje ignimbrita 60% y porcentaje de tobas 40%. Muestra C33-01.

**10,7 metros**

- Zona con intercalaciones de brechas de falla. Subunidad con zonas de brecha de falla intercaladas con tobas multicolores, ignimbritas y lavas de composición andesítica. Las brechas de falla presentan clastos fracturados y rotados que pertenecen a la roca preexistente, entre las que se encuentran, tobas multicolores, ignimbritas y lavas. Muestras C33-02, C34-01 y C37-01.

**21 metros**

El RQD de esta unidad es cercano al 20%, representando una calidad del macizo rocoso muy mala, sin embargo, existen intercalaciones de zonas de mayor calidad del macizo rocoso. En general, hasta los 160,3 m de profundidad, hay un leve aumento del RQD con la profundidad, variando de muy mala a mala. A profundidades mayores domina un RQD muy malo y comienza la zona de brechas de falla (subunidad H) hasta el final de esta unidad.

El grado de meteorización de esta unidad se tiende a mantener entre [III-IV] durante toda la unidad, excepto en los primeros 25 metros donde muestra un grado de meteorización entre [IV-V], y desde los 140 metros a los 160 metros donde el grado de meteorización es entre [II-III].

La resistencia de la matriz en la mayor parte de la unidad es R3, definida como roca medianamente fuerte. Esto cambia cuando se encuentra la litología de ignimbritas en los horizontes E y G de la secuencia estratigráfica. En estas zonas la resistencia de la roca disminuye a un R0, correspondiente a una roca extremadamente débil (R0).

La frecuencia de fracturas dentro de la Unidad 2 promedia 12 fracturas por metro y se mantiene más bien constante a lo largo de toda esta unidad hasta la zona de brechas de falla donde el promedio de fracturas por metro sube a 24 ff/m.

Para corroborar las litologías presentes en la Unidad 2 (Secuencia Volcánica) se realizaron 12 cortes transparentes para ser descritos en microscopio petrográfico (Anexo IV), en la Tabla 6.5 se muestra la descripción de la muestra C14-01 que está ubicada a una profundidad de 74,3 metros.

**Tabla 6.5. Descripción muestra C14-01.**

|                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Nicoles paralelos</b></p>  <p><b>C1401</b></p> | <p><b>Roca piroclástica verdosa</b></p> <p>Fragmentos mayores 35%</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Subangulosos</li> <li>• Fragmentos de roca               <ul style="list-style-type: none"> <li>Traquita</li> <li>Andesita</li> <li>Dacita</li> </ul> </li> <li>• Fragmentos de cristales               <ul style="list-style-type: none"> <li>Albita</li> <li>Feldespato</li> <li>Plagioclasa</li> </ul> </li> </ul> <p>Masa fundamental 65 %</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamaño</li> <li>• Ceniza</li> <li>• Color               <ul style="list-style-type: none"> <li>// Incolora a verdosa</li> <li>X Oscura a verde</li> </ul> </li> <li>• Composición               <ul style="list-style-type: none"> <li>Vidrio volcánico</li> </ul> </li> </ul> <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Epidota</li> <li>• Esmectita</li> </ul> <p>Texturas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fragmentada</li> </ul> <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>TOBA DE LAPILLI</b></li> </ul> <p>Vetilla</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Laumontita</b></li> </ul> |
| <p><b>Nicoles cruzados</b></p>                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

En el corte transparente se aprecia una toba de lapilli con matriz verdosa, roca predominante en la Unidad 2. Presenta textura fragmentada típica de este tipo de roca, fragmentos de roca principalmente traquitas y andesitas, mientras tanto los fragmentos de cristales son en su mayoría de albita. El corte

presenta una vetilla de laumontita sinuosa, bien delimitada y discontinua. La roca presenta minerales de alteración de epidota y arcillas entre la que se reconoce esmectita.

### 6.2.3 Unidad 3 (Gravas Inferiores)

Esta unidad se encuentra subyaciendo a la Secuencia Volcánica. Se reconoce a una profundidad de 181,3 m y fue atravesada hasta el final del sondaje (200 m). Tiene un espesor observado de 18,7 m.

Corresponde a un sedimento de origen continental clástico, de mala selección, sin cemento, matriz soportado, con fragmentos líticos subredondeados, polimícticos, con clastos de origen ígneo extrusivo e intrusivo y granulometría de gravas. Los líticos representan el 40% del sedimento, y la matriz 60% (Figura 6.4). Se correlaciona con la Unidad Cuaternaria Joven de Rauld (2002).



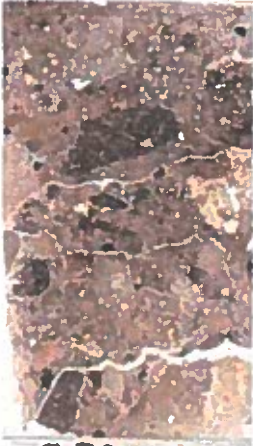
**Figura 6.4.** Unidad 3 (Gravas Inferiores).

El grado de meteorización de la Unidad 3 fue, en promedio, III; en los sectores con mayor porcentaje de clastos llegó a grado II.

La resistencia del material de los clastos es graduada en R3 (roca medianamente fuerte) para los clastos volcánicos y R4 para los clastos ígneos. En tanto la resistencia de la matriz es graduada en S5 (arcilla muy rígida), la cual es fácilmente marcada con la uña

Para verificar la litología de esta unidad se extrajo la muestra C37-02 ubicada a 182,1 metros de profundidad. A esta muestra se le realizó un corte transparente que se muestra en la Tabla 6.6, donde se observan clastos de origen volcánico de distintas composiciones, entre ellas, andesitas, andesita basáltica y traquitas, y clastos de origen plutónico como monzonita y monzodioritas. Los clastos son subredondeados y tienen una pobre selección. La matriz es de granulometría fina con presencia de esmectita, no se observa cemento. El porcentaje de clastos es 40% y el de la matriz es del 60%.

**Tabla 6.6. Descripción corte transparente muestra C37-02.**

|                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Nicoles paralelos</b></p>                        | <p><b>Gravas</b></p> <p>Clastos 40 %</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Subredondeados</li> <li>• Fragmentos líticos</li> <li>Traquita</li> <li>Andesita</li> <li>Dacita</li> <li>• Tamaño</li> <li>Hasta 1 cm</li> </ul> <p>Matriz 60 %</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamaño</li> <li>Arcilla</li> <li>• Color</li> <li>// Incolora sucia arcillosa</li> <li>X Oscura</li> <li>• Composición</li> <li>Arcillas de meteorización</li> </ul> <p>Minerales de alteración</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Epidota</li> <li>• Esmectita</li> </ul> <p>Nombre</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>GRAVAS</b></li> </ul> |
| <p><b>C 37-02</b></p> <p><b>Nicoles cruzados</b></p>  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

La descripción microscópica concuerda con la descripción macroscópica de la unidad y se le asocia el nombre de Gravass Inferiores. Con la muestra C37-02 se comprobó que la Unidad 3, que se encuentra a una profundidad de 182,1 metros, es de carácter sedimentario no consolidado.

Dado que los sedimentos de Gravass Inferiores (Unidad 3) tienen una edad menor a la unidad que la sobreyace (Secuencia Volcánica), se deduce que el sondaje S-1 atravesó una falla inversa que se interpreta como la Falla San Ramón (FSR), la cual produjo el cabalgamiento de la Formación Abanico (Secuencia Volcánica) sobre las Gravass Inferiores.

Gracias al sondaje S-1 se logró definir los componentes arquitectónicos de la zona de falla de la FSR, su protolito, zona de daño y el núcleo de falla.

La zona de daño es la red de estructuras subsidiarias que se unen al núcleo de la falla y pueden mejorar la permeabilidad de la zona de falla en relación con el núcleo y el protolito no deformado (Caine et al., 1996; Chester Y Logan, 1986; Smith et al., 1990; Andersson et al., 1991; Scholz y Anders, 1994; Goddard y Evans, 1995). Estas estructuras subsidiarias incluyen pequeñas fallas, venas, fracturas, roturas y pliegues que causan heterogeneidad y anisotropía en la estructura de permeabilidad y propiedad elásticas de la zona de falla (Caine et al., 1996; Bruhn et al., 1994).

De acuerdo con lo observado en el sondaje S-1, la zona de daño comienza a 130,5 metros de profundidad, donde se comienza a encontrar planos de fallas secundarias con estrías de falla. La zona de daño se extiende hasta el fin de la Secuencia Volcánica (181,3 metros), donde comienza la unidad de sedimentos Gravas Inferiores (Unidad 3).

El núcleo de falla es donde se produce la mayor parte del desplazamiento, generalmente tienen una menor porosidad y permeabilidad que el protolito adyacente (Caine et al., 1996) debido a la reducción del tamaño de grano y/o la precipitación mineral producida en el núcleo.

El sondaje S-1 atraviesa un núcleo de la falla discontinuo representado por 4 zonas de brechas de falla (Figura 6.5), definidas según la clasificación de Woodcock y Mort (2008) como brechas de falla tipo mosaico, las cuales se encuentran distribuidas en la subunidad H (Secuencia Volcánica) e intercaladas con zonas de daño. Estas zonas de brechas de falla mosaico tienen espesores de entre [15 - 130 cm] y en total suman 2,7 metros. La zona de brecha principal tiene un espesor de 130 cm y se encuentra al final de la Secuencia Volcánica, en contacto con las Gravas Inferiores.



Figura 6.5. Muestra de brecha de falla de la subunidad H.

A los núcleos de falla encontrados en los testigos del sondaje S-1 se le realizaron diferentes análisis como difracción de rayos x, FTIR y cortes transparentes pulidos para analizarlos petrográficamente en el microscopio de barrido electrónico SEM y el microscopio petrográfico del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

#### 6.2.4 Conteo de Clastos

Se realizó un conteo y medición de clastos en las Gravas Superiores y Gravas Inferiores. Los resultados permitieron caracterizar el tamaño promedio de los clastos, la cantidad de clastos, el porcentaje de clastos y litología de los clastos presentes en las gravas.

Para contar la cantidad de clastos se realizó un conteo de estos cada 10 cm. Se separó el sondaje por tramos de 1,5 metros para obtener el porcentaje de clastos y tamaño promedio de los clastos, finalmente se realizó una observación clasto por clasto para obtener la litología de estos.

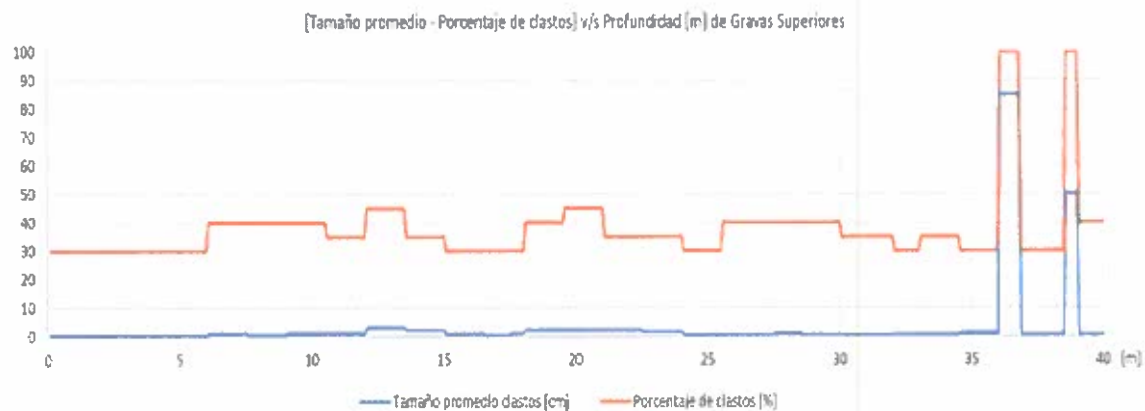


**Figura 6.6.** Gráfico [Tamaño promedio -Porcentaje de clastos] v/s Profundidad [m] de Gravas Superiores.

Los resultados mostrados en la Figura 6.6 revelan un porcentaje de clastos más bien constante, entre 30% y 40%, a lo largo del sondaje en las Gravas Superiores. El tamaño de los clastos también se mantiene constante, con tamaños menores a 5 cm. En ambas curvas se generan dos saltos importantes debido a la presencia de dos clastos de gran tamaño a los 36 y 38 metros de profundidad.

En la Figura 6.7 se muestra la cantidad de clastos de origen extrusivo e intrusivo que se encuentran a lo largo de las Gravas Superiores.

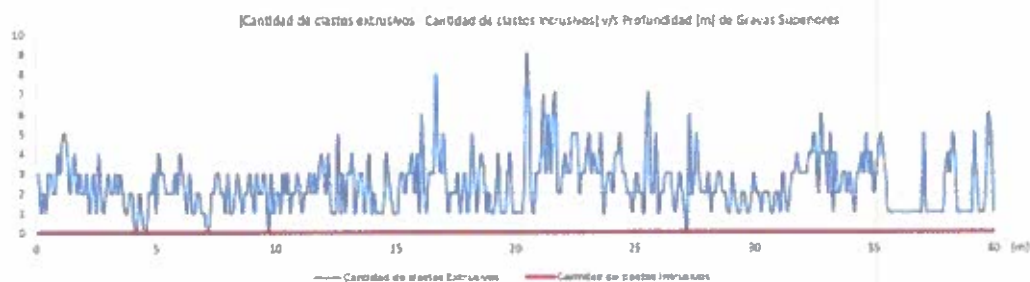


**Figura 6.7.** Gráfico [Cantidad de clastos extrusivos - Cantidad de clastos intrusivos] v/s Profundidad [m] en la unidad Gravas Superiores

En la Figura 6.8 se grafica el tamaño promedio y el porcentaje de clastos versus profundidad en la unidad Gravas Inferiores.

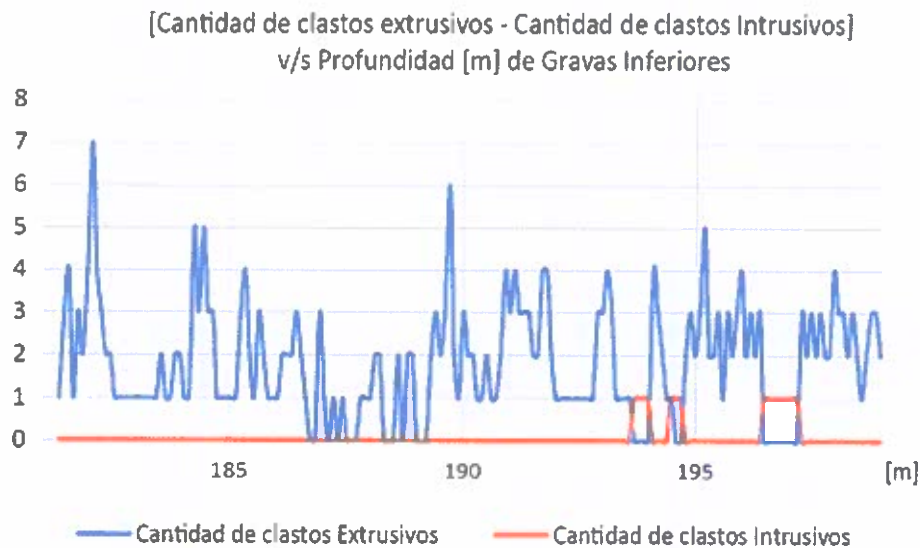


**Figura 6.8.** Gráfico [Tamaño promedio - Porcentaje de clastos] v/s Profundidad [m] en Gravas Inferiores.

La Figura 6.9 muestra la cantidad de clastos extrusivos e intrusivos en las gravas inferiores.

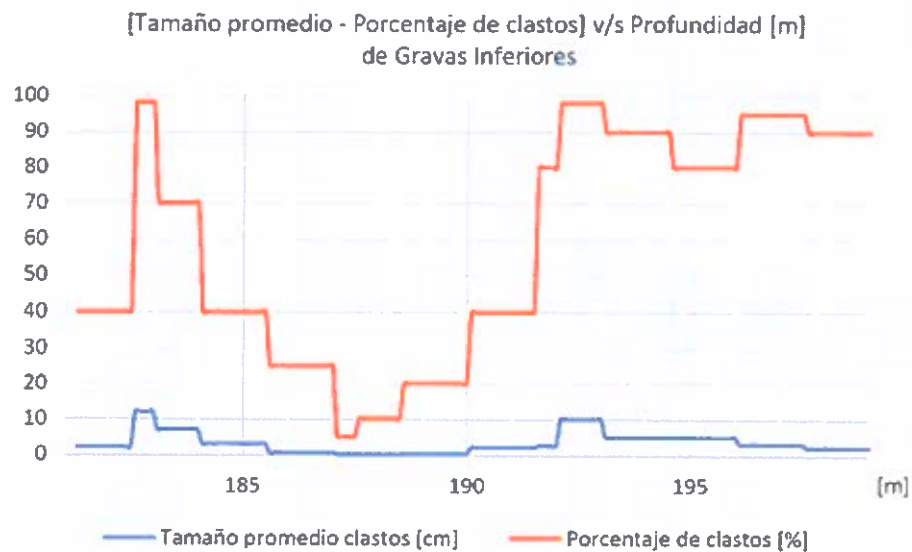


**Figura 6.9.** Gráfico [Cantidad de clastos extrusivos - Cantidad de clastos intrusivos] v/s Profundidad [m] en Gravas Inferiores.

## 6.2.5 Difractometría de Rayos X (DRX)

En el difractómetro de rayos x se analizaron 15 muestras extraídas de la unidad Gravas Superiores (1), de la unidad Gravas Inferiores (1) y de zonas de núcleos de falla (13). La Tabla 6.7 contiene los minerales encontrados en el análisis de difracción de rayos X para cada muestra, su profundidad y su ubicación en el sondaje S-1. En ella se observa que en todas las muestras se encuentran los minerales albita y laumontita, pero solo en los núcleos de falla hay presencia de esmectitas, como por ejemplo la montmorillonita. Además, en la mayoría de las muestras se encontraron variedades de plagioclasas y cuarzo.

**Tabla 6.7. Resultados Difracción de Rayos X**

| Resultados DRX |             |           | Mineralogía |     |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |
|----------------|-------------|-----------|-------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| Muestra        | Profundidad | Ubicación | Ab          | And | An | Crs | Hem | Lab | Lmt | Leo | Man | Mnt | Nim | Non | Qtz | Vrm | Woc |  |
| C03-16,20      | 837,8       | G.S.      | X           |     |    |     |     |     | X   |     |     |     |     | X   | X   |     |     |  |
| C33-160,50     | 693,5       | NF-1      | X           | X   |    |     |     |     | X   |     |     | X   |     |     | X   | X   |     |  |
| C33-162,00     | 692         | Rc        | X           |     |    |     |     |     | X   |     |     |     |     |     | X   | X   |     |  |
| C34-163,65     | 690,35      | NF-1      | X           |     |    |     |     |     | X   |     |     | X   |     |     | X   |     |     |  |
| C35-168,50     | 685,5       | Rc        | X           |     | X  |     |     |     | X   |     | X   |     |     |     |     | X   | X   |  |
| C35-172,70     | 681,3       | NF-2      | X           |     | X  |     |     |     | X   |     |     | X   |     | X   | X   |     |     |  |
| C36-175,30     | 678,7       | Rc        | X           |     | X  | X   |     | X   | X   |     |     |     |     |     |     | X   |     |  |
| C36-177,45     | 676,55      | NF-3      | X           |     |    |     |     |     | X   |     |     | X   |     | X   | X   |     |     |  |
| C36-177,55     | 676,45      | Rc        | X           |     |    |     |     |     | X   |     |     |     |     |     | X   | X   |     |  |
| C37-178,35     | 675,65      | Rc        | X           |     | X  |     |     |     | X   | X   |     |     |     |     | X   | X   |     |  |
| C37-178,55     | 675,45      | NF-3      | X           |     |    |     |     |     | X   |     |     | X   |     | X   | X   |     |     |  |
| C37-179,30     | 674,7       | Rc        | X           | X   |    |     | X   |     | X   |     | X   | X   |     | X   |     |     |     |  |
| C37-180,10     | 673,9       | NF-4      | X           | X   |    |     |     |     | X   |     |     | X   |     | X   | X   |     |     |  |
| C37-181,10 (V) | 672,9       | NF-4      | X           | X   |    |     |     |     | X   |     |     | X   |     | X   | X   |     |     |  |
| C40-195,00     | 659,0       | G.I.      | X           |     | X  |     |     |     | X   |     |     |     |     | X   | X   | X   |     |  |

Tanto las Gravas Superiores (C03-16,20) como las Gravas Inferiores (C40-195,00) contienen albita, laumontita, nontronita y cuarzo. Solo las Gravas Inferiores presentan andesina y vermiculita.

## 6.2.6 FTIR

En la Tabla 6.8 se muestran los resultados de los análisis FTIR realizado a 33 muestras a lo largo del sondaje S-1. A continuación, se analizan 3 minerales característicos (laumontita, illita y montmorillonita) para diferenciar zonas en el sondaje.

Tanto en las muestras de las gravas superiores como en las gravas inferiores tenemos una predominancia de illita, entre [38%-50%] para las gravas superiores y de 32% para las gravas inferiores,

seguido por la presencia de montmorillonita con porcentajes entre [20% -25%] y finalmente laumontita con porcentajes bastante bajos entre [4% - 6%].

A lo largo de la secuencia volcánica se nota una disminución de la presencia de illita con respecto a las gravas, sin embargo, hay muestras que tienen una porcentaje alto de illita, como por ejemplo, las muestras C09-45.10 y C15-78.40 que se ubican en los primeros metros de la secuencia volcánica y corresponden a roca con una meteorización mayor con respecto al resto de la secuencia volcánica, además las muestras C32-155.7, C33-158.7 y C37-179.3 tienen un alto porcentaje de illita [80% a 94%] que se asocia a un protolito de ignimbrita.

La laumontita, con contenidos altos (sobre el 50%) en varias muestras de la secuencia volcánica, se relaciona con una zona de alteración hidrotermal, la cual tiene como evidencia aguas termales cercanas a la zona de estudio.

En las muestras extraídas de los núcleos de falla se reconoce una mayor presencia de esmectita (predominantemente montmorillonita) en comparación con el resto de la secuencia volcánica. Esta esmectita se depositaría por fluidos en los vacíos dejados por el fracturamiento del protolito al formarse la brecha de falla, además de alterar los clastos angulosos dejados en la brecha de falla.

En los resultados de DRX y FTIR se establece que la esmectita aparece principalmente en los núcleos de falla de la FSR, esto muestra similitudes con la falla de Nojima en Japón. Los resultados de DRX mostrados en el trabajo de Ohtani et al. (2000), indican que la esmectita es un mineral característico en y cerca del núcleo de falla.

En la Figura 6.10 se muestra la columna estratigráfica del sondaje S-1 junto a datos geotécnicos obtenidos y a los resultados de análisis FTIR realizados.

Tabla 6.7 Tabla resumen de resultados FTIR.

| INTERVALO | TEMPERATURA | G.S.   | % Ab  | % Cal | % CHl | % Oz  | % Hem | % III | % Lmt | % Mc  | % Mint | % Non | % Or | % Ver | Suma   |
|-----------|-------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|------|-------|--------|
| C30-35    | 16,2        | 837,8  | 9,64  | 0,00  | 0,00  | 3,61  | 0,00  | 50,60 | 4,82  | 0,00  | 24,10  | 7,23  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C35-40    | 31,8        | 822,2  | 16,67 | 0,00  | 0,00  | 4,17  | 0,00  | 38,54 | 5,21  | 0,00  | 27,06  | 8,33  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C40-45    | 45,1        | 808,9  | 12,50 | 0,00  | 0,00  | 4,17  | 0,00  | 47,92 | 6,25  | 0,00  | 22,92  | 6,25  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C45-50    | 57,5        | 796,5  | 28,19 | 0,00  | 0,00  | 11,41 | 0,00  | 38,26 | 12,08 | 0,00  | 10,07  | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C50-55    | 58,7        | 795,3  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 3,97  | 0,00  | 7,95  | 88,08 | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C55-60    | 59,5        | 794,5  | 11,36 | 0,00  | 0,00  | 3,41  | 0,00  | 16,18 | 61,36 | 0,00  | 5,68   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C60-65    | 68,6        | 785,4  | 11,26 | 0,00  | 0,00  | 3,97  | 0,00  | 4,64  | 80,13 | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C65-70    | 78,4        | 775,8  | 17,12 | 0,00  | 0,00  | 18,84 | 0,00  | 12,84 | 11,13 | 0,00  | 12,67  | 5,14  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C70-75    | 87,1        | 766,9  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 20,24 | 0,00  | 35,48 | 53,57 | 0,00  | 5,95   | 4,76  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C75-80    | 98,85       | 755,15 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 4,26  | 0,00  | 24,82 | 51,06 | 0,00  | 14,18  | 0,00  | 5,67 | 0,00  | 100,00 |
| C80-85    | 106,3       | 747,7  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 17,27 | 0,00  | 0,00  | 82,73 | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C85-90    | 114,6       | 739,4  | 41,67 | 0,00  | 0,00  | 32,64 | 0,00  | 9,03  | 13,89 | 0,00  | 0,00   | 2,78  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C90-95    | 122         | 732    | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 14,74 | 0,00  | 34,74 | 16,84 | 0,00  | 18,95  | 14,74 | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C95-100   | 130         | 724    | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 28,95 | 0,00  | 14,91 | 50,88 | 0,00  | 5,26   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C100-105  | 138,4       | 715,6  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 14,75 | 0,00  | 0,00  | 85,25 | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C105-110  | 142,8       | 711,2  | 14,05 | 0,00  | 0,00  | 7,44  | 0,00  | 0,00  | 78,51 | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C110-115  | 149,7       | 704,3  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 27,12 | 0,00  | 16,95 | 22,03 | 0,00  | 16,95  | 16,95 | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C115-120  | 155,7       | 698,3  | 0,00  | 0,88  | 0,00  | 10,62 | 0,00  | 88,50 | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C120-125  | 158,7       | 695,3  | 0,00  | 1,23  | 0,00  | 4,29  | 0,00  | 94,48 | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C125-130  | 160,5       | 693,5  | 21,70 | 0,00  | 0,00  | 4,72  | 0,00  | 8,49  | 41,51 | 0,00  | 17,92  | 0,00  | 5,66 | 0,00  | 100,00 |
| C130-135  | 162         | 692    | 20,41 | 0,00  | 14,37 | 8,16  | 0,00  | 0,00  | 35,71 | 11,22 | 6,12   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C135-140  | 163,65      | 690,35 | 32,00 | 0,00  | 0,00  | 14,40 | 0,00  | 3,20  | 35,20 | 0,00  | 15,20  | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C140-145  | 164,5       | 685,5  | 15,23 | 0,00  | 0,00  | 11,54 | 0,00  | 0,00  | 52,88 | 10,58 | 5,77   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C145-150  | 172,7       | 681,3  | 15,75 | 0,00  | 0,00  | 6,16  | 0,00  | 8,22  | 36,99 | 0,00  | 23,29  | 5,59  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C150-155  | 175,3       | 678,7  | 6,78  | 0,00  | 0,00  | 10,17 | 0,00  | 0,00  | 71,19 | 11,86 | 0,00   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C155-160  | 177,45      | 676,55 | 18,81 | 0,00  | 0,00  | 3,96  | 0,00  | 4,95  | 58,24 | 12,09 | 36,63  | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C160-165  | 177,55      | 676,45 | 16,48 | 0,00  | 0,00  | 13,19 | 0,00  | 0,00  | 58,24 | 12,09 | 0,00   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C165-170  | 178,35      | 675,65 | 7,14  | 0,00  | 0,00  | 9,52  | 0,00  | 9,52  | 67,86 | 5,95  | 0,00   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C170-175  | 178,55      | 675,45 | 13,11 | 0,00  | 0,00  | 7,98  | 0,00  | 6,56  | 45,90 | 0,00  | 27,05  | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C175-180  | 179,3       | 674,7  | 10,75 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 5,38  | 80,65 | 3,23  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C180-185  | 180,1       | 673,9  | 12,07 | 0,00  | 0,00  | 7,76  | 0,00  | 6,90  | 44,83 | 0,00  | 28,45  | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C185-190  | 181,1       | 672,9  | 11,97 | 0,00  | 0,00  | 5,13  | 0,00  | 2,56  | 55,56 | 0,00  | 24,79  | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 100,00 |
| C190-195  | 195         | 659    | 20,90 | 0,00  | 0,00  | 6,72  | 0,00  | 32,09 | 6,72  | 0,00  | 20,15  | 4,48  | 5,97 | 2,99  | 100,00 |

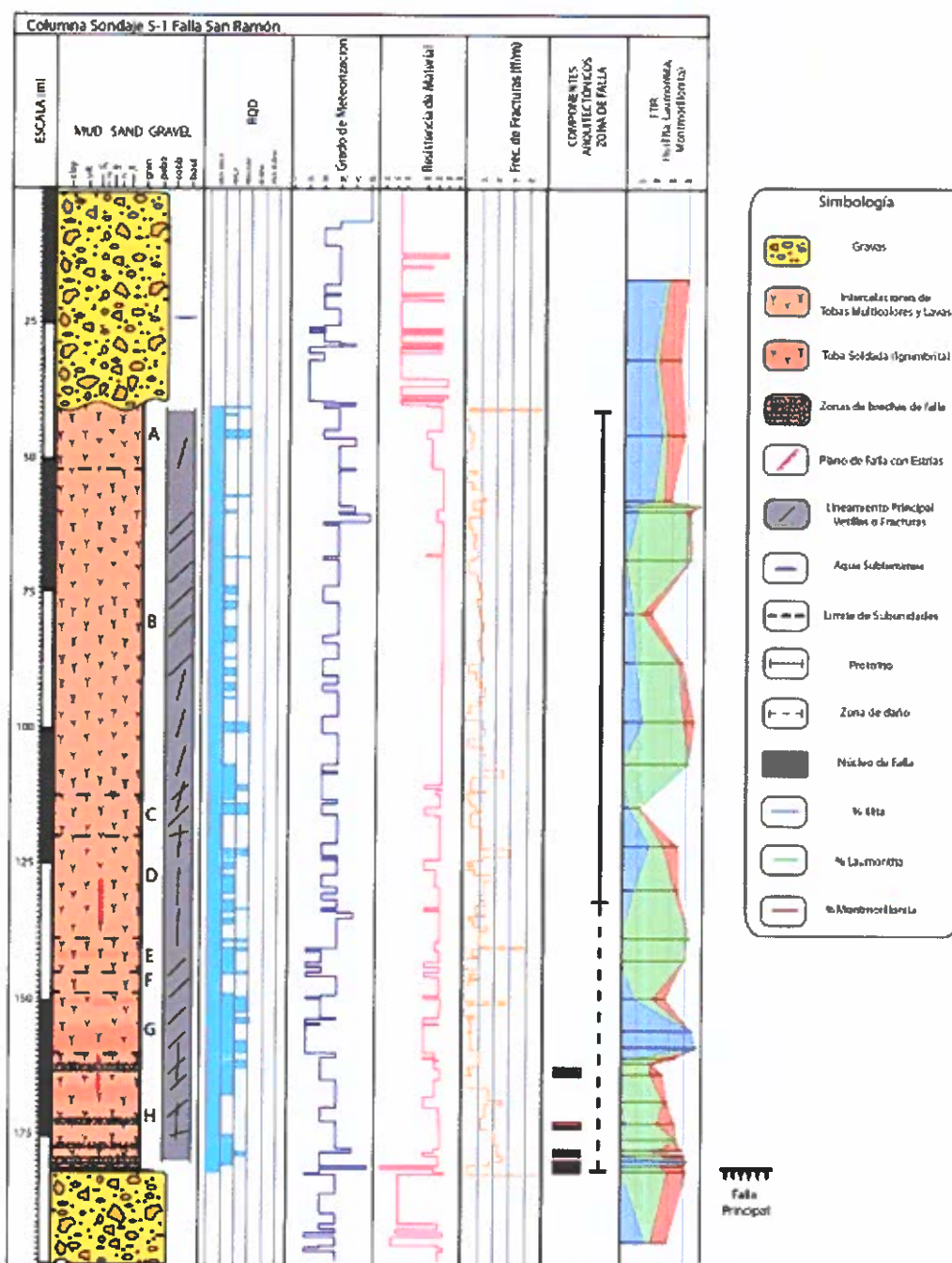


Figura 6.10. Columna estratigráfica sondaje S-1 con paralelo de datos geotécnicos y FTIR obtenidos de los testigos.

## 6.2.7 SEM

Desde el núcleo de falla definido en el sondaje S-1 se extrajeron 7 muestras para realizar cortes transparentes pulidos y ser analizadas en el microscopio de barrido electrónico (SEM) del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Los resultados de todas las muestras se encuentran en Anexo IV.

En la Figura 6.11 se muestra un resumen del análisis del corte transparente C33-160.9, ubicado a 160,9 m de profundidad, en el que se aprecia una brecha de falla tipo mosaico y los minerales característicos que se encuentran.

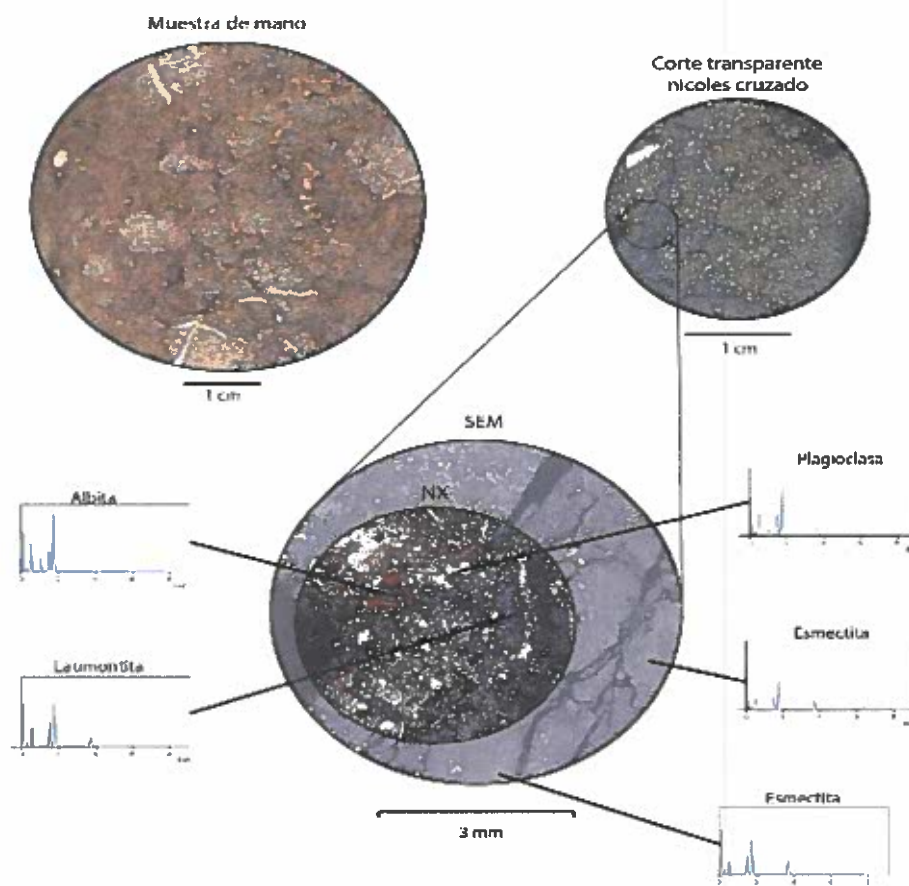


**Figura 6.11.** Resumen análisis SEM para muestra C33-160.9. En la imagen se puede apreciar una muestra de mano de la brecha de falla, el corte transparente a nicoles cruzados de la muestra y un sector estudiado por el microscopio de barrido electrónico (SEM).

Se puede mencionar que al igual que en otras fallas (por ejemplo, Solum et al., 2006) la mayor proporción de arcilla/no arcilla se presenta en la zona de núcleo de falla. Los resultados del análisis SEM al núcleo de falla de la FSR identifica como minerales característicos de la salbanda de falla, una variedad de arcillas entre las que se encuentran esmectitas, illitas y arcillas de capas mixta (mezcla de illita y esmectita entrelazadas), en menor cantidad se reconoce vermiculita y clorita. Lo anterior concuerda con otros trabajos que han analizado mineralógicamente salbanda de falla, como, por ejemplo, el trabajo de Wu (1978), donde se analiza la mineralogía de la salbanda de falla y define como arcillas presentes a la montmorillonita, illita, kaolinita, clorita, vermiculita y arcillas de capas mixta (Wu, 1978).

La laumontita presente en los análisis, se ubica predominantemente en la secuencia volcánica formando vetillas y está presente en el núcleo de falla rellenando espacios vacíos generados con la trituración del protolito, además, se presenta en vetillas que cortan zonas de brecha de falla tipo mosaico que representan el núcleo de falla, por lo cual la laumontita no necesariamente debe estar relacionada con las fallas, en cambio, su ocurrencia puede reflejar la mineralización asociada a flujos de fluidos (Solum et al., 2006) presentes en esta zona.

La formación de laumontita se asocia a fluidos de alta temperatura, reconociéndose en campos geotérmicos activos donde se formaría a por lo menos 130°C (Ohtani et al., 2000; Henley y Ellis, 1983). El sector de estudio se ubica en una zona rica en fluidos hidrotermales que tienen evidencias superficiales cercanas, en el sector de Baños de Apoquindo (Hospital Dipreca).

Según Hauser (1999), si asumimos una gradiente geotérmica de 1°C cada 25 m de profundidad y una temperatura media anual del aire de 18° C, la temperatura de 100° C se alcanzará a aproximadamente 2.125 m de profundidad. Lo que aún no alcanzaría la temperatura óptima para la formación de laumontita, por lo que se infiere que esta mineralización ocurrió a una mayor profundidad o cuando el gradiente geotermal era mayor en esta zona.

Como es el caso de otras fallas el límite de la zona de falla o zona de daño de la FSR es gradacional y el del núcleo de falla es nítido en el punto de referencia mesoscópico (Ohtani et al., 2000), dado que hay un contacto más bien abrupto entre las brechas de falla tipo mosaico y el protolito que es parte de la zona de daño.

### 6.3 Testigoteca

Los testigos del sondaje S-1 se guardaron en una bodega del Departamento de Geología de la Universidad de Chile ubicada en Beaucheff 851. La Figura 6.12 muestra la ubicación final de las 41 cajas de los testigos del sondaje S-1.



**Figura 6.12.** Fotografías de la ubicación final de los testigos del sondaje S-1.

## 6.4 Perfiles

### 6.4.1 Perfil de Resistividad

Como aporte del Departamento de Geología de la Universidad de Chile al proyecto, se realizó un perfil de resistividad eléctrica (ERT) en la zona del escarpe asociado a la FSR, que pasa sobre los sondeos S-1 y S-2 perforados en este proyecto.

La Figura 6.13 muestra el resultado del perfil generado por la inversión de datos obtenidos por la técnica de imagen ERT (*Electric Resistivity Tomography*).

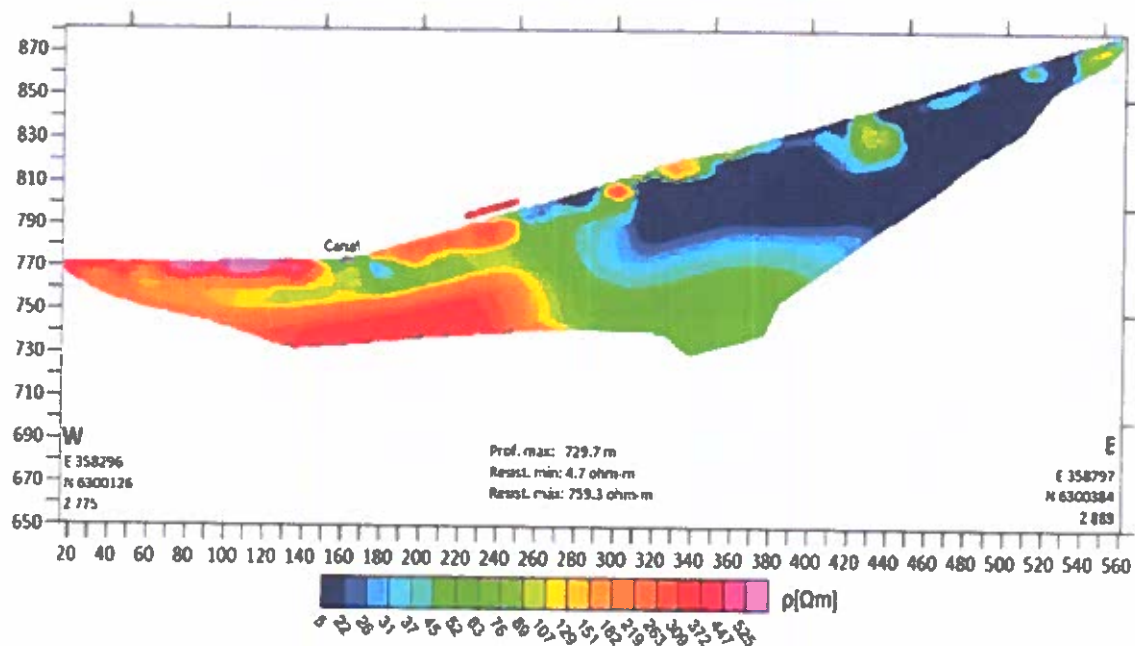


**Figura 6.13.** Perfil de resistividad eléctrica realizado como aporte de Departamento de Geología (UCH) al proyecto.

La Figura 6.14 muestra un perfil de resistividad presentado en el trabajo de Díaz et al. (2014), realizado al sur del área de este estudio. Al comparar ambas figuras, se observa que ambos perfiles muestran colores amarillos para el área occidental, representando las mayores resistividades, una zona de transición y un área de color azul ubicada al oriente de los perfiles que representan la zona con menor resistividad. En ambos perfiles la ubicación del escarpe de la FSR está representada por una línea roja en la parte superior.

El abrupto cambio lateral de resistividad ubicado en la medianía de ambos perfiles (sectores verdes), se interpreta como un control estructural de las propiedades eléctricas asociadas a la FSR, esto permite confirmar el patrón de diferencia de resistividad entre el bloque oriental y el occidental asociado a la FSR.

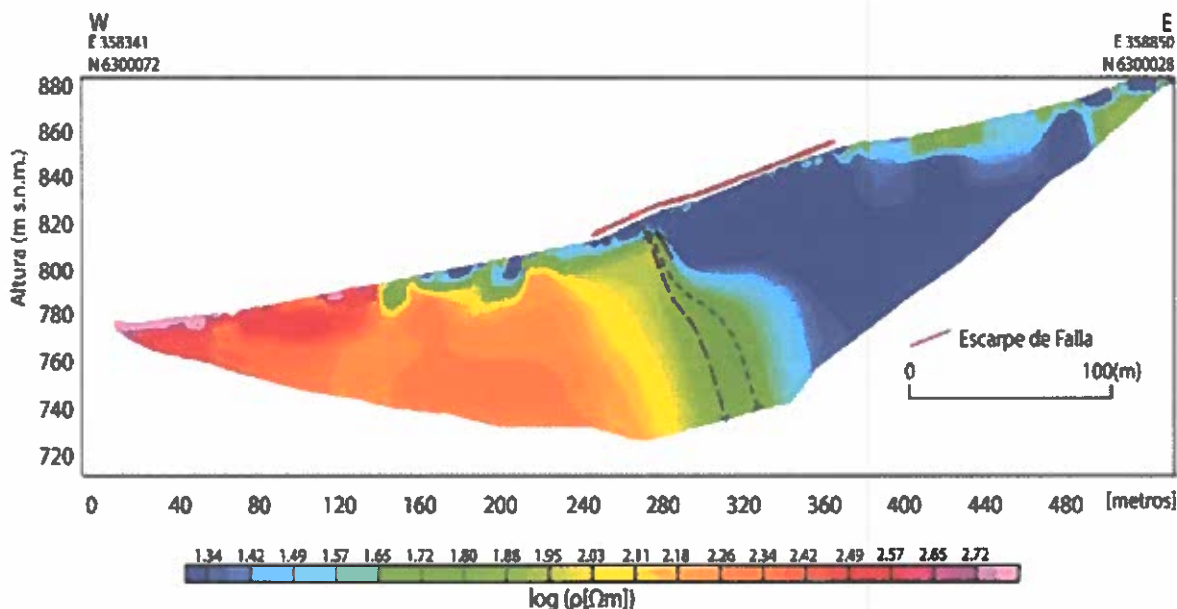


**Figura 6.14.** Perfil de resistividad de Díaz et al. (2014), que se encuentra cercano a los sondajes S-1 y S-2.

La Figura 6.15 muestra el perfil realizado para este proyecto; en él se han ubicado las columnas estratigráficas de los sondeos S-1 y S-2, para generar un perfil geológico de la zona de estudio.

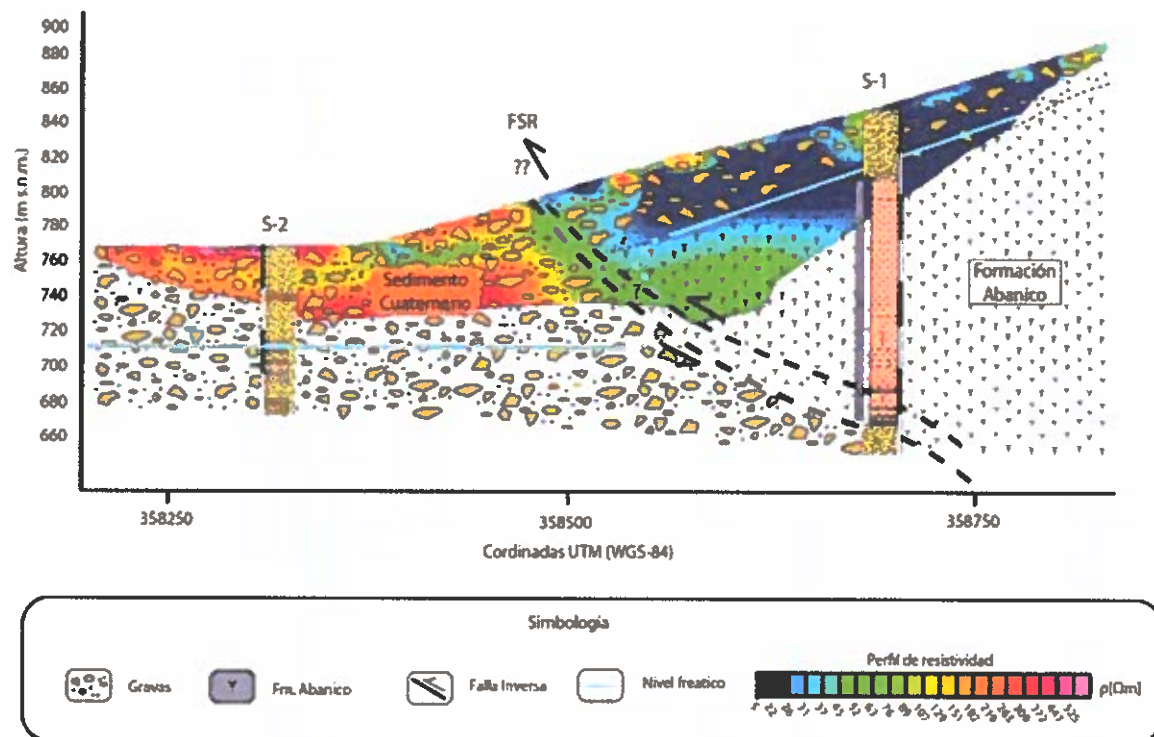


**Figura 6.15.** Perfil Geológico con la estratigrafía de ambos sondeos y el perfil de resistividad realizado para este estudio

#### 6.4.2 Perfil Geológico

A continuación, se presentan los resultados de un perfil geológico de orientación E-W del cerro Los Rulos (Figura 6.16).



**Figura 6.16.** Ubicación perfil geológico cerro Los Rulos y ubicación de sondajes. La línea azul es la ubicación del perfil geológico y en los puntos rojos se ubican el sondaje de diamantina S-1 y el sondaje de aire reverse S-2. Abajo: perfil topográfico.

En la Figura 6.17 se muestra el perfil geológico final donde se incluye la ubicación de los sondajes S-1 y S-2 y el perfil de resistividad eléctrica que atraviesa ambos sondajes. Se puede apreciar como la Formación Abanico se monta sobre las gravas cuaternarias del valle de Santiago, además se ven fallas inversas secundarias con vergencia oeste (Figura 6.18 y 6.19) y afloramientos bien estratificados de lutitas (Figura 6.20).



**fcfm**

FACULTAD DE CIENCIAS  
EXACTAS Y NATURALES  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**CSN**

CENTRO SISMOLÓGICO NACIONAL  
UNIVERSIDAD DE CHILE

# Perfil Geológico E-W

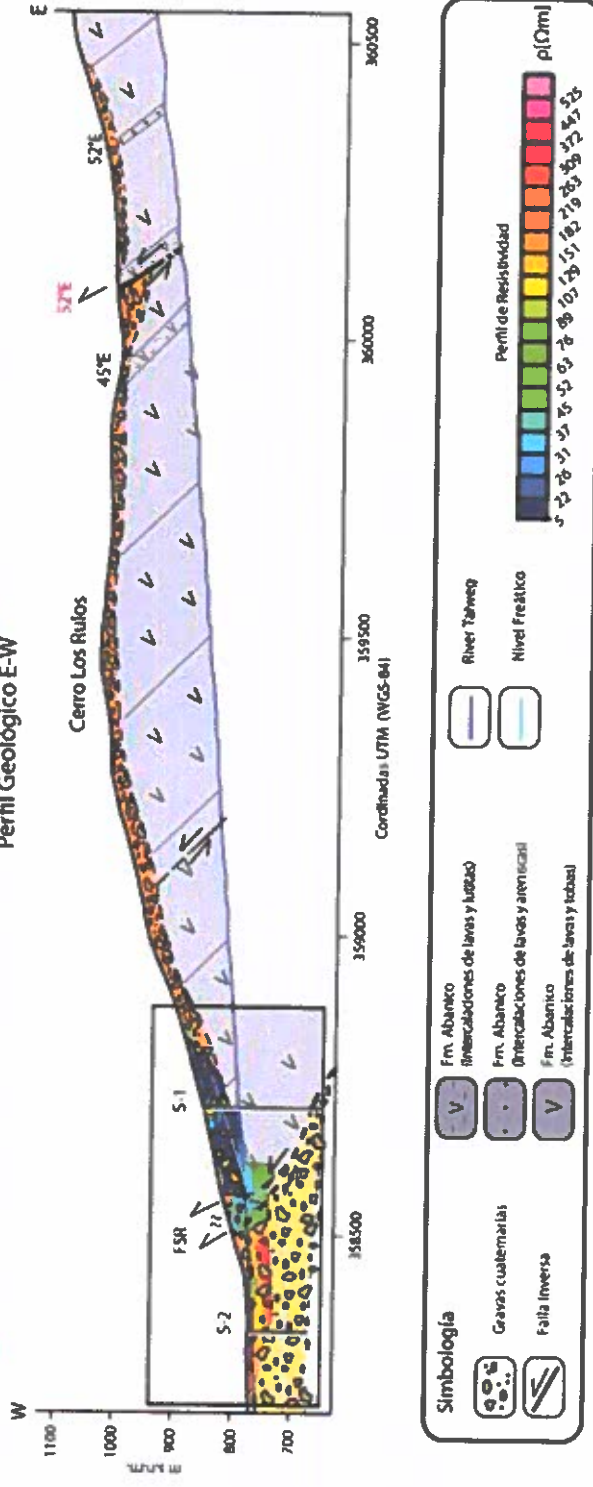


Figura 6.17. Perfil geológico cerro Los Rulos.



**fcfm**

FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**CSN**  
CENTRO SISMOLÓGICO NACIONAL  
UNIVERSIDAD DE CHILE



**Figura 6.17.** Falla Secundaria encontrada en la quebrada de Ramón.

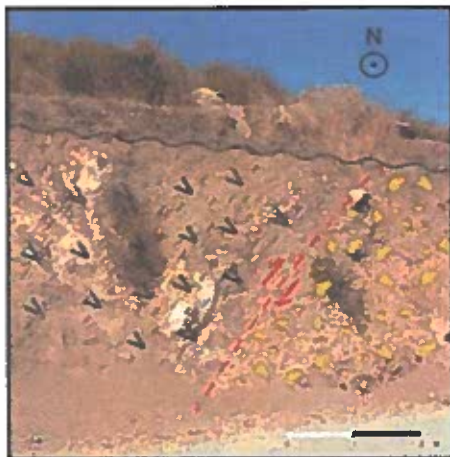


**Figura 6.18.** Falla inversa sobre el cerro Los Rulos.



**Figura 6.19.** Afloramiento estratificado de Lutitas.

## 6.5 Conclusiones

En el sondeo S-1, realizado en el escarpe de falla de la Falla San Ramón (FSR), se identificaron tres unidades principales. La unidad más somera, de 40 m de espesor, corresponde a gravas con clastos volcánicos y es asignada a la unidad Cuaternaria Antigua. La unidad intermedia, denominada Secuencia Volcánica tiene un espesor de 141,3 metros y contiene tobas multicolores, lavas e ignimbritas. Esta secuencia se asocia al miembro inferior de la Formación Abanico. La tercera unidad, con un espesor de 18,7 metros en el sondeo, consiste en sedimentos cuaternarios, principalmente gravas con clastos de origen ígneo extrusivo e intrusivos, que se asignan a la unidad Cuaternaria Reciente.

Por otra parte, en el sondeo S-1 se logró distinguir una zona de daño permeable de aproximadamente 50 metros de espesor, ubicada desde los 130 metros de profundidad hasta el contacto de la Secuencia Volcánica con las Gravas Inferiores (181,3 m). En esta zona de daño se ubican pequeñas fallas secundarias que aumentan la permeabilidad del protolito.

Junto a lo anterior, entre los 160,3 y 181,3 m, el sondeo S-1 atravesó un núcleo de falla discontinuo representado por 4 zonas de brechas de falla tipo mosaico, las cuales se encuentran distribuidas en la Secuencia Volcánica e intercaladas con zonas de daño. Estas zonas de brechas de falla mosaico tienen espesores de entre [15 - 130 cm] y en total suman 2,7 metros. La zona de brecha principal tiene un espesor de 130 cm y se encuentra al final de la Secuencia Volcánica en contacto con las Gravas Inferiores.

Lo anterior permite deducir que el sondeo S-1 atravesó la Falla San Ramón (FSR), una falla inversa que produjo el cabalgamiento de la Formación Abanico sobre las Gravas Inferiores.

Entre los minerales encontrados en la salbanda de falla se encuentran laumontita, illita, esmectita y arcillas de capas mixta. La laumontita tiene un origen hidrotermal, alterando tanto el protolito como la zona de falla. En los espacios vacíos generados por la trituración del protolito se deposita una variedad de arcillas, entre las cuales se pudo reconocer illita y esmectita. La illita, se presenta en ambas gravas (Superiores e Inferiores) y también en la secuencia volcánica en las zonas donde las ignimbritas son el protolito principal.

El porcentaje de esmectita aumenta significativamente en las zonas de núcleo de falla (brechas de falla), la disminución de tamaño de grano y la cristalización de minerales hidrotermales relleno espacios, ayudaría a que este núcleo de falla sea una barrera para los fluidos sean finalmente desviados siguiendo la estructura.

Con las muestras extraídas del sondaje S-2 se concluyó que solo atravesó sedimentos pertenecientes a depósitos cuaternarios de la cuenca de Santiago. La información de los resultados obtenidos se acopló de forma muy certera al perfil de resistividad de Díaz et al. (2014), confirmándose una vergencia oeste y un manto estimado de entre [54° - 60°E].

Considerando un manto estimado de 60° la zona de daño tendría un espesor real de 25 metros y el núcleo de falla total un espesor real de 1,35 metros; siendo el espesor real del núcleo de falla principal de 65 cm.

La unidad Secuencia Volcánica está caracterizada geotécnicamente por un RQD muy bajo con un pequeño repunte local, un grado de meteorización más bien homogéneo, entre III y IV, con un aumento al comienzo y final de la unidad llegando a un grado de meteorización V. La resistencia del material consistió básicamente en roca medianamente fuerte, exceptuando las zonas de ignimbritas y brechas de falla donde la resistencia del material fue menor, marcándola fácilmente con la uña. Presentó una frecuencia de fractura en promedio de 12 ff/m con una mayor frecuencia en las zonas de brechas de falla llegando a 24 ff/m. En tanto, las Gravas Superiores e Inferiores del sondaje S-1 (Unidad 1 y Unidad 3) presentaron un grado de meteorización entre [III-IV], y resistencia del material de la matriz asociada a arcilla muy rígida S5.

Los resultados mostrados en este trabajo demuestran que la Falla San Ramón es una estructura geológica de grandes proporciones presente en el sector oriente de Santiago, que cuenta con una longitud en superficie que llega a más de 30 km y en la zona de estudio tiene un espesor de zona de daño estimado de 25 metros.

## 6.6 Referencias

Andersson, J. E., Ekman, L., Nordqvist, R., and Winberg, A., 1991, Hydraulic testing and modeling of a low-angle fracture zone at Finnsjön, Sweden: *Journal of Hydrology*, v. 126, p. 45–77.

Armijo R., Rauld R., Thiele R., Vargas G., Campos J., Lacassin R., & Kausel E., 2007. The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile.

Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., and Kausel, E., 2010, The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile, *Tectonics*, 29, TC2007.

Brown, E. T. (1981). Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods.

Bruhn, R. L., Parry, W. T., Yonkee, W. A., and Thompson, T., 1994, Fracturing and hydrothermal alteration in normal fault zones: *PAGEOPH*, v. 142, p. 609–644.

Caine J.S., Evans J.P., Forster C.B., 1996. Fault zone architecture & permeability structure.

Charrier, R. y Munizaga, F., 1979. Edades K-Ar de volcánicas cenozoicas del sector cordillerano del Río Cachapoal, Chile (34°15' de latitud sur). *Revista geológica de Chile* N°17, pp. 41 – 51.

Chester, F. M., and Logan, J. M., 1986, Composite planar fabric of gouge from the Punchbowl fault, California: *Journal of Structural Geology*, v. 9, p. 621–634.

Díaz D., Maksymowicz A., Vargas G., Vera E., Contreras-Reyes E., & Rebolledo S., 2014. Exploring the shallow structure of the San Ramón thrust fault in Santiago, Chile (~33.5° S), using active seismic and electric methods.

Goddard, J. V., and Evans, J. P., 1995. Chemical changes and fluid-rock interaction in faults of crystalline thrust sheets, northwestern Wyoming, U.S.A.: *Journal of Structural Geology*, v. 17, p. 533–547.

Hauser Yung, A. (1999). Baños de Apoquindo: caracterización, hidroquímica, modelo hidrotermal y alternativas de aprovechamiento.

Henley, R. W., & Ellis, A. J. (1983). Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review. *Earth-science reviews*, 19(1), 1-50.

Ohtani, T., Fujimoto, K., Ito, H., Tanaka, H., Tomida, N., & Higuchi, T. (2000). Fault rocks and past to recent fluid characteristics from the borehole survey of the Nojima fault ruptured in the 1995 Kobe earthquake, southwest Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B7), 16161-16171.

Rauld, R., 2002. Análisis morfoestructural del frente cordillerano Santiago Oriente entre el Río Mapocho y la Quebrada de Macul. Memoria. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Rauld, R., 2011. Deformación Cortical y Peligro Sísmico Asociado a la Falla San Ramón en el Frente Cordillerano de Santiago, Chile Central (33° S). Tesis de grado para optar al grado de doctor en ciencias mención geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología

Scholz, C. H., and Anders, M. H., 1994. The permeability of faults, in the mechanical involvement of fluids in faulting: U.S. Geological Survey Open-File Report 94-228, p. 247–253.

Smith, L., Forster, C. B., and Evans, J. P., 1990. Interaction of fault zones, fluid flow, and heat transfer at the basin scale, in *Hydrogeology of permeability environments: International Association of Hydrogeologists*, v. 2, p. 41–67.

Solum, J. G., Hickman, S. H., Lockner, D. A., Moore, D. E., van der Pluijm, B. A., Schleicher, A. M., & Evans, J. P. (2006). Mineralogical characterization of protolith and fault rocks from the SAFOD main hole. *Geophysical Research Letters*, 33(21).

Vargas G., Klinger Y., Rockwell T.K., Forman S.L., Rebolledo S., Baize S., Lacassin R., & Armijo R., 2014. Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes.

Woodcock, N. H., & Mort, K., 2008. Classification of fault breccias and related fault rocks. *Geological Magazine*, 145(3), 435-440.

Wu, F. T. (1978). Mineralogy and physical nature of clay gouge. *pure and applied geophysics*, 116(4-5), 655-689.

## **7. MONITOREO SÍSMICO DE LA FALLA SAN RAMÓN**

### **7.1 Introducción**

El objetivo general de la investigación sismológica realizada para este proyecto fue mejorar el conocimiento del potencial sismogénico de la Falla San Ramón y las consecuencias para la zona metropolitana de Santiago en caso de ruptura en la falla.

La investigación sismológica tomó como base los sismogramas registrados por las estaciones sismológicas de la red permanente del CSN, incluyendo las estaciones instaladas recientemente en el marco del proyecto de monitoreo de la Falla San Ramón. El análisis de estos sismogramas fue clave para la detección y la caracterización de eventos sísmicos de pequeña magnitud ( $M < 2,5$ ). De esta manera, se pudo completar el catálogo del CSN con más de 900 eventos, detectados entre enero de 2017 y marzo de 2019.

Por otra parte, la distribución de la sismicidad permitió refinar el escenario de ruptura de la Falla San Ramón y sus consecuencias en términos de aceleración del suelo en la zona metropolitana de Santiago.

### **7.2 Metodología**

La red sismológica del CSN en la región de estudio comprende 16 estaciones sismológicas de banda ancha (Figura 7.1; Tabla 7.1). La sensibilidad de aquellos instrumentos permite registrar la velocidad de los movimientos del suelo generados por sismos locales como sismos ocurridos a muy larga distancia (varios miles de kilómetros) también llamados telesismos. Filtrando los sismogramas con filtro paso alto ( $f > 1$  Hz), es fácil diferenciar un sismo local de un telesismo. El contenido en frecuencias de un telesismo se caracteriza por el fenómeno de atenuación de las altas frecuencias con la distancia. En Chile, la mayor parte de la sismicidad registrada por la red sismológica nacional se debe a la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana. La zona sismogénica correspondiente se encuentra localizada en la trinchera de subducción a lo largo de la costa del Pacífico.

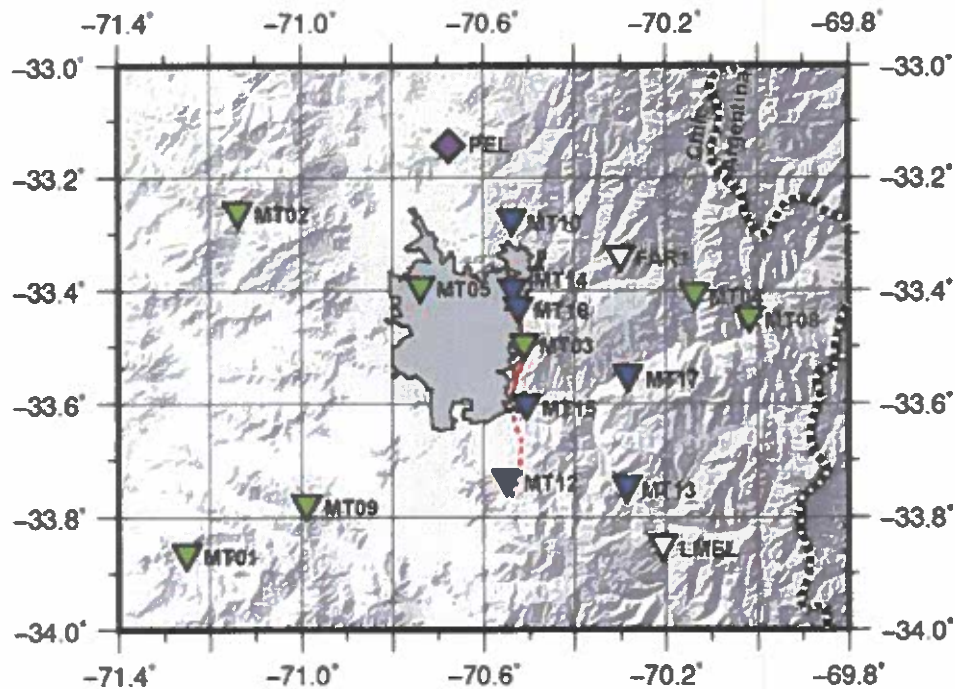


**Figura 7.1.** Mapa que muestra la ubicación de las estaciones sismológicas utilizadas en este trabajo. Los triángulos verdes y blancos forman parte de la red sismológica nacional. Los triángulos azules son del proyecto de monitoreo de la falla San Ramón.

Esta sismicidad se caracteriza por la ocurrencia de los sismos de mayor tamaño los cuales son los más peligrosos, como el terremoto de Valdivia en 1960 ( $M_w = 9,5$ ) o el terremoto del Maule en 2010 ( $M_w = 8,8$ ) (Cifuentes et al., 1989; Vigny et al., 2011). Otra fuente sismogénica, a considerar, es la deformación de la placa de Nazca, en el manto, por debajo de la placa Sudamericana. Los sismos relacionados con esta fuente, por lo general se ubican a una profundidad importante ( $\sim 100$  km debajo de la Región Metropolitana). Finalmente, una tercera zona sismogénica corresponde a los sismos corticales debido a procesos orogénicos en la región del ante país andino. Esta fuente en particular nos interesa para el presente estudio. Sin embargo, al interior de la misma de esta zona, existen fuentes sismogénicas secundarias que se pueden confundir con la sismicidad del frente Cordillerano como por ejemplo la sismicidad generada por la mina Los Bronces en el norte de Santiago.

**Tabla 7.1.** Estaciones sismológicas de la red permanente del CSN en la región de estudio. Las estaciones en verde corresponden a las últimas que fueron instaladas entre diciembre de 2016 y enero de 2018 en el marco de este proyecto. Elevación en m s.n.m.

| Código red | Estación | Lugar                      | Latitud | Longitud | Elevación | Instalación |
|------------|----------|----------------------------|---------|----------|-----------|-------------|
| C          | FAR1     | Farellones                 |         |          | 2770      | 20/12/2001  |
| C          | LMEL     | Las Melosas                |         |          | 1536      | 26/10/2011  |
| C1         | MT01     | Popeta                     |         |          | 310       | 21/01/2014  |
| C1         | MT02     | Curacavi                   |         |          | 323       | 15/01/2014  |
| C1         | MT03     | UAI                        |         |          | 1087      | 10/07/2013  |
| C1         | MT04     | Ventana Olivares AesGener  |         |          | 1922      | 01/08/2016  |
| C1         | MT05     | Renca                      |         |          | 765       | 21/10/2014  |
| C1         | MT08     | Bocatoma Colorado AesGener |         |          | 2085      | 30/08/2016  |
| C1         | MT09     | Talagante                  |         |          | 1371      | 17/10/2015  |
| C1         | MT10     | Hacienda Santa Martina     |         |          | 1420      | 20/01/2017  |
| C1         | MT12     | Pirque                     |         |          | 727       | 27/01/2017  |
| C1         | MT13     | San Alfonso                |         |          | 1199      | 16/12/2016  |
| C1         | MT14     | Cerro Calán                |         |          | 855       | 25/07/2017  |
| C1         | MT15     | Las Vízcachas              |         |          | 784       | 20/10/2017  |
| C1         | MT16     | CCHEN                      |         |          | 780       | 05/12/2017  |
| C1         | MT17     | Los maitenes               |         |          | 1159      | 12/12/2017  |

Independientemente de la fuente sismogénica, un número importante de los sismos registrados por la red nacional son locales y no se puede aislarlos filtrando el sismograma como para los telesismos. Por lo tanto, el aspecto desafiante de este trabajo fue diferenciar los sismos procedentes de las distintas zonas sismogénicas mencionadas anteriormente. Los parámetros para tomar en cuenta al momento de seleccionar los eventos relacionados con la tectónica del frente cordillerano son:

- Que estación registra el primer arribo.
- El tiempo entre la llegada de la onda P y la onda S.
- Coherencia de la señal en todas las estaciones.

El primer punto es primordial para tener una primera aproximación de la localización del sismo. Una estación sismológica cercana a la Falla San Ramón registrará un sismo relacionado con la misma antes que una estación más alejada. La onda P (compresiva) viaja dentro de la Tierra con una velocidad mayor a la Onda S (transversal).



**fcfm**

FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**CSN**  
CENTRO SISMOLÓGICO NACIONAL  
UNIVERSIDAD DE CHILE

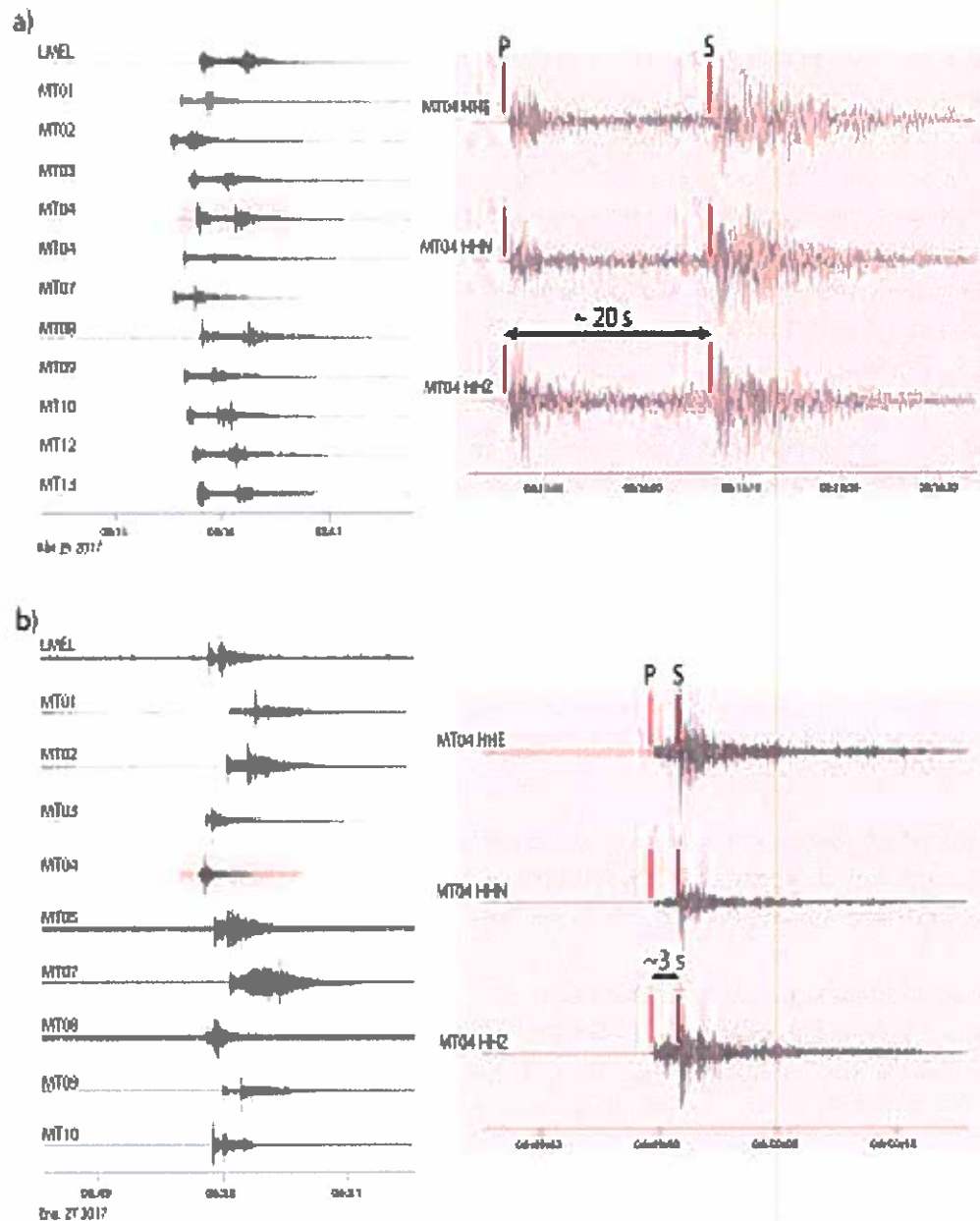


**Figura 7.2.** a) Sismogramas (componente vertical) registrados por las estaciones sismológicas del CSN en la región de estudio para una de las réplicas del terremoto de Valparaíso del 23/4/2017. El recuadro rojo muestra el sismograma de 3 componentes (este-oeste, norte-sur y vertical) registrado por la estación MT04. b) Similar a a) con un sismo localizado en el frente Cordillerano, en la zona de estudio. Nótese la diferencia entre los tiempos de llegada de las ondas P y S.

Por lo tanto, el tiempo  $t_{S-P} = t_S - t_P$  ( $t_P$  es el tiempo de arribo de la onda P y  $t_S$  el tiempo de arribo de la onda S) aumenta proporcionalmente a la distancia hipocentral: Los sismos más cercanos presentan un tiempo  $t_{S-P}$  menor a los sismos más alejados. Finalmente, un sismo tiende a tener mayor energía que las fuentes vibratorias antropogénicas (explosiones, camiones, etc.) y, por lo tanto, será registrado de forma coherente en todas las estaciones cercanas. La Figura 7.2 muestra 2 ejemplos de sismos registrados por la red del CSN en la región de estudio. Uno de estos eventos (Figura 7.2a) es una réplica del terremoto de Valparaíso del 23 de abril de 2017 y por lo tanto se localiza muy cerca de la trinchera de subducción, a más de 130 km al oeste de la región de estudio. El segundo (Figura 7.2b) es un evento local que ocurrió el 27/01/2017 y que se relaciona con la tectónica del frente Cordillerano el cual incluye la Falla San Ramón.

La localización de un evento sísmico es un problema inverso. Se puede describir como una ecuación para la cual se conoce el resultado (ej. el tiempo observado de llegada de las ondas P y S) y las incógnitas de la ecuación siendo el hipocentro, el tiempo origen y la velocidad a la cual viajan las ondas (el modelo de velocidad). Utilizando un modelo de velocidad tridimensional, el cual ha sido desarrollado por el CSN en paralelo a este estudio, y observando el tiempo de llegada de las ondas P y S en cada estación se puede buscar la localización hipocentral y tiempo origen que mejor ajuste a los tiempos de llegada observados.

### 7.3 Resultados

Se analizaron los sismogramas continuos de las estaciones de la Red Sismológica Nacional (incluyendo las estaciones instaladas en este proyecto) desde enero de 2017 a marzo de 2019, detectando 917 eventos localizados en la región de estudio (Figura 7.3).

La distribución de la sismicidad muestra claramente la presencia de 2 franjas orientadas en la dirección norte-sur. La franja más oriental, entre 69,8°W y 70,2°W agrupa eventos sísmicos con profundidades hipocentrales entre 5 y 10 km. Más al oeste (70,4-70,6°W) se observa una concentración de la sismicidad entre 10 y 20 km de profundidad. Esta franja se alinea con la traza en superficie de la Falla San Ramón (Figura 7.3) y por lo tanto asociamos la base de la rampa de la falla con esta franja de sismicidad. Esta observación nos permite sugerir que la falla presenta una extensión más al sur del río Maipo; no se observó sismicidad superficial en el plano de la Falla San Ramón. Sin embargo, el hecho que la base de la rampa sea altamente activa sugiere una acumulación de esfuerzos en la falla. Esta observación puede llevar a la conclusión que la Falla San Ramón es una falla lenta con ruptura poco frecuente, pero de gran amplitud como lo muestran los registros paleosísmicos (Vargas et al., 2014).

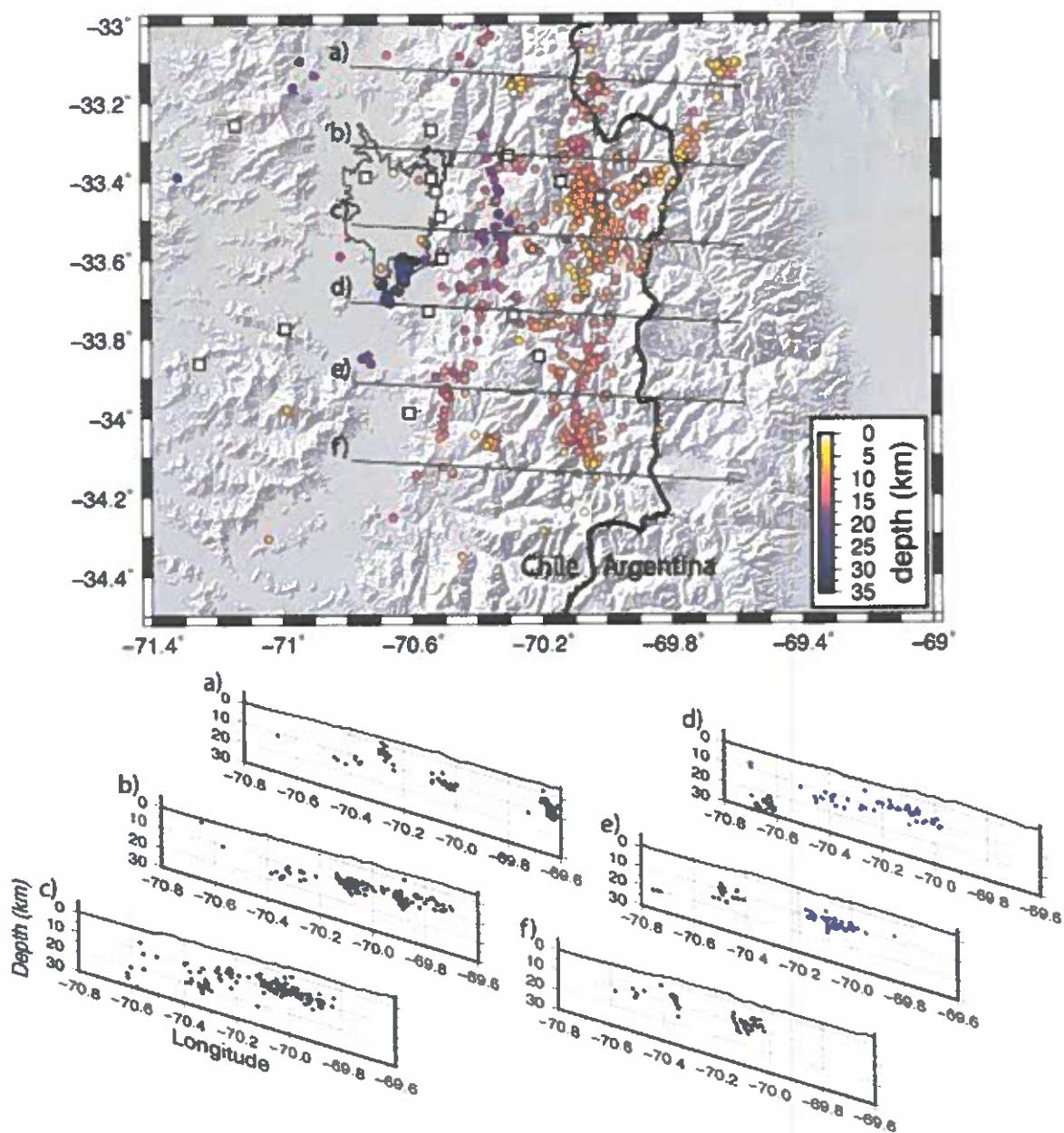


**Figura 7.3.** Mapa que muestra la distribución hipocentral de los eventos caracterizados en este estudio. El polígono negro muestra los límites del área metropolitana de Santiago. Los cuadros blancos marcan la ubicación de las estaciones sismológicas utilizadas para localizar los sismos. Las líneas negras continuas marcan la posición de los perfiles que aparecen debajo del mapa.

## 7.4 Peligro sísmico

En el “Estudio de riesgo y modificación PRMS Falla San Ramón” realizado por el Departamento de Geología (Universidad de Chile) y Territorio y Ciudad Consultores para el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Departamento de Geología, 2011), se estimó el peligro sísmico mediante una aproximación determinística. Considerando una magnitud máxima de  $M_w=7.4$ , se estimaron las aceleraciones horizontales máximas (PGA) que puede producir la Falla San Ramón, considerando el efecto de bloque colgante (hanging-wall) hacia el Este. Además, se consideró un suelo Tipo II, similar a las gravas consolidadas del Maipo y el Mapocho. Otro aspecto que se consideró fue el efecto de la cuenca de Santiago, con un valor de profundidad promedio de 300 m. Haciendo uso de la ley de atenuación definida por Campbell y Bozorgnia (2008) se obtienen los valores de PGA presentados en la Tabla 7.2 y en la Figura 7.4.

De la Figura 7.4 es posible ver que las aceleraciones horizontales máximas alcanzan valores del 70% g hacia el lado Este de la Falla San Ramón, dando énfasis al impacto del efecto de bloque-colgante.

**Tabla 7.2.** Valores de la aceleración horizontal máxima (PGA) en función de la distancia, para un evento de magnitud  $M_w=7.4$ . Notar que los valores hacia el Este son mayores que los obtenidos al Oeste por el efecto de bloque-colgante (ver detalles en el texto).

| Distancia hacia el Oeste (km) | PGA (%g) |
|-------------------------------|----------|
| 2.0                           | 47.0     |
| 5.0                           | 37.0     |
| 10.0                          | 26.0     |
| Distancia hacia el Este (km)  | PGA (%g) |
| 2.0                           | 70.0     |
| 7.9                           | 47.0     |
| 11.5                          | 37.0     |
| 14.7                          | 26.0     |

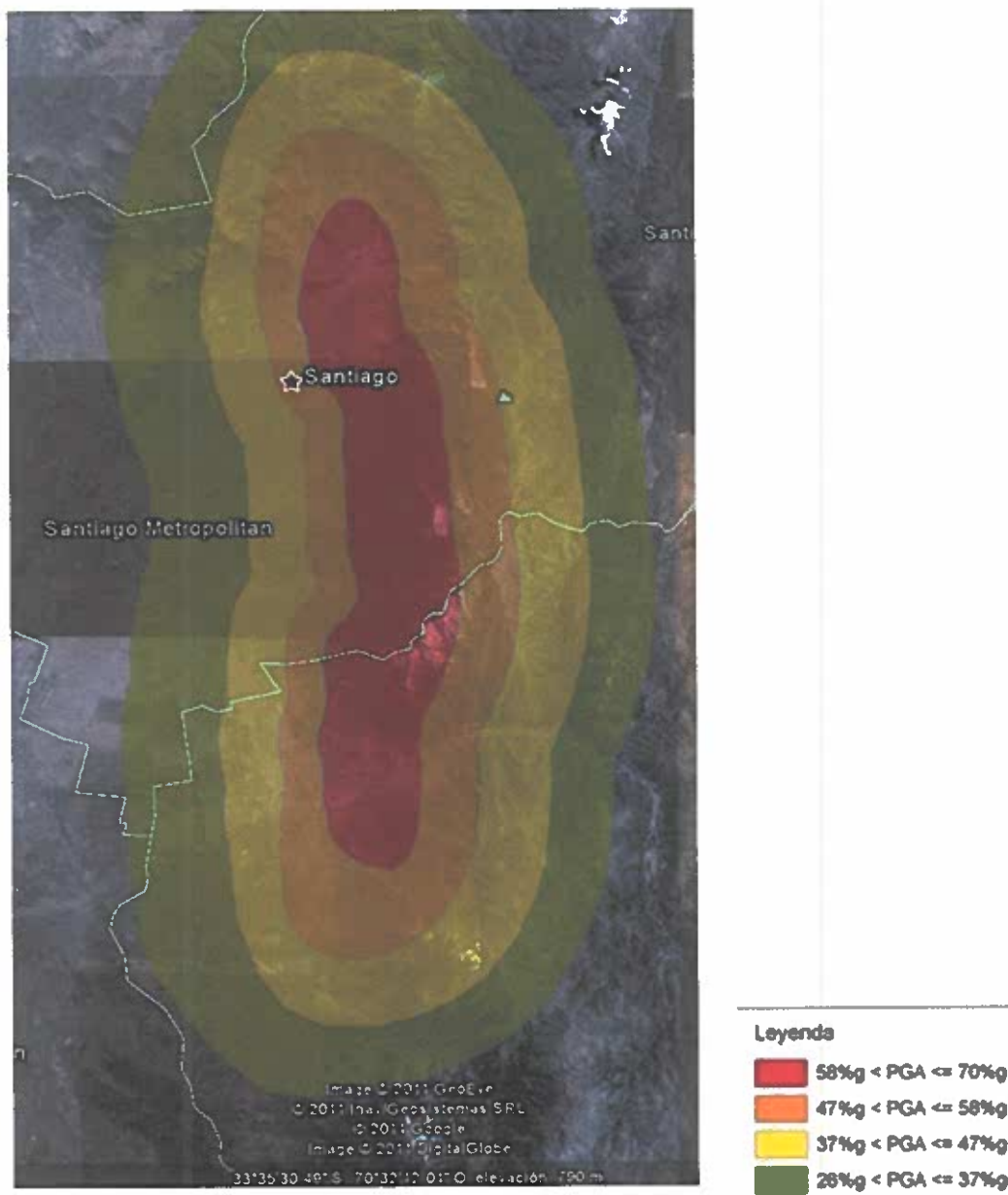


**Figura 7.4.** Valores de la aceleración horizontal máxima esperados producto del terremoto máximo creíble  $M_w$  7,4 en la Falla San Ramón.

La localización de la sismicidad en la base de la Falla San Ramón permite re-evaluar su tamaño y refinar el escenario de ruptura. Tomando un escarpe de la falla de 50 km de longitud, es decir desde la terminación norte en el Cerro Alvarado (Lo Barnechea ~33,4°S) hasta la comuna de Pirque (~33,7°S), y un ángulo de 34° para el buzamiento de la falla, se puede definir un plano de  $S = 50 \times 20 = 1.000 \text{ km}^2$  de superficie. Considerando, una rigidez (módulo de cizalle) de  $\approx 40 \text{ GPa}$  (Ji et al., 2010) y un desplazamiento sobre la falla de  $d = 4,9 \text{ m}$  (Vargas et al. 2014), se puede estimar un momento sísmico  $M_0 = \mu d S = 1,96 \cdot 10^{20} \text{ Nm}$ , o sea un sismo de magnitud  $M_w = 7.5$ .

A partir de este sismo característico para la Falla San Ramón, se puede calcular la aceleración del suelo que generaría semejante ruptura. Para eso se utiliza una ecuación de predicción de movimiento del suelo (GMPE en inglés) basado en el modelo de atenuación NGA-west 1 (Next Generation Attenuation – Chiou y Youngs, 2008). Este modelo se basa en la observación estadística de un gran número de registros de aceleración relacionados con sismos ocurridos en el mundo. Por lo tanto, se usa para estimar la aceleración promedio y desviación estándar asociada. Los parámetros de entrada de este modelo son: la distancia hacia la ruptura ( $d_{\min}$ ), la velocidad de la onda S en los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) y la profundidad de la cuenca. Considerando estos datos, calculamos el PGA para la región de estudio en caso de una ruptura de la Falla San Ramón (Figura 7.5).

Tomar en cuenta la calidad del suelo ( $V_{s30}$ ) es de primera importancia para mejorar las estimaciones de aceleración del suelo en el área metropolitana de Santiago. Este parámetro depende fundamentalmente de la calidad de la roca que aflora en superficie. Una roca blanda (por ejemplo, relleno sedimentario) tiende a ser caracterizada por una  $V_{s30}$  más baja ( $< 500 \text{ m/s}$ ) y tiene como consecuencia, la amplificación de los movimientos del suelo (efecto de sitio). Por otro lado, en el caso de una roca más resistente, caracterizada por una  $V_{s30}$  alta ( $> 1.000 \text{ m/s}$ ), estas amplificaciones quedarán limitadas.

En este estudio se consideró datos de  $V_{s30}$  compilada para la Región Metropolitana de Santiago (Leyton et al., 2011) a partir de datos de caracterización geológica, mediciones *in-situ* y ensayos en laboratorio. Si uno estima la aceleración del suelo sin considerar las variaciones de  $V_{s30}$  de acuerdo con la litología, el PGA dependerá principalmente de la distancia a la ruptura ( $d_{\min}$ ) lo cual resultará en una subvaluación de los valores de aceleración en las zonas caracterizadas por efectos de sitios y sobrevaluación del PGA en las zonas rocosas. Esto fue el caso en estudios anteriores, en particular en el “Estudio de riesgo y modificación PRMS Falla San Ramón” cuando la zonificación de la calidad de suelos para la zona Metropolitana de Santiago (Leyton et al., 2011) no estaba disponible (Figura 7.4). El resultado fue una distribución de PGA fuertemente dependiente de la distancia al plano de ruptura ( $d_{\min}$ ). Por otro lado, se tomó  $d_{\min} = 0$  para el bloque colgante, lo cual resultó en PGA muy altos.

En el presente estudio, se tomó en consideración las variaciones de  $V_{s30}$  con la litología y por lo tanto nuestros resultados, aunque similares en términos de aceleración máxima ( $\sim 0.7$  g), muestran una variación del PGA, con mayores aceleraciones para el bloque yaciente, consistente con valores bajos de  $V_{s30}$  para la cuenca de Santiago en comparación con los valores altos que caracterizan la Formación Abanico (bloque colgante).

El cálculo de la distancia al plano de ruptura ( $d_{min}$ ) se hizo considerando la altimetría de la zona (a partir de los datos SRTM de 90 m de resolución). Esta información es importante, en particular para el bloque colgante, por las altas variaciones topográficas que presenta (ej. Cerro San Ramón  $\sim 3200$  m s.n.m). De esta manera se pudo refinar el efecto del bloque colgante lo cual es máximo en los sectores de baja elevación como el valle del Maipo o el sector de Lo Barnechea (Figura 7.5).

De manera general, los resultados (Figura 7.5) muestran que en el caso de una ruptura de la Falla San Ramón por un sismo de magnitud  $M_w=7.5$ , los PGA podrían superar un valor de 0,7 g en los sectores bordeando el escarpe de la falla, en sectores caracterizados por valores de  $V_{s30}$  relativamente bajos, principalmente en el bloque yaciente (al oeste del escarpe de la falla). El sector norponiente de Santiago (Pudahuel, Recoleta), aunque alejado del escarpe de la falla, se vería afectado por aceleraciones relativamente altas ( $\sim 0.3-0.6$ g) debido a la presencia de suelos de menor calidad, caracterizados por  $V_{s30}$  bajas ( $< 200$  m/s).

El Centro de Santiago podría registrar PGA de 0,5 g. Los sectores más occidentales de la Ciudad registrarían valores cercanos a 0,3 g. En la Figura 7.4, se puede ver una comparación entre la aceleración espectral para nuestro modelo con los registros de aceleración del terremoto de Maule del 27 de febrero de 2010 en algunos sectores de la Ciudad (Cerro Santa Lucía, Hospital de Peñalolén y Hospital de Puente Alto). De forma general, y en particular cerca del escarpe de la Falla San Ramón, las aceleraciones estimadas en caso de ruptura de la falla serían notoriamente más altas que las que fueron registradas durante el terremoto del Maule.

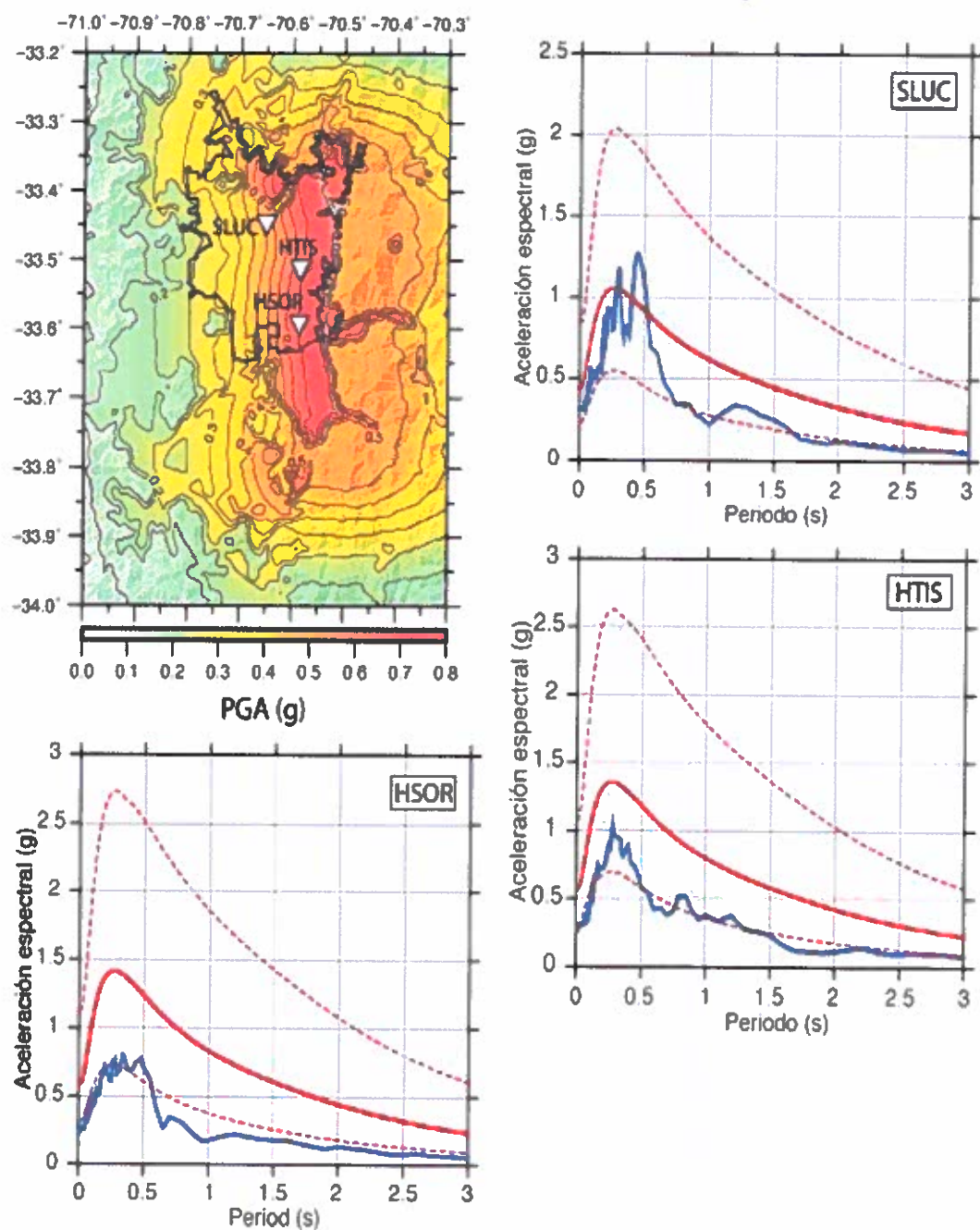


**Figura 7.5.** Mapa mostrando la aceleración del suelo en la Región Metropolitana de Santiago en el caso de ruptura de la Falla San Ramón. Se compara la aceleración obtenida en el presente trabajo (línea continua: promedio, líneas segmentadas: desviación estándar) con la aceleración registrada en varios puntos de la ciudad durante el terremoto del Maule del 2010 (azul) (Boroscchek y Contreras, 2012).

## 7.5 Conclusiones

El estudio sismológico de la sismicidad del frente Cordillerano permitió confirmar el carácter activo de la Falla San Ramón, con una sismicidad ubicada en el pie de una rampa a unos ~15 km de profundidad. La rampa en sí no presenta sismicidad lo cual sugiere un trabamiento de la falla con posibilidad de ruptura de gran amplitud. La sismicidad en profundidad interpretada como asociada a la falla da lugar a pensar que la Falla San Ramón presenta una extensión hacia el sur por una longitud total de ~50 km. El sismo característico que podría romper la falla San Ramón es de  $M_w=7,5$ . Generaría aceleraciones en el área metropolitana de Santiago que podrían superar los 0,7 g y ruptura en superficie. Los sectores en los que se espera una mayor aceleración son los que se encuentran próximos al escarpe de la falla.

## 7.6 Referencias

Boroschek, R., Contreras, V. 2012. Strong ground motion from the 2010 Mw 8.8 Maule Chile Earthquake and attenuation relations for Chilean subduction zone interface earthquakes, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, Tokyo, Japan.

Chiou, B. S.-J., Youngs, R. R. 2008. An NGA Model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, Earthqu. Spectra 24 (1), 173-215. <https://doi.org/10.1193/1.2894832>.

Cifuentes, I.L., Silver, P. G. 1989. Low frequency source characteristics of the great 1960 Chilean earthquake, J. Geophys. Res. 94, 643–663. doi:10.1029/JB094iB01p00643.

Departamento de Geología, Universidad de Chile. 2011. Estudio de riesgo y modificación PRMS Falla San Ramón. Realizado con Territorio y Ciudad Consultores para el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Secretaría Regional Ministerial, Región Metropolitana.

Ji, S., Sun, S., Wang, Q., Marcotte, D. 2010. Lamé parameters of common rocks in the Earth's crust and upper mantle, J. Geophys. Res. 115, B06314, <https://doi.org/10.1029/2009JB007134>.

Vargas, G., Klinger, Y., Rockwell, T. K., Forman, S. L., Rebolledo, S., Baize, S., Lacassin, R., Armijo, R. 2014. Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes, Geology 42(12), 1083-1086. doi:10.1130/G35741.1.

Vigny, C., Socquet, A., Peyrat, S., Ruegg, J.C., Métois, M., Madariaga, R., Morvan, S., Lancieri, M., Lacassin, R., Campos, J., Carrizo, D., Bejar-Pizarro, M., Barrientos, S., Armijo, R., Aranda, C., Valderas-Bermejo, M.C., Ortega, I., Bondoux, F., Baize, S., Lyon-Caen, H., Pavez, A., Vilotte, J.P., Bevis, M., Brooks,

B., Smalley, R., Parra, H., Baez, J.C., Blanco, M., Cimbaro, S., Kendrick, E. 2011. The 2010 Mw 8.8 Maule megathrust earthquake of central Chile, monitored by GPS, *Science* 332, 1417–1421. doi:10.1126/science.1204132.

## 8. MORFOTECTÓNICA

### 8.1 Introducción

La Falla San Ramón es una falla lenta, activa a escala geológica. Estudios previos demostraron la existencia de paleo terremotos que provocaron una ruptura superficial del orden de metros. La importancia de esta estructura para el peligro sísmico de Santiago hace necesario estudiar de manera profunda los depósitos sedimentarios afectados por la falla y reconstruir su historia de deposición y tectónica con estudios de terreno combinados con análisis de imágenes satelitales y dataciones con luminiscencia e isotopos nucleidos cosmogénicos.

### 8.2 Metodología

#### 8.2.1 Geomorfología

La morfometría se define como la medida cuantitativa de la forma del paisaje. En el nivel más simple, las formas de relieve se pueden caracterizar en términos de su tamaño, elevación y pendiente. Las mediciones cuantitativas nos permiten comparar objetivamente diferentes formas terrestres y calcular parámetros menos directos (índices geomórficos) que pueden ser útiles para identificar una característica particular de un área. Los índices geomórficos son particularmente útiles en estudios tectónicos porque se pueden usar para la evaluación rápida de áreas extensas y los datos necesarios a menudo se pueden obtener de imágenes satelitales. En este estudio hemos calculados los índices geomórficos más útiles en estudios de tectónica activa.

Con el fin de estudiar la geomorfología de las distintas cuencas de la zona de Santiago se delimitaron varias cuencas sobre las cuales se midieron y calcularon índices geomórficos.

Las principales mediciones que se realizaron por cuenca fueron altura, pendiente y las características del punto de salida de la cuenca. Se calculó la sinuosidad del frente de montaña, la integral hipsométrica, la relación de alargamiento de la cuenca, el radio de relieve de la cuenca (basin relief ratio) y el volumen mínimo erosionado.

-El índice de sinuosidad del frente de montaña refleja un equilibrio entre la tendencia de las corrientes y los procesos de pendiente para producir un frente de montaña irregular (sinuoso) y una tectónica activa vertical que tiende a producir un frente recto prominente.

-La distribución de las elevaciones dentro de una región proporciona información sobre el equilibrio entre los procesos externos (que tienden a disminuir el paisaje) y los procesos internos (que tienden a

crear alivio). El análisis hipsométrico (o análisis de área-altitud) es el estudio de la distribución del área de sección transversal horizontal de una masa de tierra con respecto a la elevación. El valor de HI varía de 0 a 1. Los valores integrales hipsométricos altos indican que la mayoría de la topografía es alta en relación con la media que representa una etapa de topografía juvenil. Los valores integrales de hipsométricos intermedios a bajos representan cuencas de drenaje disecadas más uniformemente, lo que indica una etapa madura de desarrollo.

- La relación de alargamiento de la cuenca se define como la relación entre el diámetro de un círculo de la misma área que la cuenca y la longitud máxima de la cuenca. La relación de alargamiento indica cómo la forma de la cuenca se desvía de un círculo y este índice informa sobre la forma de la cuenca. El índice de alargamiento de la cuenca ( $R_e$ ) es uno de los indicadores indirectos de la actividad tectónica reciente.

- La relación de alivio ( $R_h$ ) es un enfoque estadístico simple para caracterizar las cuencas de drenaje que se define como la relación entre el relieve total de la cuenca (es decir, la diferencia en la elevación de la salida de la cuenca y el punto más alto a lo largo de la brecha de drenaje) y la longitud de la cuenca. La relación de alivio, en la medida en que guarda una relación directa con la pendiente del terreno, es un indicador de tectónica activa. Los valores más altos de relación de alivio indican un mayor grado de actividad tectónica.

- La razón entre el volumen 3D de una cuenca hidrográfica y su área planimétrica 2D es un índice para comparar grupos de cuencas en diferentes fases de desarrollo. Este índice es útil para comparar los efectos relativos del levantamiento y la denudación en una cadena montañosa tectónicamente estable frente a uno que se eleva activamente.

### 8.2.2 Perfiles de los ríos

Los avances en geomorfología fluvial y evolución del paisaje indican que la presencia de un desequilibrio en el perfil de los ríos resulta de distintos procesos tectónicos, climáticos y geomorfológicos. Se puede estudiar el sistema de drenaje y su potencial repuesta a los cambios tectónicos por medio del estudio de los perfiles de los ríos.

Los perfiles longitudinales de un drenaje o perfiles de thalweg, proporcionan información sobre cambios de nivel de base del paisaje. Un perfil cóncavo representa un estado cercano al equilibrio del relieve con su nivel de base, mientras que un cambio abrupto de pendiente a lo largo del perfil o una convexidad en el mismo, puede ser el resultado de la propagación de la incisión aguas arriba por el thalweg, producto de un cambio en la posición del nivel de base. Esta perturbación en la pendiente del



FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



CENTRO SISMOLÓGICO NACIONAL  
UNIVERSIDAD DE CHILE

thalweg se denomina el 'knickpoint' (inflexión). Estos desequilibrios pueden resultar de una tectónica activa y de otros factores. De hecho, un cambio en la geología o en la geomorfología puede inferir desequilibrios en el sistema fluvial. En la zona de estudio se observa granitos, objetos geomorfológicos (terrazas, conos aluviales), o construcciones antrópicas. Así que para definir el tipo de knickpoints que se observan en el frente cordillerano, necesitamos estudiar precisamente la geología y la urbanización de la zona.

También se usa el índice de pendiente normalizado (ksn) a lo largo de los ríos. Según la teoría del stream power, el índice de pendiente normalizado de los ríos en equilibrio estático, donde la erosión compensa el levantamiento de las rocas, es función de la tasa de levantamiento relativo y de la resistencia de la roca a la erosión que depende tanto de la litología como de las condiciones climáticas.

La sinuosidad de un río es el índice que representa cuanto el trazado del río se aparta de una línea recta. La mayor sinuosidad suele ser frecuente en cauces de poca pendiente, frente a una baja sinuosidad representativa de un cauce de mayor pendiente y, por ello, con mayor fuerza erosiva. En este estudio la sinuosidad va varia de 1, cuando el río es recto y 0 con una sinuosidad máxima.

### 8.2.3 Los isótopos cosmogénicos ( $^{10}\text{Be}$ )

Los elementos producidos por acción de los rayos cósmicos son llamados nucleídos cosmogénicos (o cosmonucleídos). Los rayos cósmicos son partículas cargadas con energía suficiente para producir reacciones nucleares en los primeros metros de la atmósfera y litósfera (Figura 8.11).

El  $^{10}\text{Be}$  tiene dos orígenes, ambos debido a la acción de los rayos cósmicos sobre la materia terrestre. Una parte del  $^{10}\text{Be}$  es producida en la atmósfera por reacciones nucleares sobre átomos de nitrógeno y oxígeno; la otra, es la generada en la litósfera, producida principalmente por reacciones nucleares en los átomos de O y, en menor proporción, en los de Mg, Al, Si y Ca presentes en los minerales. Este tipo de  $^{10}\text{Be}$  es conocido como isótopo cosmogénico producido *in situ*. El  $^{10}\text{Be}$  es un cosmonucleído con un tiempo de vida media de  $1,36 \pm 0,07$  Ma.

Los factores que controlan la producción de los isótopos cosmogénicos ( $^{10}\text{Be}$ ) son: la variabilidad del campo magnético terrestre (latitud), la altitud, la profundidad y la topografía. En las geociencias, la geocronología mediante el estudio del  $^{10}\text{Be}$  ha permitido resolver interrogantes que no habían sido resueltas con otros métodos.



**Figura 8.1.** Interacción entre los rayos cósmicos con las partículas de la atmósfera y los primeros metros de la litosfera.

### **Datación de las superficies**

El análisis estadístico de la presencia de estos núcleos cosmogénicos sobre la parte más superficial de las rocas se está convirtiendo en un método infalible en el conocimiento del tiempo de exposición de esas superficies y, por tanto, de la evolución geomorfológica de la superficie terrestre.

Considerando la hipótesis de que las superficies a lo largo de los escarpes de fallas han sido creadas por la actividad tectónica, la edad obtenida con el perfil de los nucleídos cosmogénicos nos dará el desplazamiento promedio y la velocidad de deslizamiento a escala del Pleistoceno.

En el sitio elegido para hacer una datación  $^{10}\text{Be}$  se necesita hacer una excavación de unos 4 m de profundidad que permita muestrear una secuencia de deposición (Figura 8.2).

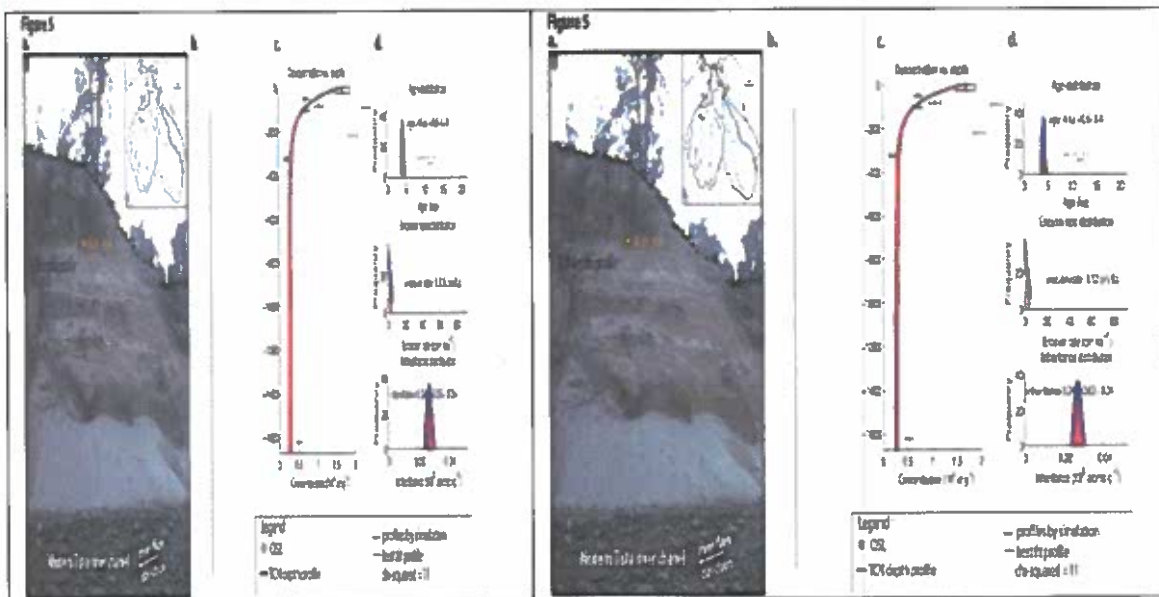


**Figura 8.2.** De Abrahams et al., 2018, QSR. a. Foto del afloramiento donde se sacaron las muestras de las dataciones con  $^{10}\text{Be}$  y termoluminiscencia. En el rincón arriba derecho, la zona de estudio (West Bengal, India). b. Resultados de la simulación Monte-Carlo con el simulador de perfil 1.2 de Hidy et al., 2010. El perfil muestra las concentraciones en  $^{10}\text{Be}$  (círculos) y sus incertidumbres. La línea azul muestra la mejor solución de la simulación por la producción de  $^{10}\text{Be}$  correspondiente a la edad de la superficie. c. Los tres gráficos muestran la frecuencia de Monte-Carlo por la edad de la superficie, la tasa de erosión y la concentración heredada de  $^{10}\text{Be}$ .

Debido a la fuerte urbanización, y a la poca presencia de cuarzo en los sedimentos, solo un lugar tenía las características para la obtención de muestras adecuadas para las dataciones con nucleídos cosmogénicos: el cerro Calan (Figura 8.3). En la cumbre del cerro, se hizo una calicata de 3.8 m de profundidad donde se tomaron 8 muestras para hacer dataciones cosmogénicas (Tabla 8.1).



**Figura 8.3.** Muestreo del Cerro Calán – Arriba: vista del cerro Calán y del lugar de muestreo con imagen satelital. Abajo: Fotos de la calicata durante el muestreo.



**Tabla 8.1. Detalles de muestreo del cerro Calán**

| Características del sitio |             |           |         |                  |
|---------------------------|-------------|-----------|---------|------------------|
| Latitud                   | Longitud    | Elevación | Muestra | Profundidad (cm) |
| S 33.398251               | N 70.537175 | 856 m     | CC 1    | 15-22            |
|                           |             |           | CC 2    | 70-80            |
|                           |             |           | CC 3    | 115-125          |
|                           |             |           | CC 4    | 140-150          |
|                           |             |           | CC 5    | 170-180          |
|                           |             |           | CC 6    | 210-220          |
|                           |             |           | CC 7    | 260-270          |
|                           |             |           | CC 8    | 310-320          |

### Enterramiento

$^{26}\text{Al}$  y  $^{10}\text{Be}$  son radionúclidos escasos que se producen en una proporción fija en los granos de cuarzo sometidos a bombardeos de rayos cósmicos en la superficie de la Tierra, pero tienen diferentes constantes de desintegración. Si el cuarzo estuvo expuesto en la superficie de la Tierra durante el tiempo suficiente para acumular una concentración significativa de estos nucleídos y que después se entierra profundamente, y por lo tanto se aísla del flujo de rayos cósmicos, los dos nucleídos se desintegran a diferentes velocidades, y la relación de  $^{26}\text{Al} / ^{10}\text{Be}$  refleja la duración del enterramiento.

### Muestreo del sondaje de la Falla San Ramón

El sondaje de la Falla San Ramón reveló una zona de falla a 180 metros de profundidad que superpone roca volcánica sobre material sedimentario más reciente.

A fin de obtener la fecha de enterramiento del material sedimentario bajo la roca volcánica, se muestreó un bloque de granodiorita para dataciones cosmogénicas ( $^{10}\text{Be}$ , y  $^{26}\text{Al}$ ; Figura 8.4).



**Figura 8.4.** Sondaje de la Falla San Ramón.

### Tasa de erosión

La mayoría de los sedimentos que se encuentran en la cuenca de Santiago vienen de la erosión de las rocas de las cuencas de los ríos Maipo y Mapocho. La tasa de erosión promedio de la cuenca del río Maipo fue calculado por Carretier et al. (2013), quienes obtuvieron una tasa promedio de 0,27 mm por año integrado sobre un periodo de 2 años.

La tasa de erosión promedio de una cuenca depende de la geología, la actividad tectónica, y de los factores climáticos. En este estudio calculamos la tasa de erosión promedio del río Mapocho.

Para calcular las tasas de erosión promediadas de la cuenca del Mapocho, combinamos un código numérico de Delunel et al. (2010) y herramientas del Sistema de información geográfica (ArcGIS®) utilizando un modelo de elevación digital (DEM) de resolución de 9 metros. Extrajimos los parámetros geomórficos relevantes del DEM, delimitando diferentes cuencas y calculando su elevación media, pendiente media y área de drenaje con módulos hidrológicos de Topotoolbox 2, y calculamos la producción teórica de  $^{10}\text{Be}$  en la superficie para cada celda del DEM. Usamos una tasa de producción de espalógeno moderna por neutrones a nivel del mar y latitud alta de  $3.9 \pm 0.1$  átomos  $\text{g}^{-1} \text{año}^{-1}$ , una longitud de atenuación de  $160 \text{ g cm}^{-2}$ . No tomamos en cuenta la producción de  $^{10}\text{Be}$  por muones, que representa solo el 2,5% de la producción de superficie de  $^{10}\text{Be}$ .

El flujo entrante de rayos cósmicos puede atenuarse mediante diversos parámetros, como el apantallamiento topográfico, la capa de nieve y los depósitos superficiales (suelo, lagos, morrenas). El factor de apantallamiento topográfico se calculó para cada celda de la cuadrícula siguiendo Dunne et al. (1999). Para obtener una corrección de la capa de nieve, extrajimos los glaciares y las áreas de la cubierta de nieve. Siguiendo a Delunel et al. (2010), establecimos tasas de producción de superficie cosmogénica en 0 en estas áreas. Nuestros factores de corrección son, por lo tanto, conservadores, que pueden corregir en exceso el efecto de la cubierta de nieve y hielo, asumiendo que las áreas cubiertas de glaciares contribuyen proporcionalmente al flujo de sedimentos (es decir, la tasa de erosión es constante en todas las subcuencas muestreadas). La tasa de producción de superficie  $^{10}\text{Be}$  corregida promedio de la cuenca se utilizó para estimar las tasas de erosión de la cuenca a partir de las concentraciones medidas de  $^{10}\text{Be}$ .

### Termoluminiscencia

Debido a la exposición a la radiación ambiental en los sedimentos circundantes y de los rayos cósmicos entrantes, los electrones excitados libres se atrapan dentro de los defectos cristalinos de los minerales (principalmente cuarzo y feldespato) y se acumulan hasta la exposición a la luz solar que los desaloja, blanqueando la muestra de su señal y, restableciendo el “reloj de luminiscencia” a cero. Una vez expulsados de las “trampas”, los electrones son atraídos hacia los agujeros creados por la ionización y en la recombinación en estos centros, emiten energía en forma de fotones. Por lo tanto, la datación OSL proporciona una estimación de la edad de la última vez que los sedimentos fueron expuestos a la luz solar, al estimar la cantidad de radiación ionizante absorbida desde el enterramiento.

A la entrada de la quebrada Macul se observa depósitos cuaternarios que forman un escarpe de 45 metros de altura (Figura 8.5). En la superficie de estos depósitos hicimos un muestreo para obtener datación de termoluminiscencia en una capa fina a 4 metros de profundidad. Se tomaron muestras para hacer un perfil de nucleídos cosmogénicos, pero debido a la falta de grano de cuarzo, no se pudo realizar los análisis.

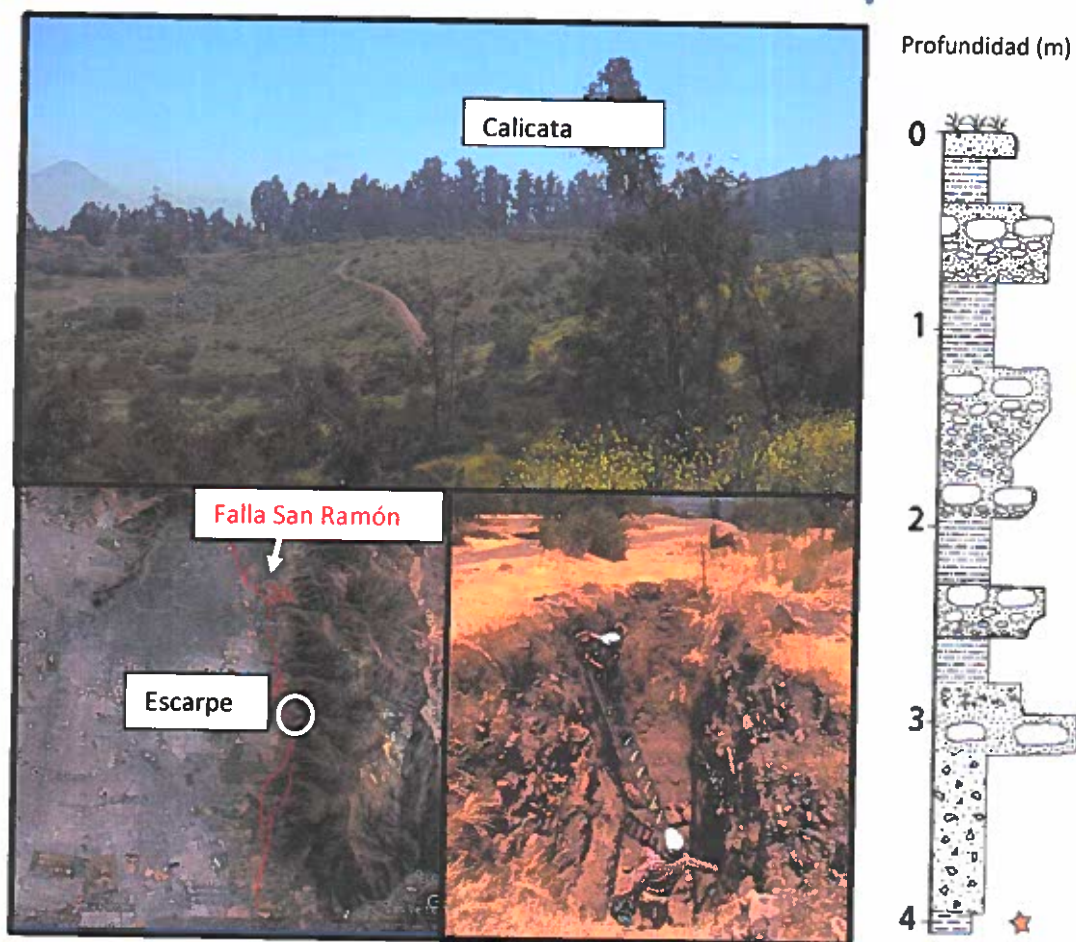


**Figura 8.5.** Muestreo de un escarpe a la entrada de la Quebrada de Macul. Arriba: vista del escarpe y del lugar de muestreo. Abajo: imagen satelital del área de muestreo y foto de la calicata durante el muestreo. A la derecha: descripción de los depósitos sedimentarios en la calicata y localización de la muestra para termoluminiscencia (estrella amarilla).

### 8.3 Caracterización de las cuencas

En este estudio se delimitaron 45 cuencas (Figura 8.6). 11 cuencas se encuentran en la comuna de Lo Barnechea, al norte de Santiago, 23 cuencas en el frente, al oriente de Santiago, entre las cuencas de los ríos Mapocho y Maipo, 8 cuencas en la comuna de Pirque, y una cuenca al oeste de Pirque, en la comuna de Paine.

Las cuencas tienen características geográficas, geológicas y geomorfológicas distintas. Las áreas de las cuencas varían desde 0,35 km<sup>2</sup> (cuenca 33) y 5054 km<sup>2</sup> (cuenca de Maipo). Las alturas promedio oscilan

entre 926 m (cuenca 19) y 3114 m (cuenca de Maipo) y la pendiente promedio varía entre 13° (cuenca 5) y 31° (cuencas de Macul y longitudinal Sur). Los resultados son presentados por zonas, diferenciadas en la zona cordillerana de Lo Barnechea, el frente cordillerano entre los ríos Mapocho y Maipo, las cuencas de los ríos Maipo y Mapocho y la zona de Pirque.

Las cuencas tienen características geográficas, geológicas y geomorfológicas distintas. Las áreas de las cuencas varían desde 0,35 km<sup>2</sup> (cuenca 33) y 5054 km<sup>2</sup> (cuenca de Maipo). Las alturas promedio oscilan entre 926 m (cuenca 19) y 3114 m (cuenca de Maipo) y la pendiente promedio varía entre 13° (cuenca 5) y 31° (cuencas de Macul y longitudinal Sur). Los resultados son presentados por zonas, diferenciadas en la zona cordillerana de Lo Barnechea, el frente cordillerano entre los ríos Mapocho y Maipo, las cuencas de los ríos Maipo y Mapocho y la zona de Pirque.

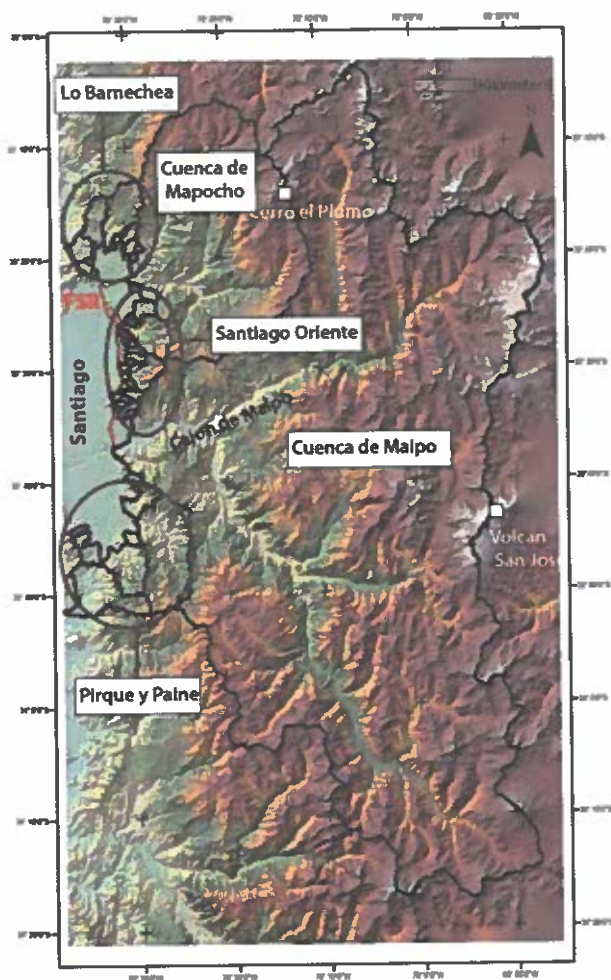


**Figura 8.6.** Zona de estudio. Las delimitaciones negras corresponden a los límites de cuencas estudiadas y la línea roja a la traza de la Falla San Ramón (FSR).



### 8.3.1 Zona cordillerana de Lo Barnechea

En la comuna la Barnechea, hemos definido 11 cuencas de superficie de 0,40 hasta 44 km<sup>2</sup> con altura promedio de 1053 hasta 1859 m y de pendiente promedio de 13° hasta 24° (Figura 8.7, Tabla 8.2).

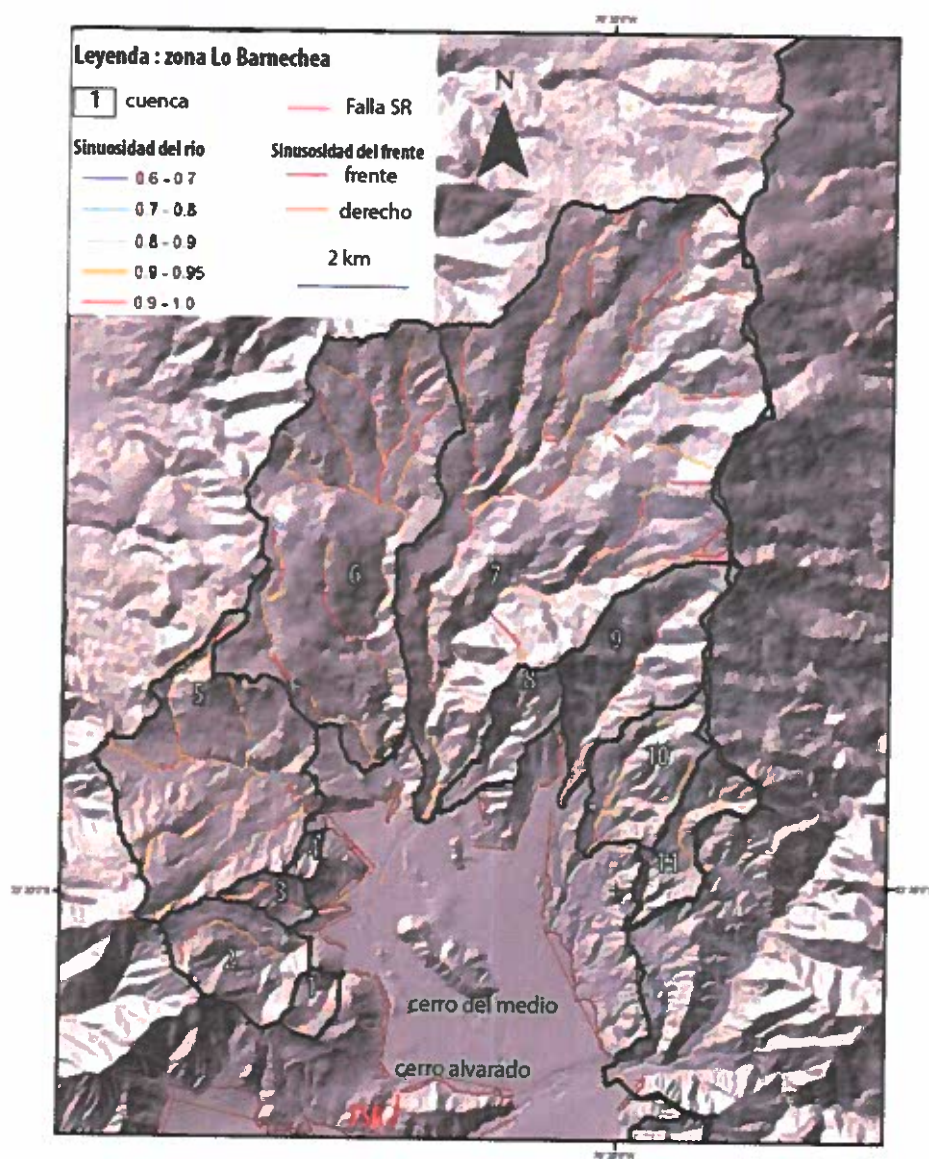


**Figura 8.7. Zona Lo Barnechea.**



FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



Los valores de integral hipsométrica se distribuyen entre 0,34 a 0,54 lo que indica que la cuenca es susceptible a la erosión y dominada por la erosión fluvial, aunque existen procesos difusivos (principalmente procesos de pendientes).

El volumen mínimo erosionado calculado para esta zona varía entre 0,006 y 7 km<sup>3</sup> y la suma de todas las cuencas es de 10km<sup>3</sup>. La relación entre el mínimo volumen erosionado y el área es de 14 a 163 m.

La relación de relieve de la cuenca varía entre 0,11 y 0,30. Estos valores indican un menor grado de pendiente y/o rocas menos resistentes.

La relación de alargamiento de la cuenca (Re) varía entre 0,11 y 0,30 mostrando un paisaje tectónicamente activo.

La sinuosidad del frente de montaña es de 1,07 para 19 segmentos lo que muestra un frente de montaña activo.

**Tabla 8.2.** Índices geomorfológicos zona Lo Barnechea.

|                |                                 |        |               | Basin geomorphologic indices |               |                |       |                          |                      |                            |                                    | sistema de drenaje | precipitaciones | Sinuosidad del frente de montaña |      |
|----------------|---------------------------------|--------|---------------|------------------------------|---------------|----------------|-------|--------------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------|-----------------|----------------------------------|------|
| Cuenca         | coordenadas del punto de salida |        |               | Altura                       | Hypsometric   | Pendiente      | Area  | Volumen mínimo erosional | Ratio Volumen - Area | ratio relieve de la cuenca | ratio de alargamiento de la cuenca | ksn                | Promedio        | mm/años                          |      |
|                | Lat                             | Long   | elevación (m) | promedio a (m)               | tríc integral | promedio a (°) | (km²) | (km3)                    | (m)                  |                            |                                    | promedio           |                 |                                  |      |
| Zona Barnechea | Cuenca 1                        | -33,35 | -70,55        | 869                          | 1111          | 0,54           | 19    | 0,95                     | 0,020                | 22                         | 0,30                               | 0,75               | 57,54           | 305                              | 1,07 |
|                | Cuenca 2                        | -33,34 | -70,56        | 890                          | 1196          | 0,41           | 20    | 4,27                     | 0,322                | 75                         | 0,25                               | 0,80               | 68,32           |                                  |      |
|                | Cuenca 3                        | -33,34 | -70,56        | 883                          | 1063          | 0,49           | 19    | 1,04                     | 0,035                | 33                         | 0,20                               | 0,63               | 44,66           |                                  |      |
|                | Cuenca 4                        | -33,32 | -70,56        | 896                          | 1053          | 0,57           | 17    | 0,40                     | 0,006                | 14                         | 0,24                               | 0,63               | -               |                                  |      |
|                | Cuenca 5                        | -33,32 | -70,56        | 885                          | 1157          | 0,41           | 13    | 13,65                    | 0,694                | 51                         | 0,11                               | 0,69               | 51,27           |                                  |      |
|                | Cuenca 6                        | -33,31 | -70,55        | 918                          | 1458          | 0,46           | 16    | 21,61                    | 0,976                | 45                         | 0,14                               | 0,63               | 74,15           |                                  |      |
|                | Cuenca 7                        | -33,32 | -70,54        | 917                          | 1859          | 0,48           | 19    | 44,38                    | 7,214                | 163                        | 0,15                               | 0,59               | 115,64          |                                  |      |
|                | Cuenca 8                        | -33,32 | -70,54        | 943                          | 1255          | 0,41           | 21    | 2,47                     | 0,090                | 36                         | 0,22                               | 0,51               | -               |                                  |      |
|                | Cuenca 9                        | -33,32 | -70,51        | 1030                         | 1543          | 0,40           | 24    | 6,92                     | 0,720                | 104                        | 0,23                               | 0,54               | 101,28          |                                  |      |
|                | Cuenca 10                       | -33,33 | -70,51        | 954                          | 1255          | 0,34           | 18    | 4,52                     | 0,102                | 23                         | 0,22                               | 0,59               | 62,86           |                                  |      |
|                | Cuenca 11                       | -33,34 | -70,50        | 945                          | 1224          | 0,39           | 19    | 3,00                     | 0,082                | 27                         | 0,19                               | 0,52               | 51              |                                  |      |

### 8.3.2 Cuencas de los ríos Mapocho y Maipo

Estas dos cuencas fueron tratadas aparte porque sus tamaños y características son distintas a las otras cuencas estudiadas (Figuras 8.8, 8.9 y Tabla 8.3).

Los valores de integral hipsométrica son de 0,40 y 0,41 lo que indica que la cuenca es susceptible a la erosión y dominada por la erosión fluvial, aunque existen procesos difusivos (principalmente procesos de pendientes).

**Tabla 8.3. Índices geomorfológicos cuencas ríos Maipo y Mapocho.**

| Cuenca  | coordenadas del punto de salida |        |               | Basin geomorphologic indices |             |              |                    |                                      |                   |                      |                           | sistema de drenaje | precipitaciones |
|---------|---------------------------------|--------|---------------|------------------------------|-------------|--------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------------|---------------------------|--------------------|-----------------|
|         |                                 |        |               | Altura                       | Hypsometric | Pendiente    | Area               | Volumen                              | Ratio             | ratio                | ratio de                  | ksn                | Promedio        |
|         | Lat                             | Long   | elevation (m) | promedia (m)                 | integral    | promedia (°) | (km <sup>2</sup> ) | minimo erosionado (km <sup>3</sup> ) | Volume - Area (m) | relieve de la cuenca | alargamiento de la cuenca |                    |                 |
| Mapocho | -33,36                          | -70,50 | 819           | 2655                         | 0,40        | 25           | 887                | 508                                  | 573               | 0,10                 | 0,76                      | 164,48             | 622             |
| Maipo   | -33,62                          | -70,53 | 675           | 3114                         | 0,41        | 27           | 5054               | 4727                                 | 935               | 0,04                 | 0,58                      | 232,88             | 482             |

El volumen mínimo erosionado es respectivamente, para las cuencas del Mapocho y del Maipo, de 508 y 4727 km<sup>3</sup>. En total, es un mínimo de 5234 km<sup>3</sup> de volumen de roca/sedimentos erosionado y transportado por los ríos.

La relación de relieve de la cuenca es de 0,10 y 0,04, lo que indica menor grado de pendiente y/o rocas menos resistentes.

La relación de alargamiento de la cuenca (Re) es de 0,76 y 0,58 mostrando un paisaje bastante estable.

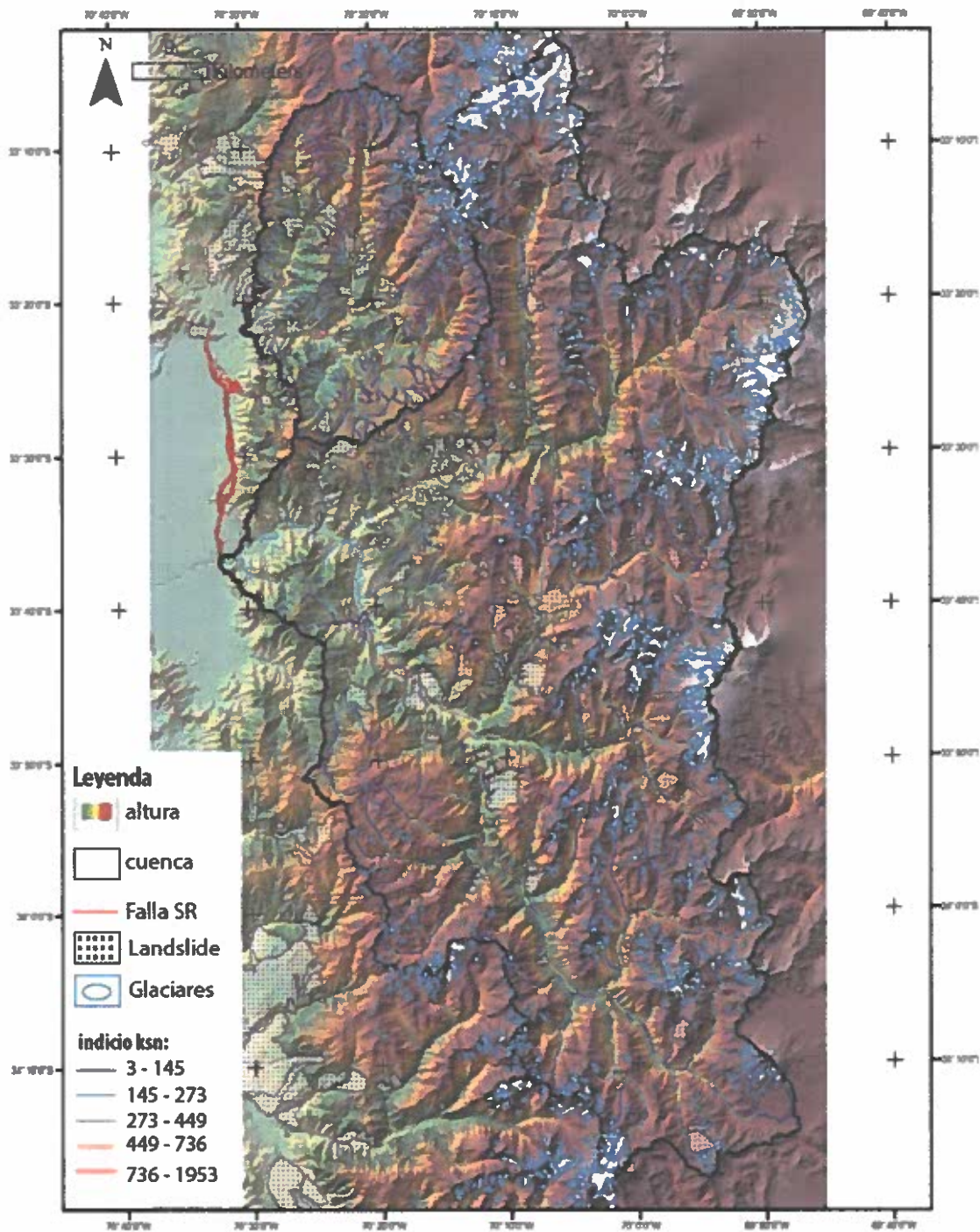


**Figura 8.8.** Cuencas ríos Maipo y Mapocho.

Las cuencas de los ríos Mapocho y Maipo se ven menos afectadas por procesos tectónicos modernos porque con sus grandes tamaños son afectados por otros procesos: erosión fluvial, erosión de los glaciares y los deslizamientos de tierra (Figuras 8.8 y 8.9).

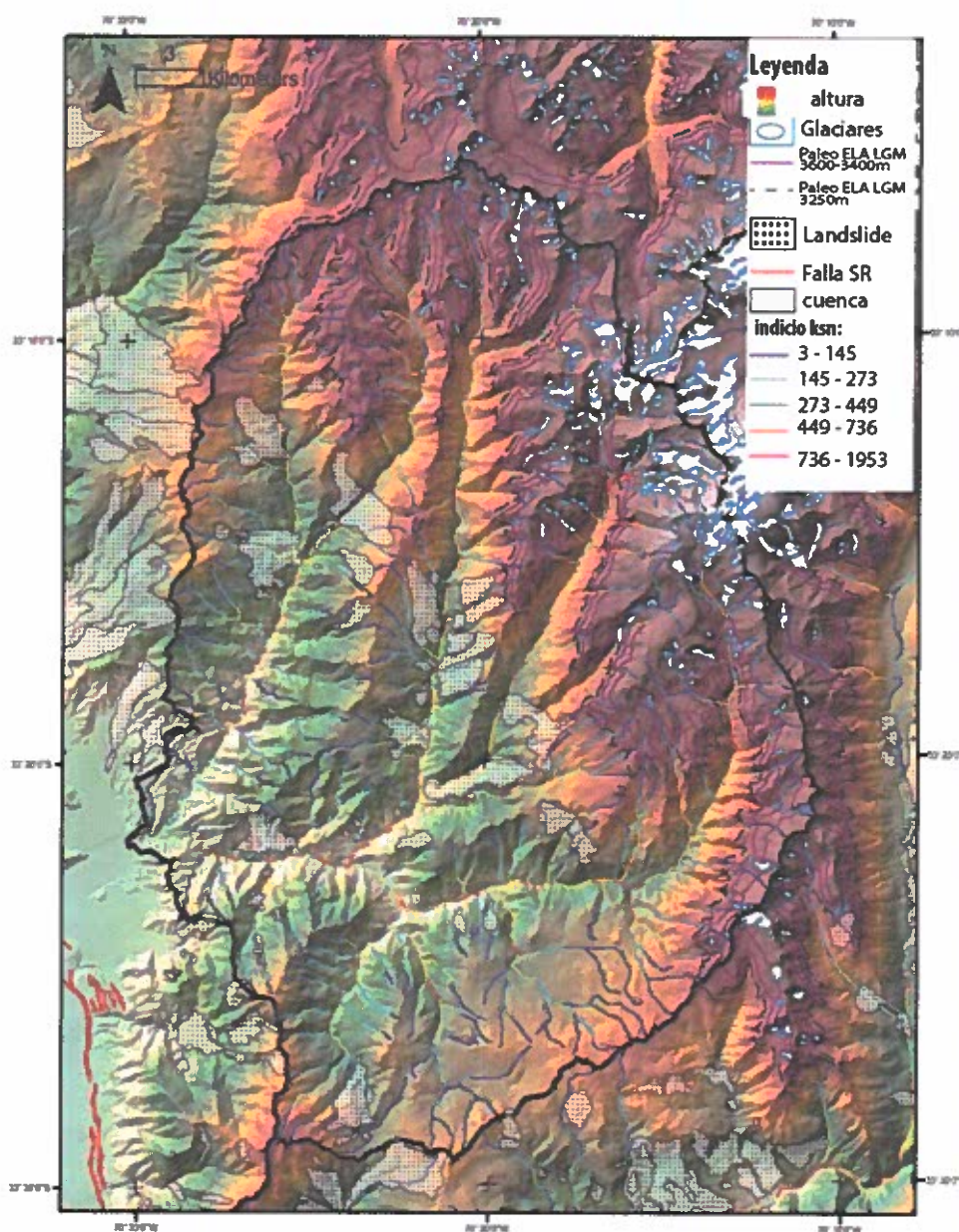


**Figura 8.9.** Cuenca río Mapocho.

En la Figura 8.9, que muestra la cuenca del río Mapocho, se puede observar la disposición de los glaciares actuales, la elevación máxima de los glaciares durante el último máximo glacial, y los deslizamientos de tierra listados por Antinao y Gosse (2009).

Los valores de “ksn” del perfil de los ríos, indican una erosión más efectiva cuando su valor es alto. Observamos que los valores altos de “ksn” coinciden con la cartografía de los deslizamientos de tierra y con los paleo-límites de los glaciares durante el último máximo glacial. Esta última observación nos hace pensar que la herencia de la geomorfología de los antiguos glaciares es importante. Efectivamente, los paisajes no se ajustan inmediatamente durante la desglaciación o el retroceso de los glaciares de tal forma que aparecen knickpoints (cambio abrupto de desnivel) donde se focaliza la erosión en el tiempo. Es decir, cuando hay desglaciación, con retroceso de los glaciares, la geomorfología cambia poco a poco. Así que los knickpoints que observamos en altura en las cuencas pueden estar relacionados al retroceso glacial de la última glaciación.

### 8.3.3 Zona Oriente de Santiago (entre los ríos Mapocho y Maipo)

En esta zona, hemos definido 33 cuencas de superficie de 0,35 hasta 36 km<sup>2</sup>, con altura promedio de 971 hasta 1969 m y de pendiente promedio de 19° hasta 31° (Figura 8.10, Tabla 8.4).

Los valores de integral hipsométrica se distribuyen entre 0,29 a 0,51 lo que indica que la cuenca es susceptible a la erosión y dominada por la erosión fluvial, aunque existen procesos difusivos (principalmente procesos de pendientes).

El volumen mínimo erosionado calculado por esta zona varía entre 0,04 y 17 km<sup>3</sup> y la suma de todas las cuencas es de 21km<sup>3</sup>. La relación entre el mínimo volumen erosionado y el área es de 9 a 321 m.

La relación de relieve de la cuenca varía entre 0,22 y 0,46. Estos valores indican un menor grado de pendiente y/o rocas menos resistentes.

La relación de alargamiento de la cuenca (Re) varía entre 0,38 y 0,77 mostrando un paisaje tectónicamente activo.

La sinuosidad del frente de montaña es de 1,07 para 34 segmentos lo que muestra un frente de montaña activo.



**Tabla 8.4. Índices geomorfológicos cuencas Santiago oriente.**

| Cuenca           | coordenadas del punto de salida |        |               | Basin geomorphologic indices |             |              |                    |                               |                   |                      |                                | sistema de drenaje | precipitaciones | Sinuosidad del frente de montaña |
|------------------|---------------------------------|--------|---------------|------------------------------|-------------|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------|----------------------------------|
|                  | Lat                             | Long   | elevación (m) | Altura                       | Hypsometric | Pendiente    | Area               | Volumen mínimo                | Ratio             | ratio                | ratio de                       | ksn                | Promedio        |                                  |
|                  |                                 |        |               | promedia (m)                 | Integral    | promedia (°) | (km <sup>2</sup> ) | erosionado (km <sup>3</sup> ) | Volume - Area (m) | relieve de la cuenca | alargamiento de la cuenca (Re) | promedio           | mm/años         |                                  |
| Cuenca 12        | -33,37                          | -70,50 | 869           | 1024                         | 0,39        | 23           | 1,18               | 0,04                          | 38                | 0,25                 | 0,77                           | 40,15              |                 | 1,07                             |
| Cuenca 13        | -33,42                          | -70,50 | 959           | 1207                         | 0,45        | 29           | 0,82               | 0,04                          | 52                | 0,42                 | 0,77                           | 62,71              |                 |                                  |
| Cuenca 14        | -33,42                          | -70,51 | 953           | 1263                         | 0,43        | 23           | 1,53               | 0,06                          | 36                | 0,29                 | 0,56                           | 63,99              |                 |                                  |
| apoquindo        | -33,40                          | -70,49 | 1032          | 1463                         | 0,28        | 25           | 10,09              | 1,35                          | 134               | 0,28                 | 0,67                           | 72,93              | 798             |                                  |
| agua san ramon   | -33,43                          | -70,52 | 795           | 1969                         | 0,48        | 27           | 36,35              | 11,67                         | 321               | 0,22                 | 0,60                           | 108,88             | 876             |                                  |
| cuenca 17        | -33,44                          | -70,52 | 796           | 971                          | 0,36        | 19           | 0,38               | 0,00                          | 9                 | 0,26                 | 0,38                           | 36,18              |                 |                                  |
| cuenca 18        | -33,44                          | -70,52 | 757           | 926                          | 0,32        | 18           | 0,78               | 0,01                          | 17                | 0,27                 | 0,50                           | 38,51              |                 |                                  |
| cuenca 19        | -33,45                          | -70,52 | 817           | 1102                         | 0,40        | 24           | 1,14               | 0,04                          | 36                | 0,32                 | 0,54                           |                    |                 |                                  |
| cuenca 20        | -33,45                          | -70,51 | 869           | 1045                         | 0,33        | 25           | 0,49               | 0,00                          | 10                | 0,40                 | 0,60                           | 41,75              |                 |                                  |
| cuenca 21        | -33,45                          | -70,52 | 869           | 1252                         | 0,41        | 30           | 0,80               | 0,03                          | 39                | 0,41                 | 0,44                           | 71,04              |                 |                                  |
| cuenca 22        | -33,46                          | -70,51 | 911           | 1447                         | 0,44        | 31           | 1,76               | 0,08                          | 48                | 0,46                 | 0,56                           | 103,96             |                 |                                  |
| cuenca 23        | -33,47                          | -70,51 | 981           | 1633                         | 0,45        | 33           | 2,22               | 0,17                          | 76                | 0,43                 | 0,50                           | 102,71             |                 |                                  |
| Nido de aguila   | -33,48                          | -70,51 | 991           | 1665                         | 0,43        | 31           | 4,46               | 0,54                          | 121               | 0,43                 | 0,65                           | 119,9              | 512             |                                  |
| cuenca 25        | -33,49                          | -70,52 | 914           | 1319                         | 0,43        | 28           | 1,33               | 0,05                          | 34                | 0,36                 | 0,50                           | 76,32              |                 |                                  |
| Macul            | -33,50                          | -70,51 | 975           | 2051                         | 0,47        | 31           | 23,32              | 6,02                          | 258               | 0,32                 | 0,77                           | 135,24             | 614             |                                  |
| cuenca 27        | -33,51                          | -70,51 | 997           | 1508                         | 0,46        | 29           | 1,55               | 0,09                          | 55                | 0,40                 | 0,51                           | 92,2               |                 |                                  |
| longitudinal sur | -33,53                          | -70,52 | 1032          | 1695                         | 0,46        | 31           | 4,28               | 0,58                          | 136               | 0,41                 | 0,65                           | 110,45             | 325             |                                  |
| cuenca 29        | -33,54                          | -70,54 | 790           | 1145                         | 0,29        | 19           | 3,52               | 0,11                          | 30                | 0,32                 | 0,54                           | 52,46              |                 |                                  |
| cuenca 30        | -33,55                          | -70,53 | 811           | 1152                         | 0,34        | 22           | 2,20               | 0,07                          | 31                | 0,36                 | 0,60                           | 65,74              |                 |                                  |
| cuenca 31        | -33,56                          | -70,53 | 783           | 1041                         | 0,44        | 26           | 0,84               | 0,03                          | 34                | 0,31                 | 0,54                           | 54,08              |                 |                                  |
| cuenca 32        | -33,56                          | -70,53 | 850           | 1055                         | 0,51        | 30           | 0,35               | 0,01                          | 26                | 0,42                 | 0,71                           | 56,36              |                 |                                  |
| el peral         | -33,57                          | -70,52 | 941           | 1501                         | 0,43        | 27           | 4,218              | 0,33                          | 77                | 0,30                 | 0,52                           | 84,45              | 325             |                                  |
| cuenca 34        | -33,57                          | -70,51 | 993           | 1360                         | 0,35        | 24           | 1,95               | 0,07                          | 36                | 0,38                 | 0,57                           | 63,2               |                 |                                  |

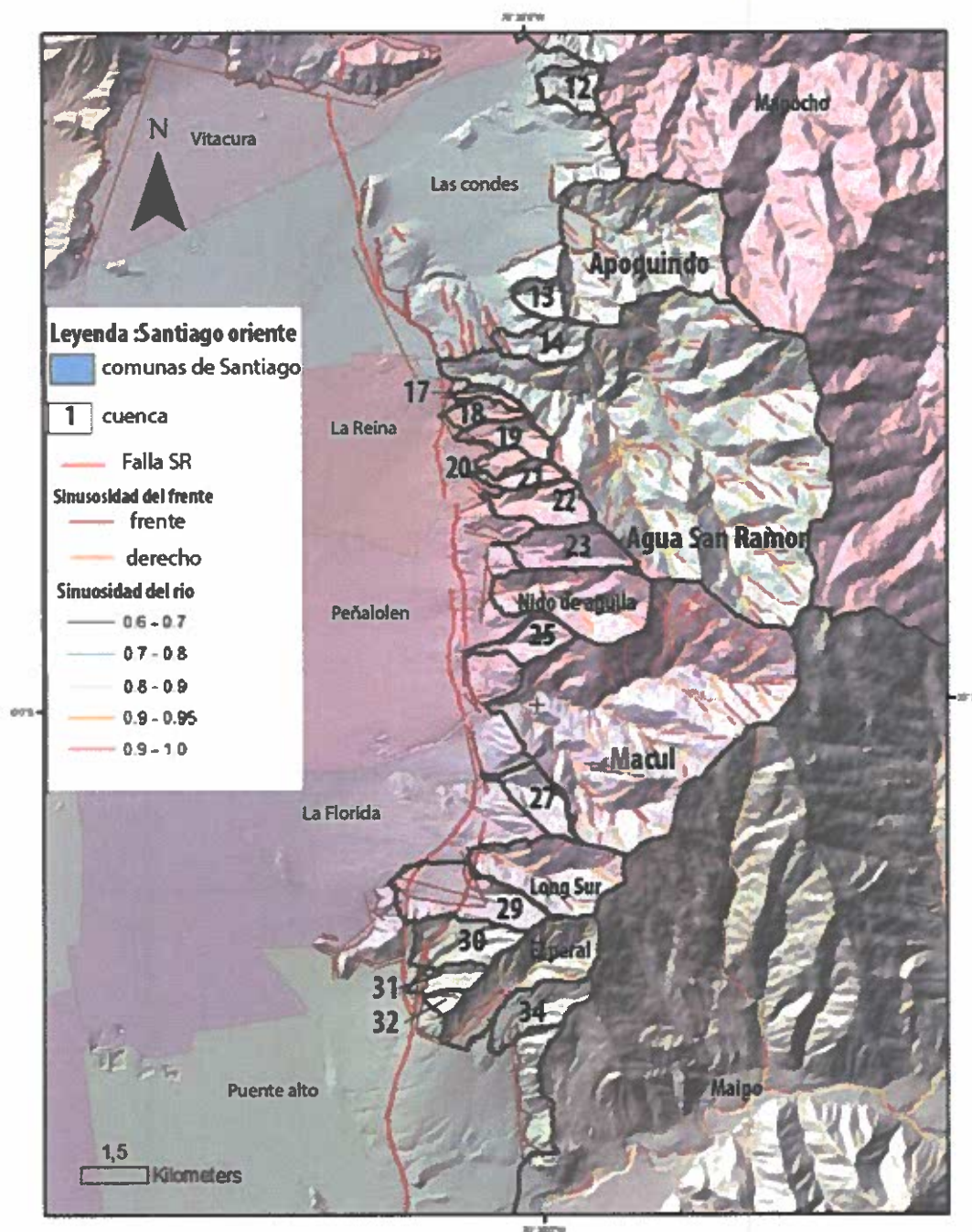


**Figura 8.10.** Cuencas Santiago oriente.

### 8.3.4 Zona de Pirque (al sur del río Maipo)

En esta zona, hemos definido 8 cuencas de superficie de 2 hasta 131 km<sup>2</sup> con altura promedio de 998 hasta 1813 m y de pendiente promedio de 20° hasta 29° (Figura 8.11, Tabla 8.5).

Los valores de integral hipsométrica se distribuyen entre 0,29 a 0,47 lo que indica que la cuenca es susceptible a la erosión y dominada por la erosión fluvial, aunque existen procesos difusivos (principalmente procesos de pendientes).

El volumen mínimo erosionado calculado para esta zona varía entre 0,5 y 56 km<sup>3</sup> y la suma de todas las cuencas es de 74 km<sup>3</sup>. La relación entre el mínimo volumen erosionado y el área es de 28 a 1292 m.

La relación de relieve de la cuenca varía entre 0,11 y 0,36. Estos valores indican un menor grado de pendiente y/o rocas menos resistentes.

La relación de alargamiento de la cuenca (Re) varía entre 0,36 y 1,69 mostrando un paisaje bastante inactivo.

La sinuosidad del frente de montaña es de 1,14 para 17 segmentos.

**Tabla 8.4. Índices geomorfológicos cuencas zona de Pirque.**

|        |              |                                 |        |               | Basin geomorphologic indices |                      |                        |                         |                                 |                         |                            |                                    | sistema de drenaje | precipitaciones  | Sinusoidal del frente de montaña |
|--------|--------------|---------------------------------|--------|---------------|------------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------|------------------|----------------------------------|
|        | Cuenca       | coordenadas del punto de salida |        |               | Altura promedio (m)          | Hypsometric integral | Pendiente promedio (") | Area (km <sup>2</sup> ) | Volumen minimo erosionado (km3) | Ratio Volume - Area (m) | ratio relieve de la cuenca | ratio de alargamiento de la cuenca | ksn promedio       | Promedio mm/años |                                  |
|        |              | Lat                             | Long   | elevacion (m) |                              |                      |                        |                         |                                 |                         |                            |                                    |                    |                  |                                  |
| Pirque | rita         | -33,65                          | -70,52 | 888           | 1346                         | 0,40                 | 29                     | 4,08                    | 0,448                           | 110                     | 0,36                       | 0,70                               | 112,53             | 417              | 1,14                             |
|        | la madera    | -33,69                          | -70,52 | 796           | 1378                         | 0,38                 | 23                     | 17,85                   | 2,391                           | 134                     | 0,24                       | 0,70                               | 116,7              | 681              |                                  |
|        | Rio Clarillo | -33,71                          | -70,52 | 833           | 1813                         | 0,46                 | 26                     | 130,89                  | 56,200                          | 429                     | 0,11                       | 0,64                               | 134,42             | 759              |                                  |
|        | Sur 1        | -33,74                          | -70,52 | 832           | 1171                         | 0,30                 | 22                     | 5,10                    | 0,502                           | 98                      | 0,32                       | 0,72                               | 58,59              |                  |                                  |
|        | Honda        | -33,76                          | -70,55 | 797           | 1562                         | 0,40                 | 26                     | 9,77                    | 12,621                          | 1292                    | 0,20                       | 0,36                               | 91,92              |                  |                                  |
|        | La cuesta    | -33,76                          | -70,56 | 767           | 998                          | 0,29                 | 20                     | 44,31                   | 1,220                           | 28                      | 0,18                       | 1,69                               | 40,26              |                  |                                  |
|        | Sur 2        | -33,74                          | -70,58 | 743           | 1158                         | 0,47                 | 22                     | 4,93                    | 0,216                           | 44                      | 0,27                       | 0,76                               | 73,59              |                  |                                  |
|        | Sur 3        | -33,73                          | -70,58 | 755           | 1153                         | 0,41                 | 25                     | 2,41                    | 0,121                           | 50                      | 0,30                       | 0,54                               | 80,64              |                  |                                  |
|        | paine        | -33,85                          | -70,61 | 455           | 1271                         | 0,35                 | 19                     | 69,08                   | 13,419                          | 194                     | 0,16                       | 0,63                               | -                  |                  |                                  |

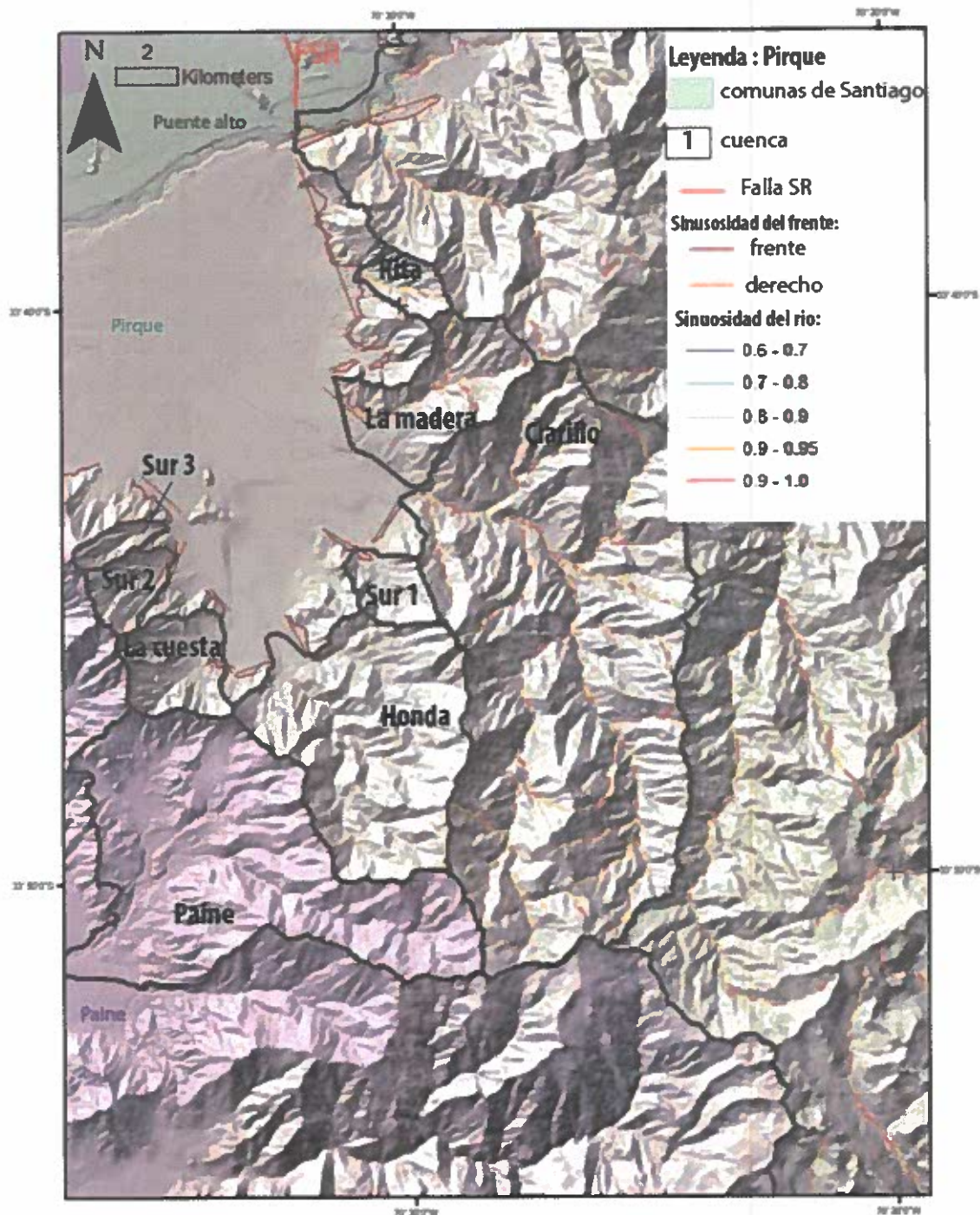


**Figura 8.11. Cuencas Zona de Pirque y Paine.**

## 8.4 Correlación entre las variables

La correlación entre dos variables mide el grado de ajuste de la nube de puntos a la función matemática asignada. La relación entre dos variables puede ajustarse muy bien a una recta o cualquier otra función matemática. Para medir el grado de ajuste de la distribución a una recta, se emplea el coeficiente de correlación de Pearson,  $r$ . Un coeficiente positivo y alto indica que ambas variables crecen o decrecen simultáneamente, es decir, presentan una fuerte correlación. Cuando mayor sea el coeficiente, más estrecho es la relación entre las variables. Un coeficiente alto y negativo indica que cuando una variable crece, la otra decrece y viceversa, es decir, presentan una fuerte correlación inversa. Si el coeficiente es cero o próxima a cero indica que no existe relación entre las variables. El valor del coeficiente de correlación puede variar de  $-1$  a  $+1$ . Mientras mayor sea el valor absoluto del coeficiente, más fuerte será la relación entre las variables. Para la correlación de Pearson, un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

En nuestros resultados se observan algunas correlaciones (Tabla 8.6). La altura promedio de la cuenca está correlacionada positivamente con el área, el volumen mínimo erosionado de la cuenca y el índice de pendiente normalizado “ksn” de los ríos. De manera esperada, los valores de “ksn” son relacionados positivamente al volumen mínimo erosionado. La pendiente promedio de la cuenca está relacionada positivamente con la relación de alargamiento de cuenca (“Basin elongation ratio”,  $Re$ ). Este resultado no es obvio porque un alto “ $Re$ ” indica una cuenca más circular, con un estado de madurez alto, con menos actividad tectónica. Mientras que la pendiente promedio alta podría ser relacionada a un paisaje más juvenil y tectónicamente activo. La pendiente promedio está también relacionada positivamente con los valores de “ksn”. En este caso podríamos interpretar los valores de pendiente altos para las cuencas grandes y más circulares, como el resultado de procesos difusivos tipo deslizamiento de tierra.

Los valores de pendiente promedio son fuertes en las pequeñas cuencas en el sector de Santiago Oriente, entre los ríos Mapocho y Maipo. Estas cuencas tienen valores de “ $Re$ ” más bajos de tal forma a que se puede interpretar con una zona tectónica más activa.



Tabla 8.6. Matriz de correlación.

|                           | Lat | Long | altura<br>promedia | Hypsometric<br>integral | pendiente<br>promedia | Area        | Mínimo<br>volumen<br>erosionado | Ratio<br>Volume -<br>Area | Basin<br>relief<br>ratio | Basin<br>elongation<br>ratio | ksn<br>promedio |
|---------------------------|-----|------|--------------------|-------------------------|-----------------------|-------------|---------------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------|
| Lat                       | 1   | 0,36 | -0,03              | 0,27                    | -0,26                 | -0,11       | -0,11                           | -0,32                     | -0,04                    | -0,21                        | -0,14           |
| Long                      |     | 1,00 | 0,25               | -0,15                   | 0,45                  | 0,03        | 0,03                            | -0,01                     | 0,33                     | -0,23                        | 0,30            |
| altura promedia           |     |      | 1,00               | 0,18                    | 0,37                  | <b>0,69</b> | <b>0,67</b>                     | <b>0,67</b>               | -0,36                    | -0,07                        | <b>0,87</b>     |
| Hypsometric integral      |     |      |                    | 1,00                    | 0,20                  | 0,00        | 0,00                            | 0,03                      | 0,06                     | -0,13                        | 0,17            |
| pendiente promedia        |     |      |                    |                         | 1,00                  | 0,11        | 0,11                            | 0,20                      | <b>0,61</b>              | -0,13                        | <b>0,50</b>     |
| Area (km2)                |     |      |                    |                         |                       | 1,00        | 1,00                            | <b>0,55</b>               | -0,41                    | -0,02                        | <b>0,60</b>     |
| Mínimo volumen erosionado |     |      |                    |                         |                       |             | 1,00                            | <b>0,53</b>               | -0,38                    | -0,03                        | <b>0,58</b>     |
| Ratio Volume - Area       |     |      |                    |                         |                       |             |                                 | 1,00                      | -0,44                    | -0,13                        | <b>0,57</b>     |
| Basin relief ratio        |     |      |                    |                         |                       |             |                                 |                           | 1,00                     | -0,16                        | -0,02           |
| Basin elongation ratio    |     |      |                    |                         |                       |             |                                 |                           |                          | 1,00                         | 1,00            |
| ksn promedio              |     |      |                    |                         |                       |             |                                 |                           |                          |                              | 1,00            |



## Knickpoints

En este estudio varios knickpoints y de distintos tipos (mayor/menor) fueron localizados (Figura 8.13). Observamos también que una parte de los knickpoints localizados en la cuenca de Santiago son artefactos debidos a construcciones antrópicas. Otros Knickpoints (en verde en la Figura 8.13) son debidos a terrazas aluviales a lo largo, por ejemplo, del río Mapocho.

Se nota que la Falla San Ramón ocasionó escarpes importantes asociados a rupturas abruptas de pendiente (knickpoints) en los perfiles de los ríos y zona de incisión más importante.

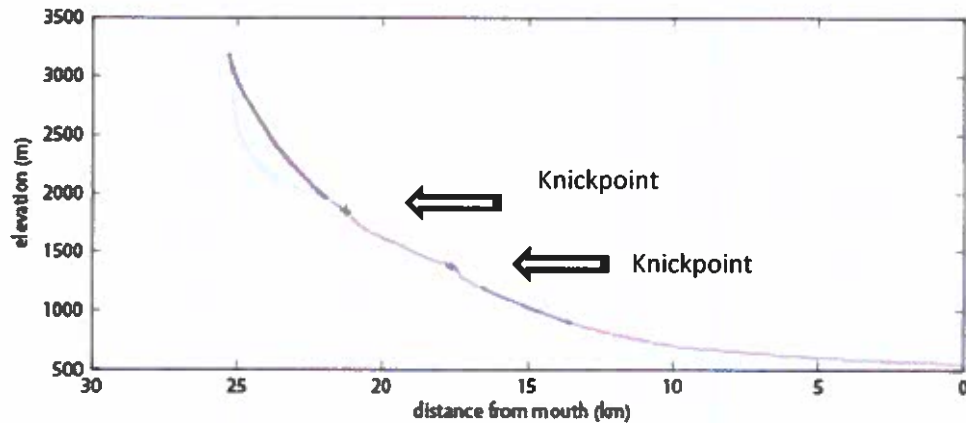


**Figura 8.12.** Perfil longitudinal de un río con los knickpoints asociados a una falla.

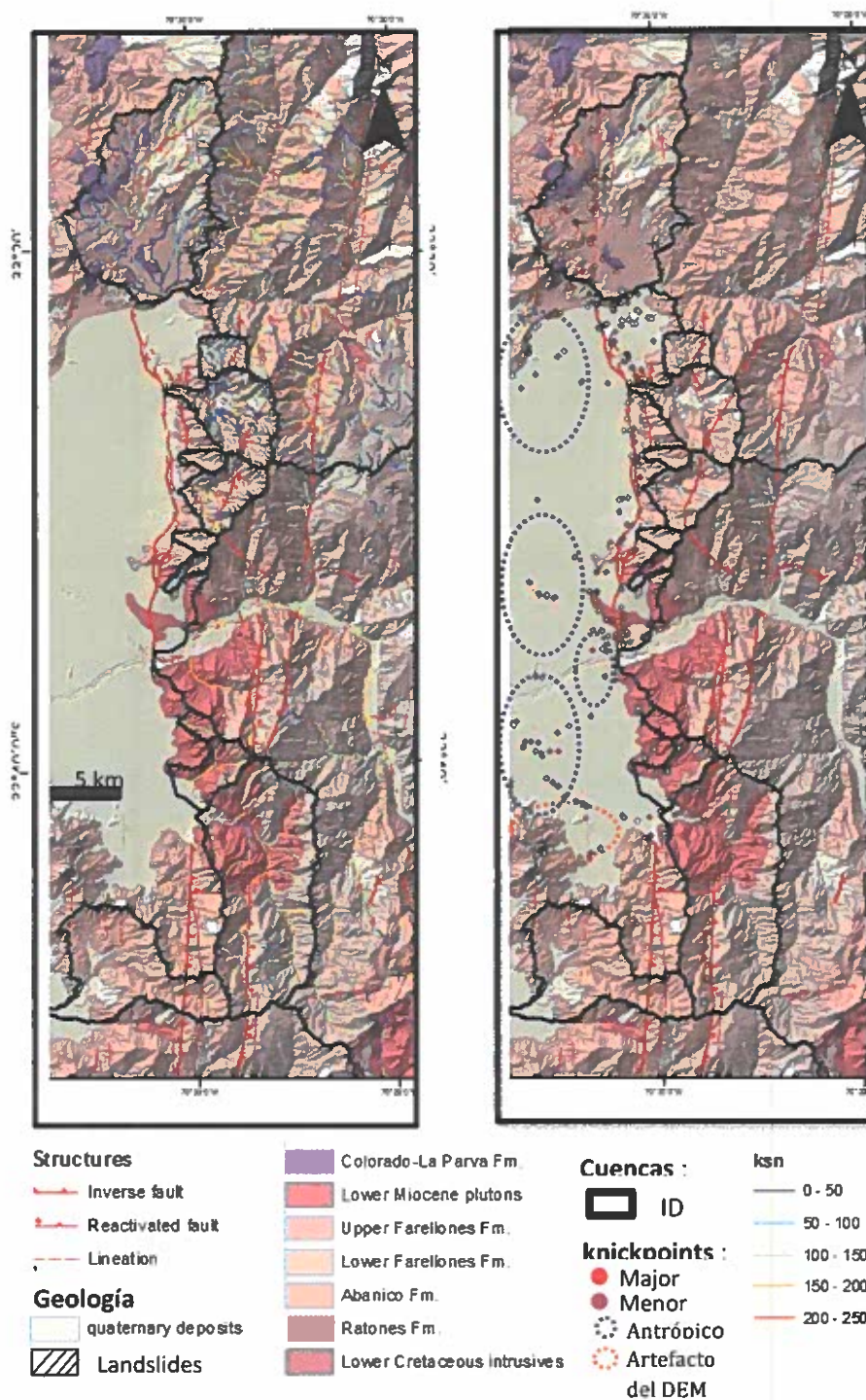


Figura 8.13. Geología, Knickpoints e índice de empinamiento (ksn) del frente Cordillerano.

## 8.5 Conclusiones

Las cuencas de los ríos Mapocho y Maipo se ven más estables, afectadas por varios procesos erosionales tales como los deslizamientos de tierra y las antiguas glaciaciones que localizan la erosión en los sitios de mayor altura.

De acuerdo con los índices geomorfológicos, la zona al sur de Santiago, en Pirque, está menos afectada por la erosión o la tectónica.

Las zonas de Lo Barnechea y de Santiago oriente se ven más afectadas por la tectónica activa gracias a los índices como la sinuosidad del frente de montaña, la forma de la cuenca y la pendiente promedio. Estas cuencas, más pequeñas y de altura promedio baja, no son afectadas por procesos glaciares y de forma menor por los procesos difusivos.

El mínimo de volumen erosionado calculado para toda la zona es de 5355 km<sup>3</sup> donde 5234 km<sup>3</sup> pertenecen a los ríos Mapocho y Maipo.

## 8.6 Referencias

Dunai, 2010. Cosmogenic Nuclides. Principles, Concepts and Applications in the Earth Surface Sciences.

Duvall, A., E. Kirby, and D. W. Burbank (2004), Tectonic and lithologic controls on bedrock channel profiles and processes in coastal California, J. Geophys. Res., 109, F03002, doi:10.1029/2003JF000086.

Flint, 1974. Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge. Water Resource Journal. Volume 10, Issue 5, Pages 969–973. DOI: 10.1029/WR010i005p00969

Goldrick & Bishop, 2007. Regional analysis of bedrock stream long profiles: evaluation of Hack's SL form, and formulation and assessment of an alternative (the DS form). Earth Surface Processes and Landforms. 32. 649-671.

Gosse & Phillips 2001. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. Quaternary Science Reviews, 20: 1475–1560.

Hidy et al., 2010. A geologically constrained Monte Carlo approach to modelling exposure ages from profiles of cosmogenic nuclides: An example from Lees Ferry, Arizona.



FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



Kirby & Whipple, 2001. Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. Volume 29, número 5.

Knighton, 1998. Fluvial forms and processes. Earth Surface Processes and Landforms. Volume 24, Issue 4, Pages 378–379.

Kober et al. 2005. In situ cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  and  $^{21}\text{Ne}$  in sanidine and in situ cosmogenic  $^3\text{He}$  in Fe-Ti-oxide minerals. Earth Planetary Science Letters. 236. 404-418.

Lal 1991, Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. Earth Planetary Science Letters. 104.424-439.

Moglen & Bras, 1995. The Effect of Spatial Heterogeneities on Geomorphic Expression in a Model of Basin Evolution. Water Resources Research. 31.10. 2613-2623.

Stolar et al., 2007. Characterization of topography steady state in Taiwan. Earth and Planetary Sciences Letters 261:421-431.

Whipple, 2001. Fluvial landscape response time: How plausible is steady state denudation?. American Journal of Science.

Whipple, K. X., and G. E. Tucker (1999), Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs, J. Geophys. Res., 104, 17,661–17,674.

