



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**MOVIMIENTO DE TERRENO EXTREMOS Y SU RELACIÓN CON EL EFECTO DE LA
INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA**

POR

Joaquín Antonio Barría Villablanca

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Gonzalo Montalva

Octubre de 2022
Concepción, Chile.
© 2022 Joaquín Antonio Barría Villablanca

© 2022 Joaquín Antonio Barría Villablanca

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

La Interacción Suelo Estructura (ISE) puede inducir variaciones a un registro sísmico capturado por un acelerómetro “cercano” a estructuras, contaminando el contenido de frecuencias, por lo que el análisis de las causas se torna relevante y es de total interés para mejorar el entendimiento de los movimientos sísmicos. En el contexto nacional, los estudios son escasos o poco significativos para identificar y catalogar la posible presencia de ISE, de estaciones sísmicas ubicadas cercanas a estructuras. Sin embargo, el comportamiento de una estructura frente a un evento sísmico es de constante investigación, distintos autores aseveran que la ISE produce que la onda sísmica registrada al interior de una edificación sea distinta a la registrada a campo libre. Es relevante investigar si estos efectos se evidencian en acelerómetros ubicados contiguos a estructuras, ya que estos registros son utilizados en análisis de ingeniería sísmica como análisis estructurales, normas de diseño estructural, peligrosidad sísmica o modelos predictivos de movimiento del suelo, entre otros.

Esta investigación pretende identificar la potencial presencia de ISE para los registros del Terremoto de Iquique del 2014 ($M_w=8.2$), en dos estaciones sísmicas, T05A y T06A, a través de la caracterización dinámica de las edificaciones cercanas y del sitio, mediante la medición y procesamiento de datos de vibración ambiental, aplicando el método HVSR (por sus siglas en inglés; *horizontal to vertical spectral ratio*) y HHSR (por sus siglas en inglés; *horizontal to horizontal spectral ratio*), además del análisis rotacional. Se alinea la dirección de movimiento de las edificaciones en sus modos de vibración con las pseudo aceleraciones rotadas del registro sísmico, en busca de variaciones no atribuibles a la matriz de suelo.

Se concluye que los modos principales de vibración de edificios de gran envergadura, es decir, con dos o más pisos de altura y sistema estructural con base a muros de hormigón armado, alteran el contenido de frecuencias del registro de una estación sísmica contigua a edificaciones. Esto modifica y da forma a las pseudo aceleraciones rotadas, tanto en la orientación de los ejes principales de la estructura como en su dirección de oscilación, comprobando la presencia de Interacción Suelo Estructura (ISE), para el registro de las estaciones sismológicas T05A y T06A del Terremoto de Iquique. Es así como, los efectos de la ISE en estaciones sísmicas ubicadas sobre suelos rígidos son directamente proporcionales a la masa del edificio e inversamente proporcionales a la distancia existente entre el centro de masa del edificio y el instrumento de medición sísmica.

ABSTRACT

The Soil Structure Interaction (SSI) can induce variations to a seismic record captured by an accelerometer "close" to structures, contaminating the frequency content, so the analysis of the causes becomes relevant and is of total interest to improve the understanding of seismic movements. In the national context, studies are scarce or insignificant to identify and catalog the possible presence of SSI, from seismic stations located close to structures. However, the behavior of a structure in the face of a seismic event is of constant investigation, different authors assert that the SSI causes the seismic wave recorded inside a building to be different from the one recorded in the free field. It is relevant to investigate if these effects are evidenced in accelerometers located adjacent to structures, since these records are used in seismic engineering analysis such as structural analysis, structural design standards, seismic hazard or predictive models of ground motion, among others.

This research aims to identify the potential presence of SSI for the records of the 2014 Iquique Earthquake ($M_w=8.2$), in two seismic stations, T05A and T06A, through the dynamic characterization of nearby buildings and the site, by measuring and processing ambient vibration data, applying the HVSR (horizontal to vertical spectral ratio) and HHSR (horizontal to horizontal spectral ratio) method, in addition to rotational analysis. The direction of motion of the buildings in their vibration modes is aligned with the rotated pseudo-accelerations of the seismic record, in search of variations not attributable to the soil matrix.

It is concluded that the main modes of vibration of large buildings, i.e., with two or more stories high and structural system based on reinforced concrete walls, alter the frequency content of the record of a seismic station adjacent to buildings. This modifies and shapes the rotated pseudo-accelerations, both in the orientation of the main axes of the structure and in its direction of oscillation, proving the presence of Soil Structure Interaction (SSI), for the recording of the seismic stations T05A and T06A of the Iquique Earthquake. Thus, the effects of the SSI in seismic stations located on rigid soils are directly proportional to the mass of the building and inversely proportional to the distance between the center of mass of the building and the seismic measuring instrument.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo general.....	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	Plan de Trabajo	2
1.4	Principales resultados y conclusiones.....	3
1.5	Estructura del informe	4
CAPÍTULO 2	REGISTRO SÍSMICO Y PERIODO FUNDAMENTAL	5
2.1	Introducción.....	5
2.2	Rotación del registro sísmico.....	5
2.3	Vibración ambiental.....	6
2.4	Método de la razón espectral H/V	7
2.5	Periodo fundamental.....	8
2.6	Espectro de respuesta.....	9
2.7	Función de Transferencia	10
2.8	Efectos de Sitio	11
2.9	Conclusiones.....	12
CAPÍTULO 3	MEDICIONES Y PROCESAMIENTO DE DATOS	13
3.1	Introducción.....	13
3.2	Terremoto de Iquique 2014	13
3.3	Descripción del área de estudio	13
3.4	Casos de estudio	14
3.4.1	Estación T05A.....	15

3.4.2 Estación T06A.....	17
3.5 Instrumentación y mediciones	18
3.6 Procesamiento de datos de vibración ambiental.....	19
3.7 Registros sísmicos	21
3.8 Análisis rotacional del registro sísmico y de vibración ambiental	21
3.9 Caracterización del sitio	22
3.10 Conclusiones.....	23
CAPÍTULO 4 RESULTADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO	24
4.1 Introducción.....	24
4.2 Resultados y análisis de la estación T05A.....	24
4.2.1 Edificio N°1 resultado razón espectral (H/V - H/H) y análisis rotacional.....	24
4.2.2 Edificio N°2 resultado razón espectral (H/V - H/H) y análisis rotacional.....	27
4.2.3 Edificio N°3 resultado razón espectral (H/V - H/H) y análisis rotacional.....	31
4.2.4 Edificio N°4 resultado razón espectral (H/V - H/H) y análisis rotacional.....	34
4.2.5 Razón espectral H/V del sitio.....	36
4.2.6 Función de transferencia teórica y Vs30.....	39
4.2.7 Estaciones a campo libre.....	39
4.2.8 Análisis rotacional del sitio y de los registros sísmicos.....	41
4.3 Resultados y análisis de la estación T06A.....	46
4.3.1 Edificio N°1 resultados razón espectral (H/V - H/H) y análisis rotacional	46
4.3.2 Edificio N°2	49
4.3.3 Razón espectral H/V del sitio.....	49
4.3.4 Función de transferencia teórica y Vs30.....	51
4.3.5 Análisis rotacional del sitio y de los registros sísmicos.....	51
4.4 Conclusiones.....	54
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....	56

REFERENCIAS	57
ANEXO 3.1 Microzonificación de la ciudad de Iquique.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Características relevantes de edificios cercanos a T05A	16
Tabla 3.2 Características relevantes de edificios cercanos a T06A	17
Tabla 4.1 Estaciones sísmicas en estudio y a campo libre utilizadas.....	40
Tabla 4.2 Modos de vibración de cada edificio y respectiva dirección de movimiento	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Trazas principales y registro resultante de una combinación lineal a 45°	6
Figura 2.2 Respuesta de deformación de 3 sistemas de 1GDL y espectro de respuesta con $\xi=2\%$...	10
Figura 3.1 Ubicación de todas las estaciones que registraron el Terremoto de Iquique y ubicación de las estaciones en estudio situadas en la ciudad de Iquique.....	15
Figura 3.2 Dependencias SERVIU, estación T05A y numeración de edificios.....	15
Figura 3.3 Dependencias hospital regional, estación T06A y numeración de edificios	17
Figura 3.4 Equipo de medición TROMINO.....	18
Figura 4.1 Vista en planta del edificio N°1. Ubicación, orientación y numeración de equipos utilizados.....	24
Figura 4.2 Razón espectral H/V por componente de los equipos 2, 4 y 5. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio.....	25
Figura 4.3 Razón espectral H/H por componente entre los equipos 5 – 1 y 4 – 3. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio.....	26
Figura 4.4 Análisis rotacional en 2.1 Hz (imagen izquierda) y en 2.8 Hz (imagen derecha) para los equipos 2, 4 y 5 normalizados por el equipo 3.....	26
Figura 4.5 Esquemmatización del movimiento torsional para 2.1 Hz del edificio N°1.....	27
Figura 4.6 Vista en planta del edificio N°2. Ubicación, orientación y numeración de equipos utilizados.....	27
Figura 4.7 Razón espectral H/V por componente de los equipos 1, 2, 4 y 5. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio.....	28
Figura 4.8 Razón espectral H/H por componente entre los equipos 1 – 3 y 4 – 3. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio.....	28
Figura 4.9 Análisis rotacional en 2.1 Hz (imagen izquierda) y 3.6 Hz (imagen derecha) para los equipos 1, 2, 4 y 5 normalizados por el equipo 3.....	29
Figura 4.10 Esquemmatización del movimiento torsional para 3.6 Hz del edificio N°2.....	30

Figura 4.11 Análisis rotacional en 3 Hz para los equipos 1, 2, 4 y 5 normalizados por su componente vertical	30
Figura 4.12 Esquematación del movimiento torsional para 3 Hz del edificio N°2.....	31
Figura 4.13 Vista en planta del edificio N°3. Ubicación, orientación y numeración de equipos utilizados	31
Figura 4.14 Razón espectral H/V por componente de los equipos 1, 3, y 5. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio.....	32
Figura 4.15 Razón espectral H/H por componente entre los equipos 1 – 3 y 4 – 3. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio	32
Figura 4.16 Análisis rotacional en 9.2 Hz (imagen izquierda) y 10.5 Hz (imagen derecha) para los equipos 1, 3 y 5 normalizados por su componente vertical	33
Figura 4.17 Vista en planta del edificio N°4. Ubicación, orientación y numeración de equipos utilizados	34
Figura 4.18 Razón espectral H/V por componente de los equipos 1, 4, y 5. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio.....	34
Figura 4.19 Razón espectral H/H por componente entre los equipos 5 – 2 y 4 – 3. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio	35
Figura 4.20 Análisis rotacional en 6.8 Hz (imagen izquierda) y 9.3 Hz (imagen derecha) para los equipos 1, 4 y 5 normalizados por su componente vertical	35
Figura 4.21 Mediciones de vibración ambiental realizadas en el sitio cercano a la estación T05A, identificadas por número de equipo y color de marcador.....	36
Figura 4.22 Curva HVSR direccionales, en imagen (a) 68°, imagen (b) 127°, imagen (c) 320° e imagen (d) 354°, de las mediciones realizadas por los equipos ubicados alrededor de la estación T05A	37
Figura 4.23 Curvas azimutales, H/V rotado equipo 1 (rojo) y equipo 4 (azul).....	38
Figura 4.24 Perfil Vs (imagen izquierda) y función de transferencia teórica (imagen derecha)	39
Figura 4.25 Ubicación de estaciones en estudio y a campo libre.....	40
Figura 4.26 Análisis rotacional de la estación T05A para el equipo 3 en distintas frecuencias	41

Figura 4.27 Ángulo de rotación respecto al eje cardinal “Este” de cada estructura.....	42
Figura 4.28 Análisis rotacional de los registros sísmicos para 2.1 Hz (imagen izquierda) en la que interactúa el edificio N°1 en su modo torsional junto al edificio N°2 en su modo traslacional y 2.8 Hz (imagen derecha) modo de vibración traslacional del edificio N°1. Las líneas negras continuas indican la orientación del edificio y la línea roja segmentada indica la dirección de oscilación.....	43
Figura 4.29 Análisis rotacional de los registros sísmicos para 3 Hz (imagen izquierda) y 3.6 Hz (imagen derecha), correspondientes a los modos de vibración rotacionales del edificio N°2. Las líneas negras continuas indican la orientación del edificio	44
Figura 4.30 Análisis rotacional de los registros sísmicos para 6.8 Hz (imagen izquierda) y 9.3 Hz (imagen derecha), correspondientes a los modos de vibración traslacionales del edificio N°4. Las líneas negras continuas indican la orientación del edificio y la línea roja segmentada indica la dirección de oscilación	45
Figura 4.31 Análisis rotacional de los registros sísmicos para 9.2 Hz (imagen izquierda) y 10.5 Hz (imagen derecha), correspondientes a los modos de vibración traslacionales del edificio N°3. Las líneas negras continuas indican la orientación del edificio y la línea roja segmentada indica la dirección de oscilación	46
Figura 4.32 Vista en planta del edificio N°1. Ubicación, orientación y numeración de equipos utilizados.....	46
Figura 4.33 Razón espectral H/V por componente de los equipos 1, 4 y 5. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio.....	47
Figura 4.34 Razón espectral H/H por componente entre los equipos 5 – 3, 4 – 3 y 1 – 3. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio	47
Figura 4.35 Análisis rotacional en 3.5 Hz (imagen izquierda) y 4.2 Hz (imagen derecha) para los equipos 1, 4 y 5 normalizados por el equipo 3.....	48
Figura 4.36 Esquematación del movimiento torsional para 4.2 Hz del edificio N°1	49
Figura 4.37 Mediciones de vibración ambiental realizadas en el sitio cercano a la estación T06A, identificadas por número de equipo y color de marcador.....	49
Figura 4.38 Curva HVSR direccional a 5° de las mediciones realizadas por los equipos ubicados alrededor de la estación T06A (imagen izquierda) y HVSR rotado del equipo 5 (imagen derecha).	50

Figura 4.39 Perfil Vs (imagen izquierda) y función de transferencia teórica (imagen derecha)	51
Figura 4.40 Análisis rotacional de la estación T06A para el equipo 1 en distintas frecuencias	52
Figura 4.41 Ángulo de rotación respecto al eje cardinal “Este” del edificio N°1	52
Figura 4.42 Análisis rotacional de los registros sísmicos para 3.5 Hz (imagen izquierda) y 4.2 Hz (imagen derecha), correspondiente al modo de vibración traslacional y rotacional del edificio N°1. Las líneas negras continuas indican la orientación del edificio y la línea roja segmentada indica la dirección de oscilación	53
Figura A.3.1 Microzonificación de la ciudad de Iquique y Alto Hospicio	61

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Chile está entre los países más sísmicos del mundo, ubicándose en el noveno lugar histórico luego del terremoto ocurrido el 27 de febrero del 2010. Para capturar la información sísmica del país, se cuenta con la Red Sismológica Nacional (RSN), compuesta de aproximadamente 100 estaciones multiparamétricas, llamadas así por estar compuestas de sismógrafos, acelerógrafos y sistemas de geolocalización, las cuales transmiten los datos en tiempo real a través de sistemas de telecomunicaciones. En el mismo contexto, se dispone de la Red Nacional de Acelerógrafos (RNA), con 297 instrumentos a lo largo del país, la cual fue desarrollada con fines de ingeniería. Dado que los acelerógrafos miden la aceleración del suelo en altas frecuencias, siendo capaces de registrar eventos de gran magnitud en el campo cercano son de gran utilidad para la disciplina de geotecnia e ingeniería sísmica, dado que los datos obtenidos son parte de las investigaciones de los efectos de los terremotos sobre las estructuras.

Los registros de aceleraciones se utilizan para el desarrollo de Modelos Predictivos de Movimiento del Suelo (GMPEs por sus siglas en inglés; *Ground Motion Prediction Equations*), herramienta que permite estimar de forma empírica el nivel de vibración de un sitio en específico para eventos presentes o futuros, ya sea, parámetros de intensidad sísmica en superficie, como la aceleración pico del terreno (PGA por sus siglas en inglés; *Peak Ground Acceleration*) o aceleraciones espectrales. Esto permite realizar un análisis de peligrosidad sísmica, que entre sus objetivos está determinar las cargas sísmicas de diseño para distintos proyectos de gran envergadura en la ingeniería civil, como por ejemplo edificios, represas, entre otros. De lo señalado anteriormente, radica la importancia de registrar los movimientos reales del suelo y no señales contaminadas por distintos factores, como la Interacción Suelo Estructura (ISE).

La presente Memoria de Título, pretende identificar la potencial presencia de Interacción Suelo Estructura (ISE), a través de la caracterización dinámica de las edificaciones cercanas a una estación sísmica, mediante equipo de medición de velocidades, el cual permite el análisis modal pasivo de estructuras y estudios sísmicos de ondas superficiales, por medio de la vibración ambiental, utilizando como caso índice el terremoto de Iquique, ocurrido el 1 de abril del año 2014, con una magnitud de

momento (M_w) 8.2, de acuerdo a los datos publicados por el Centro Sismológico Nacional (CSN), el cual tuvo como epicentro frente a las costas de Iquique y Pisagua, en el norte de Chile con una profundidad hipocentral de 38.9 km.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Relacionar cómo una estación sísmica instalada cerca de edificaciones, registra valores anómalos producto de la Interacción Suelo Estructura (ISE) durante un terremoto extremo.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Seleccionar las estaciones sísmicas, pertenecientes a la Red Sismológica Nacional, que se encuentran instaladas cercanas a edificaciones, para el evento denominado “Terremoto de Iquique” del año 2014.
- b) Calcular el periodo fundamental de vibración en estructuras a través de sismómetros de alta sensibilidad.
- c) Identificar la presencia de Interacción Suelo Estructura (ISE) en registros sísmicos a través de las pseudo aceleraciones, de los datos oficiales entregados por el Centro Sismológico Nacional (CSN).
- d) Analizar los datos para determinar los factores que influyen en Interacción Suelo Estructura (ISE), para el evento denominado “Terremoto de Iquique”.

1.3 Plan de Trabajo

La metodología de trabajo se concentra en un proceso descriptivo-correlacional, que en parte descriptiva efectúa una exhaustiva revisión de la red sismológica de la zona de Iquique, con el objeto de identificar cuáles de las estaciones sísmicas cumplen con los criterios de investigación, y en su

parte correlacional se analizan los datos a obtener a través de equipo de mediciones ambientales versus los registros sísmicos del evento denominado “Terremoto de Iquique”, con el fin de establecer que factores influyen en la Interacción Suelo Estructura (ISE), y cómo estos alteran los registros de aceleraciones sísmicas.

Identificadas las distintas estaciones sísmicas, en la zona de estudio, se seleccionan sólo aquellas que su disposición física, se encuentren instaladas próximas a edificaciones, sean estas de estructuración ligera o de gran envergadura. A efectos de limitar la investigación, se priorizarán las edificaciones de gran envergadura, es decir, aquellas que presenten dos o más pisos y su estructuración sea en base a muros de hormigón armado, además que hayan estado construidas con antelación al año 2014.

Definidas las estaciones sismográficas, se procede a la medición *in situ* con instrumento tecnológico de marca MoHo S.R.L, modelo TROMINO, el cual permite el análisis modal pasivo de estructuras y estudios sísmicos de ondas superficiales, mediante la vibración ambiental. El procesamiento de datos a obtener de la medición *in situ*, se efectúa a través de los programas informáticos Geopsy V.2.9.1 y MATLAB Vers. R2017b. La interacción de datos en ambos programas permite calcular los modos principales de vibración, por medio de la razón espectral horizontal-vertical (H/V) y horizontal-horizontal (H/H), evaluar la dirección de movimiento de las estructuras y de la matriz de suelo por medio del análisis rotacional, y calcular la razón espectral H/V del sitio en el cual se encuentra instalado la estación sismológica.

De la base de datos sismológica, se calcula la combinación lineal de las trazas principales en 360°, a su vez se determinan las pseudo aceleraciones de cada registro obtenido para la búsqueda de mitigaciones o amplificaciones en las frecuencias correspondientes a los modos de vibración y dirección de movimiento de las estructuras. Efectuados los procesamientos de datos, tanto en su descripción como su correlación, se procede al análisis y construcción de conclusiones.

1.4 Principales resultados y conclusiones

Para el Terremoto de Iquique, según el CSN, un total de 25 estaciones registraron el evento sísmico, de los cuales, sólo dos estaciones cumplen el requisito de estar a pocos metros de distancia de

estructuras de gran envergadura, las que se identifican como “Estación T05A” ubicado en el recinto del edificio público SERVIU y, el segundo como “Estación T06A” ubicado en el recinto del edificio público Hospital Regional de Iquique.

Los modos de vibración obtenidos en cada dirección de análisis por los métodos H/V y H/H entregaron valores similares entre sí para los distintos edificios estudiados, y son consistentes a los ejes estructurales, presentando menor frecuencia en el eje débil y mayor frecuencia en el eje fuerte, a su vez, el análisis rotacional en edificaciones permite identificar y hacer diferencia entre un modo traslacional y/o un modo rotacional.

Se evidencia la presencia de Interacción Suelo Estructura en el registro de las estaciones T05A y T06A del terremoto de Iquique, en los que se observó variaciones anómalas no atribuible a la matriz de suelo en las pseudo aceleraciones rotadas, alrededor de las frecuencias correspondientes a los modos principales de vibración de las edificaciones cercanas a las estaciones.

1.5 Estructura del informe

La presente Memoria de Título, se compone de cinco capítulos, además del introductorio los otros cuatro son: Capítulo 2 Registros Sísmicos y Periodo Fundamental, describe los conceptos teóricos que contextualizan este trabajo, como el método de la razón espectral H/V, rotación de registro sísmico y periodo fundamental de vibración de una estructura. Capítulo 3 Mediciones y Procesamiento de Datos, describe las mediciones *in situ* ejecutadas para obtener los datos que permiten determinar las características dinámicas de los edificios y del sitio circundante, además de la metodología de procesamiento de datos y rotación de registros tanto sísmicos como de vibración ambiental. Capítulo 4 Resultados, presenta los distintos resultados obtenidos del procesamiento de datos, analiza y contrasta los modos de vibración de las edificaciones con las pseudo aceleraciones rotadas de registros sísmicos, además de indagar en la respuesta del sitio. Por último, Capítulo 5 Conclusiones, presenta las principales conclusiones, junto a recomendaciones y comentarios de la presente investigación.

CAPÍTULO 2 REGISTRO SÍSMICO Y PERIODO FUNDAMENTAL

2.1 Introducción

En este capítulo se presentan las definiciones conceptuales relacionadas con las propiedades dinámicas de los edificios y del suelo, así como también, análisis aplicados al registro sísmico y fundamentos del uso de vibraciones ambientales. Estos conceptos generales son indispensables para entender y acotar la presente memoria hacia los objetivos planteados, lo que permite comprender el desarrollo metodológico propuesto.

2.2 Rotación del registro sísmico

Se entiende por “Rotación del registro sísmico”, el cálculo de la combinación lineal de las trazas principales (señal obtenida de un sismo), que para los efectos del estudio se denomina Norte-Sur (NS) y Este-Oeste (EO).

Por señalado anteriormente se debe interpretar que los registros sísmicos obtenidos por los instrumentos de medición graban tres señales ortogonales, dado que estos equipos se alinean en dirección al norte magnético del planeta Tierra son denominadas norte-sur (NS), este-oeste (EO) y vertical (Z) por su orientación en el plano cartesiano. Es por ello, por lo que los registros sísmicos se encuentran polarizados a estas direcciones. Boore *et al.* (2006), detalla un procedimiento para eliminar la orientación del sensor como factor de incertidumbre aleatoria, en la cual rotan el registro y obtienen, para un periodo dado, la aceleración espectral equivalente al percentil 50, donde se destaca la diferencia en la aceleración espectral según el ángulo de rotación aplicado.

Entonces, con la finalidad de obtener la respuesta sísmica en cada ángulo de rotación, en la Ecuación 2.1 se aplica un oscilador, el cual se define por medio de senos y cosenos directores.

$$Osc(t, \theta) = Osc_1(t, 0) * \cos(\theta) + Osc_2(t, 0) * \sin(\theta) \quad (2.1)$$

Donde, $Osc_1(t, 0)$ es la componente EO, $Osc_2(t, 0)$ es la componente NS, θ es el ángulo de rotación $Z \in [0,359]$ en grados. Notar que para $\theta = 0^\circ$ y 180° del oscilador se tiene el registro EO en bruto, en cambio para $\theta = 90^\circ$ y 270° del oscilador se tiene NS en bruto. De este oscilador, se obtiene el registro rotado en 360° .

En la Figura 2.1 se observa en color rojo la traza resultante de la suma vectorial a 45° de las componentes principales del registro sísmico, por lo que este cálculo se realiza en los 360° , para un paso angular de un grado.

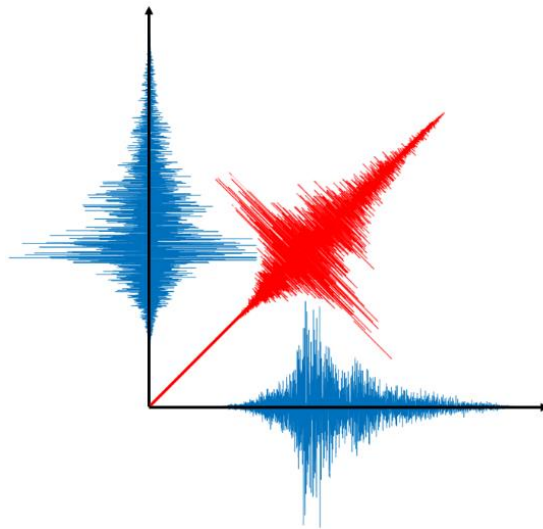


Figura 2.1 Trazas principales y registro resultante de una combinación lineal a 45°

2.3 Vibración ambiental

La Vibración ambiental, también conocida como “Microtremores”, corresponde principalmente a ondas de baja energía producidas principalmente por acciones humanas y naturales, tales como, tráfico, acción industrial, oleaje oceánico, viento, entre otros. Bard (1998) señala que estas vibraciones contienen un predominante contenido de ondas del tipo Rayleigh.

La ocurrencia de microtremores excita la masa de suelo, que a su vez producen vibraciones en las diversas estructuras, lo que permite determinar el periodo fundamental de estas. Diversos autores mediante el uso de vibración ambiental han determinado los periodos fundamentales de estructuras

tales como edificios, puentes, presas, entre otros, con la finalidad de validar modelos estructurales, desarrollar ecuaciones empíricas o evaluar el comportamiento y deterioro (e.g. Castellaro *et al.*, 2013; Gallipoli *et al.*, 2009; Gičev *et al.*, 2020; Ditommaso *et al.*, 2013).

Entre sus limitantes, la utilización de la vibración ambiental, genera resultados imprecisos en suelos con características, tales como, contraste de impedancia baja, variaciones laterales y heterogeneidades, por lo que el paso de microtemores no logra excitar el estrato de suelo en estudio, por lo que los resultados son insatisfactorios.

Desde la perspectiva histórica, el estudio de las vibraciones ambientales sobre las características del suelo comenzó en la década de 1950 con el trabajo de Kanai y Tanaka (1954) y Aki (1957) en Japón. Su uso no se popularizó hasta la aparición del método de la razón espectral H/V propuesto por Nakamura en 1989, que incrementaría el interés por las vibraciones ambientales. Este método se ha expandido ampliamente debido a su practicidad, flexibilidad y bajo costo.

2.4 Método de la razón espectral H/V

El método de la razón espectral H/V, fue desarrollado por Nakamura (1989), mediante la función de transferencia del sitio le permite estimar la frecuencia de resonancia (f_0) y la amplificación de los movimientos del suelo influidos por una capa superficial, utilizando un registro de vibraciones ambientales de varios tipos de movimiento de ondas superficiales y de cuerpo (SH, SV u ondas P).

El método se basa en calcular la razón espectral de las componentes horizontal-vertical (H/V o HVSR por sus siglas en inglés; *horizontal to vertical spectral ratio*) de un único equipo de medición. Se ha demostrado que la división de los componentes horizontales (H) por el vertical (V), tiene un poder de normalización efectivo (Nogoshi e Igarashi, 1970; Nakamura, 1989), suprime la fuente y realza la trayectoria (es decir, la respuesta del subsuelo), de modo que la relación H/V permanece esencialmente sin cambios con el tiempo (Castellaro, 2016).

Castro *et al.* (1998) demostraron que la razón espectral H/V permite calcular de forma válida la frecuencia predominante de estructuras. Castellaro (2016) indica que se logra determinar la frecuencia de resonancia y el factor de amplificación utilizando HVSR en la parte superior de un edificio. Ambos

autores concuerdan que es posible calcular el periodo fundamental de vibración por medio de la razón espectral H/V.

Nakamura (2000) señala que para un equipo situado en lo más alto de la estructura la medición registrará, tanto la función de transferencia del suelo como de la estructura, puesto que la alta rigidez vertical del edificio y del suelo bajo este, mantienen las características de la fuente. Si bien la componente normalizadora logra atenuar o eliminar el contenido de frecuencias de la fuente, del cual se deben tener presente las características del sitio y de la estructura, al poseer modos de vibración similares, las mediciones dentro del edificio podrían verse afectadas.

Indistintamente de lo señalado en el párrafo precedente, es posible excluir los efectos de la fuente, mediante el uso de dos equipos, uno situado en altura y otro a nivel del suelo, lo que permite eliminar la amplificación de las frecuencias debido al suelo y aislar el comportamiento de la estructura. Junto a las mediciones de ambos equipos se realiza H/H (HHSR por sus siglas en inglés; *horizontal to vertical spectral ratio*), es decir la razón por componente entre el espectro de frecuencias horizontal de una medición en altura y el espectro de frecuencias de una medición en la base. Chiauzzi *et al.* (2012), validaron lo anterior calculando la razón H/H para estimar el periodo fundamental de vibración en edificios mediante mediciones de vibración ambiental. En igual contexto, el código ATC3-06 (Disposiciones tentativas para el desarrollo de códigos sísmicos de edificios) ha utilizado esta técnica haciendo uso de registros sísmicos para calcular periodos en estructuras y así poder estimar una ecuación empírica en función de la altura del edificio.

2.5 Periodo fundamental

El periodo fundamental de una estructura es aquel periodo en el cual la edificación alcanza un grado máximo de oscilación. De acuerdo con la amplitud del contenido de frecuencias que se presenten en el sitio, dado la acción sísmica, la estructura se excitará más o menos alrededor del periodo fundamental, inclusive el sistema puede entrar en resonancia aumentando así significativamente las deformaciones y aceleraciones en la estructura.

El periodo fundamental de un edificio es el primer modo de vibración, el cual posee la mayor masa traslacional asociada, por lo que se debe considerar que una estructura posee tantos modos de vibrar como grados de libertad tenga, donde cada modo dispone de un periodo de vibración asociado. Tanto la masa como la rigidez de una estructura son las principales variables que influyen en el valor del periodo que esta tendrá. Entre las características de la edificación que influyen en su masa y rigidez, se destacan su altura, la distribución por nivel, los materiales de construcción, la dimensión de los elementos resistentes, el área en planta, entre otros.

Durante un sismo, los distintos daños que puedan ocurrir o el ingreso a la no linealidad de los elementos sismorresistentes debido a los esfuerzos provocados, producen en la estructura una disminución en su rigidez, lo que implica un aumento en su periodo fundamental, así también la no linealidad del suelo debido a la energía sísmica y a la oscilación de la estructura puede aumentar su periodo de vibración.

2.6 Espectro de respuesta

El “Espectro de Respuesta” es una herramienta que permite, a través de un cálculo, describir el contenido de frecuencias de un evento sísmico. Para cuantificar la particularidad de cada registro sísmico y describir la amplitud de cada frecuencia es fundamental aplicar algún parámetro de intensidad, por ello, una forma de parametrizar el contenido de frecuencias de un evento sísmico es por medio de un “espectro de respuesta” elástico.

La respuesta dinámica de cada estructura está sujeta a su frecuencia natural y al contenido de frecuencias que la excita, entonces, los “espectros” se calculan a partir del registro de la aceleración del suelo, lo que permite gráficas que proporcionan la respuesta máxima de un oscilador simple en un rango de valores, dado su período natural y amortiguación. Estas graficas proporcionan una descripción de las características de frecuencia del movimiento del suelo y dan la respuesta máxima de las estructuras simples al terremoto.

El “método numérico para el cálculo de los espectros de respuesta de un movimiento fuerte de Nigam y Jennings (1996)”, otorga una solución exacta de la ecuación diferencial gobernante para los

sucesivos segmentos lineales de la excitación, y luego utilizar esta solución para calcular la respuesta en intervalos de tiempo discretos de forma puramente aritmética. El espectro de respuesta sísmico se define como la representación gráfica de la respuesta máxima de un sistema (Figura 2.2) que depende solo del periodo natural de vibración (T_0) y de su fracción de amortiguamiento (ξ). Este se puede determinar como un sistema de un grado de libertad (1GLD) a partir de la solución de la ecuación diferencial del movimiento de una estructura.

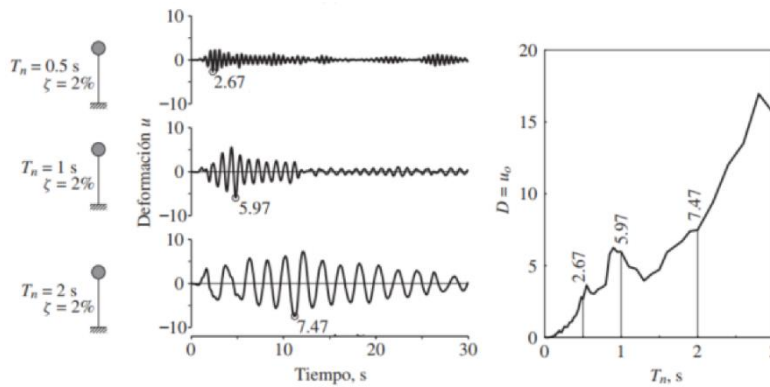


Figura 2.2 Respuesta de deformación de 3 sistemas de 1GLD y espectro de respuesta con $\xi=2\%$

Fuente: Chopra (2014).

El espectro de respuesta de pseudo aceleraciones (Sp_a) se obtiene de la Ecuación 2.2:

$$Sp_a(\omega, \xi) = \omega^2 * S_d(\omega, \xi) \tag{2.2}$$

Donde, ω es la frecuencia natural, que equivale a $2 * \pi/T_0$ y S_d es el espectro de respuesta de deformaciones.

2.7 Función de Transferencia

La Función de Transferencia, es la expresión del comportamiento dinámico del suelo en el dominio de la frecuencia. De la teoría unidimensional la amplificación dinámica del suelo surge por medio del concepto de la función de transferencia de un oscilador armónico excitado por una fuerza, es así como las propiedades dinámicas del suelo proporcionan el grado de amplificación de las ondas sísmicas, correspondientes a los efectos de sitio.

En condiciones de un estrato de suelo horizontal de espesor H , uniforme e isótropa, con un comportamiento elástico y con capacidad de amortiguamiento, sobre un basamento rocoso infinitamente rígido y sometido a excitación sísmica propagándose verticalmente, se tiene la función de transferencia relacionada con la amplificación dinámica de suelos, lo que permite la aplicación de la Ecuación (2.3) obtenido por Kramer (1996), la cual calcula los “ n ” modos de vibrar de una columna de suelo.

$$T_n = \frac{4H}{V_s(2n-1)} \text{ o } f_0 = \frac{V_s}{4H} (2n-1) \quad (2.3)$$

Donde V_s es la velocidad de ondas sísmicas, H el espesor del sedimento y con $n \in [1, \infty)$. La frecuencia fundamental (f_0) o periodo fundamental (T_n) está asociado a $n = 1$, logrando la frecuencia más baja y con el mayor máximo local, por lo tanto, en el periodo natural del depósito, el contenido de frecuencias equivalente a f_0 , se verá ampliamente amplificada.

2.8 Efectos de Sitio

Los “Efectos de Sitio” son variaciones en la amplitud del contenido de frecuencias de las ondas sísmicas provocados por los estratos de suelo superficial.

La respuesta sísmica del suelo está ligada a las heterogeneidades y a la geometría irregular que presente un sitio en superficie, así también dependen estrechamente de sus propiedades. Estos efectos de sitio pueden amplificar o desamplificar el conjunto de ondas, donde los parámetros como V_{s30} , que corresponde al promedio de la velocidad de propagación de las ondas de corte (V_s) asociada a los 30 metros superficiales y la frecuencia predominante del suelo (f_0), permiten clasificar y analizar la respuesta sísmica del terreno.

2.9 Conclusiones

Los conceptos descritos, desde “Rotación del Registro Sísmico” hasta “Caracterización del Sitio”, permiten exponer la importancia del Método de Razón Espectral H/V, el cual es un método ampliamente validado para calcular la frecuencia fundamental de un sistema, ya sea de un sitio o estructura, mediante el análisis de vibraciones ambientales. Comprender la significación de los conceptos utilizados en el método, así como los autores que han diseñado instrumentos de cálculo, permiten validar el proceso en sí.

Frente a una excitación sísmica una estructura vibrará, y ésta alrededor de su periodo fundamental experimentará las mayores cargas sísmicas, es decir, la oscilación del edificio será máxima. Si tal movimiento ocurre próximo a una estación sísmica podría ocasionar alteraciones en la amplitud de onda, contaminando la grabación del registro sísmico. Lograr identificar variaciones en el registro sísmico rotado, producto de la vibración del edificio en sus modos de vibración, precisamente en la orientación que posee la estructura con respecto al equipo sísmico puede ser la clave para evidenciar la presencia de Interacción Suelo Estructura.

La Interacción Suelo Estructura ha sido ampliamente estudiada (*e.g.* Stewart, 2000; Sotiriadis *et al.*, 2019; Cavalieri *et al.*, 2021; Goto *et al.*, 2019), indicando una clara diferencia del espectro de frecuencias dentro de una estructura con respecto al “campo libre”. No así, como una edificación cercana por medio de la ISE pueda afectar un registro sísmico. En lo anterior radica la importancia de aplicar nuevas metodologías.

CAPÍTULO 3 MEDICIONES Y PROCESAMIENTO DE DATOS

3.1 Introducción

En el presente capítulo se describe el trabajo de campo realizado, junto a las particularidades que presenta cada caso de estudio. Se detalla el procedimiento llevado a cabo para obtener las mediciones de vibración ambiental, tanto de las estructuras escogidas como de los sitios donde se emplazan las edificaciones, junto a la configuración y disposición de los equipos utilizados. Se presenta además, la metodología empleada en el procesamiento de las trazas de velocidades adquiridas, así mismo, en los registros sísmicos mediante el *software* GEOPSY v2.0.9 y rutinas MATLAB R2017b empleadas.

3.2 Terremoto de Iquique 2014

El terremoto de Iquique, ocurrido el 1° de abril del año 2014, a las 23:46 UTC (según sus siglas en inglés *Universal Time Coordinated*), fue asociado al tipo Interplaca, en el cual, la placa de Nazca se subduce hacia el este debajo de la placa de América del Sur a una velocidad de 72 mm/año. Según el CSN, su epicentro se estimó a 89 kilómetros al suroeste de la localidad Cuya y a 83 kilómetros al noroeste de la ciudad de Iquique, por sobre el océano pacífico, ubicado en latitud -19.57 y longitud -70.91, a su vez con una profundidad de 38.9 kilómetros y un momento de magnitud de 8.2. Su momento sísmico estimado es de 1.5×10^{21} N m, con un área de ruptura asociada de 140 km de largo por 140 km de ancho a lo largo de la interfaz de las placas (Yagi *et al.*, 2014).

3.3 Descripción del área de estudio

La ciudad de Iquique pertenece a la conurbanización Iquique-Alto Hospicio. Se ubica en el norte grande de Chile, capital de la provincia de Iquique, en la Región de Tarapacá. Su posición en grados sexagesimales es 20°12'51''S latitud sur y 70°09'09''O longitud oeste. Es una zona de alta sismicidad al igual que el territorio chileno dado su proximidad a la zona de subducción, contacto entre las placas Nazca y Sudamericana.

La geomorfología de la ciudad de Iquique y Alto Hospicio ha sido bien caracterizada (e.g. Marquardt *et al.*, 2008; Becerra *et al.*, 2015), indicando que la ciudad de Iquique se sitúa sobre depósitos marinos o eólicos con una baja profundidad hasta la roca madre.

En el Anexo 3.1 se muestra la microzonificación de la ciudad de Iquique, la cual indica el Vs30 promedio, f_0 , A0 y una descripción geológica de cada zona establecida, en la cual se observa que las estaciones en estudio se encuentran sobre un afloramiento de andesita.

3.4 Casos de estudio

Se ha establecido un único criterio de selección para establecer los posibles casos de estudio, el cual consiste principalmente en que la estación acelerográfica (sísmica), que en su base de registro contemple un movimiento de terreno extremo, se ubique próximo a alguna edificación de gran envergadura, es decir, a pocos metros de distancia.

Teniendo a la vista el listado de estaciones acelerográficas, informado por el CSN, y habiendo identificado como movimiento de terreno extremo de la base de datos nacional el evento sísmológico denominado Terremoto de Iquique, se procedió a la selección de las estaciones que cumplen con el criterio establecido, por lo que el proceso de selección e inspección se realizó mediante el *software* Google Earth.

En la Figura 3.2 se observan las 25 estaciones sísmicas que grabaron el terremoto de Iquique acorde a las coordenadas geográficas publicadas por el CSN; en color azul se indican las estaciones a campo libre y en color rojo aquellos potenciales casos con ISE, a su vez los casos de estudio se acotaron de acuerdo a su accesibilidad y autorización de la administración del recinto donde se encuentran emplazados. Efectuados todos los cruces de variables se seleccionaron las estaciones T05A y T06A.



Figura 3.1 Ubicación de todas las estaciones que registraron el Terremoto de Iquique y ubicación de las estaciones en estudio situadas en la ciudad de Iquique

3.4.1 Estación T05A

La estación T05A correspondiente a la red sismológica nacional administrada por el CSN, se encuentra emplazada en un recinto fiscal, donde preponderantemente esta administrado por la entidad pública del Servicio de Vivienda y Urbanismo, SERVIU, de la ciudad de Iquique (Figura 3.3).

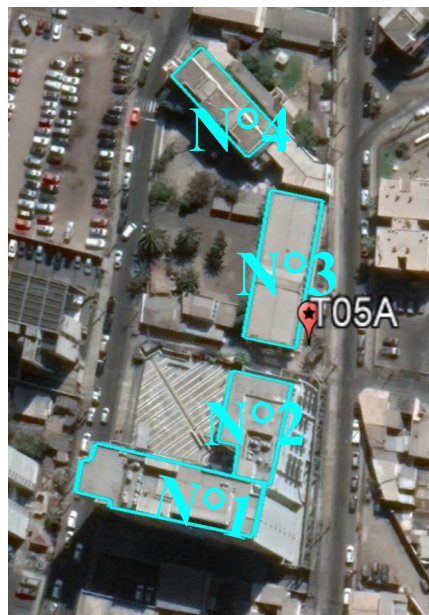


Figura 3.2 Dependencias SERVIU, estación T05A y numeración de edificios

El instrumento sísmico de la estación T05A es un Episensor FBA - Basalt Serial 1302, acelerómetro de superficie triaxial con una tasa de muestreo de 200 muestras por segundo. Cuenta con tres módulos de acelerómetros montados ortogonalmente, con un rango de grabación a gran escala de $\pm 0,25g$ a $\pm 4 g$, midiendo la aceleración del suelo en altas frecuencias. Permiten un registro de movimientos de mayor amplitud, siendo capaces de registrar eventos de gran magnitud sin saturarse. Este equipo se encuentra alineado al norte magnético de la tierra, por lo cual, sus trazas ortogonales se denominan NS (norte-sur), EO (este-oeste) y Z (vertical) respectivamente.

En la Figura 3.3 se observa que el equipo se encuentra cercado por cuatro edificios en que su sistema estructural es con base a muros de hormigón armado, en número de pisos y superficies distintas, que además presentan las características que señalan en Tabla 3.1 respecto al número de pisos, número de subterráneos, área en planta, masa estimada y D, es decir, distancia desde la estación hasta el centro de masa aproximado del edificio.

Tabla 3.1 Características relevantes de edificios cercanos a T05A

Edificio	Nº De Pisos	Subterráneo	Área en planta (m ²)	Masa (T)	D (m)
Nº1	8	1	650	6240	42
Nº2	6	1	420	3024	16
Nº3	2	0	480	1152	18
Nº4	4	0	330	1584	65

Para efectos de esta investigación no es relevante proveer más información acerca de los elementos estructurales de las edificaciones, sin embargo es importante señalar que éstas datan con anterioridad al terremoto de Iquique.

Con el objetivo de identificar la posible Interacción Suelo Estructura en cada edificio se realizaron mediciones de vibración ambiental, con equipo TROMINO, posicionando tres de éstos en lo más alto posible y dos en la base, lo anterior estuvo sujeto a las autorizaciones de acceso a las distintas dependencias que permitió la administración. A su vez se efectuaron mediciones de microtemores en el suelo cercano a la estación sísmica con la finalidad de obtener, para edificios y suelos, su periodo fundamental de vibración.

Esta estación cuenta con un perfil de velocidad de ondas de corte (V_s) proporcionado por el CSN, el cual permite obtener el promedio de la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 metros superficiales (V_{s30}) y además confiere la posibilidad de calcular la función de transferencia teórica del sitio.

3.4.2 Estación T06A

La estación T06A correspondiente a la red sismológica nacional administrada por el CSN, se encuentra emplazada en un recinto fiscal del Hospital Regional Dr. Ernesto Torres Galdames, de la ciudad de Iquique (Figura 3.4). El instrumento es un acelerómetro Episensor FBA - Basalt Serial 1514, de iguales características técnicas de la Estación T05A.

En la Figura 3.4, se observa que el equipo se encuentra al extremo de dos edificios en que su sistema estructural es con base a muros de hormigón armado, en número de pisos iguales y superficies distintas, que además presentan las características que señalan en Tabla 3.2 respecto al número de pisos, número de subterráneos, área en planta, masa estimada y D, es decir, distancia desde la estación hasta el centro de masa aproximado del edificio.

Tabla 3.2 Características relevantes de edificios cercanos a T06A

Edificio	N° De Pisos	Subterráneo	Área en planta (m^2)	Masa (T)	D (m)
N°1	2	0	2980	7152	47
N°2	2	0	1400	3360	35

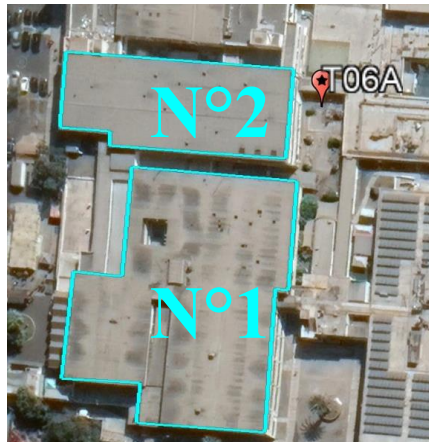


Figura 3.3 Dependencias hospital regional, estación T06A y numeración de edificios

Al igual que en la estación anterior, se realizaron mediciones de vibración ambiental, con equipo TROMINO, posicionando tres de éstos en lo más alto posible y dos en la base. Es destacable señalar que hubo mayores restricciones de acceso por parte de la administración por ser un establecimiento de salud pública. También se efectuaron mediciones de microtremores en el suelo cercano a la estación sísmica con la finalidad de obtener, para edificios y suelo, su periodo fundamental de vibración. El sitio también cuenta con una inversión de perfil Vs puesto a disposición por el CSN.

El edificio N°2, posterior al terremoto de Iquique, fue ampliado en altura, agregando un piso más al complejo, información que fue proporcionada por el personal del hospital y corroborada con imágenes satelitales previo al evento sísmico.

3.5 Instrumentación y mediciones

El instrumento tecnológico utilizado es de marca MoHo S.R.L, modelo TROMINO®, el cual permite el análisis modal pasivo de estructuras y estudios sísmicos de ondas superficiales, mediante la vibración ambiental. Para los efectos de obtener la mayor cantidad de mediciones posibles se utilizaron cinco unidades. La particularidad de este equipo es que graba tres canales ortogonales entre sí de velocidades con rango dinámico y ajustable, los cuales son Norte (N), Este (E) y Vertical (Z). Logra registrar microtremores desde ± 0.5 mm/s hasta fuertes vibraciones de ± 5 cm/s. Cada canal puede registrar dos trazas: de velocidad ultrasensible, de aceleraciones o ambos según se configure el dispositivo, además la frecuencia de muestreo del equipo es ajustable de 0.1 Hz a 1024 Hz. Es importante y regla de su operación, que de acuerdo a la orientación espacial en que se disponga, éste registrará los canales N, E y Z. En la Figura 3.5 se muestra el equipo utilizado.



Figura 3.4 Equipo de medición TROMINO

La medición en los edificios, se desarrolló distribuyendo uno o dos equipos a nivel basal, y tres o cuatro en el último piso o la azotea, tanto en los extremos del nivel como al centro de éste, con la finalidad de realizar la razón espectral H/V. En este mismo proceso se procuró alinear verticalmente al menos un par de equipos con el propósito de realizar la función de transferencia H/H. Es relevante mencionar que el acceso a los últimos pisos, así como el ingreso a zona de oficinas, de las distintas edificaciones estuvo sujeta a la autorización de las respectivas administraciones.

Los cinco equipos se posicionaron en la misma dirección, lo más alineado posible con algún eje principal del edificio, con el objetivo de obtener de cada canal horizontal (N y E) un modo principal de vibración, relaciona al eje fuerte o débil de la estructura según corresponda. Los equipos se configuraron a una tasa de muestreo de 512 Hz y el tiempo de medición en general fue de 24 minutos, para el registro de sólo velocidades.

El modelo TROMINO, cuenta con un GPS interno que funciona en forma adecuada en espacios abiertos cuando logra capturar la señal satelital, sin embargo al interior de estructuras, esta función no fue posible ejecutarla correctamente, imposibilitando la sincronización de los equipos en uso. Por lo tanto, como solo se quiere determinar el periodo fundamental de vibración y no el amortiguamiento, la sincronización de los equipos en el dominio del tiempo no es relevante, sin embargo, mediante el reloj interno del equipo se registró la hora, con la cual se recortó el tren de onda para que tuvieran el mismo largo.

3.6 Procesamiento de datos de vibración ambiental

De las señales adquiridas del equipo TROMINO, sólo se registraron velocidades, dado que éstas presentan mayor sensibilidad a microtemores. El procesamiento de datos se llevó a cabo mediante el *software* GEOPSY v2.9.1. De cada uno de las señales (N, E, Z), se analizó la gráfica en el dominio del tiempo para inspeccionar visualmente que no existan anomalías en la adquisición de datos, luego, se aplicó un algoritmo disparador (*anti trigger*), denominado razón STA/LTA (por sus siglas en ingles *Short Time Average over Long Time Average*), con el propósito de remover las señales transientes, donde STA corresponde al promedio del valor absoluto de la amplitud en una ventana de tiempo corta, equivalente a 1 s, y LTA es el promedio del valor absoluto de la amplitud en una ventana larga,

por ejemplo de 30 s, por lo que será una señal transiente si se obtiene de esta razón, un valor mayor a 2.5 o menor a 0.2, dejando fuera del análisis la ventana corta definida.

Una vez efectuada la exclusión de las señales transientes, las trazas se dividen en ventanas de 25 segundos sin traslajos. A cada una de las ventanas se le aplicó una función *Taper* para suavizar los extremos en el dominio del tiempo, luego se aplicó la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés; *Fast Fourier Transform*) y se suavizó el espectro de frecuencias utilizando el método de Konno y Ohmachi (1998), el cual emplea un ancho de banda constante en escala logarítmica, por lo que conserva el mismo número de puntos de baja y alta frecuencia. Además, este suavizador se controla por una constante de suavizado, cuyo valor recomendado es de 40. Finalmente, se calcula la razón espectral H/V y H/H , como se indica en la Ecuación 3.1 y 3.2 respectivamente, donde, el máximo local con mayor amplitud que se obtiene como resultado en la gráfica, se identifica como la frecuencia fundamental de vibración del sistema.

$$HV = \frac{H(f)}{V(f)} \quad (3.1)$$

Donde, $H(f)$ es la mediana del espectro de Fourier suavizado obtenido de cada ventana para alguna señal horizontal (N o E) y $V(f)$ es la mediana del espectro de Fourier suavizado obtenido de cada ventana de la señal vertical, a su vez, $H(f)$ puede ser calculada de la combinación lineal de las señales horizontales en alguna dirección.

$$HH = \frac{H(f)_a}{H(f)_b} \quad (3.2)$$

Donde, $H(f)_a$ es la mediana del espectro de Fourier suavizado obtenido de cada ventana para alguna señal horizontal de un equipo ubicado en altura y $H(f)_b$ para un equipo ubicado en la base del edificio, procurando que la señal horizontal utilizada (N o E) sea la misma en altura y la base.

3.7 Registros sísmicos

Los registros sismológicos del terremoto de Iquique son la base de datos utilizados en esta investigación, en particular los grabados por las estaciones T05A y T06A, los que cumplieron con el criterio para el estudio, además se utilizaron registros a campo libre cuidadosamente seleccionados, con el propósito de comparar la respuesta sísmica en superficie entre estaciones. Los registros de los casos de estudio y de las estaciones a campo libre fueron proporcionados por Bastías y Montalva (2016), los que a su vez procesaron componente por componente.

3.8 Análisis rotacional del registro sísmico y de vibración ambiental

Los equipos instalados en la estación sismológica se encuentran alineados al norte magnético de la tierra, por lo que sus componentes ortogonales están polarizados a estas direcciones, por lo que, con base en la metodología propuesta por Boore *et al.* (2006), se logra rotar el registro por medio de senos y cosenos directores, considerando las trazas ortogonales (NS y EW). Es así como aplicando la combinación lineal desde 0 a 359°, se obtienen 360 registros para una rotación completa. Para describir las características del contenido de frecuencias de los 360 registros obtenidos se aplica un parámetro de intensidad, que para el caso es el espectro de respuesta elástico.

Para el proceso de espectro de respuesta, se calculó a cada registro la pseudo aceleración con un amortiguamiento del 5% mediante el método de Nigam y Jennings (1969), del cual se fija un periodo cualquiera y se grafica el valor obtenido, logrando las pseudo aceleraciones rotadas en 360°, lo que permite obtener la respuesta sísmica del sitio en cualquier dirección. La importancia de este cálculo radica en que permite alinear la respuesta dinámica de la estructura con el registro sísmico resultante en la misma dirección, resaltando los posibles efectos de la ISE, y además identifica gráficamente posibles variaciones entre frecuencias. La orientación de la estructura respecto a los ejes cardinales se logra determinar por medio del *software* Google Earth.

El análisis rotacional también es aplicable a registros de vibración ambiental, tanto para grabaciones dentro de estructuras como para el sitio. Su aplicación dentro de edificaciones consiste en identificar la dirección de movimiento en sus modos de vibración, donde el conjunto de máximos valores de

aceleración representará el sentido de movimiento. Para una estructura simétrica, se espera que el análisis rotacional resulte en indicar un movimiento predominante en dirección de los ejes principales de la edificación, sin embargo se debe tener presente que a igual contexto, V. Gicev *et al.* (2020), determina que modos de vibración complejos y tridimensionales de un edificio irregular pueden ser identificados por mediciones de las vibraciones ambientales, resultado en un dirección de movimiento independiente para cada equipo.

El análisis rotacional aplicado a un sitio cualquiera, permite identificar ciertas direccionalidades del terreno y se logra visualizar el comportamiento de la masa de suelo bajo la excitación de una frecuencia en específico, con lo cual, poder inferir si las posibles variaciones del registro sísmico son producidas por ISE o son propias de la matriz de suelo.

Para el cálculo del análisis rotacional de vibración ambiental de esta investigación, las señales obtenidas se segmentaron en ventanas de 25 segundos y se eliminaron aquellas que presentaron datos transcientes, realizando para cada ventana la combinación lineal en 360° de las componentes principales (N y E). A continuación, para un periodo dado se calcularon las pseudo aceleraciones en 360° para cada ventana, y estas se normalizan por la pseudo aceleración de la componente vertical de la respectiva ventana, concluyendo con el cálculo de la mediana de todos los valores obtenidos de cada ventana en su respectivo ángulo. Si bien el cálculo descrito anteriormente se normaliza por la componente vertical, este mismo cálculo se puede normalizar ángulo a ángulo por la pseudo aceleración de un equipo ubicado a nivel basal.

3.9 Caracterización del sitio

La intensidad sísmica en la superficie terrestre, entre otras cosas, depende del “efecto de sitio”, que se explica como las variaciones en la amplitud del contenido de frecuencias de las ondas sísmicas provocados por los estratos de suelo superficial.

De las mediciones de vibración realizadas en el sitio alrededor o cercano a la estación sísmica, se buscó calcular la frecuencia característica del sitio (f_0), e identificar posibles direccionalidades, es

decir, zonas del suelo que presenten distinta rigidez, con el fin de permitir su relación con posibles variaciones en el espectro de respuesta rotado.

El CSN tiene a disposición perfiles de velocidad de onda de corte invertidos en ubicaciones cercanas a las estaciones sismológicas con sus respectivos valores de V_{s30} . Con estos perfiles se calculó la función de transferencia teórica de los estratos de suelo identificados, obteniendo como resultado otra referencia de la frecuencia característica del sitio (f_0).

3.10 Conclusiones

Las estaciones sismológicas T05A y T06A, cumplieron con el criterio específico de selección, así como la información capturada por estas, las cuales permitieron su procesamiento y análisis. En el mismo contexto se debe tener presente que el emplazamiento de estas estaciones se encuentra en terrenos de administraciones públicas, para lo cual su autorización a su acceso como a las edificaciones cercanas permitieron efectuar las mediciones de microtemores *in situ*.

La utilización de los equipos TROMINO en la medición de vibraciones ambientales, lo convierte en un equipo ideal en sus propiedades y funciones, ya que único equipo permite calcular la razón espectral H/V. En este contexto, permitió caracterizar dinámicamente las edificaciones y el sitio, por lo que los datos obtenidos pudieron ser procesados y cruzados con los registros sísmicos. El cálculo de la razón espectral H/V y H/H es un proceso que tiene varias fases, para lo cual se utilizó el *software* GEOPSY v2.9.1, del cual se obtuvieron los resultados en forma eficiente, para cumplir los objetivos de esta investigación.

El análisis rotacional del registro sísmico permitió alinear la dirección de movimiento de la edificación con respecto al acelerómetro en el mismo sentido, donde los efectos de Interacción Suelo Estructura (ISE) con la estación sísmica son más evidentes. La dirección de movimiento de edificaciones se calculó aplicando el análisis rotacional a mediciones de vibración ambiental realizadas *in situ*.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta para cada caso de estudio, T05A y T06A, los resultados del periodo fundamental obtenidos por medio de la razón espectral H/V y H/H de los edificios existentes en el sitio y su respectivo análisis rotacional. Se estudia la matriz de suelo, por medio del análisis rotacional y H/V de equipos en el sitio, además se presenta la función de transferencia teórica y Vs30 de un perfil estratigráfico inferido a partir de la inversión de una curva de dispersión realizada. Se calcula la pseudo aceleración rotada del registro sísmico en los periodos de interés, es decir, en los modos de vibración de las estructuras aledañas. Finalmente se examina e infiere la posible Interacción Suelo Estructura en los registros de pseudo aceleración rotada.

4.2 Resultados y análisis de la estación T05A

4.2.1 Edificio N°1 resultado razón espectral (H/V - H/H) y análisis rotacional

En la Figura 4.1 se identifica el edificio N°1 (8 pisos) y la disposición de los cinco equipos utilizados. La ubicación de los equipos es la siguiente: el equipo 2 y 5 en la azotea, el equipo 4 en el 8^{vo} piso junto a la escalera de escape, los equipos 1 y 3 en el 1^{er} piso, alineados verticalmente a los equipos 5 y 4 respectivamente.

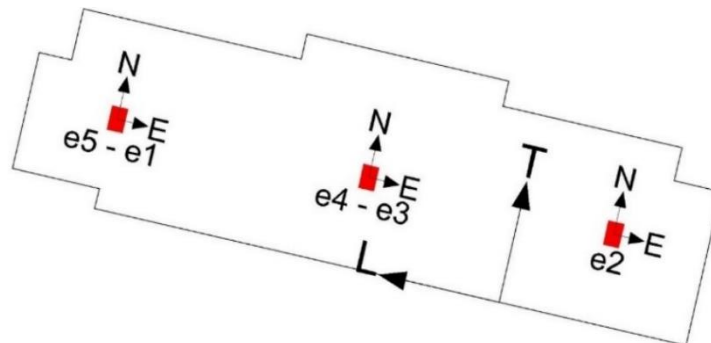


Figura 4.1 Vista en planta del edificio N°1. Ubicación, orientación y numeración de equipos utilizados

En la Figura 4.2 para cada dirección de análisis (Longitudinal y Transversal), se aprecia la razón espectral H/V. Cada línea de color representa la función de transferencia de los equipos dispuesto en

altura, se indica en la leyenda la denominación del equipo al cual corresponde. La línea segmentada vertical indica la frecuencia de máxima amplitud de razón espectral aplicada. En la gráfica se observan las frecuencias correspondientes a los modos de vibrar del edificio N°1, la cual es 2.8 Hz en la dirección longitudinal y 2.1 Hz en la dirección transversal. La frecuencia fundamental del edificio se corresponde al eje débil de la estructura, por lo que es coherente que su vibración sea en la dirección del eje de menor rigidez (Transversal) y en consecuencia poseer una menor frecuencia, en contraposición del eje fuerte (Longitudinal).

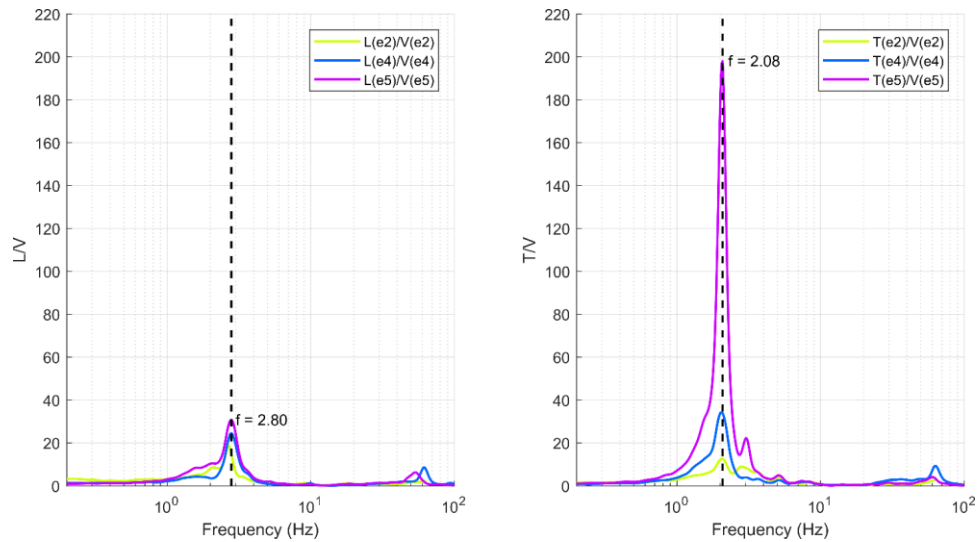


Figura 4.2 Razón espectral H/V por componente de los equipos 2, 4 y 5. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio

Utilizando el método espectral H/H en cada dirección de análisis (Longitudinal y Transversal), como se muestra en la Figura 4.3, resulta en una frecuencia fundamental en la dirección longitudinal de 2.8 Hz y en la dirección transversal 2.1 Hz. Los resultados de este método concuerdan con la razón espectral H/V realizada en la altura del edificio.

Del análisis rotacional aplicado a las mediciones de vibración ambiental realizadas en el edificio N°1, se logra identificar la dirección de oscilación que presentará la estructura en sus modos de vibración. En la Figura 4.4, imagen izquierda, se muestra la dirección de oscilación para una frecuencia de 2.1 Hz y en imagen derecha para 2.8 Hz, siendo ambos valores para los 3 equipos situado en altura del edificio.

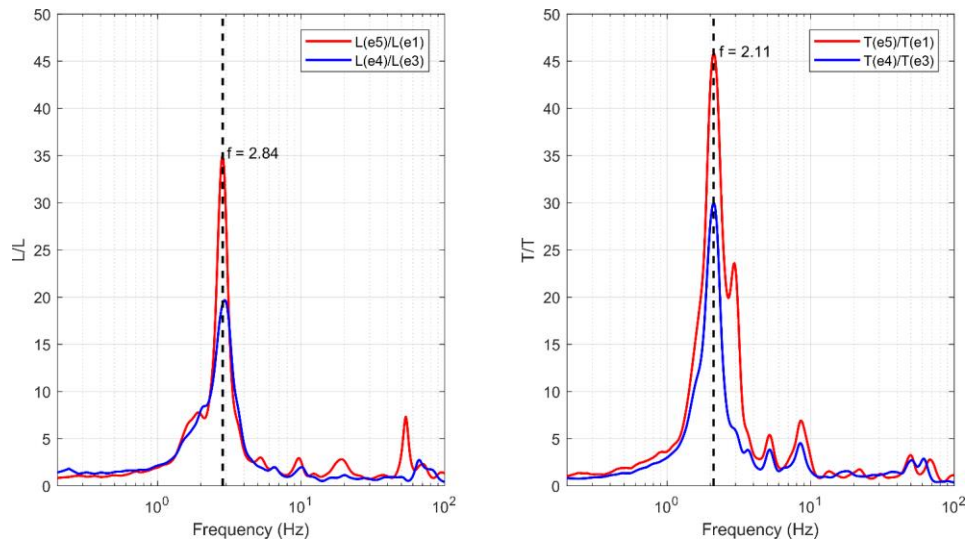


Figura 4.3 Razón espectral H/H por componente entre los equipos 5 – 1 y 4 – 3. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio

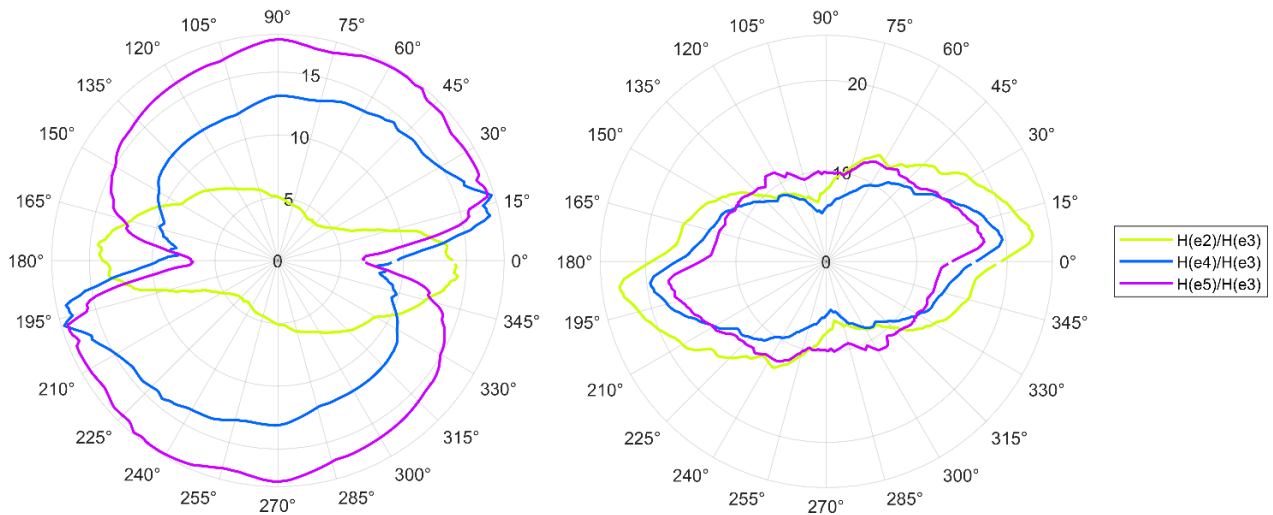


Figura 4.4 Análisis rotacional en 2.1 Hz (imagen izquierda) y en 2.8 Hz (imagen derecha) para los equipos 2, 4 y 5 normalizados por el equipo 3

Para una frecuencia de 2.8 Hz, el análisis rotacional (Figura 4.4 derecha) muestra que los equipos 2, 4 y 5 reflejan la misma dirección máxima de movimiento, aproximadamente de 7°, y teniendo presente que para el análisis rotacional 0° corresponde a la señal “E” obtenida por cada equipo indicado en la Figura 4.1, el resultado es consistente, ya que, la estructura oscila prácticamente en la misma dirección del eje longitudinal. Para una frecuencia de 2.1 Hz (Figura 4.4 izquierda), del análisis rotacional los equipos 4 y 5 presentan prácticamente el mismo sentido de movimiento, alrededor de 80°, en cambio

el equipo 2 presenta una oscilación aproximadamente de 170° , por lo que, se infiere que la frecuencia identificada corresponde a un modo torsional, cuya representación se muestra en la Figura 4.5, en el que su centro de rotación se ubica bajo el equipo 2, entre los equipos 2 y 4, logrando el mayor desplazamiento en el equipo 5, aproximadamente a unos 80° .

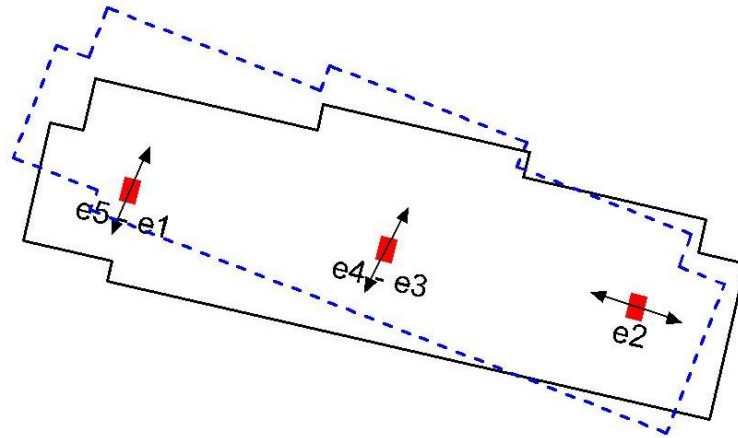


Figura 4.5 Esquemización del movimiento torsional para 2.1 Hz del edificio N°1

4.2.2 Edificio N°2 resultado razón espectral (H/V - H/H) y análisis rotacional

En la Figura 4.6 se identifica el edificio N°2 (6 pisos) y la disposición de los cinco equipos utilizados. La ubicación de los equipos es la siguiente: el equipo 1 en la azotea, el equipo 2, 4 y 5 en el 6^{to} piso y el equipo 3 en el 1^{er} piso alineado verticalmente con los equipos 1 y 4.

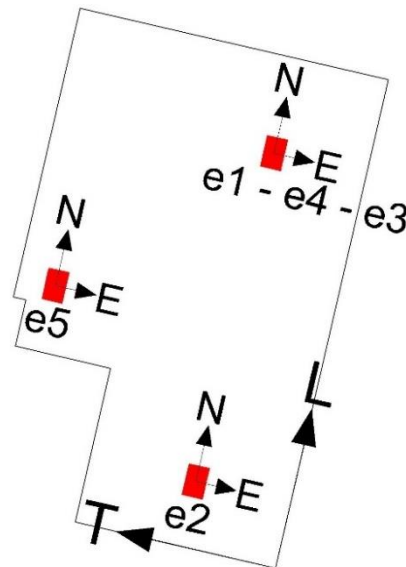


Figura 4.6 Vista en planta del edificio N°2. Ubicación, orientación y numeración de equipos utilizados

En la Figura 4.7, para cada dirección de análisis (Longitudinal y Transversal) se aprecia la razón espectral H/V y en la Figura 4.8 la razón espectral H/H del registro de mediciones de vibración ambiental realizado. En el edificio N°2, aplicados ambos métodos, los modos de vibración obtenidos en cada dirección, no resultaron significativamente diferentes, por lo que se establece como modo de vibración la frecuencia con mayor razón espectral aproximando su valor al decimal más cercano.

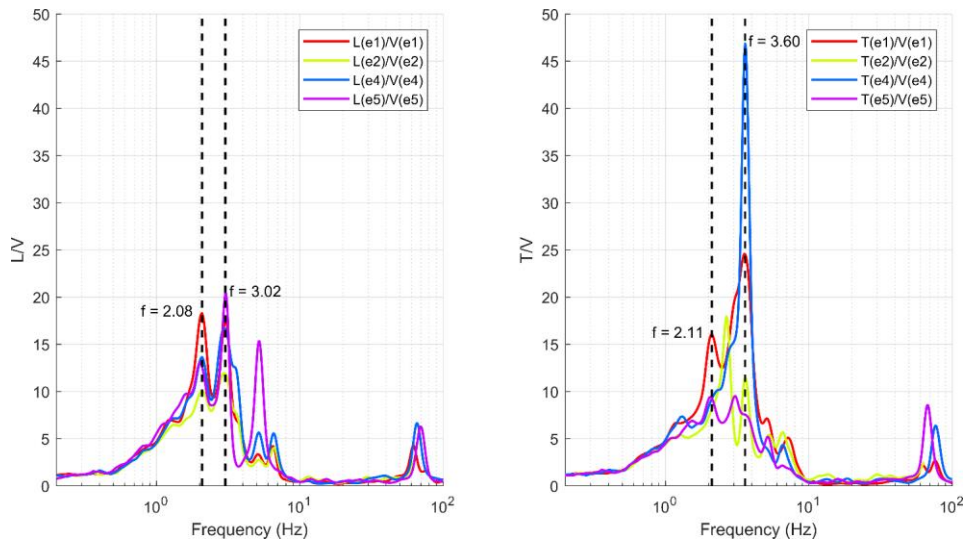


Figura 4.7 Razón espectral H/V por componente de los equipos 1, 2, 4 y 5. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio

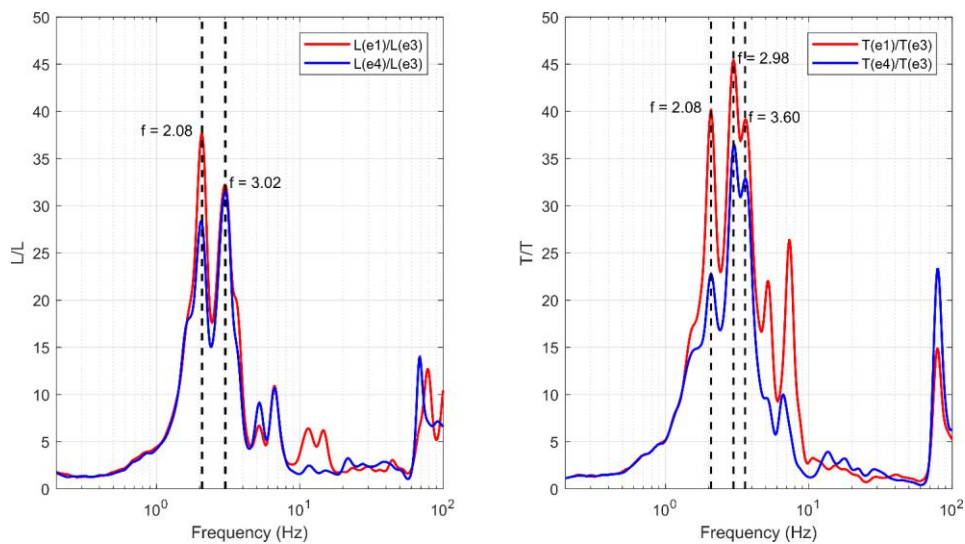


Figura 4.8 Razón espectral H/H por componente entre los equipos 1 – 3 y 4 – 3. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio

Las frecuencias correspondientes a los modos de vibrar del edificio N°2 en la dirección longitudinal son 2.1 Hz y 3 Hz, a su vez, en la dirección transversal son 2.1 Hz, 3 Hz y 3.6 Hz. De los modos de vibración identificados, las frecuencias 2.1 Hz y 3 Hz, se repiten en ambas direcciones de análisis, lo cual, puede ser atribuido a modos rotacionales o a modos traslacionales en una dirección diferente a los ejes principales del edificio.

Del análisis rotacional aplicado a las mediciones de vibración ambiental realizadas en el edificio N°2, se logra identificar la dirección de oscilación que presentará la estructura en sus modos de vibración. En la Figura 4.9, imagen izquierda, se muestra el análisis rotacional para una frecuencia de 2.1 Hz y en imagen derecha para 3.6 Hz, siendo ambos valores para los 4 equipos ubicados en altura.

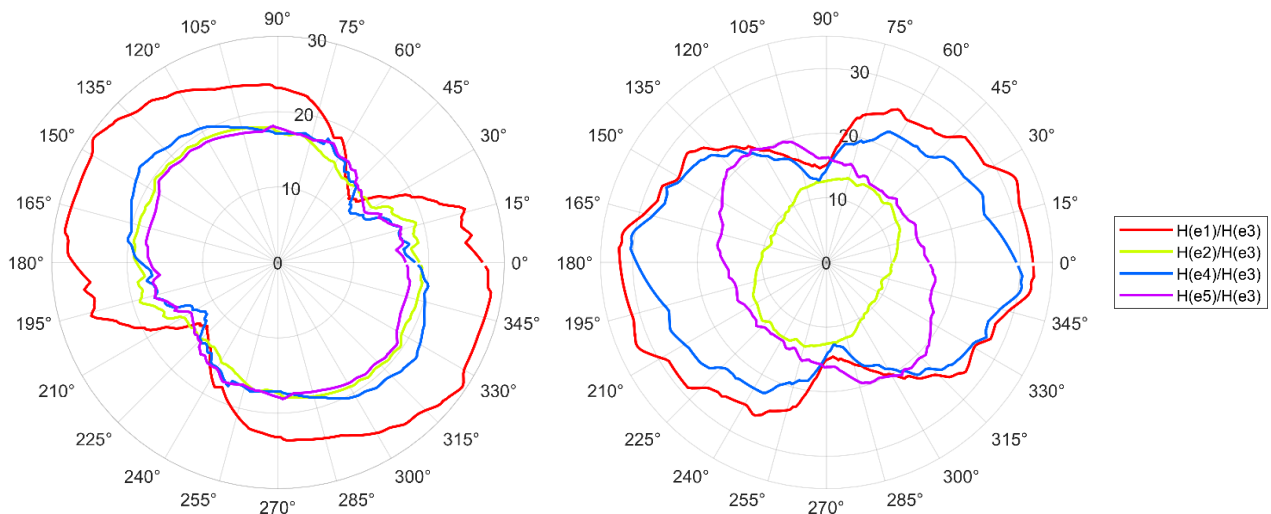


Figura 4.9 Análisis rotacional en 2.1 Hz (imagen izquierda) y 3.6 Hz (imagen derecha) para los equipos 1, 2, 4 y 5 normalizados por el equipo 3

Para una frecuencia de 2.1 Hz, el análisis rotacional (Figura 4.9 izquierda) se observa que todos los equipos oscilan preferentemente en una misma dirección, de aproximadamente 148° con respecto a la a la señal “E” de cada equipo indicado en la Figura 4.6.

Para 3.6 Hz (Figura 4.9 derecha) del análisis rotacional se infiere que la respuesta calculada corresponde a un modo torsional, ya que, la tendencia de máxima oscilación es distinta entre los equipos. Los equipos 1 y 4, se mueven en la misma dirección de aproximadamente 190°, lo anterior debido a que se encuentran alineados verticalmente, ubicados en la azotea y sexto piso respectivamente, en cambio, el equipo 2 oscila en 60° y el equipo 5 alrededor de 130°. Acorde a lo

anterior, en la Figura 4.10 se grafica el movimiento particular que presenta cada equipo, a modo de visualizar el modo torsional.

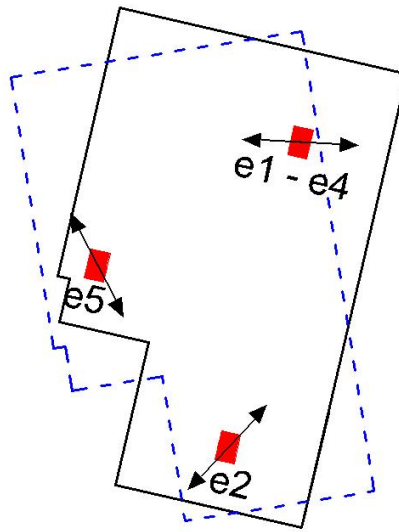


Figura 4.10 Esquemización del movimiento torsional para 3.6 Hz del edificio N°2

Producto de su mayor frecuencia, si bien, la torsión es más agresiva, la masa equivalente asociada a este modo de vibración es menor a comparación de las demás frecuencias identificadas.

En la Figura 4.11, se observa el análisis rotacional para una frecuencia de 3 Hz, en este modo de vibración la dirección de movimiento de cada equipo es distinta, por lo que, el modo de vibración corresponde a ser del tipo torsional. En la Figura 4.12 se grafica la dirección de movimiento calculada de cada equipo observada en la Figura 4.11, en la que, según la amplitud y sentido de movimiento que representa cada equipo, se infiere el movimiento torsional.

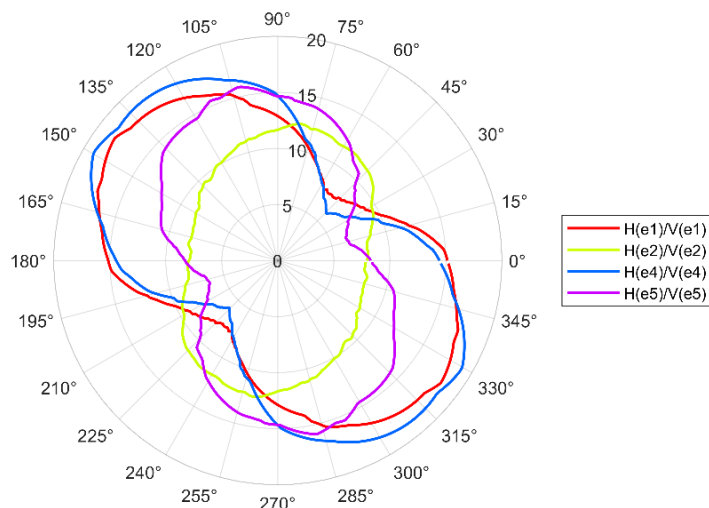


Figura 4.11 Análisis rotacional en 3 Hz para los equipos 1, 2, 4 y 5 normalizados por su componente vertical

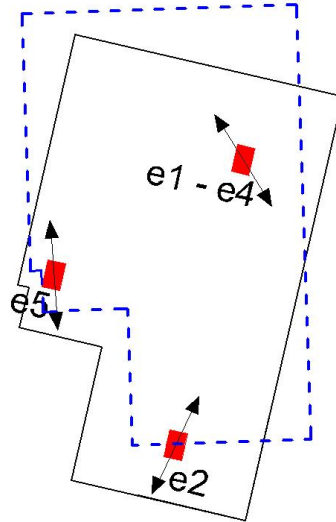


Figura 4.12 Esquematización del movimiento torsional para 3 Hz del edificio N°2

4.2.3 Edificio N°3 resultado razón espectral (H/V - H/H) y análisis rotacional

En la Figura 4.13, se identifica el edificio N°3 (2 pisos) y la disposición de los cinco equipos utilizados. La ubicación de los equipos es la siguiente: los equipos 1, 3 y 5 en el 2^{do} piso y los equipos 2 y 4 en el 1^{er} piso alineado verticalmente con los equipos 3 y 5 respectivamente.

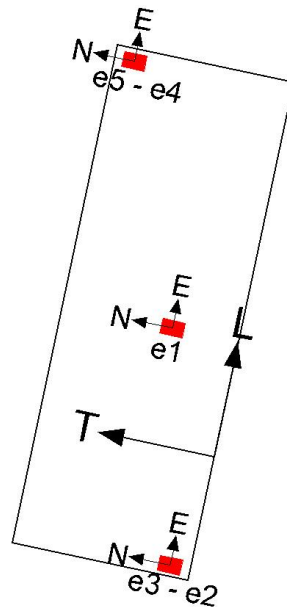


Figura 4.13 Vista en planta del edificio N°3. Ubicación, orientación y numeración de equipos utilizados

En la Figura 4.14, para cada dirección de análisis (Longitudinal y Transversal) se aprecia la razón espectral H/V y en la Figura 4.15 la razón espectral H/H del registro de mediciones de vibración ambiental realizado. El resultado entregado por ambos métodos concuerda satisfactoriamente, donde las variaciones son de decimales.

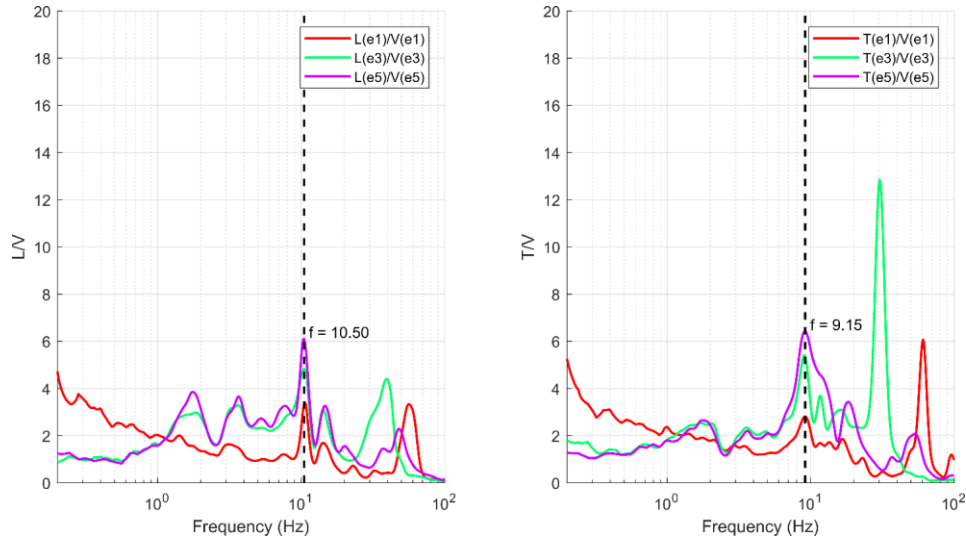


Figura 4.14 Razón espectral H/V por componente de los equipos 1, 3, y 5. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio

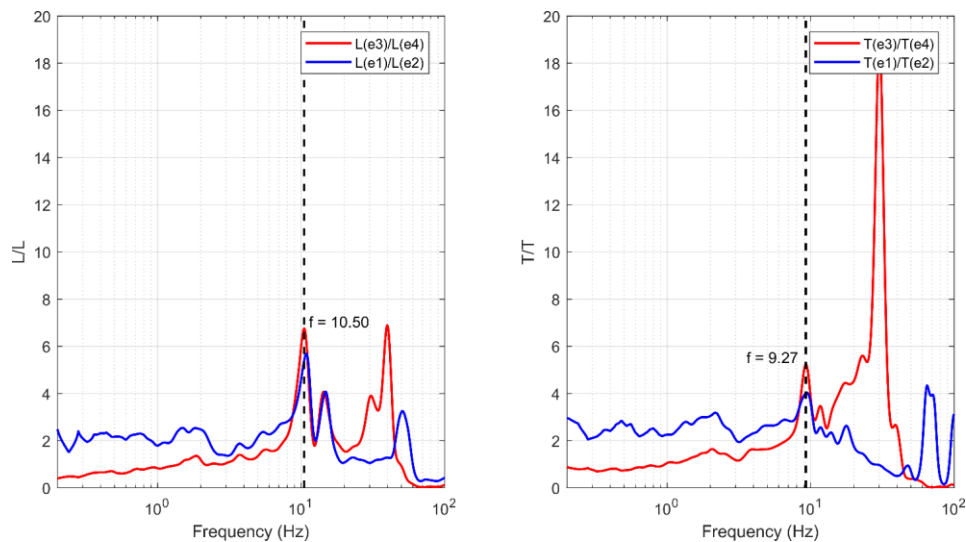


Figura 4.15 Razón espectral H/H por componente entre los equipos 1 – 3 y 4 – 3. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio

Las frecuencias correspondientes a los modos de vibrar del edificio N°3 en la dirección longitudinal es 10.5 Hz y en la dirección transversal es 9.2 Hz.

Del análisis rotacional, en la Figura 4.16, imagen derecha, se muestra la dirección de oscilación en una frecuencia de 10.5 Hz para los 3 equipos ubicados en altura, se observa que los equipos 1 y 3 se mueven en la misma dirección, alrededor de los 10°, en cambio, el equipo 5 no logra captar un sentido de movimiento, lo que puede explicarse a la alta rigidez de edificio N°3 en la dirección longitudinal. Teniendo presente que, para el análisis rotacional 0° indica la señal “E” registrada por cada equipo, coincidente con el sentido longitudinal del edificio, es consistente que la estructura oscile prácticamente en el mismo sentido del eje fuerte de la estructura.

Para la frecuencia fundamental de 9.2 Hz, en la dirección del eje débil (Figura 4.16 izquierda), la dirección de movimiento coincide en 85° para los equipos 1 y 5, en cambio, el equipo 3 toma un sentido alrededor de 75°. Si bien esta diferencia de movimiento se podría atribuir a un modo torsional, se debe considerar que el operador encargado de posicionar los equipos y alinearlos a algún eje estructural dentro de la edificación, realiza la acción a simple vista sin apoyo tecnológico. En consideración a lo anterior, la diferencia entre la dirección de oscilación entre los 3 equipos no es de más de 10°, por lo que, se asume un sentido de movimiento para 9.2 Hz alrededor de 85°, lo que se ajusta a pertenecer a la dirección del eje débil del edificio.

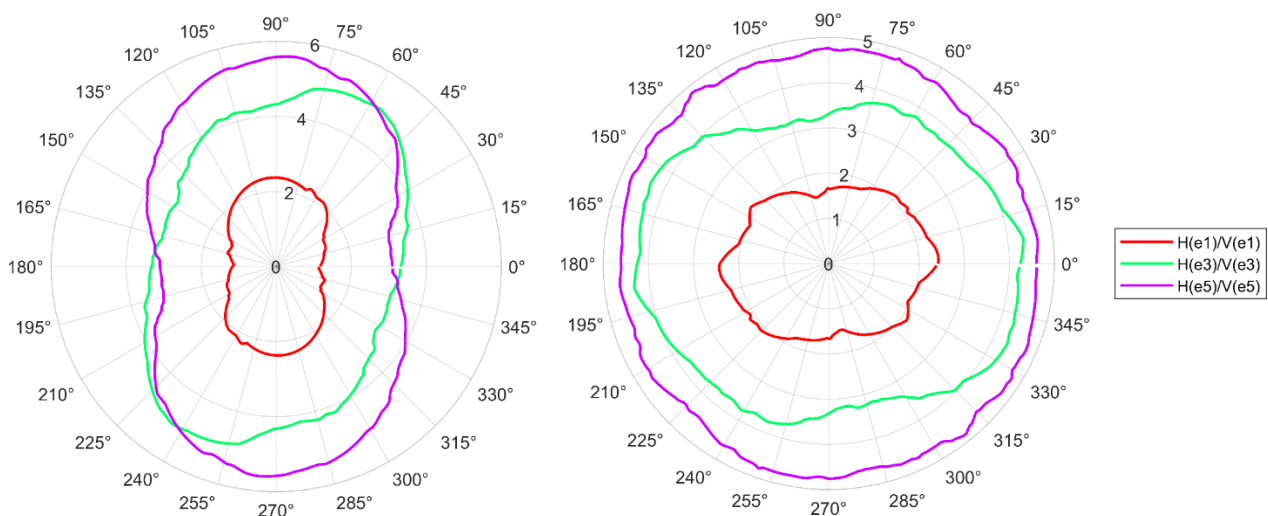


Figura 4.16 Análisis rotacional en 9.2 Hz (imagen izquierda) y 10.5 Hz (imagen derecha) para los equipos 1, 3 y 5 normalizados por su componente vertical

4.2.4 Edificio N°4 resultado razón espectral (H/V - H/H) y análisis rotacional

En la Figura 4.17 se identifica el edificio N°4 (4 pisos) y la disposición de los cinco equipos utilizados. La ubicación de los equipos es la siguiente: los equipos 1, 4 y 5 en el 4^{to} piso y los equipos 2 y 3 en el 1^{er} piso, alineados verticalmente a los instrumentos 5 y 4 respectivamente.

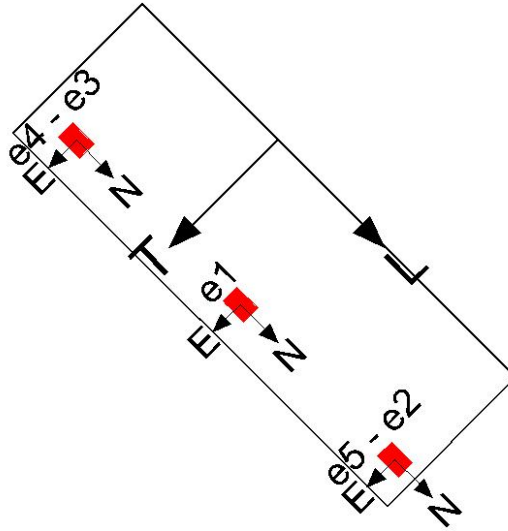


Figura 4.17 Vista en planta del edificio N°4. Ubicación, orientación y numeración de equipos utilizados

En la Figura 4.18, para cada dirección de análisis (Longitudinal y Transversal) se aprecia la razón espectral H/V y en la Figura 4.19 la razón espectral H/H del registro de mediciones de vibración ambiental realizado.

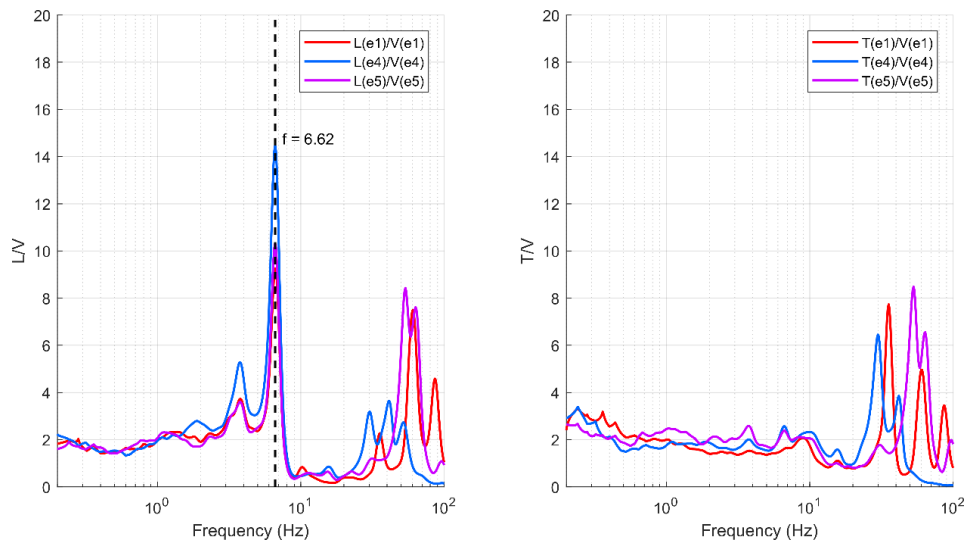


Figura 4.18 Razón espectral H/V por componente de los equipos 1, 4, y 5. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio

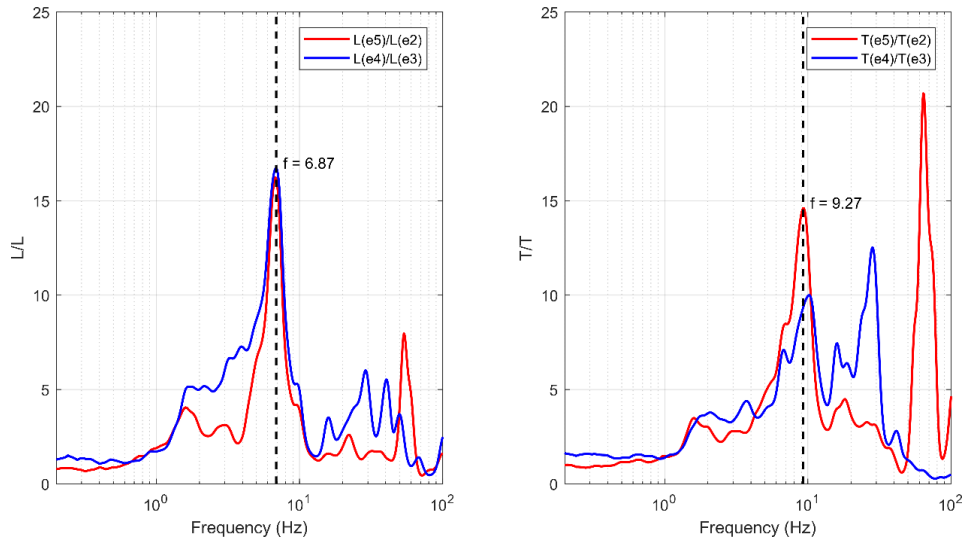


Figura 4.19 Razón espectral H/H por componente entre los equipos 5 – 2 y 4 – 3. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio

En la dirección longitudinal el modo de vibración se establece en una frecuencia de 6.7 Hz dado la diferencia obtenida entre los métodos aplicados H/V y H/H. En la dirección transversal el modo de vibración es de 9.3 Hz (frecuencia captada únicamente por el metodo H/H). Cabe señalar que la frecuencia en la dirección longitudinal resulta menor que en el sentido transversal, lo cual es contraintuitivo ya que resulta ser una frecuencia mayor en el eje débil. Si bien, no se tiene mayor información de las dimensiones de los elementos estructurales, en terreno se evidenciaron arriostramientos en la dirección transversal, dotando la estructura con mayor rigidez, cobrando sentido los resultados obtenidos.

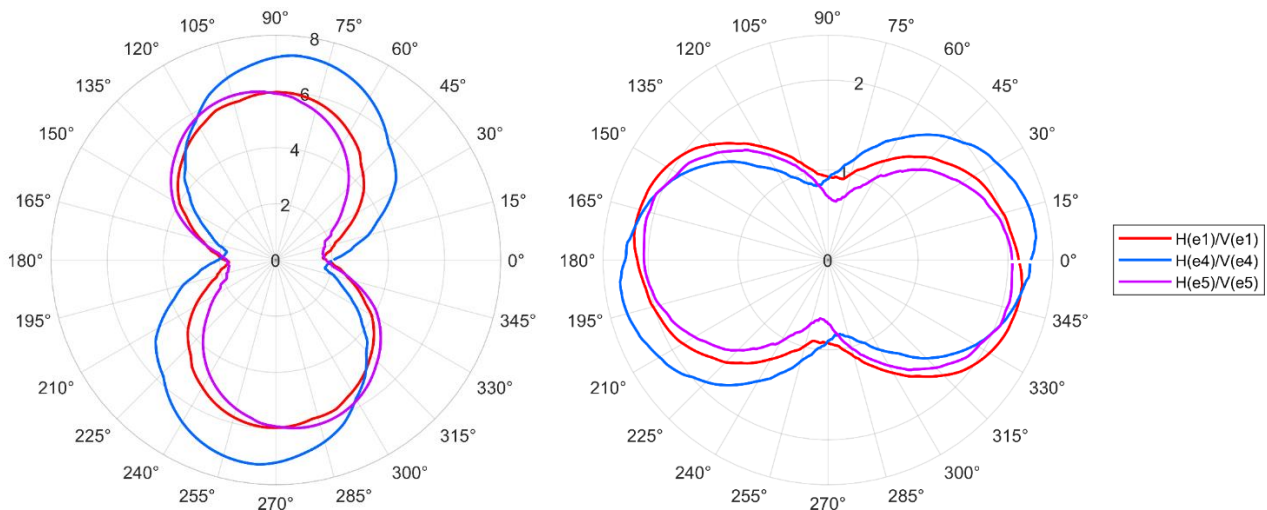


Figura 4.20 Análisis rotacional en 6.8 Hz (imagen izquierda) y 9.3 Hz (imagen derecha) para los equipos 1, 4 y 5 normalizados por su componente vertical

Del análisis rotacional, en la Figura 4.20, imagen izquierda, se muestra la dirección de oscilación en una frecuencia de 6.8 Hz para los tres equipos ubicados en altura, donde se observa una clara tendencia de movimiento alrededor de 95° , lo que concuerda con la dirección longitudinal del edificio. En la Figura 4.20, imagen derecha, se observa el análisis rotacional para 9.3 Hz (frecuencia identificada en el sentido transversal) donde los tres equipos indican la misma tendencia de movimiento, aproximadamente de 10° , y teniendo presente que en el análisis rotacional 0° indica la componente “E” de cada equipo, es consistente que la estructura oscile prácticamente en el sentido transversal.

4.2.5 Razón espectral H/V del sitio

Realizada la caracterización dinámica de los edificios, se da paso al estudio de la matriz de suelo del caso de estudio T05A. En la Figura 4.21 se señala la ubicación de los equipos en los distintos arreglos de mediciones ambientales realizadas en el sitio, los cuales fueron orientados en dirección al norte magnético con la ayuda de una brújula, por lo que su dirección coincide con la dispuesta por la estación sísmica.



Figura 4.21 Mediciones de vibración ambiental realizadas en el sitio cercano a la estación T05A, identificadas por número de equipo y color de marcador

Las mediciones de microtremores señaladas en la Figura 4.21, se procesaron mediante el *Software* Geopsy v2.9.1, según como se describe en la sección 3.6, con la finalidad de obtener la frecuencia predominante del suelo e identificar la existencia de ortogonalidad. En la Figura 4.22 se muestra la razón espectral H/V, en las orientaciones 68°, 127°, 320° y 354°, correspondientes al sentido de movimiento de los edificios N°1, N°2 y N°3 (Figura 3.3), para seis mediciones realizadas alrededor de la estación en estudio, puesto que es de interés identificar el comportamiento del suelo en dichas direcciones. El color de cada curva HVSR y la numeración mostrada en la leyenda se corresponde a los indicadores de medición en la Figura 4.21.

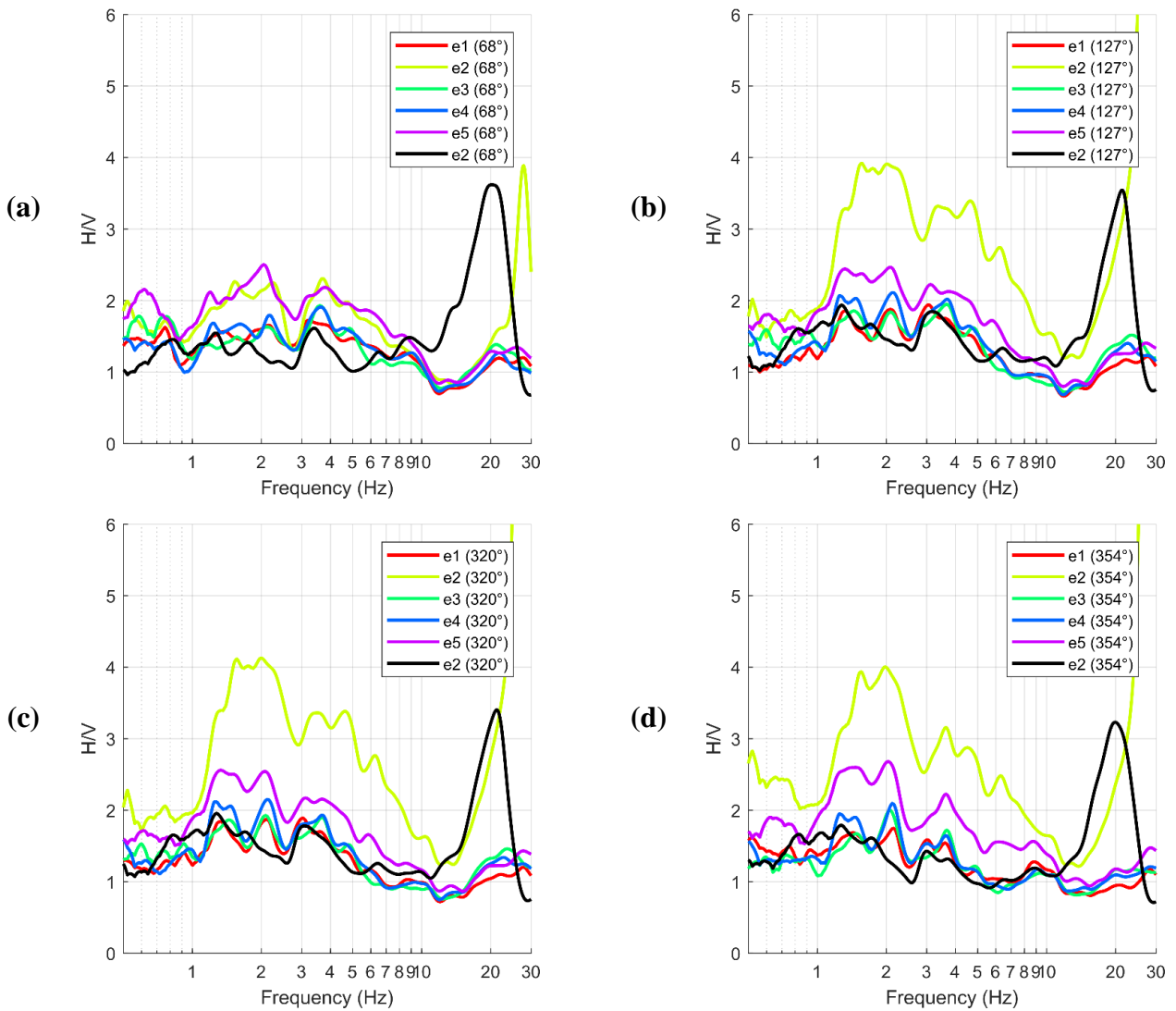


Figura 4.22 Curva HVSR direccionales, en imagen (a) 68°, imagen (b) 127°, imagen (c) 320° e imagen (d) 354°, de las mediciones realizadas por los equipos ubicados alrededor de la estación T05A

Las curvas HSVR indicadas en la Figura 4.22 se grafican en un rango de frecuencias de 0.5 Hz a 30 Hz, en las que se observa en todas las direcciones una respuesta plana, donde no se destaca una frecuencia fundamental (f_0), con valores de H/V no mayores a 2 entre 0.5 y 10 Hz, a excepción de las curvas correspondientes a los equipos 2 (verde claro) y 5. A su vez el equipo 2 (negro) muestra valores de amplificación alrededor de los 20 Hz, por lo que se infiere que una respuesta principalmente plana de la razón espectral HVSr, junto al periodo identificado de 0.02 s es característico de un material rígido. De la teoría unidimensional, se obtuvo que la f_0 del sitio es aproximadamente de 6.1 Hz, por lo que el peak identificado puede ser debido a un modo superior. Por otro lado, en todas direcciones se observa una tendencia a desamplificar la amplitud H/V alrededor de 2.7 Hz y 13 Hz, así como también, una amplificación en 2.1 Hz y 3.5 Hz aproximadamente.

Para obtener el H/V rotado, se seleccionó el equipo 1 (color rojo) y equipo 4 (color azul) como representativos del sitio, las que muestran en la Figura 4.23. De estas curvas azimutales no se identifica una clara direccionalidad del terreno, indicando alguna zona con una notoria diferencia de rigidez, sin embargo, en algunas frecuencias se observa una disminución de la amplitud H/V, alrededor de 40° y una amplificación de la razón espectral alrededor de 130° .

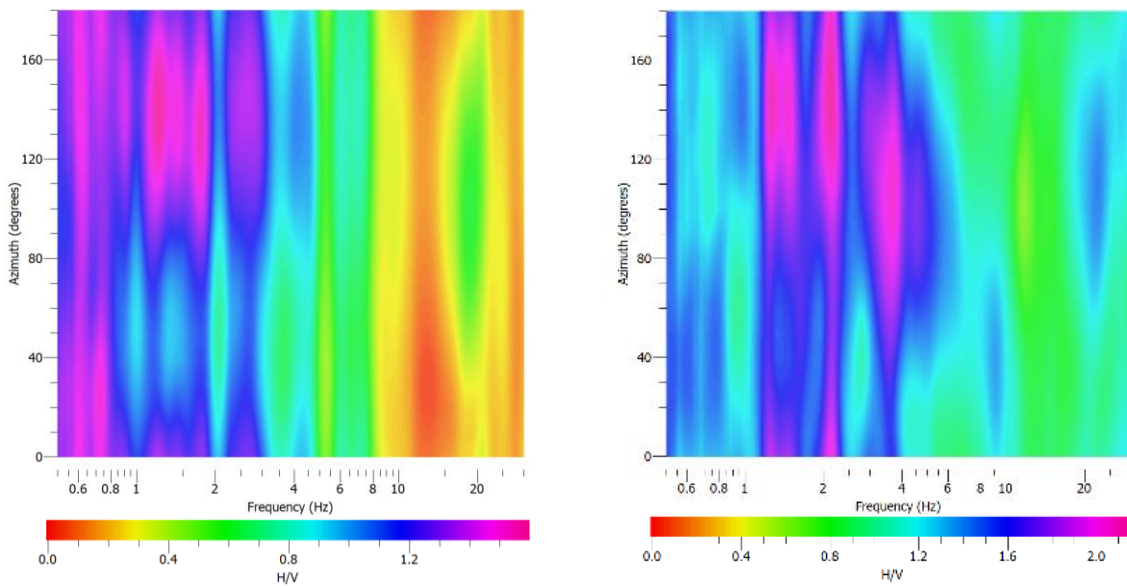


Figura 4.23 Curvas azimutales, H/V rotado equipo 1 (rojo) y equipo 4 (azul)

4.2.6 Función de transferencia teórica y Vs30

El CSN tiene a disposición un perfil de velocidad de ondas de corte obtenido del sitio cercano a la estación T05A, donde en la Figura 4.24, se muestra el perfil Vs junto a su respectivo valor de Vs30 calculado y la función de transferencia teórica según los estratos de suelo identificados para la zona. De la inversión llevada a cabo, se muestran un estrato de suelo, con una profundidad a la roca madre de 7 metros, que a su vez el sitio presenta un valor de Vs30 de 1020 (m/s) y una frecuencia predominante de 6.1 Hz (0.16 s), obtenidos del perfil Vs. Así alrededor de f_0 del terreno, el contenido de frecuencias del sismo se verá amplificado, confiriendo la posibilidad de aumentar o disminuir los efectos de la ISE, además se infiere que el sitio presenta gran rigidez, con un bajo contraste de impedancia. De lo valores Vs30 y f_0 , junto a una respuesta plana de H/V (Figura 4.22), de acuerdo con lo establecido en el Decreto Supremo N°61 (Minvu), el suelo clasifica como tipo A, indicando roca, suelo cementado.

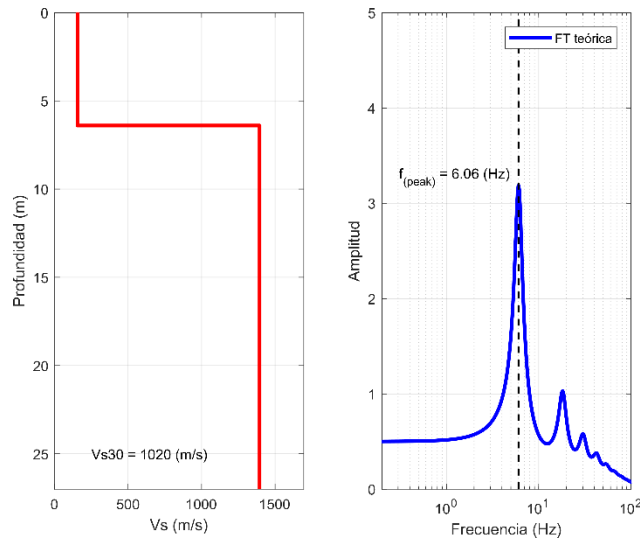


Figura 4.24 Perfil Vs (imagen izquierda) y función de transferencia teórica (imagen derecha)

4.2.7 Estaciones a campo libre

Se calcularon las psuedos aceleraciones rotadas para estaciones sísmicas ubicadas a campo libre, con el propósito de comparar su respuesta con los casos de estudio en busca de variaciones o tendencias que posibiliten identificar la presencia de ISE. En la Figura 4.25, se señalan en color azul las estaciones

seleccionadas, de las que distintos investigadores han caracterizado la respuesta de sitio en las estaciones sísmicas del norte de Chile *e.g.* González (2017), Leyton *et al.* (2018), aplicando la razón H/V de espectro de respuesta (HVRSR), los resultados para las estaciones de interés se resumen en la Tabla 4.1.



Figura 4.25 Ubicación de estaciones en estudio y a campo libre

En la Tabla 4.1, se debe entender por categoría I a las estaciones con formas planas que no exhiben ningún peak claro o con amplificaciones menores a 2. En esta categoría las estaciones se encuentran principalmente en basamento rocoso, además los valores de Vs30 son reportados por el CSN y Bastías y Montalva (2016). Las estaciones a campo libre seleccionadas (Figura 4.25), se encuentran lo más cercano a los casos de estudio y presentan valores similares de Vs30, con el propósito que no exista demasiada diferencia en los efectos de sitio. De lo anterior se puede inferir que la respuesta obtenida de estaciones como T05A y T06A es consistente con los sondajes reportados por Becerra *et al.* (2015).

Tabla 4.1 Estaciones sísmicas en estudio y a campo libre utilizadas

Estación	Vs30 (m/s)	T (s)	f0 (Hz)	Categoría
T05A	1020	Plano	Plano	I
T06A	1263	Plano	Plano	I
PB02	746	Plano	Plano	I
TA01	1339	Plano	Plano	I
HMBCX	743	Plano	Plano	I
PSGCX	1639	Plano	Plano	I

4.2.8 Análisis rotacional del sitio y de los registros sísmicos

De los registros de vibración ambiental, ejecutados alrededor de la estación sísmica T05A (Figura 4.21), se puede analizar la matriz de suelo en todas las direcciones, en las frecuencias correspondientes a los modos de vibración de los edificios N°1, N°2, N°3 y N°4, lo que permite visualizar aproximadamente cómo se comportaría el sitio frente a una frecuencia dada. En la Tabla 4.2, se resumen los modos de vibración de cada edificio junto a su dirección aproximada de movimiento, calculadas en las secciones 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 y 4.2.4.

Tabla 4.2 Modos de vibración de cada edificio y respectiva dirección de movimiento

Edificio	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Mov.
1	2.1	0.48	rot
	2.8	0.36	7°
2	2.1	0.48	140°
	3	0.33	rot
	3.6	0.28	rot
3	9.2	0.11	85°
	10.5	0.10	10°
4	6.8	0.15	95°
	9.3	0.11	5°

En la Figura 4.26 se observa el análisis rotacional realizado al registro del equipo 3 (color verde) para las distintas frecuencias respectivas de los modos de vibrar de los edificios.

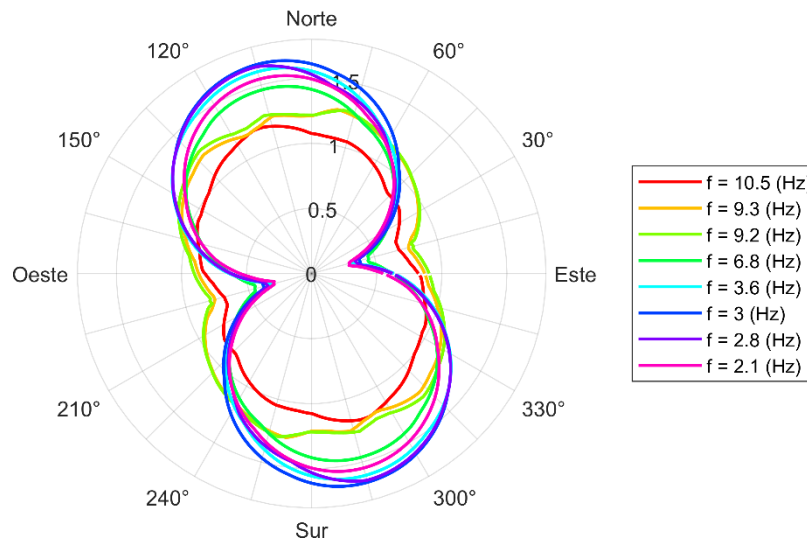


Figura 4.26 Análisis rotacional de la estación T05A para el equipo 3 en distintas frecuencias

El comportamiento del análisis rotacional en la Figura 4.26, es bastante regular para las frecuencias desde 2.1 Hz hasta 10.5 Hz orientadas alrededor del rango 90° - 120° . En esta dirección el sitio provocará un aumento en la amplitud de la onda sísmica, por otro lado, entre 345° y 75° por sobre 9.2 Hz el análisis rotacional se mantiene alrededor de uno, no modificando la amplitud de onda y bajo 6.8 Hz, se observa mitigación, lo que puede indicar que el sitio presente cierta direccionalidad, por lo cual, de existir variaciones en la amplitud de onda en el rango señalado, estas pueden ser debidas a la matriz de suelo.

Realizado el análisis rotacional al sitio, se procede con el análisis rotacional del registro sísmico de la estación T05A, para identificar posibles variaciones debidas a la ISE. Recordando que el sentido de oscilación de cada edificio tiene como eje de referencia la señal horizontal “E” de los equipos ubicados dentro del edificio, los que a su vez fueron alineados con algún eje estructural, se determinó la rotación que presenta el edificio con respecto al eje cardinal “Este”, para así poder alinear su dirección de movimiento con el acelerómetro en el mismo sentido, donde los efectos de la ISE con la estación sísmica son más evidentes. En la Figura 4.27, mediante el *software* Google Earth se obtiene una imagen orientada en dirección al punto cardinal “Norte”, luego en el *software* AutoCad se traza un plano cartesiano en cada estructura y se obtiene el ángulo de rotación con referencia al eje cardinal “Este”.

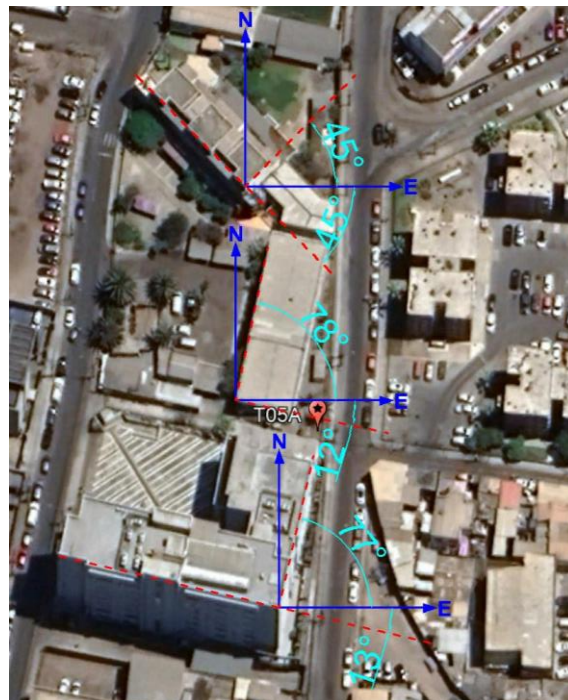


Figura 4.27 Ángulo de rotación respecto al eje cardinal “Este” de cada estructura

Calculados los modos de vibración y la dirección de movimiento de cada estructura en dichas frecuencias, y considerando la orientación que presenta cada edificio (Figura 4.27), se grafican los espectros de aceleraciones rotado para el registro de la estación T05A y los registros de las estaciones a campo libre, donde en la representación gráfica, las “líneas negras continuas” indican la orientación del inmueble acorde a los ángulos logrados en la Figura 4.27, y la “línea roja segmentada” indica la orientación del movimiento de las edificaciones, las que se resumieron en la Tabla 4.2. Por otro lado, en aquellas gráficas que solo se indique la orientación del inmueble hace referencia a un modo rotacional. Lo señalado anteriormente aplica a cada figura según la frecuencia del edificio.

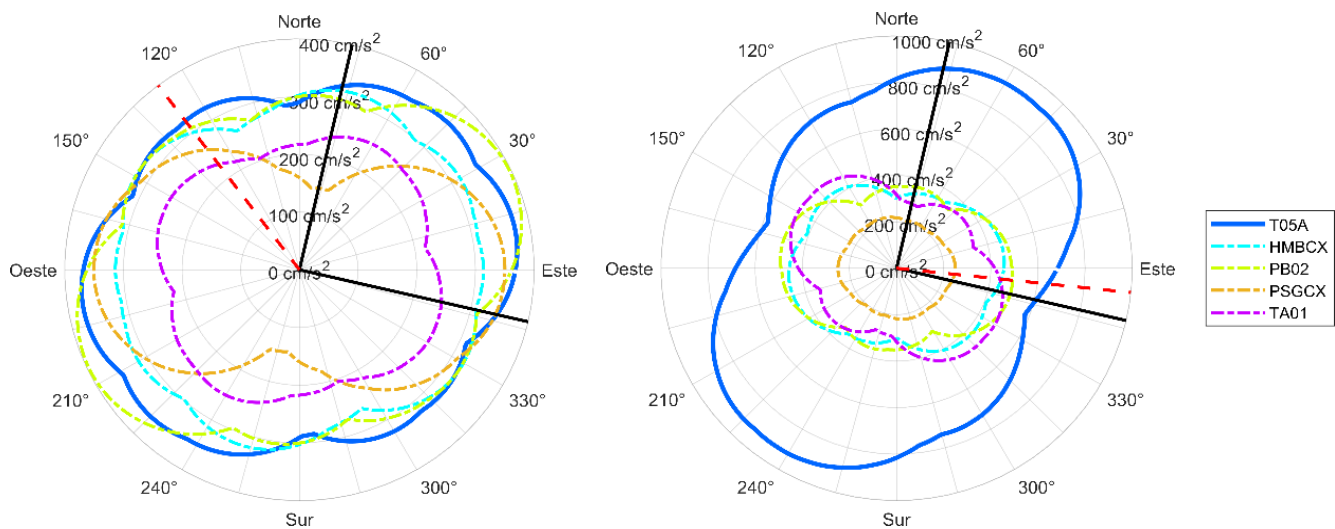


Figura 4.28 Análisis rotacional de los registros sísmicos para 2.1 Hz (imagen izquierda) en la que interactúa el edificio N°1 en su modo torsional junto al edificio N°2 en su modo traslacional y 2.8 Hz (imagen derecha) modo de vibración traslacional del edificio N°1. Las líneas negras continuas indican la orientación del edificio y la línea roja segmentada indica la dirección de oscilación

Para una frecuencia de 2.1 Hz, Figura 4.28 imagen izquierda, se observa que, entre las distintas estaciones graficadas, que si bien poseen valores de pseudo aceleración similares, existe una asimetría en la respuesta obtenida por el análisis rotacional, lo que muestra que cada sitio posee un comportamiento independiente. En la frecuencia señalada, el edificio N°1 en su modo rotacional y el edificio N°2 en su modo traslacional, interactúan con la estación sísmica, donde alrededor de 127° se identifica una muy leve disminución de la pseudo aceleración. En el mismo contexto, la respuesta que muestra el sitio, obtenida por HVSR, en una dirección de 127° presentada en la Figura 4.22 (b) indica que la matriz de suelo presenta un peak de amplificación en la frecuencia de 2.1 Hz, lo cual, no se reflejada en las pseudo a aceleraciones rotadas de la estación T05A, lo que es posible atribuir a una

compensación por parte de la ISE. De los distintos análisis rotacionales que se desarrollan a continuación, el análisis rotacional calculado en 2.1 Hz, es la única frecuencia en la cual, entre las distintas estaciones graficadas, los valores de pseudo aceleraciones en todos los ángulos de rotación tienen valores similares entre sí, lo que se puede atribuir a la ISE generada por el modo rotacional.

Para una frecuencia de 2.8 Hz, Figura 4.28 imagen derecha, la forma que consigue el análisis rotacional en la estación T05A es mucho mayor y muestra su peak de aceleración alrededor de los 60°, en comparación de las demás estaciones a campo libre. El edificio N°1 interactúa con su modo traslacional a los 354°, dirección en la que no se observa una disminución o amplificación de la onda sísmicas en sus pseudo aceleraciones, sin embargo, cercano a esta dirección se mitiga la pseudo aceleración. Se debe hacer notar que la máxima amplitud de pseudo aceleraciones de la estación T05A se orienta alrededor de 60°, siendo ortogonal a la respuesta resultante por las demás estaciones a campo libre, así también que, esta orientación prácticamente coincide con la orientación de los ejes principales del edificio, de lo que se deduce presencia de ISE.

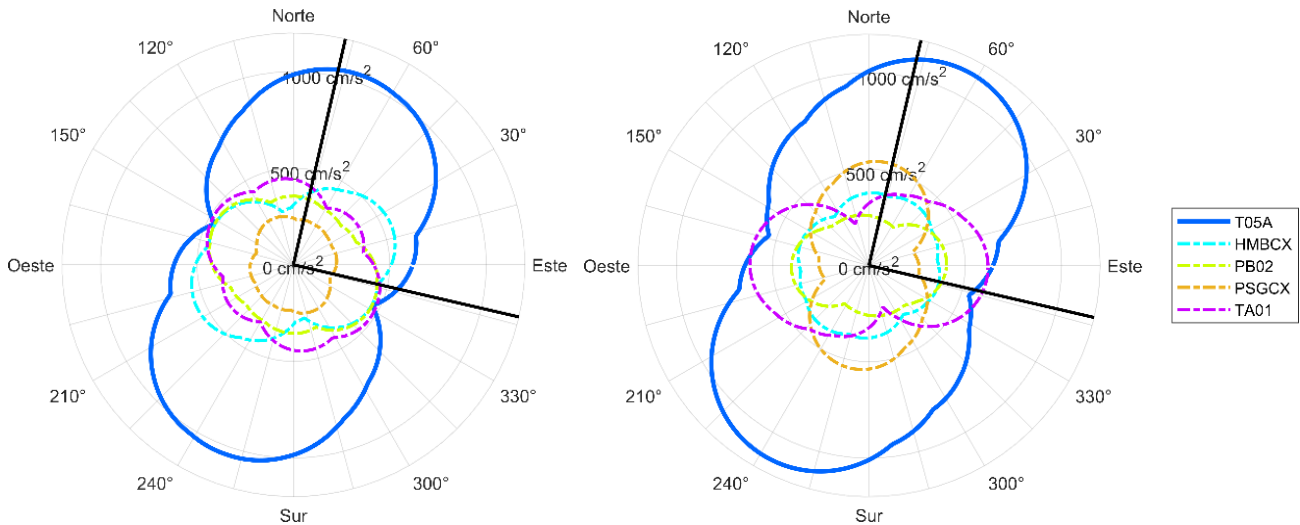


Figura 4.29 Análisis rotacional de los registros sísmicos para 3 Hz (imagen izquierda) y 3.6 Hz (imagen derecha), correspondientes a los modos de vibración rotacionales del edificio N°2. Las líneas negras continuas indican la orientación del edificio

Para las frecuencias de 3 Hz y 3.6 Hz, Figura 4.29, se observa que la pseudo aceleración rotada tiene una mayor disminución alrededor de 330°, y también muestra una tendencia de máximas aceleraciones mucho mayores a las demás estaciones presentadas alrededor de los 70°, dirección que coincide con la orientación del edificio. Ambas frecuencias corresponden a modos torsionales identificados en el edificio N°2, donde la mitigación observada en la frecuencia de 3.6 Hz, presenta en su modo de

vibración una menor masa rotacional asociada, lo que probablemente explicaría que sea menor a la presentada en la frecuencia de 3 Hz.

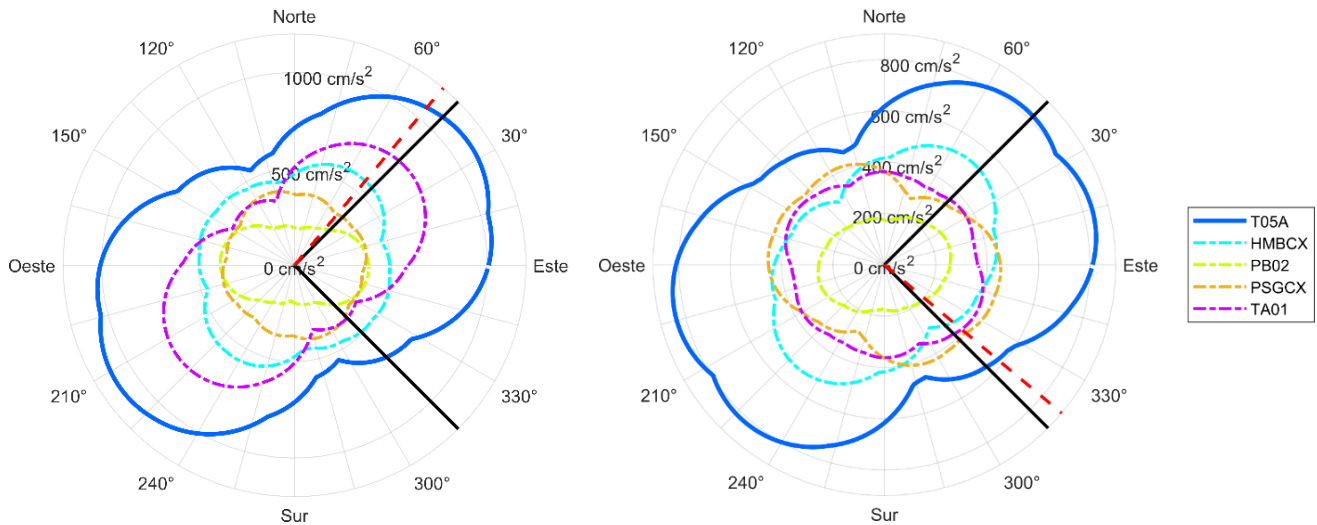


Figura 4.30 Análisis rotacional de los registros sísmicos para 6.8 Hz (imagen izquierda) y 9.3 Hz (imagen derecha), correspondientes a los modos de vibración traslacionales del edificio N°4. Las líneas negras continuas indican la orientación del edificio y la línea roja segmentada indica la dirección de oscilación

El análisis rotacional para los modos de vibración del edificio N°4 (6.8 Hz - 9.3 Hz) se presentan en la Figura 4.30, para ambas gráficas se observa en la pseudo aceleración rotada de la estación T05A una tendencia de máximas aceleraciones en dirección de los 45°, y la respuesta es menor alrededor de los 300°, respuesta que coincide con la orientación de los ejes principales, además esta dirección no es atribuible a la matriz de suelo, ya que para estas frecuencias del análisis rotacional y HVSR no se observan amplificaciones, evidenciando la presencia de ISE.

El análisis rotacional para el modo fundamental de vibración del edificio N°3, corresponde una frecuencia de 9.2 Hz, Figura 4.31 izquierda, se observa en las pseudo aceleraciones rotadas de la estación T05A una tendencia de máximas aceleraciones en dirección de los 30°, y la respuesta es menor alrededor de los 285°. Esta forma no coincide con la orientación del edificio, no evidenciando la presencia de ISE, una posible explicación es que la masa asociada al modo de vibración no es suficiente para afectar significativamente al contenido de frecuencias. Para 10.5 Hz (Figura 4.31 derecha), la respuesta obtenida del análisis rotacional se alinea con los ejes del edificio N°3, una frecuencia mayor junto a su dirección de oscilación contribuye a que los efectos de la ISE sean notorios en la pseudo aceleración rotada.

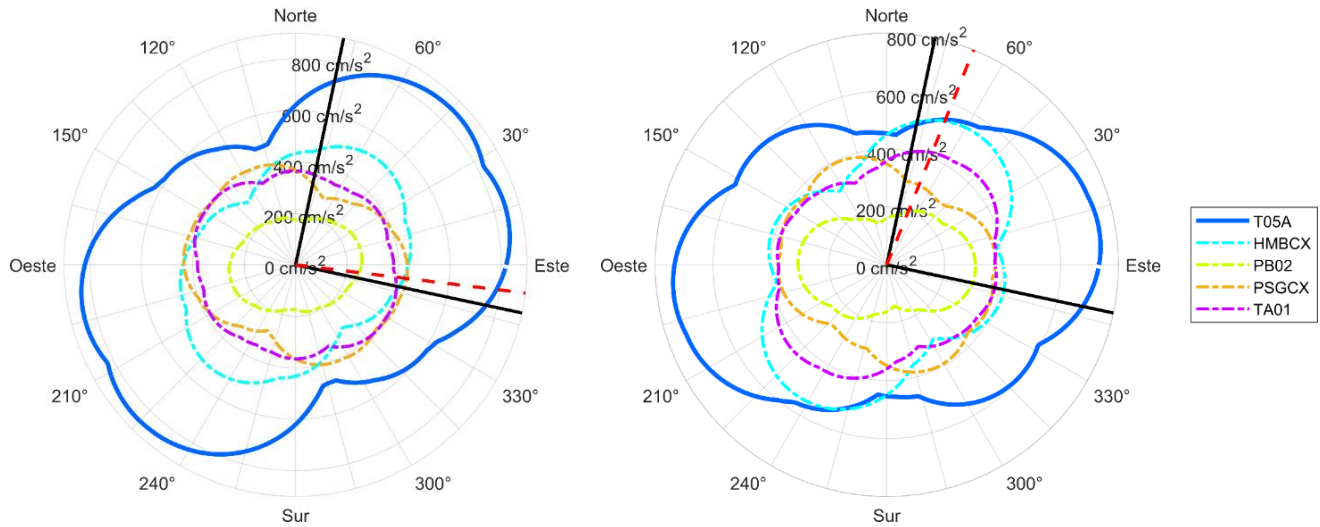


Figura 4.31 Análisis rotacional de los registros sísmicos para 9.2 Hz (imagen izquierda) y 10.5 Hz (imagen derecha), correspondientes a los modos de vibración traslacionales del edificio N°3. Las líneas negras continuas indican la orientación del edificio y la línea roja segmentada indica la dirección de oscilación

4.3 Resultados y análisis de la estación T06A

4.3.1 Edificio N°1 resultados razón espectral (H/V - H/H) y análisis rotacional

En la Figura 4.32 se identifica el edificio N°1 (2 pisos) y la disposición de los cuatro equipos utilizados. La ubicación de los equipos es la siguiente: el equipo 4 y 5 en la azotea, el equipo 1 en el 2^{do} piso y el equipo 3 en la base del edificio, alineado verticalmente al equipo 4.

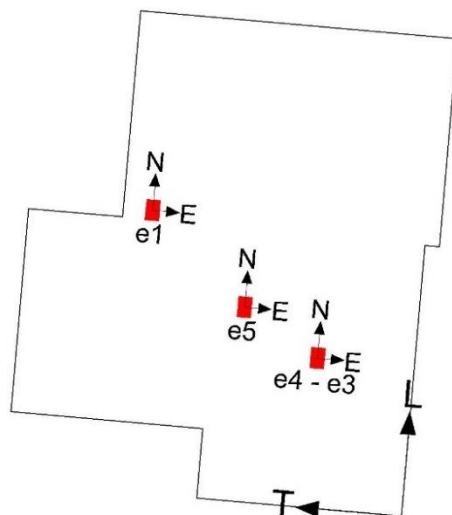


Figura 4.32 Vista en planta del edificio N°1. Ubicación, orientación y numeración de equipos utilizados

En la Figura 4.33, para cada dirección de análisis (Longitudinal y Transversal), se aprecia la razón espectral H/V y en la Figura 4.34 la razón espectral H/H, del registro de mediciones de vibración ambiental realizado.

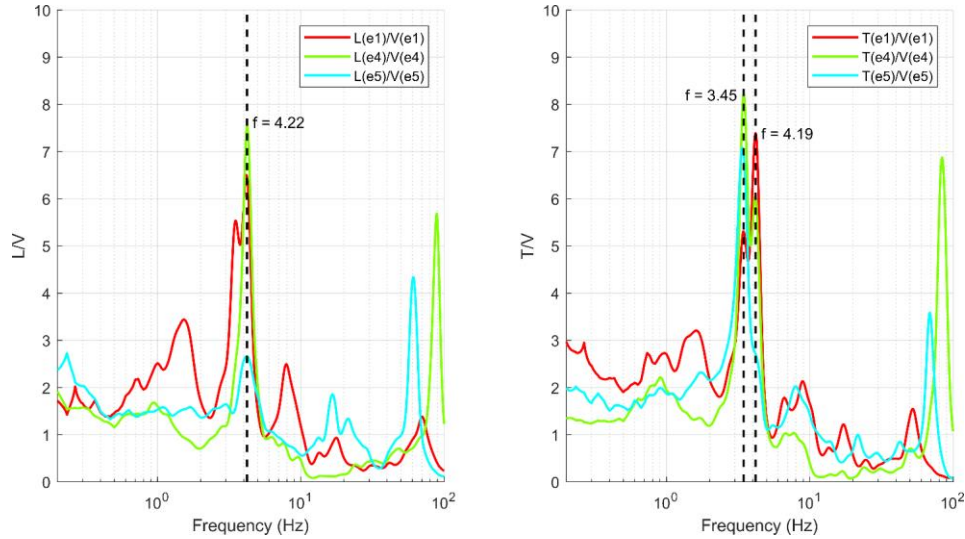


Figura 4.33 Razón espectral H/V por componente de los equipos 1, 4 y 5. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio

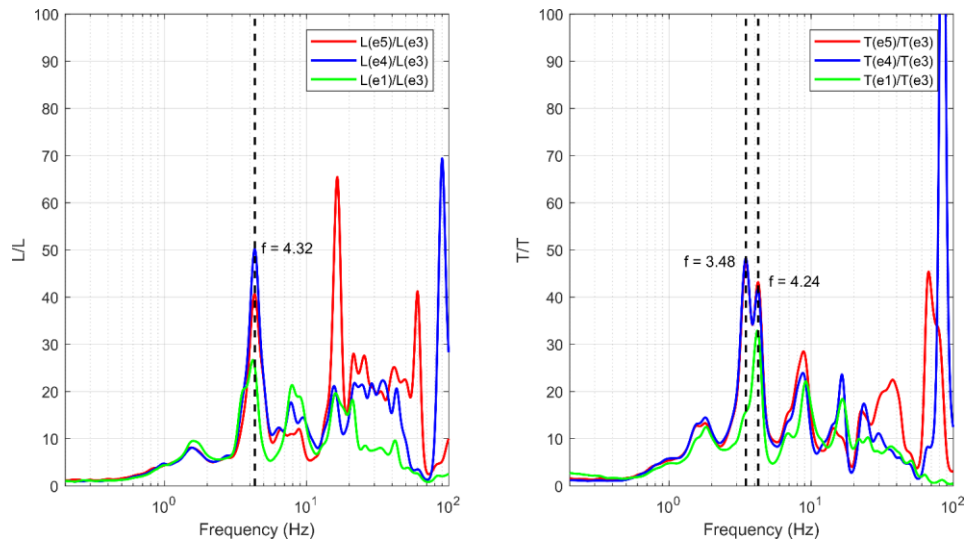


Figura 4.34 Razón espectral H/H por componente entre los equipos 5 – 3, 4 – 3 y 1 – 3. En la izquierda dirección longitudinal y derecha dirección transversal del edificio

En el edificio N°1, aplicados ambos métodos, los modos de vibración obtenidos en cada dirección no resultaron significativamente diferentes, es así como, en la dirección longitudinal, el modo de vibración se establece en 4.3 Hz y en la dirección transversal los modos de vibración son 3.5 y 4.2 Hz.

Este último valor (4.2 Hz) es posible que se encuentre acoplado a la frecuencia de 4.3 Hz identificado en la dirección longitudinal, lo que se puede atribuir a un modo rotacional o, a que producto de la simetría del edificio posea frecuencias similares en ambas direcciones.

Realizado el análisis rotacional en 4.2 Hz y 4.3 Hz, se observa la misma respuesta en sus gráficas, indicando que ambas frecuencias corresponden a un único modo rotacional, por lo que, la frecuencia de este modo se establece en 4.2 Hz. En la Figura 4.35, imagen derecha, para una frecuencia de 4.2 Hz la dirección de movimiento de los equipos se atribuye a un modo torsional, cuya representación se muestra en la Figura 4.36.

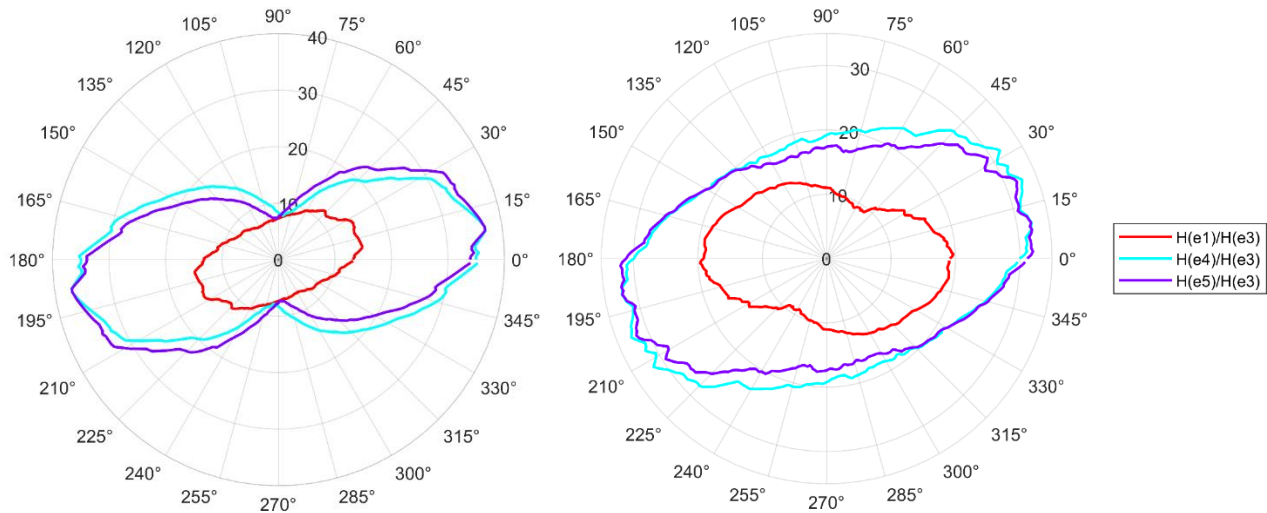


Figura 4.35 Análisis rotacional en 3.5 Hz (imagen izquierda) y 4.2 Hz (imagen derecha) para los equipos 1, 4 y 5 normalizados por el equipo 3

En la Figura 4.35, imagen izquierda, para la frecuencia fundamental que corresponde a 3.5 Hz se muestra la dirección de oscilación de los 3 equipos ubicados en altura, se observa que los equipos 4 y 5 oscilan alrededor de los 10°. A su vez, el equipo 1 presenta una máxima amplitud de movimiento alrededor de los 15°, esta diferencia puede ser debida a que el operador encargado de posicionar los equipos y alinearlos a algún eje estructural dentro de la edificación, realiza la acción a simple vista sin apoyo tecnológico. En consideración a lo anterior, la diferencia entre la dirección de oscilación entre los 3 equipos no supera los 5°, por lo que, se asume un sentido de movimiento para 3.5 Hz alrededor de 10°, lo que se ajusta a la dirección del eje transversal.

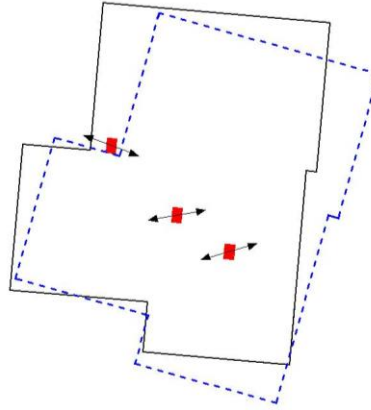


Figura 4.36 Esquematización del movimiento torsional para 4.2 Hz del edificio N°1

4.3.2 Edificio N°2

Si bien se realizaron mediciones de vibración ambiental dentro de este edificio, personal del recinto informó que para el 1 de abril del 2014 el inmueble tan solo poseía un piso de altura, por lo que, las frecuencias obtenidas de las mediciones actuales no son representativas de la estructura aquel año y por ende, no son de utilidad en esta investigación.

4.3.3 Razón espectral H/V del sitio

Realizada la caracterización dinámica de los edificios, se da paso al estudio de matriz de suelo del sitio donde se emplaza la estación sísmica T06A.



Figura 4.37 Mediciones de vibración ambiental realizadas en el sitio cercano a la estación T06A, identificadas por número de equipo y color de marcador

En la Figura 4.37, se señala la ubicación de los cinco equipos que registraron microtremores en el sitio, los cuales fueron orientados en dirección al norte magnético con la ayuda de una brújula, por lo que su dirección coincide con la dispuesta por la estación sísmica.

En la Figura 4.38, imagen izquierda, se muestra la razón espectral H/V, en una dirección de 5°, sentido de movimiento que corresponde al modo fundamental del edificio N°1 y en la imagen derecha, la curva azimutal del equipo 5 (color morado). Las curvas se grafican en un rango de frecuencias de 0.5 Hz y 30 Hz, observando una respuesta plana, con valores de H/V no mayores a 3, donde no se destaca una frecuencia predominante (f_0). Por otro lado, se muestra una tendencia a aumentar la amplitud de frecuencias alrededor de 1.5 Hz – 2.5 Hz y a mitigar ondas de aproximadamente 5.5 Hz – 10 Hz.

Del H/V rotado (Figura 4.38, imagen derecha) se muestra principalmente una respuesta simétrica para cada frecuencia en los 180°, que varía levemente al paso angular, descartando que exista direccionalidad en el sitio.

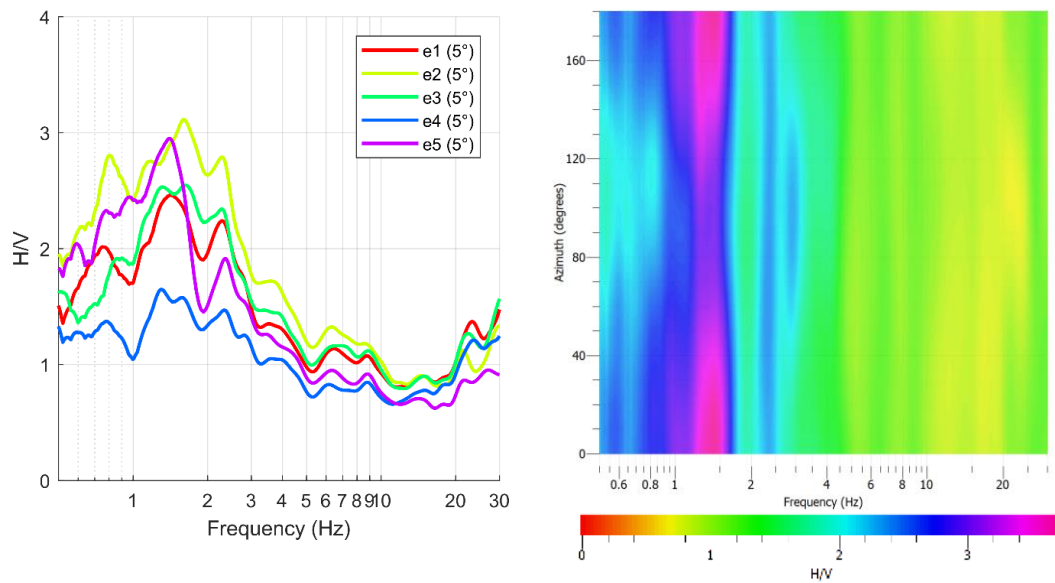


Figura 4.38 Curva HVSR direccional a 5° de las mediciones realizadas por los equipos ubicados alrededor de la estación T06A (imagen izquierda) y HVSR rotado del equipo 5 (imagen derecha)

4.3.4 Función de transferencia teórica y Vs30

El CSN tiene a disposición un perfil de velocidad de ondas de corte obtenido del sitio cercano a la estación T06A, donde en la Figura 4.39 se observa dicho perfil, del que se obtiene un Vs30 de 1263 m/s y una frecuencia característica del sitio de 25.7 Hz (0.038 s). El sitio se ubica prácticamente sobre el basamento rocoso, presentando un bajo o nulo contraste de impedancia. De los valores Vs30 y f0, junto a una respuesta plana de H/V (Figura 4.38), de acuerdo con lo establecido en el Decreto Supremo N°61 (Minvu), el suelo clasifica como tipo A, indicando roca, suelo cementado.

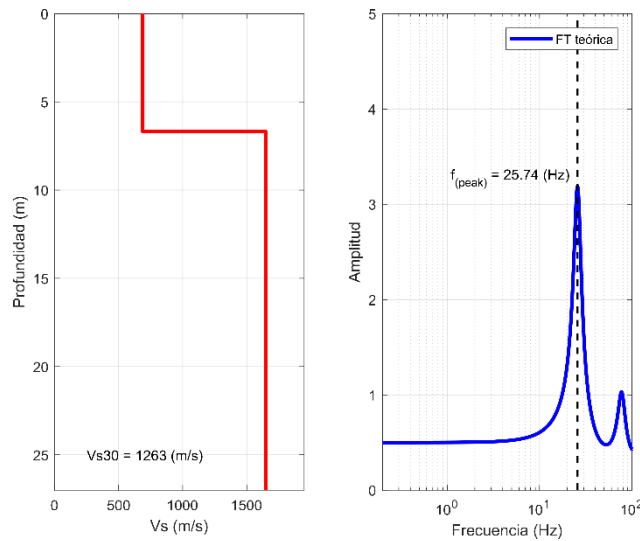


Figura 4.39 Perfil Vs (imagen izquierda) y función de transferencia teórica (imagen derecha)

4.3.5 Análisis rotacional del sitio y de los registros sísmicos

De los registros de vibración ambiental, ejecutados alrededor de la estación sísmica T06A (Figura 4.37), se selecciona el equipo 1 (color rojo) como representativo del sitio por su cercanía a la estación, para el cálculo del análisis rotacional, esto permite visualizar aproximadamente cómo se comportaría la matriz de suelo frente a una frecuencia dada.

En la Figura 4.40, se grafica la respuesta obtenida del análisis rotacional realizado al registro del equipo 1 (color rojo), en las frecuencias correspondientes a los modos de vibración del edificio

Nº1 (3.5 Hz - 4.2 Hz) y para valores alrededor de estos. Se observa una respuesta que no varía en el rango de frecuencias calculadas, orientada alrededor de 150° y 175°.

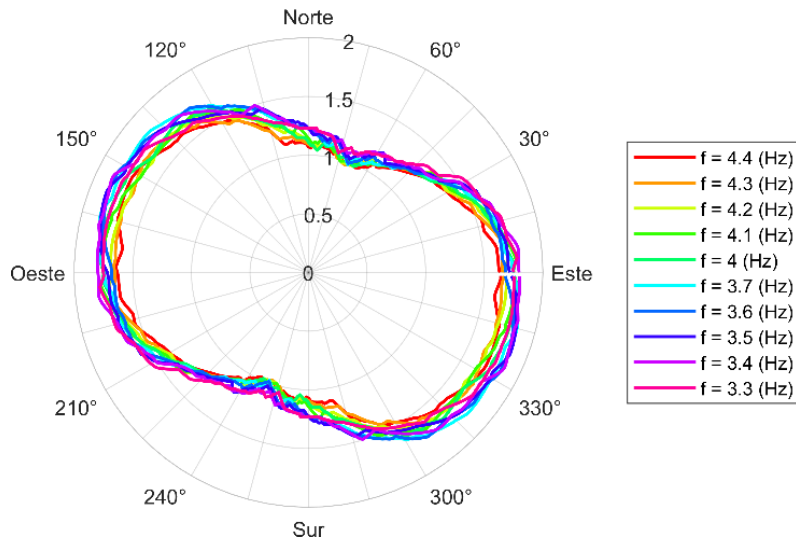


Figura 4.40 Análisis rotacional de la estación T06A para el equipo 1 en distintas frecuencias

Realizado el análisis rotacional al sitio, se procede con el análisis rotacional del registro sísmico, el cual permite alinear la dirección de movimiento del edificio Nº1 con respecto al acelerómetro de la estación T06A en el mismo sentido, donde los efectos de ISE con la estación sísmica son más evidentes. En la Figura 4.41 se observa la orientación del edificio Nº1 con respecto al eje cardinal “Este”.

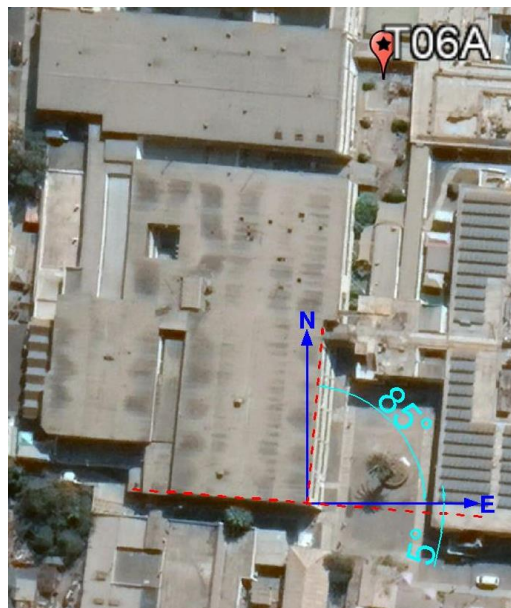


Figura 4.41 Ángulo de rotación respecto al eje cardinal “Este” del edificio Nº1

En la Figura 4.42, se ploteó el análisis rotacional de los registros sísmicos en las frecuencias características del edificio N°1, imagen izquierda para 3.5 Hz, e imagen derecha para 4.2 Hz, donde en la representación gráfica, las “líneas negras continuas” indican la orientación del inmueble acorde a los ángulos logrados en la Figura 4.41, y la “línea roja segmentada” indica el sentido de vibración calculado del análisis rotacional de la estructura. Para la Figura 4.42 derecha, no se gráfica la “línea roja segmentada” ya que hace referencia a un modo rotacional.

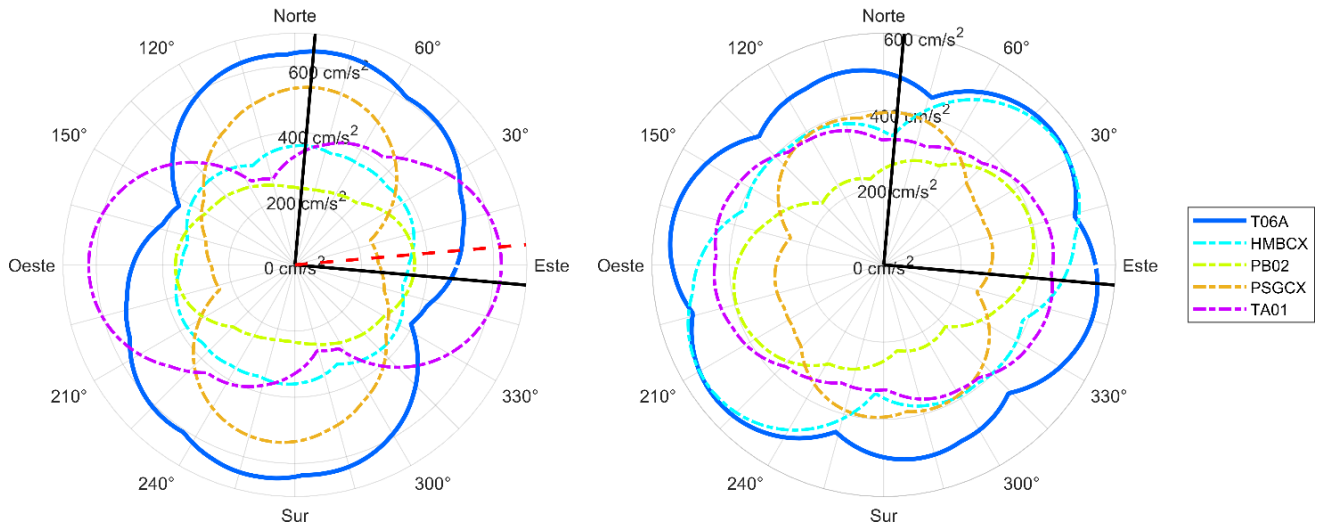


Figura 4.42 Análisis rotacional de los registros sísmicos para 3.5 Hz (imagen izquierda) y 4.2 Hz (imagen derecha), correspondiente al modo de vibración traslacional y rotacional del edificio N°1. Las líneas negras continuas indican la orientación del edificio y la línea roja segmentada indica la dirección de oscilación

En la Figura 4.42 se observa que, de las distintas estaciones ploteadas cada sitio posee un comportamiento independiente, ya que existe una asimetría en la dirección de la respuesta obtenida por el análisis rotacional de cada estación. Para una frecuencia de 3.5 Hz (Figura 4.42 imagen izquierda) la forma que consigue el análisis rotacional de la estación T06A prácticamente coincide con la orientación de emplazamiento del edificio, el cual, muestra su peak de aceleración alrededor de los 75°, por lo que, la orientación del edificio junto al movimiento del modo de vibración, dan forma a la pseudo aceleración rotada condicionando la respuesta, evidenciando la presencia de ISE. Observando la matriz de suelo precisamente en 5° (Figura 4.38, imagen izquierda) no se observan amplificaciones o desamplificaciones debidas a la matriz de suelo, y a su vez, la dirección de máximas pseudo aceleraciones no se condice con la forma mostrada en la Figura 4.40 para una frecuencia de 3.5 Hz.

Para la frecuencia de 4.2 Hz (Figura 4.42, imagen derecha) se observa que la forma del análisis rotacional es similar al caso presentado para 2.1 Hz de la estación T05A (Figura 4.28, imagen izquierda) en la que, debido a la ISE las pesudas aceleraciones rotadas adquieren gráficas circulares con disminución de pseudo aceleración en ciertos ángulos, repitiendo este comportamiento en modos torsionales, identificando ISE.

4.4 Conclusiones

Los resultados obtenidos por los métodos H/V y H/H entregan valores similares entre sí para los distintos edificios estudiados, por lo tanto se verifica la capacidad de ambos métodos para caracterizar dinámicamente una estructura por medio de la medición de microtremores. Los modos de vibración calculados por ambos métodos en cada dirección de análisis son consistentes a los ejes estructurales, presentando menor frecuencia en el eje débil y mayor frecuencia en el eje fuerte. La razón H/H identificó frecuencias que no lograron ser obtenidas por el método H/V, por lo que, la razón espectral H/H puede poseer ventajas al excluir los efectos de la fuente.

A partir del análisis rotacional aplicado a mediciones de vibración ambiental realizadas en estructuras, podemos afirmar que este análisis es válido para calcular la dirección de oscilación de edificaciones en sus frecuencias características, siendo consistente con indicar en el mismo sentido del cual se obtuvo su respectivo modo de vibración. Es así como, los resultados del análisis rotacional permiten identificar diferencia entre un modo traslacional y un modo rotacional.

Ambas estaciones sísmicas (T05A – T06A) se ubican por sobre 7 metros del basamento rocoso, indicado por los perfiles de onda Vs, atribuyéndose a un contraste de impedancia muy bajo o nulo. Es así como, de las mediciones de vibración ambiental realizadas en el sitio, la razón espectral H/V tiende a ser plana, sin destacar una frecuencia fundamental. El análisis de resultados de las pseudo aceleraciones rotadas, entre el sitio y la estación sísmica, muestra que las características de direccionalidad del registro de las estaciones en estudio no tienen relación con efectos de sitio.

Del análisis rotacional de las estaciones sísmicas T05A y T06A se evidencia que las edificaciones cercanas, por medio de la ISE dan forma a la pseudo aceleración rotada en las frecuencias respectivas a sus modos de vibración, en la que su respuesta se orienta en dirección a los ejes principales del edificio, características no atribuibles a los efectos de sitio. Dado que se evidencia la presencia de ISE en la pseudo aceleración rotada, implica que las componentes principales del registro (NS, EW, Z) obtenidas para el Terremoto de Iquique por las estaciones T05A y T06A se encuentran modificadas debido a la ISE y por ende no representan las condiciones reales del sitio, por lo que, de ser utilizadas se deben tener en cuenta estos efectos.

Físicamente los efectos de la ISE que provoca un edificio sobre una estación sísmica se deberían reducir mientras mayor sea la distancia entre estos, casos como el edificio N°4, plantea la duda, ya que se ubica aproximadamente a una distancia de 65 m del acelerómetro y aún así sus efectos se ven reflejados en la pseudo aceleración rotada del registro de la estación T05A, lo que insta a continuar el estudio de la ISE por medio de un modelo de elementos finitos, en el que se puedan analizar distintas variables.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

Los modos de vibración de edificios de gran envergadura, debido a sus efectos dinámicos e inerciales, dados por su masa, altura y rigidez asociada, alteran el contenido de frecuencias de un registro sísmico y dan forma a las pseudo aceleraciones rotadas, por lo que se comprueba la presencia de Interacción Suelo Estructura (ISE) para el registro de las estaciones sismológicas T05A y T06A del evento Terremoto de Iquique.

Ambos métodos de razón espectral aplicados (H/V y H/H) a las mediciones de microtemores realizadas en los edificios obtienen modos de vibración con valores similares entre sí y sus resultados son consistentes con la rígides de los ejes principales de la estructura, a su vez, el análisis rotacional llevado a cabo en dichas mediciones logra predecir el sentido del movimiento de los edificios, en sus modos de vibración traslacional y/o rotacional.

Para una estación sísmica instalada en una zona cercana a edificios de gran envergadura, es posible que se presenten dos probables condiciones de ISE: a) Con el paso de la onda sísmica, subterráneos y cimentaciones provocan una alteración del contenido de frecuencias de la onda, lo que se refleja en un análisis rotacional orientado en dirección a los ejes del edificio, condicionando la respuesta del registro y b) La oscilación de la estructura en sus modos principales de vibración transmite ondas al suelo que alteran el contenido de frecuencias del registro, alineando la respuesta con los ejes principales del edificio, sujeto a la características del edificio, tales como masa y rigidez.

Para la Red Sismológica Nacional, se hace necesaria la discusión sobre la exclusión o debido cuestionamiento de los datos registrados por estaciones sismológicas cercanas a estructuras de gran envergadura (ejemplos T05A y T06A), cuando acontezca un movimiento de terreno extremo, o tener presente que el registro se vea alterado por ISE.

El desarrollo de un modelo de elementos finitos es necesario para ratificar lo concluido en la presente investigación, en la cual se deben incluir los estudios de suelos blandos, distancia de la edificación respecto de la estación sísmica, modelo estructural y tipo de cimentaciones. La generación de modelos aceptables que permitan conocer el comportamiento de estas variables.

REFERENCIAS

- Aki, K., (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors: *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 415–457.
- Bard, P. Y., (1998). Microtremor measurements: a tool for site effect estimation. In Proceeding of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion. Yokohama, Japón. Diciembre.
- Bastías, N., and Montalva, G. A., (2016). Chile Strong Ground Motion Flatfile. *Earthq. Spectra* 32, no. 4, 2549–2566. doi: 10.1193/102715EQS158DP
- Becerra, A., Podesta, L., Monetta, R., Sáez, E., Leyton, F., and Yanñez G., (2015). Seismic microzoning of Arica and Iquique, Chile, *Natural Hazards* 79, 567–586 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1863-y>
- Boore, D. M., Watson-Lamprey, J., and Abrahamson, N. A., (2006). Orientation-Independent Measures of Ground Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 4A, pp. 1502–1511. doi: 10.1785/0120050209
- Castellaro, S., (2016). The complementarity of H/V and dispersion curves. *GEOPHYSICS*, VOL. 81, NO. 6.
- Castellaro, S., Padrón, L. A., and Mulargia, F., (2013). The different response of apparently identical structures: a far-field lesson from the Mirandola 20th May 2012 earthquake. *Bull Earthquake Eng.* DOI 10.1007/s10518-013-9505-9
- Castro, R. R., Mucciarelli, M., Pactor, F., Federici P., and Zaninetti, A., (1998). Determination of the characteristic frequency of two dams located in the region of Calabria, Italy. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88 (2), 503-511.

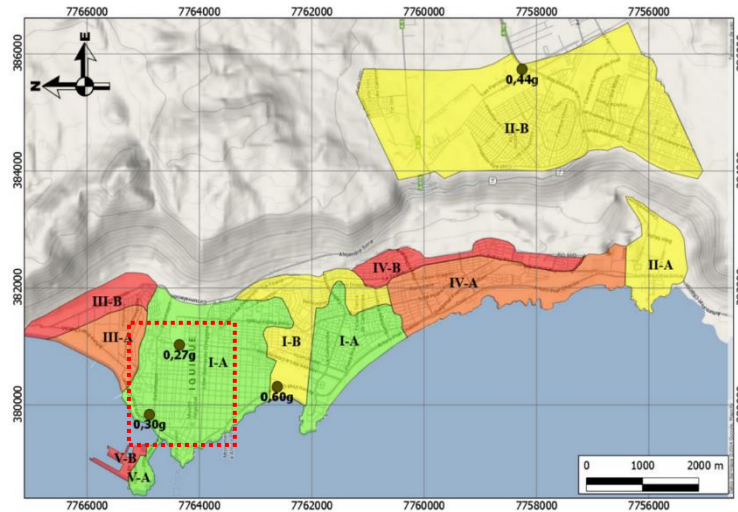
- Cavaliere, F., Correia, A., and Pinho, R., (2021). Variations between foundation-level recordings and free-field earthquake ground motions: numerical study at soft-soil sites. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 141. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106511>
- Chiauzzi, L., Masi, A., Mucciarelli, M., Cassidy, J. F., Kutyn, K., Traber, J., Ventura, C., and Yao, F., (2012). Estimate of fundamental period of reinforced concrete buildings: code provisions vs. experimental measures in Victoria and Vancouver (BC, Canada). WCEE2012_3033.pdf (iitk.ac.in)
- Chopra, A. K., (2014). *Dinámica de estructuras. 4^{ta} edición.*
- Ditommaso, R., Vona, M., Gallipoli, M. R., and Mucciarelli, M., (2013). Evaluation and considerations about fundamental periods of damaged reinforced concrete buildings. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1903–1912, 2013. doi:10.5194/nhess-13-1903-2013
- Fry, B., Benites, R., and Kaiser, A., (2011). The character of accelerations in the Mw 6.2 Christchurch earthquake, Seismol.
- Gallipoli, M. R., Mucciarelli, M., Šket-Motnikar, B., Zupancic, P., Gosar, A., Prevolnik, S., Herak, M., Stipcevic, J., Herak, D., Milutinovic, Z., and Olumceva, T., (2009). Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings. *Bull Earthquake Eng (2010)* 8:593–607. DOI 10.1007/s10518-009-9133-6
- Ghimire, S., Guéguen, P., and Astorga, A., (2021). Analysis of the efficiency of intensity measures from real earthquake data recorded in buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
- Gičev, V., Trifunac, M. D., Todorovska, M. I., Kocaleva, M., Stojanova, A., and Kokalanov V., (2020). Ambient vibration measurements in an irregular building: *Revista Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.

- Gonzales, I., (2017). *Generación de espectros de respuesta con sismos chilenos para suelos en función de su período fundamental y nivel de amplificación* (Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil). Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Goto, H., Kaneko, Y., Young, J., Avery, H., and Damiano, L., (2019). Extreme Accelerations During Earthquakes Caused by Elastic Flapping Effect.
- Kanai, K., and Tanaka, T., (1954). Measurement of the microtremor: *Bulletin of the Earthquake Research Institute* 32, 199-209.
- Konno, K., and Ohmachi, T., (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America* 88 (1), 228–241.
- Kramer S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-H. *New Jersey 07458: Upper Saddle River.*
- Leyton, F., Leopold, A., Hurtado, G., Pastén, C., Ruiz, S., Montalva, G. A., and Saéz, E., (2018). Geophysical Characterization of the Chilean Seismological Stations: *First Results, Seismological Research Letters*. doi: 10.1785/0220170156.
- Marquardt, C., Marinovic, N., and Muñoz, V. (2008). Geología de las ciudades de Iquique y Alto Hospicio, Región de Tarapacá. *Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 113:33.*
- Mylonakis, G., Nikolaou, S., and Gazetas, G., (2005) Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26 (2006) 824–853.
- Nakamura, (2019). Opinion, What is the Nakamura Method?

- Nakamura, Y., (1989). A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface: *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute*, 30, 25–33.
- Nakamura, Y., (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. In Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering.
- Nigam, N. C., and Jennings, P. C., (1969). Calculation Of Response Spectra From Strong-Motion Earthquake Records. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 59, No. 2, pp. 909-922.
- Nogoshi, M., and Igarashi, T., (1970). On the propagation characteristics of microtremors: *Journal of the Seismological Society of Japan*, 23, 264– 280.
- Sotiriadis, D., Klimis, N., Margaris, B., and Sextos, A., (2019). Influence of structure–foundation–soil interaction on ground motions recorded within buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00700-6>
- Stewart, J. P., (2000). Variations between foundation-level and free-field earthquake ground motions. *Earthquake Spectra*, Volume 16, No. 2, May 2000
- Yagi, Y., Okuwaki, R., Enescu, B., Hirano, S., Yamagami, Y., Endo, S., and Komoro, T., (2014). Rupture process of the 2014 Iquique Chile Earthquake in relation with the foreshock activity. *Geophysical Research Letters*, Volume 41, Issue 12.

ANEXO 3.1 Microzonificación de la ciudad de Iquique

Se presenta la microzonificación de la ciudad de Iquique, la cual indica el V_{s30} promedio, f_0 , A_0 y una descripción geológica de cada zona establecida. Las estaciones en estudio se observan en la zona I-A, en la que se indica su respectivo valor de PGA obtenido para el Terremoto de Iquique.



Color	Zone	Avg. $V_{S^{30}}$ (m/s)	F_0 (Hz)	A_0	Description
	I-A	872	–	[2.05–8.55]	Andesite outcrop
	I-B	768	[3.46–10.22]	[3.15–4.49]	Marine and eolian deposits, bedrock located at 5 to 15 m deep
	II-A	577	[1.7–5.15]	[2.4–10]	Colluvial deposits, bedrock located at 5 to 15 m deep
	II-B	709	–	[2.9–4.1]	Gravels from Alto Hospicio, stiff layer of gravels of about 15 m until bedrock
	III-A	461	[1.2–7.6]	[2.15–3.4]	Marine deposits, bedrock at deep levels
	III-B	612	[3.25–4.1]	[2.85–8.25]	Eolian and marine deposits, bedrock located about 25 m deep
	IV-A	403	[3.03–4.68]	[2.35–6.2]	Eolian deposits of over 30 m deep
	IV-B	379	[1.83–2.86]	[2.05–4.6]	Eolian and alluvial deposits from El Dragon hill, consisting mostly of fine sand, bedrock at deep levels
	V-A	762	[6.84–16.85]	[2–5.9]	Andesite outcrop in the port of Iquique
	V-B	393	[2.46–5.74]	[5.3–10]	Artificial landfill from the port of Iquique

Figura A.3.1 Microzonificación de la ciudad de Iquique y Alto Hospicio

Fuente: Becerra *et al.* (2015)

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Joaquín Antonio Barria Villablanca
Título de la memoria : Movimiento de terreno extremo y su relación con el efecto de la Interacción Suelo Estructura
Fecha de la presentación oral :
Profesor(es) Guía : Gonzalo A. Montalva
Profesor(es) Revisor(es) : Luis Merino
Sebastián Calderón
Concepto :
Calificación :

Resumen

Esta investigación pretende identificar la potencial presencia de Interacción Suelo Estructura (ISE) para los registros del Terremoto de Iquique del 2014 ($M_w=8.2$), en dos estaciones sísmicas, T05A y T06A, a través de la caracterización dinámica de las edificaciones cercanas y del sitio, mediante la medición y procesamiento de datos de vibración ambiental, aplicando el método HVSR y HHSR, además del análisis rotacional. Se alinea la dirección de movimiento de las edificaciones en sus modos de vibración con las pseudo aceleraciones rotadas del registro sísmico, en busca de variaciones no atribuibles a la matriz de suelo.

Se concluye que los modos principales de vibración de edificios de gran envergadura, es decir, con dos o más pisos de altura y sistema estructural con base a muros de hormigón armado, alteran el contenido de frecuencias del registro de una estación sísmica contigua a edificaciones. Esto modifica y da forma a las pseudo aceleraciones rotadas, tanto en la orientación de los ejes principales de la estructura como en su dirección de oscilación, comprobando la presencia de Interacción Suelo Estructura (ISE), para el registro de las estaciones sísmológicas T05A y T06A del Terremoto de Iquique.