

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL SUELO, APLICANDO EL METÓDO DE NAKAMURA EN CALETA CHICA COCHOLGÜE, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.

C. Ulloa Opazo¹, A. Muñoz Jensen² y R. King St-Onge³

RESUMEN:

Los movimientos de remoción en masa se refieren intrínsecamente a procesos de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca, o ambas, en diversas proporciones, generadas por una serie de factores los cuales serán tratados con mayor profundidad a través de la siguiente investigación. Estos corresponden a procesos gravitacionales, en los que una porción del terreno se desplaza hasta una cota o nivel inferior a la original.

En este estudio se lleva a cabo un análisis de la estabilidad del suelo mediante datos de vibraciones ambientales, en el sector Caleta Chica de Cocholgüe, Región del Biobío. En esta localidad se han evidenciado históricamente; Procesos de Remoción en Masas (PRM), que ha sido causados por un lento deslizamiento de terreno.

Para indagar a fondo acerca de estos procesos y la estabilidad del lugar se seleccionó el método de Nakamura, el cual es económico y relativamente fácil de aplicar. Los resultados en esta investigación para las estaciones Papas, Portón y Terraza no cumplen con los criterios mínimos establecidos por los protocolos SESAME, en cambio la estación Barranco sí cumple con el mínimo de los criterios. Utilizando la frecuencia más representativa con respecto al contexto geológico se obtiene un periodo fundamental de 0,295s, lo que indica la existencia de suelos duros o roca próxima a la superficie del terreno. Esto es concordante con el tipo de falla observada (falla normal). Los criterios SESAME entregan recomendaciones importantes en todas las fases de este estudio para obtener resultados representativos y confiables.

PALABRAS CLAVES: SESAME; Estabilidad; Nakamura **ABSTRACT:**

Mass removal movements intrinsically refer to processes of slow or rapid mobilization of a certain volume of soil, rock, or both, in various proportions, generated by a series of factors which will be treated in greater depth through the following research. These correspond to gravitational processes, in which a portion of the land moves to a level or level lower than the original.

In this study, an analysis of soil stability is carried out using environmental vibration data in the Caleta Chica sector of Cocholgüe, Biobío Region. In this locality they have been evidenced historically; Mass Removal Processes (PRM), which has been caused by a slow landslide.

To investigate in depth about these processes and the stability of the place, Nakamura's method was selected, which is economical and relatively easy to apply. The results in this research for the Papas, Portón and Terraza stations do not meet the minimum criteria established by the SESAME protocols, while the Barranco station does meet the minimum of the criteria. Using the most representative frequency with respect to the geological context, a fundamental period of 0.295s is obtained, which indicates the existence of hard soils or rock near the surface of the land. This is consistent with the type of failure observed (normal failure). The SESAME criteria provide important recommendations in all phases of this study to obtain representative and reliable results.

KEYWORDS: SESAME; Stability; Nakamura

¹ Estudiante Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, culloa@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, andrea-munoz@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los movimientos en masa se refieren intrínsecamente a procesos de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca, o ambas, en diversas proporciones, generadas por una serie de factores. Corresponden a procesos gravitacionales, en los que una porción del terreno se desplaza hasta una cota o nivel inferior a la original (Araya, 2002).

Pueden ocurrir a mayor velocidad (flujos detríticos o de barro, deslizamientos, desprendimientos), debido a rupturas o fallas, cuando se excede la resistencia al corte del material, o a menor velocidad, como simples deformaciones superficiales (reptación, solifluxión), vinculadas a mecanismos climáticos como insolación, congelación y deshielo (Hauser, 1993).

En particular, Caleta Chica de Cocholgue ha sido afectada históricamente por un lento deslizamiento del terreno, cuya reactivación, con anterioridad al sismo ocurrido el 27 de febrero del 2010, se debería principalmente, a las condiciones de circulación de las aguas subterráneas y superficiales (Hauser, 1990; Naranjo et al., 2005). El grado de actividad y movimiento del deslizamiento de Caleta Grande es aparentemente menor al de Caleta Chica, lo que debe ser precisado con observaciones detalladas y monitoreo.

Al momento de abordar la temática sobre las vibraciones ambientales es importante saber que nos referimos al movimiento oscilante o la agrupación de vibraciones que impactan de manera constante al suelo, lo que implica una potencia, frecuencia y dirección características de las ondas sísmicas que viajan por los estratos del suelo correspondiente. En el presente informe se analizará la estabilidad de Caleta Chica, y es importante mencionar que no existe una manera específica de determinar la estabilidad, sino que se debe pasar por un proceso de varios ensayos, como por ejemplo ensayos de granulometría, humedad entre otros. No es posible obtener la estabilidad del suelo en un único ensayo, por lo que se decidió emplear el método de Nakamura y analizar mediante datos ambientales el cual será más especificado a medida que se va avanzando en el informe.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Ondas Sísmicas

El movimiento sísmico del suelo se genera mayoritariamente por ondas elásticas: ondas de cuerpo P y S, las cuales están involucradas con la actividad sísmica local y las ondas superficiales que pueden ser de dos tipos: ondas Rayleigh y ondas Love, la que se caracterizan por que su amplitud es máxima en la superficie y nula a grandes profundidades. (Bolt, 1999). Históricamente la observación de estas ondas ha sido realizada a través del estudio de sismogramas, desde Oldham (1900) quien identificó “movimientos preliminares” y “grandes ondas” en sismogramas de terremotos lejanos.

2.2 Vibraciones Ambientales

Las vibraciones ambientales consisten en un movimiento oscilante o conjunto de vibraciones que afectan de manera constante al suelo. Estas vibraciones son generalmente producidas por el funcionamiento industrial, tráfico de vehículos, vibraciones producidas por el viento que son introducidas en el subsuelo por árboles, edificaciones y las vibraciones causadas por el oleaje en el borde costero.

Estas fuentes son clasificadas de la siguiente manera (Terraproof, 2016):

- Bajas frecuencias (0.3 – 0.5 Hz): Provocadas por olas oceánicas a grandes distancias.
- Frecuencias intermedias (0.5 – 1 Hz): Relacionadas al viento.

- Altas frecuencias (> 1 Hz): Relacionada a la actividad humana e industrial.

2.3 Método de Nakamura

Para estimar la frecuencia o periodo fundamental de un suelo o su efecto de sitio propiamente dicho, uno de los métodos más conocidos y actualmente uno de los más utilizados es el Método de Nakamura (Nakamura, 2008), El método fue publicado por primera vez en 1989 en donde se propuso el uso de cocientes espectrales de las componentes horizontal y vertical de un registro de vibración ambiental donde se obtiene una señal compuesta (razón espectral H/V) si es que se cumplen las condiciones (Figura 1). Se utiliza la transformada de Fourier, la cual reúne todas las frecuencias existentes de un registro determinado de vibración ambiental y calcula un único espectro de frecuencias representativo.

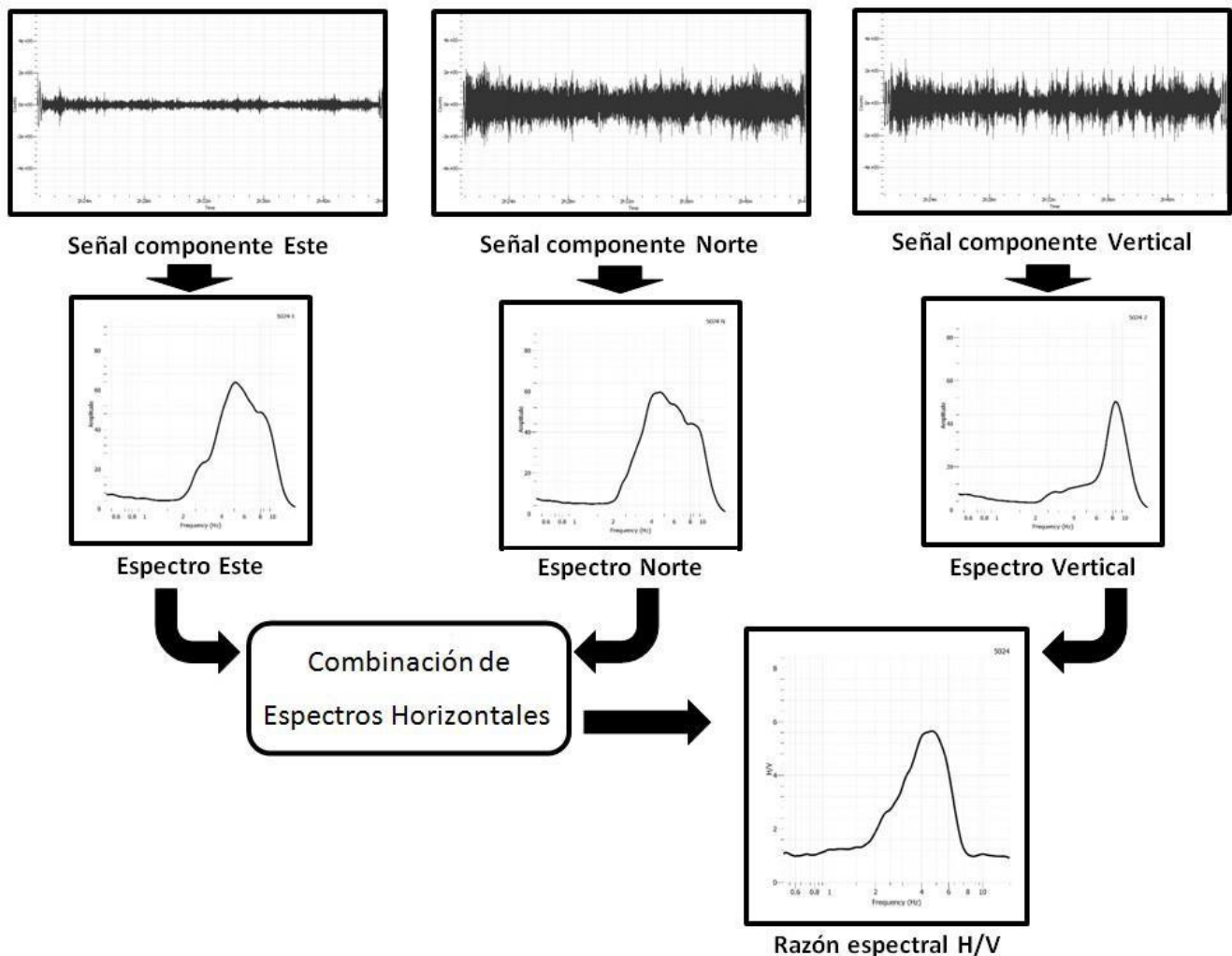


Figura 1: Esquema Creación Razón Espectral H/V. (Tomado de Pinto y Toledo, 2016).

2.3.1 Función de transferencia de la onda

La función de transferencia de la onda está compuesta por como se propaga la onda en el sedimento y en la roca o basamento, propagándose más lento en el sedimento que en el basamento. En general una función de transferencia es un modelo matemático que, mediante un cociente, relaciona la respuesta de un sistema a una señal de entrada. Para estimar la representatividad del método de Nakamura se propone una función de transferencia S_t (Ecuación 1):

$$S_t = H_B^H S \quad (1)$$

Donde:

H_s : Espectro horizontal del sedimento.

H_B : Espectro horizontal en el basamento.

A continuación, considerando que el movimiento vertical no se ve amplificado por los estratos superficiales, describiendo el efecto de la Onda Rayleigh E_s (Ecuación 2),

$$E_s = V_B^V S \quad (2)$$

Donde:

V_s : Espectro vertical en la superficie.

V_B : Espectro vertical en la base de la capa sedimentaria.

En el dominio del tiempo, una señal sísmica estocástica se puede definir como el resultado de la convolución entre las señales que la provocan. Si lo llevamos al dominio de las frecuencias, esta queda simplemente representada por la multiplicación de dichas señales.

Definiendo (*) como el operador de convolución, tenemos las Ecuaciones (3 y 4):

$$H_s = F_H * F_R * S \quad (3)$$

Y

$$H_B = F_H \quad (4)$$

Donde:

F_H : Ondas de Cuerpo (Fuentes Lejanas).

F_R : Ondas Rayleigh (Fuente Cercana).

S : Efecto de Sitio.

Nakamura (1989) supone una componente vertical superficial libre de efectos de sitio (Ecuación 5) y una componente vertical del basamento (Ecuación 6), tal como sigue:

$$V_s = F_V * F_R \quad (5)$$

$$V_B = F_V \quad (6)$$

Donde:

V_s : Espectro vertical en la superficie.

F_V : Ondas de Cuerpo polarizadas vertical (Fuentes Lejanas).

F_R : Ondas Rayleigh (Fuente Cercana).

V_B : Espectro vertical en la base de la capa sedimentaria.

Al deducir que las componentes superficiales horizontal y vertical del movimiento son afectadas por ondas Rayleigh en la misma medida, se plantea una función de efecto de sitio que cumpla con la siguiente Ecuación 7:

$$S_{TT} = s_s H_V \quad (7)$$

Se demuestra matemáticamente al resolver la Ecuación (7) que esta expresión es posible utilizar en el análisis, debido a que la función de transferencia coincide con el efecto del suelo (Ecuación 8).

$$S_{tt} = \frac{S_{HS}}{S_{VB}} = \frac{S_{HS}}{S_{HB} \cdot \frac{S_{VS}}{S_{VB}}} = R_B^R R_S \quad (8)$$

Donde:

R_S : Cociente espectral H/V en la superficie.

R_B : Cociente espectral H/V en el basamento.

Nakamura establece según observaciones que el espectro en roca es cercano a 1 indicando, $\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \approx 1$ es decir, las amplitudes de las componentes vertical y horizontal de los microtremores son similares en la base rocosa, De esta manera, su función de transferencia S_{tt} queda representada por la Ecuación 9:

$$S_{tt} = R_S \cdot \frac{1}{R_B} \approx R_B R_S \quad (9)$$

El Método de Nakamura no dispone de una base matemáticamente comprobada debido a que se encuentra fundamentado en ejemplos; tales como, estudios de terremoto, mediciones de vibraciones entre otros, en vista que el método no siempre funciona. Para que este funcione se debe asegurar una estratigrafía de tipo regular, estabilidad del suelo y cumplir con una serie de condiciones. Es por esta razón que la comunidad geocientista tomó la decisión de efectuar el proyecto, denominado SESAME.

El proyecto SESAME (Site EffectsS using AMbient Excitations) es una comisión europea que fue fundada en 2001 con el objetivo de abordar el tema de la reducción del riesgo sísmico en áreas urbanas. En 2004, SESAME publicó una guía para implementar el método de relación espectral H/V con ruido sísmico ambiental, que contiene procedimientos prácticos para la adquisición de datos in situ, el procesamiento y la interpretación de los resultados. Los criterios proporcionados por SESAME se centran en la fiabilidad de la curva H/V y el tipo de pico que presenta (Bard y SESAME-Team, 2004).

Para la medición del registro, cabe destacar que el manual es sólo una guía que entrega parámetros generales y que cada medición junto a sus análisis, se deben realizar considerando las características geológicas y geomorfológicas de los lugares estudiados.

Se debe considerar para la medición de registros lo siguiente:

Primeramente, realizar las mediciones y lograr una curva fiable para la confección de una microzonificación ('repetir tres mediciones por cada sector') seguir los pasos para el sensor y ubicarlos siempre directamente sobre el terreno evitando pendientes, terrenos blandos o saturación por lluvia. Se debe evitar tomar mediciones cercanas a edificios, árboles tuberías entre otros. Finalmente, para vientos > 5 m/s, se debe cubrir el sensor, en caso de lluvias fuertes no es posible tomar mediciones y si pasan autos u otros, se aumenta el tiempo de medición para poder eliminarlos estos ruidos antes de realizar el cálculo (Bard y SESAME-Team, 2004).

Antes del análisis de resultados, se deben cumplir primero con tres condiciones para asegurar que la curva obtenida de H/V es fiable (Pinto y Toledo, 2016).

1. Exige una cantidad mínima de ciclos significativos por ventana, que cumpla con la Ecuación 10:

$$f_0 > 10_{-lw} \quad (10)$$

2. Exige una condición mínima de ciclos significativos totales (Ecuación 11):

$$n_c(f_0) > 200 \quad (11)$$

Donde:

n_c : Número de ciclos significativos.

f_0 : Frecuencia Peak H/V

3. Exige que no exista mayor diferencia en amplitudes entre las componentes horizontales y la vertical, asegurando con esto que la señal analizada es proveniente de una fuente lejana y no local (Ecuación 12 y 13)

(octubre, 2022)

$$\sigma_A |f| < 2 \text{ para } 0.5 f_0 < f < 2f_0, \text{ Si } f_0 > 0.5\text{Hz} \quad (12)$$

$$\sigma_A |f| < 3 \text{ para } 0.5 f_0 < f < 2f_0, \text{ Si } f_0 < 0.5\text{Hz} \quad (13)$$

f : Frecuencia actual.

$\sigma_{A(f)}$: Desviación estándar de $A^H_{-v}(f)$.

Es necesario verificar que la curva es fiable y si se observan peak frecuenciales, asegurar que estos sean peak claros. Es por lo que el criterio se justifica por 6 condiciones, de las cuales mínimo 5 de estas deben ser cumplidas para ser clasificados como un peak claro y reconocer la frecuencia natural del suelo.

La primera (Ecuación 14) y segunda condición (Ecuación 15) hace referencia al rápido incremento y decaimiento que debe tener la curva, antes y después del peak frecuencial.

$$\exists f^- \in \left[\frac{f_0}{4}, f_0 \right] | AHV(f^-) < A \frac{0}{2} \quad (14)$$

$$\exists f^+ \in [f_0, 4 * f_0] | AHV(f^+) < A \frac{0}{2} \quad (15)$$

La tercera condición (Ecuación 16) solicita que la amplitud del peak frecuencial sea mayor a 2.

$$A_0 > 2 \quad (16)$$

La cuarta condición (Ecuación 17) solicita que exista una frecuencia con amplitud entre f_0 y la desviación estándar de la amplitud, que sea igual al peak frecuencial con un margen del 5%.

$$f_{Peak} [AHV(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5 \quad (17)$$

La quinta condición (Ecuación 18) está dada a que la desviación estándar del peak frecuencial debe estar dentro de un valor umbral, condicionado por esta misma frecuencia.

$$\sigma f < \varepsilon f_0 \quad (18)$$

Finalmente, la sexta condición (Ecuación 19) establece que la desviación estándar de la amplitud del peak fundamental debe estar dentro de un valor umbral, condicionado por esta misma frecuencia.

$$\sigma A(f_0) < \theta(f_0) \quad (19)$$

Donde:

f^- : Frecuencia entre $f_0/4$ y f_0 para que $AHV(f^-) < A \frac{0}{2}$

f^+ : Frecuencia entre f_0 y $4 * f_0$ para que $AHV(f^+) < A \frac{0}{2}$

$\sigma_A(f)$: Desviación estándar de $AHV(f)$

$\theta(f_0)$: Valor umbral para la condición de estabilidad $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

3. ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 Ubicación

El área de estudio (Figura 2) se encuentra en la comuna de Tomé ubicada a 32 km al norte de la ciudad de Concepción, en la Región del Biobío, con una superficie de 495 km². Dentro de sus límites comunales se localiza la Región de Ñuble, al noreste, las comunas de Penco y Florida, al sur, y la bahía de Concepción, al oeste (Figura 2A).

Cocholgue se emplaza en el borde costero de la comuna de Tomé, alrededor de 34 km al norte de la ciudad de Concepción; la caleta se segmenta en tres sectores: Villa Cocholgue, Caleta Chica y Caleta Grande.

La zona de estudio se encuentra situada en Caleta Chica, la cual esta representada con un polígono de color rojo en el mapa y las estaciones simbolizadas por un punto de diferente color respectivamente (Figura 2B).

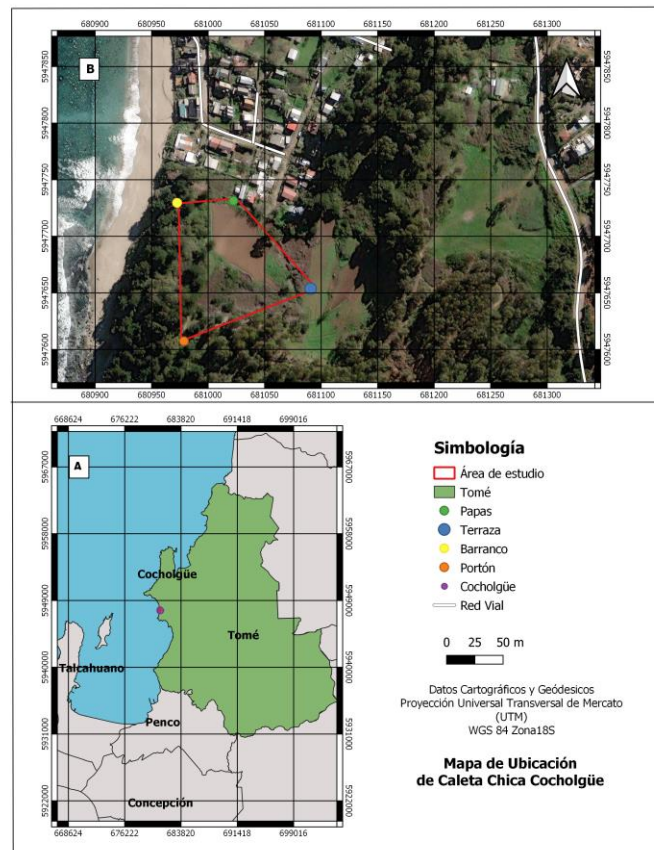


Figura 2: Ubicación zona de estudio. (A) Zona de estudio inserta en la Región de Biobío. (B) Mapa de las Comunas con la ubicación C. Elaboración propia mediante el software QGIS v. 3.10.2

3.2 Antecedentes Geológicos

3.2.1 Geología

En la zona de estudio (Figura 3) se reconoce el Basamento metamórfico correspondiente a la serie oriental (Pzb), se caracteriza por una franja de bajo P/T (facies de esquistos verdes a granulito inferior) constituida principalmente por metapsamitas y metapelitas, pizarras, filitas y esquistos, además de rocas calcosilicatadas y migmatitas en menor medida (Vásquez, 2001). El protolito de esta serie corresponde a una secuencia detrítica de origen terrígeno, asociada al contexto de zona de plataforma de antearco (Hervé, 1988).

La Formación Quiriquina (Krq) (Biró-Bagoczky, 1982), corresponde a una secuencia sedimentaria marina fosilífera, cuya localidad tipo se encuentra en la bahía Las Tablas ubicada en Isla Quiriquina y su parlocalidad tipo en el sector costero de Cocholgue. La Formación Quiriquina (Krq) sobreyace en inconformidad al basamento cristalino e infrayace en paraconformidad a las secuencias sedimentarias del Paleógeno y del Cuaternario (Salazar, 2004; Buatois y Encinas, 2011).

Se presentan rocas de la Formación Quiriquina compuesta por areniscas de grano fino a medio, de color verde y pardo y niveles conglomeráticos. En esta Formación, se evidencia la presencia de abundantes fósiles, principalmente dentro de concreciones (Quinzio et al., 2011; Biró, 1982).

La Formación Cosmito (Ttc) definida por Galli (1967) en la Estación de Ferrocarril Cosmito, ubicada a 5 km al Norte de Concepción. Su litología consiste en lutitas, areniscas pardas de granulometría fina a gruesa con estratificación cruzada, conglomerados y mantos de carbón, las cuales están levemente inclinadas. Sus mejores afloramientos se encuentran en Villa Cocholgue, entrada a Cocholgue.

La zona de estudio se reconoce la cobertura cuaternaria compuesta por los depósitos litorales y los depósitos fluviales, en relación con los primeros mencionados se encuentran constituidos por arenas blancas a grises con alto contenido de cuarzo y feldespatos, ubicadas en el sector de la playa; también destacan depósitos de movimientos en masa con actividad cuaternaria y reciente (Alfaro y Sepúlveda, 2018). En cuanto a los depósitos fluviales (Qft), corresponden a depósitos fluviales de ríos y esteros, y de sus terrazas y llanuras de inundación: limo, arenas y gravas.

3.2.2 Geomorfología y geología estructural

En Cocholgue, se puede observar la presencia de rasgos geomorfológicos de menor orden los cuales han afectado de forma parcial o total a las planicies litorales, destacando entre estos la presencia de varios niveles de terrazas de erosión marina (Börgel, 1983). Las terrazas de erosión marina en el sector se caracterizan por ser extensas y relativamente discontinuas, debido a la presencia de numerosas quebradas profundas que las disectan principalmente en forma perpendicular a la línea de costa, sumado a la presencia de escollos rocosos, del acantilado costero, embahamientos causados por diferencias litológicas y a la presencia de la plataforma de erosión actual (Cuevas, 2012).

La zona Caleta Chica presenta laderas donde destacan las de tipo cóncavas, las cuales favorecen la acumulación de aguas lluvias y del material debido a la erosión y se observan fallas normales en el área de estudio (figura 3) la cual afecta la confiabilidad de los resultados H/V.

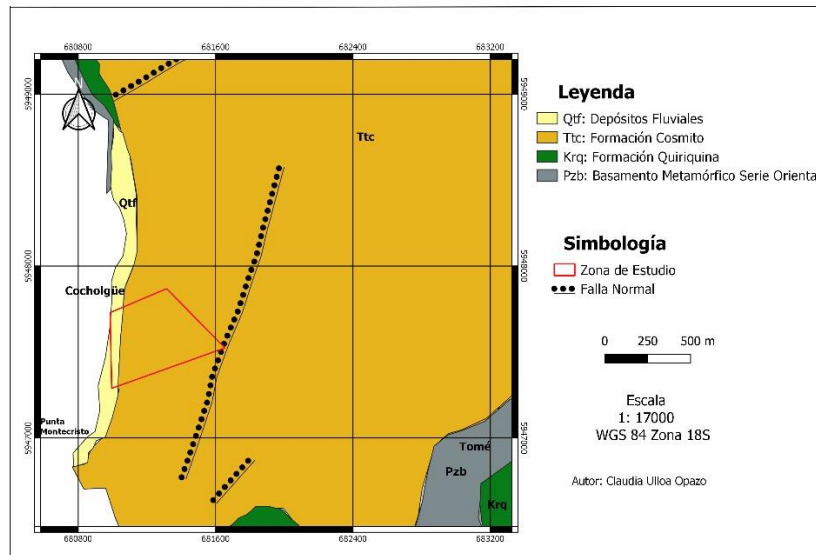


Figura 3: Mapa geológico de la zona de estudio. Fuente: Elaboración Propia mediante el software QGIS v. 3.10.

3.3 Estudios previos de riesgos

El mapa de la Figura 4, muestra una evaluación preliminar del grado de peligro por remociones en masa en las caletas de Cocholgüe. El mapa presenta una zonificación del peligro y puede ser la base para la toma de decisiones respecto a la planificación territorial. Medidas de mitigaciones específicas, apropiadas para cada zona, deben ser evaluadas con estudios técnicos detallados.

En relación con el terremoto del 27 de febrero del 2010 (MW 8,8), los efectos observados en la caleta de Cocholgüe son debido a lo siguiente expuesto:

“Las viviendas de las caletas de Cocholgüe están esencialmente construidas sobre grandes depósitos de remociones en masa del tipo rotacional que ocurrieron, posiblemente, durante el Holoceno” (Hauser, 1990), y cubren casi la totalidad del área habitada de ambas Caletas (Chica y Grande). Estos deslizamientos son parte de un conjunto de remociones en masa, con distinto grado de actividad, que afectan el borde costero desde Playa Cocholgüe hasta Playa Blanca, hacia el norte cerca de Coliumo, lo que debe ser considerado en la planificación de nuevos asentamientos y en la reubicación de la población.

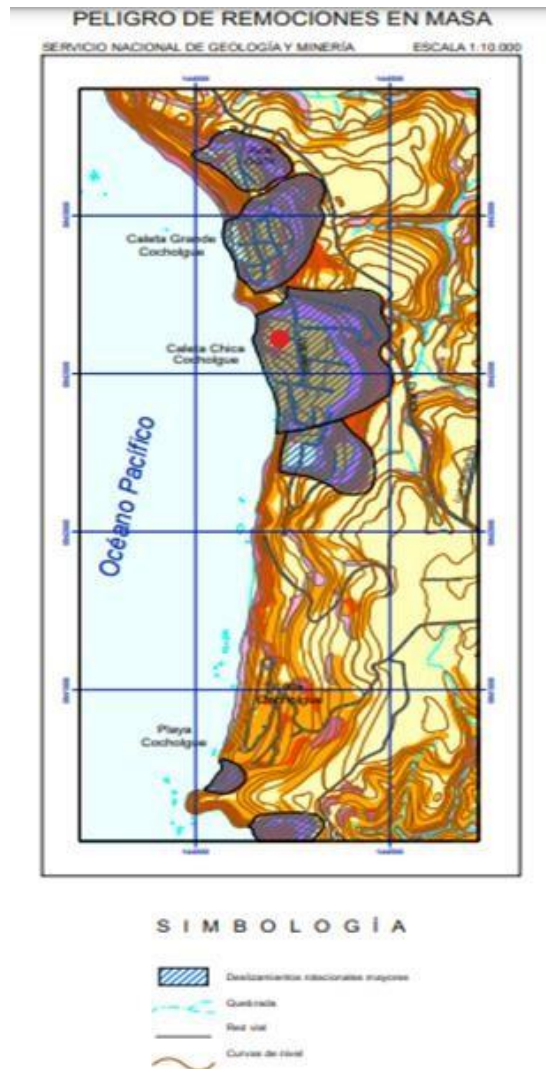


Figura 4: Mapa peligro de remoción en masa, el punto rojo señala la zona de estudio. (Modificado de Fernández et al., 2011.)

En particular, Caleta Chica de Cocholgue ha sido afectada históricamente por un lento deslizamiento del terreno, cuya reactivación, con anterioridad al sismo, se debería principalmente, a las condiciones de circulación de las aguas subterráneas y superficiales (Hauser, 1990; Naranjo et al., 2005). El grado de actividad y movimiento del deslizamiento de Caleta Grande es aparentemente menor al de Caleta Chica, lo que debe ser precisado con observaciones detalladas y monitoreo. Producto el sismo del 27 de febrero de 2010 y sus consecuentes réplicas, un número significativo de viviendas incrementó los daños estructurales que ya presentaban como consecuencia de la reactivación del deslizamiento del terreno. Es importante mencionar que los muros de contención costeros se deformaron y se produjeron grietas en el camino de la variante de acceso (actualmente en uso), la calle de acceso y patios del colegio y en otros sectores cercanos. Las grietas tienen un desplazamiento máximo de 10 y 30 cm en los planos horizontal y vertical, respectivamente. Cabe señalar que el sismo provocó remociones en masa, del tipo caída de roca, de grandes proporciones que dejó inutilizable el camino principal de acceso (bypass) al sector de Cocholgue y solo permite el uso de la variante de acceso a la Caleta Grande. Asimismo, se formaron grietas de tracción detrás del escarpe principal, de alrededor de 20 m de largo, y de 12 cm y 15 cm de

desplazamiento horizontal y vertical, respectivamente (SERNAGEOMIN, 2010) La caída de bloques de areniscas, de tamaños métricos, revela la mala calidad geotécnica de estas rocas y el inminente peligro al que está expuesta la comunidad.

Según (Fernández et al., 2011), no existen evidencias de que un sector en sus inicios posea un periodo fundamental del suelo y luego de producirse un terremoto que provoque procesos de remoción, este valor sea modificado.

4.METODOLOGÍA

4.1 Etapa de Gabinete

En primera instancia se realizó la recopilación de información y antecedentes para la zona de estudio, analizando mapas, cartas geológicas, material bibliográfico, entre otros.

La información compilada abarca información sobre ondas sísmicas, vibraciones ambientales, estabilidad, método de Nakamura, criterios SESAME, ubicación de la zona de estudio, antecedentes geológicos y remoción en masa.

Esta información es analizada con la finalidad de encaminar el estudio con mayor detalle en la etapa de terreno situando los puntos más importantes y considerarlos al momento de caracterizar los procesos efectuados en la zona.

4.2 Etapa de Terreno

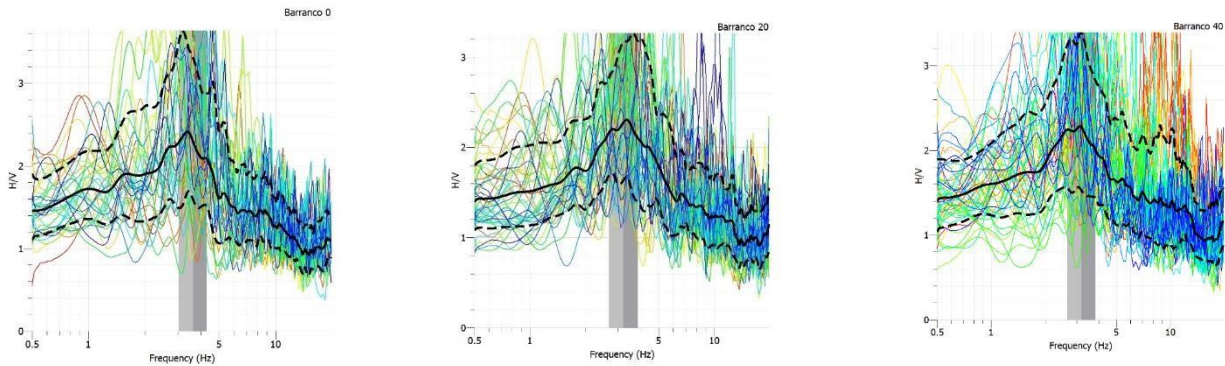
Se realizaron mediciones en la Caleta Chica de Cocholgüe, específicamente en 4 puntos denominados Papas, Terraza, Barranco y Portón, situadas en las coordenadas en la Tabla 1. Los datos fueron facilitados para el análisis de este informe, los cuales fueron registrados durante el mes de noviembre del año 2019.

Tabla 1: Coordenadas de los puntos medidos. (Elaboración propia).

| Puntos | Coordenadas | |
|----------|---------------|---------------|
| | Latitud | Longitud |
| Papas | 36°35'55.52"S | 72°58'34.38"O |
| Terraza | 36°35'57.97"S | 72°58'31.50"O |
| Barranco | 36°35'55.62"S | 72°58'36.35"O |
| Portón | 36°35'59.57"S | 72°58'35.96"O |

4.3 Análisis de Datos

El procesamiento de datos de los HVSR es ejecutado en el software Geopsy, para analizar el registro de vibraciones, es decir, estudiar cómo se mueve cada uno de los sensores en el tiempo. Este análisis se inicia con un primer filtro, donde se eliminan todos los eventos que salen del umbral definido por el ruido ambiental,



i.

ii.

iii.

Figura 8: Gráficos H/V vs Frecuencia de mediciones realizadas en Estación 2: Barranco i) Medición realizada entre 00:00 y 20:00 minutos, ii) Medición realizada entre 20:00 y 40:00 minutos, iii) Medición realizada entre 40:00 y 60:00 minutos.

5.2 Criterios SESAME

El primer requisito, antes cualquier interpretación, se refiere a la fiabilidad de la curva H/V. La fiabilidad implica representatividad, es decir, que la curva H/V real obtenida con los registros seleccionados, sea replicable a través de las curvas H/V que podrían obtenerse con otros registros de vibraciones ambientales y/o con otra selección de ventana físicamente razonable.

En primer lugar, se tienen que cumplir tres condiciones para que la curva H/V obtenida sea considerada como fiable; la primera exige una cantidad mínima en ciclos por ventana, la segunda una cantidad mínima en ciclos en el tiempo total de medición y la tercera que no exista una mayor diferencia entre las amplitudes de los espectros horizontales y vertical.

Como se aprecia en la Tabla 2, todas las mediciones cumplen estas condiciones.

Tabla 2. Resumen de criterios SESAME para confiabilidad de las curvas en las mediciones de las diferentes estaciones. (Papas, Portón, Terraza y Barranco). Fuente: Elaboración propia.

| | Condición | Papas 0 | | Condición | Papas 20 | | Condición | Papas 40 |
|------------------------|-----------|---------|------------------------|-----------|----------|------------------------|-----------|----------|
| Curva Confiable | I | SÍ | Curva Confiable | I | SÍ | Curva Confiable | I | SÍ |
| | II | SÍ | | II | SÍ | | II | SÍ |
| | III | SÍ | | III | SÍ | | III | SÍ |

| | Condición | Portón 0 | | Condición | Portón 20 | | Condición | Portón 40 |
|------------------------|-----------|----------|------------------------|-----------|-----------|------------------------|-----------|-----------|
| Curva Confiable | I | SÍ | Curva Confiable | I | SÍ | Curva Confiable | I | SÍ |
| | II | SÍ | | II | SÍ | | II | SÍ |
| | III | SÍ | | III | SÍ | | III | SÍ |

| | Condición | Terraza 0 | | Condición | Terraza 20 | | Condición | Terraza 40 |
|------------------------|-----------|-----------|------------------------|-----------|------------|------------------------|-----------|------------|
| Curva Confiable | I | SÍ | Curva Confiable | I | SÍ | Curva Confiable | I | SÍ |
| | II | SÍ | | II | SÍ | | II | SÍ |
| | III | SÍ | | III | SÍ | | III | SÍ |

| | Condición | Barranco 0 | | Condición | Barranco 20 | | Condición | Barranco 40 |
|------------------------|-----------|------------|------------------------|-----------|-------------|------------------------|-----------|-------------|
| Curva Confiable | I | SÍ | Curva Confiable | I | SÍ | Curva Confiable | I | SÍ |
| | II | SÍ | | II | SÍ | | II | SÍ |
| | III | SÍ | | III | SÍ | | III | SÍ |

Al estar aprobadas las curvas de H/V vs Frecuencia, se continúa con la identificación de un peak claro dentro de estas, en donde, de un total de 6 condiciones según el criterio SESAME, 5 al menos deben cumplirse para aceptar un resultado de f_0 (Tabla 3).

Tabla 3: Resumen de criterios SESAME para identificar un peak claro en las mediciones de las diferentes estaciones. Fuente: Elaboración propia

| Papas | Tiempo | Condición 1 | Condición 2 | Condición 3 | Condición 4 | Condición 5 | Condición 6 |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Medición 1 | 00:00-20:00 | No | No | No | No | No | No |
| Medición 2 | 20:00-40:00 | No | Si | No | Si | Si | No |
| Medición 3 | 40:00-60:00 | Si | No | No | Si | Si | Si |

| Portón | Tiempo | Condición 1 | Condición 2 | Condición 3 | Condición 4 | Condición 5 | Condición 6 |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Medición 1 | 00:00-20:00 | No | No | No | Si | No | No |
| Medición 2 | 20:00-40:00 | No | No | No | No | No | Si |
| Medición 3 | 40:00-60:00 | Si | Si | No | Si | No | Si |

| Terraza | Tiempo | Condición 1 | Condición 2 | Condición 3 | Condición 4 | Condición 5 | Condición 6 |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Medición 1 | 00:00-20:00 | No | No | No | No | No | No |
| Medición 2 | 20:00-40:00 | No | No | No | No | No | No |
| Medición 3 | 40:00-60:00 | No | No | No | No | No | No |

| Barranco | Tiempo | Condición 1 | Condición 2 | Condición 3 | Condición 4 | Condición 5 | Condición 6 |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Medición 1 | 00:00-20:00 | Si | Si | Si | Si | Si | Si |
| Medición 2 | 20:00-40:00 | Si | Si | Si | Si | Si | Si |
| Medición 3 | 40:00-60:00 | Si | Si | Si | Si | Si | Si |

Para el análisis de peak claro o definido, se efectúa la evaluación de los criterios SESAME para cada estación. En particular en este caso como se presenta en la Tabla 3, sólo la estación denominada Barranco cumple con los criterios SESAME, por lo que se obtiene los valores de frecuencia y periodo fundamental del suelo, en relación con el resto de las estaciones al no cumplir los criterios, no es posible obtener dichos los parámetros anteriormente mencionados

En la (Tabla 4), se presentan los valores de frecuencia fundamental f_0 (Hz), entregadas por las curvas H/V, relacionándose con el periodo fundamental T_0 (s), mediante la fórmula $f_0=1/T_0$.

Tabla 4: Frecuencia Fundamental y Periodo en la estación Barranco.

| F0 (Hz) | To (s) | Estación |
|---------|--------|----------|
| 3,380 | 0,295 | Barranco |

6. FACTORES DE INFLUENCIA

Para el caso de esta investigación, la curva de confiabilidad cumple para las cuatro estaciones estudiadas por lo que se continua con la evaluación del peak claro o definido. Para este caso los resultados obtenidos no fueron concluyentes dado que la mayoría de las estaciones estudiadas no cumplieron los criterios mínimos, por lo que sólo la estación denominada Barranco cumple; por este mismo motivo se optó visitar la zona de estudio e identificar cuales serían los factores que influirían en los resultados obtenidos de las curvas H/V.

Se debe destacar que el día anterior a la visita hubo muchas precipitaciones en la zona, ocasionado una alteración en las propiedades del suelo y mayor saturación, por lo que no es posible acceder a los cuatro puntos estudiados, pero sí fue posible apreciar las estaciones Papas, Barranco y Terraza.

La primera mencionada es una zona en donde el suelo se encuentra tratado debido a que se realiza siembra de papas (Figura 10 A), por lo que al efectuar un aplanamiento del suelo y el arado se genera alteraciones en los resultados geofísicos, posiblemente siendo una de las razones por lo que los resultados obtenidos no cumplen con los criterios y afectan en las mediciones. Para el caso de Barranco se optó por tomar una muestra del suelo (Figura 9) y realizar una prueba de plasticidad, por lo que se observa que es un suelo de tipo arcilla expansiva con alta plasticidad; Este tipo de suelo tiene una respuesta sísmica bastante particular debido a que no siempre se comportan mecánicamente de la misma forma ya que son suelos impermeables, es decir tienen un patrón irregular y con procesos de remoción en masa influye en la estabilidad y en la propagación de las ondas sísmicas (Trujillo, 1986).



Figura 9: Muestra de suelo con evidencia de alta plasticidad.

Adicionalmente, en la estación Barranco se observa una ladera con bastante vegetación (figura 10B) la cual es importante considerar para eventos de remoción en masa, debido que este ejerce un efecto protector en la ladera mientras que por otro lado contribuyen a un potencial de inestabilidad de la pendiente (Henríquez, 2019). En el lugar se observó falla de tipo normal, por ello se debe considerar que la presencia de una falla afecta la confiabilidad de los resultados H/V y por tanto aumenta el rango de error en el periodo fundamental calculado, lo que podría contrarrestarse realizando una mayor cantidad de mediciones con un aumento en el tiempo de registro, con la finalidad de obtener una mayor base de datos.

Para el caso de la estación Terraza el suelo se encontraba muy irregular e inestable presentando grietas por lo que estas características pueden alterar los resultados obtenidos. Finalmente, los árboles muy altos pueden

intervenir en los registros ambientales de manera desfavorable, ocasionando por el viento que sopla durante el tiempo de grabación vibraciones adicionales, especialmente en el caso de condiciones de grabación no óptimas.

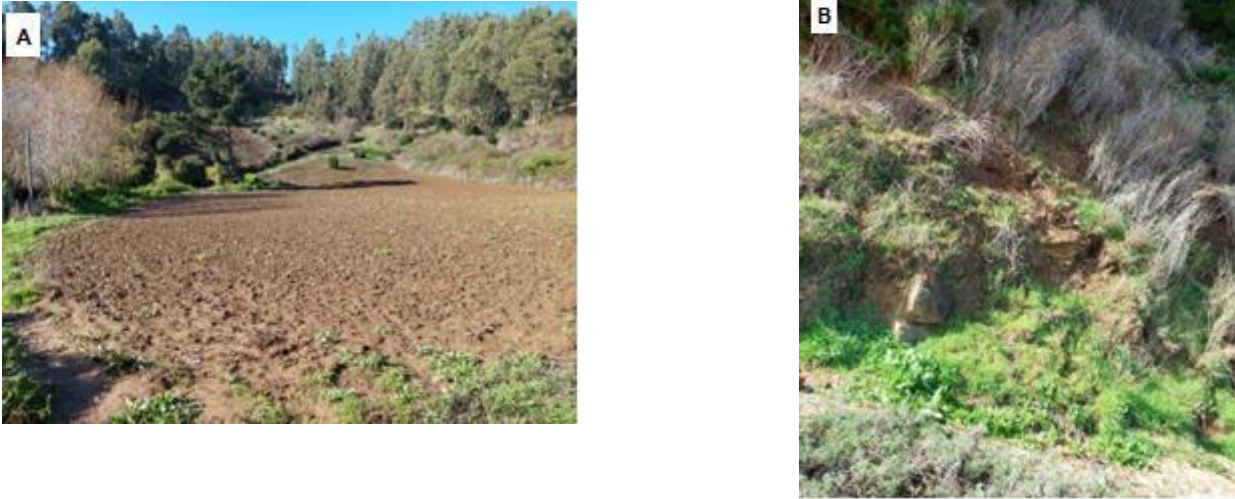


Figura 10: (A) Estación Papas evidencia de suelo tratado para la siembra de papas. (B) Estación Barranco, Ladera con bastante vegetación.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio efectuado tuvo por objetivo analizar la estabilidad del suelo mediante datos ambientales aplicando el método de Nakamura. Para ello fueron evaluadas cuatro estaciones, correspondiente a la Caleta Chica en Cocholegüe, Según el criterio SESAME, las mediciones deben cumplir tres condiciones para confirmar que las curvas obtenidas son confiables. Todos los registros analizados en esta investigación cumplen con las tres condiciones. Pero, la verificación para obtener un peak claro exige cumplir con 5 de 6 criterios, en este estudio sólo una estación cumple con los criterios, correspondiente a la estación Barranco, se obtiene un periodo fundamental de 0,295 s. Mientras que las otras tres estaciones, Papas, Terraza y Portón no cumplen con los criterios mínimos que se exigen, por lo que no es posible obtener un periodo fundamental.

En base con los resultados obtenidos el suelo de Caleta chica y en respuesta con el objetivo de esta investigación, se concluye que la zona de estudio presenta un suelo muy poco estable, esto es porque existen 3 estaciones que evidentemente no fue posible obtener un periodo fundamental del terreno y en cuanto a la estación Barranco, a pesar de obtener un periodo fundamental, las características del tipo de suelo que se encuentra en la zona carece bastante de estabilidad y por tanto puede afectar a eventuales eventos geológicos, tales como sismos, remoción en masa, entre otros.

Por lo expuesto en esta investigación, en la zona de estudio se aprecian fallas normales, por lo que, se debe considerar que la presencia de una falla afecta la confiabilidad de los resultados H/V y por tanto aumenta el rango de error en el periodo fundamental calculado, lo que podría contrarrestarse realizando una mayor cantidad de mediciones con un aumento en el tiempo de registro, con la finalidad de obtener una mayor base de datos.

El valor de dicho periodo se relaciona con el espesor del suelo, la naturaleza de tales suelos y de la profundidad del substrato rocosos (Velocidad de Onda S), por lo que los factores que intervienen son la geología, geofísica y geotecnia. Por esto necesario aplicar en conjunto el método de Nakamura H/V y ReMi, los que al complementarse permiten la obtención de los principales parámetros para la caracterización del sitio, Vs30,

Período fundamental de Resonancia, Potencial de licuefacción, entre otros de manera más precisa. Una vez obtenido el Vs30, se clasifica el suelo y se continua con la caracterización del suelo mediante la aplicación de la geotecnia. En concordancia con lo anterior se aumenta la confiabilidad y efectividad de los resultados.

Las recomendaciones establecidas por el criterio SESAME son una buena forma de adquirir resultados representativos de la zona en estudio, ya que en general señala las condiciones óptimas para adquirir datos y resultados confiables. En el caso de los criterios para una curva confiable y un peak definido, pueden o no cumplirse a cabalidad, pero esto no significa que el resultado sea correcto o no. La confiabilidad del resultado dependerá mucho de las condiciones en terreno, donde fueron medidos los datos, y también del análisis en software. Frente a esto, y para cumplir en su totalidad el criterio es aconsejable efectuar mediciones de noche, donde se captan menores perturbaciones en la señal.

A pesar de sus limitaciones, el método de Nakamura es una herramienta muy útil y eficaz para la microzonificación y los estudios de respuestas del sitio. Cabe mencionar que esta técnica es más eficaz para estimar la frecuencia natural de los terrenos blandos cuando hay un gran contraste de impedancia con la roca madre subyacente.

Se recomienda enfáticamente que antes de planificar una salida a terreno para la medición de las vibraciones ambientales, se debe realizar un estudio geológico local, especialmente en los depósitos cuaternarios, porque estos son depósitos relativamente recientes, por ende, no han sufrido grandes procesos de compactación y son más propensos a sufrir procesos de remoción en masa (PRM). La interpretación de los resultados H/V mejora enormemente cuando se combina con la información geofísica, geológica y geotécnica de la zona a estudiar (Acerra et al.,2004).

Para establecer una relación más precisa entre la geología local y las frecuencias fundamentales de las estaciones es necesario realizar un estudio de campo para verificar la geología del lugar en vista que el mapa utilizado corresponde a un mapa georreferenciado que sirve como primera referencia comparativa. Los efectos del sitio asociados con las condiciones geológicas locales constituyen una parte importante de cualquier evaluación del peligro sísmico. Muchos ejemplos de consecuencias catastróficas de los terremotos han demostrado la importancia de procedimientos y técnicas de análisis fiables en evaluación del peligro de terremotos y en las estrategias de mitigación del riesgo de terremotos. Se han propuesto registros de vibraciones combinados con la técnica de relación espectral H/V para ayuda en la caracterización de los efectos locales del sitio (SESAME,2004).

8. BIBLIOGRAFÍA

Acerra, C., Aguacil, G., Anastasiadis, A., Atakan, K., Azzara, R., Bard, P. Y., & Zacharopoulos, S. (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. European Commission.

Alfaro, A.; Sepúlveda, N. (2018). Informe técnico por peligro de remociones en masa, sector Caleta Cocholgüe, Comuna de Tomé, Región del Bío Bío. Servicio Nacional de Geología y Minería. INF-BIOBÍO-01.

Araya Vergara, J. 2002. Apuntes de Cátedra de Geomorfología. Escuela de Geografía. Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Bard P., y SESAME-Team. (2004). Guidelines for the implementation for the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations-measurements, processing and interpretations, SESAME European research project EVG1CT-2000-00026, Recuperado de <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr>.

Biró, L. (1982) Revisión y redefinición de los “Estratos de Quiriquina”, Campaniano-Maastrichtiano, en su localidad tipo en la Isla Quiriquina, 36°35’S, Chile, Sudamérica, con un perfil complementario en Cocholhue. Congreso Geológico Chileno, Concepción, Vol. 3, 29-64.

Bolt, B. A. (1999). Earthquakes. W.H. Freeman, San Francisco, pp. 309.

Börgel, R. (1983). Geomorfología de Chile, Tomo II. Colección Geográfica de Chile. Santiago. Instituto Geográfico Militar de Chile.

Buatois, L. A., & Encinas, A. (2011). Ichnology, sequence stratigraphy and depositional evolution of an Upper Cretaceous rocky shoreline in central Chile: Bioerosion structures in a transgressed metamorphic basement. *Cretaceous Research*, 32(2), 203-212.

Cuevas, M. (2012). Susceptibilidad de remoción en masa, caleta Cocholgue, comuna de Tomé. Memoria para optar al título de Geógrafo, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

Cuadra Monreal Pilar. (2007). Tesis: Aplicación de Técnicas de Vibraciones Ambientales: Análisis de Microtremores y vibraciones naturales, para la caracterización de sitio. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.

Fernández, J.; Falcón, M.F.; Venegas, C.; Arenas, M. 2011. Evaluación preliminar de peligros geológicos: Área Caletas de Cocholgue, Región del Biobío. Mapa 11-1: Peligro de remociones en masa. In *Geología para la reconstrucción y la gestión del riesgo en la Región del Biobío* (2012). Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-12 p., 35 mapas diferentes escalas. Santiago.

Galli, C. (1967). Geología Urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcahuano. Informe final del proyecto de investigación N°75. Comisión de Investigación Científica de la Universidad de Concepción.

Hauser, A. (1990). Informe Geológico “*Estudio Geológico – Geotécnico en relación con Procesos de deformación del terreno en Caleta Chica de Cocholgue, VIII Región*”. Informe Inédito, Servicio Nacional de Geología y Minería, 23p.

Hauser, A. 1993. Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería – Chile. 75 p. Santiago de Chile.

Henríquez, E. (2019). “Análisis de Susceptibilidad a Remociones en Masa en la comuna de Corral, al Norte de los 39°54’S, Región de los Ríos, Chile”. Tesis de pregrado. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

Hervé, F. (1988). Late Paleozoic subduction and accretion in Southern Chile. *Episodes Journal of International Geoscience*, 11(3), 183-188.

Naranjo, J. A., Clavero, J., Hauser, A., Ramírez, P., 2005. Informe geológico sobre las remociones en masa causadas por las lluvias torrenciales de los días 26 y 27 de junio 2005 en Concepción, VIII Región. Informe Inédito, Servicio Nacional de Geología y Minería, 26 p.

- Nakamura, Y. (1989).** A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Report Railway Tech. Research Institute. Vol. 30, pp. 25-33.
- Nakamura Yutaka, (2008).** “Characteristics H/V spectrum”, Instituto de Tecnología, Tokio, Japón.
- Muñoz, (2021).** Apuntes utilización del software Geopsy para el análisis de datos, Concepción, Chile.
- Oldham, R.D. (1900).** On the propagation of earthquake motion to great distances, Phil. Trans. R. Soc., ser. A, 194, 135-174.
- Pinto, C., y Toledo, V. (2016).** Utilización del Método de Nakamura para la Caracterización Sísmica de los Suelos en la Ciudad de Temuco. (Trabajo para optar al título de ingeniero constructor. Universidad de la frontera. Facultad de ingeniería y ciencias, Chile).
- Quinzio, A.; Bonilla, R.; González, A. (2011).** *Geology of the coastal range, Biobío region, Chile. Poster, 2nd Latin American Colloquium LAK, Heidelberg.*
- Salazar, C. (2004).** Ammonites del Maastrichtiano de la Formación Quiriquina, VIII Región del Bío-Bío, Chile: sistemática, bioestratigrafía y afinidades paleobiogeográficas. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- SESAME (2004).** Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations: Measurements, Processing and Interpretation (pp. 1-62). SESAME European Research Project WP12.
- Terraproof, (2016).** “Método de Nakamura-HVSR: Horizontal Vertical Spectral Ratio”, <http://www.terraproof.cl/servicios/hvst/>. Chile. Visitada en Enero de 2016.
- Trujillo, A. D. (1986).** *Influencia de la trayectoria de las tensiones en el comportamiento de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno* (Doctoral dissertation, Universidad de Sevilla).
- Ulloa, R. (2018).** “Aplicación del método de Nakamura H/V, para estudiar el riesgo sísmico en la zona comprendida por el despliegue de estaciones IMAD”. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas.
- Valderrama, G. (2020).** “Aplicación del método Nakamura H/V, para el estudio de sedimentos lacustres en la población Vergara, Viña del Mar, Chile”. Universidad Andrés Bello. Facultad de ingeniería.
- Vásquez, P. (2001).** Petrología y geotermobarometría del basamento metamórfico de la Cordillera de la Costa de Chile, entre los 36°30’S y 38°00’S. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito).