

ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIÓN EN MASA A TRAVÉS DE ENSAYO MASW JUNTO CON METODOLOGÍA INSAR EN CERRO RENCA, REGIÓN METROPOLITANA, CHILE.

Aníbal Sotomayor Aguilera¹, Alejandra Muñoz Jensen² y Matilde Basso Aránguiz³

RESUMEN:

Los eventos catastróficos relacionados con remoción en masa son fenómenos ligados principalmente a las condiciones y el tipo de suelo presente en el área, así como también a las precipitaciones. En el presente artículo se investiga la ladera suroeste del Cerro Renca en la cual se encuentra un gran depósito de remoción en masa ocurrido en años anteriores. Se realizaron 3 mapas interferométricos para distintos años, analizando los desplazamientos superficiales ocurridos en el área de estudio. En el análisis de desplazamiento se identificaron zonas de reptación, las cuales presentan un riesgo a largo plazo en edificaciones cercanas al movimiento. Se recomienda un monitoreo satelital constante de los desplazamientos en el área.

También se realizaron ensayos MASW y REMI en 4 líneas sísmicas distintas con el objetivo de visualizar y analizar el subsuelo presente en la zona. Los ensayos sísmicos dieron cuenta de la presencia de suelo de baja compactación asociado a fenómenos de remoción en masa ocurridos anteriormente, indicando un riesgo de deslizamiento bajo precipitaciones y asumiendo que el estado del subsuelo es permeable.

Se recomienda realizar ensayos geotécnicos para evaluar de manera fehaciente el estado, composición y permeabilidad del terreno.

PALABRAS CLAVES: Desplazamiento; MASW; InSAR

ABSTRACT:

Catastrophic events related to mass removal are phenomena linked mainly to the conditions and type of soil present in the area, as well as rainfall. In the present article, the southwestern slope of Cerro Renca is investigated, in which there is a large mass removal deposit that occurred in previous years. Three interferometric maps were made for different years, analyzing the surface displacements that occurred in the study area. In the displacement analysis, creeping areas were identified, which present a long-term risk in buildings close to the movement. Constant satellite monitoring of displacements in the area is recommended.

MASW and REMI tests were also carried out on 4 different seismic lines to visualize and analyze the subsoil present in the area. The seismic tests reported the presence of low compaction soil associated with previously occurring mass removal phenomena, indicating a risk of landslides under rainfall and assuming that the subsoil state is permeable.

It is recommended to carry out geotechnical tests to reliably evaluate the state, composition, and permeability of the terrain.

KEYWORDS: Displacement; MASW; InSAR

¹ Aníbal Sotomayor, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, asotomayor@ing.ucsc.cl

² Alejandra Muñoz, D. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, andrea.munoz@ucsc.cl

³ Matilde Basso, D. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, matildebasso@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los acontecimientos catastróficos relacionados con eventos de remoción en masa no son algo extraño en nuestro país, a lo largo de los años este tipo de catástrofes han azotado de manera frecuente principalmente la zona norte de Chile con eventos de remoción asociados a fuertes precipitaciones en un corto lapso. A su vez dentro de esta área existe una problemática relacionada a la construcción de viviendas, las cuales son posicionadas en zonas de alto riesgo de derrumbe, sin que se realice un estudio pertinente y se les advierta del peligro.

En los últimos años se han implementado métodos variados para la evaluación de riesgo de remoción en masa, analizando así su geología, topografía, nivel de vegetación y principalmente los niveles que alcanzan los caudales asociados a precipitaciones. Sin embargo, muchas veces estos análisis no son del todo asertivos, obviando y olvidando parámetros intrínsecos del área de estudio.

Existen distintos tipos de formas de análisis de suelo, uno de los métodos más utilizados en la actualidad es la evaluación de un terreno utilizando ensayos geofísicos. Estos métodos son ideales para conocer la información subterránea de un suelo, tanto sus características geofísicas como también su respuesta hacia estímulos externos.

Otra forma de analizar el suelo es observando su desplazamiento a lo largo de los años, esto se ha logrado gracias a la implementación de la Interferometría de Radars de Apertura Sintética (InSAR) la cual es una constelación de satélites orbitales con datos de libre acceso. Dichos satélites miden los desplazamientos ocurridos en un intervalo de tiempo determinado en el orden de milímetros, lo cual permite observar de manera detallada los cambios de deformación producidos en el terreno. Cabe destacar que este método es reciente, solo en los últimos 5 años se ha implementado y aplicado a distintos análisis, lo que indica que tendrá más aplicaciones y protagonismo en investigaciones futuras.

La presente Investigación de Habilitación Profesional plantea un análisis mixto para la evaluación de terreno ante un eventual deslizamiento, para ello se evaluará la susceptibilidad de remoción en masa según los desplazamientos superficiales en los últimos años y análisis subterráneos ocurridos en Cerro Renca, región Metropolitana, Chile, mediante ensayos geofísicos y análisis interferométrico InSAR. Para lograr dicho objetivo se determinarán los desplazamientos superficiales del área de estudio, a su vez, se analizará y se examinarán las características del subsuelo mediante ensayo MASW según la geología y geomorfología de la zona. Finalmente se contrastarán los resultados de desplazamientos superficiales con información subterránea estimando la susceptibilidad de remoción en masa de la zona de estudio.

2. ANTECEDENTES

2.1 Ubicación

El Cerro Renca está ubicado en la zona oriente de Santiago de Chile, más específicamente al noroeste de la ciudad como se indica en la figura 1, colindando con las comunas de Renca, Huechuraba y Quilicura. Su cota más alta alcanza los 903 m s.n.m y su cota más baja los 530 m s.n.m aproximadamente. El área de estudio corresponde a la sección del flanco suroeste del Cerro Renca ubicado en las coordenadas 33°23'27" Sur, 70°42'40" Oeste. Abarcando aprox. 0,38 km². También en esta zona se ubica el Parque Metropolitano Cerros de Renca, cuya entrada es a través de la Av. El Cerro #1555, Renca.



Figura 1: Mapa ubicación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

2.2 Geología

La geología regional y local del área de estudio, está determinada por dos formaciones: La Formación Lo Valle, que en este caso corresponde al afloramiento de Cerro Colorado, al Oeste del área de estudio que se encuentra haciendo contacto por medio de una falla inversa con la Formación Abanico cuyo afloramiento es el Cerro Renca. Esta falla también llamada Cerro Renca es de tipo inversa con una dirección NS y se dice es la prolongación sur de la Falla Infiernillo, de extensión kilométrica. Esta se aprecia en la zona NW del área de estudio (S. Espinoza et al, 2022).

Olma: Unidad que consta de una secuencia volcánica andesítica a basáltica de textura porfídica, con intercalaciones piroclásticas y sedimentarias continentales, con espesor expuesto de ca. 2.000 m. Aflora en el sector oriental de la zona, dispuesta concordantemente sobre la Formación Lo Valle, al norte de Colina, mientras que, en el cerro Renca una posible falla inversa del tipo joven sobre viejo, con manto al este la pone en contacto hacia el oeste, con rocas asignadas a ésta última formación.

Qrm: Depósitos de remoción en masa, originados por flujo de detritos, reptación, hundimiento, etc. Se componen de fragmentos rocosos angulosos englobados en una abundante matriz de arcillas y arenas arcillosas.

A continuación, en la figura 2 se presenta un mapa geológico de referencia.

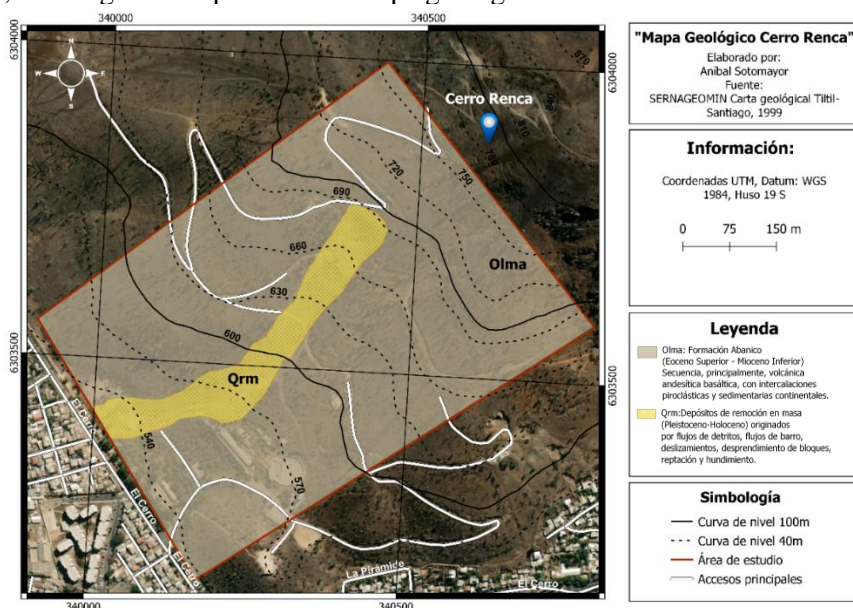


Figura 2: Mapa geológico de la zona de estudio, Cerro Renca. Fuente: Elaboración propia.

2.3 Geomorfología

La morfología regional está caracterizada por 6 unidades geomorfológicas (Figura 3). En la zona oriente de la región metropolitana se encuentra la cordillera andina de retención crionival, la cual está conformada por zonas montañosas de gran altitud. En la zona céntrica de la región se observa la cuenca de Santiago en la cual se encuentra situada la ciudad de Santiago. Hacia el poniente de la cuenca de Santiago se encuentra la cordillera de la costa junto con cuencas graníticas marginales y en la zona litoral, planicies marinas y/o fluvio-marina. (M. Alarcón, 2012)

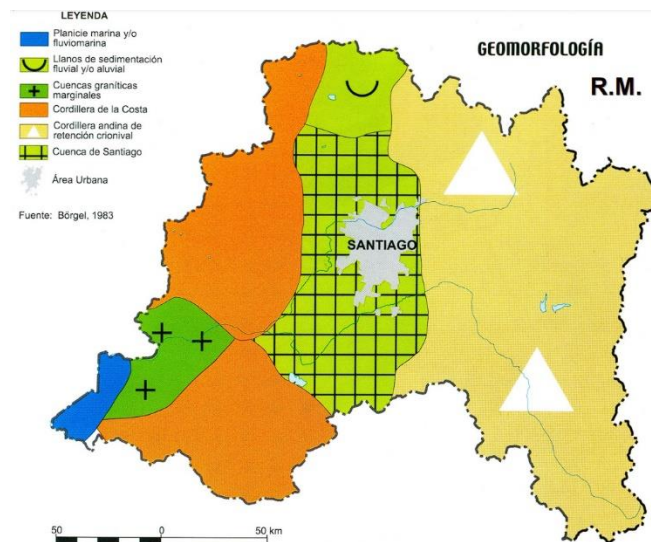


Figura 3: Mapa geomorfológico de la región metropolitana.
Fuente: (M. Alarcón, 2012)

El área de estudio se encuentra ubicada en el dominio morfoestructural de la Depresión Central, correspondiendo a un relieve de tipo Cerro Isla, o también llamado Inselberg. Es decir, una zona elevada aislada que sobresale de la Cuenca sedimentaria de Santiago, con una altura máx. de 905 m s. n. m. y una pendiente con 38° de inclinación, de tipo empinada la que representa uno de los factores que hace al terreno susceptible a una remoción en masa (S. Espinoza et al, 2022).

Según (Hauser, 2001) se da cuenta de un avance de 450 m ladera abajo de la masa deslizada encontrándose a 160 m de afectar instalaciones de portería o control del cerro Renca (Figura 4), además se describe de forma detallada la morfología de deslizamiento rotacional, la cual consta de un coronamiento semicircular con ancho cercano a los 65m, un escarpe principal de 35 a 40 m y un largo de 220 m aproximado. Según el estudio citado la masa en su comienzo adquirió un frente lobular (5,5 a 6 metros de altura), posteriormente en 1995 la remoción había avanzado 175m, para 1997 la remoción en masa avanzó otros 22m ladera abajo. EL continuo avance y las características que fue adquiriendo la remoción en masa generaron una evolución en el tipo de remoción, desde un deslizamiento rotacional a uno multirotacional.

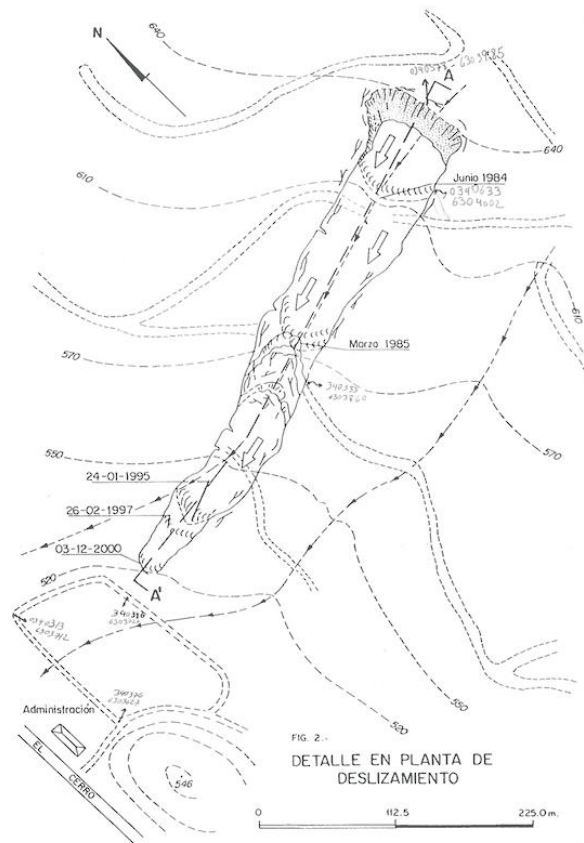


Figura 4: Esquema geomorfológico local de la ladera suroeste de Cerro Renca. Fuente: (Hauser, 2001)

2.4 Antecedentes de estudio

La presente memoria de título está estrechamente ligada al “Análisis para la gestión del riesgo de remoción en masa por deslizamiento en el flanco suroeste del cerro Renca, comuna de Renca, Chile” realizado en el año 2018 por Simón Inzunza y publicado en un boletín electrónico BeGEO. En dicho boletín se analizó el flanco suroeste de Cerro Renca mediante la Recolección de antecedentes del deslizamiento en el cerro Renca, identificando el problema principal, sus causas y efectos, para finalmente proponer acciones y alternativas para la solución del problema. Se concluyó que el deslizamiento flanco suroeste del Cerro Renca que se originó el año 1984, ha tenido un notable avance favorecido por la acción de las precipitaciones, llegando incluso a estar a metros de las medidas de mitigación presentes en el área. También no se atendió la causa “ladera susceptible a remoción en masa” ya que se entiende que las condiciones naturales del cerro son propicias a deslizamientos, razón por la que se le da énfasis a aspectos como la prevención y la mitigación.

En el año 2015 se realizó por el SERNAGEOMIN una “Asistencia técnica asociada a fenómeno de remoción en masa en el Cerro Renca, Comuna de Renca, Región Metropolitana” recopilando antecedentes geomorfológicos, geológicos con sus peligros asociados y observaciones de terreno para finalmente realizar un análisis de deslizamiento. En dicha asistencia técnica se concluyó que en la última década la masa deslizada no ha experimentado cambios significativos, la remoción sigue estando activa. Al frente del deslizamiento le falta alrededor de 2 m de avance para toparse con el muro de contención en base a gaviones. También concluyó que la disminución de la actividad de la remoción se debe a varios factores, destacando la disminución considerable de precipitaciones en los meses más lluviosos de la zona.

Otro estudio de remoción en masa es la: “Aplicación de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) y análisis de series de tiempo SBAS, para tres casos de estudio en Chile central” realizado en el

año 2020 por M. Garcés para optar al título de geólogo. En esta investigación se busca evaluar la aplicación de Interferometría de Radars de Apertura Sintética (InSAR) y análisis de series de tiempo (SBAS) para el monitoreo de deformaciones de terreno, en tres casos de estudio en Chile central definiendo una metodología que permita cuantificar a escala de detalle zonas con deformación de terreno, obteniendo interferogramas generados mediante la metodología InSAR de imágenes satelitales SAR de acceso libre (Sentinel 1A y 1B) utilizando softwares de código abierto para así generar mapas de registro temporal con las deformaciones acumuladas en las zonas estudiadas. Esta memoria de título concluyó que fue aplicada con éxito una de las técnicas derivadas de la interferometría de radar de apertura sintética InSAR, específicamente *Small Baseline Subset* (SBAS), para el monitoreo y análisis de series de tiempo en tres casos relevantes de Chile central. El primer caso corresponde a un ambiente urbano, el segundo a una operación minera en un ambiente montañoso y el tercero a un deslizamiento. Se relaciona la investigación de M. Garcés 2020 con la presente memoria de título ya que uno de los pilares fundamentales para el análisis de remoción en masa en esta investigación está basado en el análisis de interferogramas con radares de apertura sintética, analizando así los desplazamientos ocurridos en el último tiempo.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Fenómenos de remoción en masa

Una remoción en masa corresponde al proceso de movilización, lenta o rápida, ladera abajo por efectos de gravedad, de un determinado volumen de roca, detritos o suelo (Varnes, 1978).

Los movimientos de remoción en masa corresponden, intrínsecamente, a procesos gravitacionales considerando que una porción específica del conjunto del terreno se desplaza hasta una cota o nivel inferior a la original. Se destacan aquellos de carácter interno o intrínseco, que caracterizan y definen el material (litología, estructura, comportamiento hidrogeológico, estados tenso-deformativos, propiedades físicas), y externos (aplicación de cargas estáticas o dinámicas, variaciones en las condiciones hidrogeológicas, factores climáticos, alteraciones en la geometría de taludes). (A. Hauser 2000)

Dentro de los atributos que son usados en el criterio de identificación (Figura 5) y clasificación se señalan los tipos de movimientos, tipos de material, velocidad de movimiento, geometría del área de colapso, tipo de depósito, edad, causas, grado de ruptura de la masa desplazada, relación con la estructura geológica, grado de desarrollo, ubicación geográfica, y el estado de la actividad (Highland y Bobrowsky, 2008).

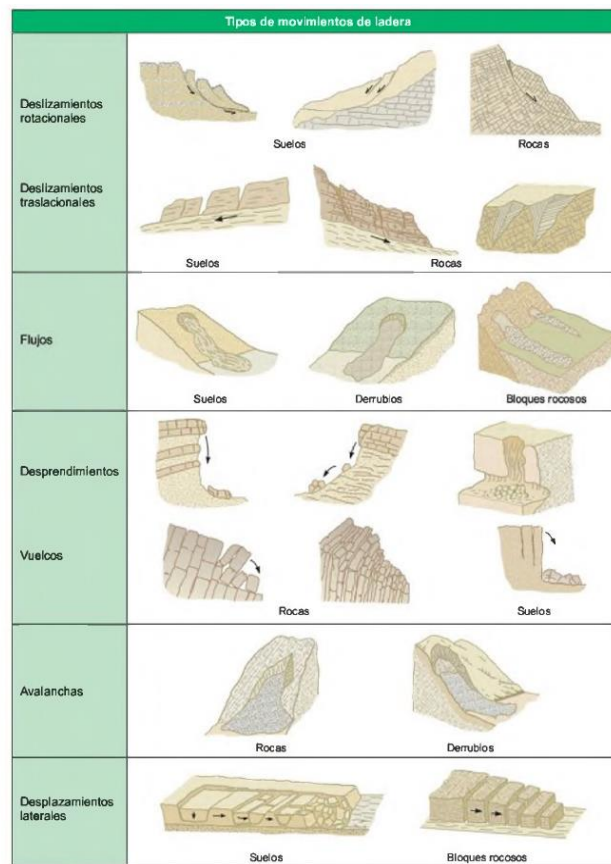


Figura 5: Clasificación general para los movimientos de ladera. (L. Gonzales de Vallejo, 2002)

3.2 Tipos de remoción en masa

3.2.1 Deslizamientos

Los deslizamientos son movimientos de masas de suelo o roca que deslizan (Figura 6), moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estas superficies; la masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido; la velocidad puede ser muy variable, pero suelen ser procesos rápidos y alcanzar grandes volúmenes (hasta varios millones de metros cúbicos). En ocasiones, cuando el material deslizado no alcanza el equilibrio al pie de la ladera (por su pérdida de resistencia, contenido en agua o por la pendiente existente), la masa puede seguir en movimiento a lo largo de cientos de metros y alcanzar velocidades muy elevadas, dando lugar a un flujo; los deslizamientos también pueden ocasionar avalanchas rocosas.

Pueden producirse deslizamientos en derrubios (por ejemplo, en los coluviones de las laderas, a favor del contacto con el sustrato, o en laderas rocosas muy alteradas y fracturadas, a favor del contacto con la roca sana), que generalmente dan lugar a flujos de derrubios, ya que suelen ocurrir en condiciones de saturación del material. El termino derrubio se refiere a un material suelto, sin consolidar, con una proporción significativa de material grueso (Varnes, 1988).

3.2.2 Deslizamientos rotacionales

Este es un tipo de deslizamientos en el cuál la superficie de ruptura se curva cóncavamente hacia arriba y el movimiento deslizante es fuertemente rotacional sobre un eje que es paralelo a la superficie del terreno transversal a lo largo del deslizamiento. (C.Martinez 2020)

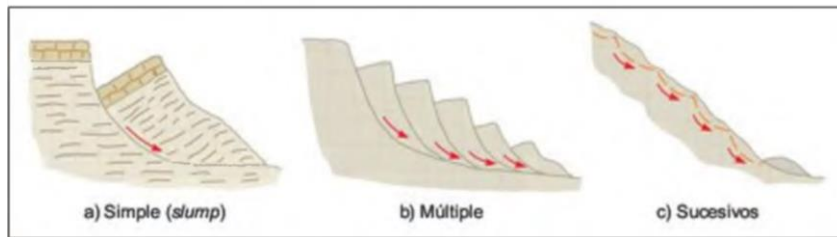


Figura 6: Tipos de deslizamientos rotacionales. (L. Gonzales de Vallejo, 2002)

3.2.3 Deslizamientos traslacionales

En este tipo de deslizamiento, la masa deslizante se mueve fuertemente a lo largo de una superficie plana con un pequeño efecto rotativo o una basculación hacia atrás. Un *bloque deslizante* es también un movimiento traslacional en el cual la masa en movimiento consiste en un único bloque o pocas unidades disgregadas que se mueven pendiente abajo con relativa coherencia. (C.Martinez 2020)

3.2.4 Flujos

Los flujos o coladas son movimientos de masas de suelo (flujos de barro o tierra), derrubios (coladas de derrubios o *debris flow*) o bloques rocosos (coladas de fragmentos rocosos) con abundante presencia de agua, donde el material está disgregado y se comporta como un fluido, sufriendo una deformación continua, sin presentar superficies de rotura definidas (Figura 7).

Según (C. Martinez, 2020) hay cinco categorías básicas de flujos, las cuales son:

Flujo de detritos: Un flujo de detritos es una forma rápida de movimiento en masa en el cual una combinación de suelo poco rígido, roca, materia orgánica, aire y agua se moviliza como una especie de lodo que fluye pendiente abajo. Los flujos de detritos son comúnmente causados por un intenso flujo de agua superficial, debido a una fuerte precipitación o un rápido deshielo, que erosiona y moviliza suelo inestable o roca en pendientes empinadas. Los flujos de detritos se movilizan comúnmente a partir de otros tipos de fenómenos de remoción en masa que ocurren en pendientes empinadas, saturadas y se conforman por una gran proporción de material particulado del orden de los limos y/o arenas. Las áreas fuente de los flujos de detritos están frecuentemente asociadas con barrancos empinados y depósitos detríticos. Las llamas que despojan las pendientes de su respectiva vegetación intensifican la susceptibilidad de estas a presentar este tipo de movimientos en masa.

Avalancha de detritos: Esta es una variedad de flujo de detritos con movimiento de rápido a extremadamente rápidos.

Flujo de tierras: Este movimiento en masa tiene una particular forma de ampolleta. El material se transforma en líquido y fluye, formando una especie de cuenco o depresión en la cabeza. El flujo por sí mismo se elonga y normalmente ocurre materiales de grano fino o rocas arcillosas en pendientes moderadas y bajo condiciones de saturación hídrica. Sin embargo, también es posible el flujo material seco.

Corriente de lodo: Este es un tipo de flujo de tierra consistente de material que está lo suficientemente húmedo como para fluir rápidamente y que contiene al menos 50% de partículas del tamaño arenas, limos y arcillas.

Reptación o creep: la reptación es un movimiento imperceptiblemente lento, constante y hacia debajo de roca o suelo formadores de pendiente. El movimiento es causado por estrés de cizalla suficiente para producir una deformación permanente pero demasiado pequeño como para producir una falla de cizallamiento

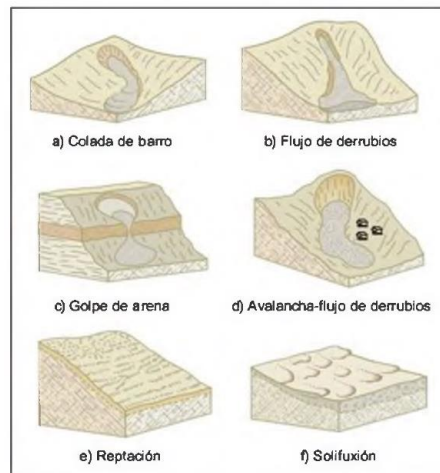


Figura 7: Tipos de flujos de deslizamiento (L. Gonzales de Vallejo, 2002; Coraminas y García Yague. 1997).

Dentro del movimiento de reptación (C. Martinez 2020) indica que se clasifican en tres tipos:

- **Estacionarios:** en el cual el movimiento se da en la profundidad del suelo debido a cambios estacionarios en la humedad y temperatura del suelo.
- **Continuos:** donde el estrés de cizalla continuamente excede la fuerza del material.
- **Progresivos:** donde las pendientes llegan a alcanzar un punto de falla como si fueran otros tipos de movimientos en masa.

3.2.5 Deslizamientos laterales

Este tipo de movimiento (denominado en algunas clasificaciones como extensión lateral o (*lateral spreading*) hace referencia al movimiento de bloques rocosos o masas de suelo muy coherente y cementado sobre un material blando y deformable (Figura 8). Los bloques se desplazan muy lentamente a favor de pendientes muy bajas. Los movimientos son debidos a la perdida de resistencia del material subyacente, que fluye o se deforma bajo el peso de los bloques rígidos. Los desplazamientos laterales también pueden ser provocados por licuefacción del material infra yacente, o por procesos de extrusión lateral de arcillas blandas y húmedas, bajo el peso de las masas superiores. Se dan en laderas suaves, y pueden ser muy extensos. Las capas superiores se fragmentan generándose grietas, desplazamientos diferenciales, vuelcos, etc., presentando las zonas afectadas un aspecto caótico. (L. Gonzales de Vallejo, 2002)

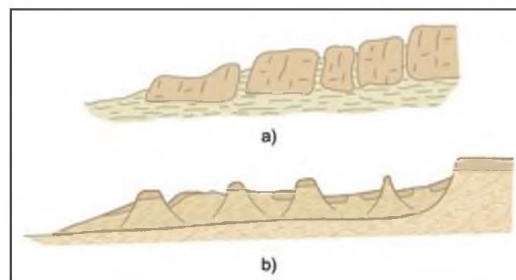


Figura 8: Desplazamientos laterales por: a) fluencia y extrusión del material infrayacente, b) licuefacción (L. Gonzales de Vallejo, 2002; Coraminas y García Yague. 1997).

3.3 Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas se caracterizan por ser ondas mecánicas elásticas, propagadas en un medio homogéneo y continuo luego de una perturbación sísmica. Estas ondas se propagan de manera volumétrica y superficial, abarcando tanto el subsuelo como la superficie del terreno. Las ondas de volumen corresponden a las ondas P y S, mientras que las ondas superficiales son llamadas ondas Rayleigh.

En el caso de la propagación de ondas en el suelo puede utilizarse la teoría de la mecánica del medio continuo dado que las longitudes de onda empleadas están en el orden de metros y atraviesan suelos cuyas partículas tienen tamaños del orden del milímetro.

Considerando al suelo como un medio continuo es posible utilizar las relaciones de equilibrio y de compatibilidad de los materiales. Además, la teoría de la elasticidad establece la ecuación constitutiva que permite completar la definición del problema. (Lopez, 2016)

3.3.1 Ondas P

Las ondas P, ondas primarias o de compresión, son ondas que se propagan a través de la compresión uniaxial y la dilatación de un medio resultante en cambios de volumen sin rotación. El movimiento resultante de partículas es oscilatorio y viaja en la misma dirección que la propagación de la onda. (C.Urquiza 2020)

Son llamadas ondas primarias debido a que son las primeras en ser registradas por un sismógrafo, y su velocidad (V_p) según (Graph, 1991) en un medio homogéneo e isótropo viene dada por la ecuación 1:

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (1)$$

Dónde k es el módulo de compresibilidad, μ es el módulo de corte y ρ es la densidad del medio de propagación.

3.3.2 Ondas S

Las ondas de corte u ondas secundarias son ondas mecánicas cuyas partículas se desplazan en sentido perpendicular a la dirección de propagación de la onda (Figura 9). Cuando las ondas de corte propagan en el plano vertical se les denomina ondas SV. Por el contrario, cuando estas ondas actúan en el plano horizontal del medio en el que interactúan, se les denomina ondas SH.

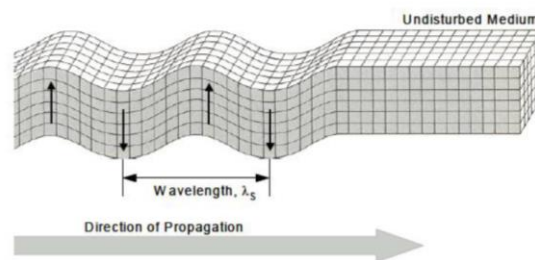


Figura 9: Dirección de propagación de la onda de corte.
 Extraído de (S. López, 2016)

La velocidad de la onda de corte u onda S está dada por la ecuación 2:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

Donde μ es el módulo de corte y ρ es la densidad del medio de propagación.

Cabe destacar que las ondas S no se propagan a través de líquidos ni gases, debido a que la materia en estos estados no tiene resistencia al esfuerzo cortante.

3.3.3 Ondas superficiales

Tal como su nombre, las ondas superficiales son aquellas que viajan a través de la superficie terrestre. Según (C. Urquizo 2020) sus principales características son sus amplitudes relativamente grandes y bajas frecuencias. En el artículo de (F. Zúñiga 2019) se indica que las ondas superficiales al igual que las ondas de cuerpo pueden ser clasificadas en dos categorías, ondas Love y ondas Rayleigh las cuales se diferencian por el tipo de movimiento producido por las partículas.

Ondas Love

Fueron descubiertas, en 1911, por un geofísico inglés llamado Augustus Edward Hough Love y recibieron su nombre en honor a su descubridor. Se desarrollan solo en los casos en que un medio semi-infinito elástico sólido está cubierto por una capa horizontal de baja velocidad, al igual que en el modo de vibración de onda SH, el movimiento de partículas es transversal y se limita al plano horizontal (Figura 10), las ondas Love viajan por múltiples reflexiones entre la parte superior y Límite inferior de los planos de la capa superficial. (C. Urquizo 2020)
 La velocidad de propagación se acerca a la velocidad de la onda S en el medio del subsuelo para longitudes de onda muy largas y al de la capa superficial para longitudes de onda cortas. (C. Urquizo 2020)

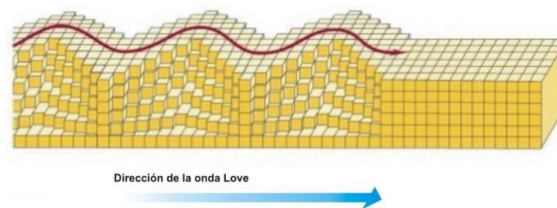


Figura 10: Propagación de ondas love. Extraído de (Nc Arquitectura, 2016).

Ondas Rayleigh

Descubiertas por el científico inglés Lord Rayleigh en el 1885, estas ondas generalmente se desarrollan en la superficie libre de un medio sólido semi-infinito. Su amplitud de onda se descompone rápidamente al aumentar la profundidad, el viaje perturbación en este caso es una especie de combinación de movimientos de partículas de P y Ondas SV (Figura 11).

Las ondas Rayleigh viajan sobre la superficie de un medio sólido con velocidad de 0.92 de la velocidad de las ondas S moviéndose en ese medio (C. Urquizo 2020).

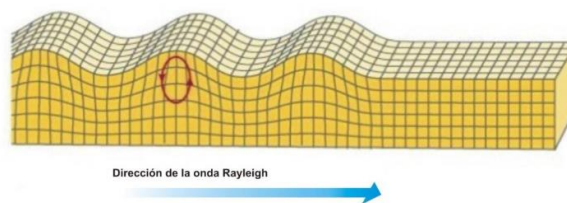


Figura 11: Propagación ondas de rayleigh. Extraído de (Nc Arquitectura, 2026).

3.4 Dispersión de ondas de Rayleigh

Se define como dispersión el cambio de velocidad de propagación de las ondas Rayleigh en función de la longitud de onda (λ) o de la frecuencia (f). Este fenómeno solamente se manifiesta cuando el medio es no homogéneo en la distribución de los valores de V_s según la vertical. En un medio con valores de V_s (Figura 12) crecientes con la profundidad las componentes de alta frecuencia (menor longitud de onda) se transmiten a menor velocidad de fase (c) que las de baja frecuencia (mayor longitud de onda) que además profundizan más en el terreno (S. López, 2016).

Cabe destacar que más de una velocidad de fase puede estar asociada con una frecuencia de onda Rayleigh debido a que estas ondas pueden viajar a diferentes velocidades para una frecuencia determinada. La velocidad más baja es llamada velocidad del modo fundamental (W Hullica, 2020).

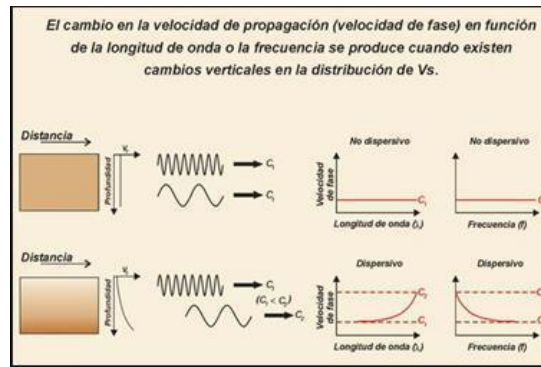


Figura 12: Propagación de ondas de Rayleigh, extraído de (W Hullica, 2020)

3.5 Clasificación litológica según velocidad de onda de corte in situ.

Para clasificar un suelo según sus condiciones sísmicas, se utiliza la velocidad de onda de corte S como referencia. En la tabla 1 se observa una recopilación de diferentes autores para velocidades de onda S según el tipo de material presente. Los valores de la tabla revelan la importante variabilidad en V_s que se puede medir en una sola unidad geológica (W. Greenwood, 2015).

Tabla 1: Clasificación litológica según velocidades de ondas de corte in situ para diferentes tipos de roca de acuerdo con distintas literaturas. Extraído de (W. Greenwood, 2015).

Ahmed (1989)	Anhydrite	250-750 m/s
Brandes et al. (2011)	Basalt	360-910 m/s
Wong et al. (2011)	Basalt	300-900 m/s
Le et al. (2014)	Chalk	230-1100 m/s*
Nichoff (2010)	Clay/sandstone	900 m/s
Harrison and Hiltunen (2004)	Dolomite	520-610 m/s
Godio et al. (2006)	Gneiss	1000 m/s
Park et al. (2008)	Gneiss	1200-3500 m/s
Rucker et al. (2005)	Gypsite	700 m/s
Rucker et al. (2005)	Gypsum	1600 m/s
Ahmed (1989)	Halite	650-1000 m/s
Ezersky et al. (2013)	Halite	760-1050 m/s
Ezersky et al. (2013)	Halite (solid)	> 1500 m/s
Bianchi Fasani et al. (2013)	Ignimbrite	350-700 m/s
Nettles et al. (2010)	Limestone	800-1000 m/s
Parker and Hawman (2012)	Limestone	350-700 m/s
Robison and Anderson (2008)	Limestone	1600-2400 m/s
Ellefsen et al. (2012)	Mud/Sandstone	350-2350 m/s
Rucker et al. (2005)	Mudstone	200-900 m/s
Ahmed (1989)	Sandstone	700-950 m/s
Roy and Stewart (2012)	Sandstone	900-1300 m/s
Ahmed (1989)	Shale	500-1000 m/s
Castagna et al. (1984)	Shale	1100-2300 m/s
Eastwood and Castagna (1983)	Shale	2400-2700 m/s
Lingle and Jones (1977)	Shale	1900-2300 m/s
Hamilton (1979)	Shale	900-1400 m/s
Hiltunen (2005)	Shale	550-610 m/s
Koerperich (1979)	Siltstone	2400-2700 m/s
Bianchi Fasani et al. (2013)	Tuff	500-700 m/s
Nunziata et al. (1999)	Tuff	500-1100 m/s

3.6 Norma sismorresistente E.30

Para la interpretación de perfiles sísmicos e identificación de estratos según rango de velocidades de onda S, se utiliza el criterio de la Norma Técnica Peruana E.030, actualizada 2018, la cual clasifica los suelos según la velocidad de onda de corte tal como muestra la tabla 2 (W. Huillica, 2021)

Tabla 2: Clasificación de suelo según la norma E.030.

Clasificación de los perfiles de Suelo				
N°	V_s	Norma E.030		Descripción
1	< 180 m/s	S_3	Suelo blando	Suelo blando
2	180 m/s a 350 m/s	S_2	Suelo medianamente rígido	Suelo moderadamente rígido
3	350 m/s a 500 m/s			Suelo rígido
4	500 m/s a 800 m/s	S_1	Roca o suelo muy rígido	Suelo muy rígido o roca blanda
5	800 m/s a 1500 m/s			Roca moderadamente dura
6	> 1500 m/s	S_0	Roca dura	Roca dura

3.6 Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)

El método sísmico de análisis multicanal de ondas superficiales fue introducido por Park et al. (1999) y permite determinar la litología del subsuelo bajo un punto basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que la conforman. El ensayo consiste en generar ondas sísmicas en la superficie del terreno mediante una fuente de energía artificial en puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de una línea sobre la superficie del terreno, tal como muestra la Figura 13. La perturbación puede ser generada por un martillo o un mazo que permita tener control del rango de frecuencias y amplitud de las ondas. Se hace el uso de ondas Rayleigh, ya que son estas las que predominan en el grupo de ondas, conteniendo alrededor del 70% de la energía del tren de ondas y es el 95 % similar a las ondas de corte S.

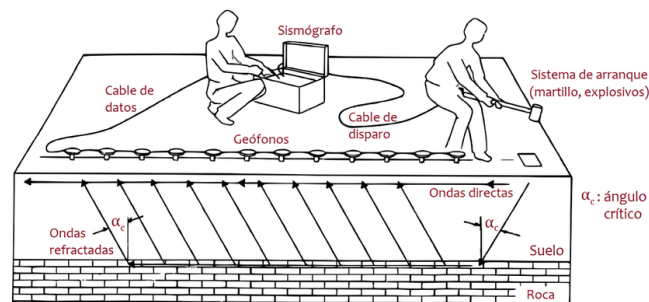


Figura 13: Esquema de datos de adquisición sísmica para un ensayo MASW. Extraído de ASTM D5777

La ventaja de emplear el ensayo MASW es que aumenta la fiabilidad de los resultados y acorta el tiempo de ejecución de estudios tanto en el campo como durante la interpretación de la data. Este método es una herramienta rápida, poderosa y rentable para estimar la velocidad de onda de corte. Es claro que este método es útil para ingenieros geotécnicos y sismólogos que necesitan una rápida evaluación de las características del suelo (S López, 2016).

3.7 Análisis Interferométrico con Radar de Apertura Sintética (InSAR)

La interferometría diferencial DInSAR (por su sigla en inglés Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar), es una técnica de observación de la Tierra mediante la utilización de sensores activos de radar de apertura sintética, montados sobre satélites, con los que es posible identificar, medir y mapear el movimiento de la superficie y el cálculo de la coherencia relativa, analizando la diferencia en la fase entre dos imágenes con fechas de adquisición distinta.

Una antena de apertura sintética o virtual consiste en un vector de sucesivas y coherentes señales de radar, que son transmitidas y recibidas por una pequeña antena que se mueve a lo largo de un determinado recorrido de vuelo u órbita (Figura 14). El procesamiento de la señal usa las magnitudes y fases de la señal recibida sobre sucesivos pulsos para crear una imagen (Sillerico, et al., 2010).

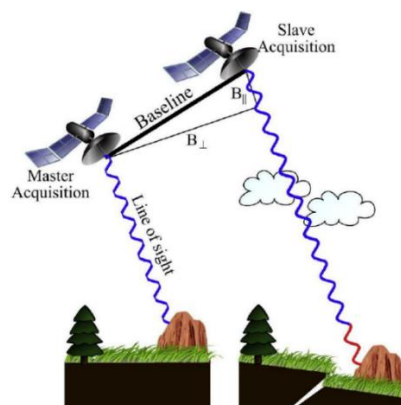


Figura 14: La interferometría se genera a través de la multiplicación cruzada de la imagen maestra con la conjugación compleja de las esclavas. (Secretaría de comunicaciones y transporte Instituto mexicano del transporte, 2020)

A partir de dicho principio, los datos obtenidos son las distancias entre el satélite y la superficie del terreno, que se calculan mediante la medición de desplazamientos y desfases. La señal se ve afectada por varios parámetros como son la atmósfera, el ruido, la topografía y los movimientos en la superficie. En el caso de movimientos o deformaciones, el cálculo se desarrolla de la siguiente manera: Se tiene un punto P sobre la superficie de la Tierra que es observado por un satélite en fechas distintas, si el punto P no tuvo movimiento, las distancias R_s y R_m deberán ser iguales (Figura 15), de haber tenido un movimiento al punto hipotético punto P', entonces las distancias serán diferentes y la magnitud del movimiento será directamente proporcional a la diferencia en la fase (Sillerico, et al., 2010)

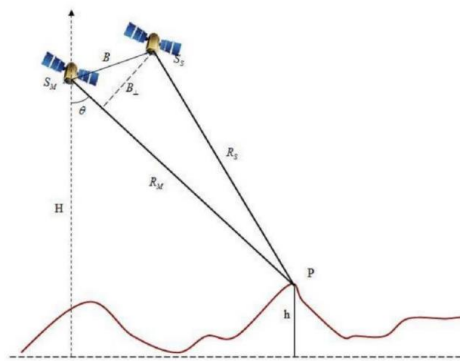


Figura 15: Geometría de adquisición de imágenes SAR (Secretaría de comunicaciones y transporte Instituto mexicano del transporte, 2020)

4. METODOLOGÍA

4.1 Antecedentes geológicos

El análisis litológico y geomorfológico de la zona de estudio se realiza en base a datos bibliográficos, recolectando una serie de trabajos investigativos, ya sean, revistas científicas, tesis de doctorados, cartas geológicas, memorias de título y artículos relacionados con el área de Cerro Renca en la región Metropolitana. Principalmente la geología del área se analiza en base a la carta geológica otorgada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) complementándose junto con otras investigaciones realizadas en Renca.

Para el estudio en profundidad de la geología de la zona, se hace uso de datos de Sistema de Información Geográfica (SIG), los cuales indican la topografía del terreno, áreas pobladas y distintas zonas de interés para un posterior análisis. Luego de la recopilación bibliográfica y en conjunto con datos SIG del terreno, se realiza un mapa geológico y un análisis descriptivo de la zona de interés con la ayuda de programas GIS de licencia gratuita, precisando su georreferenciación, áreas pobladas y principalmente litología. Finalmente se analizan las áreas de mayor susceptibilidad de remoción en masa, de acuerdo con la litología y topografía presente en el terreno.

4.2 Antecedentes geomorfológicos

El análisis geomorfológico se ejecuta en base a datos bibliográficos del terreno, así como también en base a observaciones realizadas de manera extensa utilizando programas GIS de licencia gratuita. Estas observaciones digitales permiten observar de amplia manera el relieve del terreno, identificando zonas de escarpe y agentes modeladores. Para un análisis más exhaustivo del área, se hará un análisis del relieve de manera presencial, ubicando e

identificando zonas geomorfológicas de interés, teniendo registro fotográfico para una posterior evaluación.

Finalmente, en base a los datos bibliográficos, datos SIG e información recopilada en terreno, se realiza una descripción del relieve de la zona, así como también un mapa geomorfológico del área denostando las principales zonas de escarpes, valles y áreas de intenso modelamiento de terreno.

4.3 Análisis de desplazamiento interferométrico InSAR

Para realizar un análisis de desplazamiento InSAR en primera instancia se debe localizar el área de estudio, encerrándola en un polígono y guardándolo como un archivo Kml. Esto para tener información geográfica y georreferencial de la zona de estudio. Posterior a la selección del área de estudio, se realizará una búsqueda exhaustiva de imágenes con 5 años de antigüedad tipo Single Looks Complex (SLC), la cual dependerá del intervalo de fechas disponible en la página de la NASA, Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS). Con un intervalo de aproximadamente un mes por imagen, se procede a realizar el procesamiento interferométrico el cual se realizará con el software SNAP, el cual está esquematizado en la figura 16.

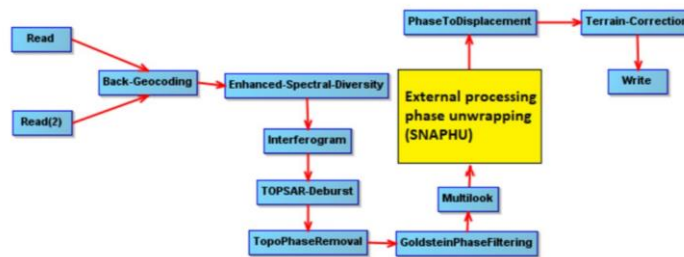


Figura 16: Procesamiento de imágenes interferométricas en programa SNAP. (Secretaría de comunicaciones y transporte Instituto mexicano del transporte, 2020)

Una vez obtenido el interferograma de desplazamientos, se extrae en formato Geo/TIFF el cual nos permitirá analizar el archivo de desplazamiento con mayor detalle utilizando un software GIS de licencia gratuita.

Finalmente con la ayuda del software GIS, se realizan 3 mapas de desplazamiento para su posterior análisis, abarcando los 3 últimos años del área de estudio.

4.4 Análisis de ondas superficiales MASW

El análisis de ondas superficiales MASW cuenta con dos etapas para su respectivo procesamiento. En primera instancia está la etapa de medición o etapa de terreno la cual consiste en la realización del ensayo, midiendo así la respuesta sísmica del área de estudio con respecto a un estímulo externo.

Luego de realizadas las mediciones de campo, en segunda instancia comienza la etapa de gabinete la cual consiste en la interpretación de los datos obtenidos en terreno, utilizando información bibliográfica del área de estudio y clasificando los resultados según la norma Técnica Peruana E.030

4.4.1 Extracción de datos MASW

Este ensayo se realizó con mediciones activas y pasivas, dividiendo dicha toma de datos en perfiles configurados como perfil A, perfil B, perfil C, y perfil D. La toma de datos de ondas activas fue realizada en los 4 perfiles anteriormente mencionados, sin embargo, solo en los perfiles C y D fueron realizadas las mediciones de ondas pasivas (Figura 18). La configuración de los perfiles A y B (Figura 17) fue de 24 geófonos de 10 Hz posicionados de forma lineal con un espaciamiento de 5 m de distancia. En los perfiles C y D se utilizaron 12 geófonos con la misma configuración que los perfiles anteriores.

Para la extracción de datos sísmicos en terreno se utilizó el siguiente equipo de medición:

- Sismógrafo GEA P.A.S.I de 24 canales.
- 24 geófonos horizontales de 10 Hz
- Ordenador portátil
- Dos cables sísmicos con espaciamiento estándar
- Placa de impacto
- Maza de impacto
- Software de adquisición de datos incluido con el sismógrafo

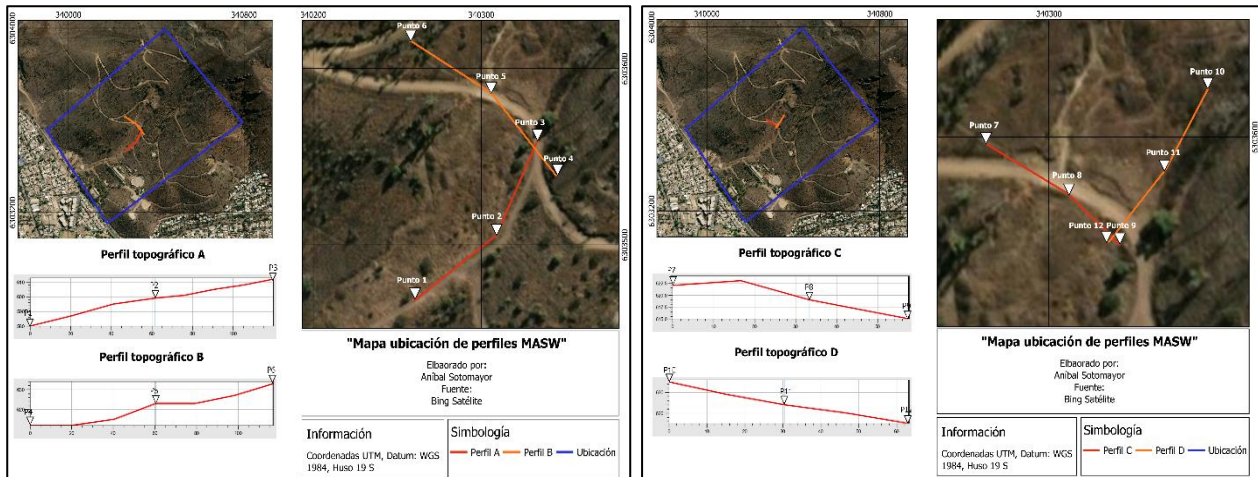


Figura 17: Mapa ubicación de perfiles A y B para la realización de ensayo MASW. Fuente: Elaboración propia.

Figura 18: Mapa ubicación de perfiles B y C para la realización de ensayo MASW. Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento para la toma de datos consta de 3 golpes en cada extremo del arreglo lineal y 3 golpes en el centro de la línea de geófonos, siendo 9 los golpes por perfil. La Tabla 3 presenta las ubicaciones de los golpes realizados para los ensayos activos.

Tabla 3: Clasificación de coordenadas para los perfiles A, B, C y D tras la realización del ensayo MASW y REMI.

Punto	Latitud	Longitud	Perfil
1	33°23'46.51"S	70°43'3.35"O	A
2	33°23'45.29"S	70°43'1.44"O	
3	33°23'43.60"S	70°43'0.48"O	
4	33°23'44.17"S	70°43'0.06"O	B
5	33°23'42.64"S	70°43'1.51"O	
6	33°23'41.65"S	70°43'3.35"O	
7	33°23'42.24"S	70°43'2.58"O	C
8	33°23'42.80"S	70°43'1.48"O	
9	33°23'43.35"S	70°43'0.81"O	
10	33°23'42.56"S	70°43'0.15"O	D
11	33°23'41.71"S	70°42'59.56"O	
12	33°23'43.32"S	70°43'0.82"O	

4.4.2 Procesamiento de datos MASW

Para procesar los datos obtenidos en terreno, se utilizó el software de procesamiento Seisimager/SW Geometrics®, con el cual se obtuvieron 4 perfiles de velocidad en 2 dimensiones.

El proceso general de procesamiento de datos consta de 5 etapas las cuales se pueden observar en la figura 19:

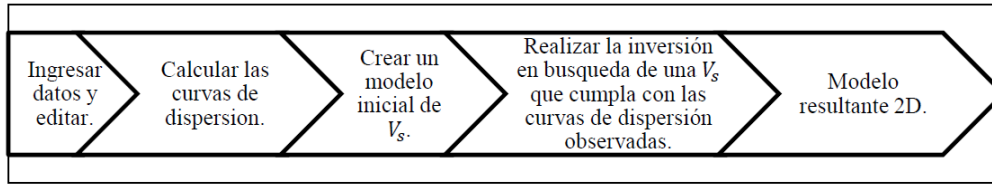


Figura 19: Esquema generalizado de pasos a seguir para procesar datos sísmicos en el software Seisimager. Fuente: Extraído de (F. Zúñiga, 2019)

En primera instancia se utilizó el programa Pickwin incluido en el software Seisimager/SW Geometrics[®], con este programa se visualizaron los datos obtenidos en terreno, observando si se presentó algún fallo o la toma de datos no fue realizada de manera adecuada. Cabe destacar que el Stacking se realizó de manera visual para este trabajo, esto debido al tipo de archivo entregado por el sismógrafo utilizado. Luego se utilizó el programa “Waveeq”, donde se puede aplicar filtros a las curvas de dispersión, en los que se utilizaron para eliminar datos de baja calidad. En los perfiles A y B se incluyen las curvas solo con datos de ondas activas, mientras que en los perfiles D y C se realizó una combinación de estos dos tipos de onda, dilucidando de manera más clara los datos de terreno y alcanzando una mayor profundidad. Finalmente, en el módulo “Geoplot” se pueden visualizar los perfiles 2D de la distribución de la velocidad de onda S resultante de la inversión (F. Zúñiga, 2019).

5. RESULTADOS

5.1 Resultados análisis interferométrico

A continuación, se muestran los resultados del análisis de desplazamiento de la zona de estudio. Para el primer y el segundo mapa interferométrico se utilizó un intervalo de tiempo de 2 meses, mientras que, para el tercer mapa se utilizó un intervalo de 4 meses. Cabe destacar que los intervalos de tiempo utilizados para hacer el análisis de desplazamiento están sujetos a la cantidad y calidad de imágenes disponibles en el área seleccionada.

En el primer mapa interferométrico, el cual está basado en el análisis del 09 de octubre del 2020 hasta el 20 de diciembre del mismo año, se aprecian valores negativos en los desplazamientos ocurridos en el área de estudio, esto indica que el terreno se alejó del punto de referencia satelital, dando a entender que ha ocurrido un hundimiento en la zona. En general se observa un gran movimiento caracterizado de color verde en el mapa (Figura 20), el cual tiene intervalos de 1 cm a 0.4 cm. En el área noreste de la media luna ubicada en uno de los accesos cercanos a la zona de remoción en masa se puede apreciar un desplazamiento focalizado, con más de 1.5 cm de hundimiento y corresponde al mayor movimiento ocurrido en el análisis. Otro desplazamiento focalizado ocurre en la cota 670 aproximadamente justo donde comienza el depósito de remoción en masa, se puede observar este desplazamiento de color naranja. En esta área se observan movimientos de entre 1 cm y 1.5 cm. Finalmente en el área suroeste de la zona de estudio, se aprecia un movimiento leve caracterizado de color azul el cual está por debajo los 0.4 cm.

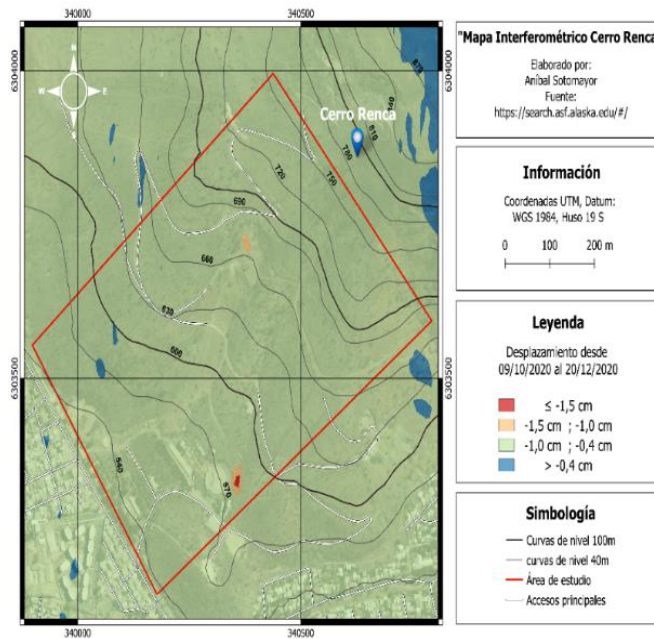


Figura 20: Mapa interferométrico del área de estudio en Cerro Renca. La fecha de la imagen maestra corresponde al 09/10/2020 y la de la imagen esclava corresponde al 20/12/2020

El segundo mapa (figura 21), cuyo análisis se realizó entre el 10 de octubre del 2021 y el 21 de diciembre del mismo año, presenta dos desplazamientos positivos los cuales abarcan la totalidad del área de estudio. El primer desplazamiento observado está caracterizado de color azul y corresponde a un movimiento mayor a 1.24 cm. El segundo desplazamiento se sitúa en la parte inferior del área de estudio y está caracterizado de color verde, su movimiento está en el rango de los 0.47 cm y 1.24 cm. Los valores obtenidos del análisis son positivos con respecto al punto de referencia satelital, lo que indica un levantamiento del terreno. Cabe destacar que en este análisis no ocurrieron desplazamiento focalizados.

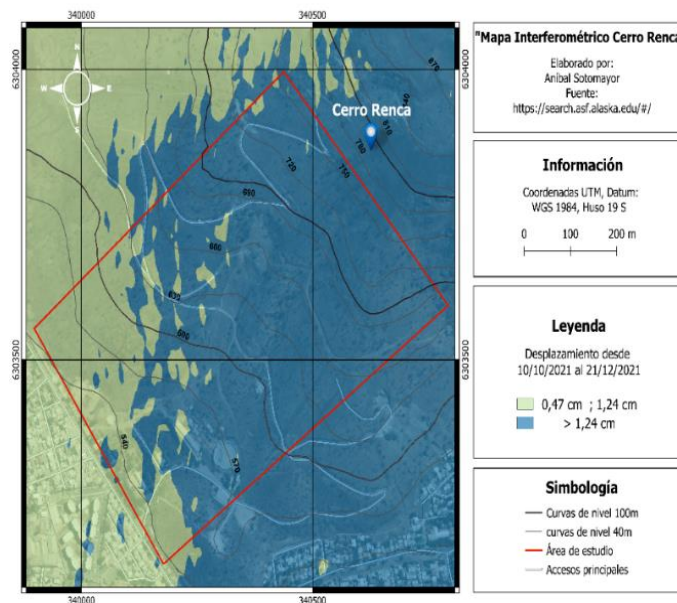


Figura 21: Mapa interferométrico del área de estudio en Cerro Renca. La fecha de la imagen maestra corresponde al 10/10/2021 y la de la imagen esclava corresponde al 21/12/2021

Por último, el tercer mapa interferométrico que se observa en la figura 22, cuyo análisis se realizó entre el 20 de abril del 2022 y el 18 de agosto del mismo año, presenta un movimiento generalizado negativo que va desde 1.64 cm a 2.46 cm. En la zona noreste de la media luna, al igual que en el primer mapa, ocurre un desplazamiento negativo focalizado, en este caso este desplazamiento va desde los 0.82 cm a 1.64 cm. Otro movimiento particular se encuentra en la zona inferior del área de estudio correspondiente a la cota 570, la misma zona que se produjo movimiento en el primer mapa. Este desplazamiento es superior a 2.46 cm y corresponde al mayor movimiento registrado en los tres análisis interferométricos.

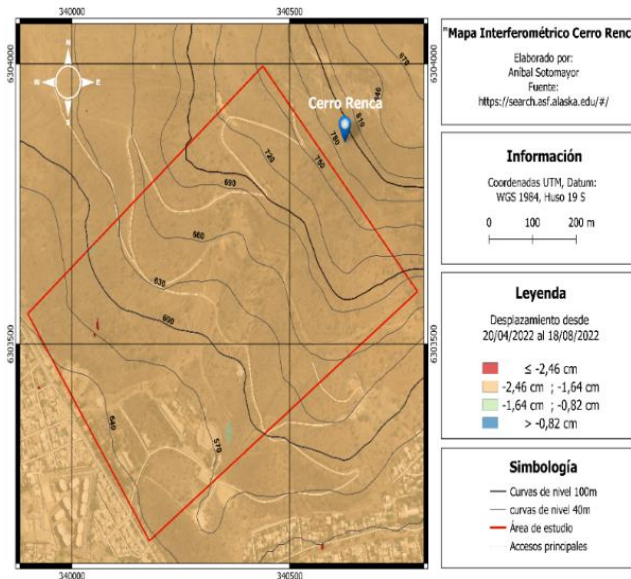


Figura 22: Mapa interferométrico del área de estudio en Cerro Renca. La fecha de la imagen maestra corresponde al 20/04/2022 y la de la imagen esclava corresponde al 18/08/2022

5.1 Resultados e interpretación ensayos MASW y REMI

Los resultados obtenidos de los ensayos MASW y REMI in situ son analizados a partir de la geología presente en la zona de estudio, asociando las distintas velocidades de onda S a diferentes litologías, esto basado en la información presente en la tabla 1. La clasificación de cada estrato según el tipo de suelo presente está realizada en base a la Norma Técnica Peruana E.030, actualizada el 2018.

Perfil A: Se identifica la secuencia volcánica Olma (Figura 23), con tonalidades verdes y una velocidad de onda de corte de aproximadamente 1075 m/s. Sobre esta secuencia volcánica, se encuentran dos depósitos de remoción en masa representados con tonalidades anaranjadas. Entre 5 y 15 metros de profundidad se encuentra el primer depósito en el cual se registra una velocidad de onda de aproximadamente 175 m/s. El segundo depósito de remoción en masa, el cual presenta una mayor densidad, se aprecia entre los 20 y los 30 metros de profundidad con una velocidad de 330 m/s. Estas velocidades no concuerdan con la geología del lugar, siendo más bajas de lo que indica la tabla 1, indicando una muy baja compacidad y densidad en los depósitos observados. En la superficie del perfil sísmico, con una tonalidad azul oscuro, se identifican velocidades de onda de corte altas lo cual, de acuerdo a la geología del lugar, corresponde a un fragmento de roca anguloso asociado a una remoción en masa.

Se identifican 5 capas sísmicas con diferentes espesores y velocidades de onda corte. Desde los 0 a 5 metros de profundidad se encuentra el primer estrato en el cual se identifica de manera mayoritaria la presencia de suelo muy rígido y roca moderadamente dura, con velocidades de 650 m/s y 1450 m/s. Entre los 30 y los 80 metros del arreglo lineal, se identifica la presencia de una roca dura, con velocidades de 1525 m/s y 1900 m/s.

El segundo estrato, el cual comienza desde los 5 metros hasta 14 metros de profundidad aproximadamente, está compuesto por suelos rígidos y moderadamente rígidos, con velocidades de 400 m/s a 650 m/s. Desde el inicio del arreglo lineal hasta los 40 metros de distancia aproximadamente, se identifica la presencia de suelo blando, con una velocidad de 175 m/s.

En la tercera capa sísmica, la cual se identifica desde los 14 hasta los 19 metros de profundidad, se observa la presencia de suelo muy rígido y roca moderadamente dura, con velocidades de 750 m/s en los primeros 25 metros de distancia del arreglo lineal y 1200 m/s entre los 50 y 95 metros de distancia. Desde los 14 hasta 30 metros de profundidad aproximadamente se identifica el cuarto estrato, en el que se observa la presencia de suelo rígido y suelo muy rígido o roca blanda, con velocidades que van desde los 400 m/s en los primeros 25 metros del arreglo lineal y 780 m/s desde los 65 metros de distancia hasta el final del arreglo.

Por último, desde los 30 metros hasta una profundidad desconocida, se identifica el cuarto estrato el cual en su mayoría está compuesto por roca moderadamente blanda, con una velocidad de 1300 m/s. En el centro del arreglo lineal, aproximadamente desde los 48 metros de profundidad se observa la parte superior de una roca dura con una velocidad registrada de 1600 m/s.

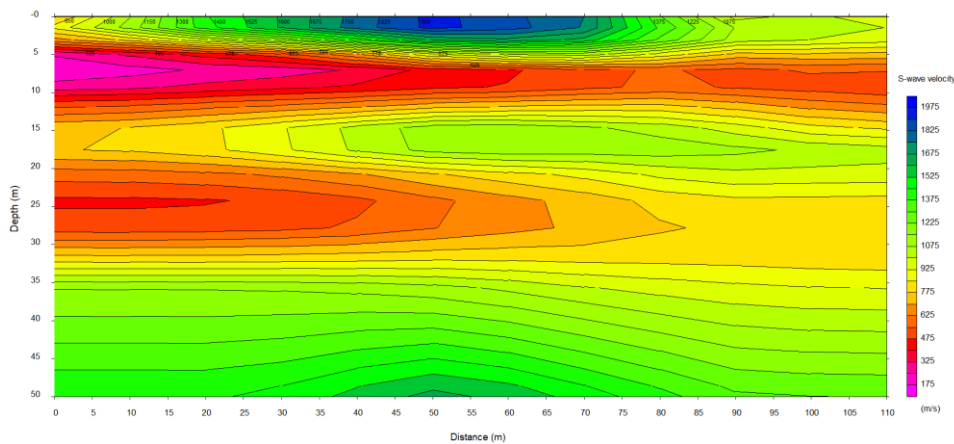


Figura 23: Resultado línea de perfil A ensayo MASW ondas activas. Fuente: Elaboración propia

Perfil B: En este perfil sísmico se observa desde la superficie hasta aproximadamente 12 metros de profundidad, con tonalidades anaranjadas y rojas un depósito de remoción en masa el cual corresponde a la unidad Qrm y según las velocidades registradas, se trataría de arenas arcillosas. Cerca del final del arreglo lineal se pueden apreciar velocidades de onda de corte altas, indicando la presencia de rocas angulosas basálticas asociadas a remociones en masa.

Desde los 12 metros hasta una profundidad desconocida y con tonalidades verdes se identifica la secuencia volcánica Olma, indicando la presencia de andesitas y basaltos a mayor profundidad.

Se observan 2 estratos principales como se puede observar en la figura 24. El primer estrato inicia en la superficie y llega hasta los 14 metros de profundidad aproximadamente, se identifica la presencia de suelo moderadamente rígido en los primeros metros de profundidad y los primeros metros de distancia del arreglo lineal, con velocidades de 340 m/s a 545 m/s. Cerca de los 110 metros aproximadamente del arreglo lineal, se observa la presencia de suelo muy rígido o roca blanda con una velocidad de 707 m/s.

El segundo estrato está compuesto en su mayoría por roca moderadamente dura con una velocidad registrada que varía desde los 870 m/s a 1073 m/s. Desde los 14 metros hasta una profundidad desconocida, esta capa sísmica alcanza una velocidad máxima de 1276 m/s en su parte inferior derecha.

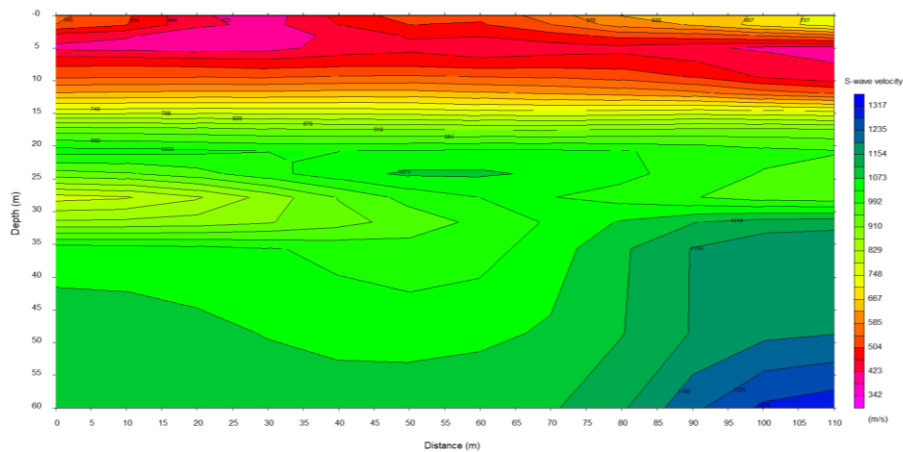


Figura 24: Resultado línea de perfil B ensayo MASW ondas activas. Fuente: Elaboración propia

Perfil C: Similar a los perfiles anteriores, se puede apreciar un depósito de remoción en masa en la superficie hasta aproximadamente los 7 metros de profundidad. Entre los 15 y los 20 metros de profundidad se aprecia otro depósito de remoción en masa caracterizado por bajas velocidades de ondas de corte.

Las zonas caracterizadas con tonalidades verdes y azules, corresponden a la secuencia Olma, identificando según las velocidades de ondas de corte andesitas y basaltos.

Se observan 5 estratos con distintas velocidades y litologías en la figura 25, el primer estrato presenta las velocidades más bajas, al contrario del ultimo estrato que presenta velocidades altas. Desde la superficie hasta los 7 metros de profundidad aproximadamente, se identifica el primer estrato. En esta capa sísmica se observa suelo moderadamente rígido a lo largo del arreglo lineal, alcanzando una velocidad de 322 m/s. También se identifica la presencia de suelo muy rígido o roca blanda con una velocidad máxima de 517 m/s.

El segundo estrato esta situado desde los 7 metros hasta los 14 metros de profundidad, presentando una característica de suelo rígido o roca blanda alcanzando velocidades desde los 550 m/s a los 646 m/s. También se puede observar que las velocidades máximas presentes se sitúan en la parte central de la capa sísmica.

Desde los 14 metros hasta los 21 metros aproximadamente se identifica el tercer estrato en el cual se observa la presencia de suelo rígido con una velocidad de 490 m/s y suelo muy rígido o roca blanda alcanzando una velocidad de 549 m/s. Cabe destacar que en la base y en el techo de la capa sísmica se identifican mayores velocidades que en la parte central.

La cuarta capa sísmica se encuentra entre los 21 metros y los 30 metros de profundidad presentando velocidades levemente homogéneas, las cuales van desde los 670 m/s hasta los 776 m/s indicando la presencia de suelo muy rígido o roca blanda.

Finalmente el quinto estrato se identifica desde los 30 metros hasta una profundidad desconocida, esta capa sísmica corresponde en su totalidad a roca moderadamente dura la cual alcanza una velocidades de entre los 808 m/s y 1068 m/s.

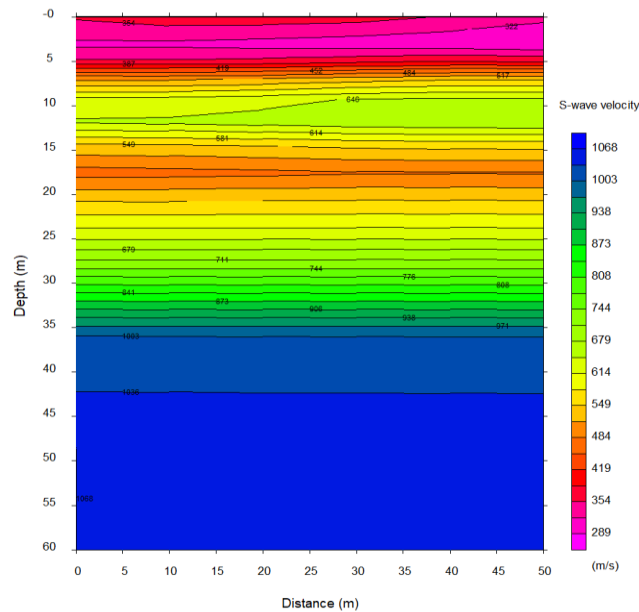


Figura 25: Resultado línea de perfil C ensayo MASW con ondas activas y pasivas. Fuente: Elaboración propia

Perfil D: Se identifica la presencia de un depósito de remoción en masa desde la superficie hasta los 5 metros de profundidad. Este depósito corresponde a la secuencia Q_{rm} y la menor velocidad de onda de corte se aprecia en la superficie del terreno, indicando baja compacidad. A medida que aumenta la profundidad, aumenta la velocidad de onda de corte, identificando la secuencia Olma compuesta por andesitas y basaltos. Se infiere la presencia de tres capas sísmicas de diferentes características como se observa en la figura 26. El primer estrato se ubica desde la superficie hasta los 5 metros de profundidad, se identifica la presencia de suelo moderadamente rígido y suelo rígido con velocidades de 321 m/s y 519 m/s. En la segunda capa sísmica, que va desde los 5 metros hasta los 23 metros de profundidad aproximadamente, se identifica la presencia de suelo muy rígido o roca blanda en la parte superior del estrato con una velocidad de 552 m/s. Desde los 9 metros hasta los 14 metros de profundidad aproximadamente, se puede observar la presencia de una roca moderadamente dura con un velocidad de 881 m/s. Finalmente desde los 23 metros de profundidad hasta una profundidad desconocida, se identifica la presencia de una roca moderadamente dura con velocidades que van desde los 914 m/s hasta los 1046 m/s.

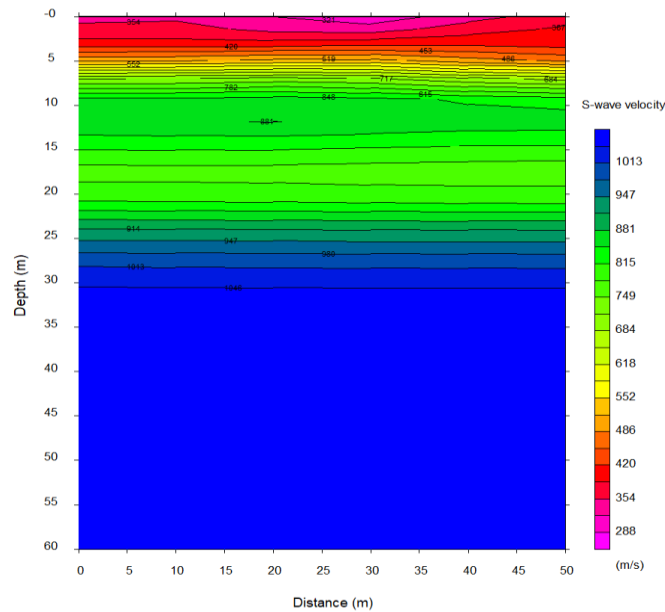


Figura 26: Resultado línea de perfil D ensayo MASW con ondas activas y pasivas. Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente artículo se realizaron dos estudios de procesamiento para dilucidar el estado de la ladera, la cual está caracterizada por depósitos de remoción en masa. Por una parte, se realizó un análisis de desplazamiento interferométrico utilizando tecnología InSAR, así como también se realizaron ensayos geofísicos en el área de estudio correspondientes a MASW y REMI. Para el análisis de desplazamiento interferométrico, se elaboraron 3 mapas asociados al área de estudio, describiendo los movimientos ocurridos en un intervalo de tiempo determinado. A su vez, para el análisis sísmico se realizaron 4 arreglos lineales, de los cuales la mitad fue analizada con ondas de corte activas, mientras que la otra mitad fue analizada con ondas de corte activas y pasivas.

Cabe destacar que el análisis de susceptibilidad se realizó utilizando parámetros de movimiento superficial y características subterráneas, así como también utilizando información bibliográfica asociada a la geología y geomorfología del área de estudio. A su vez, también se consideraron los análisis de remoción en masa realizados por el SERNAGEOMIN en el año 2015 y los resultados obtenidos del estudio realizado por S. Inzunza en el año 2018.

Los resultados de desplazamiento interferométrico no indican un movimiento significativo en el intervalo de tiempo analizado. Este intervalo para el primer y segundo mapa corresponde a 2 meses y 11 días, en cambio para el tercer mapa el intervalo fue de 4 meses y 28 días.

En los 3 mapas analizados se visualizan zonas de máximo 1.5 cm de hundimiento de terreno, estos valores asociados a su constancia en los intervalos de tiempo y a su bajo desplazamiento, indican que estos movimientos corresponden a reptación, este tipo de deslizamiento puede ocasionar a largo plazo problemas en los cimientos de las edificaciones, por lo que al tener este movimiento cerca de la zona noreste de la media luna de Renca, se recomienda una evaluación profesional constante a través de datos interferométricos u otras técnicas de procesamiento satelital.

Los datos obtenidos en terreno a través de los ensayos MASW y REMI indican la presencia de suelo de baja compacidad en zonas profundas de la ladera asociado a remociones en masa ocurridas en años anteriores.

En el perfil sísmico A, se presentan valores de onda de corte de 175 m/s aproximadamente 5 metros de profundidad, siendo estos los registros más bajos en comparación a los otros perfiles. En los perfiles B, C

y D se observan depósitos de remoción en masa en la superficie del terreno con valores que van desde los 280 m/s a 342 m/s.

Se recomienda realizar ensayos geotécnicos in situ junto con ensayos sísmicos en la zona del perfil A, debido a la presencia de suelo de baja compacidad a 5 metros de profundidad la ladera analizada, presentando un riesgo de deslizamiento al tener un comportamiento permeable ante precipitaciones.

Según los antecedentes de estudio realizados por Inzunza, 2018 y los antecedentes aportados por la asistencia técnica realizada a través del SERNAGEOMIN, junto con los criterios de desplazamiento InSAR y el análisis subterráneo entregado por los resultados MASW, se concluye que la ladera del Cerro Renca analizada no presenta resultados que indiquen un riesgo inminente de remoción en masa en la zona. Sin embargo, los resultados del presente estudio dan cuenta de que esta área está activa, con movimientos de reptación particulares asociados al depósito y la presencia de suelo poco compacto, presumiblemente permeable generando un posible riesgo a largo plazo.

7. AGRADECIMIENTOS

El principal agradecimiento es hacia mis padres, principalmente mi madre la cual me dio la vida y la sabiduría para seguir siempre adelante en esta carrera profesional.

También agradezco a todos los profesores presentes en todo mi proceso educativo, con principal énfasis a mis profesoras guía.

Finalmente, agradezco a la empresa tutora de esta investigación EG-Sciences Ltda. la cual gentilmente facilitó parte de su equipo de trabajo e información bibliográfica para realizar las mediciones sísmicas en la zona de estudio.

8. REFERENCIAS

Lara, M. 2007. *Metodología para la evaluación y zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en la quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar el Grado de Magíster en Ciencias Mención Geología y Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología, 212 p.*

Varnes, D.J., 1978. *Slope movement types and processes. In Landslides, Analysis and Control, Special Report N°176. Schuster, R.L., Krizek, R.J., edits. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., p.11-33.*

Hauser, A. (2000, noviembre). *Remociones en masa en Chile. sernageomin.cl. Recuperado mayo de 2022, de https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RAR-002.pdf*

Vergara Zuñiga, L. A. (2015). *Relación entre las propiedades geológicas y geotécnicas de la cuenca de Santiago y los daños observados en el terremoto del 27 de febrero del 2010.*

Secretaría de comunicaciones y transportes Instituto mexicano de transporte, Gúzman, G., Quintana, J., Gasca, H., Carrión, F., Martínez, L., Hernández, J., Hernández, A., Valenzuela, J., & Anaya, M. (2020). *Análisis del potencial de tecnología satelital InSAR para el monitoreo de la infraestructura carretera (N.o 593).*

Data Search Vertex. NASA'S EOSDIS. <https://search.asf.alaska.edu/#/>.

OCSA Estudios Geofísicos. (2022). MASW. [ocsa-geofisica. https://www.ocsa-geofisica.com/masw.html](https://www.ocsa-geofisica.com/masw.html)

Park, C. B., Miller, R. D. & Xia, J. (1999). *Multichannel analysis of surface waves*. *Geophysics*, 64(3), pp. 800-808.

Suarez, L. E., Pando, M. A. & Ritta, R. (2012). *Ambient Vibration Measurements for Estimation of Site Fundamental Periods at the City of Mayagüez, Puerto Rico*. *University of Puerto Rico at Mayaguez*.

Park, C. B. (2005). *MASW-Horizontal resolution in 2-D shear-wave velocity (V_s) mapping*

Park, C. B. (2008). *Imaging dispersion of passive surface waves with active scheme*. Philadelphia

Auge, M, 2008. "Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea". *Área de Hidrogeología. Departamento de Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Apuntes de cátedra.*

Municipalidad de Choachí, & Martínez Campos, C. (2020). *Estudio geoelectrico en el municipio de Choachí para establecer zonas de susceptibilidad por riesgo de remoción en masa*. Bogotá, Colombia.

Universidad Católica de la Santísima Concepción, Navarro Flores, F., King St-Onge, R., & Muñoz Jensen, A. (2018, abril). *PROSPECCIÓN ELÉCTRICA PARA DETECCIÓN DE AGUA TERMAL EN ZONA DE LIQUIÑE, REGIÓN DE LOS RÍOS, CHILE*.

Zúñiga, F. (2019). *INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN MEDICIONES OBTENIDAS POR EL ENSAYO GEOFISICO MASW EN PAVIMENTO [Tesis]*. Universidad Católica de la Santísima Concepción.

S. Espinoza, A. Sotomayor, V. Vidal. (2022). *Evaluación de remoción en masa mediante Interferometría radar InSAR en el área Cerro Renca, Región Metropolitana, Chile*.

Highland, L.M., and Bobrowsky, Peter, 2008, *The landslide handbook—A guide to understanding landslides*: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.

Luis I. Gonzalez de Vallejo, Mercedes Ferrer, Luis Ortuno, Carlos Oteo *INGENIERIA GEOLOGICA. PEARSON EDUCACION, Madrid, 2002*

Hullica, W. (2020). *Procedimiento para la aplicación de prospección sísmica para los estudios de zonificación de los suelos en áreas urbanas [Tesis de grado]*. Instituto geofísico del Perú.

Inzunza, S. (2018). *Análisis para la gestión del riesgo de remoción en masa por deslizamiento en el flanco suroeste del cerro Renca, comuna de Renca, Chile*. www.geografia.uc.cl.