

## Análisis geotécnico y clasificación sísmica para proyectos en áreas de intercalaciones estratigráficas en Región Metropolitana de Santiago

Geotechnical analysis and seismic classification for projects in stratigraphic intercalations areas in the Santiago Metropolitan Region

**Yoshiro Huilca, Dennis Raddatz, Oscar Taiba & Laura Peña.**  
*Ferrara, Santiago, Chile, dennis.raddatz@ferrara.cl*

**RESUMEN:** El incremento en densidad de la población en Santiago y la expansión de la cobertura del metro, han provocado un aumento en la cantidad de proyectos habitacionales, comerciales e industriales en zonas donde hace una década era poco común encontrar edificios. En este trabajo se realiza un análisis geotécnico en una zona de intereses, utilizando la información de proyectos distribuidos en las comunas de Macul, Ñuñoa y parte de San Miguel, San Joaquín y Santiago, dentro de los límites de Av. Departamental por el sur, Av. Santa Isabel por el norte, la Ruta 5: Autopista Central por el poniente, y Autopista Vespucio Sur por el oriente. En el área de estudio se identifican dos unidades geológicas: gravas de origen fluvial y abanicos aluviales. En el presente estudio, se genera un mapa de curvas de isovelocidades  $V_{s30}$  en toda la zona de estudio, incorporando las velocidades que son límites en la clasificación sísmica según normativa vigente, esto es un aporte para un estudio de microzonificación sísmica del sector. Además, se emplea el software Strater 5 con el propósito de confeccionar detallados perfiles estratigráficos del área bajo análisis. Esta labor se lleva a cabo utilizando la información de exploraciones geotécnicas realizadas en la zona mediante calicatas; sondajes; ensayos geofísicos y ensayos de laboratorio.

**PALABRAS CLAVES:** zonificación sísmica, estratigrafías de transición, clasificación sísmica.

**ABSTRACT:** The increase in population density in Santiago and the expansion of subway coverage have led to a rise in the number of residential, commercial, and industrial projects in areas where a decade ago it was uncommon to find buildings. This paper conducts a geotechnical analysis in a region of interest, utilizing information from projects distributed across the communes of Macul, Ñuñoa, and parts of San Miguel, San Joaquín, and Santiago, within the boundaries of Av. Departamental to the south, Av. Santa Isabel to the north, Route 5: Autopista Central to the west, and Autopista Vespucio Sur to the east. Two geological units are identified in the study area: fluvial gravels and alluvial fans. In the present study, a map of  $V_{s30}$  isovelocity curves is generated across the entire study area, incorporating velocities that represent the limits in seismic classification according to current regulations. This contributes to a seismic microzonation study of the area. Additionally, Strater 5 software is employed to create detailed stratigraphic profiles of the area under analysis. This task is carried out using information from geotechnical explorations conducted in the area through test pits, boreholes, geophysical tests, and laboratory tests.

**KEYWORDS:** seismic zoning, transitional stratigraphy, seismic classification.

### 1 INTRODUCCIÓN

En Chile, para la definición de cantidad de puntos de exploración geotécnica y profundidad de estos puntos, se utiliza la norma NCh 1508: Geotecnia - Estudio de mecánica de suelos (INN, 2014). La cantidad de puntos depende del área del sitio y de las profundidades de exploración, y las profundidades de exploración depende principalmente del tipo de estructura proyectada en el sitio, de las cotas de enterramiento de la estructura, y si son fundaciones superficiales o fundaciones profundas. Adicionalmente, debido a que Chile es un país altamente sísmico es necesario considerar prospecciones profundas, ensayos geofísicos y de laboratorio para la clasificación sísmica de un sitio. La norma NCh 433 Of. 96 (INN, 2009), modificada por el Decreto 61 (MINVU, 2011). El tipo de exploración in-situ o ensayos de laboratorio depende del tipo de suelo que se está clasificando, pero en general siempre es necesario contar con una medición de propagación de velocidad de ondas de corte a través del parámetro  $V_{s30}$ .

En los últimos años, el aumento en la densidad poblacional y la expansión de la red del metro en la ciudad de Santiago han

contribuido al incremento de proyectos habitacionales, comerciales e industriales en áreas donde hace una década era poco común encontrar edificaciones. Este fenómeno ha marcado un importante aumento de las exploraciones geotécnicas realizadas en estas zonas, abriendo nuevas oportunidades para la renovación y actualización de datos geológicos históricos de la ciudad utilizando esta nueva información geotécnica.

En este trabajo se analizan geotécnicamente proyectos distribuidos en las comunas de Macul, Ñuñoa y parte de San Miguel, San Joaquín y Santiago entre el año 2012 y 2023. El área de estudio queda limitada por el sur por Av. Departamental, el norte con Av. Santa Isabel, el poniente con la Ruta 5: Autopista Central y por el oriente con Autopista Vespucio Sur (ver Figura 1). Con el propósito de confeccionar un mapa estratigráfico del área bajo análisis y un mapa con una zonificación geotécnica según velocidad de ondas de corte de terreno, se emplea el software civil 3D y Strater 5. Mediante el software se desarrolló el material visual y gráfico de las propiedades del suelo utilizando los datos obtenidos de calicatas; sondajes y ensayos de laboratorio de los proyectos analizados. Mientras que con los datos ensayos

geofísicos se confeccionó un mapa de isovelocidades con el software Civil 3D.



Figura 1. Zona de estudio en la ciudad de Santiago, Chile. Fuente: Preparado por los autores, 2024.

## 2 ANTECEDENTES

En la zona de estudio anteriormente definida se pueden identificar diferentes estudios realizados, que han sido ampliamente usados como antecedentes en el desarrollo de proyectos de diferente índole. Entre estos estudios se pueden identificar mapas geológicos y estudios hidrogeológicos.

### 2.1 Mapas geológicos

En términos generales, se ha observado una evolución en los mapas geológicos de la zona de estudio a lo largo del tiempo, caracterizada por una reducción progresiva de la extensión identificada como grava de Santiago, y un aumento correspondiente en las áreas de intercalaciones.

Según el estudio de Valenzuela (1978), donde en base a diferentes pozos de exploración se construyó un mapa geológico, se distinguen dos unidades de suelo en la zona (ver Figura 2):

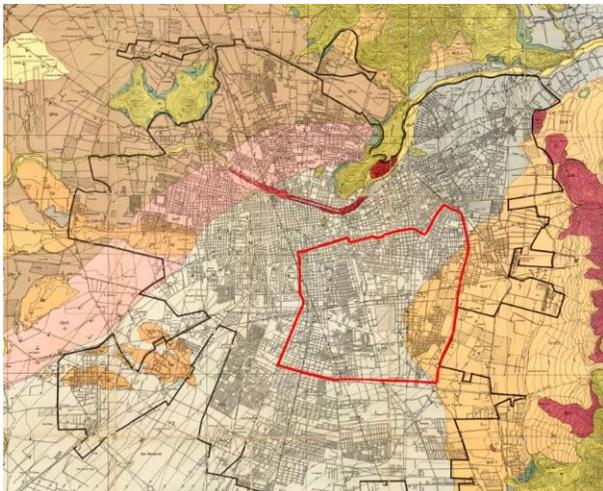


Figura 2. Mapa de Suelo de Fundación del Gran Santiago. Modificada con zona de estudio de Valenzuela (1978).

Qrs: Ripio de Santiago. Esta unidad está formada por aportes del río Mapocho en la zona norte, río Maipo en la zona sur. Esta unidad está constituida por bolones menores que 20 cm, acompañados por gravas limosas, gravas arcillosas, arenas limosas, limos y arcillas.

Qcd1: Depósitos de conos de inyección, gradados en el sentido de la pendiente, constituidos por bloques con una matriz limo arenosa predominando los primeros en ápice del cono y la matriz en su parte terminal ocasionalmente presentan cierta estratificación.

Según el estudio de Fernandez, J.C. (2003), se determinó la respuesta sísmica de las distintas unidades geológicas de la cuenca de Santiago, en base a estimación de la intensidad asociada a los registros de daños observados después del terremoto del 1985, en las cuales se pueden distinguir 11 unidades agrupadas en 5 grupos según tipo de respuesta sísmica, en la figura 3 se observa 2 unidades en la zona de estudio.

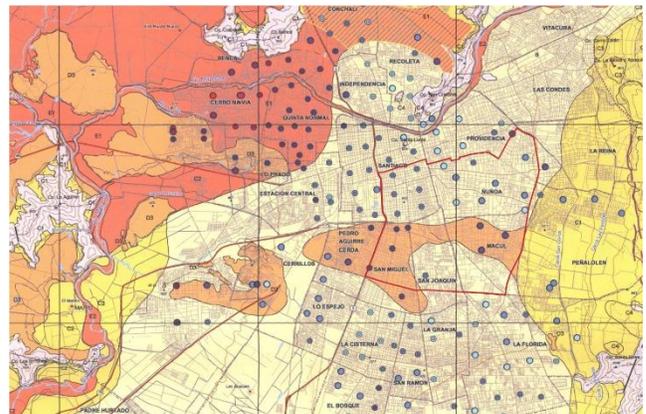


Figura 3. Mapa de Respuesta sísmica de cuenca de Santiago. Modificada con zona de estudio. Fernandez, J.C. (2003).

B: Depósitos de abanicos aluviales constituido por gravas en matriz arenosa, con niveles freáticos profundos (>20m). En algunos sectores existen suelos limo-arcillosos que pueden desmejorar la respuesta sísmica.

D1: Depósitos de abanicos aluviales, constituidos por gravas en matriz areno-arcillosa, con abundantes intercalaciones de arenas, limos y arcillas y gruesos suelos limo-arcillosos.

Según el estudio de Leyton et al. (2011), donde se recopiló y analizó información de pozos y sondajes de diferentes estudios previos para construir un mapa geológico de la región metropolitana, en la zona de estudio se pueden identificar 2 unidades (ver Figura 4):

Unidad II: Gravas. Unidad constituida principalmente por materiales gruesos, con predominio de gravas arenosas de compacidad media a alta. En la cuenca corresponden principalmente a los depósitos subactuales de los ríos Maipo, Mapocho y Clarillo.

Unidad IIIa: Depósitos constituidos por bloques y gravas subangulares en matriz soportante areno-arcillosa con intercalaciones de arenas, limos y arcillas. En el área de estudio corresponden a abanicos aluviales menores ubicados en las laderas de los relieves principales que rodean la cuenca.

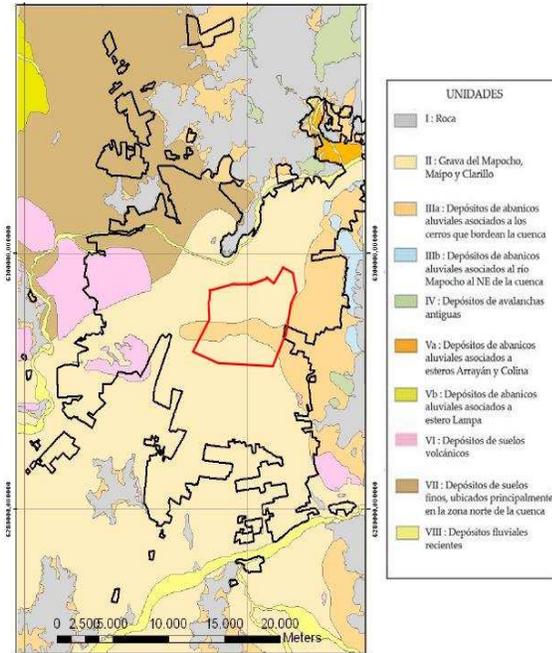


Figura 4. Mapa de depósitos de suelos de Santiago. Modificada con zona de estudio de Leyton et al. (2011).

Por otra parte, como resultado de la expansión de las líneas de metro se ha realizado diversas campañas de exploración, de la cual se han obtenido una zonificación distinta del suelo de la cuenca de Santiago y en la zona de interés. En la Figura 5 se puede visualizar la clasificación de suelo en proyectos de Metro (González, 2024), la cual se divide principalmente en 5 tipos de terrenos: Gravas (Verde); Suelos Finos (Naranja); Terrenos Mixtos (Rojo); Pumacita (Celeste); Rocas (Gris), identificándose los 3 primeros en la zona de estudio.

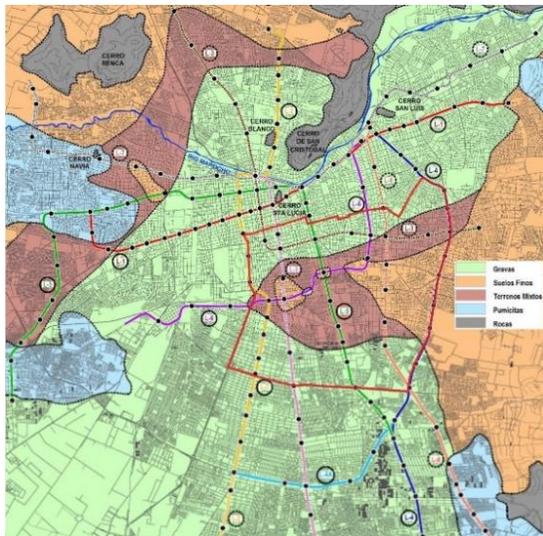


Figura 5. Mapa de tipos de suelos de Santiago según metro. Modificada con zona de estudio de González (2024).

## 2.2 Parámetros geotécnicos

Para la caracterización geotécnica de las estratigrafías en cada sitio, es común que se incluyan los parámetros resistentes de ángulo de fricción interna ( $f$ ) y cohesión ( $c$ ), y la relación entre peso y volumen a través del peso específico ( $g$ ) de cada estrato presente. Se recopiló los diferentes tipos de suelo y los parámetros entregados para ellos en cada uno de los estudios de mecánica de suelos analizados, identificando el rango de variación, los que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de rangos de parámetros geotécnicos propuestos para los suelos de estudio. Fuente: Preparado por los autores, 2024.

Suelo	Ángulo de Fricción $\phi$ [°]	Cohesión $c$ [Ton/m <sup>2</sup> ]	Densidad natural $\gamma$ [Ton/m <sup>3</sup> ]
Grava	40 - 45	0,00 - 2,00	2,00 - 2,30
Grava con arena	30 - 45	0,00 - 2,00	1,80 - 2,30
Grava con finos	30 - 45	0,00 - 2,50	1,80 - 2,30
Arena con grava	30 - 40	0,00 - 2,50	1,70 - 2,10
Arena con finos	25 - 35	0,00 - 3,50	1,60 - 2,10
Limo con arena	20 - 30	2,00 - 4,00	1,30 - 1,90
Arcilla con arena	15 - 25	2,00 - 5,00	1,40 - 2,10
Arcilla	10 - 25	3,00 - 5,00	1,30 - 1,80
Pumacita	20 - 35	3,00 - 5,00	1,40 - 1,90

## 2.3 Estudios hidrogeológicos

Finalmente, según la Figura 6 se conoce que la napa freática se sitúa a profundidades superiores a los 50 metros para la zona de estudio (tal como confirman los datos obtenidos de los proyectos) por ende, no se toma en cuenta en este trabajo, ya que la mayoría de las exploraciones consideradas se realizan hasta los 30 metros.

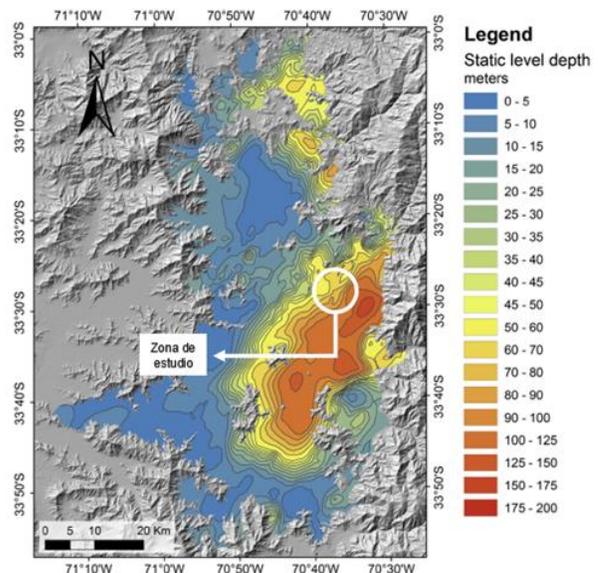


Figura 6. Nivel estático de la Cuenca de Santiago. Modificado de Muñoz et al. (2015).

Cabe señalar que en varias de las exploraciones se hacen mención sobre napas colgadas o infiltraciones debido a las redes de agua o acumulación de aguas lluvias dentro de los 30 primeros metros.

### 3 METODOLOGÍA DE DESARROLLO

Conforme a la información en disposición, se revisan las exploraciones geotécnicas en búsqueda de aquellas que estén contenidas dentro de la zona de estudio. Una vez identificadas, se verifica que las exploraciones contengan datos de calicatas, sondajes y perfiles de velocidad de ondas de corte. Los datos estratigráficos se procesan para poder ser ingresados en el software Strater 5. Como resultado, en este trabajo se considera un total de 304 proyectos geotécnicos y 338 puntos de exploración. Así, se incluye información, según disponibilidad de cada proyecto, como número de golpes de ensayos SPT, perfiles de velocidades de onda de corte Vs30, porcentajes de suelos granulares y finos, así como también las estratigrafías presentes. Con el análisis antes indicado, se construyen perfiles estratigráficos con ayuda del software Strater 5 y un mapa de zonificación sísmica en la zona con Civil 3D.

#### 3.1 Perfiles estratigráficos

Para poder construir los perfiles estratigráficos de interés, se construye la estratigrafía global de la zona de estudio mediante la interpolación de las estratigrafías locales de los proyectos obtenidos de las exploraciones realizadas. Cabe señalar que pudiesen existir más de un punto de exploración por proyecto, es decir, resultados de múltiples de ensayos o caracterizaciones geotécnicas por cada obra estudiada, en dichos casos se decide proceder de la siguiente forma:

##### 3.1.1 Estratigrafías

En caso de que sean muy distintas entre sí, se incluyen todos los puntos de las exploraciones realizadas, en sus posiciones respectivas. En caso de que sean similares o exista una estratigrafía representativa por proyecto, se añade solo un punto con esa estratigrafía, con una posición central (promedio).

##### 3.1.2 Resultados SPT

En caso de tener más de un sondaje con ensayo SPT por proyecto, se incluyen todas las prospecciones con sus coordenadas respectivas o el de mayor alcance, teniendo en cuenta la extensión en profundidad de los demás datos geotécnicos presentes.

##### 3.1.3 Porcentaje de suelos granulares y finos

Se ingresan según disponibilidad y en concordancia con la estratigrafía representativa del suelo, la que finalmente son agrupadas por tipo de suelos para su interpolación.

##### 3.1.4 Perfiles de velocidad de onda de corte

Se ingresan según disponibilidad, utilizando el promedio de todos los perfiles de velocidad de cada proyecto. En caso de que ambos perfiles entreguen Vs30 muy distintos, se utiliza el perfil de velocidades correspondiente al caso más desfavorable.

#### 3.2 Mapa de zonificación sísmica

En la actualidad, en Chile para la clasificación sísmica de un terreno donde se planea construir una estructura se utiliza la norma NCh 433 Of. 96 (INN, 2009), modificada por el Decreto 61

(MINVU, 2011), donde se indica necesario tener el parámetro de velocidad de onda de corte equivalente de los 30m superiores del terreno (Vs30). Este parámetro también se utilizará en la nueva propuesta de clasificación sísmica en el anteproyecto NCh 433 (INN, 2022), que entrará prontamente en vigencia. Para la clasificación sísmica del suelo de cimentación se tienen seis diferentes tipos de suelos que van desde el mejor comportamiento (Tipo A) hasta el de mayor exigencia sísmica (Tipo E), con diferentes rangos de Vs30 por tipo de suelo, como se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. Resumen requisitos de clasificación normativa vigente de clasificación sísmica de suelos. Fuente: Minvu, 2011.

Suelo Tipo	Vs30 (m/s)	RQD	qu (Mpa)	(N1)	Su (MPa)
A: Roca, suelo cementado	≥ 900	≥ 50%	≥ 10		
B: Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		≥ 0,40	≥ 50	
C: Suelo denso o firme	≥ 350		≥ 0,30	≥ 40	
D: Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180			≥ 30	≥ 0,05
E: Suelo de compactidad, o consistencia mediana	< 180			≥ 20	< 0,05
F: Suelo especiales					

El suelo tipo F queda fuera de los rangos de clasificación, abarca terrenos con particularidades en su comportamiento mecánico que demandan estudios geotécnicos específicos. Esta clasificación comprende suelos propensos a la licuación, colapsos, materiales orgánicos, sensibles, turba, entre otros. En términos generales, y como se aprecia en la tabla 2, la clasificación sísmica de los suelos implica tener en cuenta diversos parámetros adicionales a la velocidad de las ondas de corte, dependiendo del tipo de suelo. Para el suelo tipo A, además de la velocidad de las ondas de corte, es necesario considerar el índice de calidad de la roca (RQD) en rocas y el ángulo de fricción (qu) en suelos cementados. En el caso de los suelos tipo B y C, se requiere tomar en cuenta el número de golpes (N1) en arenas y el ángulo de fricción (qu) en suelos finos. Respecto a los suelos tipo D y E, es esencial considerar el número de golpes (N1) en arenas y la resistencia no drenada (Su) en suelos finos (MINVU, 2011).

En este caso, se realiza una zonificación en las comunas de la región metropolitana anteriormente mencionadas, específicamente registrando los resultados de los ensayos geofísicos disponibles (MASW o ReMi), correspondiente a las velocidades de onda de corte equivalentes de los primeros 30 metros de profundidad, Vs30, para así poder determinar, o tener una primera aproximación, de la distribución del parámetro Vs30 en el mapa. Para identificar a simple vista las velocidades asociadas a suelos tipo B y C según la clasificación sísmica con la norma vigente NCh433 Of. 96 (Modificada por D.S. N°61), se eligen dos tramos representados por distintos colores, conteniendo las velocidades entre 350 y 500 m/s y velocidades sobre 500 m/s respectivamente, coincidiendo con el rango de velocidades Vs30 de los tipos de suelos antes indicados.

#### 4 RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados centrados en 2 elementos principales: el mapa de microzonificación sísmica con valores de Vs30 en unidades de m/s, y los perfiles estratigráficos del suelo de estudio.

##### 4.1 Mapa de zonificación

El mapa de isovelocidades Vs30 visualizado en la Figura 7, queda representado particularmente por 2 tramos de Vs30. Cada tramo equivale a un intervalo de velocidades de onda de corte, los cuales parten con una velocidad de 350 m/s y finalizan, en el caso de mayor valor con 725 m/s. Se genera corte en los 500 m/s, el cual corresponde a magnitud límite dentro de la clasificación sísmica del suelo según normativa vigente NCh433 Of. 96 (Modificada por D.S. N° 61). De acuerdo con esto, las zonas en color rojo corresponden a suelo con velocidad de onda de corte en el rango de suelo tipo C, mientras que los sectores con colores morado corresponden a suelos con velocidad de onda de corte en el rango de suelo tipo B. Adicionalmente, se verifico que la velocidad Vs30 de los proyectos sean concordantes con la estratigrafía, de tal forma que en caso de existencia de suelo de menor calidad como arcilla y limo se presente valores bajos de Vs30, así como tambien se verifico que para suelo con Vs30 > 500 m/s correspondieran a depósitos de grava. Esto se puede verificar con los perfiles estratigráficos.

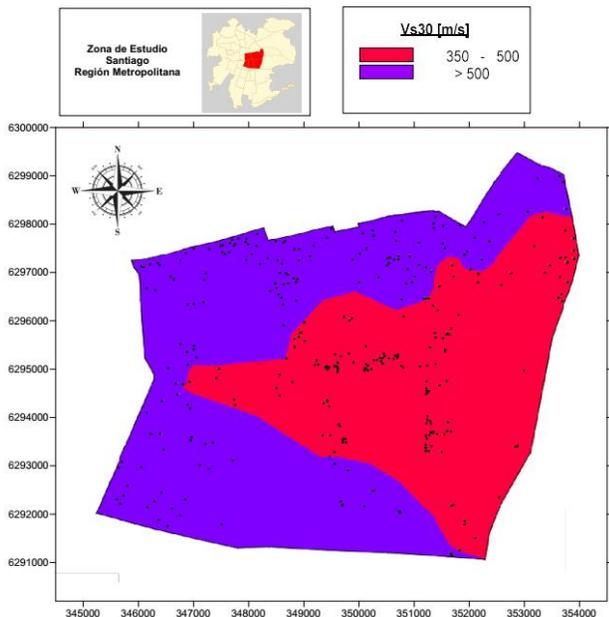


Figura 7. Mapa de isovelocidades Vs30 de las comunas de Macul, Ñuñoa y parte de Santiago, San Miguel y San Joaquín. Región Metropolitana, Chile. Fuente: Preparado por los autores, 2024.

Solo los puntos con información explícita fueron considerados. Notar que existen zonas con una mayor densidad de puntos de exploración en comparación con otras, por ejemplo, en el centro y hacia el norte de la zona de estudio. De todas maneras, es posible observar que la zona con Vs30 en el rango de suelo tipo C

disminuye su extensión de este a oeste, finalizando antes del límite poniente de la zona de estudio.

En la Figura 8 se puede observar la evolutiva de la definición de la estratigrafía de la zona de estudio, donde se observan dos zonas bien definidas que es concordante en los cuatro estudios, los cuales corresponde a la Unidad II y IIIa.

Por otra parte, se observa que la unidad IIIa\* zona marcada por el presente estudio corresponde por anteriores estudios a unidad IIIa y como Gravas en la punta de lengüeta zona sur de la respuesta sísmica definida por Fernández, J.C. (2003), de lo cual según los proyectos analizados corresponden a Gravas con presencias de limos y/o arcillas localizadas tal como se puede observar en Figura 8. Adicionalmente, en la Unidad IIIa\* se observa daños severos para el terremoto del 2010 según el estudio de Vergara y Verdugo (2015), lo cual podría ser incidencia de una respuesta por suelo blandos localizados que existen en la zona.

Mirando la Figura 8, se puede apreciar que la unidad II\*, corresponde a un área conocida por suelos tipo gravosos (Valenzuela G., (1978); Fernández J.C. (2003); Leyton et al (2011)), lo cual mediante los perfiles estratigráficos de las figura 11 y 12 se observa que corresponde a suelos Mixtos, es decir que se tiene la presencia de suelos gravosos con intercalaciones lentes de suelos finos y arenosos, lo cual es coincidente con las exploraciones del realizadas por el metro (González C. (27/06/2024)). Cabe señalar que la lengüeta de suelos Finos varia entre lo expuesto por metro y los otros autores.

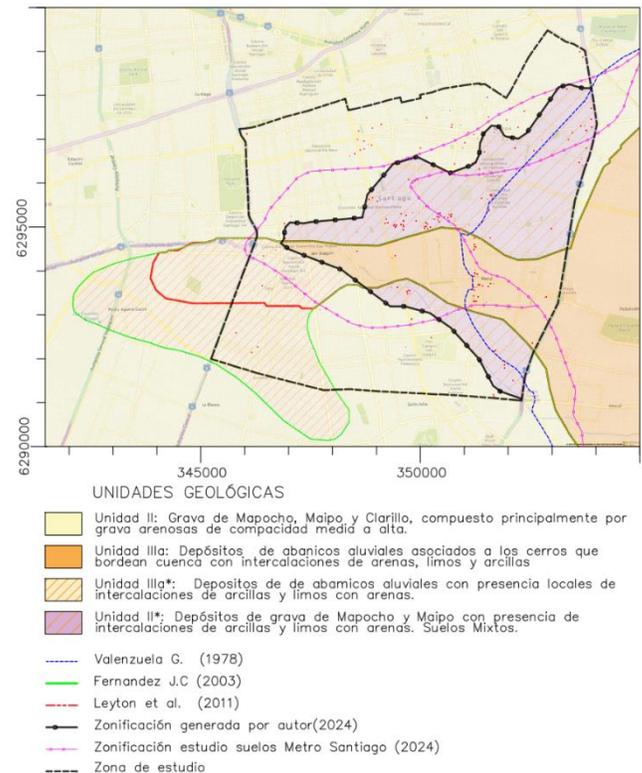


Figura 8. Evolución de la definición de la estratigrafía de la zona de estudio de las comunas de Macul, Ñuñoa y parte de Santiago, San Miguel y San Joaquín. Región Metropolitana, Chile. Fuente: Preparado por los autores, 2024.

Al comparar lo límites expuestos por cada autor para la zona de finos, se puede observar que los estudios más recientes son concordantes con tipos de suelo según nuestro mapa de isovelocidades. Variando levemente en la zona sur de la lengüeta de suelo mixtos, los cuales serían clasificados como suelo tipo C.

#### 4.2 Perfiles estratigráficos

Notar que el alcance de los distintos pozos en profundidad difiere en cada caso, teniendo distancias exploradas menores a 20 metros en el caso de calicatas y mayores cuando se tienen sondajes, que rondan los 30 m aproximadamente.

Se presentan 4 perfiles estratigráficos de manera de caracterizar el subsuelo de estudio y verificar el tipo de suelo presente. Estos perfiles se enumeran del 1 al 4, ordenados desde poniente a oriente en el mapa, es decir, de izquierda a derecha. Los perfiles 1, 2, 3 y 4 se pueden observar en las Figuras 9, 10, 11 y 12, respectivamente. Cada perfil, posee una pequeña descripción que contiene las cotas máximas y mínimas del terreno, las comunas que recorre, una leyenda con la descripción de los suelos encontrados y una vista del mapa en planta de isovelocidades indicado en Figura 7 con una línea negra indicando el recorrido del perfil mostrado dentro de ese mapa. En general, todos los perfiles están definidos de norte a sur de izquierda a derecha.

Además, se presentan dos barras que indican distancias; una vertical para indicar la profundidad de los pozos y otra horizontal, donde se indica la distancia entre cada punto de exploración. Los perfiles tienen longitudes totales de 5904, 6265, 4705 y 8432m, respectivamente.

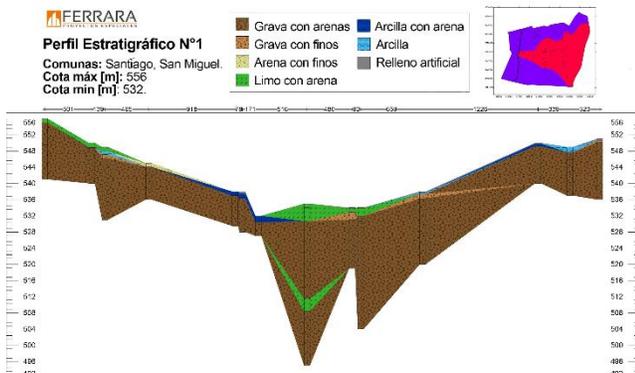


Figura 9. Perfil estratigráfico 1. Distancias en metros. Fuente: Preparado por los autores, 2024.

Como se puede observar en el primer perfil presentado (Figura 9), las profundidades son variables, partiendo y finalizando con profundidades menores debido a la utilización de datos a partir de calicatas de máximo 15 m, esto es producto de que la zona es reconocida históricamente por una zona de grava fluvial densa, no siendo necesario contar con exploración mediante sondaje de 30m para clasificar sísmicamente el sitio. Por su parte, en el centro del perfil se tiene un alcance mayor en profundidad producto de que en el sector las mediciones de velocidad no siempre superan con claridad el límite de suelo tipo B de 500 m/s, entonces se han realizado sondajes de 30m con el fin de contra información adicional para clasificar sísmicamente los sitios. De esta manera, en la zona central se confirma la existencia predominantemente de

grava en la estratigrafía del sector, pero con un estrato de limo con arena en la zona más cercana a superficie y en profundidad de espesor variable.

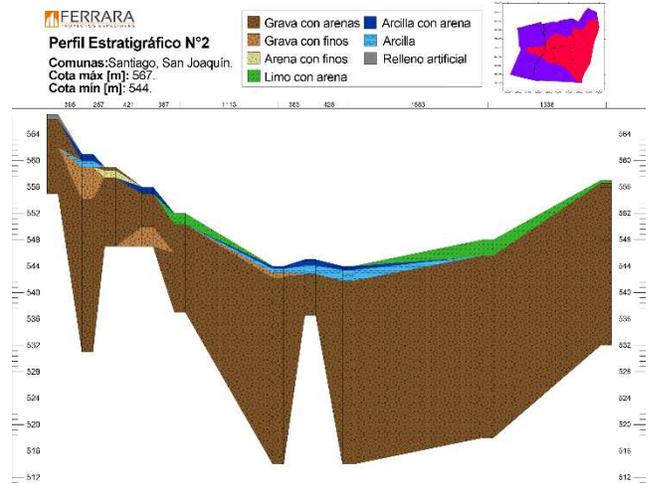


Figura 10. Perfil estratigráfico 2. Distancias en metros. Fuente: Preparado por los autores, 2024.

Para el segundo perfil (Figura 10), se puede comentar que se presenta igual mayoritariamente grava, esta vez, con unas exploraciones más profundas en sus límites, y se repite la presencia de un estrato de fino a nivel superficial, pudiendo faltar exploraciones más profundas en la línea donde en el perfil 1 se identifica el estrato de limo con arena en profundidad.

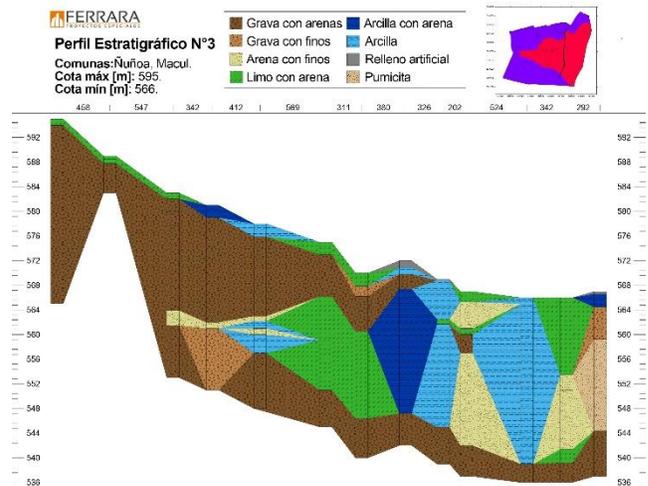


Figura 11. Perfil estratigráfico 3. Distancias en metros. Fuente: Preparado por los autores, 2024.

En el tercer perfil (Figura 11), se observa ya una clara variación en la estratigrafía con respecto a los perfiles anteriores. La grava es solo predominante en los extremos, donde es importante mencionar que se tienen pocos puntos profundos de exploración en la zona norte por lo que no se aprecia una transición limpia en ese

extremo del perfil. La cantidad de estratos mas finos prevalecen en el centro; en este caso, arcillas, limos y arenas con finos. Se tiene además una gran heterogeneidad en la estratigrafía, tanto en dirección horizontal como vertical.

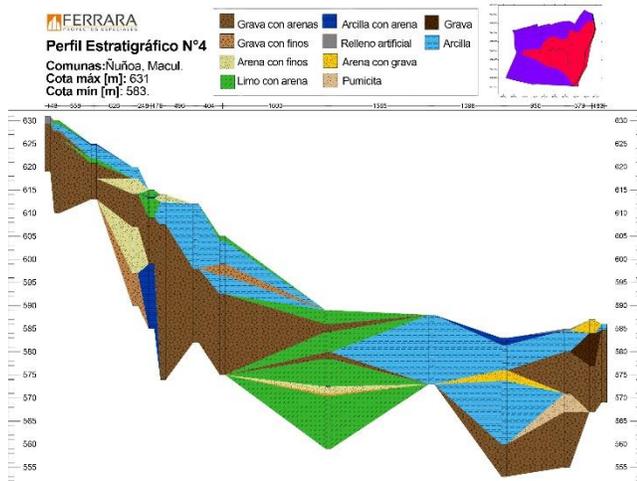


Figura 12. Perfil estratigráfico 4. Distancias en metros. Fuente: Preparado por los autores, 2024.

Por último, en el cuarto perfil (Figura 12), la grava se mantiene en los extremos, pero en forma de intercalaciones en profundidad. La presencia de suelos finos predomina en toda la superficie, y en el centro y extremo sur del perfil en profundidad.

## 5 CONCLUSIONES

En la zona oriente, donde se tienen suelos de transición entre granulares y finos: arena con finos, limo con arena y arcilla con arena, se generan problemas de clasificación sísmica con la normativa vigente, en particular con el cumplimiento del requisito distinto al Vs30. La presencia de suelo fino en un suelo mayoritariamente granular produce una disminución en el número de golpes de SPT (Shahien, 2016). La presencia de suelo granular en suelo mayoritariamente fino, provoca dificultad en obtención de muestras inalteradas para pruebas de laboratorio, ya que en suelos granulares es muy difícil obtener muestras intactas pudiéndose realizar pruebas de laboratorio en muestras reconstituidas (Ameratunga, Sivakugan & Das, 2016). La diferencia entre el comportamiento y resistencia de muestras inalteradas y reconstituidas son significativas (Wijewickreme, Soysa & Verma, 2020). Por lo tanto, se generan condiciones poco favorables para la obtención del segundo parámetro de clasificación, esto puede variar con la nueva normativa que regirá para clasificar sísmicamente un sitio (INN, 2022), donde además del Vs30, es necesario contar con el periodo predominante del suelo, Tg y un levantamiento estratigráfico para contrastar y reportar en paralelo la estratigrafía.

De acuerdo con los perfiles obtenidos, es posible relacionar que el suelo en profundidad es concordante con lo esperado según el mapa de isovelocidades, existiendo principalmente gravas en la zona poniente y extremos norte y sur donde se tiene mayores valores de Vs30 en el mapa, e intercalaciones de arenas y

especialmente finos en la zona oriente central donde se tienen menores valores de Vs30.

La presencia de lentes de finos en estratos gravosos puede ser despreciable en las mediciones de velocidades de ondas de corte, ya que en las curvas de dispersión puede que no se visualice una inversión. La presencia de capas más rígidas o débiles genera que las curvas de alejen del origen, sin modificar velocidades de onda iniciales o finales, lo que de manera práctica puede entenderse como un aumento de área bajo la curva (Araya, 2022), pero dicho aumento puede ser insignificante si las capas son muy delgadas y/o no se tiene un levantamiento estratigráfico que ayude a su procesamiento.

De mapa y perfiles, se puede inferir que la zona de intercalaciones es más amplia en planta que lo que se muestra en los antecedentes disponibles en la actualidad y es coincidente con lo más recientes hallazgos de las exploraciones de Metro. Se debe tener especial cuidado con la particularidad para la definición de la exploración y clasificación sísmicamente de un suelo como sitio tipo B, donde en antecedente Decreto 61 (MINVU, 2011) se indica: “Una excepción son las gravas fluviales de espesor mayor o igual a 30 metros (medidos a partir de la superficie natural), las cuales clasifican en Suelo Tipo B sin necesidad de medir Vs, ni presentar la descripción estratigráfica detallada. El sustento para establecer la presencia de gravas fluviales de espesor mayor o igual a 30 metros puede ser de tipo geológico, o información confiable y demostrable de sectores del entorno inmediato”. Entonces, se podría clasificar un suelo como tipo B por antecedentes geológicos, y con una exploración superficial que no alcance a identificar estratos distintos a la grava.

Cabe señalar que la obtención perfil de Vs de las distintas oficinas de ingeniería pueden ser variables, ya que hoy en día no existe una norma que establezca procedimientos estandarizados para la estimación de velocidades, por lo cual un mal procesamiento de estas mediciones sumado al uso de mapa geológicos no actualizados podría conducir a una errónea clasificación sísmica de sitio.

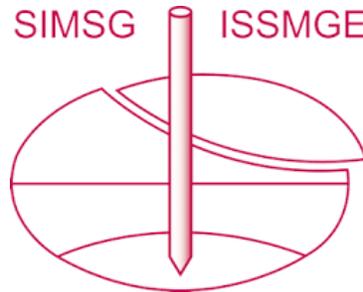
Se debe tener especial cuidado con el uso de los mapas geológicos, pues se debe entender que estos son generados en base a interpolaciones de levantamientos de puntos discretos de sitios, por lo cual es recomendable considerar una distancia de seguridad de la zona de suelos mixtos para definir la zona de Gravas de río Mapocho o río Maipo.

## 6 REFERENCIAS

- Araya M., (2022). Análisis de sensibilidad de curvas de dispersión y curvas elípticas para generación de criterios de inversión conjunta en técnicas geofísicas requeridas por normativas de diseño sísmico. Tesis pregrado, UTFSM, Valparaíso.
- Ameratunga, Jay, Sivakugan, Nagaratnam, and Das, Braja M. (2016) Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering. Developments in Geotechnical Engineering. Springer, New Delhi, India.
- Fernández, J.C. (2003) “Respuesta sísmica de la cuenca de Santiago”, Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental N°1.
- González C. (27/06/2024) *Experiencias del Metro en la exploración y caracterización del suelo de Santiago*. Exploraciones Geológica y Geotécnica de obras subterráneas organizado por corporación de túneles y espacios CTES- CHILE. Santiago Chile.

- Instituto Nacional de Normalización (2009). NCh 433.Of96 Modificada en 2009, Diseño Sísmico de Edificios. Santiago de Chile.
- Instituto Nacional de Normalización (2014). NCh 1508: Geotecnia — Estudio de mecánica de suelos. Santiago de Chile.
- Instituto Nacional de Normalización (2022). Proyecto de norma en consulta pública – prNCh433, Diseño Sísmico de Edificios. Santiago de Chile.
- Leyton, F., Sepúlveda, S., Astroza, M., Acevedo, P., Ruiz, S., González, L. and Foncea, C. (2011). Seismic zonation of the Santiago Basin, Chile. 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago, Chile.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2011). Decreto 61 que aprueba reglamento que fija el diseño sísmico de edificios y deroga decreto 117, de 2010. Santiago de Chile.
- Muñoz, M., Garat, P., Flores-Acheveque, V., Vargas G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S., Daniele, L., Morata, D., Parada, M. A. (2015). Estimating low-enthalpy geothermal energy potential for district heating in Santiago basin-Chile (33.5 °S). Disponible online. Renewable Energy 76.
- Shahien, M. M. (2016). Fines Content correction factors for SPT N values - Liquefaction resistance correlation. Vol. 5 of Proc., 5th Int. Conf. on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation, 663–668. B. Lehane, H. E. Acosta-Martínez, and R. Kelly (Eds). Sydney: Australian Geomechanics Society.
- Strater® software (software de mapeo y modelado geofísico utilizado en la visualización de datos de pozos, suministrado por: <http://www.goldensoftware.com/products/strater>).
- Valenzuela, Gloria (1978): “Suelo de Fundación del Gran Santiago”, Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín 33, 84 pp.
- Vergara L., Verdugo R. (2015). “Condiciones geológicas- geotecnicas de la cuenca de Santiago y su relación con la distribución de daño del terremoto del 27 F”, Obras y Proyectos no.17; Concepción, Chile.
- Wijewickreme, D., Soysa, A. and Verma, P (2020). Observations on the response of natural fine-grained soils with respect to particle fabric. Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (ICEGE 2019) 335-352, Silvestri & Moraci (Eds). Rome, Italy.

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12<sup>th</sup> to November 16<sup>th</sup> 2024 in Chile.*