

Primera versión de un repositorio y mapa de suelos singulares chilenos.

First version of a repository and map of Chilean singular soils.

Matías Bravo-Zapata

División Geotecnia Laboratorio, IDIEM, Chile, mfbravozapata@gmail.com

Leonardo Dorador

EGSciences, Chile

RESUMEN: En Chile se presentan diversas condiciones geológicas, geomorfológicas y meteorológicas que influyen en los procesos formativos de los suelos singulares, reflejándose en las distintas características y comportamientos mecánicos de cada uno de ellos. Por lo que comprender el origen geológico de estos suelos resulta necesario, debido al requerimiento de estudios particulares exigidos por distintas normativas, sin embargo, la información resulta escasa o de difícil acceso. Este trabajo tiene por objetivo crear un repositorio público y colaborativo que contenga información de suelos singulares. Para ello, se realizó una revisión en la literatura científica que permitiera comprender los procesos formativos y distribución de los suelos salinos, diatomáceos, pumicitas, maicillo, arenas Biobío, trumao y mazacote. Como resultados, se obtienen mapas de zonificación y puntos de muestreo de los suelos singulares incluidos en este artículo, así como una descripción y resumen de parámetros geotécnicos.

ABSTRACT: Chile exhibits diverse geological, geomorphological and meteorological conditions that influence in the singular soils formative processes, evidenced in the distinct characteristics and mechanical behaviors to each of them. Therefore, understanding the geological origin of these soils is necessary, due to the requirements of particular studies requested by different regulations, however, the information is scarce of difficult to access. The objective of this study is to create a public and collaborative repository that contains information of singular soils. To this end, a review of the scientific literature was carried out to understand the formative processes and distribution of saline, diatomaceous, pumicite, *maicillo*, *biobio* sands, *trumao* and *mazacote* soils. As results, a zonation and sampling points maps of the singulars soils includes in this article are obtained, as well as a description and summary of geotechnical parameters.

KEYWORDS: suelos singulares, ingeniería geológica, .

1. INTRODUCCIÓN.

En Chile se presentan diversas condiciones geológicas, geomorfológicas y meteorológicas que representan factores influyentes en los procesos formativos de los suelos. Esta variabilidad se refleja en los tipos de suelos que se pueden encontrar en el territorio nacional, otorgando características y comportamientos mecánicos particulares a cada uno de ellos, dando origen a los suelos singulares.

La NCh 1508 of. 2014 menciona entre ellos a las arenas licuables, limos colapsables, suelos expansivos, alofánicos, salinos, residuales y suelos antrópicos, donde además señala la necesidad de que un profesional competente defina ensayos para su clasificación, recomendando un trabajo de gabinete que contenga información geológica y geotécnica.

En ese sentido, Villalobos (2014) relata la importancia de la interacción entre la Geología y la Geotecnia, resaltando lo fundamental que es conocer y entender el origen geológico de los suelos previamente debido a la escala en la que se desarrolla la Mecánica de Suelos, por lo que destaca a la Ingeniería Geológica como el área especializada en realizar este vínculo.

Lo anterior, evidencia que el estudio y comprensión de los suelos y, en particular, de los suelos singulares, responde al conocimiento interdisciplinario geológico y geotécnico. Bajo este punto, es que el siguiente trabajo tiene por objetivo desarrollar un repositorio público y colaborativo que recopile información

asociada a los suelos singulares, permitiendo la transferencia de conocimiento y la vinculación académico-profesional para afrontar los problemas geotécnicos actuales y futuros. Asociado a este repositorio, se presenta la primera versión del mapa de zonificación y descripción de suelos singulares, elaborado a partir de la interpretación de información geológica y procesos formativos de estos suelos, estudios geotécnicos, problemáticas y recomendaciones ingenieriles, donde la información fue georreferenciada a través del software SIG, QGIS.

Cabe señalar, que la versión presentada de la zonificación de suelos singulares es una primera aproximación, que espera actualizarse de manera periódica, a partir de la disponibilidad de nueva información.

2. REPOSITORIO.

El repositorio ha sido desarrollado en la plataforma web de Github (*link de acceso: [MBravo-Zapata/Suelos_Singulares_CL](https://github.com/MBravo-Zapata/Suelos_Singulares_CL) (github.com)*). En esta versión se considera un grupo de siete suelos singulares chilenos, que corresponden a las arenas Biobío, suelos diatomáceos, suelos salinos, pumicitas y los suelos residuales graníticos (maicillo) y alofánicos (trumao). Dentro del repositorio, se incluyen artículos y estudios geotécnicos asociados

a los suelos mencionados, los mapas de zonificación y puntos de muestreo (ambos en versión PDF) y la tabla de parámetros encontrados en la literatura.

Para la estructuración del repositorio, se asignó un identificador a cada tipo de suelo singular, mientras que el número de muestra corresponde a un código alfanumérico compuesto de cuatro dígitos, donde cada dígito sigue el correlativo 1 – 9 y A – Z. La tabla 1 presenta la codificación de cada tipo de suelo.

Tabla 1. Codificación para cada tipo de suelo singular y muestras.

Tipo de Suelo	Código
Arena Biobío	AB
Diatomáceo	DT
Maicillo	MC
Mazacote	MZ
Pumicitas	PM
Salinos	SA
Trumao	TR

Para colaborar con el desarrollo del repositorio en posteriores versiones, se debe acceder al formulario del siguiente enlace (<https://forms.gle/AK5rzF1v1UgPHC2U6>). Este formulario permite adjuntar trabajos de investigación (tesis, artículos, informes, mapas), datos referenciales del trabajo y archivos en formato *Shape* (.shp), especificando el tipo de suelo singular estudiado y qué información contiene el trabajo. De esta manera, la nueva información se dispone de forma ordenada para la revisión y actualización del repositorio.

3. MAPA DE SUELOS SINGULARES.

El mapa de suelos singulares se elaboró a partir de la revisión de información geológica y geotécnica disponible en la literatura científica (tesis, artículos de revistas científicas y congresos, libros y mapas geológicos), correspondiente a información de procesos formativos, mapas de zonificación y puntos de muestreo de los suelos singulares considerados en este estudio, con el fin de complementar los estudios y consolidar toda la información en un solo mapa. Este proceso permitió asociar una litología al tipo de suelo singular, facilitando su zonificación al emplear como base los distintos mapas disponibles en la literatura como base general,

entre ellos, el Mapa Geológico 1:1.000.000 elaborado por Sernageomin (2003).

En el caso de los suelos salinos, Acevedo et al. (2004) presentan una distribución de estos, asociados principalmente a depósitos de playas, campos de sales y salares, clasificando los depósitos según el tipo de depositación de las sales. De esta forma, los autores mencionan los lagos de agua salada secos, los lagos subterráneos, depósitos de nitrato, rellenos coluviales y aluviales, lentes arenosos eólicos, depósitos marinos, rocas sedimentarias y depositaciones salinas sobre rocas y en diaclasas. Estos depósitos se presentan en la zona de playa, pampas y en la precordillera de los Andes, y pueden asociarse a distintas secuencias sedimentarias presentes en el Mapa Geológico escala 1:1.000.000. Estas secuencias corresponden a secuencias marinas carbonatadas y clásticas y secuencias marinas litorales del Jurásico – Neocomiano (J1m) y Jurásico Medio Superior (Js1m), respectivamente, presentando niveles de yeso y evaporitas. También a secuencias de abanicos aluviales, pedimento o fluviales, secuencias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales y fluviales, y depósitos evaporíticos (salares) del Mioceno Inferior – Medio (M1c), Mioceno Superior-Pleistoceno (MP1c) y Mioceno – Cuaternario (MQs). Secuencias lacustres con niveles calcáreos y rocas sedimentarias consolidadas de facies aluviales, lacustres y eólicas del Plioceno – Pleistoceno (PP111 y PP11c, respectivamente). Por último, a depósitos aluviales (Qa), depósitos eólicos (Qe), depósitos litorales (Qm) del Pleistoceno – Holoceno.

La ubicación de los suelos diatomáceos fue determinada a partir del mapa geológico y columna estratigráfica de la zona norte de la Península de Mejillones presentados en Arenaldi (2018), que da cuenta de que las diatomitas están asociadas a la Formación La Portada, que subyace a la sucesión litoral de Mejillones. Las pumicitas, por su parte, están asociadas a las Ignimbritas de Pudahuel, que corresponden a depósitos piroclásticos riolíticos del Pleistoceno (PI3t) (Troncoso et al., 2015). Las arenas Biobío fueron distribuidas a partir de los mapas presentados por Vivallos et al., (2010) y Erices (2018), asociados a los depósitos fluviales del río Biobío del Pleistoceno – Holoceno. La distribución del trumao se realizó a partir del mapa presentado en Paredes y Verdugo (2004). Basándose en la descripción del estado de las rocas del batolito costero realizada por Flandes (2017), junto con la distribución del batolito costero presente en Deckart et al. (2014), se zonificó el maicillo. Por último, la ubicación del mazacote, o suelo glacial, se asoció a los depósitos fluvio-glaciales (Q1) y depósitos morrénicos (Q1g1) presentes en la región de Magallanes, según lo dispuesto en el mapa Geológico de Chile, y los estudios de Ortiz (2010) y Vásquez (2012).

Finalmente, la Figura 1 presenta el mapa de zonificación de los suelos singulares considerados en este estudio.

Mapa de Zonificación de Suelos Singulares

Datum WGS 84 - Sistema de Coordenadas UTM Zona 19S

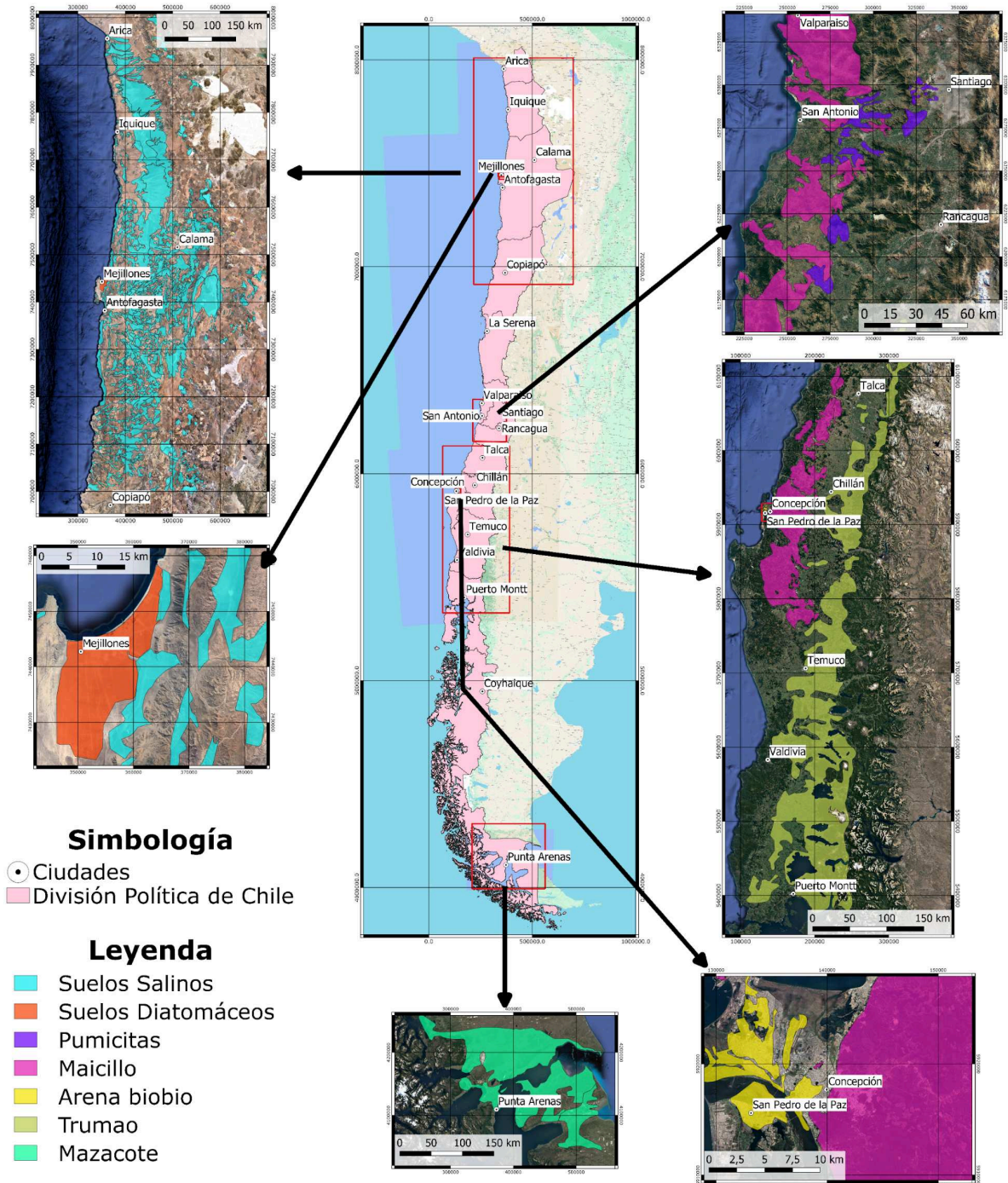


Figura 1. Mapa de

zonificación de algunos suelos singulares en Chile. Elaborado a partir de SERNAGEOMIN (2003); Acevedo et al., 2004; Arenaldi, 2018; Deckart et al., 2014; Flandes, 2017; Ortiz, 2010; Paredes & Verdugo, 2004; Puga, 2012; Rodriguez, 2015; Romero-Mancilla et al., 2021; Troncoso et al., 2015; Vásquez, 2012; Verdugo & Paredes, 2004; Villalobos, 2014; Vivallos et al., 2010.

4. DESCRIPCIÓN DE SUELOS SINGULARES

4.1. Suelos Salinos

Debido a los procesos tectónicos entre la Placa de Nazca y la Sudamericana, es posible encontrar depósitos salinos alineados en dirección Norte – Sur, entre los paralelos 17°30' y 27° S, extendidos entre la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Copiapó. Dichos depósitos están conformados por los grupos minerales de cloruros, sulfatos, carbonatos y nitratos, distribuidos en salares pre andinos y andinos, así como depósitos ubicados en las pampas cercanas a la cordillera de la Costa, formando así suelos con costras salinas producto del ascenso capilar de napas con elevada salinidad o infiltración de aguas salinas (Acevedo et al., 2004).

Olguín et al. (2004) ha observado dos estructuras internas en estos suelos. La primera de ellas es una estructura soldada o macroporosa, donde se identifican fases suelo-sal-aire y con una permeabilidad tipo acuífero, donde el agua percolada satura el suelo de forma rápida. Los suelos con esta estructura presentan sales cristalizadas como cementantes entre las partículas insolubles, las que se pueden disolver producto de su permeabilidad y provocar el colapso de su estructura, es decir, provocar asentamientos. La segunda estructura interna es el tipo matriz o microporosa, en donde el espacio entre las partículas insolubles está ocupado por sales solubles y suelo fino, reduciendo el volumen de vacíos. La interacción fisicoquímica de las partículas y la cristalización de las sales hacen de estos suelos menos permeables, por lo que tienen un potencial de colapso menor.

Algunos de los problemas identificados por Acevedo et al. (2004) son los asentamientos por la disolución de sales y daños en el hormigón y armaduras por corrosión, debido a que la acción antrópica en la manipulación recursos hídricos puede perturbar el equilibrio. También ordena los grupos minerales según los efectos que pueden tener en las obras civiles, donde los cloruros son los minerales más perjudiciales (mayor disolución y causa principal de asentamientos y agrietamientos, producto de su acumulación en zonas planas), seguidos por los sulfatos (agente meteorizante durante la cristalización, debido a la expansión), mientras que los carbonatos no generan problemas a corto plazo (difícil disolución). Por otro lado, Olguín et al. (2004) mencionan que el modelo de fases propuesto, elaborado a partir de la granulometría y límites de Atterberg, debe ser complementado con otros tipos de estudios u observaciones, como la microscopía mineralógica y electrónica, ya que no hace distinción del tipo de sal soluble presente. Esto influye directamente en la velocidad de disolución de las sales y, por ende, en el potencial de colapso.

Complementando lo anterior, la experiencia internacional es útil en la comprensión de los suelos salinos y los problemas posibles en esta materia. Li et al. (2016) menciona que el anión de Cloro (Cl-) tiene efectos negativos en la resistencia del suelo a corto y largo plazo. En ese sentido, diversos autores (Cheng et al., 2021; Li et al., 2016; Mishra et al., 2018; Ying et al., 2021; Zhang et al., 2017, 2019) analizaron la variación de parámetros del suelo a partir de distintos porcentajes de salinidad. Uno de estos efectos es la disminución de la conductividad eléctrica, provocada por la concentración de NaCl. A medida que aumenta salinidad, disminuyen los límites de consistencia en muestras de caolín (Mishra et al., 2018). Por otro lado, el límite plástico y líquido incrementan levemente cuando el suelo presenta concentraciones salinas del 0 al 1%, manteniéndose constante hasta disminuir significativamente a partir del 3% de concentración, atribuible a la reducción del volumen de vacíos del suelo (Li et al., 2016). Respecto a la compactación, la salinidad disminuye levemente el peso específico seco, sin embargo, la humedad óptima se mantiene (Li et al., 2016; Ying et al., 2021).

Otro aspecto para considerar son los ciclos de congelación-descongelación. La variación de volumen tiene un comportamiento diferenciado según el tipo de sal presente, puesto que el alto contenido de sulfosales ($\geq 0.5\%$) aumenta el volumen en un $\sim 4\%$ cuando las temperaturas son cercanas a los -20°C , mientras que en suelos con alto contenido de sales cloradas ($\geq 15\%$) el volumen disminuye en un $\sim 1\%$ a temperaturas de -10°C (Zhang et al., 2017). Los autores señalan que el comportamiento de los suelos con sulfosales se debe a la cristalización de estos minerales, volviendo al suelo expansivo. En cuanto a la resistencia de estos suelos, Cheng et al. (2021) menciona que independiente del contenido de sal, la resistencia al corte y la cohesión disminuye drásticamente en los 10 primeros ciclos, mientras que el ángulo de fricción aumenta ligeramente en este mismo rango. Adicionalmente, el contenido de sal mantiene casi constante la cohesión, independiente del ciclo de congelación, mientras que el ángulo de fricción disminuye drásticamente entre el 0.5% y 2% de contenido de sales de manera inicial, y entre el 1% y 2% entre 10 a 60 ciclos. Por lo tanto, Cheng et al., (2021) los ciclos de congelación-descongelación afectan a la resistencia al corte por la disminución de la cohesión, mientras que el contenido de sales lo hace debido a la reducción del ángulo de fricción. Por otro lado, Zhang et al. (2017) indica que la cohesión y el ángulo de fricción de suelos con sulfosales y sales cloradas aumentan a los -10°C , pero disminuyen con la salinidad.

Como la variación de parámetros producto de la congelación favorece la resistencia y capacidad de carga del suelo, puede mejorar las condiciones para carreteras y estabilidad de taludes (Zhang et al., 2017). Sin embargo, la variación de volumen provocaría desniveles en el camino o fenómenos de subsidencia por disolución de los minerales o rocas evaporíticas, colapso de cavidades, lavados de suelos o asentamientos diferenciados (Correas, 2015).

Algunas recomendaciones que se pueden entregar respecto a los suelos salinos es la utilización de ensayos geofísicos, como los perfiles SEV (Imhof et al., 2001) o inducción electromagnética (Wittler et al., 2006), para determinar la conductividad eléctrica del suelo y así definir el grado de salinidad (Alva et al., 1976; Gallart Martínez, 2018). Para la corrosión, existen alternativas como el concreto con envoltura de polímero reforzado con fibra de carbono (Wootton et al., 2003), concreto con aditivos y PVC (Baydjanov et al., 2019) y revestimiento de pilotes (Manap et al., 2017). Mientras que en el caso de mejoras de terreno se contempla el refuerzo del suelo con fibras de paja y limo (Li et al., 2012), estabilización profunda con columnas de módulo controlado de mezcla suelo-cemento (González & Pedregal, 2019), geotextiles (Abduljawad et al., 1994) y drenajes. En cuanto a las normativas, se encuentran la NCh 3394 of 2017 – “Suelo Salino: Requisitos geotécnicos y de instalaciones sanitarias para diseño y ejecución de obras” y la NCh 1444/1 of 2010 – “Determinación de sales solubles”.

4.2. Suelos Diatomáceos

Estos suelos corresponden a suelos fósiles formados por diatomeas, tipo más común de fitoplancton, quienes presentan una capa externa dura y porosa compuesta por sílice llamada frústula y con un tamaño entre 10 y 500 μm . Poseen una superficie rugosa y una estructura interna con alta porosidad, que permite atrapar y retener agua, afectando las propiedades geomecánicas de estos suelos (Arenaldi, 2018; Díaz-Rodríguez & González-Rodríguez, 2013; Locat & Tanaka, 2001; Sánchez, 2002). En cuanto a la formación de estos suelos, están asociados a zonas de alta actividad volcánica, debido al aporte de sílice al ambiente, favoreciendo la existencia y abundancia de diatomeas y la formación de frústulas (Arenaldi, 2018; Shiwakoti et al., 2002; Talliaferro, 1933). Después de la muerte de las diatomeas, las frústulas se disuelven y pueden servir como sílice disponible para

otras o formar depósitos oceánicos y/o lacustres (Arenaldi, 2018; Treguer et al., 1995).

Estos suelos tienen un comportamiento no plástico independiente del contenido de humedad, debido a que las frústulas atrapan el agua (aumentando el límite líquido) y las diatomeas realizan un nulo aporte de minerales arcillosos, disminuyendo la plasticidad (Arenaldi, 2018; Shiwakoti et al., 2002). Por otro lado, Arenaldi (2018) menciona que el ángulo de fricción varía entre 40° a 50°, obteniendo un valor de 49° para un comportamiento dilatante del suelo, mientras que, para el comportamiento contractivo, el ángulo de fricción varía entre los 31° y 35°.

4.3. Pumicitas

Las pumicitas son suelos volcánicos no alofánicos desarrollados en cuencas sedimentarias de la Región Metropolitana y la Región de O'Higgins, producto de depósitos de pómez. Estas rocas se componen de ceniza volcánica, con vidrios del tipo no coloreado, debido a su composición riolítica (González Pulgar, 2012; Verdugo & Paredes, 2004). Wilson (2013) describe los yacimientos de pumicita, indicando que corresponden a Ignimbrita Pudahuel, distribuidas en el valle del río Maipo. Estos yacimientos tienen una potencia de 10 m, con ceniza volcánica compuesta en un 70% SiO₂ y pómez en un 5 a 10%, lo que concuerda con la descripción anterior.

Lazcano (2018) señala que el proceso de origen de estos suelos es distinto a los convencionales, ya que presentan granulometría variable y son transportados por el aire, depositados en la superficie terrestre o en un cuerpo de agua, pudiendo volver a transportarse y depositarse. El autor agrega que estos suelos predominan en las partes con vulcanismo riolítico explosivo, como Estados Unidos, México, Japón y Chile. Por otro lado, Lazcano (2018) explica que hay cuatro aspectos importantes que le dan un carácter especial a estos suelos, resumidos en la Tabla 2.

Algunas consideraciones que se deben tener respecto a las pumicitas, según la literatura internacional, es la variación de la resistencia, la presencia de niveles orgánicos y los desprendimientos (Hernández Gutiérrez et al., 2015). Además, los parámetros y propiedades del suelo se ven afectados por el índice de vacíos y el tamaño de partículas. La gravedad específica y el peso específico seco son menores a medida que aumenta el tamaño de grano (Esposito y Guadagno, 1998), lo que también ocurre con la resistencia a la trituración (Orense y Pender, 2015), atribuible a los esfuerzos de corte (Orense et al., 2012). Wesley et al. (1999), al comparar arenas cuarcíferas y pumicitas, menciona que la resistencia al corte de estas últimas es mayor, mientras que la compresibilidad es mucho menor.

Tabla 2. Aspectos importantes en los suelos pumicíticos. Modificado de Lazcano (2018)

Factor	Descripción
Partículas	Red de finas oquedades que otorgan ligereza, rugosidad y triturabilidad.
Triturabilidad	Cambian la densidad, aumentan compresibilidad y reducen la resistencia al cortante.
Compresibilidad	Cuatro a cinco veces mayor que en arenas cuarcíferas.
Esfuerzo de Corte	A mayor presión de confinamiento se pierde el máximo y alcanzan un ángulo de fricción interno de 41,5°.

Tabla 3. Correlaciones para suelos pumicíticos.

Parámetro	Ecuación	Autores
Velocidad de onda de corte (SPT no corregido) (V _s)	$V_s = 142,4N^{0,25}$	Ohta y Goto (1978)
	$V_s = 88,4(N + 1)^{0,3}$	Dickenson (1994)
	$V_s = 90,8N^{0,32}$	Hasancebi & Ulusay (2007)
	$V_s = 99,63N^{0,32}$	Zamudio-Zavala & Mayoral (2019)
Ángulo de fricción (φ)	$\phi = 43 PVS$	Vargas Del Rio & Ochoa González (2014)
Esfuerzo de corte (τ)	$\tau_{falla} = 1,92\sigma_0 + 56,31\rho_d - 1204 (\%_{fine})$	Zamudio-Zavala et al. (2016)
	$\tau_{residual} = 1,48\sigma_0 + 8,55\rho_d$	

N: Número de golpes SPT.
 PVS: Peso volumétrico seco
 σ_0 : Tensión efectiva
 ρ_d : Densidad seca kg/m³

El efecto de la presión de confinamiento sobre las pumicitas se refleja en el módulo de corte y velocidad de onda de corte (V_s), donde a medida que aumenta la presión de confinamiento, aumentan ambos parámetros (Asadi et al., 2018). Por el contrario, a medida que aumenta la presión de confinamiento, disminuye la resistencia a la licuefacción considerando la relación del esfuerzo de corte cíclico (Orense y Pender, 2013). Sin embargo, Asadi et al. (2018) señalan que las pumicitas densas sufren bajas deformaciones a pesar de la alta presión de poros que fueron sometidas dentro de su estudio. Cabe mencionar, que el ensayo CPT puede sobreestimar el potencial de licuefacción producto de la trituración de las partículas del suelo, pudiendo ser más útil determinar este potencial a partir de la velocidad de onda de corte (V_s) (Clayton et al., 2019). Estas correlaciones se presentan en la Tabla 3.

Lazcano (2018) considera que es necesario modificar los ensayos de laboratorio con el fin de representar las características de las pumicitas, debido a la interacción entre las partículas y el agua. Por lo tanto, señala que hay que realizar estas pruebas con cautela y complementándolas entre sí, ya que estos suelos no son convencionales.

4.4. Suelos Residuales

Blight (2012) señala que la definición de suelo residual varía según cada país, sin embargo, se pueden definir a modo general como “un material similar al suelo, derivado de la meteorización y descomposición in situ de rocas o fragmentos de roca, que no se han transportado desde su ubicación original”. Wesley (2009) menciona dos grandes diferencias entre los suelos transportados o sedimentarios y los suelos residuales, que concuerdan con la definición anterior. La primera diferencia entre estos dos tipos de suelos son los procesos de erosión, transporte y sedimentación que sufren las partículas. En el caso de los suelos sedimentarios, las partículas se ven afectadas por estos procesos, dándole homogeneidad de tamaños y su nombre, en cambio, los suelos residuales no sufren estos procesos, encontrando perfiles de terreno más heterogéneos. La segunda diferencia es la historia tensional. Los suelos residuales presentan como estado tensional inicial el estado de la roca madre, por lo que no se pueden identificar etapas de consolidación de manera visual. En los suelos transportados si es posible identificar este límite, en base a la competencia y procesos erosivos o de depositación.

Dapena (1978) indica que el clima agrupa un conjunto de factores atmosféricos que regulan la intensidad de meteorización, destacando el agua, la temperatura y el viento. Por su parte, González de Vallejo (2002) agrega que las condiciones climáticas en regiones tropicales, donde hay alta humedad y altas temperaturas, provocan una intensa meteorización química, provocando un gran desarrollo de suelos residuales. En el caso particular de Chile, estas condiciones se presentan en la Zona Central del país, entre la Región de Valparaíso y la Región del Biobío.

Por otro lado, Wesley (2009) plantea una clasificación para los suelos residuales basada en la composición mineralógica, dividiéndose en tres grupos. El primer grupo corresponde a los suelos sin fuerte influencia mineralógica (Tipo A). Estos suelos presentan arcillas de baja actividad (como el caolín), abarcando muchos tipos de suelos residuales, principalmente aquellos formados por meteorización de areniscas o rocas ígneas graníticas, siendo suelos de grano grueso con una porción arcillosa. Los suelos con una fuerte influencia mineralógica (Tipo B) conforman el segundo grupo. A diferencia de los suelos Tipo A, estos presentan arcillas de alta actividad (como esmectitas), suelos vertisoles o “black cotton”, formados en zonas de mal drenaje, por lo que poseen una alta plasticidad y potencial de hinchamiento. El tercer grupo lo conforman los suelos con fuerte influencia mineralógica por arcillas “especiales” no encontradas en arcillas sedimentarias (Tipo C). En estos suelos se puede encontrar la halloisita y el alofán, propios de suelos residuales de origen volcánico, y óxidos de hierro o aluminio, como la gibbsita y la goetita.

Además, Wesley (2009) señala que hay dos factores que se deben incluir relacionado a la estructura. Por un lado, la macroestructura abarca aquellas características visibles, como la estratificación, discontinuidades, fisuras, poros, roca no meteorizada o estructuras heredadas de la roca madre. Y la microestructura, que corresponde a la cementación y agregados entre las partículas. Además, el autor señala que son difíciles de determinar, pero pueden inferirse a partir de la sensibilidad del suelo, debido a que una alta sensibilidad indica la presencia de enlaces entre partículas destruidas al ser remodeladas.

4.4.1 Maicillo

Los suelos graníticos, conocidos en Chile como Maicillo, son aquellos que se forman a partir de la meteorización química de rocas ígneas intrusivas. En el caso del Maicillo, estas se forman producto de la meteorización de las rocas del Batolito Costero, es cuerpo intrusivo compuesto, grande y alargado, que atraviesa

rocas metamórficas más antiguas, donde posteriormente intruyeron magmas cuarzodioríticos a graníticos, y presenta distintos niveles de alteración y meteorización (Deckart et al., 2014; Flandes, 2017). Este Batolito, se extiende entre la región de Valparaíso y la cordillera de Nahuelbuta, siendo el Maicillo uno de los suelos residuales más abundantes del país (Villalobos, 2014).

En cuanto a las características de las rocas del Batolito Costero, Flandes (2017) las describe con una estructura inequigranular, con cristales de ortoclasa de gran tamaño, inmersos en una matriz de cuarzo y material de alteración, como el Maicillo y arcillas. El producto de la reacción química entre la roca y el agua corresponde a caolinita y sílice, siendo la primera el producto más abundante de la descomposición química del feldespato, mientras que el Cuarzo (SiO₂) el mineral más resistente a la meteorización (Flandes, 2017). Estos suelos pueden clasificarse granulométricamente como arenas limosas o limos arenosos (Au, 1996), presentando una coloración marrón oscuro a blanquecino. Además, según la clasificación de Wesley (2009), el Maicillo puede clasificarse como un suelo residual Tipo A.

Debido a sus propiedades mineralógicas, el Maicillo puede mantener diversas estructuras geológicas posteriores a la meteorización, denominadas estructuras heredadas, que corresponden a las diaclasas presentes en el macizo rocoso, así como a planos de meteorización, fallas o diques (Aydin, 2006; González de Vallejo, 2002). Estas discontinuidades representan un factor influyente en la estabilidad de taludes, dominando el desarrollo de pendientes (Wesley, 2011).

4.4.2 Trumao

El trumao es un suelo alofánico formado producto de la meteorización de cenizas volcánicas, compuestas por vidrio volcánico, cristales y líticos, y bajo contenido de SiO₂ (Paredes y Verdugo, 2004), dando lugar a los minerales alofán e imogolita (González Pulgar, 2012; Paredes & Verdugo, 2004; Romero-Mancilla et al., 2021; Verdugo, 2008; Verdugo & Paredes, 2004). La Tabla 4 resume los factores de formación de los suelos alofánicos (Paredes y Verdugo, 2004).

Tabla 4. Factores de formación de suelos alofánicos y su efecto. Modificado de Paredes y Verdugo, 2004.

Factor	Descripción
Precipitación	Lixivia superficies generando alteración.
pH	4,9 -7,6 para la formación.
Grado de Percolación	Influencia en el drenaje y acumulación de materia orgánica.
Material Parental	Cenizas coloreadas favorecen formación de alofanos.
Topografía	Baja pendiente implica mal drenaje.
Materia Orgánica	Bajan el pH, inhibiendo la formación.
Sucesión de depositaciones	Reabastece de componentes químicos.
Temperatura	Temperaturas altas aceleran las reacciones.
Edad	Orden de vida de 25.000 años.

En particular, los parámetros geotécnicos del Trumao están influenciados por los procesos de secado y perturbación de muestras. En ese sentido, (Romero-Mancilla et al., 2021) indica

que el Índice de Plasticidad se reduce considerablemente, sin modificar su clasificación USCS. El valor del peso específico seco máximo del ensayo Proctor modificado en las muestras secadas al horno presentan un aumento, respecto a las muestras inalteradas, mismo comportamiento en el valor del CBR, donde los autores recomiendan no secar las muestras para el desarrollo de proyectos. Otros efectos son el aumento del coeficiente de compresibilidad medio y la disminución de la resistencia al corte no drenado. Por último, señalan que el Trumao es un suelo muy sensitivo, lo que concuerda con los resultados de Verdugo y Paredes (2004), quien además señala que los suelos no pueden ser secados previamente a los ensayos que requieran mantener la estructura original del suelo.

4.5. Arenas Biobío

Estas arenas son parte de los depósitos fluviales no consolidados del río Biobío, pudiéndose encontrar en el antiguo delta del río, lugar donde se encuentra la ciudad de Concepción. Estas arenas varían de finas a gruesas, con pequeña presencia de limo, buena selección y subredondeadas. Tienen su origen en material del volcán Antuco, erosionado y transportado por el río Laja, principal afluente del río Biobío. La composición de la arena Biobío es andesítica-basáltica (Vivallos et al., 2010).

Puga (2012) agrega que estas arenas poseen un color gris oscuro a negro castaño, sin cementación y con fragmentos de roca volcánica gris oscuro, con escasos bolones de granito intercaladas con laminillas de limo de menos de 1 mm de espesor.

Si bien las características mencionadas no parecieran ser alguna singularidad, sin embargo, las arenas Biobío presentan elevados índices de vacíos por lo que son potencialmente licuables, siendo un riesgo para la población. Así lo evidencia Verdugo et al. (2010), donde analizan distintos efectos del terremoto ocurrido en Chile el año 2010, en el Gran Concepción. Dentro de su estudio, se observaron como casas y edificios fueron afectados por la licuación tras el terremoto, construidas sobre depósitos de arenas Biobío y que su ubicación coincide con la zonificación propuesta.

Considerando que el potencial de licuación está relacionado con la compactación, resulta útil la ecuación planteada por Dobry & Poblete (1966) (ver Eq. 1) para determinar la densidad máxima a partir de la densidad mínima, asegurando una precisión casi 4 veces mayor que el ensayo de densidad máxima para las arenas Biobío. Si embargo, la dispersión de la ecuación es casi el doble de cuando se determina la densidad máxima experimentalmente. Los autores señalan que la regresión planteada permite controlar los rellenos compactados, determinando la densidad mínima en

relleno y, así, lograr una menor dispersión de los resultados de densidad relativa en los procedimientos experimentales.

$$D_{m\acute{a}x} = 0.282 + 1.022 \times D_{m\acute{i}n} \quad (1)$$

Por otro lado, Pradenas (2017), quien estudia la influencia de la morfología de granos en la licuación, indica que a menor esfericidad (partículas angulares) disminuye la susceptibilidad a la licuación de las arenas Biobío, siendo factor en la elección de material empleable en mejoramiento de terrenos potencialmente licuables.

4.6. Mazacote

Ortiz (2010) señala que el mazacote es un suelo que aún no está definido, debido a que no hay consenso en lo que realmente corresponde este suelo patagónico llamado comúnmente "mazacote". Por otro lado, el autor menciona que el mazacote se clasifica según la coloración, encontrando la variedad azul, verde y gris.

En general, el mazacote corresponde a material de depósitos glaciares del tipo till, que fueron depositados en las morrenas del frente glaciar en la Patagonia Chilena. Tienen una granulometría variable entre arcilla y arena, y mantienen la historia tensional, de fallamiento y procesos de congelamiento – descongelamiento del material de origen, propios del proceso erosivo del glaciar sobre la roca (Vásquez, 2012). Sin embargo, Ortiz (2010) hace diferencia entre el mazacote y el till, mencionando que el primero posee una granulometría limo-arcillosa, mientras que el material fino mezclado con arena corresponde al till.

5. PUNTOS DE MUESTREO Y PARÁMETROS.

La Figura 2 presenta la ubicación de puntos de muestreo realizados por algunos autores mencionados en el apartado anterior, a partir de las coordenadas entregadas en sus estudios.

La distribución espacial de los estudios sobre el maicillo (Cabrera, 2007; Rodríguez, 2015; Flandes, 2017), el trumao (Verdugo y Paredes, 2004; Hermosilla, 2012; Romero et al., 2021) y suelos diatomáceos (Arenaldi, 2018) dan cuenta de las áreas que aún no han sido estudiadas, correspondiendo a una gran extensión del territorio. Por otro lado, esta problemática está relacionada a la falta de registros o precisión de las coordenadas en los estudios revisados, así como la información confidencial de diversos proyectos y estudios geotécnicos realizados.

Puntos de muestreo en Suelos Singulares

Datum WGS 84 - Sistema de Coordenadas UTM Zona 19S

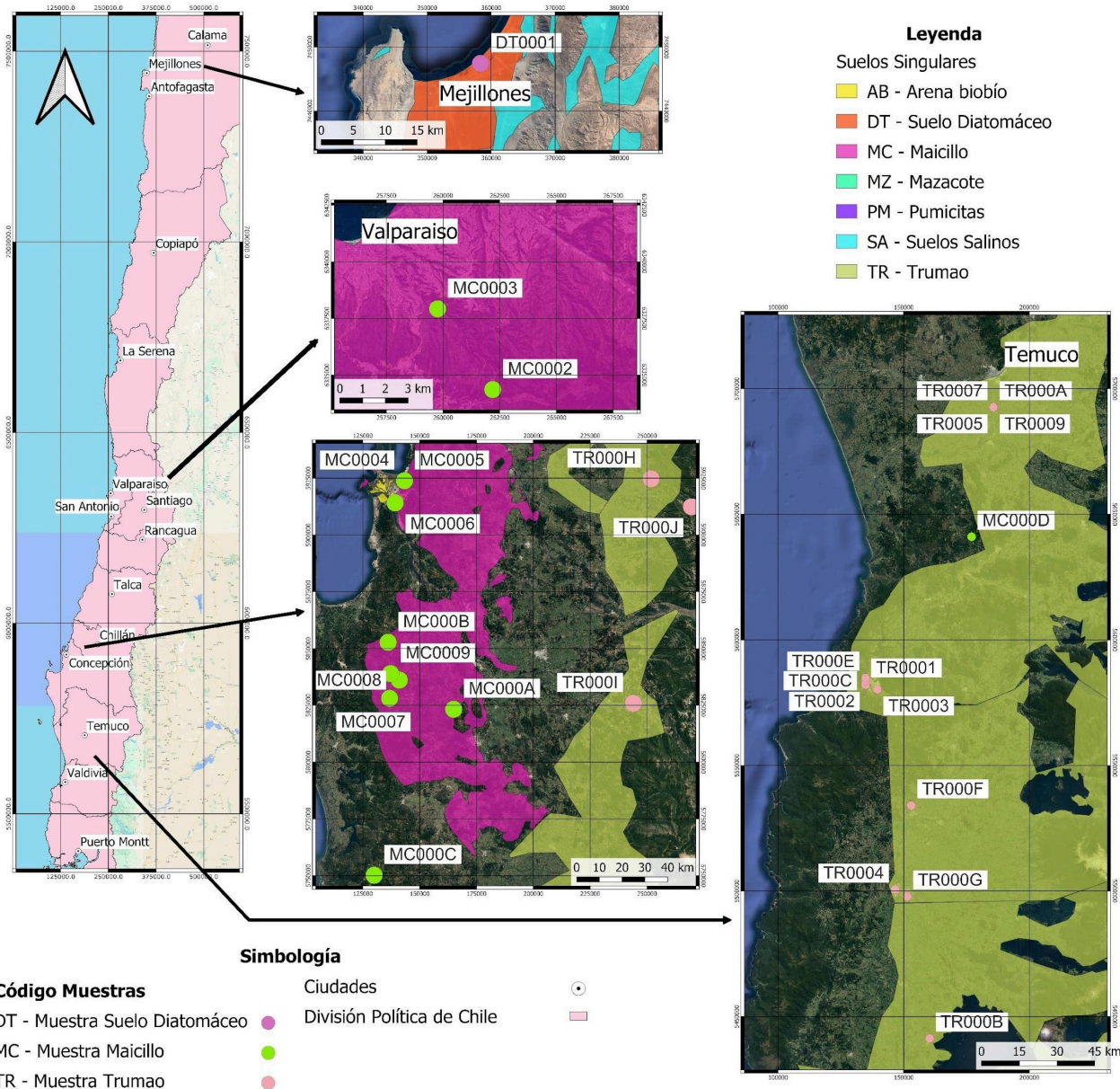


Figura 2. Puntos de muestreo en suelos singulares presentes en este estudio. Elaborado a partir de Arenaldi (2018); Cabrera (2007); Flandes (2017); Hermosilla (2012); Rodríguez (2015); Romero et al. (2021); Verdugo y Paredes (2004).

En relación a estos puntos de muestreo, la Tabla 5 presenta un resumen del rango de variación de parámetros de estado y resistentes asociados a cada suelo singular estudiado por los autores mencionados. Cabe mencionar que mayor detalle de la parametrización de estos suelos singulares se encontrará disponible dentro del repositorio, diferenciándose por cada tipo de suelo y código de muestra.

Tabla 5. Resumen de parámetros de suelos singulares. Elaborado a partir de Fonca et al (2004), Arenaldi (2018), Flandes (2017), Rodríguez (2015), Verdugo y Paredes (2004), Hermosilla (2012), Romero et al (2021) y Ortiz (2010).

Suelo	Salinos	Diatomeas	Maicillo	Trumao	Mazacote
-------	---------	-----------	----------	--------	----------

UCSC	MH	SM-SC	MH	CH-CL
LL (%)	62	25.97-47	50-176	26,6-54
IP	22	28-30,64	15-89	8,3-32
Gs	2,65-2,7 3	2,63	2,58-2,81	2,49-3,09
yd (kN/m ³)	5,89 - 9,81		15,85-18,2	4,91-12,26
c max (kPa)			0-18.1	9,81-49,05
phi max (°)	40-50	13,15-44,3	30-30.7	30,3
c residual (kPa)				0-29
phi residual (°)		23,03-37,4	39-43,3	28,9

6. CONCLUSIONES

La interacción entre la geología y la ingeniería geotécnica permite comprender de mejor forma el entorno en donde se desarrollan los diversos proyectos y obras ingenieriles. Más aún, cuando este medio es complejo y no ha sido estudiado en profundidad. De esta forma, un trabajo colaborativo entre la comunidad ligada a la geotecnia y geología es fundamental para abordar los problemas de las ciencias de la tierra que son peculiares o menos frecuentes. La profundización en el conocimiento permitirá entender nuestro entorno, proponer mejoras y soluciones frente a los desafíos presentes en las obras civiles y salvaguardar la vida de las personas.

Los suelos salinos, formados por grupos minerales solubles, se producen asentamientos diferenciales y cambios en la permeabilidad, resistencia y consistencia. Por otro lado, los suelos diatomáceos tienen un comportamiento no plástico y elevado ángulo de fricción debido a que están formados principalmente por estructuras de sílice. Las pumicitas, compuestas por cenizas de un 70% de sílice, poseen una alta compresibilidad debido a la trituración de sus partículas, fenómeno que produce una sobreestimación del potencial de licuación a partir del CPT. Las propiedades mineralógicas de las rocas graníticas conservan estructuras geológicas luego de la meteorización que origina al maicillo, las que representan planos de debilidad de laderas y taludes. La meteorización origina nuevos minerales arcillosos en el caso del trumao, donde su estructura se ve afectada por los procesos de secado, reduciendo el índice de plasticidad y sobreestimando la densidad máxima compactada seca y el CBR. Las arenas Biobío, en cambio, presentan un elevado índice de vacíos que las hace potencialmente licuables. O bien, no hay un consenso en qué es el mazacote.

Por lo que comprender el origen y características geológicas, y la distribución geográfica de los suelos singulares a través del mapa de zonificación permite anticipar problemáticas propias de la ingeniería geotécnica asociada a cada uno de estos.

Este repositorio, en su primera versión, ayuda a la necesidad de disponer de información de los suelos singulares en Chile, facilitando la comprensión de la interacción de la geología e ingeniería geotécnica, a través de la disposición de fuentes bibliográficas y mapas de zonificación como apoyo visual.

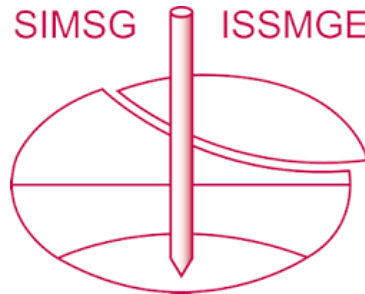
Finalmente, se invita a la comunidad geotécnica a colaborar con el desarrollo de este repositorio y otros proyectos que vayan al servicio de la sociedad.

7. REFERENCIAS

- Abduljawad, S. N., Bayomy, F., Al-Shaikh, A.-K. M., & Al-Amoudi, O. S. B. (1994). Influence of geotextiles on performance of saline sebkha soils. *Journal of geotechnical engineering*, 120(11), 1939-1960.
- Acevedo, P. A., Fonca, C. F., & Olguin, R. O. (2004). Suelos salinos del norte de Chile parte I origen, distribución y características de los depósitos. 9.
- Alva, C. A., Alphen, J. Van, & De la Torre, A. (1976). Problemas de drenaje y salinidad en la costa peruana. ILRI.
- Arenaldi, G. F. (2018). Caracterización geotécnica de suelos diatomáceos. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Asadi, M. B., Asadi, M. S., Orense, R. P., & Pender, M. J. (2018). Effects of Confining Pressure and Void Ratio on the Maximum Shear Modulus of Natural Pumiceous Soils. In *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V: Slope Stability and Landslides, Laboratory Testing, and In Situ Testing* (pp. 238-246). American Society of Civil Engineers Reston, VA.
- Au, S. W. C. (1996). The influence of joint-planes on the mass strength of Hong Kong saprolitic soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 29(3), Article 3. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P3.02>
- Aydin, A. (2006). Stability of saprolitic slopes: Nature and role of field scale heterogeneities. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-89-2006>
- Baydjanov, D., Abdrakhmanova, K., Kropachev, P., & Rakhimova, G. (2019). Modified concrete for producing pile foundations [Pdf]. <https://doi.org/10.18720/MCE.86.1>
- Blight, G. E. (2012). *Mechanics of Residual Soils* (2nd Edition). CRC Press.
- Cabrera, T. (2007). Características geotécnicas de los suelos residuales del batolito de la Cordillera de la Costa [Pregrado]. Universidad de Chile.
- Cheng, S., Wang, Q., Wang, N., Wang, J., & Han, Y. (2021). Study on Mechanical Properties of Saline Soil and Evaluation of Influencing Factors. *Journal of Cold Regions Engineering*, 35(2), 04021002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)JCR.1943-5495.0000247](https://doi.org/10.1061/(ASCE)JCR.1943-5495.0000247)
- Clayton, P. J., de Graaf, K. L., Yong, I., & Green, R. A. (2019). Comparison of assessments of liquefaction potential in selected New Zealand pumiceous soils. In *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions* (pp. 1828-1835). CRC Press.
- Correas, R. (2015). Líneas ferroviarias en terrenos evaporíticos. Medidas a adoptar en fase de proyecto, obra y explotación frente a los procesos de disolución [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Dapena García, J. E. (1978). Estudio de la influencia de la meteorización sobre las características de los materiales pétreos utilizados en el proyecto de las obras públicas. Caminos.
- Deckart, K., hervácopyright, F., Fanning, C. M., ramã\rez, V., caldera3n, M., & Godoy, E. (2014). U-Pb Geochronology and Hf-O Isotopes of zircons from the Pennsylvanian Coastal Batholith, South-Central Chile. *Andean Geology*, 41, 49-82.
- Díaz-Rodríguez, J. A., & González-Rodríguez, R. (2013). Influence of diatom microfossils on soil compressibility. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 325-328.
- Dickenson, S. E. (1994). Dynamic response of soft and deep cohesive soils during the Loma Prieta earthquake of October 17, 1989. University of California, Berkeley.
- Dobry, R., & Poblete, M. (1966). Densidades máximas y mínimas de las arenas del Bio-Bío. *Revista IDIEM*, 5(3), ág. 151-159.
- Erices, J. A. E. (2018). Estratigrafía e icnología de los estratos de la formación quiriquina que afloran en el área costera de la provincia de concepción, región del biobío, Chile: evolución ecosedimentaria del sustrato. Universidad de Concepción.
- Esposito, L., & Guadagno, F. M. (1998). Some special geotechnical properties of pumice deposits. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57(1), Article 1. <https://doi.org/10.1007/s100640050019>
- Flandes, N. (2017). Estudio de la relación entre meteorización y características geomecánicas de la roca granítica de Concepción. [msc thesis]. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Fonca, C. F., Acevedo, P. A., & Olguin, R. O. (2004). Suelos salinos del norte de Chile parte III a - asentamientos para diferentes estructuras de suelo b - lineamientos de nuevas etapas de desarrollo. 8.
- Gallart Martínez, F. (2018). La conductividad eléctrica del suelo como indicador de la capacidad de uso de los suelos de la zona norte del Parque Natural de la Albufera de Valencia. Universitat Politècnica de València.
- González de Vallejo, L. I. (2002). Ingeniería geológica. Pearson Educación. <https://books.google.cl/books?id=mpd4owaacaaj>
- González, J., & Pedregal, A. (2019). Análisis de cimentaciones en terrenos difíciles evaporíticos. 18.
- González Pulgar, C. (2012). PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE DOS SUELOS DE ORIGEN VOLCANICO. Universidad de Chile.

- Hasancebi, N., & Ulusay, R. (2007). Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(2), 203-213.
- Hermosilla, M. A. (2012). Antecedentes de alofán y otros minerales en suelos derivados de cenizas volcánicas del sur de Chile. 10.
- Hernández Gutiérrez, L. E., Santamarta Cereza, J. C., Olalla Maraño, C., Rodríguez Losada, J. A., Muñoz Menéndez, M., González-Gallego, F. J., Rodríguez Martín, J., Pomares Rodríguez, M., López Felipe, M., & Lomoschitz Mora-Figueroa, A. (2015). Ingeniería geológica en terrenos volcánicos. Métodos, Técnicas y Experiencias en las Islas Canarias.
- Imhof, A. L., Guell, A. E., & Villagra, M. S. (2001). Aplicación del método geoelectrico para la determinación de horizontes salinos en la colonia floveras - peña de san juan - argentina. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19, 16.
- Instituto Nacional de Normalización (2010). Norma Chilena NCh 1444 – Aridos para morteros y hormigón – Determinación de cloruros y sulfatos.
- Instituto Nacional de Normalización (2014). Norma Chilena NCh 1508, Geotecnia - Estudios de Mecánica de Suelos.
- Instituto Nacional de Normalización (2016). Norma Chilena NCh 3394, Suelo Salino – Requisitos geotécnicos y de instalaciones sanitarias para diseño y ejecución de obras.
- Lazcano, S. (2018). Suelos pumíticos: Suelos no-conventionales. 6.
- Li, M., Chai, S., Du, H., & Wang, C. (2016). Effect of chlorine salt on the physical and mechanical properties of inshore saline soil treated with lime. *Soils and Foundations*, 56(3), 327-335. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.04.001>
- Li, M., Xi Chai, S., Yuan Zhang, H., Pu Du, H., & Wei, L. (2012). Feasibility of saline soil reinforced with treated wheat straw and lime. *Soils and Foundations*, 52(2), 228-238. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.02.003>
- Locat, J., & Tanaka, H. (2001). A new class of soils: Fossiliferous soils? *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul, Turkey, 27-31 August 2001. Volumes 1-3, 2295-2300.
- Manap, N., Tan, K. Y., & Syahrom, N. (2017). Main issues of pile foundation at waterfront development and its prevention method. 13.
- Mishra, P. N., Scheuermann, A., & Li, L. (2018). Significance of Corrections and Impact of Saline Pore Fluid on Kaolin. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11), 06018016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002458](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002458)
- Ohta, Y., & Goto, N. (1978). Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 6(2), 167-187.
- Olguín, R. O., Foncea, C. F., & Acevedo, P. A. (2004). Suelos salinos del norte de Chile parte I: estructura y propiedades índices - metodología. 10.
- Orense, R. P., & Pender, M. J. (2013). Liquefaction characteristics of crushable pumice sand. *Proceeding of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2-6.
- Orense, R. P., & Pender, M. J. (2015). From micro to macro: An investigation of the geomechanical behaviour of pumice sand. *En Volcanic rocks and soils (Vol. 45)*. Taylor & Francis Group London, UK.
- Orense, R. P., Pender, M. J., & O'Sullivan, A. S. (2012). Liquefaction characteristics of pumice sands. *Earthquake Commission*.
- Ortiz, J. (2010). Implementación del equipo de Corte Directo y su aplicación en algunos suelos típicos de Punta Arenas. Proyecto de Trabajo de Titulación. Chile: Universidad de Magallanes.
- Paredes, M., & Verdugo, R. (2004). Genesis y estructura de los suelos alofanicos en Chile. 10.
- Pradenas Pereira, A. M. (2017). Predicción del exceso de presión de poros en el estudio de la licuación de la arena Bio Bio considerando la influencia de la morfología de los granos. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Puga, P. (2012). Estudio experimental del coeficiente de permeabilidad en arenas. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Rodríguez, P. (2015). Caracterización geomecánica y mineralógica del maicillo en la cordillera de Nahuelbuta. [Pregrado]. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Romero-Mancilla, P. E., Montenegro-Cooper, J. M., King, R. W., Lapeña-Mañero, P., & García-Casuso, C. (2021). Experimental Investigation on the Influence of Oven-Drying on the Geotechnical Properties of Volcanic Ash-Derived Residual Soils. *Applied Sciences*, 11(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/app112411708>
- Sánchez, M. A. (2002). Caracterización geomecánica de diatomeas. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago.
- Shiwakoti, D. R., Tanaka, H., Tanaka, M., & Locat, J. (2002). Influences of diatom microfossils on engineering properties of soils. *Soils and Foundations*, 42(3), 1-17.
- Talliaferro, N. (1933). The Relation of Volcanism to Diatomaceous and Associated Sediments. *Bulletin of the University of California (Department of Geological Sciences)*, 23, 1-56.
- Treguer, P., Nelson, D. M., Van Bennekom, A. J., demaster, D. J., Leynaert, A., & Quéguiner, B. (1995). The silica balance in the world ocean: A reestimate. *Science*, 268(5209), 375-379.
- Troncoso, C., Lara, L., Silva, C., & Castruccio, A. (2015). Facies Piroclásticas de la Ignimbrita Pudahuel: Implicancias en su emplazamiento. XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena.
- Vargas Del Rio, D., & Ochoa González, G. H. (2014). Correlación entre ángulo de fricción interna y peso volumétrico seco para las arenas pumíticas de la zona metropolitana de Guadalajara. XXVII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica 2014 (RNI-G), Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG).
- Vásquez, A. D. (2012). Suelos de Fundación de la Ciudad de Punta Arenas. Región de Magallanes y Antártica Chilena.
- Verdugo, R. (2008). Singularities of Geotechnical Properties of Complex Soils in Seismic Regions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(7), 982-991. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:7\(982\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:7(982))
- Verdugo, R., & Paredes, M. (2004). Comportamiento geomecánico de suelos alofanicos. 10.
- Verdugo, R., Villalobos, F., Yasuda, S., Konagai, K., Sugano, T., Okamura, M., ... & Torres, A. (2010). Description and analysis of geotechnical aspects associated to the large 2010 Chile earthquake. *Obras y Proyectos*, 8, 25-36.
- Villalobos, F. (2014). Mecánica de suelos. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Vivallos, J., Ramirez, P., & Fonseca, A. (2010). Microzonificación sísmica de la ciudad de Concepción. Región del Biobío, Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile.
- Wesley, L. (2009). Behaviour and geotechnical properties of residual soils and allophane clays. *Obras y Proyectos*, 19.
- Wesley, L. (2011). Stability of slopes in residual soils. *Obras y Proyectos*, 10, Article 10. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132011000200005>
- Wesley, L. D., Meyer, V. M., Pranjoto, S., Pender, M. J., Larkin, T. J., & Duske, G. C. (1999). Engineering properties of a pumice sand. *Proceedings of the 8th Australian New Zealand Conference on Geomechanics: Consolidating Knowledge*, 901-907.
- Wilson, J. M. B. (2013). Patrimonio geológico del proyecto geoparque Cajón del Maipo (Región Metropolitana—Chile). *Universidade do Minho*.
- Wittler, J. M., Cardon, G. E., Gates, T. K., Cooper, C. A., & Sutherland, P. L. (2006). Calibration of Electromagnetic Induction for Regional Assessment of Soil Water Salinity in an Irrigated Valley. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(5), 436-444. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2006\)132:5\(436\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:5(436))
- Wootton, I. A., Spainhour, L. K., & Yazdani, N. (2003). Corrosion of Steel Reinforcement in Carbon Fiber-Reinforced Polymer Wrapped Concrete Cylinders. *Journal of Composites for Construction*, 7(4), 339-347. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2003\)7:4\(339\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:4(339))
- Ying, Z., Cui, Y.-J., Benahmed, N., & Duc, M. (2021). Salinity effect on the compaction behaviour, matric suction, stiffness and microstructure of a silty soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(4), 855-863. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.002>
- Zamudio-Zavala, P., & Mayoral, P. (2019). Correlación entre la velocidad de onda de corte (Vs) y el número de golpes del SPT (N) para arenas pumíticas de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG).
- Zamudio-Zavala, P., Vargas-delrío, D., & Ochoa-González, G. H. (2016). Correlación entre propiedades mecánicas y propiedades físicas en suelos pumíticos no saturados.
- Zhang, Y., Yang, Z. J., Liu, J., & Fang, J. (2019). Freeze-Thaw Cycle Impact on Volumetric and Low-Temperature Shear Behavior of High-Salinity Soils. *Journal of Cold Regions Engineering*, 33(1), 06018002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000176](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000176)
- Zhang, Y., Yang, Z., Liu, J., & Fang, J. (2017). Impact of cooling on shear strength of high salinity soils. *Cold Regions Science and Technology*, 141, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.06.005>

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 12th to November 16th 2024 in Chile.