



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO DE ASENTAMIENTO POR EFECTO DE DISOLUCIÓN DE
SALES EN ARENAS LIMOSAS COMPACTADAS**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MENCIÓN INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

JAVIERA NATALIA ESPINOZA MONTOYA

PROFESOR GUÍA

EDGAR BARD ORTUZAR

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

YOLANDA ALBERTO HERNÁNDEZ

ROBERTO OLGUÍN PIZARRO

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE
LA INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA
ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA,
Y AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: JAVIERA NATALIA ESPINOZA MONTOYA
FECHA: 2022
PROFESOR GUÍA: EDGAR BARD ORTUZAR

ESTUDIO DE ASENTAMIENTO POR EFECTO DE DISOLUCIÓN DE SALES EN ARENAS LIMOSAS COMPACTADAS

La normativa chilena actual establece que un suelo debe ser considerado “salino” al superar un valor crítico de 3% de salinidad, para los cuales se debe optar por procedimientos como remoción o mejoramiento (entre otros), que generan importantes costos para un proyecto. Este valor se determina de forma empírica y no hace distinción respecto de su compactación.

El presente trabajo estudia el fenómeno del colapso por disolución de sales en suelos salinos compactados con el objetivo general de evaluar la factibilidad de utilizar materiales con salinidad mayor a 3% como relleno de fundación de estructuras tolerantes a asentamientos leves o moderados. Además, se evalúa el efecto de la infiltración de solvente con un contenido inicial de sales disueltas.

El estudio experimental realizado consiste en la caracterización, ensayo de compactación Proctor Modificado y ensayo edométrico con infiltración realizados sobre arena mal graduada con limo proveniente del tranque El Torito, confeccionadas con salinidades de 2%, 3,5%, 7% y 12% de cloruro de sodio. Las muestras estudiadas en el ensayo edométrico son compactadas a un 90% de Proctor Modificado, e infiltradas con agua desmineralizada y agua con 15% de sal.

Los resultados obtenidos para el potencial de colapso clasifican como “leves” en todas las muestras ensayadas, con excepción de la muestra con la mayor salinidad (12%) infiltrada con agua desmineralizada, cuyo colapso clasifica como “moderado”. Además, la comparación entre los dos sets de ensayos da cuenta de menor colapso y compresibilidad de las muestras infiltradas con salmuera.

El análisis de los resultados obtenidos y de resultados de estudios afines, dan cuenta de una disminución sostenida del colapso generado por disolución de sales con el aumento de densidad seca de la muestra. Así, se concluye que la densidad tiene una alta incidencia en el colapso que se produce ante la infiltración de éstos, lo que refuerza la factibilidad de utilizar suelos con salinidades mayores a 3% como rellenos compactados.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.2.1. Objetivo General.....	1
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Metodología	2
1.3.1. Análisis Teórico	2
1.3.2. Estudio Experimental	2
1.3.3. Análisis de Resultados	3
1.4. Organización de la Tesis.....	3
2. Antecedentes	5
2.1. Geología de los Suelos Salinos	5
2.1.1. Génesis de Depósitos Salinos	5
2.1.2. Concentraciones Típicas	8
2.1.3. Distribución	10
2.1.4. Perfil de Salinidad.....	11
2.2. Norte Grande de Chile	12
2.2.1. Geomorfología	12
2.2.2. Clima	15
2.2.3. Hidrogeología	17
2.2.4. Causas de Disolución	19
3. Marco Teórico	20
3.1. Sales Solubles.....	20
3.1.1. Composición de la Sal.....	20
3.1.2. Cristalinidad de la Sal	21
3.1.3. Temperatura del Solvente.....	21
3.1.4. Tipo y Salinidad del Solvente.....	22
3.2. Suelos Salinos	23

3.2.1.	Modelo de Fases de Suelos Salinos	23
3.2.2.	Propiedades Índice de los Suelos Salinos	25
3.2.3.	Cementación	28
3.3.	Caracterización Geotécnica de Suelos Salinos del Norte de Chile	30
3.4.	Suelos Compactados	31
3.5.	Características que Controlan la Colapsabilidad.....	32
3.5.1.	Solubilidad	32
3.5.2.	Grado de Cristalización	33
3.5.3.	Salinidad del solvente	34
3.5.4.	Contenido de finos	34
3.5.5.	Clasificación de finos.....	35
3.5.6.	Distribución Granulométrica	35
3.6.	Potencial de Colapso	37
4.	Material Ensayado y Metodología Experimental	41
4.1.	Material Ensayado.....	41
4.1.1.	Arena de Relaves de El Torito	41
4.1.2.	Cloruro de Sodio	41
4.2.	Caracterización Geotécnica del Material Base	42
4.2.1.	Clasificación Granulométrica.....	42
4.2.2.	Gravedad Específica.....	43
4.3.	Preparación del Material	43
4.4.	Proctor Modificado	45
4.5.	Determinación de Salinidad.....	46
4.6.	Ensayo Edométrico con Infiltración	48
4.6.1.	Montaje de Probetas.....	48
4.6.2.	Edómetro de Pared Rígida	50
4.6.3.	Sistema de Rebalse de Agua	52
4.6.4.	Determinación de Conductividad Hidráulica.....	54
5.	Resultados	55

5.1.	Caracterización Geotécnica del Material Base	55
5.2.	Proctor Modificado	58
5.3.	Edómetro con Infiltración.....	62
5.3.1.	Confección de Probetas.....	62
5.3.2.	Conductividad Hidráulica	63
5.3.3.	Salinidad	65
5.3.4.	Deformación Vertical vs Tensión Vertical	67
5.3.5.	Índice de Vacíos vs Tensión Vertical.....	75
5.3.6.	Deformación por Disolución en el Tiempo.....	81
5.3.7.	Índice de Colapso.....	84
5.3.8.	Parámetros Post-Ensayo.....	87
5.4.	Curvas de Densidad - Salinidad	87
6.	Potencial de Colapso.....	89
6.1.	Análisis Estadístico χ^2	90
6.2.	Densidad y Potencial de Colapso	92
6.3.	Densidad y Salinidad	93
6.4.	Efecto tensión vertical	94
7.	Conclusiones y Recomendaciones.....	96
7.1.	Proctor Modificado	96
7.2.	Ensayo Edométrico con Infiltración	97
7.3.	Potencial de Colapso	98
7.4.	Conclusiones Generales.....	99
7.5.	Futuras líneas de investigación.....	100
	Bibliografía	101
	Anexos	106
Anexo A.	Ensayo Edométrico con infiltración de agua desmineralizada ...	107
Anexo B.	Ensayo Edométrico con infiltración de salmuera.....	113
Anexo C.	Salinidad Máxima	119
Anexo D.	Tabla de distribución de χ^2.....	120

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Análisis químico sobre muestra de Camanchaca. Antofagasta (Ericksen, 1963).	7
Tabla 2.2. Cuadro Resumen que asocia el depósito salino al origen geológico de las sales solubles presentes y con el tipo de estructura esperada (Modificado de Olguín, 2006).	9
Tabla 2.3. Comparación de concentración de iones en muestras de planicie costera y cordillera (Ericksen, 1963).	11
Tabla 2.4. Distribución de los salares del norte de Chile (Vila, 1990).	15
Tabla 3.1. Solubilidad de distintas sales en agua a 20°C (Lide, 2012).	20
Tabla 3.2. Solubilidad de minerales a distintas temperaturas (Lide, 2012).	22
Tabla 3.3. Clasificación del potencial de colapso. (ASTM D5333-03).	40
Tabla 4.1. Parámetros del Cloruro de Sodio (Hill, Petrucci, McCreary, & Perry, 2005).	42
Tabla 4.2. Parámetros y dimensiones probeta.	48
Tabla 5.1. Resultados granulometría laser y plasticidad para arena de relave de El Torito.	55
Tabla 5.2. Determinación de gravedad específica para arena de relave de El Torito.	56
Tabla 5.3. Muestras estudiadas por Olguín (2016), Palma & Riquelme (2018) y Espinoza (2021).	56
Tabla 5.4. Salinidad real muestras Proctor Modificado.	58
Tabla 5.5. Salinidad representativa de cada muestra Proctor.	58
Tabla 5.6. Resultados ensayo Proctor Modificado.	59
Tabla 5.7. Resultados ensayo Proctor Modificado.	59
Tabla 5.8. Características de confección de probetas infiltradas con agua destilada.	62
Tabla 5.9. Características de confección de probetas infiltradas con agua con 15% de salinidad.	62
Tabla 5.10. Gravedad específica e índice de vacíos iniciales corregidos.	63
Tabla 5.11. Salinidad inicial y final de muestras ensayadas.	65
Tabla 5.12. Módulos de compresibilidad volumétrica ensayo edométrico con infiltración.	73
Tabla 5.13. Deformación y variación de índice de vacíos por disolución.	83
Tabla 5.14. Potencial de colapso.	86
Tabla 5.15. Parámetros post-ensayo de las muestras.	87
Tabla 6.1. Características muestras ensayadas por Olguín, McDougall, Palma & Riquelme y presente estudio.	89
Tabla 6.2. Tabla de contingencia.	90
Tabla 6.3. Frecuencias teóricas.	91
Tabla 6.4. Tabla de contingencia.	91
Tabla 6.5. Frecuencias teóricas.	91
Tabla D.1. Distribución de χ^2 .	120

Índice de Figuras

Figura 2.1. Avances y regresiones del océano Pacífico (Corvalan & Hervé, 1996).	5
Figura 2.2. Esquema hidrogeológico del Norte de Chile en la formación de depósitos salinos (Olguín, 2006).	7
Figura 2.3. Esquema de ubicación de depósitos salinos en el norte de Chile (Tamblay, 1983).	10
Figura 2.4. Distribución típica de sales solubles en profundidad (Tamblay, 1983).	11
Figura 2.5. Imagen satelital del Norte Grande Chileno. (1) Planicie Costera; (2) Cordillera de la Costa; (3) Valle central; (4) Cordillera de Domeyko; (5) Cordillera de los Andes (Olguín, 2006).	12
Figura 2.6. Perfil esquemático geomorfológico de depósitos salinos del norte de Chile (Gajardo & Carrasco, 2010).	13
Figura 2.7. Perfil transversal oeste-este de la provincia de Antofagasta, entre las latitudes 23° y 24° (Stoertz & Ericksen, 1974).	13
Figura 2.8. Mapa climático actual del norte de Chile. (1) Extremadamente árido; (2) Árido; (3) Semiárido; (4) Subhúmedo (Ortlieb, 1995).	16
Figura 2.9. Sistemas hidrográficos del Norte Grande de Chile (Modificado de DGA, 1986).	18
Figura 3.1. Solubilidad de minerales a distintas temperaturas (Lide, 2012).	22
Figura 3.2. Modelo Trifásico Suelos Salinos (Olguín, 2006).	23
Figura 3.3. Modelo Cuatrifásico Suelos Salinos.	24
Figura 3.4. Imágenes de Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) de arena cementada por sal (a) Salinidad 6,5% (x800); (b) Salinidad 6,5% (x50); (c) Salinidad 12,9% (x50) (He & Chu, 2017).	28
Figura 3.5. (a) Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) vs contenido de agentes cementantes; (b) Módulo de deformación vs contenido de sal (He & Chu, 2017).	29
Figura 3.6. Trayectoria de tensiones y envolvente de falla en el espacio $\sigma - \tau$ para arena moderadamente cementada. (a) Parcialmente saturado; (b) Saturado (Collins & Sitar, 2009).	29
Figura 3.7. Resultados ensayo placa de carga suelos de sabkhas con salinidad inicial de 25,2% aproximadamente (Abduljawwad & Al-Amoudi, 1995).	30
Figura 3.8. Curvas granulométricas de muestras de suelos salinos del norte de Chile (Palma & Riquelme, 2018).	30
Figura 3.9. Curvas granulométricas de muestras de suelos salinos del norte de Chile (Sanhueza & Valenzuela, 2018).	31
Figura 3.10. Comparación de diferentes modelos $k - et$ (Ren <i>et al.</i> , 2016).	32

Figura 3.11. Comparación de cristalización de la sal en distintas condiciones de secado. (a) Secado a temperatura ambiente; (b) Secado en horno a 100°C.	33
Figura 3.12. Conductividad Hidráulica para distintos valores de contenido de fino (limo) (Bandini & Sathiskumar, 2009).	34
Figura 3.13. Índices de vacíos máximos y mínimos para arenas limosas con distinto contenido de finos (Bandini & Sathiskumar, 2009).	35
Figura 3.14. Variación de índice de vacíos por disolución en función de la razón de diámetro para 6 contenidos de NaCl. a) Material mal graduado; b) Material bien graduado (McDougall, <i>et al.</i> , 2015).	36
Figura 3.15. Variación promedio en el índice de vacíos por disolución de sales en función de la salinidad para materiales bien graduados y mal graduados (McDougall, <i>et al.</i> , 2015)..	36
Figura 3.16. Enlaces temporales entre partículas (Saravia, 2018).	37
Figura 3.17. Estructura de un suelo (a) antes y (b) después del colapso (Valencia-González, Yepes-García, & Echeverri-Ramírez, 2015).	38
Figura 3.18. Curva de consolidación con colapso (Thyagaraj, Bhavani, Das, & Julina, 2016).	38
Figura 3.19. Curva de deformación por infiltración en el tiempo (Modificado de ASTM D4546-14).	39
Figura 4.1. Origen del material. (a) Ubicación de Mina el Soldado; (b) Tranque El Torito.	41
Figura 4.2. Patrones de dispersión de Mie. De izquierda a derecha, para tamaños de partícula de 10, 0,2 y 0,05 μm de diámetro (Iesmat, 2017).	43
Figura 4.3. Preparación material proctor. (a) Material sin sal; (b) Sal a agregar; (c) Material mezclado con salmuera.	44
Figura 4.4. Proceso de secado y mezclado material proctor.	45
Figura 4.5. Esquema del procedimiento a seguir para la medición de salinidad mediante el método de conductividad eléctrica (Modificado de Karakouzian <i>et al.</i> , 1996).	46
Figura 4.6. Relación entre concentración de suelo en la mezcla y conductividad eléctrica (Karakouzian <i>et al.</i> , 1996).	47
Figura 4.7. Relación entre concentración de sal y conductividad eléctrica para distintas sales solubles (Regional Salinity Laboratory (US), 1954).	47
Figura 4.8. Elementos molde edómetro.	49
Figura 4.9. Montaje probeta ensayo edométrico.	50
Figura 4.10. Esquema del ensayo de consolidación edométrica con infiltración.	51
Figura 4.11. Curva representativa tensión vertical v/s deformación total (Modificado de Thyagaraj, Bhavani, Das, & Julina, 2016).	51
Figura 4.12. Sistema de rebalse de agua.	52
Figura 4.13. Esquema sistema de rebalse de agua.	53

Figura 4.14. Bomba de inmersión y líneas de llenado y rebalse.....	53
Figura 4.15. Muestreo de agua percolada durante la infiltración en ensayo edométrico (Muestra con salinidad de 7%).....	54
Figura 5.1. Curva granulométrica material base.....	55
Figura 5.2. Comparación de curvas granulométricas.	57
Figura 5.3. Resultados de Límites de Atterberg sobre muestras naturales de suelos salinos. (Sanhueza & Valenzuela, 2018).....	57
Figura 5.4. Curvas de compactación de Proctor Modificado.	59
Figura 5.5. Curvas de compactación de Proctor Modificado.	60
Figura 5.6. (a) Succión osmótica en función de concentración de cloruro de sodio; (b) Succión Osmótica en función de conductividad eléctrica de la solución (Arifin & Schanz, 2009)..	61
Figura 5.7. Curvas de succión para distintos contenidos de cloruro de sodio en Limo Arcilloso (a) Matricial (b) Total (Fattah, Yahya, Al-Hadidi, & Ahmed, 2013).....	61
Figura 5.8. Conductividad hidráulica del material base versus carga vertical. No considera pérdida por evaporación.	63
Figura 5.9. Evolución de conductividad hidráulica en el tiempo para ensayo de infiltración con agua desmineralizada y carga vertical constante de 2 kg/cm ² . No considera pérdida por evaporación.	64
Figura 5.10. Evolución de conductividad hidráulica en el tiempo para ensayo de infiltración con agua con 15% de salinidad y carga vertical constante de 2 kg/cm ² . Medición interrumpida por colmatación de piedra porosa, no considera pérdida por evaporación..	64
Figura 5.11. Evolución de salinidad en líquido percolado, infiltración con agua desmineralizada.	66
Figura 5.12. Evolución de salinidad en líquido percolado, infiltración con agua con 15% de sal. Medición interrumpida por colmatación de piedra porosa.	66
Figura 5.13. Deformación vertical vs tensión vertical para S=0%, Sw=0% y muestra saturada al comienzo. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.	67
Figura 5.14. Comparación de deformación vertical vs tensión vertical para S=2%. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.	68
Figura 5.15. Comparación de deformación vertical vs tensión vertical para S=3,5%. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.....	68
Figura 5.16. Comparación de deformación vertical vs tensión vertical para S=7%. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.	69
Figura 5.17. Comparación de deformación vertical vs tensión vertical para S=12%. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.....	69
Figura 5.18. Resumen de deformación vertical vs tensión vertical para Sw=0%. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.	70

Figura 5.19. Resumen de deformación vertical vs tensión vertical para $S_w=15\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.	71
Figura 5.20. Resumen de deformación vertical vs tensión vertical para ambos sets. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.	72
Figura 5.21. Curvas de deformación vertical vs tensión vertical efectiva edómetro (a) Módulos de compresibilidad volumétrica (Budhu, 2011). (b) Etapas de carga y descarga de ensayo edométrico con infiltración.	73
Figura 5.22. Índice de vacíos corregido vs tensión vertical para $S=0\%$ y $S_w=0\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.	75
Figura 5.23. Comparación de índice de vacíos vs tensión vertical para $S=2\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.	76
Figura 5.24. Comparación de índice de vacíos vs tensión vertical para $S=3,5\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.	76
Figura 5.25. Comparación de índice de vacíos vs tensión vertical para $S=7\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.	77
Figura 5.26. Comparación de índice de vacíos vs tensión vertical para $S=12\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.	77
Figura 5.27. Resumen de índice de vacíos vs tensión vertical para $S_w=0\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.	78
Figura 5.28. Resumen de índice de vacíos vs tensión vertical para $S_w=15\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.	79
Figura 5.29. Resumen de índice de vacíos vs tensión vertical para ambos sets. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.	80
Figura 5.30. Comparación de deformación unitaria por disolución vs tiempo. (a) $S=2\%$; (b) $S=3,5\%$	81
Figura 5.31. Comparación de deformación unitaria por disolución vs tiempo. (a) $S=7\%$; (b) $S=12\%$	82
Figura 5.32. Resumen de deformación unitaria por disolución vs tiempo. (a) $S_w=0\%$; (b) $S_w=15\%$	82
Figura 5.33. Resumen de deformación unitaria por disolución vs tiempo para ambos sets.	83
Figura 5.34. Índice de colapso en función de la deformación unitaria versus salinidad. (a) $S_w=0\%$; (b) $S_w=15\%$	84
Figura 5.35. Comparación de índices de colapso en función de la deformación unitaria versus salinidad.	85
Figura 5.36. Índice de colapso en función de la variación de índice de vacíos versus salinidad. (a) $S_w=0\%$; (b) $S_w=15\%$	85

Figura 5.37. Comparación de índices de colapso en función de la variación de índice de vacíos versus salinidad.	86
Figura 5.38. Curvas de densidad vs salinidad. ($G_s=2,65$, $G_{ss}=2,165$)	88
Figura 6.1. Ensayos de colapso Olguín (2006), McDougall <i>et al.</i> (2015), Palma & Riquelme (2018) y presente estudio (muestras ensayadas con distintas tensiones de saturación). Izquierda: Densidad Seca vs Índice de Colapso. Derecha: Densidad Seca vs Salinidad.	89
Figura 6.2. Índice de Colapso vs Densidad Seca para distintas salinidades.....	92
Figura 6.3. Densidad versus Salinidad.	93
Figura 6.4. Índice de colapso versus densidad para tensiones verticales menores a 10 [kPa] y mayores a 20 [kPa]. (a) $S=2\%$; (b) $S=5\%$	94
Figura 6.5. Índice de colapso versus densidad para tensiones verticales menores a 10 [kPa] y mayores a 20 [kPa]. (a) $S=10\%$; (b) $S=14\%$	95
Figura A.1. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=2\%$ y $Sw=0\%$	107
Figura A.2. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=3,5\%$ y $Sw=0\%$	107
Figura A.3. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=7\%$ y $Sw=0\%$	108
Figura A.4. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=12\%$ y $Sw=0\%$	108
Figura A.5. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para $S=2\%$ y $Sw=0\%$	109
Figura A.6. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para $S=3,5\%$ y $Sw=0\%$	109
Figura A.7. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para $S=7\%$ y $Sw=0\%$	110
Figura A.8. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para $S=12\%$ y $Sw=0\%$	110
Figura A.9. De deformación unitaria por disolución vs tiempo $S=2\%$ y $Sw=0\%$	111
Figura A.10. De deformación unitaria por disolución vs tiempo $S=3,5\%$ y $Sw=0\%$	111
Figura A.11. De deformación unitaria por disolución vs tiempo $S=3,5\%$ y $Sw=0\%$	112
Figura A.12. De deformación unitaria por disolución vs tiempo $S=12\%$ y $Sw=0\%$	112
Figura B.1. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=2\%$ y $Sw=15\%$	113
Figura B.2. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=3,5\%$ y $Sw=15\%$	113
Figura B.3. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=7\%$ y $Sw=15\%$	114
Figura B.4. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=12\%$ y $Sw=15\%$	114
Figura B.5. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para $S=2\%$ y $Sw=15\%$	115
Figura B.6. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para $S=3,5\%$ y $Sw=15\%$	115
Figura B.7. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para $S=7\%$ y $Sw=15\%$	116
Figura B.8. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para $S=12\%$ y $Sw=15\%$	116
Figura B.9. Deformación unitaria por disolución vs tiempo $S=2\%$ y $Sw=15\%$	117
Figura B.10. Deformación unitaria por disolución vs tiempo $S=3,5\%$ y $Sw=15\%$	117
Figura B.11. Deformación unitaria por disolución vs tiempo $S=7\%$ y $Sw=15\%$	118
Figura B.12. Deformación unitaria por disolución vs tiempo $S=12\%$ y $Sw=15\%$	118

1. Introducción

1.1. Motivación

Debido a distintos factores geológicos, morfológicos, hidrogeológicos y climáticos, la zona norte de Chile presenta suelos con importantes contenidos de sales solubles, los que comúnmente se denominan “suelos salinos”. En condición natural, con baja o nula humedad, se caracterizan por presentar alta rigidez, capacidad de soporte y resistencia al corte, gracias a la cementación generada por dichas sales.

Sin embargo, dado que las sales solubles pueden disolverse en distintas soluciones acuosas, estas propiedades pueden degradarse drásticamente al entrar en contacto con agua. Incluso, se puede producir el colapso del esqueleto granular del suelo, lo que se traduce en asentamientos de gran magnitud afectando las estructuras que soportan.

La magnitud de los asentamientos por la disolución de sales depende, entre otros, de la salinidad del suelo. La norma chilena NCh3394 establece como valor crítico un contenido de sales solubles de 3% para considerar un suelo como “salino”, contenido que puede generar asentamientos perjudiciales en el caso de presentar disolución. Este criterio, de origen empírico, fue establecido en base a la práctica de la ingeniería y construcción, y a diversos estudios previos en suelos salinos naturales; mas no se hace distinción respecto a su utilización en rellenos controlados compactados.

Además de la salinidad, se ha puesto en evidencia experimentalmente que los asentamientos por disolución también dependen del índice de vacíos inicial del suelo, generándose menores asentamientos en materiales con mayor grado de compactación. Esta situación conduce a la necesidad de evaluar la variación del valor crítico utilizado en la actualidad, en el caso de materiales para los cuales se controla la compactación. Gracias a esto sería posible disminuir costos de mejoramiento que pueden llegar a ser suficientes para desistir de construir obras como caminos, estacionamientos u obras industriales de distinta naturaleza.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Estudiar la posibilidad de, bajo un estricto control, utilizar suelos con salinidad mayor a 3% como rellenos compactados que sirvan como fundación de estructuras que sean capaces de tolerar índices de colapso leves a moderados, para las que el valor crítico actual podría ser demasiado conservador.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Efectuar una revisión bibliográfica que abarque las características de las sales solubles, los suelos salinos y el potencial de colapso, además de estudios experimentales previos.
- Analizar la evolución de la compactación (curvas del ensayo Proctor Modificado) en función del contenido de sales solubles.
- Estudiar el efecto de la compactación en el colapso producido por la disolución de sales en suelos salinos con distintas salinidades.
- Estudiar la variación del colapso del suelo salino ante infiltraciones con agua con contenido de sal.
- Presentar y discutir la metodología y los criterios utilizados actualmente para abordar el problema de los suelos salinos como suelo de fundación.
- Proponer trabajos posteriores para complementar los resultados de esta investigación para analizar el efecto de la variación de otros parámetros, tanto de la sal como del suelo.

1.3. Metodología

La metodología empleada para llevar a cabo el presente estudio consta de tres etapas principales:

1.3.1. Análisis Teórico

Esta etapa consiste en recopilar, interpretar y analizar la información existente relevante para la investigación, referente las propiedades de las sales solubles y de los suelos salinos, y a las condiciones naturales de estos en Chile.

- Antecedentes
 - Geología de los depósitos salinos en Chile.
 - Geomorfología, clima e hidrogeología del norte grande.
- Revisión Bibliográfica
 - Características de las sales solubles.
 - Propiedades y caracterización geotécnica de los suelos salinos presentes en Chile.
 - Potencial de colapso y características que controlan la colapsabilidad.
 - Estudios afines.

1.3.2. Estudio Experimental

La caracterización del material y el estudio de su comportamiento contempla la realización de los siguientes ensayos:

- Granulometría Laser (ISO 13320:2020)
- Límites de Atterberg (ASTM D4318-05)

- Gravedad Específica (ASTM D854-14)
- Proctor Modificado (ASTM 1557-12)
- Determinación de Salinidad mediante el método de conductividad eléctrica (Karakouzian et al., 1996)
- Ensayo de Edométrico de Pared Rígida (ASTM D2435) con Infiltración
- Determinación de Conductividad Hidráulica

1.3.3. Análisis de Resultados

Estudiar los resultados experimentales obtenidos y los obtenidos por otros estudios afines, a partir de los cuales se detallan las principales conclusiones, además de presentar una propuesta metodológica y proponer estudios posteriores que sigan la línea de investigación.

1.4. Organización de la Tesis

El presente estudio consta de 7 capítulos, los que se describen a continuación.

Capítulo 1: Introducción

Se presenta, a grandes rasgos, el contenido del trabajo de tesis, junto con la motivación para realizar el estudio, sus objetivos y alcances, y la metodología llevada a cabo.

Capítulo 2: Antecedentes

El objetivo de este capítulo es el de contextualizar sobre la relevancia del estudio de suelos salinos en Chile, abordando, entre otros:

- Génesis, distribución y características de los depósitos salinos.
- Geomorfología, clima e hidrología del norte grande de Chile.

Capítulo 3: Revisión Bibliográfica

Se presenta información recopilada sobre la cual se basa el presente estudio, y se centra en:

- Características de las sales solubles, cuáles se encuentran con mayor frecuencia en Chile y qué propiedades influyen en su solubilidad.
- Propiedades y caracterización geotécnica de los suelos salinos presentes en Chile.
- Características del arreglo del suelo que controlan su colapsabilidad.
- Concepto de potencial de colapso (ASTM D5333) y sus aplicaciones.
- Estudios previos realizados sobre suelos salinos.

Capítulo 4: Material Ensayado y Metodología Experimental

En primer lugar, se presentan antecedentes y características del material base y de la sal a utilizar, junto con las razones por las que se decide utilizarlos para el estudio.

Luego, se describe de forma detallada los procedimientos experimentales a realizar, entre los que se encuentran la preparación de muestras, ensayo Proctor, determinación de salinidad y ensayo de percolación.

Capítulo 5: Resultados

Se presentan los principales resultados obtenidos a partir de los ensayos detallados en el capítulo anterior. Los más relevantes corresponden a las curvas de compactación y el potencial de colapso.

Además, este capítulo consiste en explicar los resultados obtenidos, discutir sobre el porqué de éstos y compararlos con otros trabajos similares. Con base en esta etapa se establecen conclusiones expuestas posteriormente.

Capítulo 6: Potencial de Colapso

Se presenta un análisis de los resultados de potencial de colapso obtenidos mediante ensayos edométricos con infiltración en el presente estudio y de estudios afines, con base en los cuales se establecen las principales conclusiones del trabajo.

Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones

Se presentan las principales conclusiones y recomendaciones, y se proponen estudios posteriores que sigan la misma línea de investigación.

2. Antecedentes

2.1. Geología de los Suelos Salinos

Con el fin de comprender las características y problemáticas de los depósitos salinos chilenos, se describen los mecanismos mediante los cuales se originan las concentraciones salinas típicas y su distribución en el país.

2.1.1. Génesis de Depósitos Salinos

Olgún (2006) plantea que los procesos geológicos e hidrológicos que originan los depósitos salinos presentes en el norte de Chile constan principalmente de cuatro fenómenos.

- **Procesos Evaporíticos Antiguos**

Hace 190 millones de años, a finales de la era Triásica y comienzos de la era Jurásica, se desarrolló una cuenca actualmente conocida como la Depresión Intermedia, en la que ingresa el paleo-oceano Pacífico, inundando la mayor parte del territorio nacional durante alrededor de 50 millones de años (Figura 2.1).

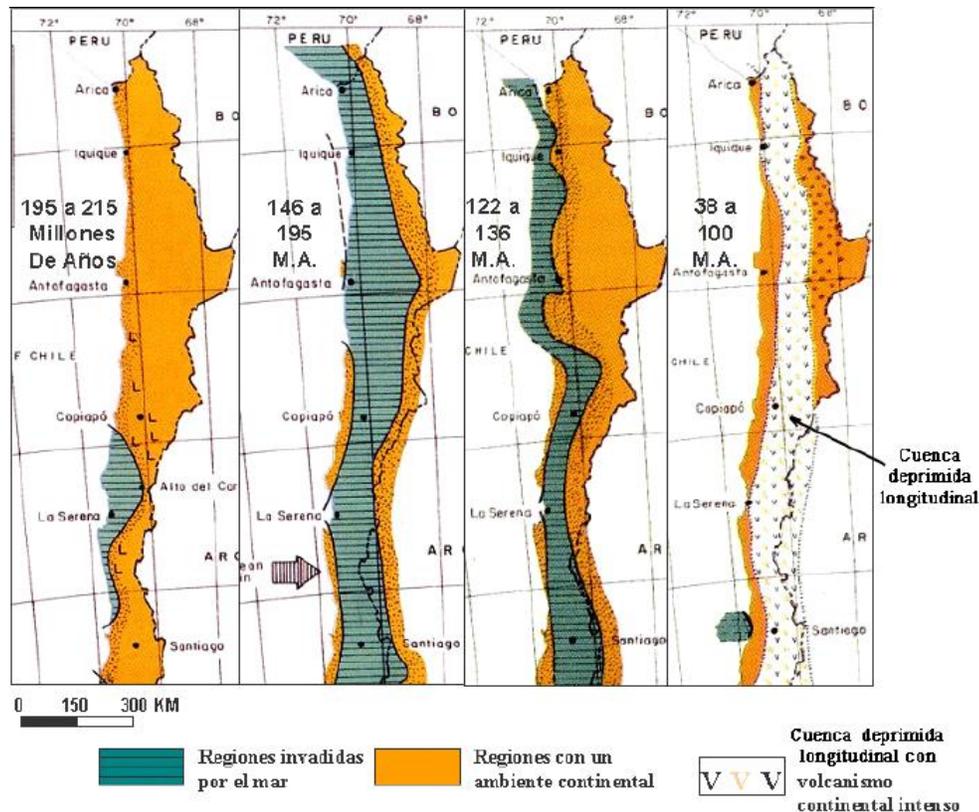


Figura 2.1. Avances y regresiones del océano Pacífico (Corvalan & Hervé, 1996).

A fines de la era Jurásica comienza la retirada del océano, generándose la formación de los depósitos salinos debido a la precipitación de sal, causada por la evaporación del agua sobresaturada.

Debido a este fenómeno, fueron depositados estratos sedimentarios que presentan grandes cantidades de cloruros y carbonatos (rocas evaporíticas carbonatadas y calcitas), además de los mantos de yeso y anhidrita de la Cordillera de los Andes en el norte y centro del país.

• **Movilidad Salina Superficial y Subterránea**

La movilidad salina consiste en el transporte de sales disueltas en el agua de cauces superficiales o subterráneos, y su posterior depositación en cuencas endorreicas de alta tasa de evaporación.

Este fenómeno ocurre debido a la salinización del agua mediante la lixiviación y disolución de sales presentes en rocas volcánicas fracturadas, rocas carbonatadas y formaciones sedimentarias evaporíticas que se encuentren a lo largo de su cauce. Estos procesos además son acrecentados por la meteorización que resulta de distintas condiciones climáticas:

- Elevados gradientes de temperatura
- Fuerte viento
- Formación de hielo en grietas
- Actividad volcánica que genera altos gradientes geotermales en aguas subterráneas.

Debido a que las aguas escurren preferentemente de este a oeste, estudios realizados por la dirección general de aguas del MOP (Gajardo, 2001) sobre las rocas que conforman los cauces de los ríos Lluta, Loa y la Quebrada de Tarapacá, confirman que la concentración de sales presentes es mayor hacia el poniente.

• **Deposiciones Marinas Recientes**

El aporte de sales solubles del océano Pacífico sobre la planicie costera es producido principalmente por dos mecanismos: la neblina y la salinización de la napa freática.

En toda la costa chilena existe el efecto de la brisa marina que proviene del Pacífico, que aporta con bajas cantidades de sales; sin embargo, durante la noche, en el norte grande se presenta el fenómeno de la “Camanchaca”, la que consiste en un tipo de neblina costera, dinámica y copiosa, que presenta una alta concentración de sales solubles (Tabla 2.1).

Durante la mañana, la camanchaca precipita y se infiltra a través de los suelos, que corresponden principalmente a coluvios de alta permeabilidad. Posteriormente, el agua es evaporada por efecto de la radiación solar, causando la cristalización de las sales en el esqueleto del suelo.

Por su parte, la sal proveniente del océano contenida en el agua de las napas freáticas asciende a la superficie debido a la capilaridad del suelo. Una vez que la solución alcanza mayores temperaturas, el agua se evapora, lo que causa la cristalización de la sal en torno a los sólidos insolubles.

Tabla 2.1. Análisis químico sobre muestra de Camanchaca. Antofagasta (Ericksen, 1963).

Iones	Concentración [mg/l]
Cl ⁻	46,0
SO ₄ ²⁻	32,0
Na ⁺	30,0
NO ₃ ²⁻	19,0
Ca ²⁺	12,0
Mg ²⁺	6,1
Otros	17,3
Total	154,0

• **Deposiciones Provenientes de la Atmósfera**

Fuenzalida (2004) mostró que existe depositación de nitratos debido a que las intensas tormentas eléctricas producidas durante el invierno altiplánico desarrollan energías suficientes para que se generen enlaces de oxígeno y nitrógeno atmosférico.

Debido a este proceso, las concentraciones de nitrato en la atmósfera son suficientes para su precipitación y transporte mediante causas superficiales y subterráneos.

Todos los conceptos descritos anteriormente pueden generar depósitos salinos tanto de forma independiente como conjunta, y la Figura 2.2 esquematiza, a modo de resumen, dónde se producen y de qué forma lo hacen.

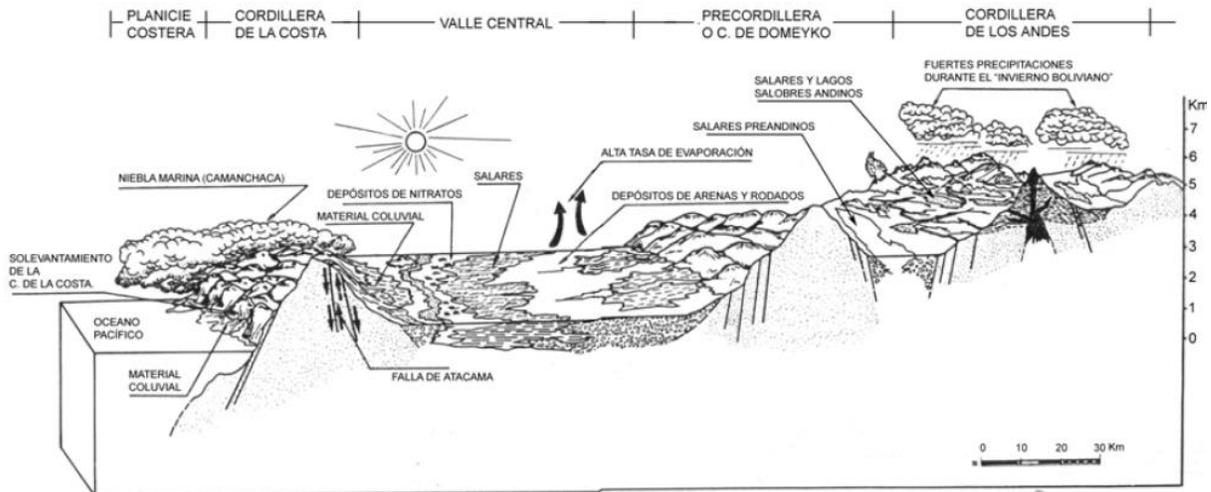


Figura 2.2. Esquema hidrogeológico del Norte de Chile en la formación de depósitos salinos (Olguín, 2006).

2.1.2. Concentraciones Típicas

Los distintos procesos que dan origen a cada depósito salino inciden tanto sobre la mineralogía de los sólidos insolubles, como sobre la distribución y propiedades de las sales. Por lo tanto, influye directamente sobre el tipo de estructura resultante, en términos de qué tan propensa es al colapso.

Los depósitos salinos se clasifican según su tipo de depositación en 9 grupos (Skorin, 1971):

- **Afloramientos salinos sobre lagos de agua salada secos**

Corresponden al estado inicial de concentración de sales en los lagos de agua salada confinados en el interior del continente debido a movimientos tectónicos. Un ejemplo de estos depósitos es el Salar de Atacama.

- **Afloramientos salinos sobre lagos subterráneos**

En estos depósitos, las aguas mantienen su nivel de equilibrio a varios metros de profundidad bajo la superficie del suelo, debido a la fuerte evaporación en grandes superficies. En estas condiciones, las sales afloran y se depositan principalmente en zonas de menor cota. Este caso de concentración de sales se presenta en la Pampa del Tamarugal.

- **Costra salina en depósitos de nitratos**

Los depósitos de nitratos se forman mediante movilidad salina y depositaciones atmosféricas, y se forman generalmente en superficies de topografía plana, como las pampas salitreras.

- **Costras salinas en rellenos coluvial-aluvionales**

Este tipo de concentraciones se encuentran generalmente encima de los conos de deyección de las desembocaduras de las quebradas costeras, formando frecuentemente una capa horizontal o semi-horizontal de entre 1 y 2 metros de profundidad. Su concentración de sales está por sobre el 15%, mientras que los suelos presentes inmediatamente sobre o bajo ésta tienen salinidades que varían entre 0 y 5%.

La costra tiene aspecto de roca sedimentaria debido a la alta cohesión generada por la cementación de las sales en los suelos de origen coluvial-aluvional formados principalmente por arenas y gravas. Además, se observan desplazamientos en los granos del suelo debido al crecimientos de las sales al recrystalizar.

- **Costras salinas en estratos arenosos eólicos**

En estas costras, las arenas finas de origen eólico están cohesionadas por sales, formando capas horizontales de espesores semejantes a las costras de rellenos coluvial-aluvionales.

- **Costras salinas en depósitos marinos**

El regreso de las sales solubles hacia el mar ha formado costras salinas en depósitos de conchuelas marinas de distintos grados de molienda, situados cerca de la costa, sobre la roca basal que aflora en diversos puntos. Generalmente tienen profundidades menores a 2 metros y sus espesores y salinidades son semejantes a las costras de rellenos coluvial-aluvionales.

- **Salinidad soluble en rocas sedimentarias**

Las rocas sedimentarias contienen distintos tipos de cementantes que actúan como ligantes de los materiales detríticos, entre los cuales se encuentran las sales solubles. A pesar de que estas rocas pueden llegar a tener un contenido de sales mayor a 10%, no presentan asentamientos por disolución debido a que la estructura fundamental se mantiene mediante sus cementantes no solubles.

- **Recubrimientos salinos de valles rocosos**

Los recubrimientos salinos se originan en la superficie de las rocas, tienen una alta salinidad y en algunos casos se presentan como sal pura. Normalmente su espesor no supera los 10 cm y suele ser confundida con la roca, debido a su cercanía a ésta.

- **Incrustaciones salinas en rocas agrietadas**

Esta concentración de sales se presenta únicamente en rocas, ocupando sus grietas, y corresponde al caso con mayor salinidad de todos los casos mencionados, siendo, casi siempre, sal pura.

Son capas de poco espesor, llegando a algunos casos a ser de 2 a 3 cm, y se ubican en planos sin ninguna dirección determinada, siendo en algunos casos totalmente vertical.

A partir de lo anterior, Olguín (2006) asocia cada tipo de depósito a su origen geológico, lo que, en conjunto con estudios experimentales y observación en terreno, permitió a su vez asociar preliminarmente cada depósito a un tipo de estructura esperable, como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Cuadro Resumen que asocia el depósito salino al origen geológico de las sales solubles presentes y con el tipo de estructura esperada (Modificado de Olguín, 2006).

Génesis Salina	Tipo de Depósito Salino	Tipo de Estructura
Procesos Evaporíticos Jurásicos	Rocas Sedimentarias	En su mayoría menormente colapsables
	Depósitos Marinos	En su mayoría colapsables
Movilidad Salina en Cauces Superficiales y Subterráneos	Salares	Ambas
	Lagos Subterráneos	Menormente colapsables
	Depósitos de Nitratos	Menormente colapsables
	Deposiciones en valles rocosos	Ambas
Contribución directa del Mar	Rellenos Coluviales/Aluviales	Colapsables
	Lentes Arenosos Eólicos	Colapsables
	Deposiciones en valles rocosos	Ambas
Fenómenos Atmosféricos	Depósitos de Nitratos	Menormente colapsables

2.1.3. Distribución

Según describe Tamblay (1983), la distribución de los depósitos salinos en Chile se divide en tres grupos principales (Figura 2.3):

- **Salares:** Presentes tanto en la cordillera como en la precordillera andina, corresponden a afloramientos salinos sobre lagos secos de agua salada. Contienen principalmente depósitos de sulfato y cloruro de sodio, borato sódico cálcico y sales potásicas en menor proporción.
- **Depósitos salinos de las pampas:** Ubicadas en la depresión central, corresponden a depósitos de material erosivo arrastrado desde la precordillera y acumulados en las cuencas de la pampa. Están constituidos principalmente por nitrato y sulfato de sodio, y sales potásicas en proporción variable.
- **Depósitos salinos costeros:** Se encuentran en la planicie costera y están constituidos por conchuelas marinas sedimentadas por sobre la roca basal, arenas mal graduadas de origen eólico cementadas y rellenos coluvial-aluvionales cementados formados por material bien graduado de arena, grava y fino. Estos últimos están compuestos principalmente por cloruros de magnesio y sodio, sulfatos de calcio, magnesio y potasio, y en menor proporción, de carbonatos y nitratos.

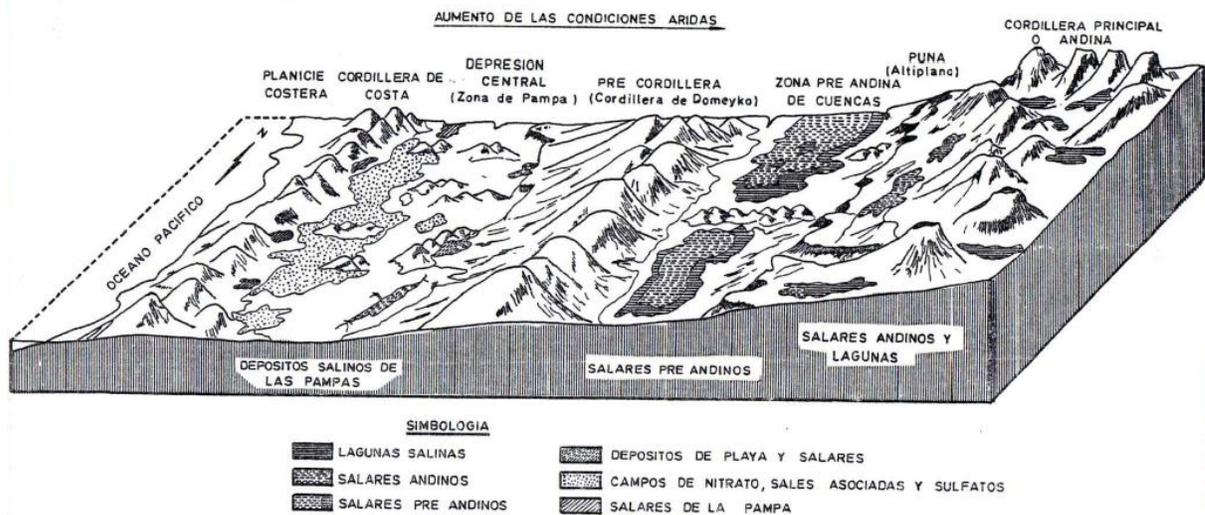


Figura 2.3. Esquema de ubicación de depósitos salinos en el norte de Chile (Tamblay, 1983).

Debido a las características de los iones presentes en los distintos depósitos, sus comportamientos tienen importantes diferencias. En resumen, los suelos costeros se caracterizan por tener un contenido de cloruros mayor que de sulfatos, mientras que la depresión central se constituye de nitratos y sulfatos, y a su vez los suelos precordilleranos (al margen de los salares) presentan mayor contenido de sulfato que de cloruro (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Comparación de concentración de iones en muestras de planicie costera y cordillera (Ericksen, 1963).

Iones	Concentración [%]	
	Planicie Costera	Cordillera
SO ₄	0,48	30,73
Cl	51,30	0,21

Como consecuencia de lo anterior, los suelos de la planicie costera son más propensos que los demás a generar asentamientos dada la alta solubilidad de los cloruros; en cambio, en la cordillera y precordillera andina presentan tendencia al hinchamiento debido al carácter expansivo de los sulfatos. Por su lado, los suelos de la pampa pueden generar hinchamiento o asentamientos dependiendo del contenido de sales presentes.

2.1.4. Perfil de Salinidad

En profundidad, la distribución de la salinidad es común para los tres tipos de depósito descritos anteriormente, y se caracteriza por presentar un estrato de alto contenido de sal (Figura 2.4), con profundidades que van de 0,5 a 4 m y espesores de 0,5 a 1 m.

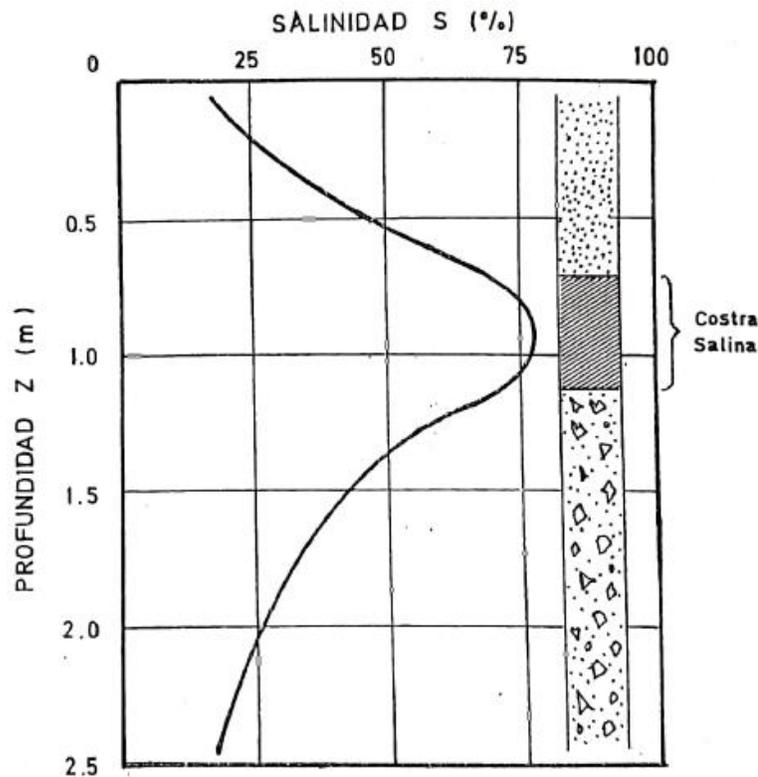


Figura 2.4. Distribución típica de sales solubles en profundidad (Tamblay, 1983).

2.2. Norte Grande de Chile

El Norte Grande de Chile comprende las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y la mitad norte de Atacama, y presenta la gran mayoría de los depósitos salinos del país.

Para entender de mejor manera la problemática de los suelos salinos en el norte grande de Chile, se presentan las condiciones geomorfológicas, climáticas e hidrogeológicas que inciden tanto sobre su formación como su comportamiento.

Además, se mencionan las principales causas de la disolución de sales en la zona, con el fin de establecer qué tipo de fenómenos o actividades representan un mayor riesgo para su estabilidad.

2.2.1. Geomorfología

En el norte grande de Chile es posible distinguir cinco unidades morfológicas principales: Planicie Costera, Cordillera de la Costa, Valle central, Cordillera de Domeyko, Cordillera de los Andes. En la Figura 2.5 y Figura 2.6 se identifica la distribución de estas macroformas, mientras que en la Figura 2.7 se muestra un perfil transversal de la provincia de Antofagasta, separado en tres unidades morfológicas mayores, donde además se señalan los distintos salares presentes entre las latitudes 23° y 24° S.

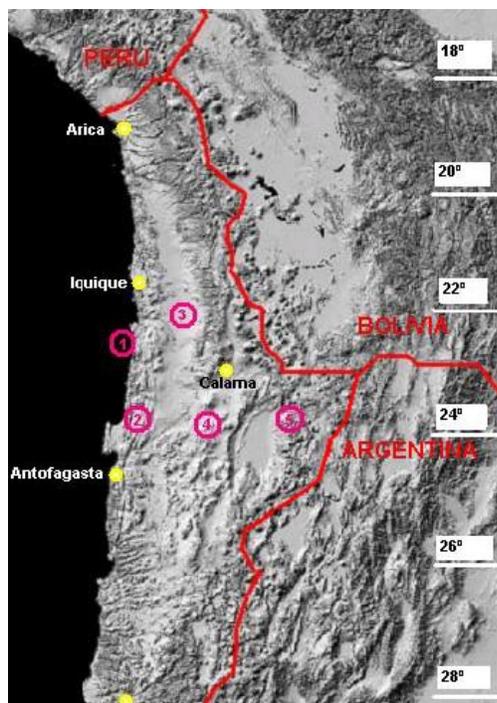


Figura 2.5. Imagen satelital del Norte Grande Chileno. (1) Planicie Costera; (2) Cordillera de la Costa; (3) Valle central; (4) Cordillera de Domeyko; (5) Cordillera de los Andes (Olguín, 2006).

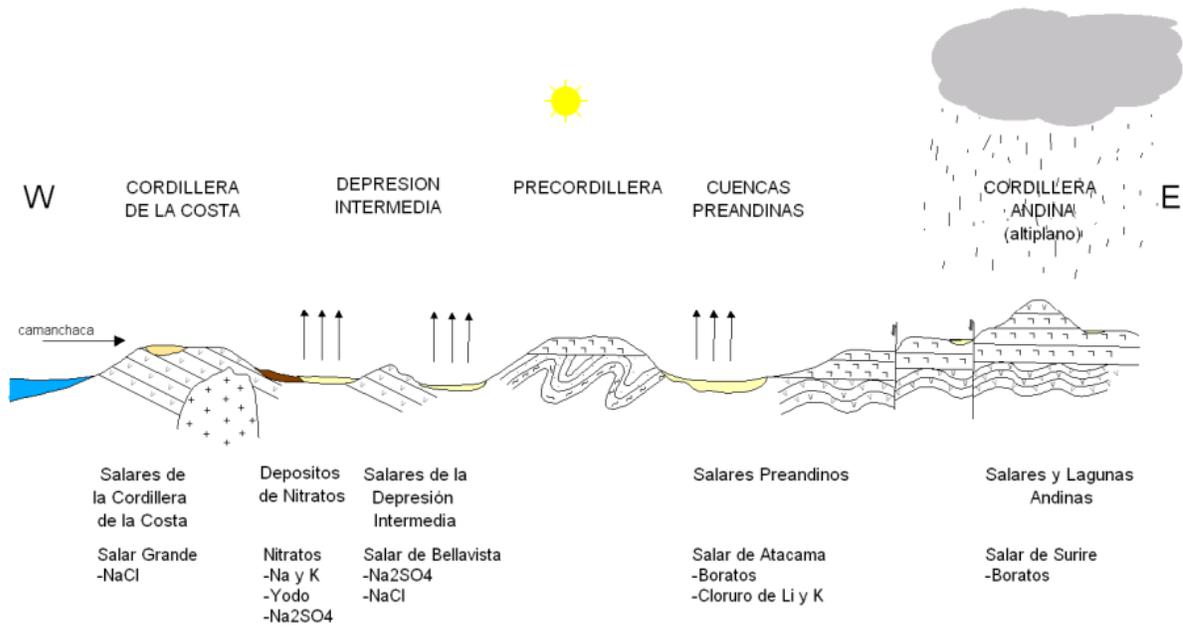


Figura 2.6. Perfil esquemático geomorfológico de depósitos salinos del norte de Chile (Gajardo & Carrasco, 2010).

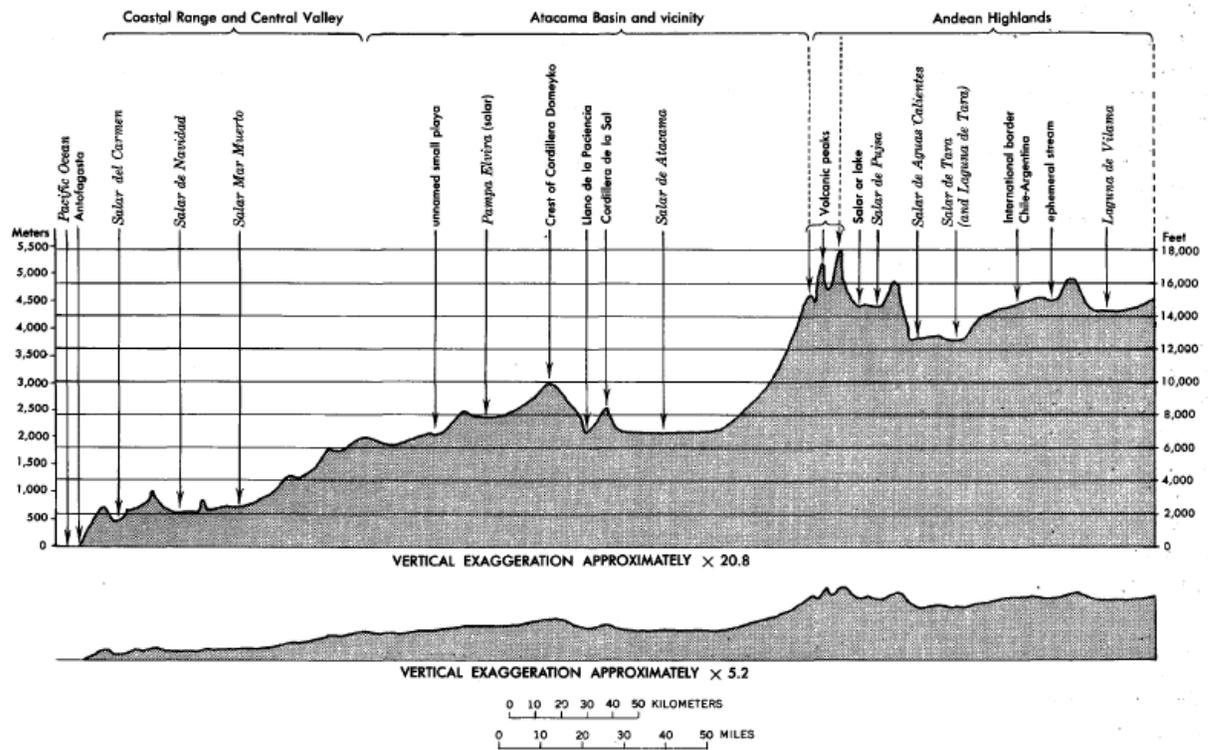


Figura 2.7. Perfil transversal oeste-este de la provincia de Antofagasta, entre las latitudes 23° y 24° (Stoertz & Ericksen, 1974).

- **Planicie Costera**

La planicie costera es la macroforma más occidental de Chile, se extiende entre el mar chileno y la Cordillera de la Costa, y corresponde a la zona donde se ubican los principales centros urbanos de la zona norte del país.

Su extensión de oeste a este llega hasta un máximo de sólo 5 km, debido a que está restringida por la presencia del farellón costero, que se forma como consecuencia de la actividad tectónica generada por la subducción de la placa de nazca bajo la placa sudamericana (Quezada, Cerda, & Jensen, 2010).

Esta zona presenta suelos granulares de origen coluvial o escombros de falda producto de la erosión de los taludes de la Cordillera de la Costa, además de arenas originadas por la erosión de rocas costeras y material de grano fino a medio depositado eólicamente (Olguín, 2006).

Como se menciona anteriormente, en esta zona se encuentran los depósitos salinos costeros, los que presentan un contenido de sales compuesto principalmente de cloruros provenientes de depositaciones marinas recientes y de acuíferos subterráneos.

- **Cordillera de la Costa**

La Cordillera de la Costa presenta una topografía plana levemente incidida por quebradas, caracterizada por antiguos depocentros aluviales limitados por las serranías aisladas. Esto demuestra que corresponde a un relieve maduro, pero intensamente fragmentado por estructuras de actividad posterior a un proceso de peneplanación (Guerrero, 2014).

El límite occidental de la cordillera constituye el Escarpe Costero, donde se presentan taludes pronunciados de hasta 800 m de desnivel, producto del rápido alzamiento de la costa; a diferencia del límite oriente, donde la inclinación se torna más gradual y reducida.

El depósito salino más importante encontrado en esta unidad morfológica corresponde al Salar Grande en la provincia de Antofagasta, con un contenido de sales compuesto principalmente de cloruro de sodio.

- **Depresión central**

La depresión central, o zona de pampa, se desarrolla al este de la Cordillera de la Costa, y consiste en una extensa franja de varios kilómetros de ancho, con una elevación promedio de 600 m.s.n.m. y una leve pendiente creciente hacia el oeste (Olguín, 2006).

En esta zona se encuentran materiales depositados sobre rocas de origen volcánico, correspondientes a suelos granulares gruesos con lentes de arcilla al oriente, y suelos granulares o escombros de falda al poniente.

Como se menciona anteriormente, aquí se ubican los depósitos salinos de las pampas, constituidos principalmente por iones de nitrato, sulfato, sodio y potasio.

- **Cordillera de Domeyko**

La precordillera o Cordillera de Domeyco tiene una altura de entre 2400 y 4800 m, y se caracteriza por presentar una gran extensión, altos topográficos y una meseta alargada cuyo ancho varía entre los 20 y 45 km (Véliz, 2018). La litología de las rocas presentes corresponde a rocas volcánicas extrusivas, sobre las cuales se depositaron suelos de origen coluvial y aluvial (Olguín, 2006).

Además de una gran cantidad de yacimientos mineros metálicos y no metálicos, esta zona concentra el 61% de la superficie de salares en el país (Tabla 2.4), entre los que destacan el Salar de Atacama y el Salar del Huasco. Esto se debe a la presencia de grandes cuencas endorreicas que no permiten el drenaje de aguas superficiales a cotas menores, favoreciendo la depositación de sales.

- **Cordillera de los Andes**

La zona cordillerana corresponde a la macroforma más oriental de Chile, y se caracteriza por la presencia de montañas y volcanes, con cumbres que alcanzan alturas por sobre los 6000 m.s.n.m. y, al igual que la precordillera, una litología de rocas de origen volcánico. Debido a su gran cantidad de cuencas endorreicas, la Cordillera de los Andes concentra el 72% de los salares chilenos (Tabla 2.4), de menor superficie que los salares preandinos, teniendo en ambos casos un contenido de sales compuesto principalmente por sulfatos.

Tabla 2.4. Distribución de los salares del norte de Chile (Vila, 1990).

Unidad Morfológica	Cantidad	Área total	Área promedio
	-	km ²	km ²
Costa	1 (2%)	245 (4%)	44,5
Depresión Central	7 (15%)	815 (12%)	812,0
Precordillera	5 (11%)	4072 (61%)	116,0
Cordillera	34 (72%)	1511 (23%)	245,0
Total	47	6643	-

2.2.2. Clima

Según describe Tamblay (1983), los suelos salinos que conforman el subsuelo del norte chileno están restringidos principalmente por las condiciones climáticas de la región. El clima de la zona norte de Chile presenta 4 clasificaciones principales en función de su aridez: extremadamente árido, árido, semiárido y subhúmedo.

En el mapa climático actual (Figura 2.8) es posible identificar una preponderancia en el Norte Grande de los climas extremadamente árido y árido, dentro de los cuales se distinguen 4 subtipos, que se detallan a continuación.

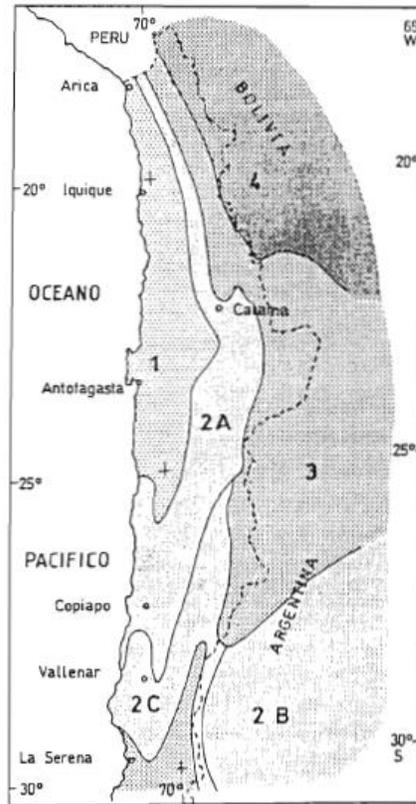


Figura 2.8. Mapa climático actual del norte de Chile. (1) Extremadamente árido; (2) Árido; (3) Semiárido; (4) Subhúmedo (Ortlieb, 1995).

- **Desértico Costero Nuboso**

Este subtipo climático se localiza en todo el sector costero del norte grande, presenta abundantes nieblas matinales y fuerte evaporación marina que causan una humedad relativa promedio de 75%. La humedad ambiental se incorpora a los estratos superficiales y producen su desrigidización como consecuencia de la disolución de sales, las que a su vez son depositadas en los estratos inferiores, aumentando su cohesión.

La temperatura anual fluctúa entre 15 y 25°C, y no afecta en el proceso de disolución, además, sus precipitaciones no superan los 3 mm anuales, por lo que no permiten un lavado más continuo de sales.

- **Desértico Interior**

Presente en el valle central a una altura por sobre los 1000 m.s.n.m., el clima desértico interior no se ve influenciado por el océano Pacífico, por lo que tiene una humedad relativa menor a la zona costera, con un promedio anual de 50%. En este subtipo climático las precipitaciones alcanzan un máximo anual de 80 mm, y las temperaturas pueden variar entre 0 y 35°C en un día.

Además de la baja humedad ambiental, las altas temperaturas generan la evaporación de las precipitaciones, por lo que no se produce una incorporación de agua a los estratos superiores y, en consecuencia, se conserva su contenido salino y cementación.

- **Desértico Marginal de Altura**

Se ubica en la zona andina por sobre los 2000 m.s.n.m., con una alta oscilación térmica y precipitaciones que varían entre los 50 y 100 mm anuales que se concentran en el periodo de noviembre-abril. El aumento de las precipitaciones en comparación con las demás zonas está asociado al fenómeno climático del “invierno boliviano”, el que se concentra sobre la Cordillera de los Andes y el Altiplano boliviano, generando intensas precipitaciones y tormentas eléctricas.

- **Estepa en Altura**

Se localiza en el sector altiplánico y cordillerano por sobre los 3000 m.s.n.m., presenta una gran oscilación térmica con temperaturas que no superan los 20°C, y sus precipitaciones de lluvia y nieve alcanzan los 410 mm, las que se infiltran rápidamente en los estratos inferiores. Debido a las fuertes variaciones de temperatura diaria y gran cantidad de humedad incorporada, se genera una importante meteorización del medio geotécnico.

2.2.3. Hidrogeología

Los cauces de agua, tanto superficiales como subterráneos, corresponden al principal transporte natural de sales solubles, por lo que es relevante conocer sus características dentro de la región debido a la posible disminución o aumento de salinidad que generen sobre los suelos.

Según describe la dirección general de aguas del ministerio de obras públicas de Chile, la Cordillera de Domeyko genera un régimen hídrico endorreico en el Altiplano, alimentado por precipitaciones estivales. Se caracteriza por la formación de salares en los puntos terminales de escurrimiento y por mantener un recurso subterráneo importante debido a las infiltraciones.

Entre las latitudes 18° y 20° S, las precipitaciones cordilleranas permiten la existencia de ríos permanentes que llegan al mar, mientras que entre las latitudes 20° y 22° S, algunas quebradas que nacen en la cordillera definen un régimen endorreico, al desaparecer por infiltración llegando a la depresión intermedia. Entre el río Loa y la latitud 26° S, existe una zona completamente arreica (Desierto de Atacama), donde el único recurso superficial corresponde a numerosas vertientes y aguadas de limitado caudal.

Dadas las condiciones climáticas del Norte Grande, la mayor parte del flujo se desarrolla a través de acuíferos subterráneos, a partir de los cuales el Mapa Hidrogeológico de Chile (DGA, 1986), distingue tres provincias hidrogeológicas en el territorio nacional continental (de oeste a este): provincia de las cuencas costeras, provincia andina vertiente al Pacífico y provincia altiplánica.

Como muestra la Figura 2.9, el Norte Grande presenta las tres provincias, las que contienen sus respectivas subprovincias, que se describen a continuación.

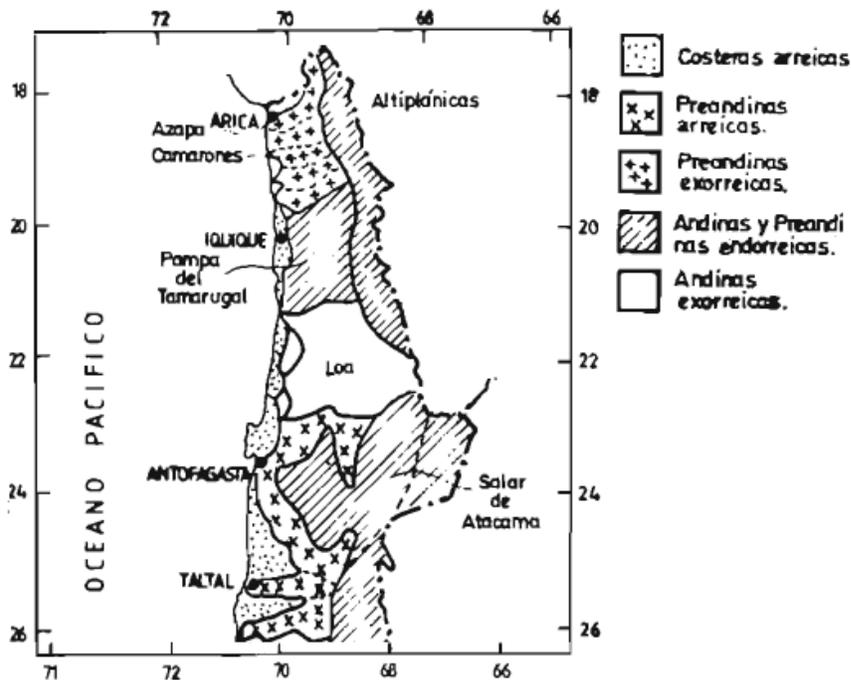


Figura 2.9. Sistemas hidrográficos del Norte Grande de Chile (Modificado de DGA, 1986).

- **Provincia de las Cuencas Costeras**

A nivel nacional abarca todas aquellas cuencas vertientes al pacífico sin respaldo andino, con nacientes en la Cordillera de la Costa (Orrego, 2002); sin embargo, en la actualidad no se presenta ningún tipo de escurrimiento en el Norte Grande, debido a la ausencia casi total de recursos hídricos en el sector.

- **Provincia Altiplánica**

La potencialidad hidrogeológica en la provincia altiplánica está ligada a su clima y litología, donde las precipitaciones estivales y alta permeabilidad de su cubierta terciario-cuaternaria volcánica permiten la infiltración del agua y su transmisión hacia sectores más bajos.

Dichos sectores están generalmente provistos de un relleno cuaternario no consolidado, volcanoclástico, de tipo fluvial o aluvial, de un espesor de más de 100 metros, y sus zonas terminales de escurrimiento suelen estar constituidas por salares.

- **Provincia Andina Vertiente al Pacífico**

Se extiende por todo el resto del país, abarcando a cauces con respaldo andino y vertientes al pacífico. En particular, la subprovincia Norte Grande se encuentra entre el extremo norte del país hasta el paralelo 27° S.

Esta subprovincia incluye acuíferos formados por rellenos cuaternarios adyacentes a cauces superficiales de la zona; el sistema acuífero de la Pampa del Tamarugal, almacenado en el extenso relleno aluvional terciario y cuaternario de la depresión intermedia; y el sector del Desierto de Atacama, con sistemas acuíferos aluvionales (Espinoza, 2006).

2.2.4. Causas de Disolución

La disolución de sales puede ser producida por cualquier razón que consista en suministrar soluciones acuosas al suelo salino; sin embargo, en la mayoría de los casos se debe a acciones antropogénicas.

Es relevante clasificar las distintas fuentes en función de su probabilidad de ocurrencia, con el fin de tenerlas en consideración al proyectar una obra sobre un suelo con contenido de sales solubles, por lo que se separan en 3 grupos (CMGI, 2013):

- **Más probables**
 - Filtraciones de cañerías de agua potable
 - Filtraciones de tuberías de alcantarillado
 - Riego de jardines
 - Lavado de autos, mascotas u otros
 - Filtraciones y derrames desde piscinas
 - Choques contra grifos
 - Aumento de lluvias debido a cambio climático
- **Menos probable**
 - Extinción de incendio
 - Derrame de agua desde camiones aljibes
 - Derrame de agua desde industrias
- **Fortuita**
 - Derrames de solventes desde industrias
 - Falla de calefactores solares
 - Rotura de camión aljibe
 - Rotura de estanque de agua

3. Marco Teórico

3.1. Sales Solubles

Las sales corresponden a compuestos iónicos formados por cationes y aniones y, en particular, las sales solubles son aquellas capaces de pasar de estado sólido a líquido al entrar en contacto con agua o soluciones acuosas (NCh3394, 2016).

En los depósitos salinos del norte de Chile existe presencia de los aniones cloruro, sulfato, carbonato y nitrato, enlazados con los cationes sodio, calcio y magnesio (NCh3394, 2016). Los compuestos más comunes presentes en los depósitos salinos corresponden a Cloruro de Sodio (NaCl), Sulfato de Calcio (CaSO₄), Nitrato de Sodio (NaNO₃) y Carbonato de Calcio (CaCO₃)

Los distintos tipos de sales presentan diferentes propiedades químicas y físicas debido a su formación, estructura atómica y composición. Estas propiedades son, entre otras, la dureza, peso específico, forma del cristal y solubilidad.

La solubilidad de una sal corresponde a la característica relevante para el presente estudio, y representa su capacidad de disolverse en contacto con un determinado solvente. Generalmente, se determina considerando agua como solvente, y se mide en gramos de sal por 100 gramos de agua. Existen diversos factores que influyen en la solubilidad de una sal, entre los que destacan, para este contexto, la composición y cristalinidad de la sal, y la temperatura y tipo de solvente.

3.1.1. Composición de la Sal

La solubilidad de los distintos tipos de sales minerales que se encuentran comúnmente en suelos salinos se presenta en la Tabla 3.1. La diferencia de la solubilidad de estos compuestos está dada por las diferentes afinidades entre solutos y solventes, lo que determina la capacidad de realizar la disolución.

Tabla 3.1. Solubilidad de distintas sales en agua a 20°C (Lide, 2012).

Mineral	Fórmula	Solubilidad [g/100 g H ₂ O]
Carbonato de Calcio (Calcita)	CaCO ₃	6,60 x 10 ⁻⁴
Carbonato de Magnesio (Magnesita)	MgCO ₃	1,80 x 10 ⁻²
Sulfato de Calcio (Anhidrita)	CaSO ₄	2,05 x 10 ⁻¹
Sulfato de Sodio	Na ₂ SO ₄	1,95 x 10 ¹
Sulfato de Magnesio	MgSO ₄	3,51 x 10 ¹
Cloruro de Sodio (Halita)	NaCl	3,60 x 10 ¹
Cloruro de Magnesio	MgCl ₂	5,60 x 10 ¹

3.1.2. Cristalinidad de la Sal

La cristalinidad se define como la propiedad de un compuesto macromolecular que consiste en una disposición regular de las macromoléculas entre sí, y tiene gran influencia sobre las propiedades de un mineral, como la dureza, densidad, transparencia y superficie específica.

La cristalización de un mineral puede ser producida mediante la evaporación del solvente en el que se encuentra disuelto. En este proceso, los sólidos disueltos se comienzan a cristalizar al alcanzar el límite de su solubilidad (sobresaturación), por lo que su grado de cristalización está directamente relacionado con las condiciones de evaporación a las que fue sometido.

Si se tiene una evaporación rápida, el mineral formará una estructura amorfa, con bajo nivel de ordenamiento entre partículas, que presenta una menor resistencia mecánica y mayor superficie específica. Por el contrario, al tener una evaporación gradual, se formará una estructura con un mayor grado de cristalización, la que presenta mayor resistencia mecánica y menor superficie específica.

Estas propiedades de resistencia y superficie tienen alta incidencia sobre la capacidad de disolución del material; por lo que, si el mineral tiene un bajo grado de cristalización (amorfo), éste tendrá una mayor solubilidad en comparación a un mineral con mayor cristalización.

Un ejemplo de este fenómeno es la calcita, el mineral más estable de carbonado de calcio, cuya solubilidad es muy baja (Tabla 3.1). Este mineral tiene dos polimorfos, el aragonito y la vaterita, los cuales presentan un menor grado de cristalización y, por lo tanto, una mayor solubilidad.

3.1.3. Temperatura del Solvente

Como es posible apreciar en la Tabla 3.2, la solubilidad de los minerales varía según la temperatura del solvente, a distintas tasas dependiendo del tipo de sal.

A partir de la Figura 3.1 se identifica que en algunos casos la solubilidad aumenta hasta cierta temperatura, y después comienza a descender; sin embargo, en todos los casos se presenta una tendencia al aumento. Además, cabe destacar que el cloruro de sodio mantiene una solubilidad con muy baja variación en el rango estudiado.

Tabla 3.2. Solubilidad de minerales a distintas temperaturas (Lide, 2012).

Mineral	Fórmula	Temperatura [°C]					
		0	20	40	60	80	100
Sulfato de Sodio	Na ₂ SO ₄	4,9	19,5	48,8	45,3	43,7	42,5
Sulfato de Magnesio	MgSO ₄	25,5	35,1	44,7	54,8	54,8	50,2
Cloruro de Sodio	NaCl	35,7	35,9	36,4	37,0	37,9	39,0
Cloruro de Magnesio	MgCl ₂	52,9	54,6	57,5	61,0	66,1	73,3

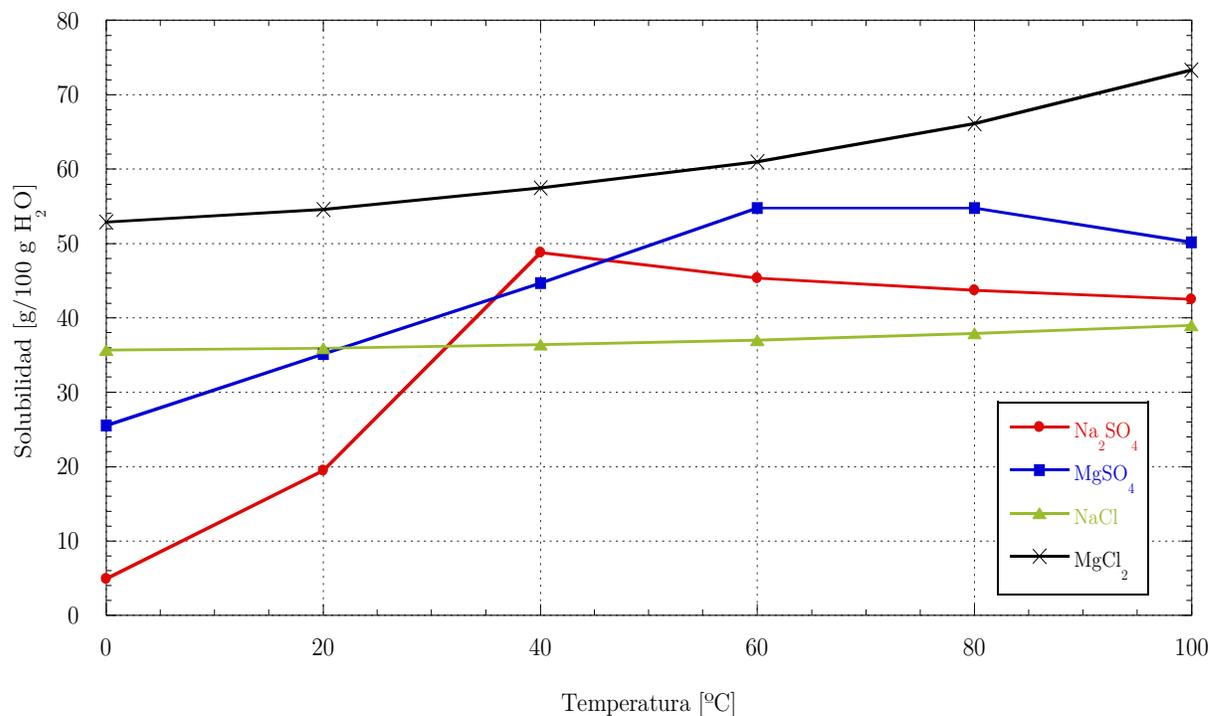


Figura 3.1. Solubilidad de minerales a distintas temperaturas (Lide, 2012).

3.1.4. Tipo y Salinidad del Solvente

Como se menciona anteriormente, la capacidad de disolución de un compuesto está determinada por la afinidad entre solutos y solventes; por lo tanto, para un mismo mineral, con distintos solventes se tendrán valores de solubilidad diferentes.

Por ejemplo, los carbonatos, con excepción de los carbonatos de metales alcalinos, son poco solubles en agua; sin embargo, éstos reaccionan con los ácidos liberando agua y dióxido de carbono. Esto tiene importantes implicancias sobre la proyección de obras industriales, mineras o de rellenos sanitarios, en los que se pueden presentar solventes distintos al agua.

Además de la composición del solvente como tal, su contenido de sales solubles determina su capacidad de disolución, debido a que puede incorporar menor cantidad de soluto antes de llegar a la sobresaturación.

3.2. Suelos Salinos

Los suelos salinos están definidos por la norma técnica NTM010 como aquellos suelos que poseen una excesiva concentración de sales solubles de distintas composiciones; en los que su origen puede ser natural o como consecuencia de acción humana. En particular, la norma NCh3394 establece dicho contenido como un 3% de concentración en peso, criterio de origen empírico determinado con base en la práctica de la ingeniería y construcción, además de diversos estudios previos realizados sobre suelos salinos naturales.

3.2.1. Modelo de Fases de Suelos Salinos

Existe una importante problemática con respecto a la caracterización geotécnica de suelos salinos naturales, debido a que distintos parámetros son imposibles de determinar mediante procedimientos convencionales. Por ejemplo, el ensayo de gravedad específica no entrega valores realmente representativos del suelo, sino que entrega un valor aproximado, debido a que el agua necesaria para éste altera la composición de la muestra.

En este contexto, Olguín (2006) planteó la necesidad de generar un nuevo modelo de fases para suelos salinos, el que consiste en un modelo trifásico de sólido insoluble-sal soluble-aire como se muestra en la Figura 3.2, a partir del cual es posible obtener los parámetros de estado tradicionales utilizados en mecánica de suelos adaptados a suelos salinos.

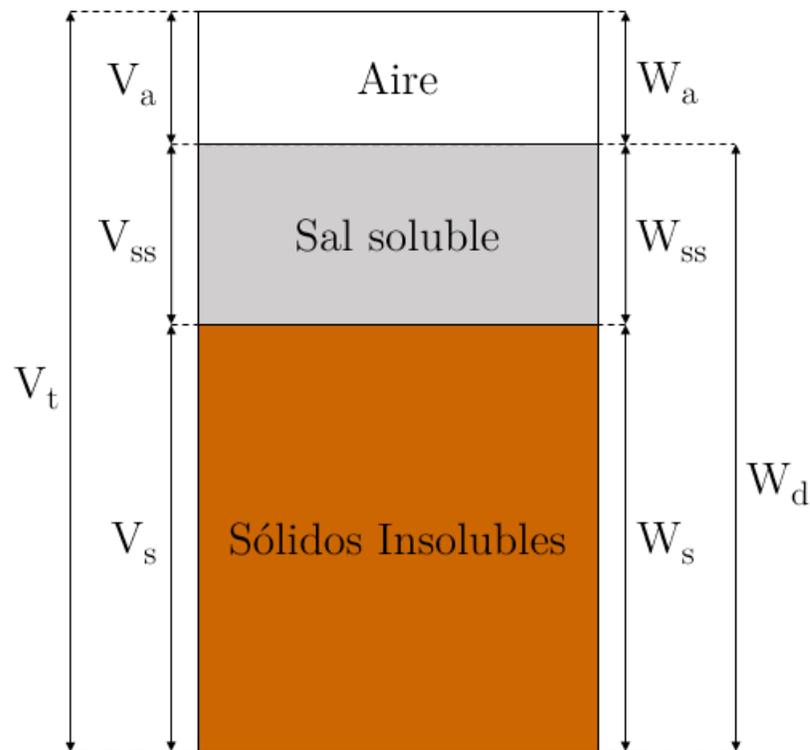


Figura 3.2. Modelo Trifásico Suelos Salinos (Olguín, 2006).

El modelo trifásico propuesto por Olgún considera que el material se encuentra en estado seco debido a que los suelos salinos se encuentran naturalmente en el norte grande de Chile, cuya aridez es tal que la humedad in-situ presente en el suelo es despreciable, caso no representativo del presente estudio.

En el caso de los suelos remoldeados, se busca que éstos lleguen a un grado de compactación determinado, el que se alcanza agregando un contenido de humedad específico, por lo tanto, no es posible considerar un modelo de fases que no incluya agua. Luego, se propone un modelo cuatrfásico del suelo salino, como se muestra en la Figura 3.3, en la que se presentan las 4 fases y sus respectivos volúmenes y pesos.

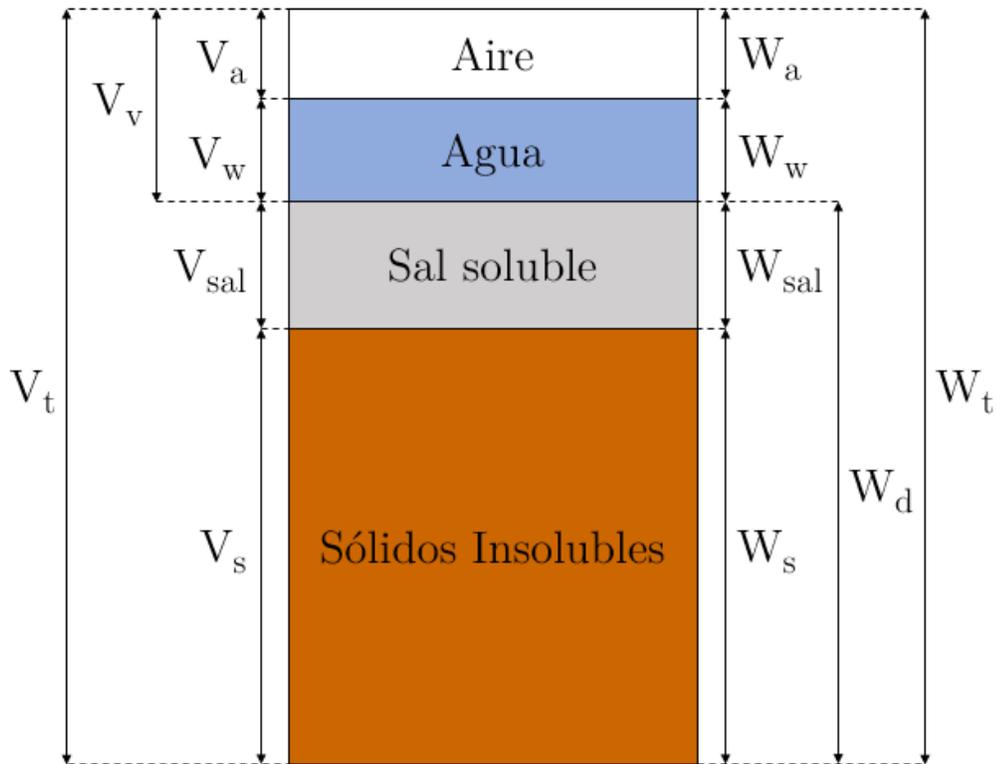


Figura 3.3. Modelo Cuatrfásico Suelos Salinos.

Donde:

V_t [L^3] : Volumen Total.	W_t [ML/T^2] : Peso Total.
V_v [L^3] : Volumen de Vacíos.	W_a [ML/T^2] : Peso Seco.
V_a [L^3] : Volumen de Aire.	W_a [ML/T^2] : Peso de Aire.
V_w [L^3] : Volumen de Agua.	W_w [ML/T^2] : Peso de Agua.
V_{sal} [L^3] : Volumen de Sales Solubles.	W_{sal} [ML/T^2] : Peso de Sales Solubles.
V_s [L^3] : Volumen de Sólidos Insolubles.	W_s [ML/T^2] : Peso de Sólidos Insolubles.

3.2.2. Propiedades Índice de los Suelos Salinos

a) Salinidad (S)

La salinidad corresponde a la concentración en peso de sales solubles respecto al peso seco de los sólidos insolubles (3.1).

$$S = \frac{W_{sal}}{W_s} \cdot 100 [\%] \quad (3.1)$$

El procedimiento mediante el cual se obtiene este parámetro se detalla en el capítulo de Metodología.

b) Gravedad Específica

La gravedad específica corresponde a la relación entre el peso específico del suelo y el peso específico del agua (Ecuación (3.2.)), y su valor depende de la mineralogía del suelo, por lo que varía con el contenido de sal.

$$G = \frac{\gamma_n}{\gamma_w} = \frac{\sum W_{sólidos}}{\sum V_{sólidos}} [-] \quad (3.2)$$

Donde:

γ_w [ML/T²L³] : Peso específico del agua (4°C).

$W_{sólidos}$ [M] : Peso de los sólidos solubles e insolubles.

$V_{sólidos}$ [L³] : Volumen ocupado por los sólidos solubles e insolubles.

Generalmente, la determinación de la gravedad específica de un suelo se realiza en presencia de agua, lo que genera un problema debido a que las sales solubles pasan a estado líquido, alterando los resultados.

Conocida la gravedad específica de las sales solubles (G_{sal}) presentes en el suelo y sus respectivas concentraciones (S), una solución al problema mencionado anteriormente consiste en determinar la gravedad específica de los sólidos no solubles (G_s) y, posteriormente, calcular la gravedad específica del suelo salino (G) según la Ecuación (3.3). (Nusier, Al-Mufty, & Joradat, 2008).

$$G = \frac{W_s + W_{sal}}{(V_s + V_{sal})\gamma_w} = \frac{G_s G_{sal}}{G_{sal} + (G_s - G_{sal})S} [-] \quad (3.3)$$

c) Pesos Específicos

El peso específico de los sólidos insolubles (γ_s), de las sales solubles (γ_{sal}) y del suelo natural (suelo más sal) (γ_n), se expresan según las ecuaciones (3.4), (3.5) y (3.6) respectivamente.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} = G_s \cdot \gamma_w \left[\frac{ML}{T^2L^3} \right] \quad (3.4)$$

$$\gamma_{sal} = \frac{W_{sal}}{V_{sal}} = G_{sal} \cdot \gamma_w \left[\frac{ML}{T^2L^3} \right] \quad (3.5)$$

$$\gamma_n = \frac{W_s + W_{sal}}{V_s + V_{sal}} = G \cdot \gamma_w \left[\frac{ML}{T^2L^3} \right] \quad (3.6)$$

d) Humedad (ω)

La humedad es medida en laboratorio mediante el secado al horno de las muestras, según el procedimiento detallado en la norma ASTM D2216-10, y su valor se determina usualmente según la Ecuación (3.7).

$$\omega = \frac{W_t - W_d}{W_d} [-] \quad (3.7)$$

Es importante notar que, según lo descrito por Nusier, Al-Mufty & Joradat (2008), durante el secado de las muestras la sal que se encuentra incorporada en el agua comienza a precipitar, por lo que la humedad medida (ω_{med}) corresponde a:

$$\omega_{med} = \frac{W_w}{W_s + W_{sal}} [-] \quad (3.8)$$

Mientras que la forma propuesta es considerar tanto la sal disuelta en el agua, como la que se encuentra en estado sólido. Luego, la humedad corregida (ω_{corr}) se determina según la Ecuación (3.9).

$$\omega_{corr} = \frac{W_{Fluido}}{W_{Sólidos}} = \begin{cases} \frac{W_w + W_{sal_w}}{W_s} [-] , & \text{si } W_{sal} \leq s \cdot W_w \\ \frac{W_w(1 + s)}{W_s + W_{sal_s}} [-] , & \text{si } W_{sal} > s \cdot W_w \end{cases} \quad (3.9)$$

Donde:

W_{sal_w} [M] : Peso de sal soluble disuelta en el agua.

W_{sal_s} [M] : Peso de sal soluble en estado sólido.

s [MM⁻¹] : Solubilidad de la sal en agua.

e) Pesos Unitarios

A partir de las relaciones propuestas por Skorin (1971), Tamblay (1983) y Olgúin (2006), se definen:

i. Peso unitario seco sin sales ($\gamma_{d_{ss}}$)

$$\gamma_{d_{ss}} = \frac{W_s}{V_t} \left[\frac{\text{ML}}{\text{T}^2\text{L}^3} \right] \quad (3.10)$$

ii. Peso unitario seco con sales ($\gamma_{d_{cs}}$)

$$\gamma_{d_{cs}} = \frac{W_d}{V_t} = \frac{W_s + W_{sal}}{V_t} = \gamma_{d_{ss}}(1 + S) \left[\frac{\text{ML}}{\text{T}^2\text{L}^3} \right] \quad (3.11)$$

iii. Peso unitario del suelo (γ_t)

$$\gamma_t = \frac{W_t}{V_t} = \frac{W_s + W_{sal} + W_w}{V_t} = \gamma_{d_{cs}}(1 + \omega_{med}) = \gamma_{d_{ss}}(1 + S)(1 + \omega_{med}) \left[\frac{\text{ML}}{\text{T}^2\text{L}^3} \right] \quad (3.12)$$

iv. Peso unitario seco corregido ($\gamma_{d_{corr}}$)

Finalmente, es necesario considerar el efecto de la solubilidad de la sal en el agua, con el fin de asignar correctamente los valores del peso del agua y de los sólidos, como se menciona anteriormente. Esta corrección es de particular interés para obtener la curva de compactación real del suelo, y evidenciar el efecto de su contenido de sal.

$$\gamma_{d_{corr}} = \frac{\gamma_t}{1 + \omega_{corr}} \left[\frac{\text{ML}}{\text{T}^2\text{L}^3} \right] \quad (3.13)$$

f) Índice de Vacíos (e)

Al igual que los parámetros descritos anteriormente, no considera el efecto del contenido de sales solubles. Por lo tanto, Mishra *et al.* (2019) propone la siguiente corrección para este parámetro:

$$e_{corr} = \frac{G\gamma_w}{\gamma_{d_{corr}}} - 1 [-] \quad (3.14)$$

Y su variación se calcula en función de la deformación vertical unitaria como:

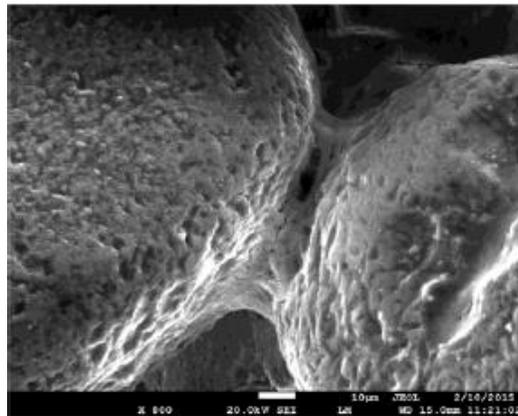
$$\Delta e = e_0 + \frac{\Delta h}{h_0}(1 + e_0) \quad (3.15)$$

3.2.3. Cementación

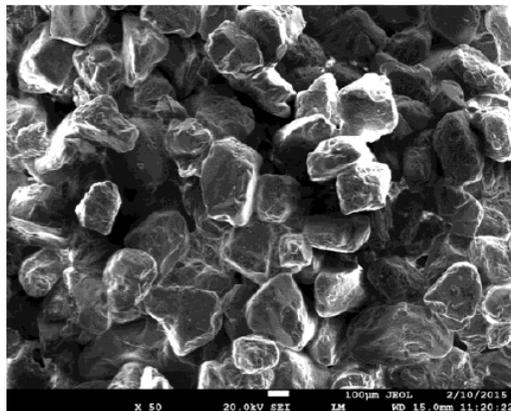
La cementación consiste en el aumento aparente de la fuerza interpartícula de un suelo, debido a la precipitación de un mineral en los vacíos de éste, siendo proporcional a su concentración de sales. Este proceso reduce la porosidad del suelo y genera su litificación (Boggs Jr., 2014).

Jia He y Jian Chu (2016) mostraron que, para salinidades relativamente bajas, la sal precipitada forma un puente entre las partículas de suelo, y este contacto toma una forma de menisco (Figura 3.4 (a)), como en el caso del agua. Por otro lado, al comparar las imágenes de arena con 6,5% y 12,9% de salinidad (Figura 3.4 (b) y (c)) es posible apreciar que este último caso presenta una distribución continua de la sal precipitada entre las partículas de suelo.

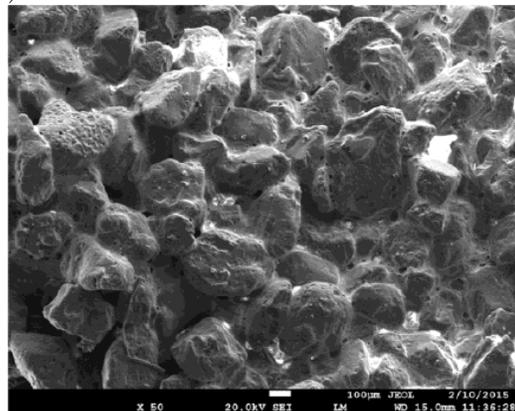
Esto explica por qué la precipitación de sales genera un aumento en la rigidez y la resistencia del suelo, pero una disminución en la tasa de crecimiento de ambas (Figura 3.5).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.4. Imágenes de Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) de arena cementada por sal (a) Salinidad 6,5% (x800); (b) Salinidad 6,5% (x50); (c) Salinidad 12,9% (x50) (He & Chu, 2017).

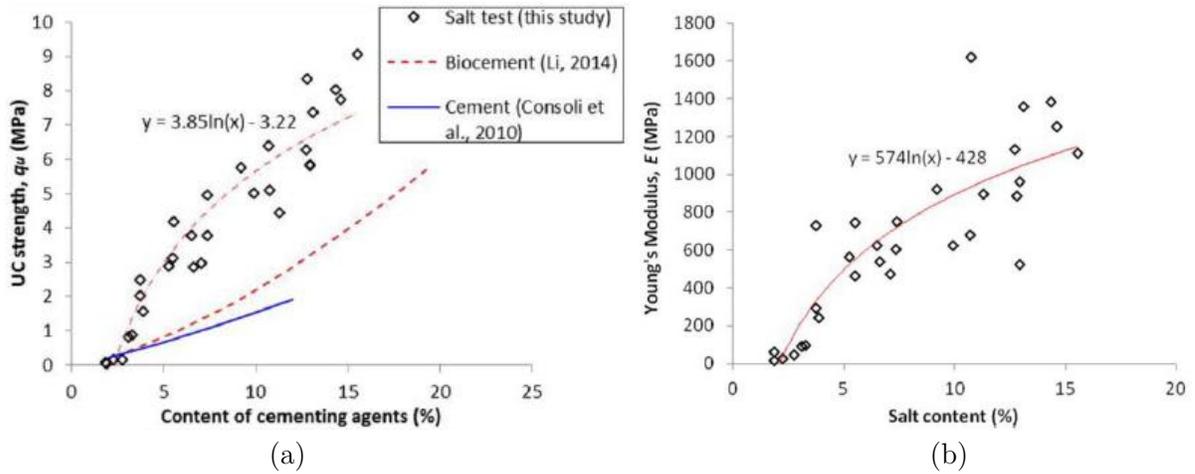


Figura 3.5. (a) Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) vs contenido de agentes cementantes; (b) Módulo de deformación vs contenido de sal (He & Chu, 2017).

Collins & Sitar (2009) y Abduljawad & Al-Amoudi (1995) realizaron estudios sobre arenas cementadas (Figura 3.6) y suelos salinos de sabkhas (Figura 3.7), respectivamente. Estos estudios dan cuenta de la destrucción de la cementación, disminución de la resistencia y rigidez, y aumento del asentamiento a causa de la disolución de las sales.

Es de suma importancia tener en consideración este efecto de las sales en la metodología de la confección del material a ensayar, con el fin de reproducir las características de un suelo salino natural.

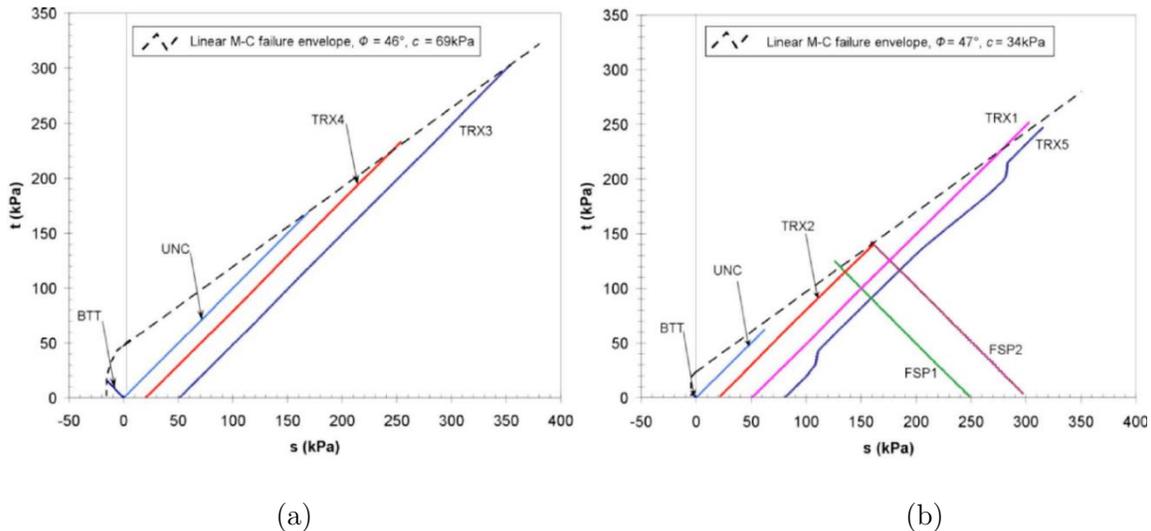


Figura 3.6. Trayectoria de tensiones y envolvente de falla en el espacio $\sigma - \tau$ para arena moderadamente cementada. (a) Parcialmente saturado; (b) Saturado (Collins & Sitar, 2009).

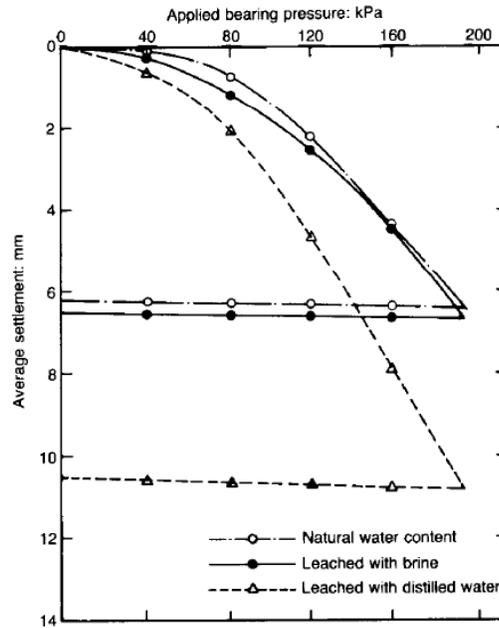


Figura 3.7. Resultados ensayo placa de carga suelos de sabkhas con salinidad inicial de 25,2% aproximadamente (Abduljawwad & Al-Amoudi, 1995).

3.3. Caracterización Geotécnica de Suelos Salinos del Norte de Chile

Se presentan los resultados obtenidos en distintos estudios de la caracterización geotécnica de muestras de suelos salinos naturales del norte de Chile, con el fin de tener una referencia para la selección del material a ensayar en el presente estudio.

Las curvas granulométricas determinadas por Palma & Riquelme (2018) y por Sanhueza & Valenzuela (2018) se presentan en la Figura 3.8 y Figura 3.9 respectivamente.

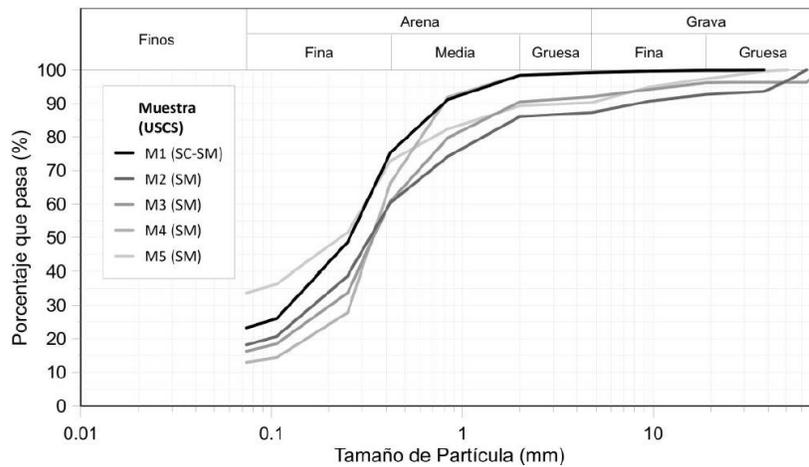


Figura 3.8. Curvas granulométricas de muestras de suelos salinos del norte de Chile (Palma & Riquelme, 2018).

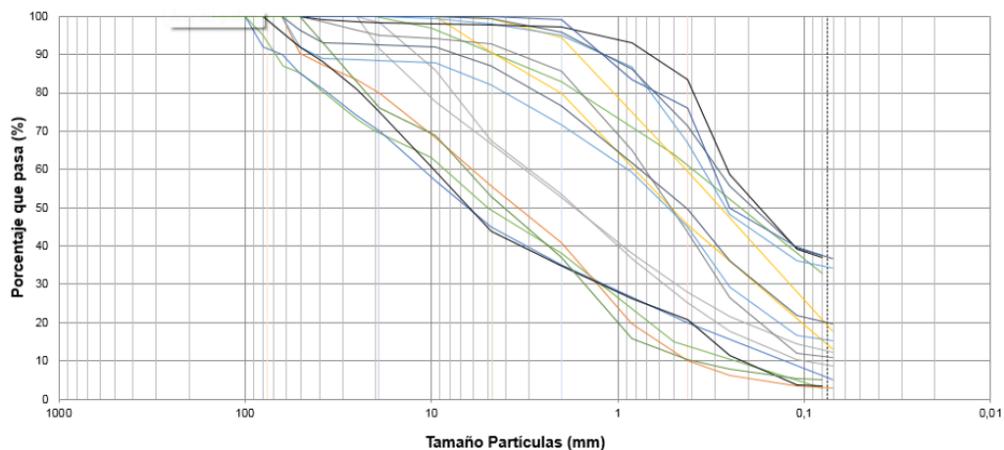


Figura 3.9. Curvas granulométricas de muestras de suelos salinos del norte de Chile (Sanhueza & Valenzuela, 2018).

Los suelos analizados por Palma & Riquelme corresponden a muestras provenientes de calicatas efectuadas en las cercanías de Calama, mientras que Sanhueza & Valenzuela estudiaron distintas muestras del norte de Chile, principalmente a profundidades menores a 5 m. A partir de las curvas, se evidencia que el contenido de finos varía entre 3% y 35%, estando la mayoría sobre el 12%.

Por su lado, Olgún (2006) determinó las curvas granulométricas naturales y lixiviadas de distintas muestras de suelos salinos, a partir de las cuales también se determinó mayoritariamente un contenido de finos por sobre 12%, alcanzando en algunos casos hasta un 50%.

Los casos de estudio mencionados anteriormente corresponden principalmente a arenas con contenido de finos de limos o arcillas no plásticas.

3.4. Suelos Compactados

La compactación de suelos tiene como objetivo mejorar algunas de sus propiedades mecánicas, entre las que se encuentran la rigidez, permeabilidad, resistencia peak y estabilidad volumétrica (Sagüés, 2008). La variación de dichas propiedades es consecuencia principalmente de la reducción del índice de vacíos de la estructura debido a la aplicación de energía mecánica.

Los efectos más relevantes de la compactación en el contexto del asentamiento por disolución de sales corresponden principalmente al aumento de densidad seca del material además considerable disminución de la permeabilidad del suelo, como se observa en la Figura 3.10. En dicho gráfico se evidencia la variación de la permeabilidad en arena de playa con respecto a su índice de vacíos para 4 relaciones empíricas propuestas por distintos autores, además de resultados experimentales obtenidos por Taylor (1948).

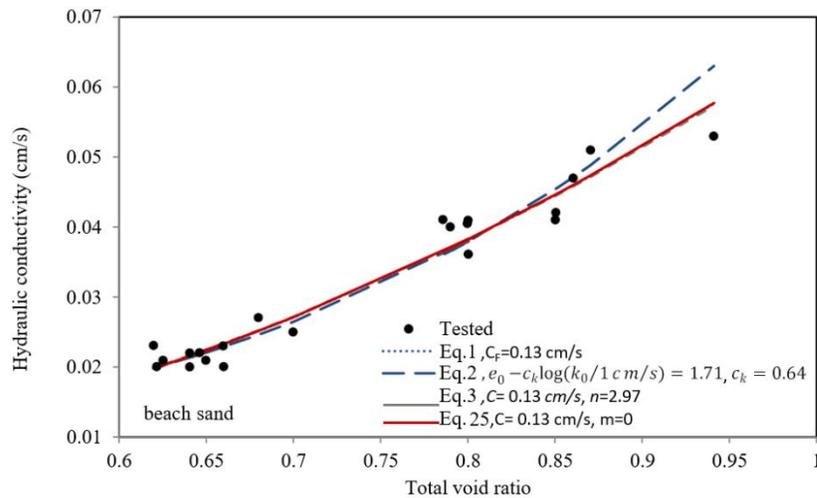


Figura 3.10. Comparación de diferentes modelos $k - e_t$ (Ren *et al.*, 2016).

Además del efecto de la compactación, el remoldeo del material natural y la adición de humedad generan una distribución más uniforme de la sal en el esqueleto, disminuyendo los grumos de sal depositados en macro poros, por lo que, generalmente, se obtiene una estructura menos colapsable.

3.5. Características que Controlan la Colapsabilidad

Entre las consideraciones a tener en cuenta para la selección del material a ensayar, está la representatividad con respecto a los suelos naturales presentes en el norte de Chile; sin embargo, también es importante tener un caso desfavorable con el fin de obtener resultados conservadores.

Con este fin, se presentan algunas de las características que inciden en la colapsabilidad de un suelo salino y de qué forma lo hacen.

3.5.1. Solubilidad

La solubilidad representa la capacidad de un mineral de disolverse en contacto con un determinado solvente, por lo tanto, mientras mayor sea la solubilidad de un mineral, será necesario un menor volumen de agua para cambiar su fase.

Con base en lo anterior, los suelos salinos con sales solubles de altas solubilidades corresponden a estructuras mayormente colapsables, en comparación a suelos con características similares y sales menormente solubles.

Las características de la sal que tienen mayor incidencia corresponden a su composición y grado de cristalización, por lo que ambas características deben ser consideradas en la elección de material y el proceso de confección.

3.5.2. Grado de Cristalización

Las sales solubles pueden presentar distintos grados de cristalización dependiendo de las condiciones en las que se produce la depositación del mineral.

El nivel de ordenamiento que alcanza la microestructura de la sal incide directamente sobre su solubilidad, siendo las estructuras cristalinas menormente solubles que las estructuras amorfas. Por lo tanto, suelos salinos que presenten sales con menor grado de cristalización corresponden a estructuras mayormente colapsables.

Uno de los procesos que genera la depositación de un mineral corresponde a la evaporación del solvente en la que éste se encuentra disuelto, generando una sobresaturación de la solución y la precipitación de la sal.

La velocidad de este proceso depende principalmente de la temperatura a la que está sometida la solución, y controla el grado de cristalización del mineral (Figura 3.11).

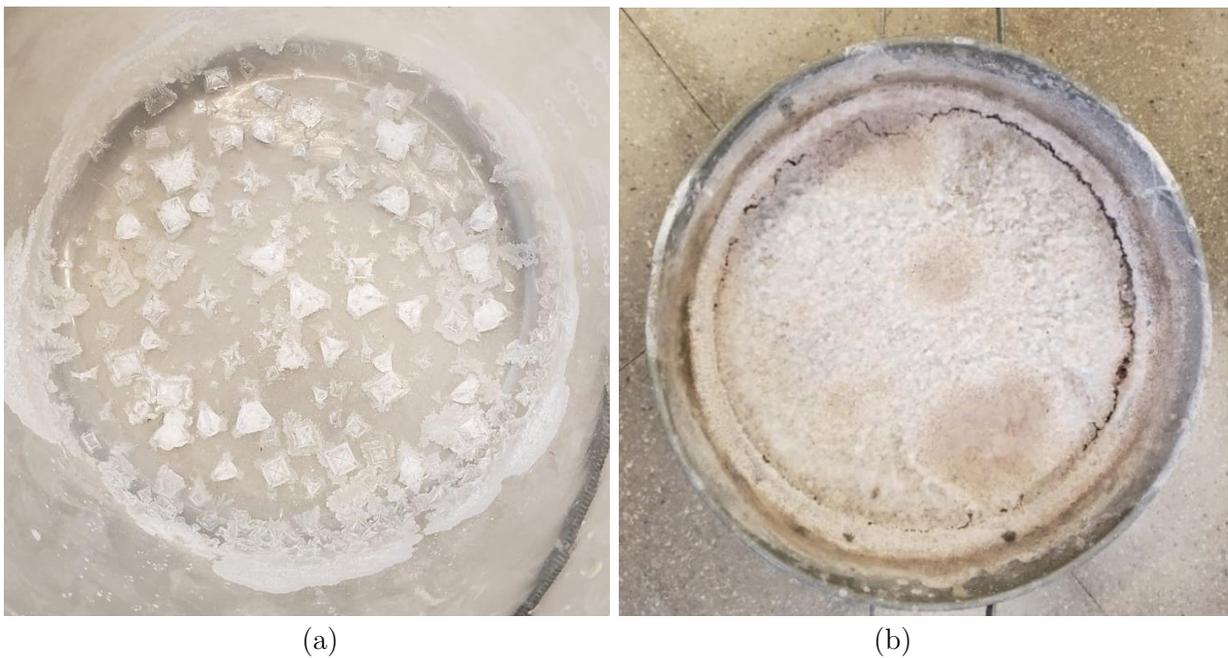


Figura 3.11. Comparación de cristalización de la sal en distintas condiciones de secado. (a) Secado a temperatura ambiente; (b) Secado en horno a 100°C.

Es posible evidenciar a partir de la Figura 3.11 que al tener un secado de muestras rápido se genera una estructura cristalina amorfa con gran superficie específica y mayor solubilidad en comparación a la muestra de secado lento, por lo que la temperatura de secado es un parámetro importante para considerar en la confección del material a ensayar.

3.5.3. Salinidad del solvente

El presente estudio incorpora el análisis del asentamiento producido por la infiltración de solvente que presenta un contenido de sal previo al contacto con el suelo.

Debido a que el solvente puede incorporar menor cantidad de soluto antes de llegar a la sobresaturación, se espera que se produzcan menores asentamientos durante la infiltración, condición ante la cual el suelo se comportaría de manera menormente colapsable en comparación con una estructura infiltrada con un solvente desmineralizado.

Por otro lado, al infiltrar con un solvente con sal, la salinidad final del suelo será mayor que la inicial, contrario a la infiltración con un solvente limpio. El cambio de comportamiento se evidencia de mejor manera al analizar la evolución del índice de vacíos que sólo la deformación, debido a que también refleja la variación de la gravedad específica equivalente.

3.5.4. Contenido de finos

El contenido de finos tiene una incidencia directa en la conductividad hidráulica del suelo, como es posible observar en la Figura 3.12, donde se obtiene que la permeabilidad de la arena con 25% de limo es aproximadamente dos órdenes de magnitud mayor que la de la arena limpia, para ambas muestras.

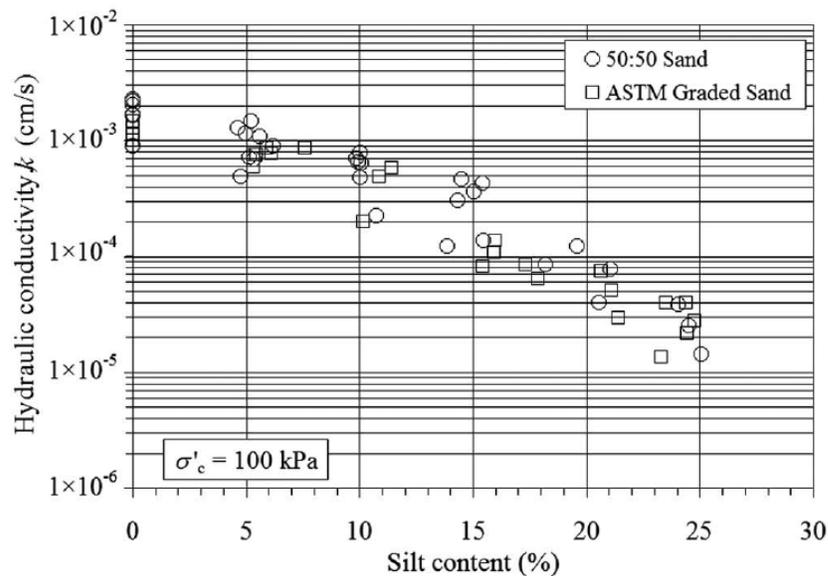


Figura 3.12. Conductividad Hidráulica para distintos valores de contenido de fino (limo) (Bandini & Sathiskumar, 2009).

Este efecto se debe principalmente a que las partículas de suelo fino ocupan los intersticios del esqueleto, y como consecuencia se genera una disminución de los índices de vacíos máximos y mínimos (Figura 3.13).

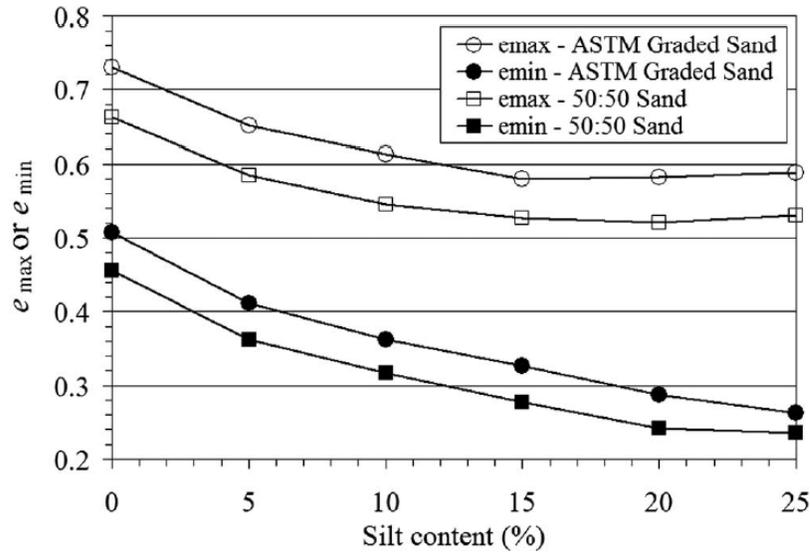


Figura 3.13. Índices de vacíos máximos y mínimos para arenas limosas con distinto contenido de finos (Bandini & Sathiskumar, 2009).

A partir de lo anterior se puede concluir que los materiales con un mayor contenido de finos corresponden a estructuras menormente colapsables.

3.5.5. Clasificación de finos

Según describe la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONUAA), la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es una medida de cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo. En el caso de los limos, la CIC presenta valores entre 15-30 meq/100g, mientras que las arcillas pueden presentar valores que llegan hasta 100 meq/100g (montmorillonita).

Esta característica de los suelos finos genera una importante diferencia en la interacción de limos o arcillas con los cationes que proporcionan las sales (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , etc.), donde las arcillas generan enlaces iónicos significativamente mayores que los limos.

A nivel macro, dichos enlaces tienen como efecto un mayor grado de cementación en el suelo, lo que genera que éste presente una estructura más compacta e impermeable, y, en consecuencia, menormente colapsable.

3.5.6. Distribución Granulométrica

En 2015 fueron analizados 2 set de ensayos de percolación de sales en celda edométrica por McDougall *et al* (2015). Los ensayos fueron realizados sobre muestras de suelo con distintas salinidades, distintas razones de diámetro ($D_{50_{arena}}/D_{50_{sal}}$) y tanto bien como mal graduadas.

Una de las principales conclusiones de este estudio es que la variación de índice de vacíos es relativamente independiente de la razón entre el D_{50} de la arena y el D_{50} de la sal como se presenta en la Figura 3.14, tanto para materiales bien graduados ($C_u=6,98$) como mal graduados ($C_u=1,4$ y $1,18$).

Otra conclusión es que los materiales mal graduados presentan una mayor variación de índice de vacíos que los materiales bien graduados, tal como se muestra en la Figura 3.14, y más claramente en la Figura 3.15.

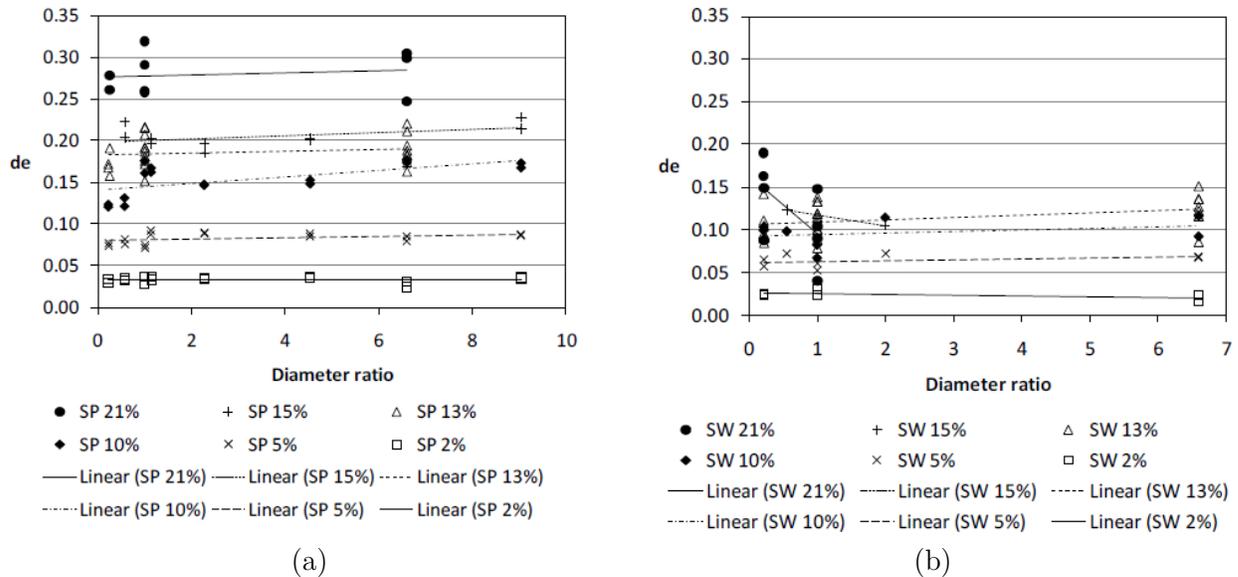


Figura 3.14. Variación de índice de vacíos por disolución en función de la razón de diámetro para 6 contenidos de NaCl. a) Material mal graduado; b) Material bien graduado (McDougall, *et al.*, 2015).

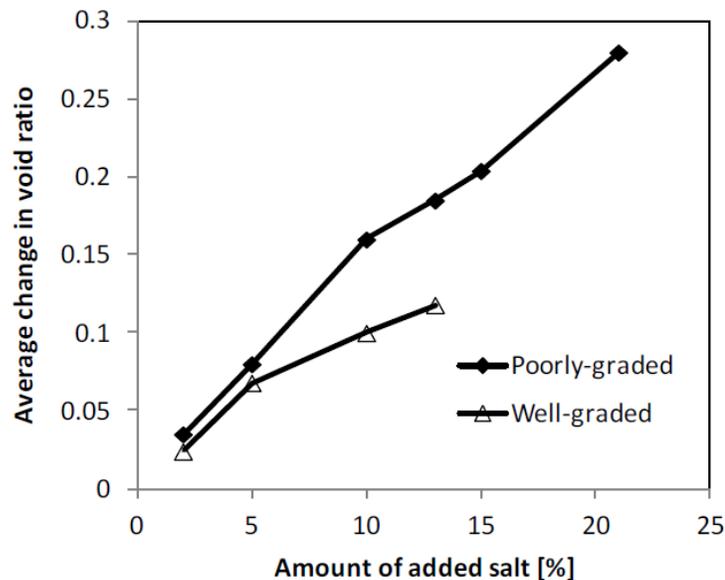


Figura 3.15. Variación promedio en el índice de vacíos por disolución de sales en función de la salinidad para materiales bien graduados y mal graduados (McDougall, *et al.*, 2015).

3.6. Potencial de Colapso

Uno de los análisis más importantes en el proceso de diseño de cualquier obra corresponde al estudio de asentamientos de su sello de fundación, debido a que afectan tanto su seguridad como serviciabilidad y hasta su apariencia. Según describe Saravia (2018), una de las causas principales de este tipo de daño estructural, son los suelos no saturados ubicados en las formaciones geológicas de regiones áridas y semiáridas.

Además, Saravia señala que los fenómenos más característicos del comportamiento del suelo no saturado se relacionan con sus deformaciones volumétricas al ser sometidos al incremento del grado de saturación, las cuales pueden producir hinchamiento como en el caso de las arcillas expansivas o colapso como consecuencia de la pérdida de cohesión aparente (Figura 3.16).

La norma ASTM D5333-03 define el colapso (Figura 3.17) como una disminución de la altura de un suelo confinado luego de su saturación a tensión vertical constante. Además, agrega que un suelo colapsable puede soportar tensiones verticales relativamente grandes con un bajo nivel de asentamientos mientras se encuentre en un estado parcialmente saturado; sin embargo, puede exhibir un asentamiento importante durante la saturación sin la necesidad de estar sometido a altas tensiones verticales.



Figura 3.16. Enlaces temporales entre partículas (Saravia, 2018).

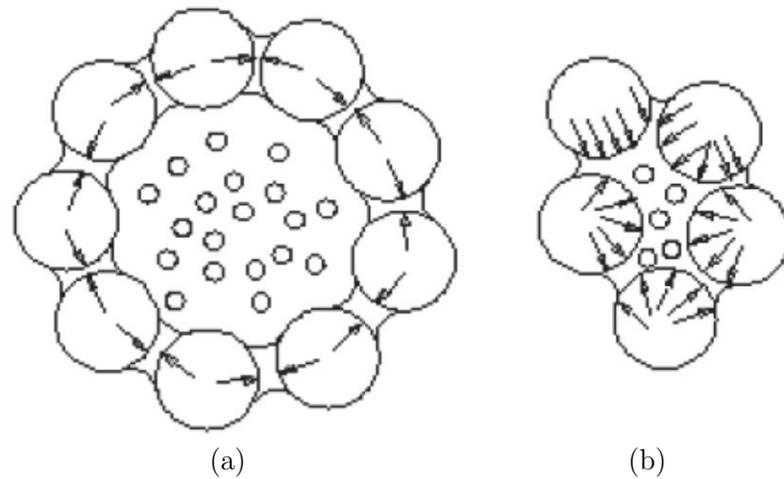


Figura 3.17. Estructura de un suelo (a) antes y (b) después del colapso (Valencia-González, Yepes-García, & Echeverri-Ramírez, 2015).

Con el fin de cuantificar la colapsabilidad del suelo se han realizado ensayos de consolidación unidimensional con infiltración según el procedimiento descrito en la norma ASTM D4546, donde se detalla el equipo necesario, la metodología de preparación de muestras y la presentación de resultados.

Durante el ensayo se aplica tensión vertical creciente a la muestra hasta una tensión de saturación de 2 kgf/cm², posteriormente se realiza la infiltración de solvente, y finalmente se termina de realizar la carga y descarga. Este procedimiento entrega como resultado el gráfico de índice de vacíos versus tensión vertical de la forma en que se presenta en la Figura 3.18, además de la curva de deformación por saturación en el tiempo (Figura 3.19).

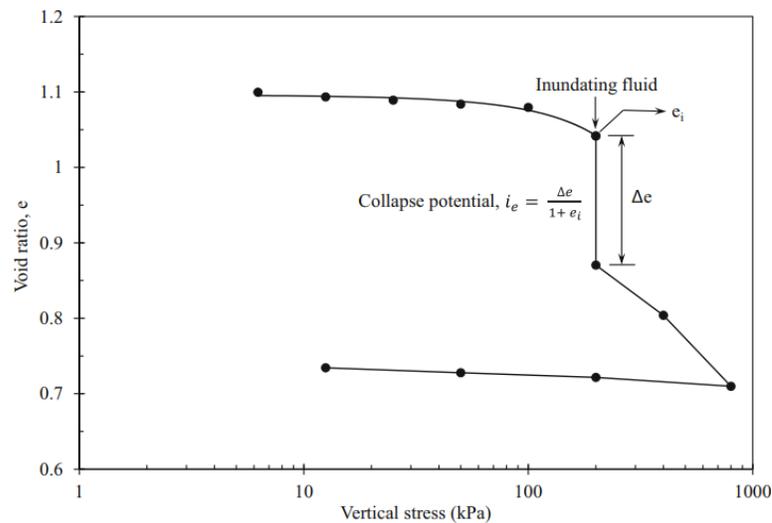


Figura 3.18. Curva de consolidación con colapso (Thyagaraj, Bhavani, Das, & Julina, 2016).

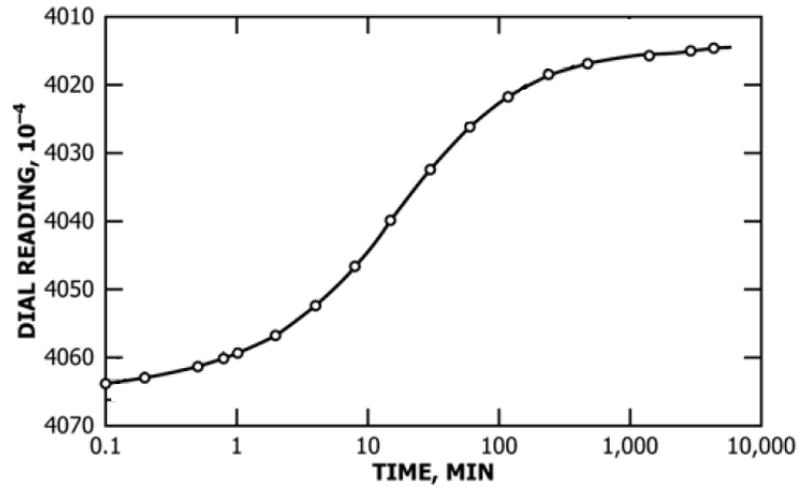


Figura 3.19. Curva de deformación por infiltración en el tiempo (Modificado de ASTM D4546-14).

El objetivo final de realizar el ensayo es el de determinar el potencial de colapso del suelo estudiado, parámetro que representa la magnitud relativa del colapso del suelo a determinada tensión vertical (ASTM D5333-03).

El potencial de colapso se calcula a partir de la deformación vertical según la Ecuación (3.16), y de la variación de índice de vacíos según la Ecuación (3.17).

$$I_{ch} = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100\% \quad (3.16)$$

$$I_{ce} = \frac{\Delta e_{corr}}{1 + e_{corr0}} \cdot 100\% \quad (3.17)$$

Donde:

Δh [L] : Deformación durante saturación.

h_0 [L] : Altura inicial de la muestra.

Δe_{corr} [-] : Variación del índice de vacíos durante saturación.

e_0 [-] : Índice de vacíos corregido inicial

En suelos sin presencia de sales solubles, ambas ecuaciones son equivalentes; sin embargo, en el presente estudio se hace la distinción debido a que la disolución de sales genera un cambio en la gravedad específica equivalente del suelo, por lo que el índice de vacíos no puede ser calculado simplemente en función de la deformación vertical.

El potencial de colapso se clasifica cualitativamente según su grado de colapso, como se resume en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Clasificación del potencial de colapso. (ASTM D5333-03).

Grado de Colapso	Índice de colapso, I_c [%]
Nulo	0,0
Leve	0,1-2,0
Moderado	2,1-6,0
Moderadamente Severo	6,1-10,0
Severo	>10

La clasificación de grado de colapso se desarrolla en el contexto de deformación por cambio de presión efectiva por el aumento de saturación; sin embargo, en el contexto de suelos salinos, la deformación producida por el cambio de saturación depende casi exclusivamente de la disolución de sales y no de la pérdida de succión. La magnitud del índice de colapso depende del líquido utilizado para la lixiviación y su capacidad de disolver las sales solubles contenidas en la muestra.

4. Material Ensayado y Metodología Experimental

4.1. Material Ensayado

4.1.1. Arena de Relaves de El Torito

El material a ensayar para el desarrollo de este trabajo corresponde a arena obtenida del muro del tranque de relaves El Torito (Figura 4.1 (b)), perteneciente a la mina El Soldado, propiedad de la empresa Anglo American Chile.

El Soldado es un yacimiento minero de la comuna de Nogales, en el sector de El Melón, a 132 kilómetros de Santiago (Figura 4.1 (a)). Consta de una mina a rajo abierto y una subterránea, y plantas de chancado y de tratamiento de minerales oxidados y sulfurados.

La arena de El Torito corresponde al material con el que se construye el muro del tranque, y constituye la fracción gruesa de los relaves obtenidos como el residuo del tratamiento de minerales sulfurados.



Figura 4.1. Origen del material. (a) Ubicación de Mina el Soldado; (b) Tranque El Torito.

Este material es seleccionado debido a que su distribución granulométrica es pobremente graduada y presenta un contenido de finos bajo entre los valores típicos de los suelos salinos naturales, los cuales constan de limos no plásticos debido a su origen.

4.1.2. Cloruro de Sodio

La sal soluble seleccionada para la confección del suelo salino corresponde al cloruro de sodio (NaCl). Este mineral es seleccionado debido a que presenta una alta solubilidad en comparación con otras sales presentes en el norte de Chile para el rango de temperaturas entre 0 y 100°C (Figura 3.1), lo que implica que se estará considerando un caso desfavorable en términos de asentamiento por disolución de sales.

Adicionalmente, como es posible apreciar en la Figura 3.1, la solubilidad presenta muy poca variación en función de la temperatura del solvente. Esto representa una ventaja en el procedimiento experimental, debido a que la temperatura no será un parámetro que controle los resultados obtenidos.

Las características del NaCl relevantes para este estudio se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros del Cloruro de Sodio (Hill, Petrucci, McCreary, & Perry, 2005).

Parámetro	Unidad	Valor
Solubilidad en Agua (25°C)	g/100 g	35,9
Gravedad Específica	-	2,16
Punto de Fusión	°C	801

4.2. Caracterización Geotécnica del Material Base

4.2.1. Clasificación Granulométrica

- **Granulometría Laser**

La distribución granulométrica del material base es obtenida mediante el método de difracción laser, utilizando el equipo Mastersizer 2000 ubicado en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Este método se utiliza para la medición de distribución de tamaño de partícula de distintos sistemas bifásicos y se guía por la norma internacional ISO 13320:2020.

El principio de la difracción laser consiste en medir las distribuciones de tamaño de partícula a partir de la variación angular de la intensidad de la luz dispersada cuando un rayo láser pasa a través de una muestra cuyas partículas se encuentran suspendidas en un dispersante entre dos cristales circulares (Malvern Panalytical, 2017).

Las partículas dispersan luz en todas las direcciones, con un patrón de intensidad que es dependiente de su tamaño, donde partículas de mayor tamaño dispersan la luz en ángulos pequeños en relación con el rayo láser, y las de menor tamaño lo hacen en ángulos mayores.

El cambio en la dirección del láser por difracción es registrado y medido por un arreglo de celdas fotosensibles especialmente ubicadas. A través de este mecanismo, el equipo entrega una frecuencia de distribución de tamaños con respecto al volumen total de la muestra lo que luego es expresado en términos de porcentaje más fino en peso (Maureira, 2012).

Para el cálculo de la distribución de tamaño de partícula, la difracción láser utiliza la teoría Mie de la dispersión de la luz, suponiendo un modelo de esfera equivalente al volumen de la partícula (Figura 4.2). Esto quiere decir que supone que las partículas medidas son esféricas

y los resultados que muestra este análisis se registran como un diámetro de la esfera equivalente al volumen de la partícula (González Garcés, 2017).

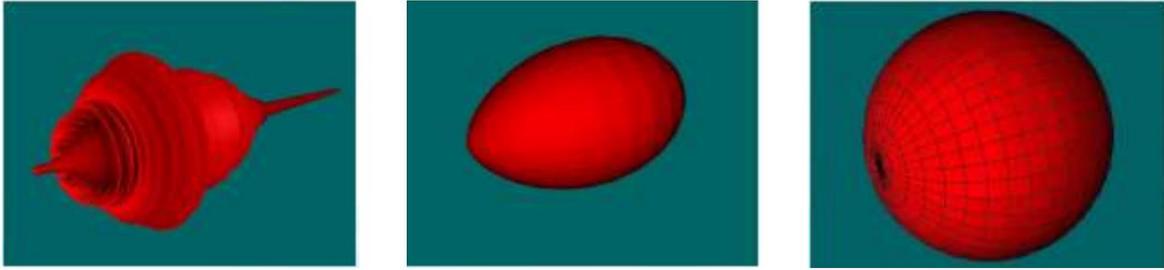


Figura 4.2. Patrones de dispersión de Mie. De izquierda a derecha, para tamaños de partícula de 10, 0,2 y 0,05 μm de diámetro (Iesmat, 2017).

- **Límites de Atterberg**

La determinación del límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad se realiza siguiendo la metodología descrita en la norma ASTM D4318-05.

Este procedimiento tiene como objetivo la clasificación del contenido de finos del suelo según su plasticidad, la cual se realiza según la carta de plasticidad presente en la norma ASTM D2487-17.

4.2.2. Gravedad Específica

La gravedad específica de los sólidos no solubles que componen el suelo se determina mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM D854-14

Para los sólidos solubles utilizados en el presente estudio este parámetro se presenta en la Tabla 4.1.

Finalmente, se determina la gravedad específica del suelo salino a partir de los parámetros anteriormente mencionados y su salinidad según lo expresado en la Ecuación (3.3).

4.3. Preparación del Material

Para la realización de los ensayos se preparan las muestras de material a 2%, 3,5%, 7% y 12% de salinidad. Se confeccionaron:

- Proctor: 36 kg de material por cada contenido de sal, en partes de 6 kg en pailas de acero inoxidable, dada su capacidad (Figura 4.3 (a)).
- Consolidación: 1 kg de material por cada contenido de sal en moldes de silicona, con el fin de tener un mayor control sobre la salinidad real.

Es necesario procurar que la sal se incorpore a la matriz del suelo y que esté bien distribuida en la muestra, con el fin de que el colapso sea totalmente correlacionable con la salinidad y la densidad, y no se vea alterado por concentraciones irregulares. Luego, se sigue el siguiente procedimiento:

- Definir el peso de sal requerido para que un determinado peso de suelo tenga la salinidad nominal (Figura 4.3 (b)).
- Mezclar la cantidad de sal requerida con agua, de manera que formen una solución (salmuera). Es importante tener en consideración la solubilidad de la sal, con el fin de determinar el volumen de agua necesario para no tener sobresaturación.
- Mezclar la salmuera con la muestra de suelo (Figura 4.3 (c)), para posteriormente secar la mezcla al horno a 100°C hasta obtener un peso constante.

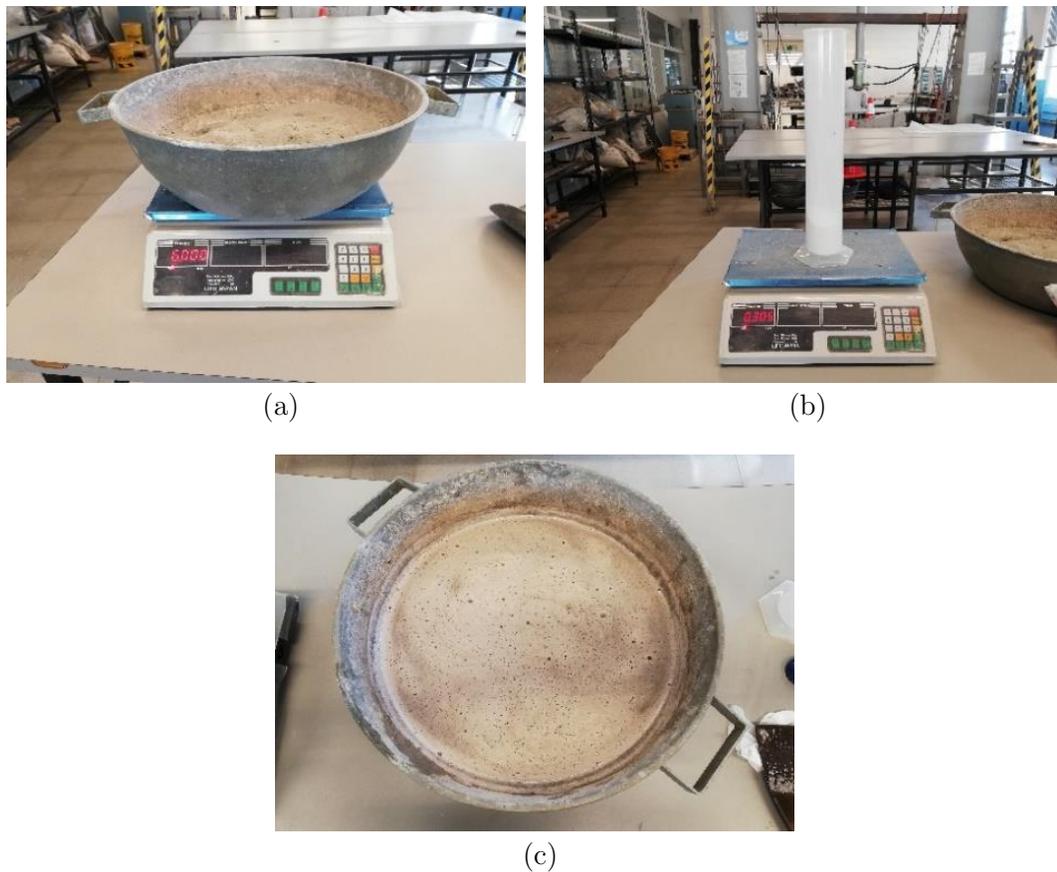


Figura 4.3. Preparación material proctor. (a) Material sin sal; (b) Sal a agregar; (c) Material mezclado con salmuera.

- Durante el secado, el material es mezclado regularmente con el fin de obtener una salinidad uniforme en la muestra (Figura 4.4).
- Finalizado este proceso, se debe realizar la medición de contenido de sales solubles para determinar la salinidad real del material.

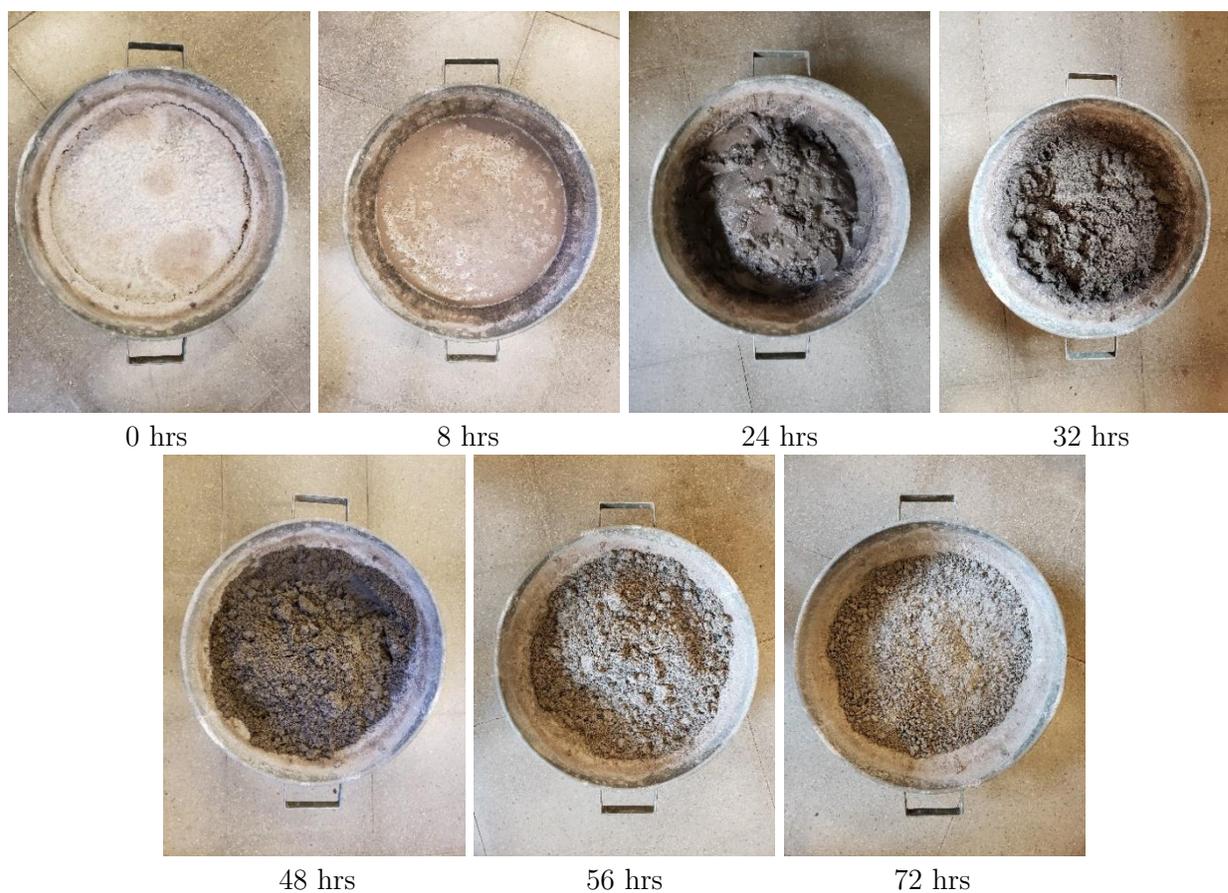


Figura 4.4. Proceso de secado y mezclado material proctor.

4.4. Proctor Modificado

Se realiza el ensayo de compactación Proctor modificado, con el fin de determinar las curvas de compactación del material base y de los materiales con distintos contenidos de sales solubles, y así, determinar su respectiva humedad óptima y densidad máxima. A partir de estos parámetros se especifica la humedad y densidad de las muestras a ensayar en el edómetro con infiltración.

Para su realización es necesario confeccionar 36 kg de material para cada contenido de sal, según el procedimiento detallado anteriormente. Posteriormente, se preparan 5 muestras de 6 kg con distintas humedades y se dejan reposar durante 24 horas en un ambiente cerrado. Es de suma importancia que esta última etapa se realice correctamente ya que es necesario que el agua se distribuya uniformemente, especialmente en los grumos generados por la precipitación de sal durante el secado.

El procedimiento a seguir para la realización del ensayo y el manejo de datos se encuentran detallados en la norma ASTM 1557-12. Además, al finalizar cada ensayo se toman dos muestras para la determinación de humedad real según la norma ASTM D2216 y para la determinación de salinidad real según el procedimiento descrito a continuación.

4.5. Determinación de Salinidad

Para la medición del contenido de sales solubles se utiliza el método de conductividad eléctrica (Karakouzian, M.; Pitchford, A.; Leonard, M. & Johnson, B., 1996). Para llevar a cabo el ensayo se debe seguir el procedimiento esquematizado en la Figura 4.5.

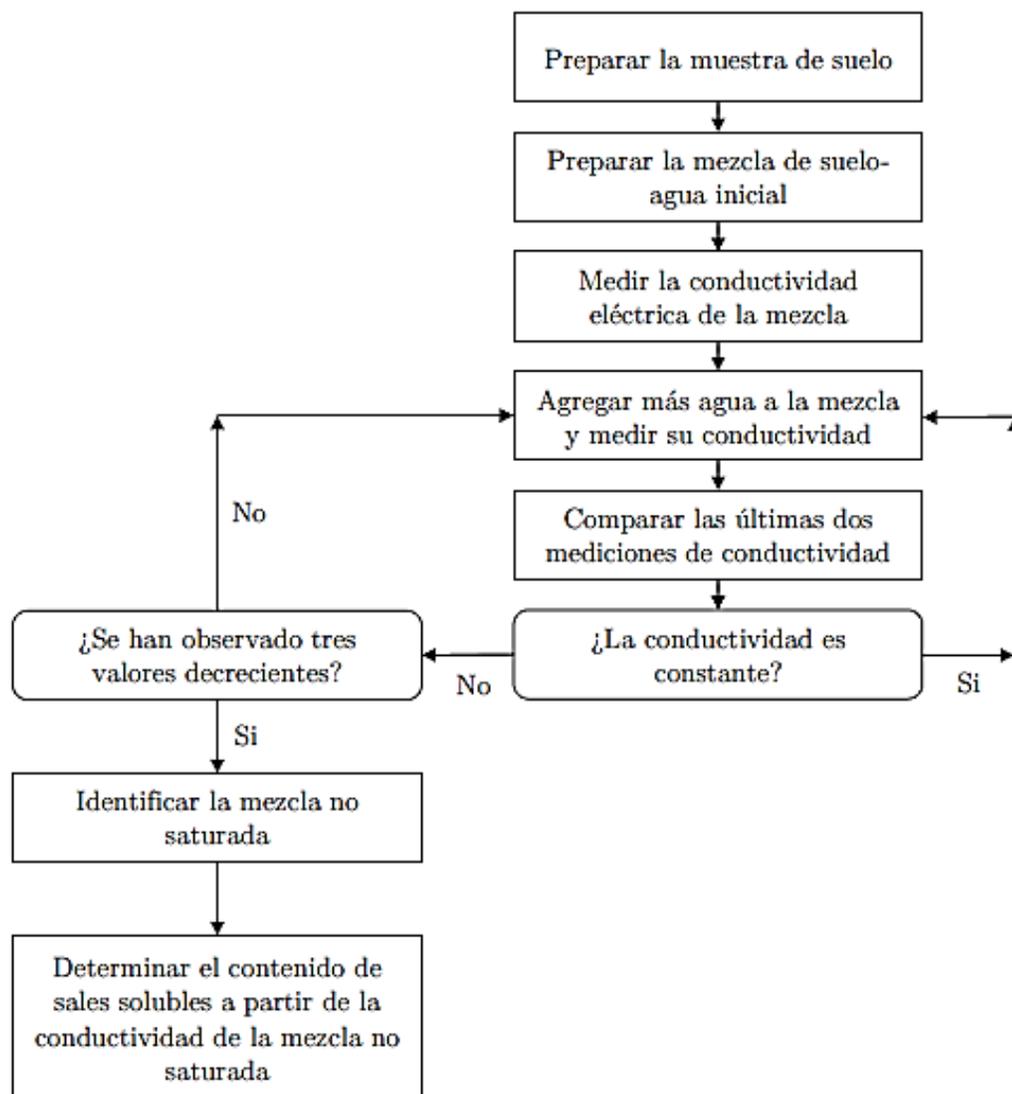


Figura 4.5. Esquema del procedimiento a seguir para la medición de salinidad mediante el método de conductividad eléctrica (Modificado de Karakouzian *et al*, 1996).

La medición de conductividad se realiza con un instrumento llamado conductímetro y los valores de las mediciones realizadas tienen la forma presentada en la Figura 4.6.

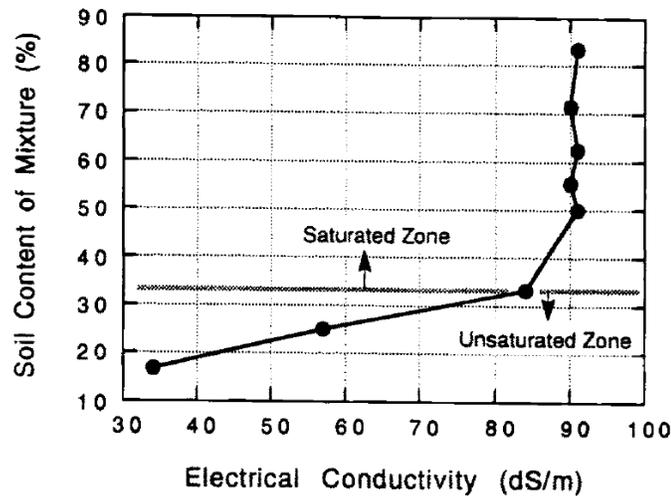


Figura 4.6. Relación entre concentración de suelo en la mezcla y conductividad eléctrica (Karakouzian *et al.*, 1996).

Finalmente, para determinar el valor de la salinidad del suelo, se utilizan los ábacos presentados por el U.S. Salinity Laboratory (1954) (Figura 4.7), en los que se relaciona la conductividad eléctrica con la concentración de sal en el agua para distintas sales solubles.

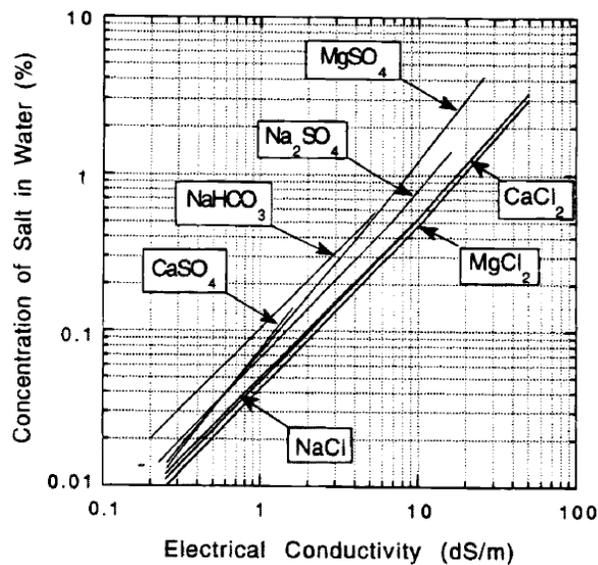


Figura 4.7. Relación entre concentración de sal y conductividad eléctrica para distintas sales solubles (Regional Salinity Laboratory (US), 1954).

El ensayo se basa en que la sal será completamente disuelta en el agua en el momento en que deja de estar sobresaturada, por lo tanto, a partir de la concentración de sal en el agua y la masa total de agua, es posible determinar la masa de sal en la muestra. Luego, la salinidad corresponde a la razón entre dicha masa de sal y la masa de la muestra seca.

4.6. Ensayo Edométrico con Infiltración

4.6.1. Montaje de Probetas

Todas las muestras ensayadas corresponden a probetas remoldeadas y sus parámetros se resumen en la Tabla 4.2, donde la densidad y humedad de confección se establecen según la curva de compactación respectiva.

Tabla 4.2. Parámetros y dimensiones probeta.

Parámetro	Unidad	Valor
Altura	cm	5
Diámetro	cm	10
Densidad Seca	t/m ³	90% $max(\gamma_{d_{corr}})$
Humedad	%	ω_{opt}

La confección se realiza mediante la compactación del material en 10 capas de igual peso y altura, utilizando el método de compactación húmeda o “wet tamping”, debido a que reproduce de buena manera las condiciones del ensayo Proctor.

Los elementos que componen el molde donde se ubica la muestra a ensayar se presentan en la Figura 4.8., y su descripción se detalla a continuación:

- a) Base: Elemento al cual se fijan el molde y el dial. Cuenta con una línea de entrada de agua y una piedra porosa que distribuye la infiltración, debido a que corresponde originalmente a una base del ensayo de permeabilidad.
- b) O-ring: Consiste en un anillo de goma que se posiciona entre la base y el molde, y tiene como objetivo evitar la pérdida de agua.
- c) Molde: Contiene a la muestra ensayada, restringiendo su deformación radial mientras permite la deformación vertical. Corresponde a un molde de Proctor estándar acondicionado para este ensayo, que presenta una línea de salida del agua infiltrada.
- d) Acrílico: Placa perforada que se posiciona sobre la muestra, y tiene como objetivo permitir la salida de agua mientras distribuye uniformemente la carga vertical.
- e) Geotextil: Material permeable y flexible ubicado sobre y bajo la muestra, que evita la pérdida de material fino durante la infiltración. Se utiliza geotextil no tejido de 130 gr/m² y 1,1 mm de espesor.
- f) Rótula: Elemento mediante el cual se trasmite la carga desde el marco, que cuenta con una base adaptada. Además, se agrega una placa de acrílico que brinda una sobrealtura para que el marco de carga no entre en contacto con la pared del molde.

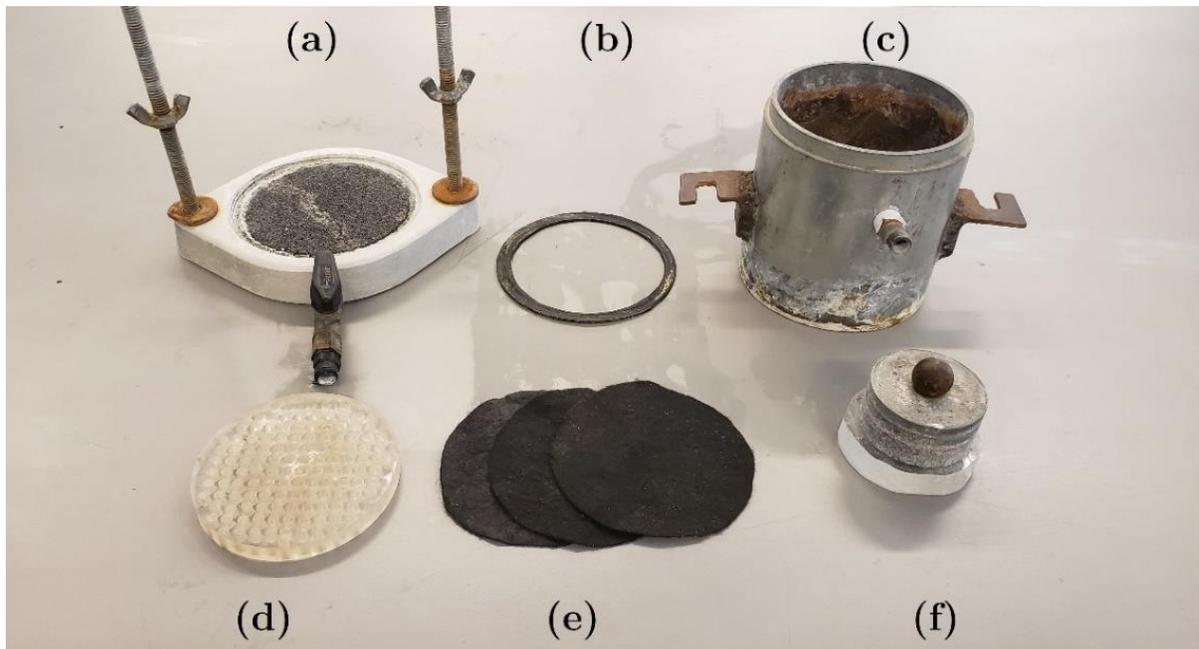


Figura 4.8. Elementos molde edómetro.

Previo al montaje, se prepara la muestra confeccionada según el procedimiento descrito anteriormente, agregando la humedad de confección. Este contenido de agua es nominal, por lo tanto, se toma una muestra a partir de la cual se determina la humedad real (ω_{med}) según el procedimiento descrito en la norma ASTM D2216.

Teniendo la humedad real del material y el peso unitario seco con sal de confección, se determina el peso unitario total de confección a partir de la Ecuación (3.12), y calcula el peso de la muestra a ensayar.

En la Figura 4.9 se muestra la secuencia del montaje de la muestra a ensayar, donde cada paso registrado consiste en:

- a) Fijar el molde a la base.
- b) Ubicar dos geotextiles sobre la piedra porosa.
- c) Compactar el material en 10 capas de igual peso y altura.
- d) Ubicar dos geotextiles sobre la muestra, y verificar su horizontalidad con el fin de asegurar una distribución de carga vertical uniforme.
- e) Ubicar las placas de acrílico, la rótula y su base sobre la probeta.
- f) Montar la probeta en el marco de carga, procurando que la rótula se encuentre sobre el centro de la muestra y, finalmente, fijar el dial en el molde.

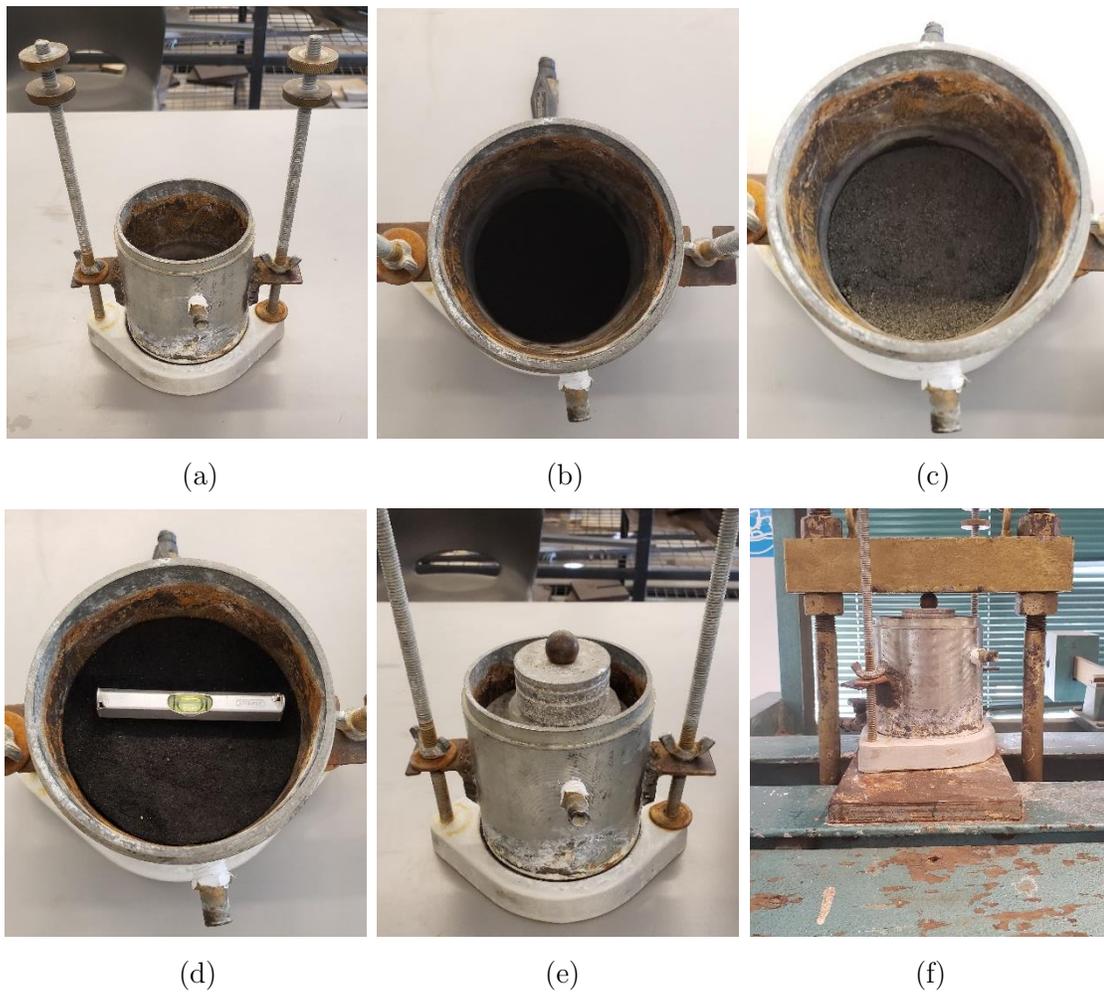


Figura 4.9. Montaje probeta ensayo edométrico.

4.6.2. Edómetro de Pared Rígida

Las probetas descritas anteriormente son ensayadas en un consolidómetro de pared rígida (ASTM D2435), con el fin de estudiar su comportamiento ante la infiltración de agua, variando los parámetros de salinidad de la muestra y del solvente.

Se realiza el ensayo de consolidación para:

- Material base (0% de Salinidad) en estado saturado.
- Cuatro muestras con distinta salinidad en estado inicial parcialmente saturado, con infiltración de agua destilada.
- Cuatro muestras con distinta salinidad en estado inicial parcialmente saturado, con infiltración de agua con 15% de contenido de sal.

Un esquema simplificado del montaje experimental se presenta en la Figura 4.10, donde se ilustra que el ensayo consiste principalmente en la carga vertical de la muestra, el ingreso de agua por su base, y la medición de deformaciones verticales.

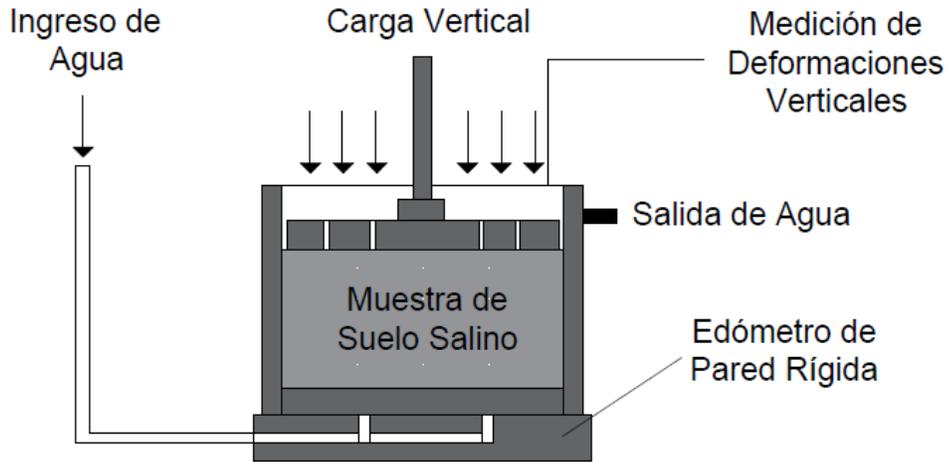


Figura 4.10. Esquema del ensayo de consolidación edométrica con infiltración.

El desarrollo del ensayo consta de 4 etapas, como se ilustra en la Figura 4.11, que consisten en:

- Tramo A-B: Carga vertical de la muestra en estado parcialmente saturado, hasta una tensión de saturación de 2 [kgf/cm²].
- Tramo B-C: Infiltración de agua durante 7 días a carga vertical constante.
- Tramo C-D: Carga vertical de la muestra en estado saturado hasta alcanzar una tensión de 16 [kgf/cm²].
- Tramo D-E: Descarga.

Una vez finalizada la última etapa del ensayo, se desmonta la probeta y se determina su contenido de sales solubles para estudiar su disminución o aumento de salinidad.

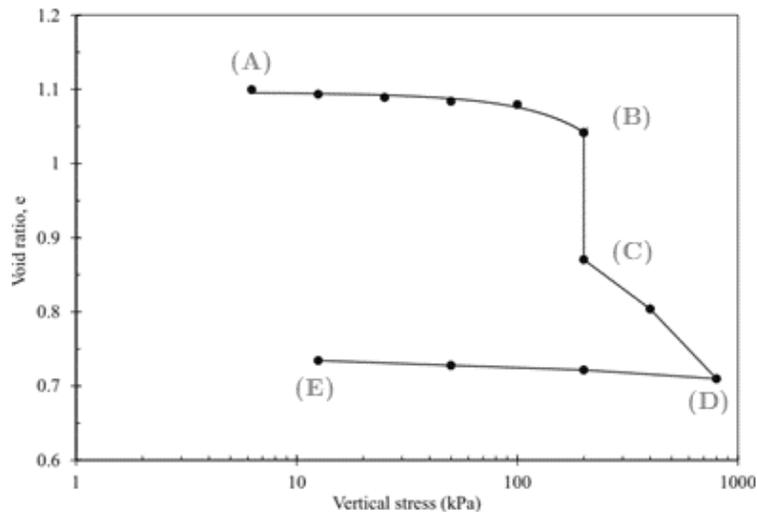


Figura 4.11. Curva representativa tensión vertical v/s deformación total (Modificado de Thyagaraj, Bhavani, Das, & Julina, 2016).

4.6.3. Sistema de Rebalse de Agua

La magnitud de la deformación generada por la disolución de sales solubles es altamente dependiente de las condiciones del solvente y la manera en la que se genera la infiltración.

Como se menciona anteriormente, el agua con menor contenido de sal produce una mayor disolución, por lo que se busca generar un sistema que asegure el recambio de ésta. Por otro lado, también se tiene que el flujo de agua a través de la muestra produce una mayor disolución que sólo la presencia de agua estancada.

A partir de esto, se implementa un sistema de rebalse de agua (Figura 4.12), que cumple con mantener una carga hidráulica constante durante la etapa de infiltración del ensayo edométrico, asegurando el flujo de solvente a través del material.



Figura 4.12. Sistema de rebalse de agua.

Como es posible observar de mejor manera en la Figura 4.13, el mecanismo consta de:

- Una línea de llenado que se conecta a una bomba de inmersión (Figura 4.14), la cual alimenta el sistema. Esta entrada tiene una tapa en su extremo, y el agua pasa por agujeros perforados radialmente para generar menor turbulencia
- Un vaso interior en el que se genera el rebalse, manteniendo una carga hidráulica constante.
- Una placa perforada de acrílico (similar a la mostrada en la Figura 4.8) que también tiene como objetivo disminuir la turbulencia del flujo.
- Una línea de salida que conecta el sistema con la base de la muestra.
- Un vaso externo de rebalse que capta el agua que rebalsa del vaso interno.
- Una línea de rebalse que devuelve el agua a la bomba, de manera que haya una recirculación del agua que no ingresa a la muestra.

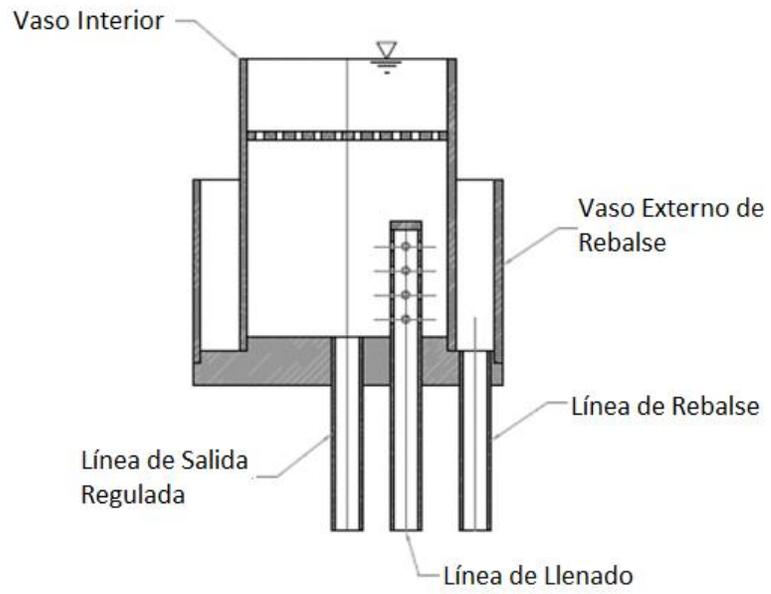


Figura 4.13. Esquema sistema de rebalse de agua.



Figura 4.14. Bomba de inmersión y líneas de llenado y rebalse.

4.6.4. Determinación de Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica del material se mide mediante el muestreo del agua percolada durante la infiltración de la probeta como se indica en la Figura 4.15, donde se recolecta una muestra en un vaso precipitado durante un periodo de tiempo determinado.

En el caso del material base, la medición se realiza para las distintas tensiones verticales durante la etapa de carga del ensayo de consolidación, mientras que, para las muestras con contenido de sal, se estudia la evolución en el tiempo durante la etapa de infiltración.



Figura 4.15. Muestreo de agua percolada durante la infiltración en ensayo edométrico (Muestra con salinidad de 7%).

El valor de la conductividad hidráulica se determina a partir de las siguientes ecuaciones.

$$k = \frac{v}{i} \quad (4.1)$$

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (4.2)$$

Donde:

$k [L/T]$: Conductividad Hidráulica. $L [L]$: Altura de Muestra

$i [-]$: Gradiente Hidráulico. $\Delta H [L]$: Altura Hidráulica

$v [-]$: Velocidad de infiltración.

Todos los ensayos mantienen una carga hidráulica constante de 58,3 [cm] y la altura de muestra es corregida de acuerdo con la deformación vertical registrada. En el caso de las muestras con contenido de sal, se determina la salinidad del líquido percolado.

5. Resultados

5.1. Caracterización Geotécnica del Material Base

La Figura 5.1 muestra las curvas granulométricas obtenidas mediante el método de difracción laser, para dos muestras de relave de El Torito. En la Tabla 5.1 se presentan el contenido de limos y arcillas determinado a partir de la difracción laser, los diámetros característicos y coeficientes de uniformidad y curvatura calculados, y la plasticidad de los finos presentes en el material determinada según la norma ASTM D4318-05.

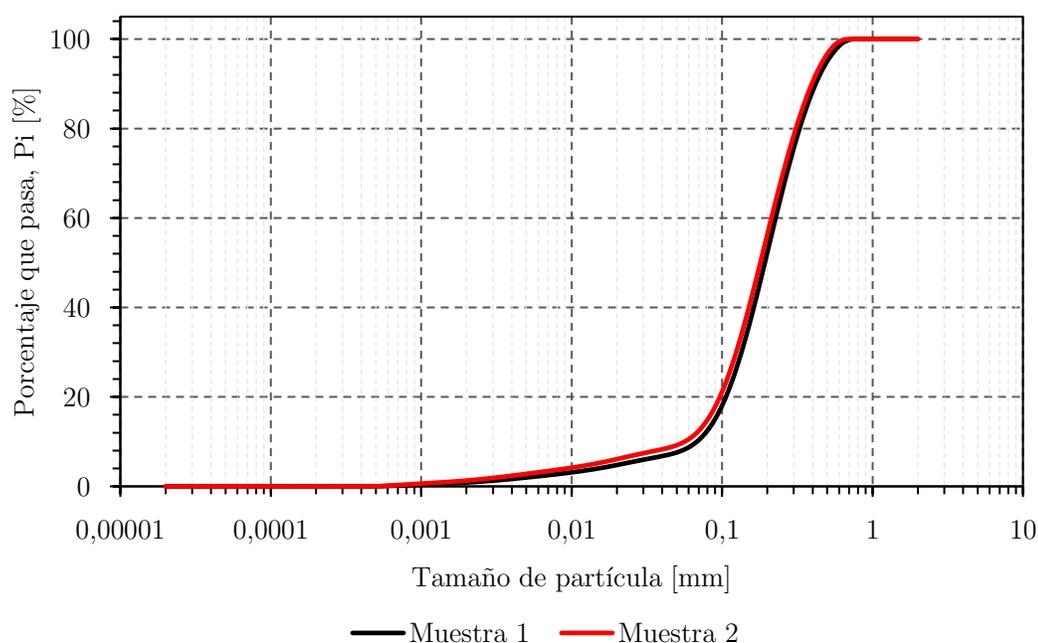


Figura 5.1. Curva granulométrica material base.

Tabla 5.1. Resultados granulometría laser y plasticidad para arena de relave de El Torito.

Parámetro	Unidades	Muestra 1	Muestra 2
Arcilla	%	0,9	1,3
Limo	%	11,6	12,3
Finos	%	12,5	13,6
d_{10}	mm	0,068	0,058
d_{30}	mm	0,134	0,124
d_{60}	mm	0,227	0,211
Cu	-	1,2	1,3
Cc	-	3,4	3,7
Plasticidad	-	NP	NP

A partir de los parámetros presentados anteriormente se realiza la clasificación USCS del material según la norma ASTM D2487-17, obteniendo que corresponde a una **“Arena mal graduada con limo” (SP-SM)**.

Adicionalmente, la Tabla 5.2 presenta los resultados obtenidos para la medición de la gravedad específica de 5 muestras de arena de El Torito.

Tabla 5.2. Determinación de gravedad específica para arena de relave de El Torito.

Datos de Confección	Unidad	M1	M2	M3	M4	M5
Picnómetro+Agua+Suelo	g	363,0	363,6	362,2	362,3	361,8
Picnómetro+Agua	g	344,2	344,8	343,3	343,5	343,0
Suelo Seco	g	30,0	30,1	30,0	30,0	30,0
Temperatura Agua	°C	29,6	28,9	34,1	31,0	30,0
Volumen Sólido	cm ³	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2
Gravedad Específica	-	2,69	2,69	2,69	2,69	2,69

Como se señala en la sección 3.3, el material a estudiar es seleccionado teniendo como referencia las curvas granulométricas de muestras de suelos salinos naturales del norte de Chile. Por otro lado, según lo descrito en la sección 3.5, el criterio también considera que el material debe representar un caso desfavorable con el fin de obtener resultados conservadores.

Con base en lo anterior, se realiza una comparación (Figura 5.2) entre las curvas granulométricas de las muestras estudiadas por Olguín (2016), Palma & Riquelme (2018), resumidas en la Tabla 5.3, y del material analizado en el presente estudio.

Tabla 5.3. Muestras estudiadas por Olguín (2016), Palma & Riquelme (2018) y Espinoza (2021).

	Muestra	Clasificación USCS	Contenido de Finos [%]
Olguín (2006)	AH 01	SM	19,1
	AH 02	SM	34,4
	Arica 01	SW	3,7
	Arica 02	SM	15,0
	Arica 03	SC	44,2
	Calama 01	CL	51,5
Palma & Riquelme (2018)	M1	SC-SM	23,3
	M2	SM	16,4
	M3	SM	14,8
	M4	SM	12,6
	M5	SM	33,7

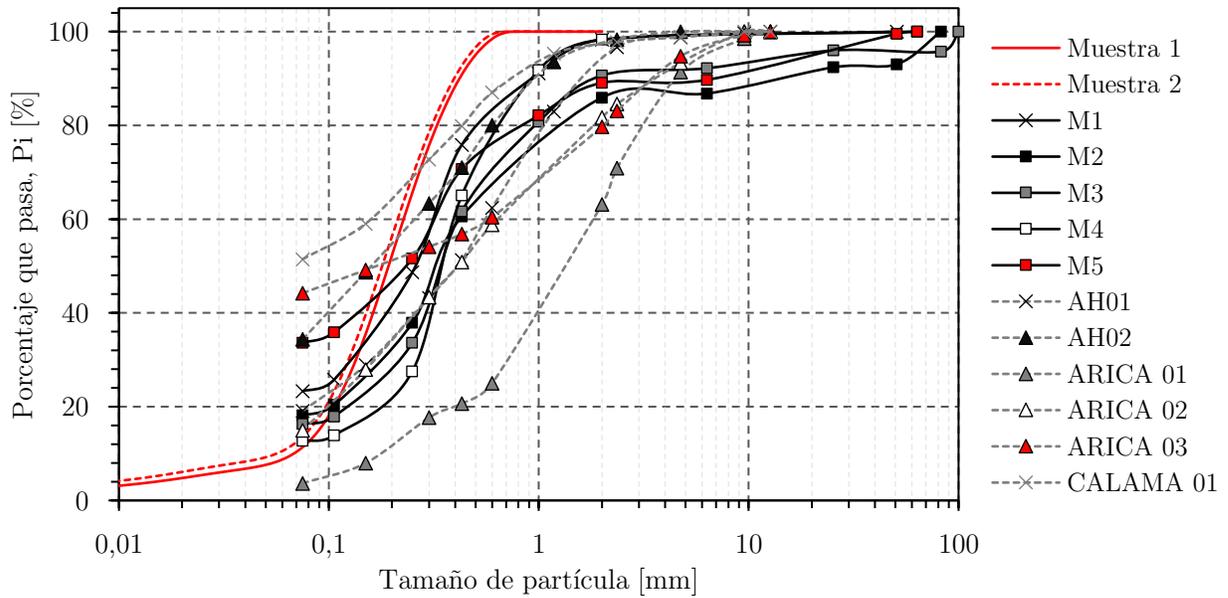


Figura 5.2. Comparación de curvas granulométricas.

Por otro lado, la Figura 5.3 presenta los resultados de Límites de Atterberg sobre muestras de suelos salinos obtenidas de prospecciones superficiales y profundas estudiadas por Sanhueza & Valenzuela (2018), a los que además se suman 324 muestras para las que no fue posible determinar los límites líquido y plástico (NP).

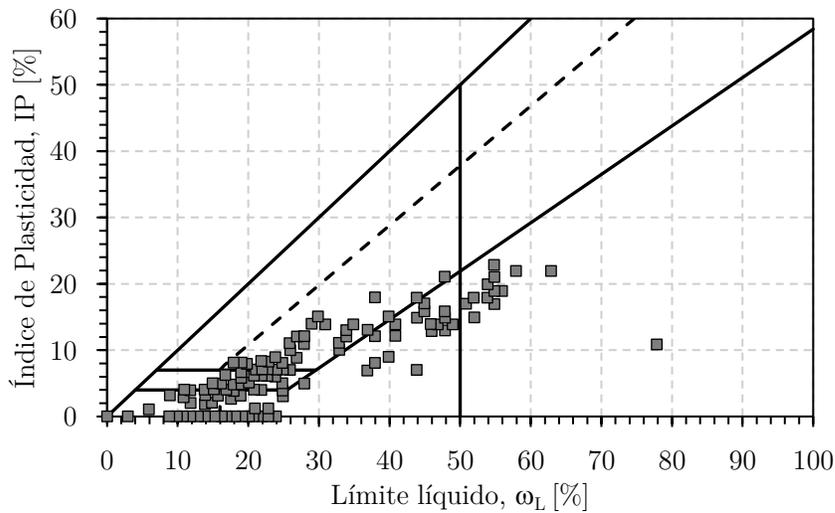


Figura 5.3. Resultados de Límites de Atterberg sobre muestras naturales de suelos salinos. (Sanhueza & Valenzuela, 2018)

De la Figura 5.2, y la Tabla 5.3 se concluye que el material ensayado en el presente estudio tiene una clasificación granulométrica similar a la mayoría de las muestras naturales ensayadas por Olgún y por Palma & Riquelme bajo 1 mm; sin embargo, presenta una peor graduación, menor tamaño máximo de partícula y menor contenido de finos en prácticamente todos los casos.

A su vez, los resultados obtenidos por Sanhueza & Valenzuela muestran una predominancia de finos de baja o nula plasticidad, siendo este último el caso de la arena de El Torito.

Según se describe en la sección 3.5., una mala graduación, bajo contenido de finos y baja plasticidad de éstos, corresponden a características desfavorables en el contexto de colapso por disolución de sales, por lo tanto, los resultados obtenidos en el presente estudio pueden ser considerados como conservadores en términos del material base utilizado.

5.2. Proctor Modificado

En la Tabla 5.4 se muestran las salinidades reales determinadas para cada muestra de material salino en función de su humedad nominal. A partir de estos resultados, se establece que cada muestra es representativa de una salinidad nominal (Tabla 5.5), con la que se confeccionará el material a estudiar en los ensayos de colapso.

Tabla 5.4. Salinidad real muestras Proctor Modificado.

Humedad Nominal [%]	Salinidad [%]				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
8	0,0	2,11	3,31	7,20	12,05
10	0,0	2,12	3,39	6,81	11,85
12	0,0	2,03	3,48	7,12	11,91
14	0,0	2,18	3,53	6,90	12,62
16	0,0	2,15	3,61	7,20	11,97
Promedio	0,0	2,12	3,46	7,05	12,08

Tabla 5.5. Salinidad representativa de cada muestra Proctor.

Muestra	Salinidad [%]
1	0,0
2	2,0
3	3,5
4	7,0
5	12,0

Los resultados de la densidad y humedad corregidas obtenidas mediante el ensayo Proctor se presentan en la Tabla 5.6. A partir estos resultados se determinan las humedades óptimas y densidad seca máxima (Tabla 5.7), y se trazan las curvas de compactación para cada contenido de sales (Figura 5.5).

Tabla 5.6. Resultados ensayo Proctor Modificado.

S=0,0%		S=2,0%		S=3,5%		S=7,0%		S=12,0%	
ω_{corr}	$\rho_{d_{corr}}$								
%	t/m ³								
8,1	1,74	9,3	1,70	10,7	1,72	10,6	1,68	12,3	1,62
10,2	1,76	11,8	1,74	13,5	1,75	13,3	1,69	15,3	1,68
11,9	1,78	13,6	1,78	15,4	1,77	16,5	1,72	17,0	1,70
12,9	1,79	15,1	1,75	16,3	1,74	19,2	1,67	19,9	1,65
14,2	1,78	16,6	1,72	18,7	1,67	20,2	1,65	22,3	1,61

Tabla 5.7. Resultados ensayo Proctor Modificado.

S	$\omega_{corr_{opt}}$	$\rho_{d_{corr_{max}}}$	$e_{corr_{min}}$	Sat
%	%	t/m ³	-	%
0	12,9	1,79	0,503	69,6
2	13,6	1,78	0,506	72,3
3,5	15,4	1,77	0,508	81,1
7	16,5	1,72	0,535	81,5
12	17,0	1,70	0,535	82,7

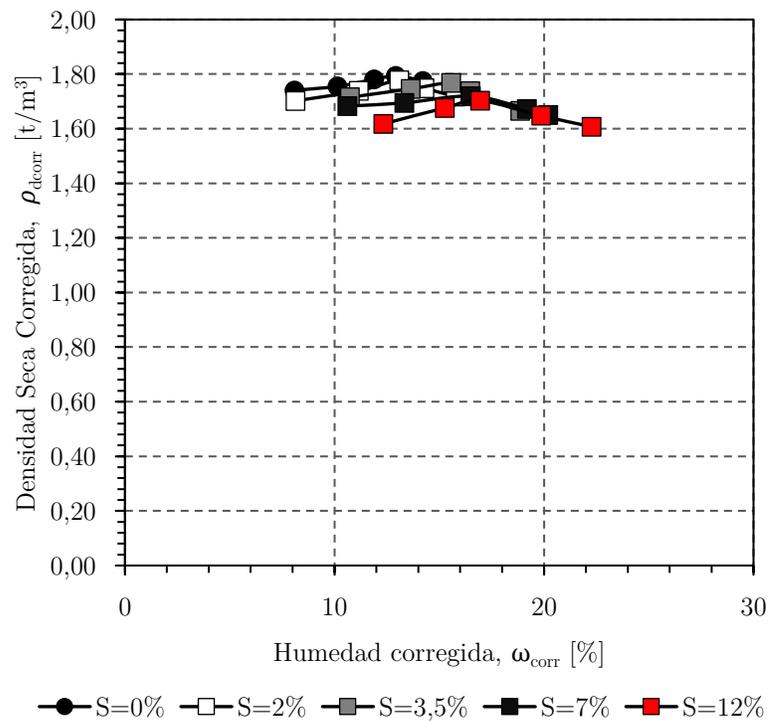


Figura 5.4. Curvas de compactación de Proctor Modificado.

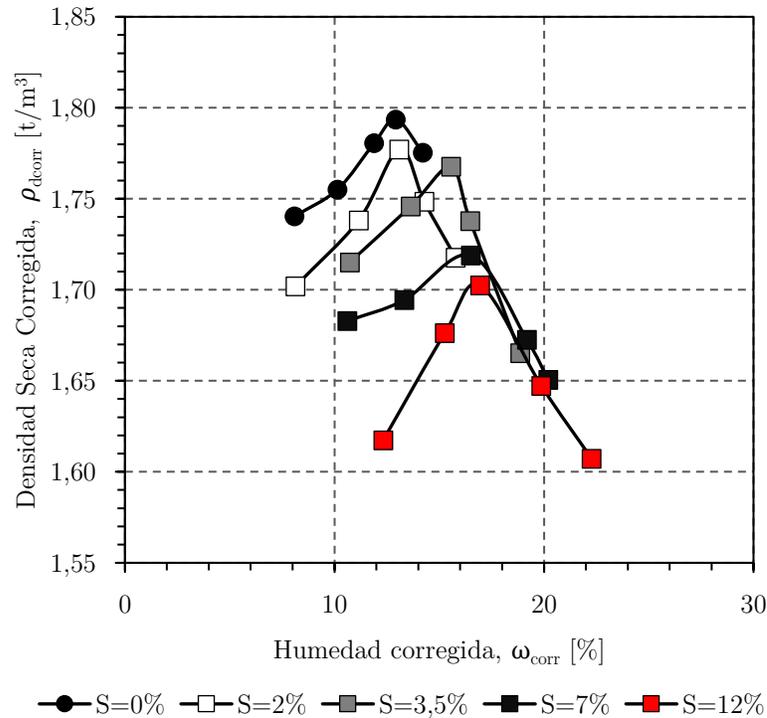


Figura 5.5. Curvas de compactación de Proctor Modificado.

De los resultados del ensayo de compactación Proctor, se obtiene que el aumento de contenido de sales solubles en el suelo tiene principalmente dos efectos, disminución de densidad seca y aumento de humedad óptima.

La disminución de densidad seca se debe al aumento de salinidad, que al sobrepasar el límite de solubilidad en el agua conlleva un aumento de sales secas en un volumen dado, que generalmente tienen una gravedad específica menor que los sólidos no solubles.

Por otro lado, el aumento de la humedad óptima se debe a un aumento de la succión total del suelo, por lo que se requiere un mayor contenido de agua para alcanzar el equilibrio (AlHattamleh, 2013). La succión tiene dos componentes independientes entre sí, la osmótica y la matricial (Fredlund & Rahardjo, 1993), ambas afectadas por la salinidad.

La succión osmótica está asociada a la presencia de sales solubles en el agua, la que produce una reducción de la presión de vapor sobre la superficie capilar de la solución (Miller & Nelson, 2006), por lo que se requiere una mayor energía (succión) para remover una molécula de agua (Meza Ochoa, 2012). La magnitud de succión osmótica aumenta con la concentración de sales en la solución hasta llegar a su sobresaturación (Figura 5.6 (a)), y está directamente relacionada con su conductividad eléctrica (Figura 5.6 (b)), por lo que también depende de la composición de las sales.

A su vez, la succión matricial depende de las fuerzas de atracción entre el agua y los cationes del suelo, de las fuerzas de tensión superficial y de las cargas externas (I.N.V. E - 157, 2013). Su magnitud incrementa con el aumento de contenido de sales debido a la interacción de ésta con los sólidos no solubles, y su efecto disminuye a medida que aumenta el contenido de humedad, debido a la disolución de la sal.

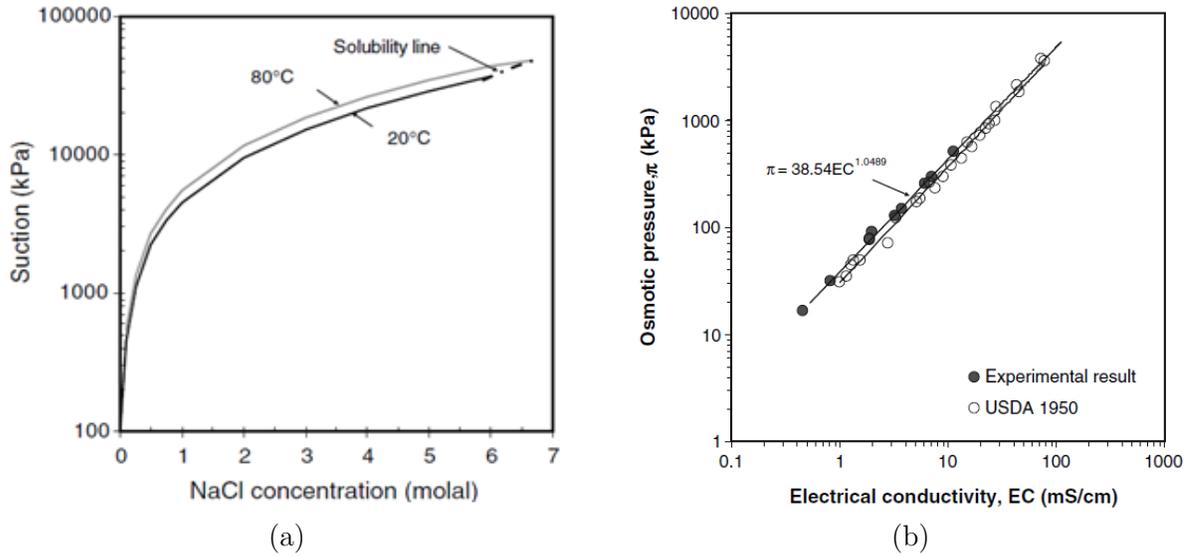


Figura 5.6. (a) Succión osmótica en función de concentración de cloruro de sodio; (b) Succión Osmótica en función de conductividad eléctrica de la solución (Arifin & Schanz, 2009).

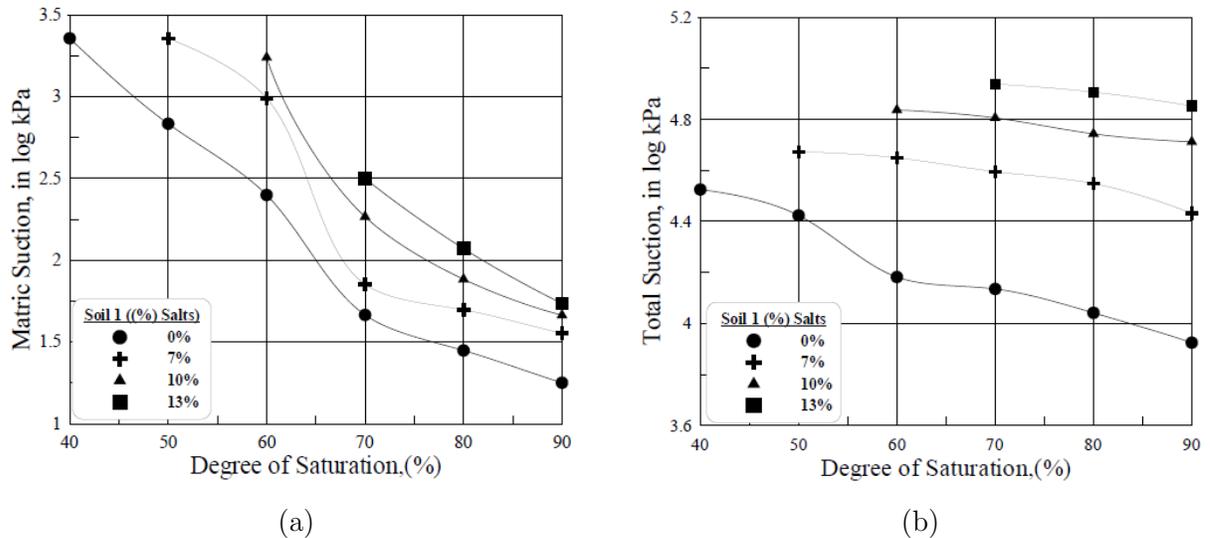


Figura 5.7. Curvas de succión para distintos contenidos de cloruro de sodio en Limo Arcilloso (a) Matricial (b) Total (Fattah, Yahya, Al-Hadidi, & Ahmed, 2013).

Como consecuencia de lo descrito anteriormente, la succión total del suelo aumenta considerablemente con un incremento en la salinidad (Figura 5.7 (b)), especialmente en los suelos donde el contenido de sal sobrepasa la sobresaturación de su contenido de agua.

5.3. Edómetro con Infiltración

5.3.1. Confección de Probetas

En la Tabla 5.8 y Tabla 5.9 se presentan las características de confección de las probetas ensayadas con infiltración de agua destilada y agua con 15% de contenido de sal, respectivamente. Además, se muestra en detalle la masa de cada uno de los componentes del material (sólidos insolubles, sales solubles y agua). El montaje del ensayo y las condiciones de las muestras siguen la metodología descrita en la sección 4.6.

Las muestras ensayadas son compactadas a un 90% de la densidad seca corregida máxima determinada a partir de las curvas de compactación de cada material con el fin de utilizar un método de control de densidad ampliamente aplicado en rellenos compactados. Se utiliza un 90% y no un 95% para obtener resultados más conservadores.

Tabla 5.8. Características de confección de probetas infiltradas con agua destilada.

Salinidad Suelo	Humedad Medida	90% $\gamma_{d_{csmax}}$	Peso Suelo	Peso Sal	Peso Agua	Peso Total	Peso Capa
%	%	gf/cm ³	gf	gf	gf	gf	gf
0	12	1,61	645,7	0,0	77,4	723,1	72,31
2	12	1,66	641,0	13,1	78,0	732,1	73,21
3,5	12	1,65	636,4	23,1	81,0	740,4	74,04
7	12	1,62	600,6	45,2	78,7	724,5	72,45
12	12	1,60	563,5	76,8	77,7	718,1	71,81

Tabla 5.9. Características de confección de probetas infiltradas con agua con 15% de salinidad.

Salinidad Suelo	Humedad Medida	90% $\gamma_{d_{csmax}}$	Peso Suelo	Peso Sal	Peso Agua	Peso Total	Peso Capa
%	%	gf/cm ³	gf	gf	gf	gf	gf
2	12	1,64	641,0	13,1	79,8	733,9	73,39
3,5	12	1,65	636,4	23,1	79,6	739,0	73,90
7	12	1,61	600,6	45,2	77,1	722,9	72,29
12	12	1,60	563,5	76,8	76,3	716,7	71,67

Tabla 5.10. Gravedad específica e índice de vacíos iniciales corregidos.

Salinidad	Gravedad Específica	Índice de vacíos corregido
%	-	-
0	2,69	0,670
2	2,68	0,673
3,5	2,67	0,676
7	2,64	0,706
12	2,61	0,706

5.3.2. Conductividad Hidráulica

Los gráficos a continuación presentan los resultados obtenidos para la evolución de la conductividad hidráulica de las muestras durante ensayos edométricos.

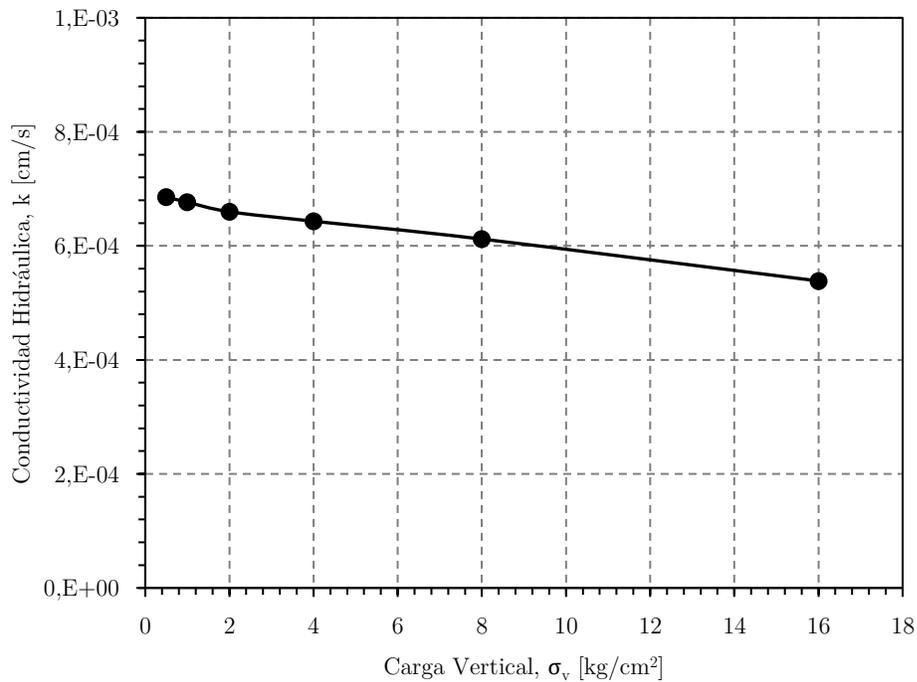


Figura 5.8. Conductividad hidráulica del material base versus carga vertical. No considera pérdida por evaporación.

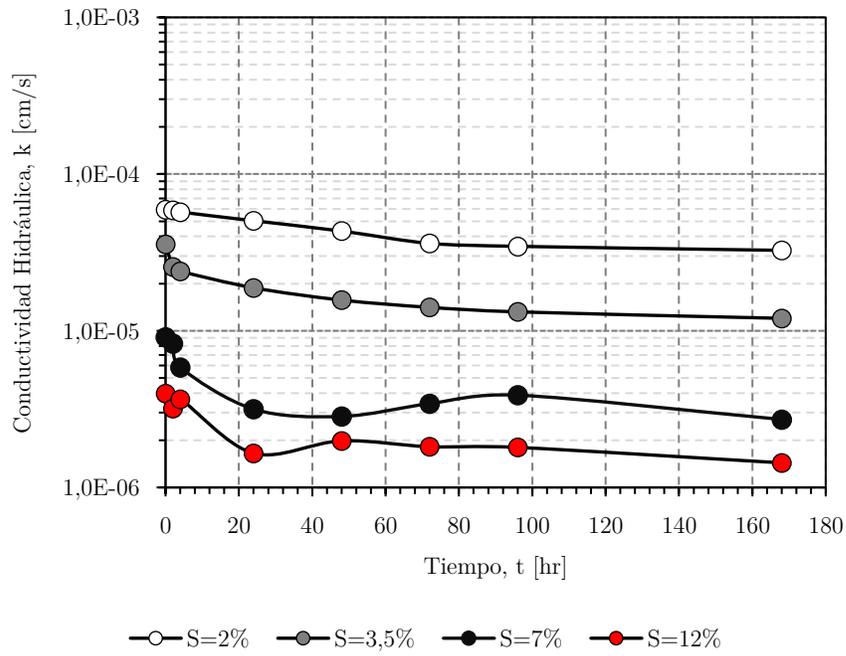


Figura 5.9. Evolución de conductividad hidráulica en el tiempo para ensayo de infiltración con agua desmineralizada y carga vertical constante de 2 kg/cm². No considera pérdida por evaporación.

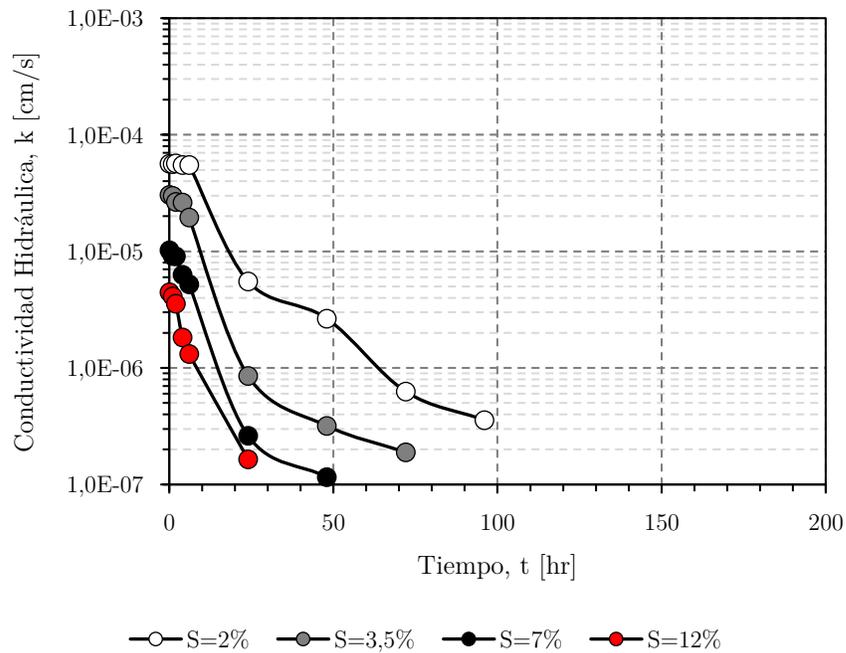


Figura 5.10. Evolución de conductividad hidráulica en el tiempo para ensayo de infiltración con agua con 15% de salinidad y carga vertical constante de 2 kg/cm². Medición interrumpida por colmatación de piedra porosa, no considera pérdida por evaporación.

Los resultados para el parámetro de conductividad hidráulica del material base presentados en la Figura 5.8 corresponden a valores estándar de una arena limosa densa (Coduto, 1999), y su evolución es consistente con la disminución de índice de vacíos generada por el aumento de tensión vertical durante el ensayo de consolidación.

En cuanto a las muestras con contenido de sal soluble, los resultados dan cuenta de una disminución de la conductividad hidráulica inicial con el aumento de salinidad, consistente con el aumento de succión total, tanto para los ensayos con infiltración de agua desmineralizada (Figura 5.9) como para infiltración con salmuera (Figura 5.10).

Con respecto a la evolución en el tiempo, en el caso de las muestras infiltradas con agua desmineralizada, la disminución de la conductividad hidráulica en las muestras de menor salinidad es consistente con la densificación de las probetas. Mientras que las muestras de mayor salinidad son más propensas a la depositación de sal en su base y piedra porosa, junto con que las muestras de percolación se ven mayormente afectadas por la evaporación, debido al largo tiempo necesario para su recolección.

En el caso de las muestras infiltradas con salmuera, se produce una impermeabilización en todos los ensayos pasadas las 100 horas, debido a que la depositación de sal en la base de la muestra y en la piedra porosa impide la infiltración de agua. Para esta condición también se debe tomar en cuenta la pérdida de las muestras de percolación por evaporación.

En ninguno de los ensayos realizados se generó una colmatación del geotextil ubicado en la base de la probeta que afectara la medición de permeabilidad.

5.3.3. Salinidad

La Tabla 5.11 presenta la salinidad previa y posterior a la infiltración de cada probeta ensayada, y los gráficos a continuación presentan la concentración de sal en el líquido percolado durante la etapa de infiltración de los ensayos edométricos.

Tabla 5.11. Salinidad inicial y final de muestras ensayadas.

Sw	S _i	S _f
%	%	%
0	2,0%	0,00%
	3,5%	0,00%
	7,0%	1,04%
	12,0%	2,63%
15	2,0%	11,23%
	3,5%	12,45%
	7,0%	15,95%
	12,0%	20,43%

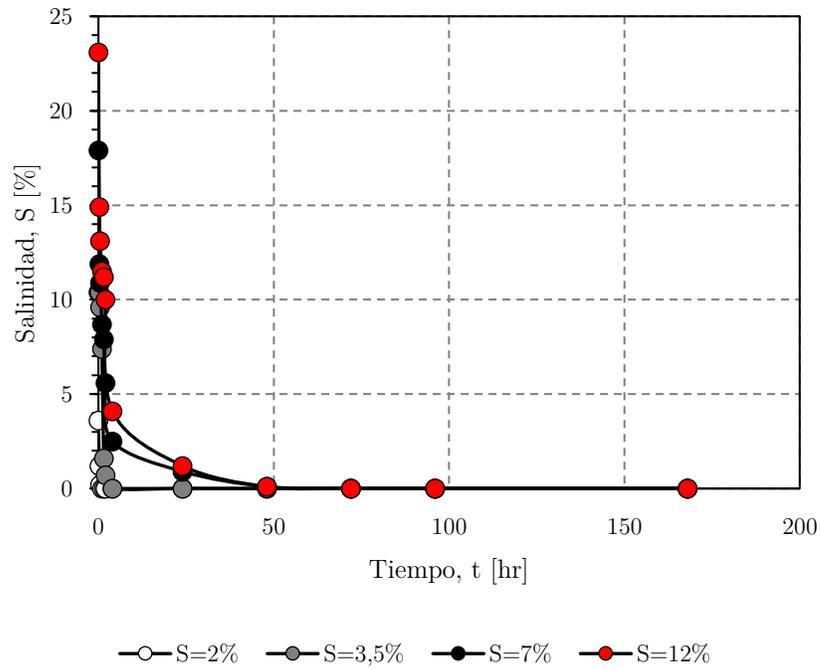


Figura 5.11. Evolución de salinidad en líquido percolado, infiltración con agua desmineralizada.

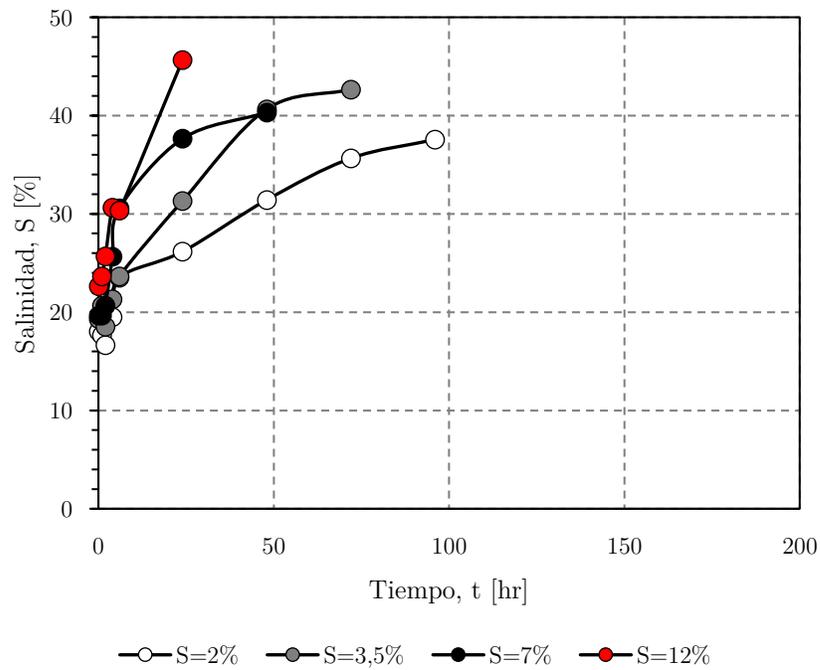


Figura 5.12. Evolución de salinidad en líquido percolado, infiltración con agua con 15% de sal. Medición interrumpida por colmatación de piedra porosa.

Los resultados obtenidos a partir de la medición del contenido de sales solubles en el líquido percolado para muestras infiltradas con agua desmineralizada presentados en la Figura 5.11, dan cuenta de una disolución prácticamente completa de las muestras con salinidad de 2% y 3,5% en las primeras 24 horas y en las primeras 48 horas en las muestras de 7% y 12%.

Por el contrario, los resultados obtenidos para las muestras percoladas con salmuera presentados en la Figura 5.12 muestran una disolución que se produce de forma más lenta que en el caso anterior y una medición de salinidad que se ve fuertemente afectada por la evaporación de las muestras, dada la baja permeabilidad de las probetas. Al igual que para la conductividad hidráulica, no es posible continuar la medición de salinidad pasadas las 100 horas debido a la depositación de sal en la base de la muestra.

Con respecto a la salinidad final de las probetas ensayadas (Tabla 5.11), se produce la disolución total en las muestras de menor salinidad infiltradas con agua desmineralizada, mientras que en las muestras de mayor salinidad existe un remanente atribuible a depositación de sal en la base de la probeta o a sal cristalizada en sus bordes que no logran ser disueltas. Por otra parte, en el caso de las muestras infiltradas con salmuera la depositación de la sal infiltrada genera un importante aumento en la salinidad de la muestra en los 4 ensayos, la que principalmente se concentra en la cara superior de la probeta, donde se produce la cristalización por evaporación.

5.3.4. Deformación Vertical vs Tensión Vertical

Se presentan los resultados obtenidos para el material base ($S=0\%$), posteriormente una comparación del comportamiento ante la infiltración de solvente sin sal ($S_w=0\%$) y con 15% de sal ($S_w=15\%$) para cada salinidad (S), y finalmente, se entregan gráficos resumen donde se comparan todos los ensayos de colapso realizados.

- **Material Base**

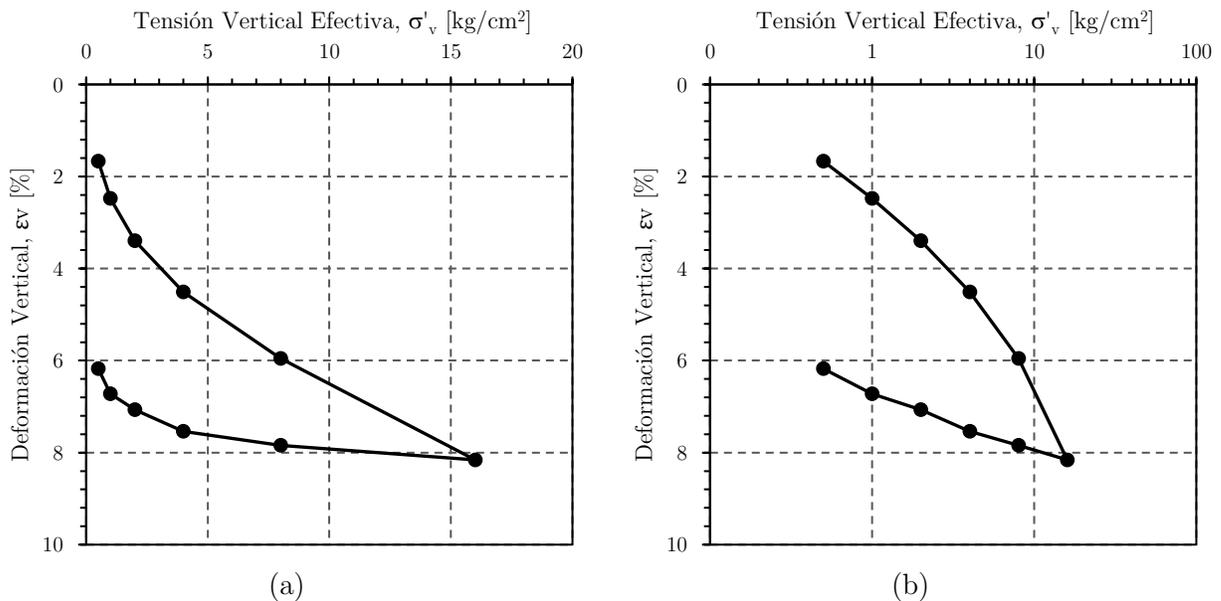


Figura 5.13. Deformación vertical vs tensión vertical para $S=0\%$, $S_w=0\%$ y muestra saturada al comienzo. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.

- **Comparación**

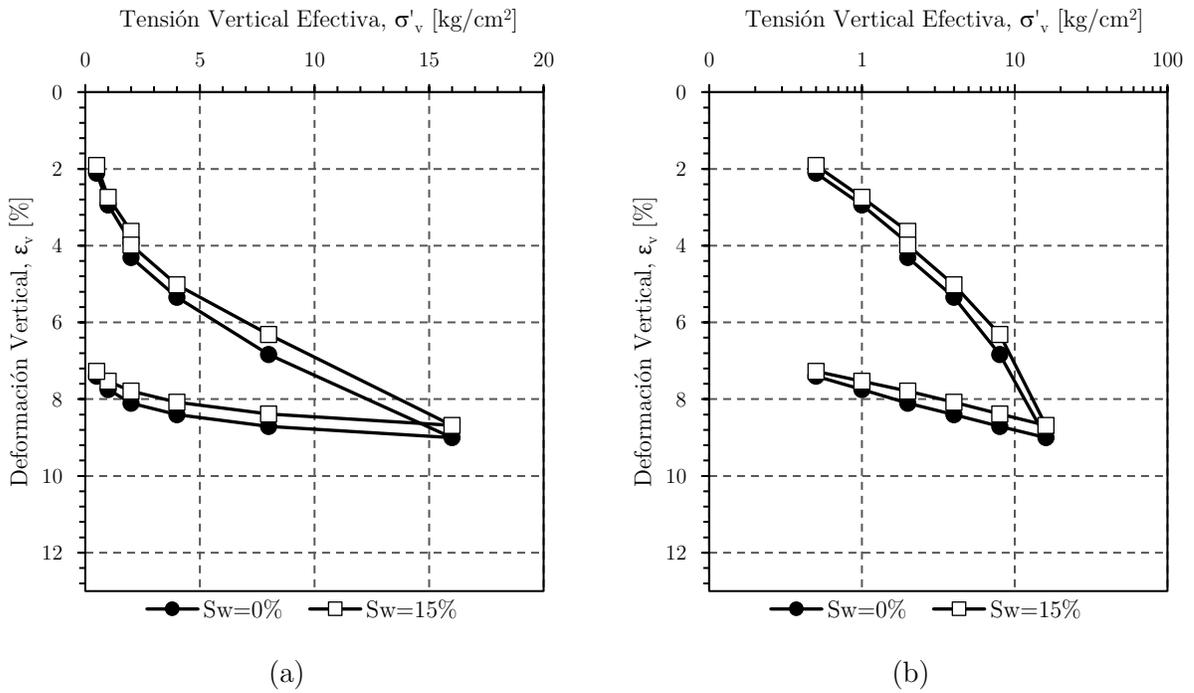


Figura 5.14. Comparación de deformación vertical vs tensión vertical para $S=2\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.

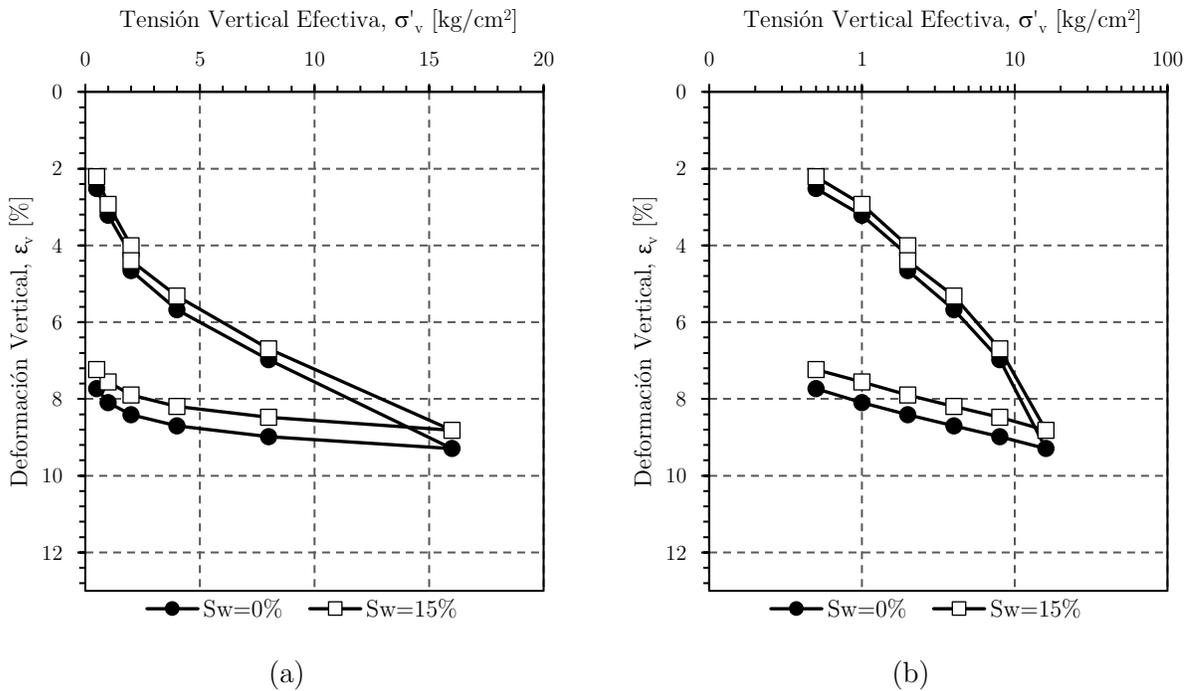
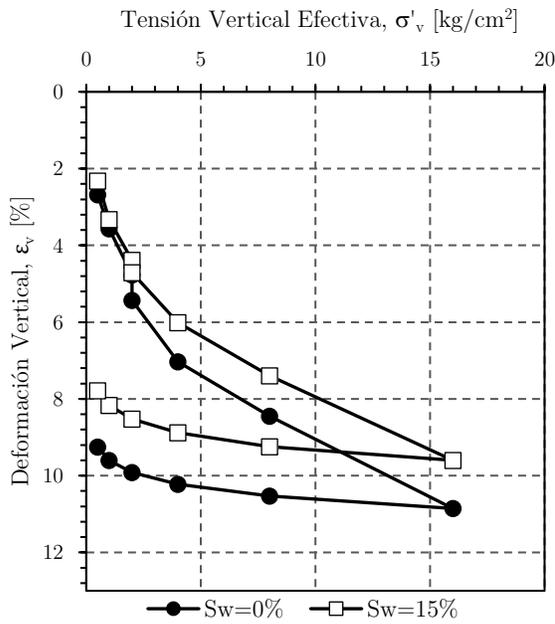
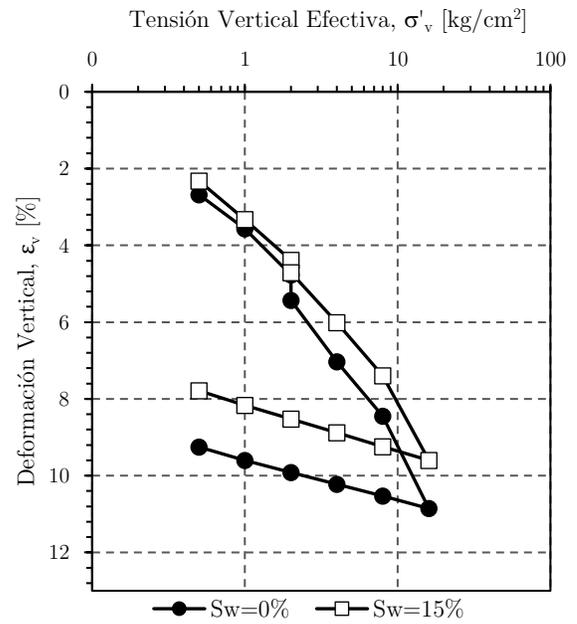


Figura 5.15. Comparación de deformación vertical vs tensión vertical para $S=3,5\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.

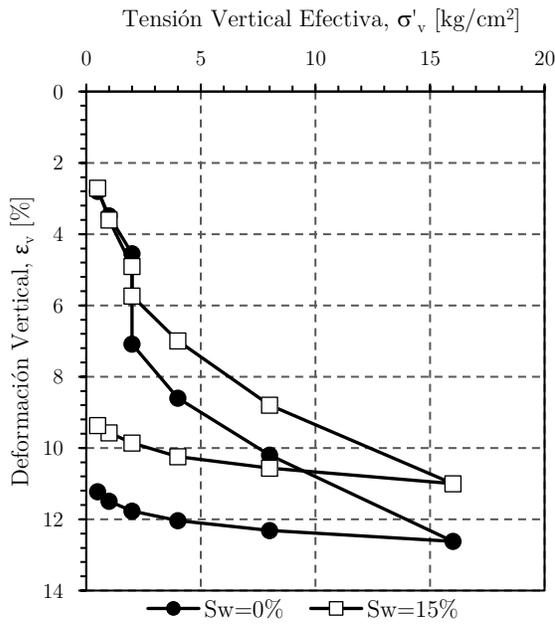


(a)

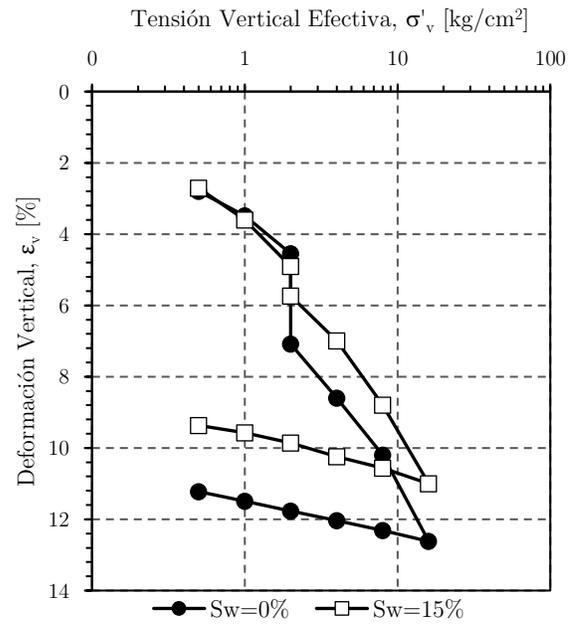


(b)

Figura 5.16. Comparación de deformación vertical vs tensión vertical para $S=7\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.



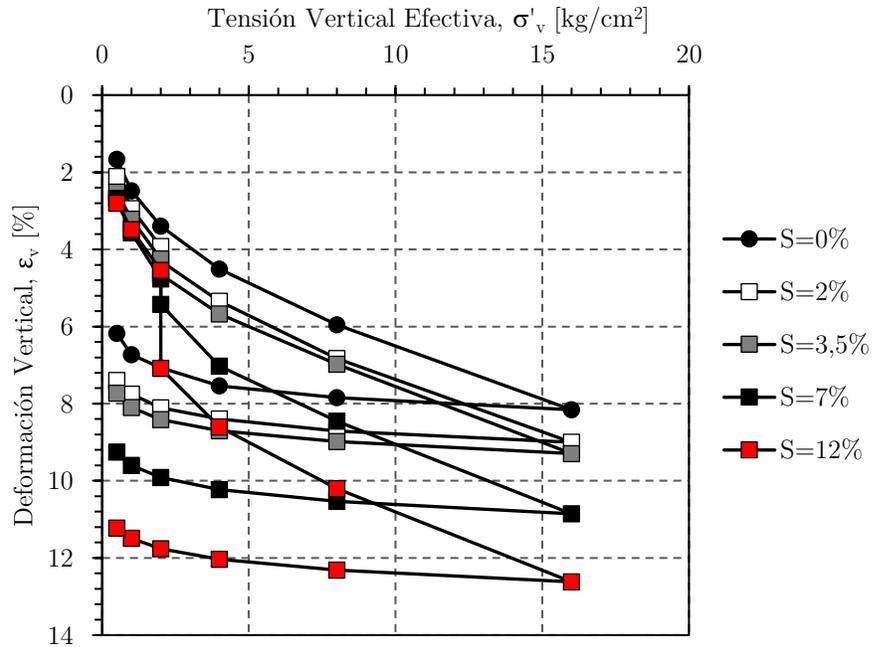
(a)



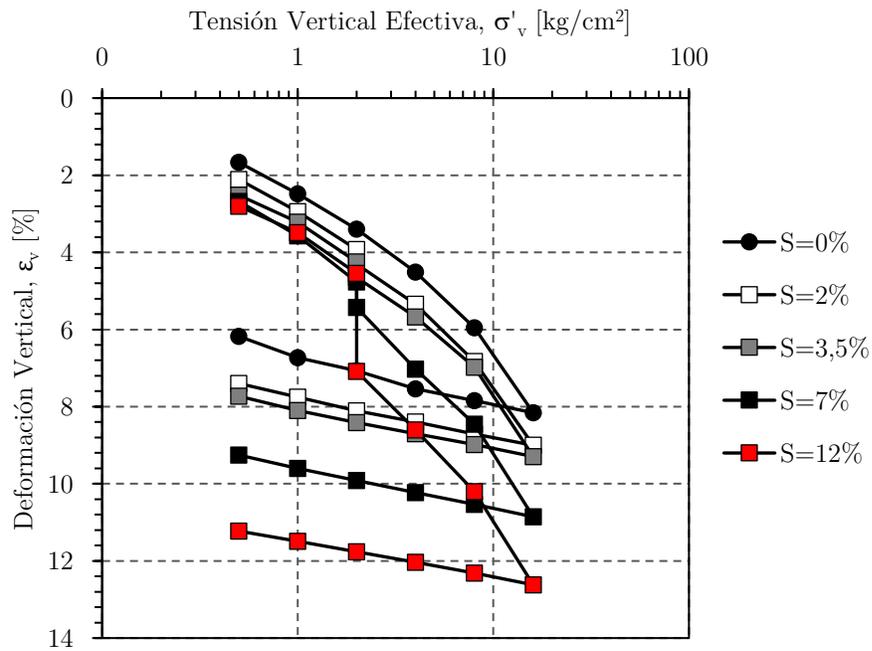
(b)

Figura 5.17. Comparación de deformación vertical vs tensión vertical para $S=12\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.

- Resumen

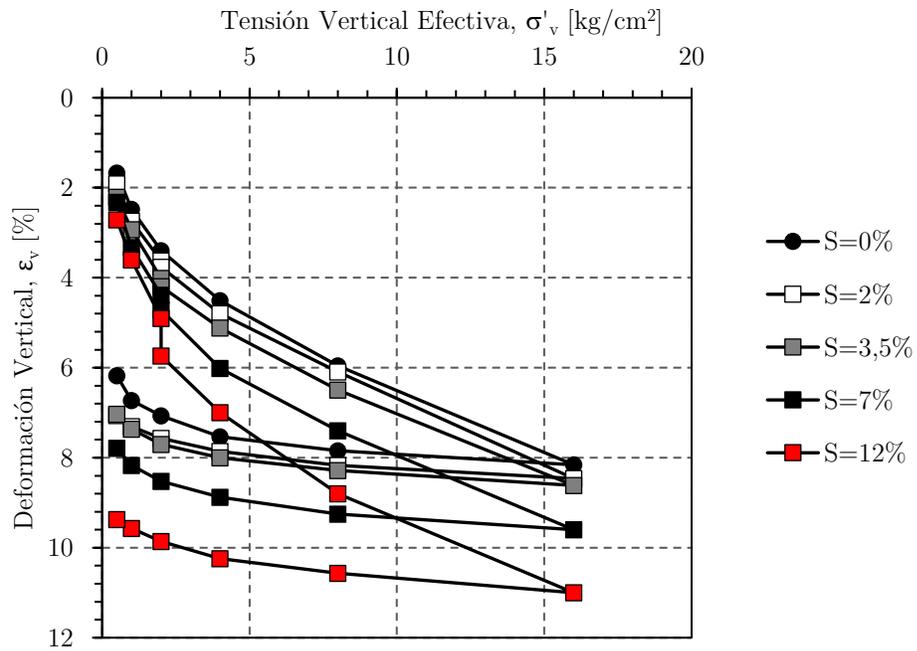


(a)

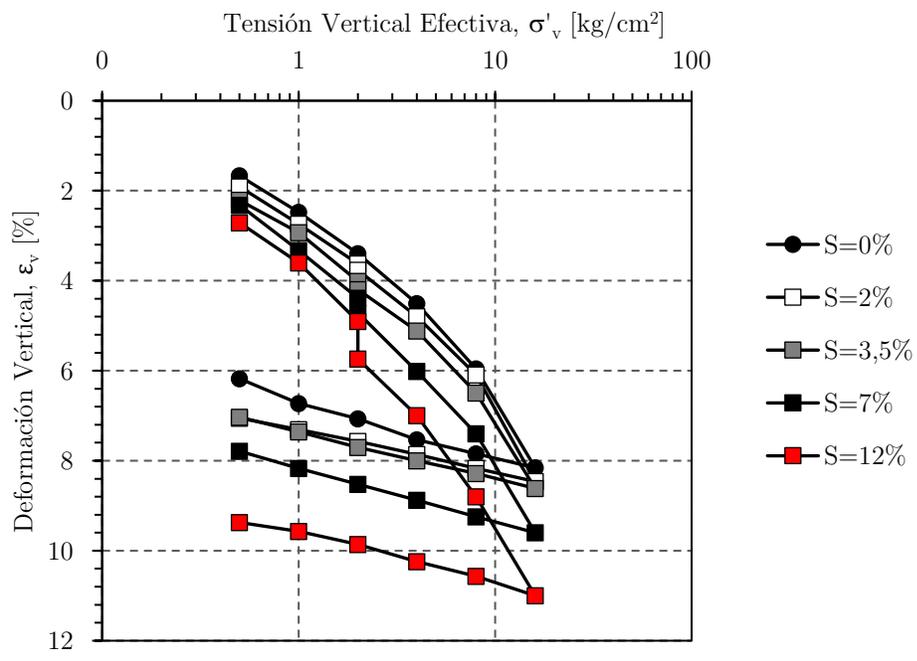


(b)

Figura 5.18. Resumen de deformación vertical vs tensión vertical para $S_w = 0\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.

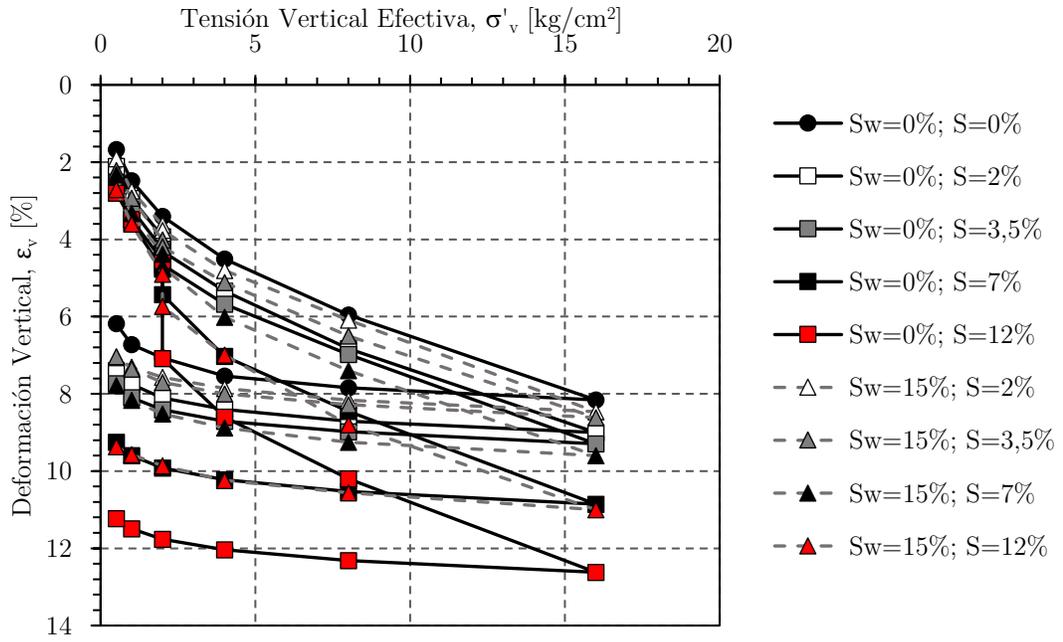


(a)

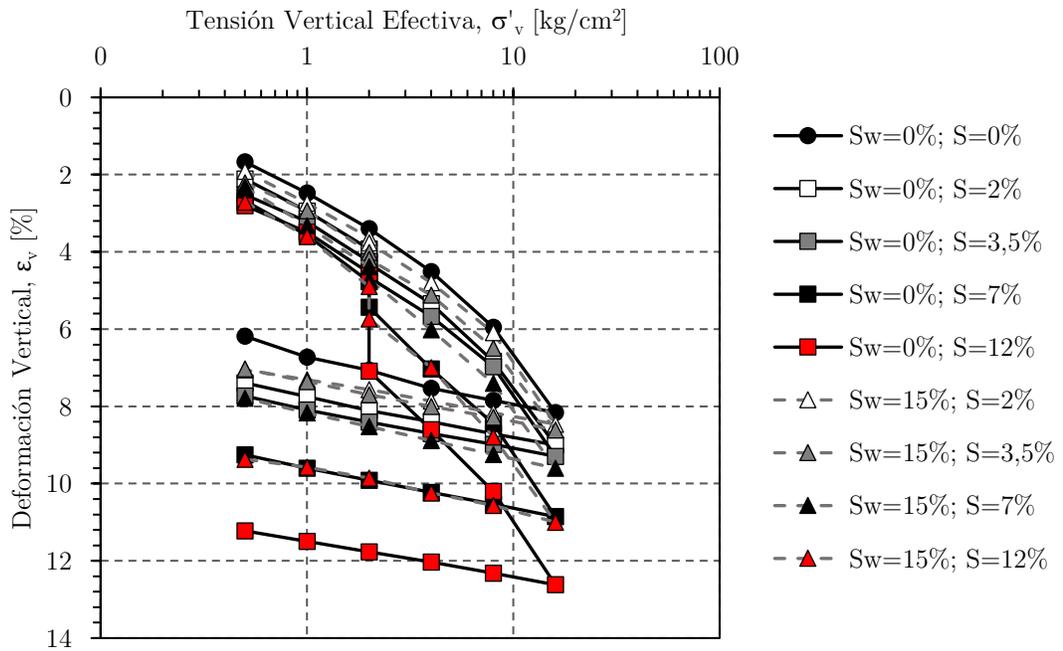


(b)

Figura 5.19. Resumen de deformación vertical vs tensión vertical para $S_w=15\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.



(a)



(b)

Figura 5.20. Resumen de deformación vertical vs tensión vertical para ambos sets. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.

Se determinan los módulos de compresibilidad volumétrica m_v y m_{vr} (Figura 5.21 (a)) con el fin de estudiar el efecto de la variación de salinidad y de la percolación de ambos solventes. Los módulos se determinan mediante la regresión lineal de los gráficos de deformación vertical vs tensión vertical efectiva para la etapa de carga previa a la infiltración (A), carga posterior a la infiltración (B) y descarga (Figura 5.21 (b)). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.12.

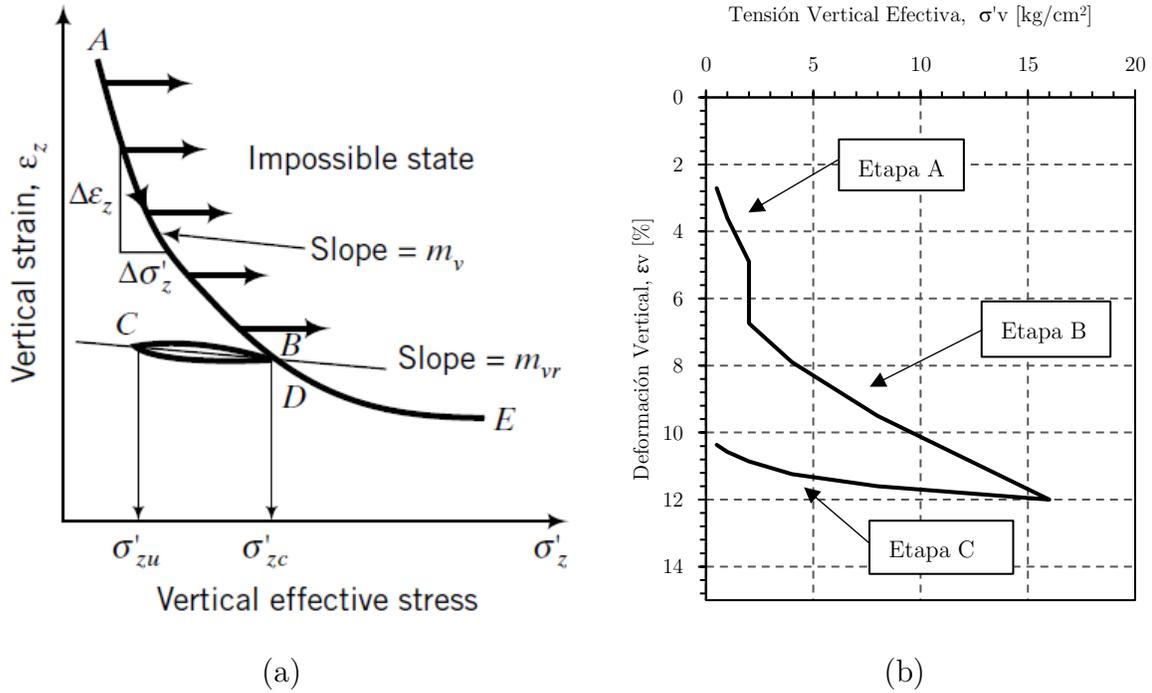


Figura 5.21. Curvas de deformación vertical vs tensión vertical efectiva edómetro (a) Módulos de compresibilidad volumétrica (Budhu, 2011). (b) Etapas de carga y descarga de ensayo edométrico con infiltración.

Tabla 5.12. Módulos de compresibilidad volumétrica ensayo edométrico con infiltración.

	m_v [cm ² /kg]				m_{vr} [cm ² /kg]	
	Etapa A		Etapa B		Etapa C	
S	Sw=0%	Sw=15%	Sw=0%	Sw=15%	Sw=0%	Sw=15%
0%	1,120	-	0,312	-	0,057	-
2%	1,118	1,132	0,308	0,304	0,061	0,062
3,5%	1,142	1,127	0,322	0,315	0,059	0,061
7%	1,212	1,197	0,378	0,331	0,068	0,063
12%	1,225	1,237	0,396	0,342	0,064	0,062

Los resultados obtenidos mediante el ensayo edométrico con infiltración para la deformación vertical generada por la disolución de sales solubles son consistentes con lo esperado, obteniéndose mayores deformaciones con el aumento de salinidad tanto para infiltraciones con agua desmineralizada como con salmuera, como se muestra en la Figura 5.18 y Figura 5.19. Esto tiene como consecuencia directa el aumento de índice de colapso con el aumento de contenido de sales solubles del suelo.

La principal diferencia en los resultados obtenidos para ambos sets de ensayos consiste en una menor deformación generada por la infiltración de salmuera en comparación a la infiltración con agua sin sal, especialmente en las muestras de mayor salinidad, lo que conlleva a menores índices de colapso. Es importante destacar que en todas las muestras ensayadas se obtuvieron potenciales de colapso leves (menores a 2), con excepción de la muestra de $S=12\%$ infiltrada con agua desmineralizada, donde se generó un colapso de sólo 2,54. Esto es atribuible al alto grado de compactación con el que se confeccionaron las muestras, y a la metodología que aseguró una distribución uniforme de las sales.

Las curvas de tensión – deformación para cada contenido de sales solubles (Figura 5.14 a Figura 5.17) y los respectivos módulos de compresibilidad calculados (Tabla 5.12) dan cuenta de un comportamiento similar en la etapa inicial del ensayo para las dos muestras ensayadas por cada salinidad. En el caso de las muestras con mayor salinidad (7% y 12%) los resultados dan cuenta de una mayor compresibilidad que las muestras con menor salinidad (2% y 3,5%) como consecuencia del mayor índice de vacíos inicial para cada ensayo (Tabla 5.10).

Las muestras con contenidos de 2% y 3,5% (Figura 5.14 y Figura 5.15) continúan teniendo una compresibilidad similar posterior a la percolación debido a que, como se menciona anteriormente, se presume que las sales solubles presentes inicialmente en el suelo son completamente disueltas durante la etapa de infiltración en ambos casos, finalizando con estructuras relativamente similares entre ellas. De estos resultados es posible inferir también que el contenido de sales medido al finalizar el ensayo se encontraba incorporado en la salmuera inmediatamente después de la infiltración, y que fue depositado en etapas posteriores debido a la evaporación del solvente por la alta temperatura ambiental, no incidiendo mayormente en la compresibilidad de la probeta.

Por el contrario, las muestras con contenidos de 7% y 12% (Figura 5.16 y Figura 5.17) presentan una compresibilidad menor en la etapa posterior a la percolación en los ensayos con salmuera que en los con agua desmineralizada como consecuencia del importante aumento de índice de vacíos generado por la mayor pérdida del contenido de sal.

5.3.5. Índice de Vacíos vs Tensión Vertical

A continuación, se representan gráficamente los resultados obtenidos para la evolución del índice de vacíos corregido en función de la tensión vertical aplicada.

Al igual que en la sección anterior, se presentan los resultados obtenidos para el material base, una comparación del comportamiento ante la infiltración de solvente sin sal y con 15% de sal, y finalmente, un resumen de todos los ensayos de colapso realizados.

Este análisis se realiza debido a que el índice de vacíos refleja de mejor manera la variación de la salinidad, ya que depende de la gravedad específica equivalente y la densidad corregida. Gracias a esto, es posible evidenciar con mayor claridad el cambio en el comportamiento ante la infiltración de solvente con diferentes contenidos de sales solubles.

Para determinar el índice de vacíos, se separa el ensayo en dos condiciones. Previo a la saturación, se calcula considerando la salinidad de confección; mientras que posterior a la saturación, se considera el contenido de sal como el valor determinado post ensayo.

Luego, los índices de vacíos iniciales para ambas condiciones son determinados con gravedades específicas y densidades secas corregidas distintas, y los demás valores son calculados a partir de la deformación vertical unitaria de la muestra.

- **Material Base**

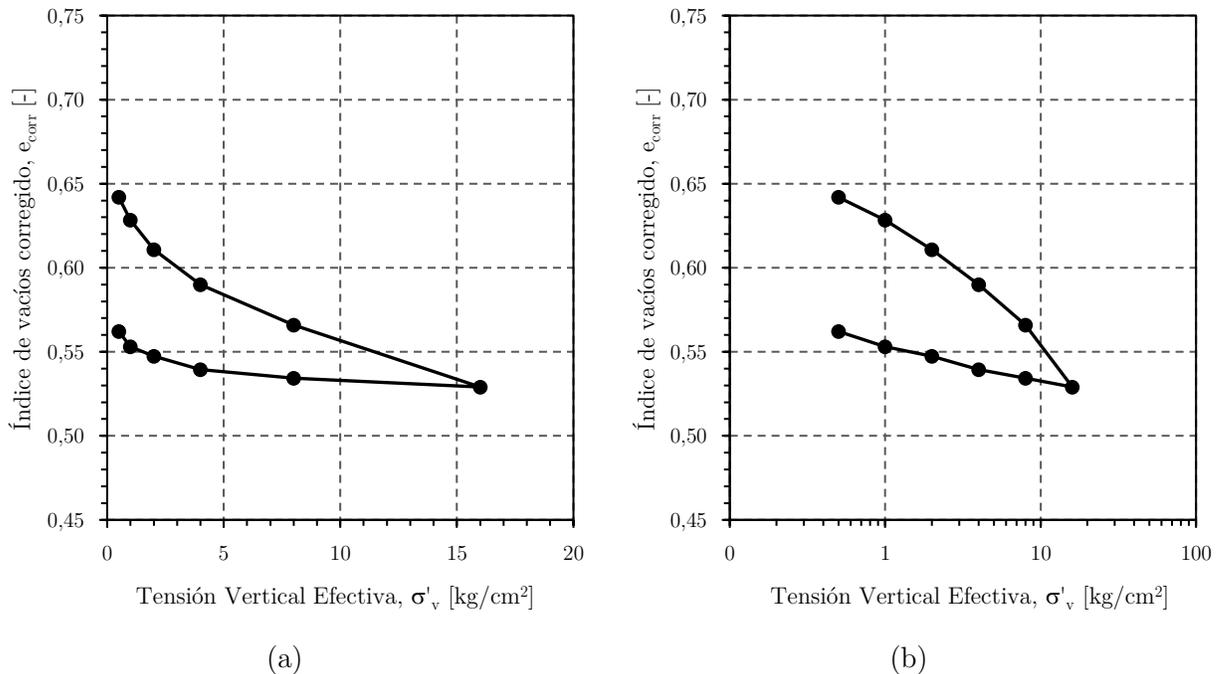


Figura 5.22. Índice de vacíos corregido vs tensión vertical para $S=0\%$ y $Sw=0\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.

• **Comparación**

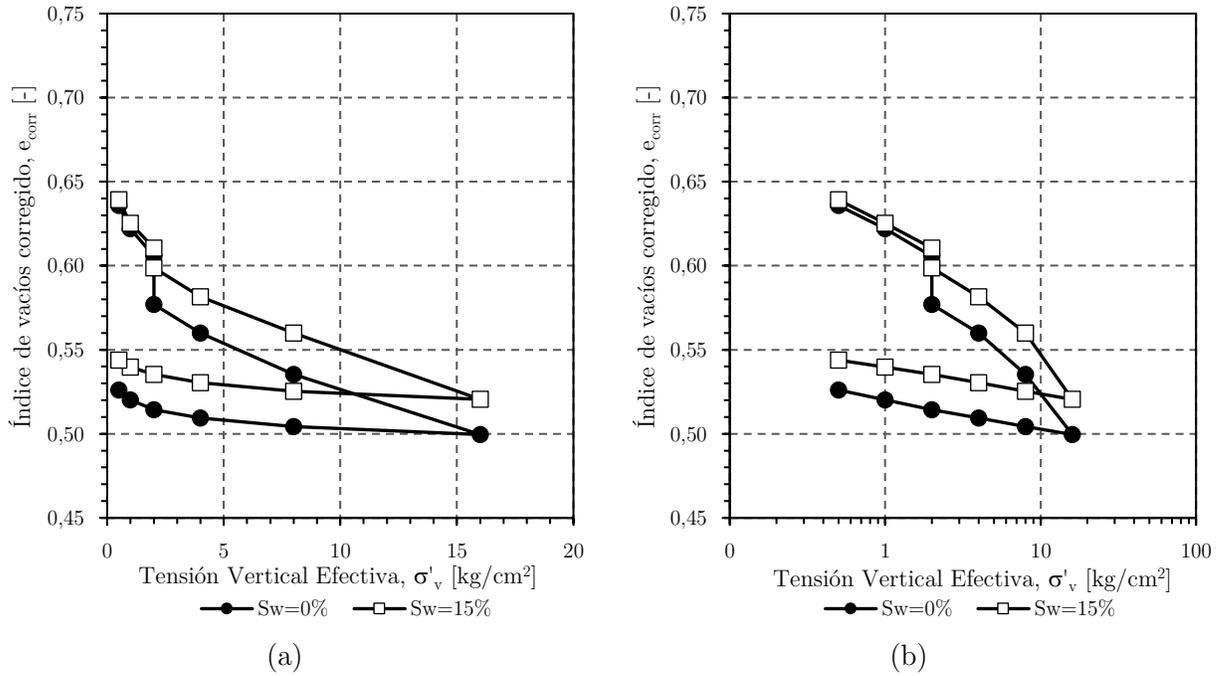


Figura 5.23. Comparación de índice de vacíos vs tensión vertical para $S=2\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.

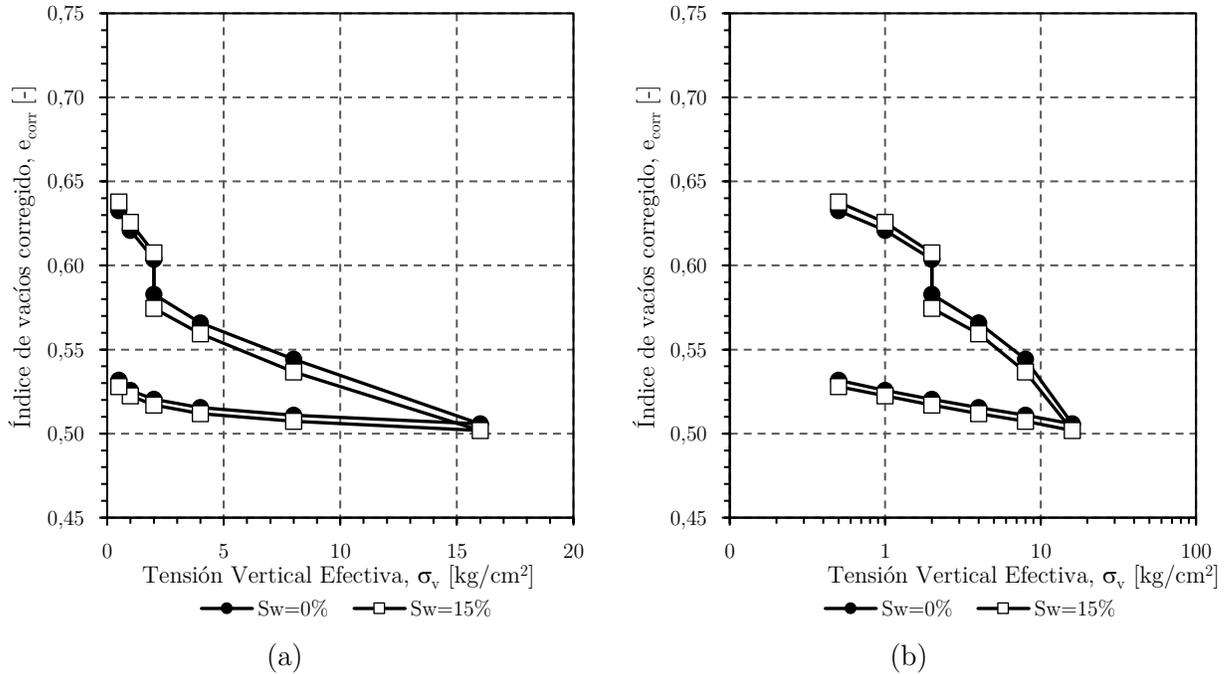


Figura 5.24. Comparación de índice de vacíos vs tensión vertical para $S=3,5\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.

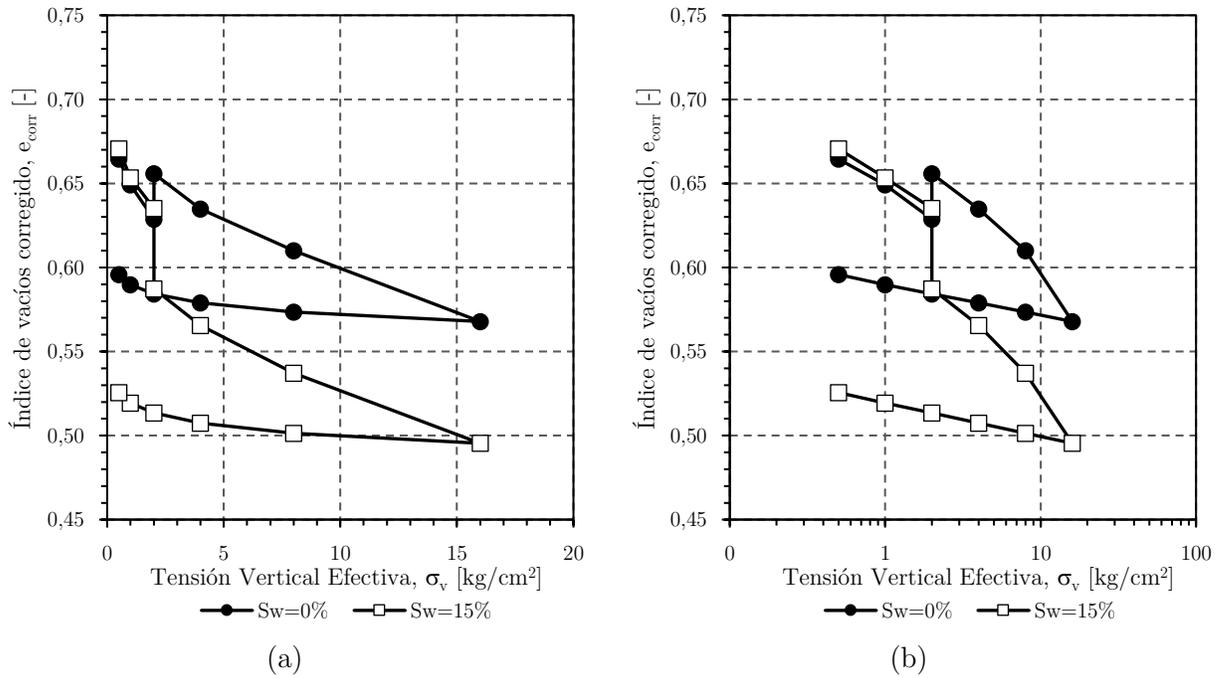


Figura 5.25. Comparación de índice de vacíos vs tensión vertical para $S=7\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.

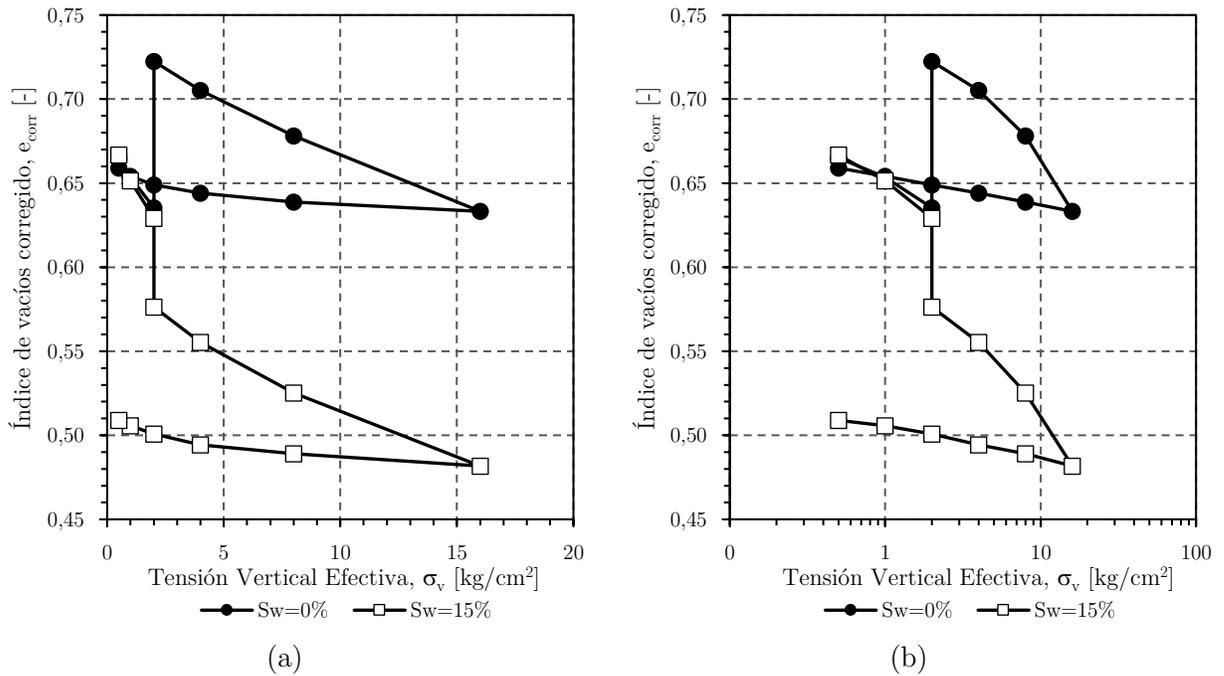
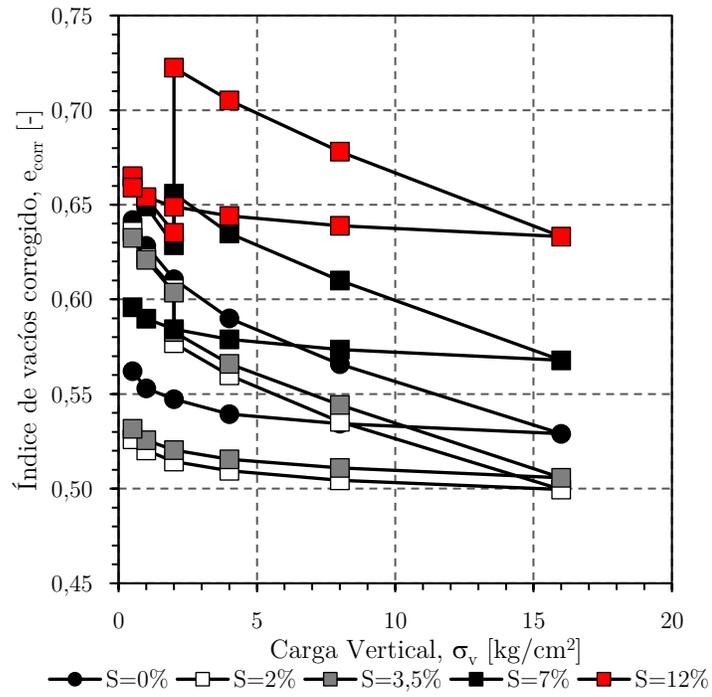
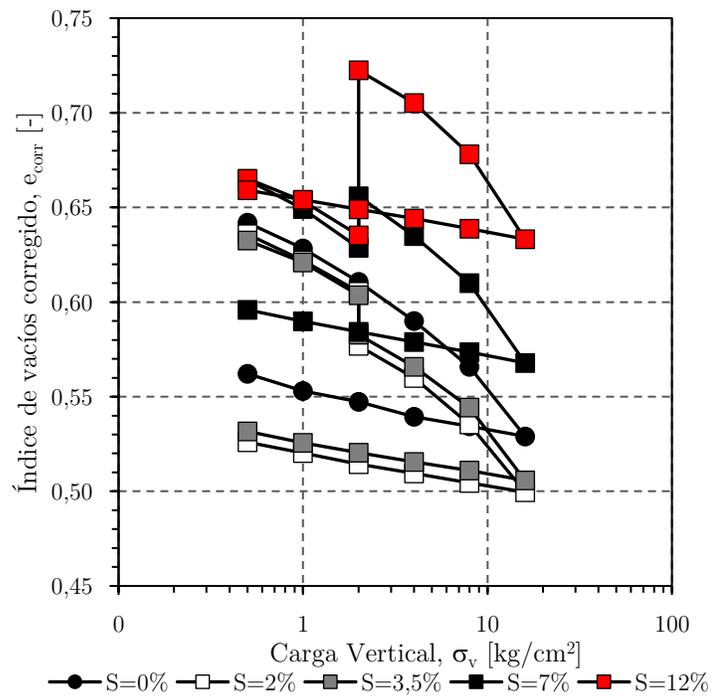


Figura 5.26. Comparación de índice de vacíos vs tensión vertical para $S=12\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.

- Resumen

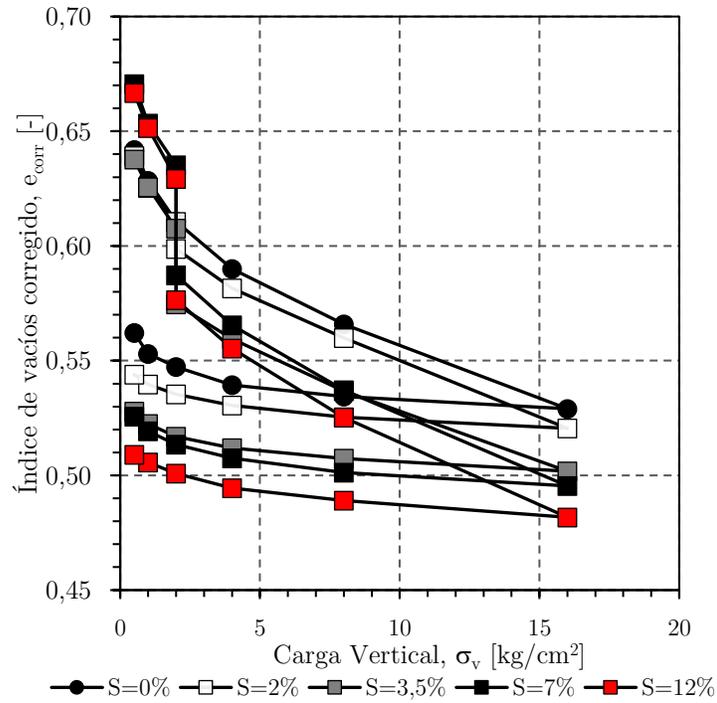


(a)

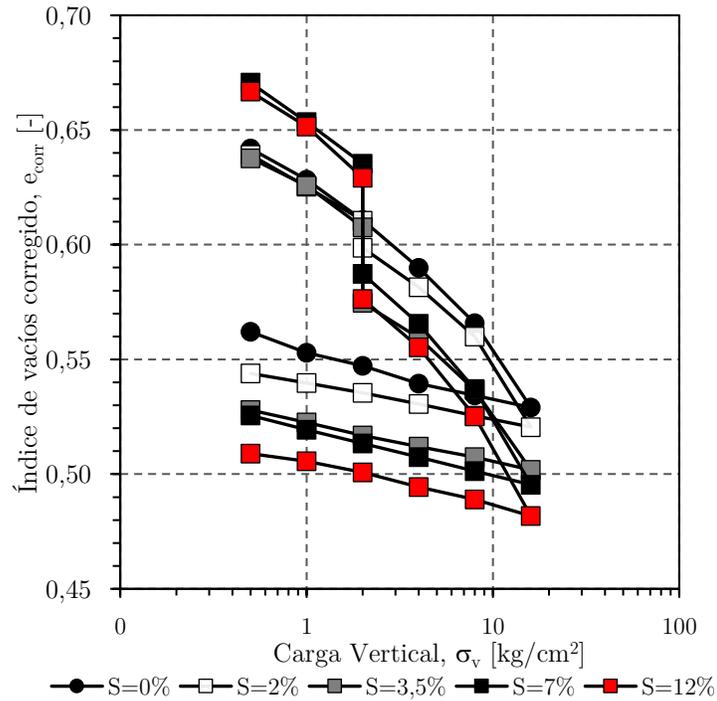


(b)

Figura 5.27. Resumen de índice de vacíos vs tensión vertical para $S_w=0\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.

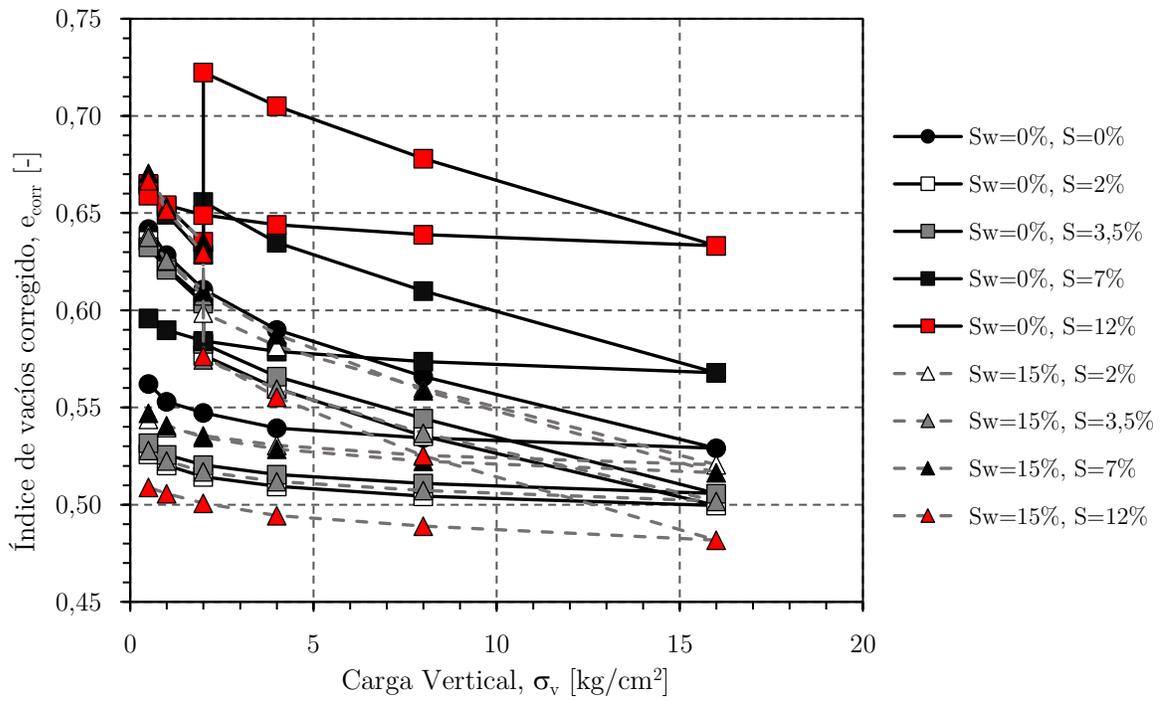


(a)

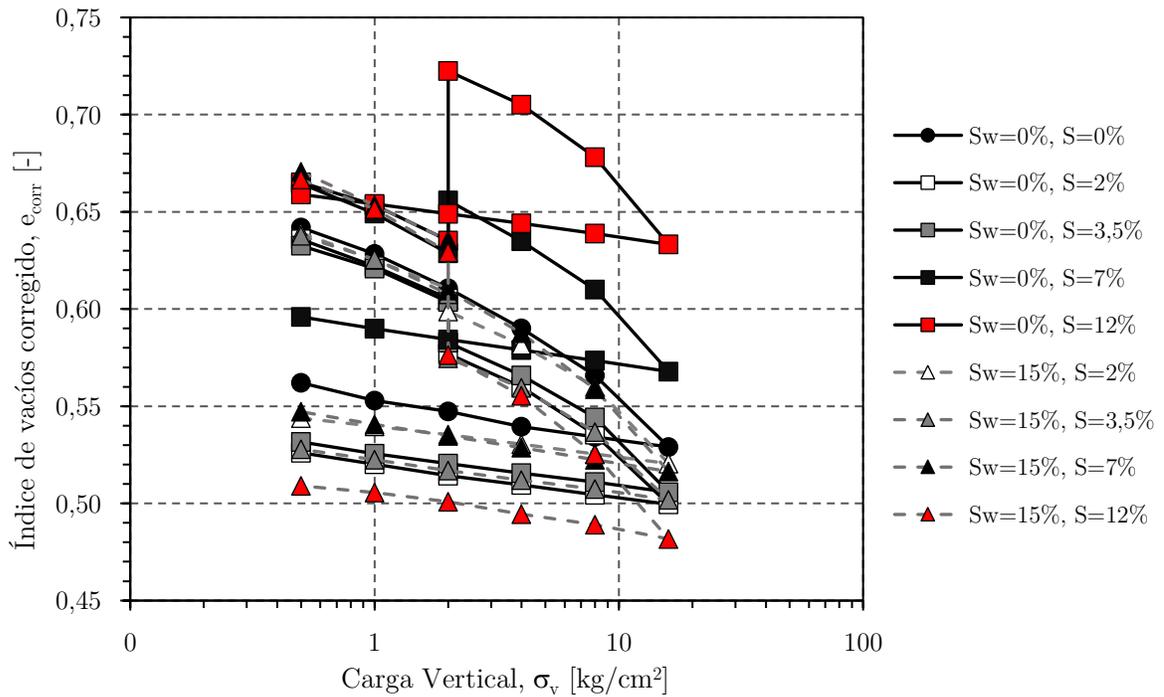


(b)

Figura 5.28. Resumen de índice de vacíos vs tensión vertical para $S_w=15\%$. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.



(a)



(b)

Figura 5.29. Resumen de índice de vacíos vs tensión vertical para ambos sets. (a) Escala lineal; (b) Escala semi-logarítmica.

Los resultados obtenidos para la variación de índice de vacíos por disolución en muestras infiltradas con agua con contenido de sales solubles de 15% (Figura 5.28) dan cuenta de un comportamiento consistente con el análisis a partir de las deformaciones unitarias, existiendo una disminución en los vacíos con la infiltración que se acrecienta con el aumento de la salinidad de la muestra. La magnitud del potencial de colapso calculado en función del índice de vacíos aumenta en comparación al calculado en función de la deformación debido a que la depositación de la sal contenida en el líquido percolado ocupa los vacíos de la muestra, lo que se adiciona al efecto de la deformación vertical.

Por el contrario, los resultados obtenidos para las muestras percoladas con agua desmineralizada (Figura 5.27) reflejan un importante incremento del índice de vacíos, especialmente en las muestras con alto contenido de sal. Este incremento es consecuencia de la disolución de las sales que se encontraban inicialmente en estado sólido y también contribuye a que las muestras presenten mayor compresibilidad que sus contrapartes.

5.3.6. Deformación por Disolución en el Tiempo

A continuación, se presentan las curvas de deformación vertical unitaria en el tiempo, producida por la disolución de sales.

- **Comparación**

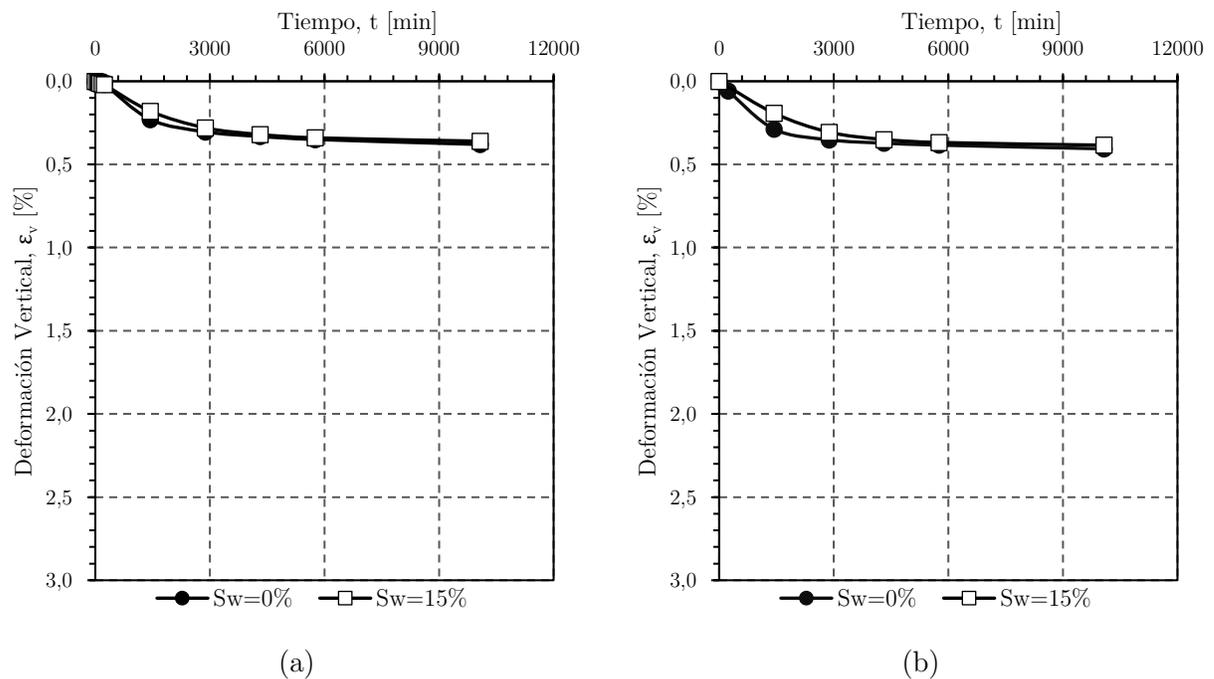
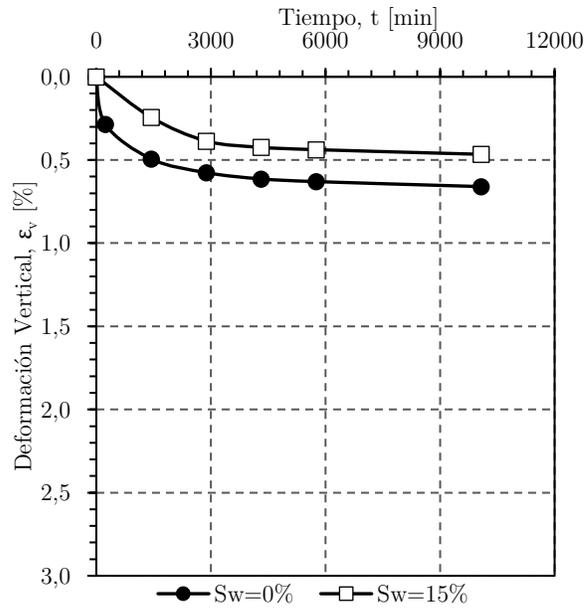
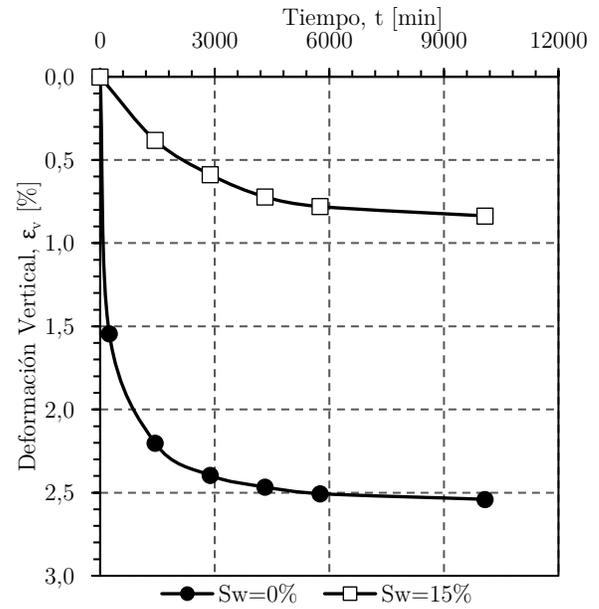


Figura 5.30. Comparación de deformación unitaria por disolución vs tiempo. (a) $S=2\%$; (b) $S=3,5\%$.



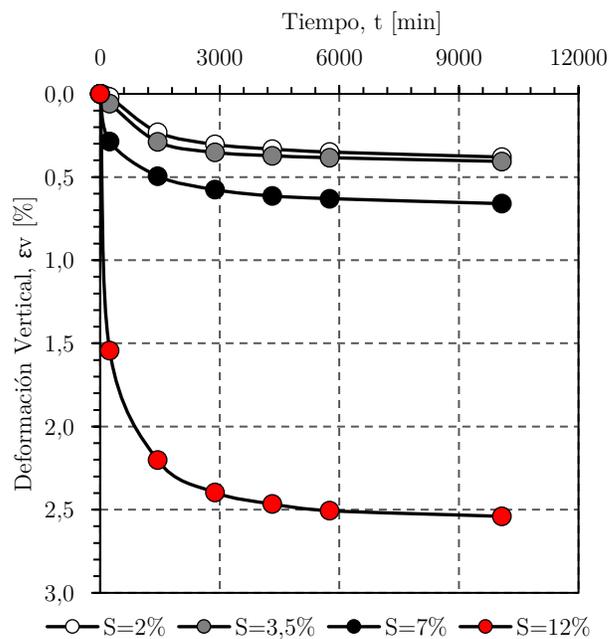
(a)



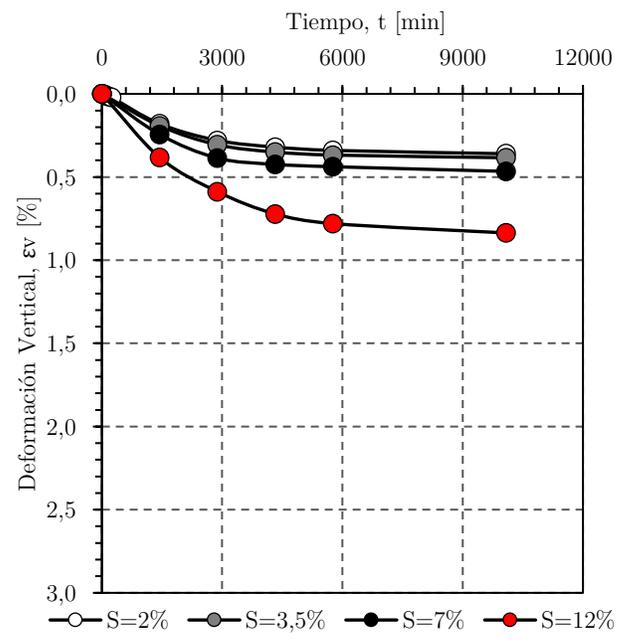
(b)

Figura 5.31. Comparación de deformación unitaria por disolución vs tiempo. (a) $S=7\%$; (b) $S=12\%$.

• **Resumen**



(a)



(b)

Figura 5.32. Resumen de deformación unitaria por disolución vs tiempo. (a) $S_w=0\%$; (b) $S_w=15\%$.

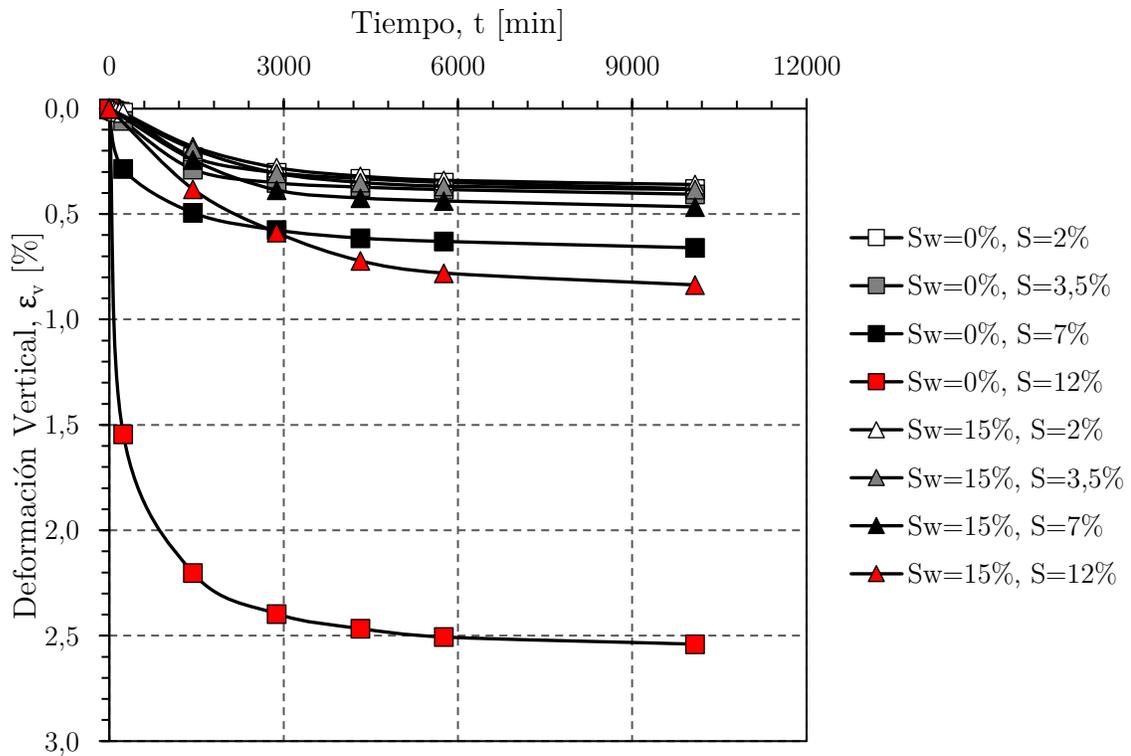


Figura 5.33. Resumen de deformación unitaria por disolución vs tiempo para ambos sets.

Finalmente, se presentan las deformaciones y variaciones de índice de vacíos producidas por disolución de sales en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13. Deformación y variación de índice de vacíos por disolución

S_w	S	Δh	Δe
%	%	mm	-
0	2	-0,190	-0,034
	3,5	-0,203	-0,028
	7	-0,330	0,045
	12	-1,270	0,112
15	2	-0,180	-0,012
	3,5	-0,192	-0,033
	7	-0,233	-0,048
	12	-0,418	-0,053

Las curvas de deformación unitaria en el tiempo de las muestras infiltradas con agua desmineralizada (Figura 5.32 (a)) dan cuenta de una rápida deformación en la etapa inicial del ensayo. Las muestras con contenidos de sal de 2%, 3,5% y 7% presentan una muy baja variación posterior a las 48 horas, mientras que la muestra con salinidad de 12% se estabiliza

desde aproximadamente las 72 horas. La diferencia entre el tiempo de estabilización de deformación y la desalinización de las muestras se atribuye al acomodamiento de las partículas no solubles con el tiempo.

Las curvas para las muestras con contenido de sal de 2% y 3,5% (Figura 5.30) no evidencian una diferencia considerable de la deformación total entre la infiltración con agua desmineralizada y la infiltración con salmuera, lo que sugiere que la sal contenida inicialmente en las muestras pudo ser disuelta por la salmuera en la etapa previa a la impermeabilización.

Las curvas de los ensayos de infiltración con salmuera presentadas en la Figura 5.32 (b) dan cuenta de una tasa de deformación inicial considerablemente menor, especialmente para las muestras de 7% y 12%, debido principalmente de una menor capacidad de disolución del líquido percolado además de una rápida disminución de la permeabilidad de las probetas. Esto también genera la principal diferencia observada en las curvas de deformación, donde se produce una clara diferencia en la magnitud de la deformación total de las muestras de 7% y 12% (Figura 5.31).

5.3.7. Índice de Colapso

Se presentan los resultados obtenidos para el índice de colapso tanto en función de deformaciones verticales como de variación de índice de vacíos.

- **Deformación Vertical**

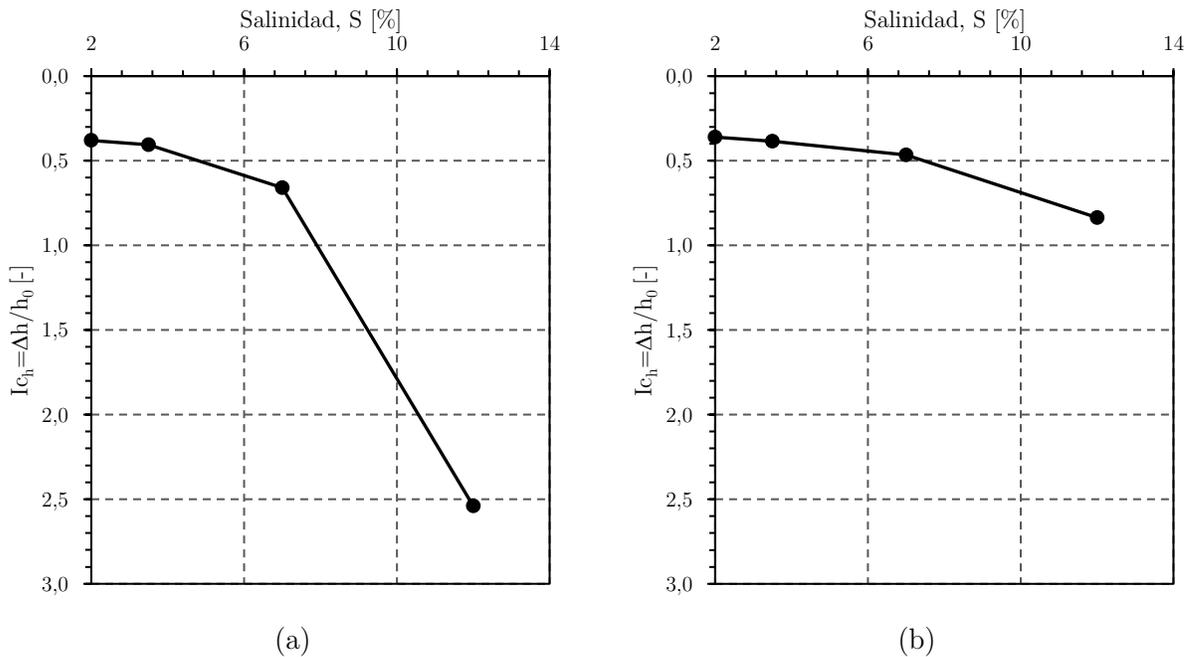


Figura 5.34. Índice de colapso en función de la deformación unitaria versus salinidad. (a) $S_w = 0\%$; (b) $S_w = 15\%$.

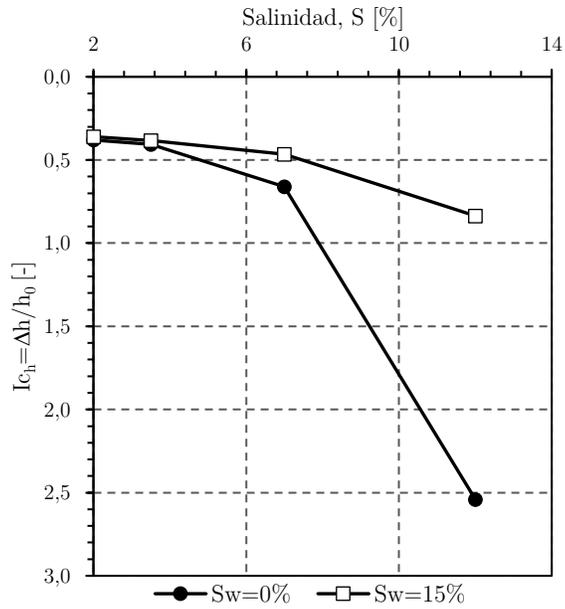


Figura 5.35. Comparación de índices de colapso en función de la deformación unitaria versus salinidad.

- Índice de Vacíos

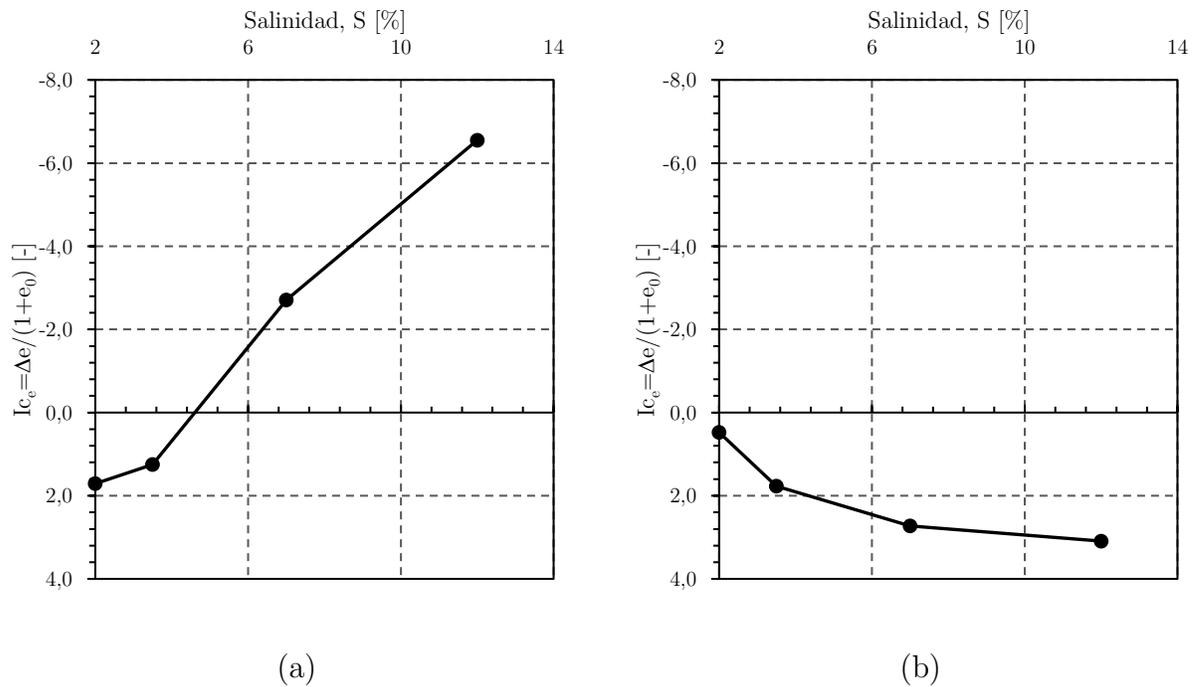


Figura 5.36. Índice de colapso en función de la variación de índice de vacíos versus salinidad. (a) Sw=0%; (b) Sw=15%.

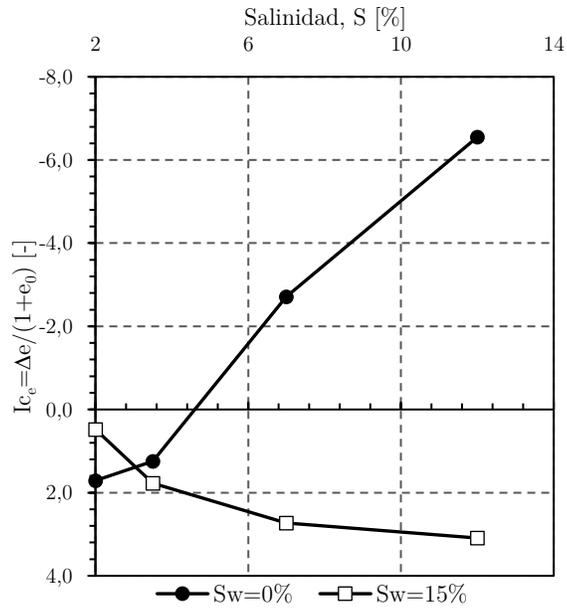


Figura 5.37. Comparación de índices de colapso en función de la variación de índice de vacíos versus salinidad.

Los valores del potencial de colapso determinados a partir de deformaciones e índice de vacíos se resumen en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14. Potencial de colapso.

Sw	S	Ic _h	Ic _e
%	%	-	-
0	2	0,38	1,710
	3,5	0,406	1,246
	7	0,66	-2,708
	12	2,54	-6,550
15	2	0,36	0,478
	3,5	0,384	1,774
	7	0,466	2,727
	12	0,836	3,091

5.3.8. Parámetros Post-Ensayo

Finalmente, la Tabla 5.15 presenta la variación de salinidad en las muestras y un resumen de los parámetros post-ensayo que se ven mayormente afectados por ésta.

Tabla 5.15. Parámetros post-ensayo de las muestras.

Sw	S _i	S _f	G	$\gamma_{d_{corr}}$	e_{corr}
%	%	%	-	t/m ³	-
0	2,0%	0,00%	2,69	1,71	0,526
	3,5%	0,00%	2,69	1,70	0,532
	7,0%	1,04%	2,68	1,62	0,596
	12,0%	2,63%	2,67	1,55	0,659
15	2,0%	11,23%	2,62	1,64	0,548
	3,5%	12,45%	2,61	1,66	0,529
	7,0%	15,95%	2,59	1,64	0,526
	12,0%	20,43%	2,56	1,64	0,509

5.4. Curvas de Densidad - Salinidad

La densidad seca de un suelo salino depende de su índice de vacíos y salinidad según la ecuación (5.1), mientras que su salinidad máxima puede ser calculada considerando que las sales ocupan completamente su porosidad según la ecuación (5.2) (Anexo Anexo C).

$$\gamma_d = \gamma_w G_s \left(\frac{1 + S}{1 + e} \right) \quad (5.1)$$

$$S_{max} = e \frac{G_{ss}}{G_s} \quad (5.2)$$

Luego, es posible trazar curvas de densidad vs salinidad de un material en función de la gravedad específica de los sólidos no solubles y de las sales solubles, para distintos porcentajes de salinidad máxima contenido en el suelo (Figura 5.38.).

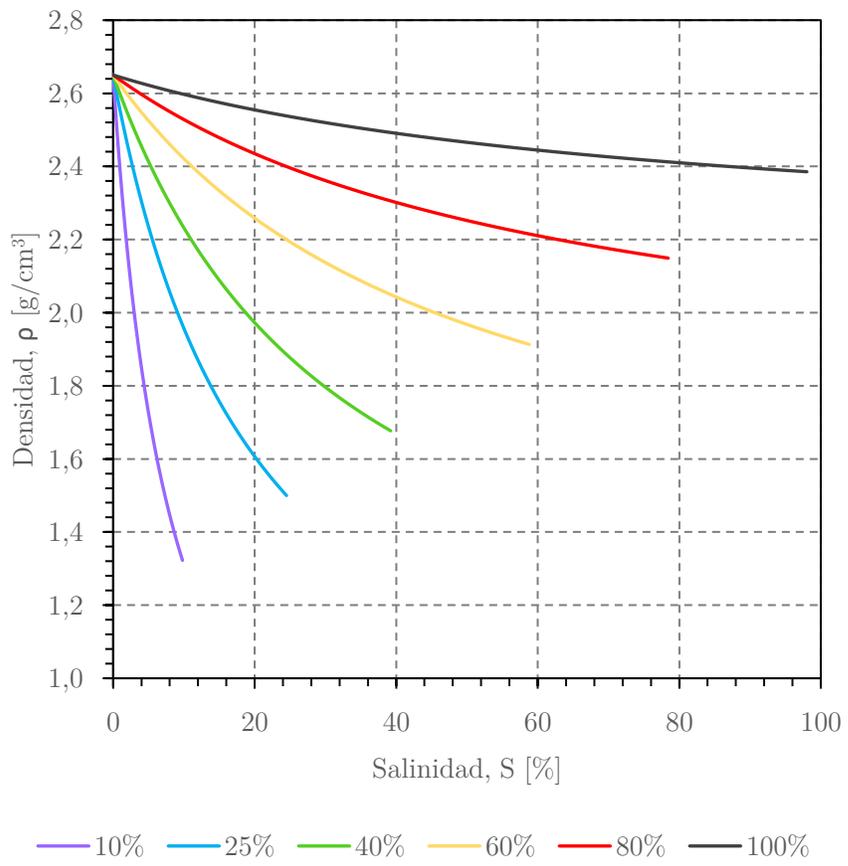


Figura 5.38. Curvas de densidad vs salinidad. ($G_s=2,65$, $G_{ss}=2,165$)

6. Potencial de Colapso

Se analizan los resultados de los ensayos de colapso realizados en el presente estudio, además de los obtenidos por Olgúin (2006), McDougall *et al.* (2015) y Palma & Riquelme (2018) (Figura 6.1), con el fin de estudiar la influencia de la densidad del suelo en el potencial de colapso por disolución de sales. Las características generales de las muestras estudiadas en los 4 trabajos analizados se resumen en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Características muestras ensayadas por Olgúin, McDougall, Palma & Riquelme y presente estudio.

	Tipo de Sal	Clasificación USCS	Compactación
Olgúin	Sulfatos y Cloruros	SC y SW	Natural
Mc Dougall	NaCl	SP y SW	Compactado 45-110% DR
Palma & Riquelme	Sulfatos	SM y SC-SM	Compactado 75-95% PM
Espinoza	NaCl	SM	Compactado 90% PM

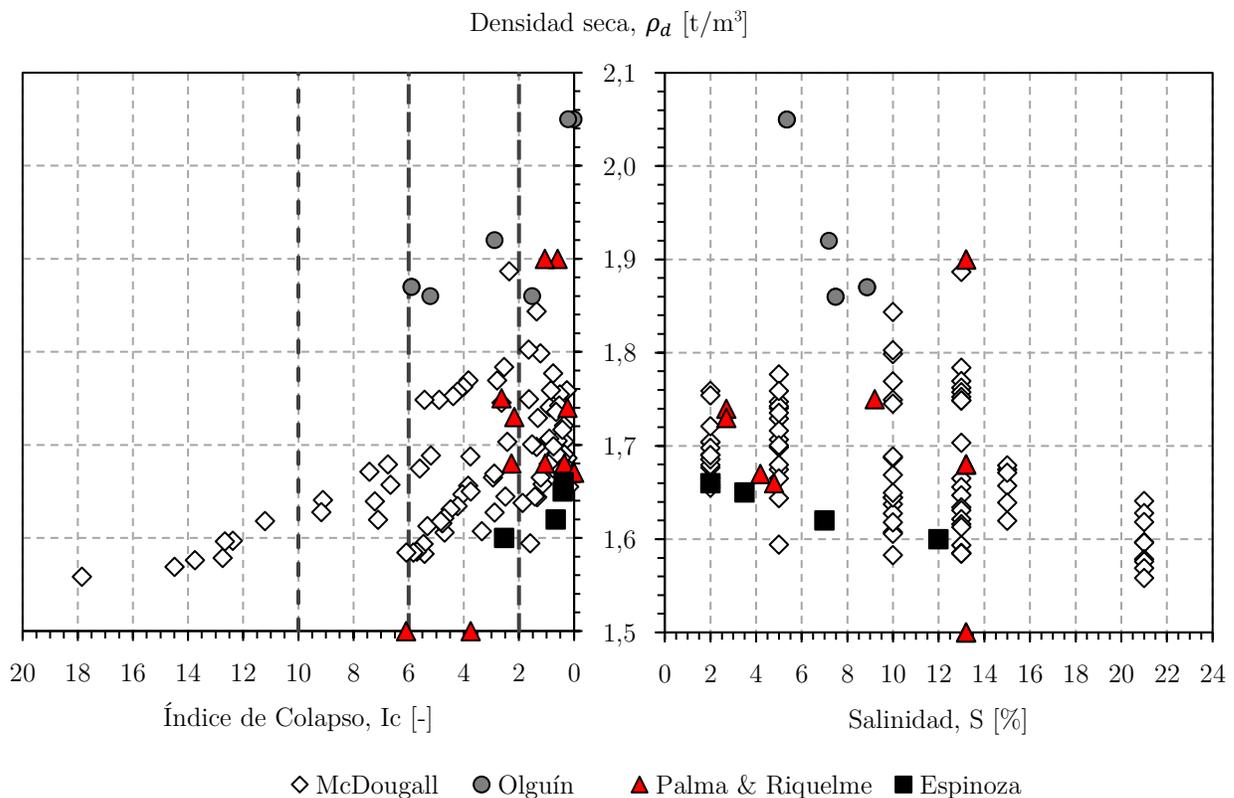


Figura 6.1. Ensayos de colapso Olgúin (2006), McDougall *et al.* (2015), Palma & Riquelme (2018) y presente estudio (muestras ensayadas con distintas tensiones de saturación). Izquierda: Densidad Seca vs Índice de Colapso. Derecha: Densidad Seca vs Salinidad.

6.1. Análisis Estadístico χ^2

Se realiza una prueba estadística de χ^2 de Pearson con el fin de probar la existencia de una relación de dependencia del índice de colapso y de la salinidad con respecto a la densidad seca, a partir de los resultados obtenidos por los ensayos resumidos en la Figura 6.1. Ésta corresponde a una prueba no paramétrica que mide la bondad de ajuste entre una distribución observada y una teórica, y se utiliza para probar la dependencia o independencia de dos variables entre sí (Chernoff & Lehmann, 1954).

La prueba de Pearson consiste en contrastar el parámetro χ^2 calculado según la Ecuación (6.1) y el valor crítico obtenido a partir de las tablas de distribución de χ^2 (Anexo Anexo D), dependiente de los grados de libertad y del nivel de significancia. Cuanto menor sea el valor de χ^2 , más ajustadas están ambas distribuciones, por lo tanto, la hipótesis nula se comprueba si el valor calculado es menor al valor crítico, y de lo contrario se rechaza.

$$\chi^2 = \sum \frac{(f_o - f_t)^2}{f_t} \quad (6.1)$$

$$f_t = \frac{\sum_i f_o * \sum_j f_o}{\sum_{ij} f_o} \quad (6.2)$$

Donde:

f_o [-] : Frecuencia observada.

f_t [-] : Frecuencia teórica.

Se realizan las pruebas para con 3 intervalos de densidad (gdl=4), un nivel de significancia de 0,1% ($\chi^2_{crítico}=18,49$), y las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula: Variables son independientes.
- Hipótesis Alternativa: Variables son dependientes.

- **Potencial de Colapso**

Tabla 6.2. Tabla de contingencia.

ρ_d \ Ic	Leve	Moderado	Moderadamente Severo y Severo
<1,65 [t/m ³]	5	18	14
1,65-1,74 [t/m ³]	29	9	5
>1,74 [t/m ³]	17	15	0

Tabla 6.3. Frecuencias teóricas.

ρ_d \ Ic	Leve	Moderado	Moderadamente Severo y Severo
<1,65 [t/m ³]	16,9	13,9	6,3
1,65-1,74 [t/m ³]	19,6	16,1	7,3
>1,74 [t/m ³]	14,6	12,0	5,4

$$\chi^2 = 33,05$$

El valor de χ^2 calculado es mayor que el valor crítico, por lo que se rechaza la hipótesis nula, probándose la dependencia del potencial de colapso y la densidad seca, con una probabilidad de error de 0,1%.

- **Salinidad**

Tabla 6.4. Tabla de contingencia.

ρ_d \ S	<5%	5%-10%	>10%
<1,65 [t/m ³]	2	10	21
1,65-1,74 [t/m ³]	28	3	10
>1,74 [t/m ³]	8	14	15

Tabla 6.5. Frecuencias teóricas.

ρ_d \ Ic	Leve	Moderado	Moderadamente Severo y Severo
<1,65 [t/m ³]	38,0	8,9	15,2
1,65-1,74 [t/m ³]	14,6	10,4	17,7
>1,74 [t/m ³]	10,9	7,7	13,1

$$\chi^2 = 63,37$$

El valor de χ^2 calculado es mayor que el valor crítico, por lo que se rechaza la hipótesis nula, probándose la dependencia de la salinidad y la densidad seca, con una probabilidad de error de 0,1%.

6.2. Densidad y Potencial de Colapso

La Figura 6.2 presenta la variación del índice de colapso con la densidad seca del suelo, para muestras agrupadas en 5 contenidos de sal con una variación de $\pm 1\%$, además de los resultados obtenidos en el presente estudio para los ensayos de edómetro con infiltración de agua desmineralizada. En los 5 rangos evaluados, los resultados dan cuenta de una tendencia a la disminución del potencial de colapso a medida que incrementa la densidad seca.

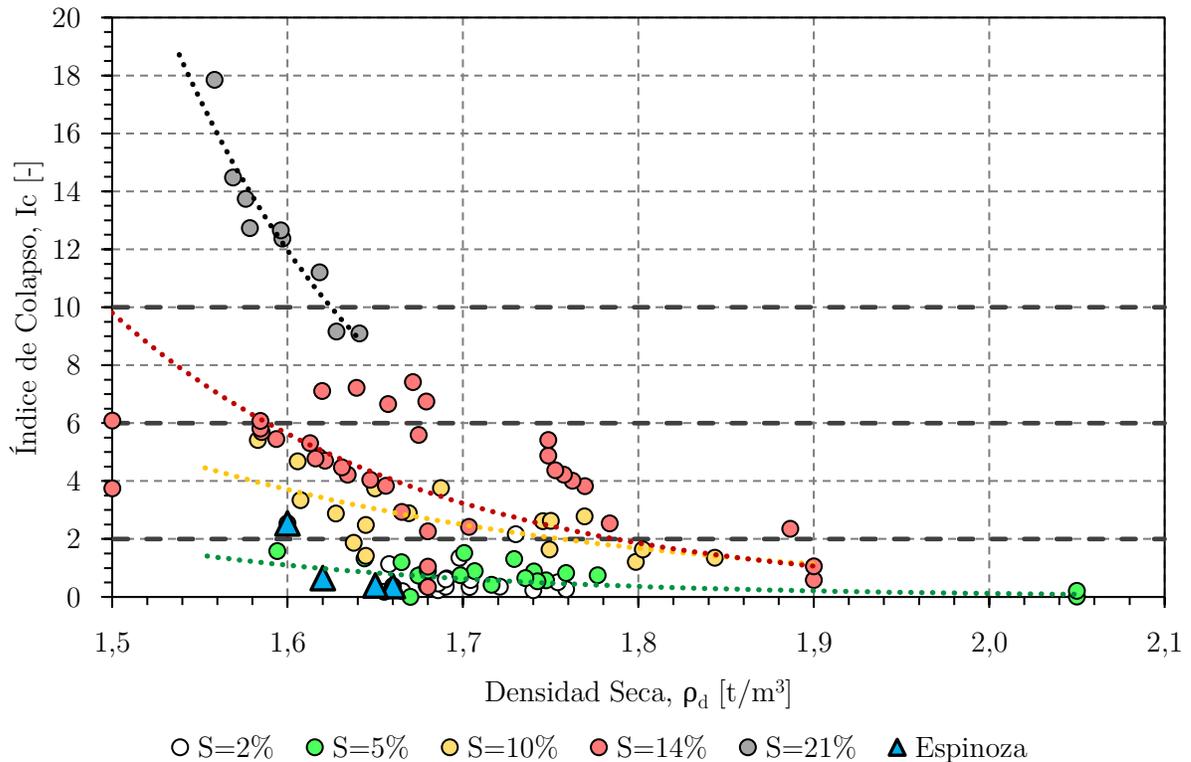


Figura 6.2. Índice de Colapso vs Densidad Seca para distintas salinidades.

Para las muestras con contenido de sal de 2% y 5% se obtiene que el potencial de colapso es leve en prácticamente todos los ensayos. En el caso de 5% de salinidad se observa una tendencia a disminución del índice de colapso a partir de una densidad seca de 1,7 [t/m³], llegando a un colapso casi nulo a la densidad de 2,05 [t/m³].

Los resultados de las muestras en 10% y 14% también evidencian una disminución en el índice de colapso por disolución con el aumento de densidad seca. Para densidades mayores a 1,8 [t/m³], las muestras con 10% de salinidad presentan potenciales de colapso leves en los 3 ensayos, mientras que en las muestras de 14% se obtienen colapsos leves en 2 de 3 ensayos.

Las muestras de 21% de contenido de sal presentan colapsos severos y moderadamente severos, consistentes con muestras con alta salinidad, y al igual que los demás casos muestran una tendencia a la disminución del colapso con el aumento de la densidad.

Las muestras ensayadas en el edómetro con infiltración en el presente estudio fueron compactadas a un 90% de Proctor Modificado, alcanzando densidades secas de hasta 1,66 [t/m³]. Los resultados obtenidos para infiltración de agua desmineralizada y salinidades de 2%, 3,5%, 7% y 12% (derecha a izquierda en la Figura 6.2) corresponden a bajos potenciales de colapso en comparación con otros ensayos dentro de los rangos de salinidad respectivos.

Lo anterior da cuenta del efecto de un alto grado de compactación en el contexto del colapso por disolución de sales solubles, a pesar de tener una baja densidad seca de confección en comparación con los demás ensayos analizados, además de ser muestras con granulometría y plasticidad desfavorables en el contexto de colapso por disolución de sales.

6.3. Densidad y Salinidad

La Figura 6.3 presenta la densidad seca de las muestras en relación con su contenido de sales solubles, agrupados según nivel del colapso y autor. Además, se grafican las curvas de densidad-salinidad que muestran el porcentaje de salinidad máxima contenido en las muestras.

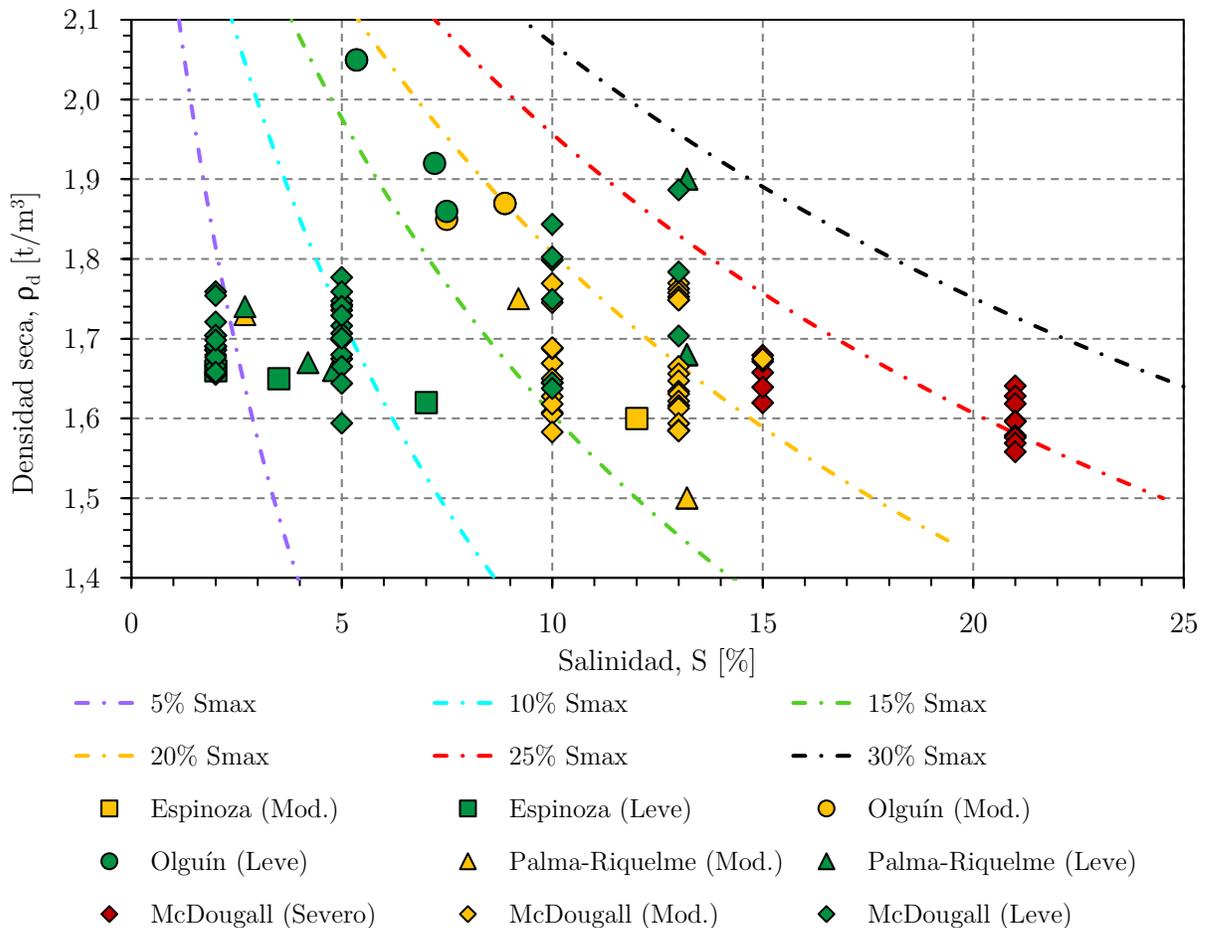


Figura 6.3. Densidad versus Salinidad.

A partir de los resultados se ratifica el análisis realizado en el acápite anterior, observándose que el nivel de colapso disminuye de moderado a leve con el aumento de densidad seca en las muestras de 10% y 13%.

De este gráfico es importante destacar que las únicas muestras con densidades mayores a 1,8 [t/m³] que presentan colapsos mayores a 2 corresponden a muestras no remoldeadas, por lo que presentan una distribución no uniforme de las sales solubles y macroestructuras mayormente colapsables, como se detalló en el capítulo 3.4 sobre suelos compactados.

Además, en particular para muestras con salinidades menores e iguales a 10%, se obtienen potenciales de colapso mayores a 2 para sólo 6 de las 38 muestras con densidades secas mayores o iguales a 1,7 [t/m³], y sólo 3 de esas muestras tienen colapsos mayores a 2,6.

6.4. Efecto tensión vertical

Los gráficos presentados en la Figura 6.4 y Figura 6.5 reflejan el efecto de la densidad y de la tensión vertical en el colapso por disolución de sales para distintos contenidos de sal. Los resultados fueron agrupados en 4 contenidos de sal con una variación de $\pm 1\%$, los que a su vez fueron divididos en dos grupos según la tensión vertical aplicada durante la infiltración, y para ambos grupos se realiza una regresión exponencial que muestra la tendencia del índice de colapso con la variación de densidad seca.

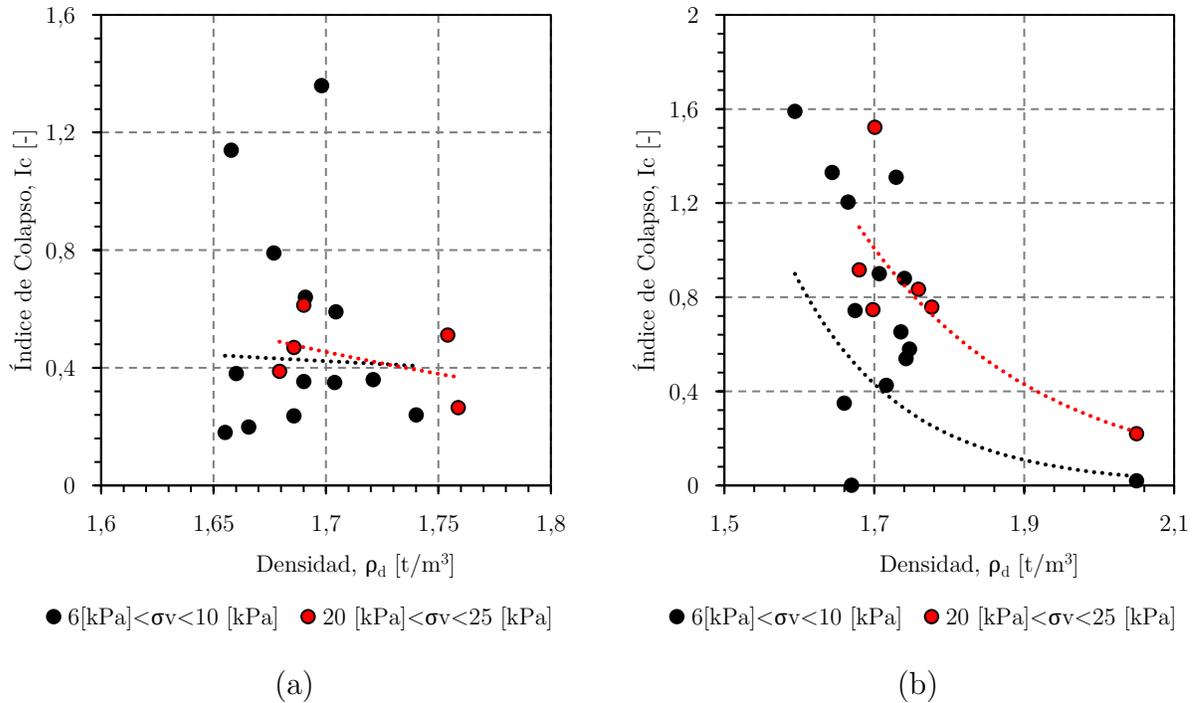


Figura 6.4. Índice de colapso versus densidad para tensiones verticales menores a 10 [kPa] y mayores a 20 [kPa]. (a) S=2%; (b) S=5%.

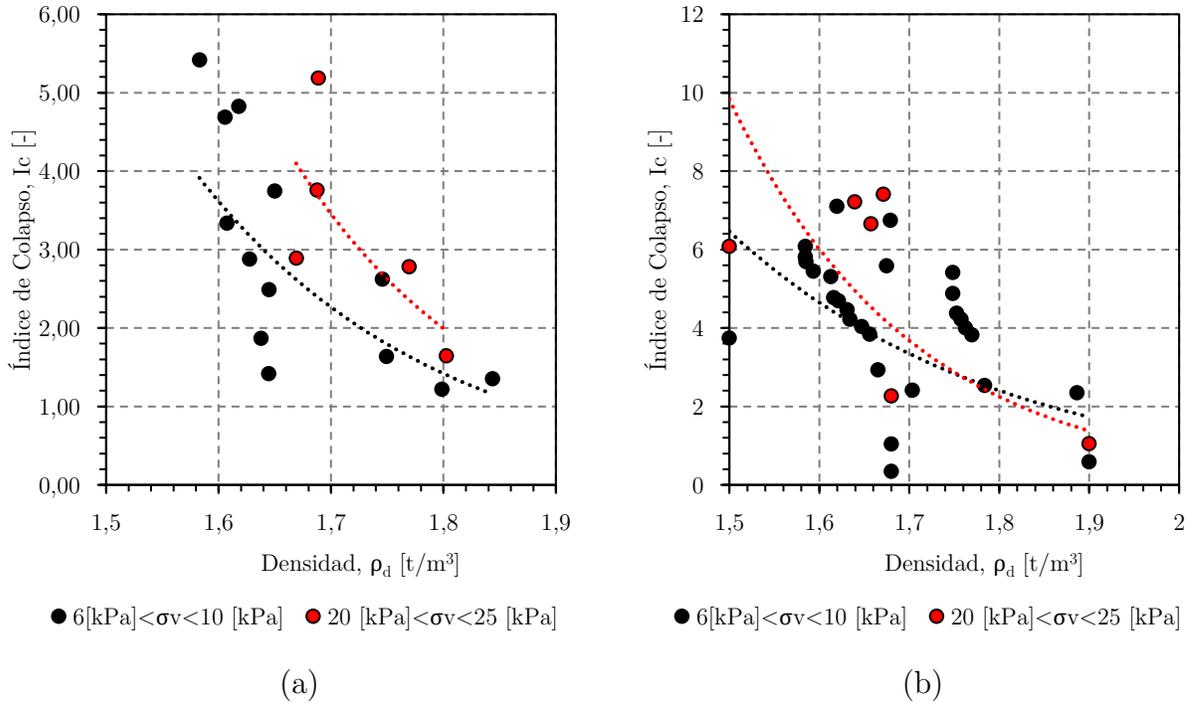


Figura 6.5. Índice de colapso versus densidad para tensiones verticales menores a 10 [kPa] y mayores a 20 [kPa]. (a) S=10%; (b) S=14%.

Los resultados evidencian que la reducción del potencial de colapso con el aumento de la densidad seca se produce en ambos rangos de tensión vertical analizados.

Los gráficos además dan cuenta de una tendencia al aumento del colapso debido al aumento de tensión vertical aplicada durante la etapa de infiltración, especialmente para las muestras con 5% y 10% de salinidad; sin embargo, la tendencia no es tan clara en los suelos con 2% y 14%.

El análisis no fue extendido a las muestras confeccionadas con 21% de contenido de sal debido a que los resultados disponibles sólo corresponden a ensayos con 6 [kPa].

7. Conclusiones y Recomendaciones

El presente trabajo estudia el fenómeno del colapso por disolución de sales en suelos salinos compactados con el objetivo general de evaluar la factibilidad de utilizar materiales con salinidad mayor al valor crítico establecido por la normativa chilena actual, como relleno de fundación de estructuras tolerantes a asentamientos leves o moderados.

Se seleccionó un material mal graduado, casi monotamaño, mezclado con distintos contenidos de cloruro de sodio según un procedimiento de compactación controlado, para contar con una estructura propensa a presentar colapso, al ser sometido a infiltraciones. De este modo, se tuvo una estructura reproducible que permite un análisis cuantitativo más riguroso.

Los resultados de colapso en suelos naturales presentan, por el contrario, varias granulometrías, con contenidos de sales solubles de distintas naturaleza y densidades muy diferentes, que no permiten, en una primera instancia, revelar en forma clara el efecto de la tensión de saturación, el contenido de sales y la densidad. En esta tesis, se observa claramente el efecto de cada una de las variables indicadas, las que pueden servir de base para un mejor entendimiento del colapso de suelos salinos por dilución.

El estudio experimental realizado consistió en la caracterización, ensayo de compactación y ensayo edométrico con infiltración realizados sobre arena limosa mal graduada proveniente del tranque El Torito, confeccionadas con distintos contenidos de cloruro de sodio. Además, se analizaron los resultados de potencial de colapso obtenido por estudios afines.

7.1. Proctor Modificado

Se llevaron a cabo ensayos de compactación Proctor Modificado para el material base y 4 materiales confeccionados con distintas salinidades, con el fin de establecer la densidad seca y humedad de confección de cada probeta para el ensayo edométrico con infiltración.

Las curvas de compactación obtenidas a partir del ensayo Proctor Modificado dan cuenta de que con el aumento de la salinidad del material se produce una disminución de la densidad seca corregida, la que considera que parte de las sales solubles están disueltas en el agua incorporada en cada muestra. Una vez que el material pierde humedad las sales son cristalizadas, aumentando la densidad seca del material además de generar cementación.

Es importante tener en consideración este proceso al momento de controlar la compactación de suelos salinos, tanto al especificar la densidad del relleno como al verificar su cumplimiento. También se debe tener en cuenta que, para efectos prácticos, al especificar una humedad de compactación es necesario considerar la definición que considera la sal soluble como peso seco.

7.2. Ensayo Edométrico con Infiltración

Con el fin de estudiar el colapso por disolución de sales en materiales salinos compactados, se efectuaron ensayos edométricos a muestras confeccionadas con distintas salinidades y densidad de 90% de Proctor Modificado.

Los ensayos de colapso comúnmente utilizan agua desmineralizada como solvente; sin embargo, los suelos salinos no siempre se ven expuestos a esta condición, como es el caso de depósitos expuestos a infiltraciones de cuencas o microcuencas cerradas, o de materiales que reciban líquido percolado que ya ha generado disolución de sales. Para reflejar el efecto de ambas condiciones, utilizó agua desmineralizada y agua con 15% de contenido de cloruro de sodio para la percolación de las muestras.

La etapa de infiltración del ensayo edométrico fue llevada a cabo en el periodo de 7 días con una carga hidráulica constante, con el fin de obtener las mayores deformaciones posibles. No obstante, esta no es una condición a la que estén expuestos comúnmente los suelos del norte de Chile, especialmente si se trata de una infiltración de agua desmineralizada. Estas condiciones de infiltración fueron adoptadas con el fin de obtener resultados representativos de la condición más desfavorable.

Los resultados obtenidos para el potencial de colapso clasifican como “leves” en todas las muestras ensayadas, con excepción de la muestra con la mayor salinidad (12%) infiltrada con agua desmineralizada, cuyo colapso clasifica como “moderado”.

Se produjeron menores deformaciones en las muestras percoladas con agua con 15% de sal, especialmente en las muestras con mayor salinidad. El análisis de la deformación en el tiempo da cuenta además de una tasa de deformación considerablemente menor en las muestras infiltradas con agua con salinidad de 15%. La diferencia del comportamiento en ambos sets se debe principalmente a las distintas capacidades de disolución de los solventes.

Es importante destacar que estas diferencias se producen con una concentración de sólo 15g/100ml de cloruro de sodio en el agua, siendo su capacidad de disolución de 36g/100ml.

Las probetas infiltradas con agua desmineralizada presentaron un aumento en el índice de vacíos como consecuencia de la disolución de la mayor parte de sales solubles presentes inicialmente. Por el contrario, en las muestras infiltradas con salmuera se generó una disminución de índice de vacíos producto de la incorporación de sales a su estructura.

Este fenómeno demuestra la importancia de evaluar el colapso no sólo en función de la deformación vertical, sino que también estudiar la estructura del material posterior a la infiltración.

Los módulos de compresibilidad calculados a partir de las curvas de consolidación edométrica evidencian que la compresibilidad en la etapa posterior a la infiltración es menor en los

materiales percolados con salmuera que los infiltrados con agua desmineralizada. Esto como consecuencia de un índice de vacíos significativamente menor en el primer caso.

Los resultados obtenidos y el análisis realizado evidencian la importancia de realizar estudios de infiltración que se aproximen a las condiciones a las que será sometido el material utilizado como fundación en términos de la naturaleza del solvente con el que entrará en contacto. Esto no sólo enfocado en su contenido de sales disueltas, sino que también para casos donde pueda existir una infiltración de ácido, como en obras industriales, mineras o rellenos sanitarios, especialmente en presencia de carbonatos.

También es de gran importancia estudiar el comportamiento del material posterior a su infiltración, en comparación a su estado seco, ya que este proceso no sólo tiene incidencia sobre la deformación por disolución. Esto mediante el análisis de la variación de los parámetros de resistencia y del comportamiento tensión-deformación.

7.3. Potencial de Colapso

Se analizaron los resultados obtenidos, además de 3 estudios afines, con el fin de estudiar la influencia de la densidad del suelo en el potencial de colapso por disolución de sales.

Es importante mencionar que los estudios considerados corresponden a ensayos sobre materiales con diferentes clasificaciones, composición de sales y niveles de compactación, por lo que corresponde a un análisis generalizado.

Se llevó a cabo la prueba estadística χ^2 sobre todos los resultados recopilados con el fin de mostrar una relación de dependencia del potencial de colapso y la densidad seca. Se obtuvo como resultado la verificación de la dependencia estadística de ambas variables, con un nivel de significancia de 0,1%.

Se analizó gráficamente el potencial de colapso determinado en los 4 estudios considerados en función de la densidad seca de la muestra ensayada, separados en 5 rangos de salinidad (Figura 6.2). Los resultados dan cuenta de una disminución del colapso con el aumento de la densidad seca para todos los rangos evaluados, además de colapsos leves en todos los ensayos dentro de los rangos de 2% y 5%.

En dicho gráfico se destacan los resultados obtenidos en el presente estudio (infiltrados con agua desmineralizada). Al comparar cada muestra ensayada con su respectivo rango de salinidades se advierte que se producen colapsos bajos, aun cuando no tienen altas densidades de confección.

Considerando que las condiciones del ensayo fueron establecidas con el fin de procurar obtener resultados conservadores, es posible concluir que se produjeron bajos colapsos como consecuencia del alto grado de compactación de las probetas (90% PM), en comparación con los grados de compactación de las demás muestras (Tabla 6.1).

Se analizó gráficamente la densidad seca de las muestras en relación con su contenido de sales solubles, separados por autor y nivel de colapso (Figura 6.3). Del gráfico se advierte que el nivel de colapso disminuyó de moderado a leve con el aumento de densidad seca en las muestras con salinidades intermedias, además de producirse colapsos mayoritariamente leves para muestras con salinidades menores a 10% y densidades mayores a 1,7 [t/m³].

La información más importante que se desprende de este análisis es que todas las muestras compactadas con densidades mayores a 1,8 [t/m³] presentaron colapsos leves, teniendo salinidades de hasta 13,2%. Estos resultados sugieren que, para materiales compactados a altas densidades secas, el contenido de sales solubles comienza a tener menor incidencia en el nivel de colapso generado por la disolución de éstas.

El análisis por separado para dos rangos de tensión vertical de saturación da cuenta de que para ambas condiciones existe una disminución del potencial de colapso con el aumento de la densidad, además de ocurrir un aumento de colapso por el aumento de tensión. Este fenómeno evidencia la necesidad de estudiar el potencial de colapso por infiltración de un material según la sollicitación a la cual será sometido.

7.4. Conclusiones Generales

El análisis de los materiales salinos para su uso como rellenos compactados no debe limitarse sólo a su porcentaje de salinidad, sino que debe contemplar numerosos factores que inciden en su desempeño. Esto debido a que la sobre simplificación del análisis conlleva a tomar criterios demasiado estrictos que pueden implicar altos costos asociados principalmente a movimientos de tierra.

Con base en el trabajo realizado se concluye que la densidad y el proceso de compactación de los materiales salinos tiene una alta incidencia en el potencial de colapso. Esto refuerza la factibilidad de utilizar suelos con salinidades mayores a 3% como rellenos compactados.

Además, se evidencia la importancia de evaluar el comportamiento de los materiales según las características del solvente al que estará expuesto y la sollicitación a la que estará sometido.

Entre otros, también es importante considerar los siguientes factores:

- Tipo, solubilidad y grado de cristalización de sales presentes
- Tipo de solvente al que estará expuesto
- Caudal y tiempo de exposición al solvente
- Distribución granulométrica y plasticidad del material
- Tolerancia de la estructura a los asentamientos
- Eventual sollicitación dinámica generada por equipos
- Si las estructuras emplazadas son propensas a sufrir corrosión

Adicionalmente al análisis de muestras en laboratorio, es recomendable, en medida de lo posible, realizar ensayos de placa de carga en terreno para condiciones secas e inundadas, además de pruebas a escala real de colapso por disolución mediante la saturación del material.

De igual manera se recomienda ejecutar canchas de prueba del material seleccionado, con el fin de establecer las especificaciones para la compactación en terreno, como espesor de capas, número de pasadas y equipo a utilizar.

A partir del presente estudio además se desprende la factibilidad de compactar suelos con agua de mar, controlado mediante ensayos Proctor realizados con salmuera. Esto como alternativa ante la baja disponibilidad de agua dulce, especialmente en el norte grande de Chile.

7.5. Futuras líneas de investigación

A partir de los resultados obtenidos y los antecedentes analizados, se propone seguir las siguientes líneas de investigación:

- Estudiar la variación de parámetros de resistencia y comportamiento tensión-deformación de materiales salinos infiltrados con agua desmineralizada y con agua con contenido de sales.
- Estudios complementarios a los presentados en este trabajo, para suelos característicos del Norte del país con compactación controlada.
- Ensayos de colapso para muestras cuya densidad y humedad de compactación sean controladas por el ensayo proctor, pero que se encuentren en estado seco al inicio de la consolidación. Esto con el fin de permitir la cristalización de las sales y así evaluar el colapso en muestras con mayor cementación.
- Realizar ensayos de colapso por disolución para muestras con amplio rango de salinidades mayores a 5‰ y densidades secas mayores a 1,8 [t/m³].
- Evaluar la diferenciación del uso de suelos con contenido de sales como rellenos compactados según la sollicitación a la que se verá sometido, mediante ensayos de colapso con infiltración a distintas cargas verticales.
- Estudiar el colapso por disolución para suelos con distintas sales solubles que den cuenta del efecto de la variación de solubilidad.
- Evaluar el efecto de la distribución granulométrica y de la plasticidad de los suelos salinos ante el colapso por disolución de sales.
- Analizar la factibilidad de la compactación con agua de mar para rellenos masivos, controlados por Proctor Modificado.

Bibliografía

- Abarca, M. (2010). *Geoquímica En Suelos Salinos En El Distrito Minero Mantos De La Luna: Utilización En Exploración Minera*. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile.
- Abduljawwad, S. N., & Al-Amoudi, O. S. (1995). Geotechnical behaviour of saline sabkha soils. *Geotechnique*, 45 (3), 425-445.
- AlHattamleh, O. (2013). *An Assessment of Soil Collapsibility Due Dissolution of Salts*.
- Arifin, Y., & Schanz, T. (2009). Osmotic suction of highly plastic clays. *Acta Geotechnica*, 177-191.
- ASTM D 5333 – 03. (2003). *Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils*.
- ASTM D1557 – 12. (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*.
- ASTM D2216 – 10. (2010). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*.
- ASTM D2435M – 11. (2011). *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*.
- ASTM D2487 - 17. (2017). *Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified)*.
- ASTM D4318 – 17. (2017). *Standard Test Methods For Liquid Limit, Plastic Limit, And Plasticity Index Of Soils*.
- ASTM D854 – 14. (2014). *Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*.
- Bandini, P., & Sathiskumar, S. (2009). Effects of silt content and void ratio on the saturated hydraulic conductivity and compressibility of sand-silt mixtures. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(12), 1976-1980.
- BCN. (2019). *Clima y Vegetación Región de Atacama*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region3/clima.htm>
- BCN. (2019). *Región de Arica y Parinacota*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region15>
- Behzad, F., Hady, K., & Sudip, B. (2011). Effects of Salinity and Sand Content on Liquid Limit and Hydraulic Conductivity. *Australian Geomechanics, Volume 46 No 1*.
- Boggs Jr., S. (2014). *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. Pearson Education.
- Budhu, M. (2011). *Soil mechanics and foundations 3rd edition*. University of Arizona.

- Carmi, C. (2013). *Variación De La Permeabilidad Y Parámetros Consolidación En Relaves Tratados Con Agua De Mar*. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
- Cha, M. (2012). *Mineral dissolution in sediments*. (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology).
- Chernoff, H., & Lehmann, E. (1954). The use of maximum likelihood estimates in chi square tests for goodness-of-fit. *The Annals of Mathematical Statistics*, 579-586.
- CMGI. (2013). *Mecánica de Suelos Aplicada a Suelos Salinos*. Informe preparado para la Cámara Chilena de la Construcción.
- Coduto, D. P. (1999). *Geotechnical engineering: principles and practices*.
- Collins, B. D., & Sitar, N. (2009). Geotechnical properties of cemented sands in steep slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(10), 1359-1366.
- Corvalan, J., & Hervé, F. (1996). *Large Dams in Chile*. Chilean National Committee on Large Dams.
- Dirección General de Aguas. (1986). *Mapa Hidrogeológico de Chile*. Santiago, Chile.
- Ericksen, G. E. (1963). *Geology of the salt deposits and the salt industry of northern Chile*. US Geological Survey.
- Espinoza, C. (2006). *Existencia y origen de las aguas subterráneas*. Obtenido de Centro de Información de Recursos Naturales: <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/8>
- Fatahi, B., Khabbaz, H., & Basack, S. (2011). Effects of salinity and sand content on liquid limit and hydraulic conductivity. *Australian Geomechanics Journal*.
- Fattah, M., Yahya, A., Al-Hadidi, M., & Ahmed, B. (2013). Effect of salt content on total and matric suction of unsaturated soils. *European Scientific Journal - European Scientific Institute*, 228-245.
- Fonca, C., Acevedo, P., & Olguin, R. (2005). Geotechnical characterization of saline soils. En *Proceedings Of The International Conference On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering (Vol. 16, No. 2)* (pág. 503). AA Balkema Publishers.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Gajardo, A. (2001). *Depósitos de Nitratos y Salares en Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN.

- Gajardo, A., & Carrasco, R. (10-11 de Noviembre de 2010). *Salares del norte de Chile: potenciales fuente de litio*.
- González Garcés, J. (2017). *Análisis de la distribución de tamaños de partículas mediante difracción láser: aplicación para la mejora de mezclas de especias y aromas*. Tesis Doctoral.
- Guerrero, A. L., Gallucci, S. S., Michalijos, P., & Visciarelli, S. M. (2011). Países Andinos: aportes teóricos para un abordaje integrado desde las perspectivas geográfica y turística. *Huellas n° 15*, 121-138.
- Guerrero, A. M. (2014). *Consideraciones de diseño y ejecución para soluciones de fundación en suelos salinos de Alto Hospicio*. Santiago, Chile.
- He, J., & Chu, J. (2017). Cementation of sand due to salt precipitation in drying process. *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(3), 441-445.
- Hill, J. W., Petrucci, R. H., McCreary, T. W., & Perry, S. S. (2005). *General Chemistry, 4th ed.* Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Holtz, W. G., & Hilf, J. W. (1961). *Settlement of Soil Foundations Due to Saturation*. Proceedings, 5^a Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e ingeniería de Fundaciones, Paris, vol. 1, 1961, pp. 673-679.
- I.N.V. E - 157. (2013). *Determinación de la succión de un suelo con el método del papel de filtro*.
- Iesmat. (2017). *Fundamentos sobre el tamaño de una partícula*. Obtenido de <http://iesmat.com/iesmat/upload/file/Malvern/Productos-MAL/DIF-Fundamentos%20tam.%20de%20particula.pdf>
- ISO 13320. (2020). Particle size analysis — Laser diffraction methods.
- Karakouzian, M., Pitchford, A., Leonard, M., & Johnson, B. (1996). Measurements of soluble salt content of soils from arid and semi-arid regions. *Geotechnical testing journal*, 19(4), 364-372.
- Lide, D. R. (2012). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton: CRC.
- Malvern Panalytical. (2017). *Difracción láser*. Obtenido de Malvern Panalytical: <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/light-scattering/laser-diffraction>
- Maureira, S. (2012). *Respuesta Cíclica de Arenas de Relaves en un Amplio Rango de Presiones*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Ingeniería Geotécnica. Universidad de Chile.

- McDougall, J. R., Fleming, I. R., Thiel, R., Dewaele, P., Parker, D., & Kelly, D. (2015). Mass loss and volume change: from sand-salt analogues to MSW. *Multilevel Modeling of Secure Systems in QoP-ML*, 189.
- Meza Ochoa, V. E. (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 23-38.
- Miller, D. J., & Nelson, J. (2006). Osmotic suction in unsaturated soil mechanics. *Unsaturated Soils*, 1382-1393.
- Mishra, P. N., Scheuermann, A., Bore, T., & Li, L. (2019). Salinity effects on soil shrinkage characteristic curves of fine-grained geomaterials. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(1), 181-191.
- NCh3394. (2016). *Suelo salino — Requisitos geotécnicos y de instalaciones sanitarias para diseño y ejecución de obras*.
- NTM 010. (s.f.). *Recomendaciones para intervención en edificaciones emplazadas en Suelos Salinos*.
- Nusier, O. K., Al-Mufty, A. A., & Joradat, R. A. (2008). Determination of saline soils specific gravity. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 2(1), 1-19.
- Olguín, R. (2006). *Geotecnia de los Suelos Salinos del Norte de Chile*. Tesis para optar al grado de Magister en ciencias de la Ingeniería, Mención en Ingeniería Geotécnica. Universidad de Chile.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020). *FAO*. Obtenido de <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Orrego, J. P. (2002). *El Estado de las Aguas Terrestres en Chile: cursos y aguas subterráneas*. Fundación Terram. Santiago.
- Ortlieb, L. (1995). Paleoclimas Cuaternarios en el Norte Grande de Chile.
- Osama, N., Ahmed, A. M., & Rasheed, J. (2008). Determination of Saline Soils Specific Gravity. *Jordan Journal Of Civil Engineering*, Vol 2.
- Palma, C., & Riquelme, J. (2018). *Suelos Salinos y su uso en Rellenos*. X Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica.
- Pavez, A. (2014). Terremoto en el Norte Grande - Características Técnicas. *Revista BIT*, 1-14.
- Regional Salinity Laboratory (US). (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. US Department of Agriculture.

- Ren, X., Zhao, Y., Deng, Q., Kang, J., Li, D., & Wang, D. (2016). A relation of hydraulic conductivity—void ratio for soils based on Kozeny-Carman equation. *Engineering Geology*, *213*, 89-97.
- Sagüés, P. (2008). Propiedades de los suelos compactados. *Buenos Aires: LMSFIUBA*.
- Sanhueza, C., & Valenzuela, M. (2018). *Caracterización Geotécnica para el Diseño de Obras en Suelos Salinos del Norte de Chile*. X Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica.
- Saravia, A. A. (2018). Potencial de colapso en suelos limosos. *Ciencia Sur Vol. 4 N° 5*, 14-25.
- Skorin, A. (1971). *Efectos de los Suelos Salinos sobre Estructuras*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
- Stoertz, G. E., & Ericksen, G. E. (1974). *Geology of Salars in Northern Chile*. Washington: United States Government Printing Office.
- Tamblay, G. (1983). *Comportamiento de Fundaciones apoyadas en Suelos Salinos*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
- Thyagaraj, T., Bhavani, P., Das, A. P., & Julina, M. (2016). Collapse Behaviour of Compacted Coal Ashes. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, *2(1)*, 6.
- Valencia-González, Y., Yepes-García, J. A., & Echeverri-Ramírez, O. (2015). Evaluación por diferentes métodos del potencial de colapso de algunos suelos residuales en los Valles de Aburrá y San Nicolás. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, *(38)*, 60-64.
- Véliz, D. E. (2018). *Distribución de asociaciones evaporíticas en el Salar del Huasco Región de Tarapacá, Chile: Análisis espacio temporal a través de sensores remotos*. Viña del Mar, Chile.
- Vila, T. (1990). Salar Deposits in Northern Chile. *Stratabound Ore Deposits in the Andes*, 703-720.

Anexos

Anexo A. Ensayo Edométrico con infiltración de agua desmineralizada

- Deformación Vertical vs Tensión Vertical Efectiva

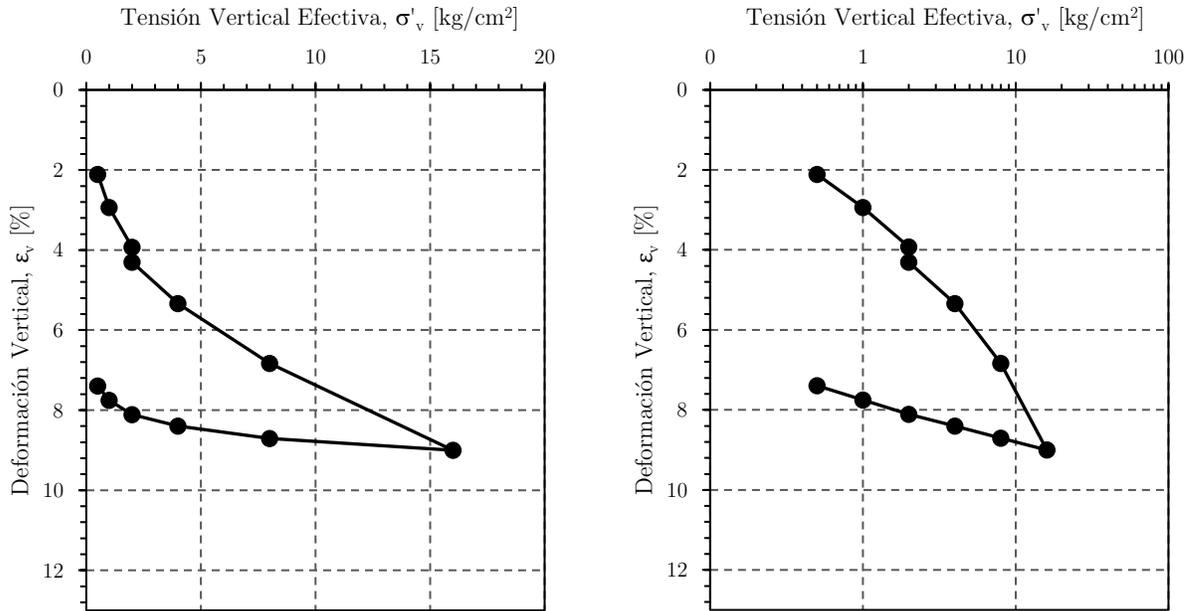


Figura A.1. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=2\%$ y $Sw=0\%$.

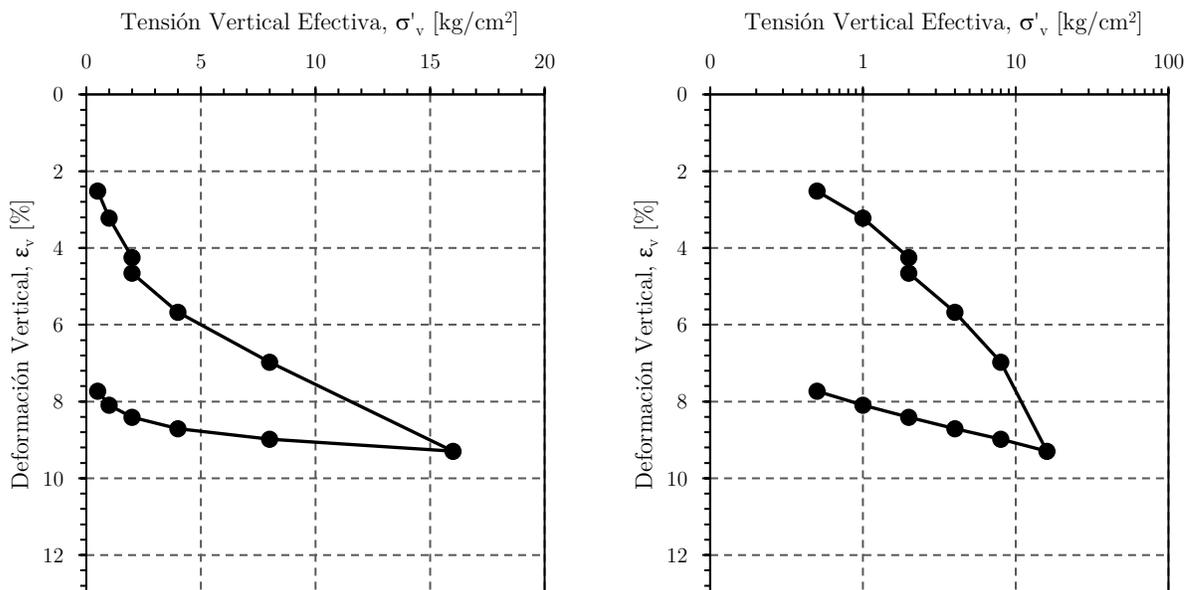


Figura A.2. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=3,5\%$ y $Sw=0\%$.

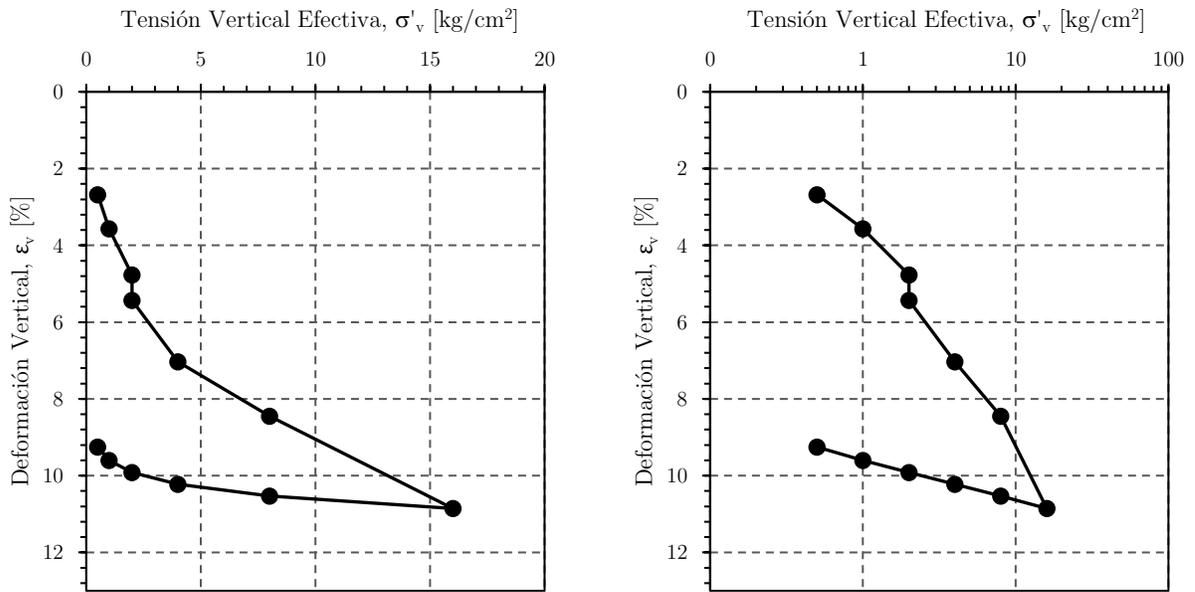


Figura A.3. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=7\%$ y $Sw=0\%$.

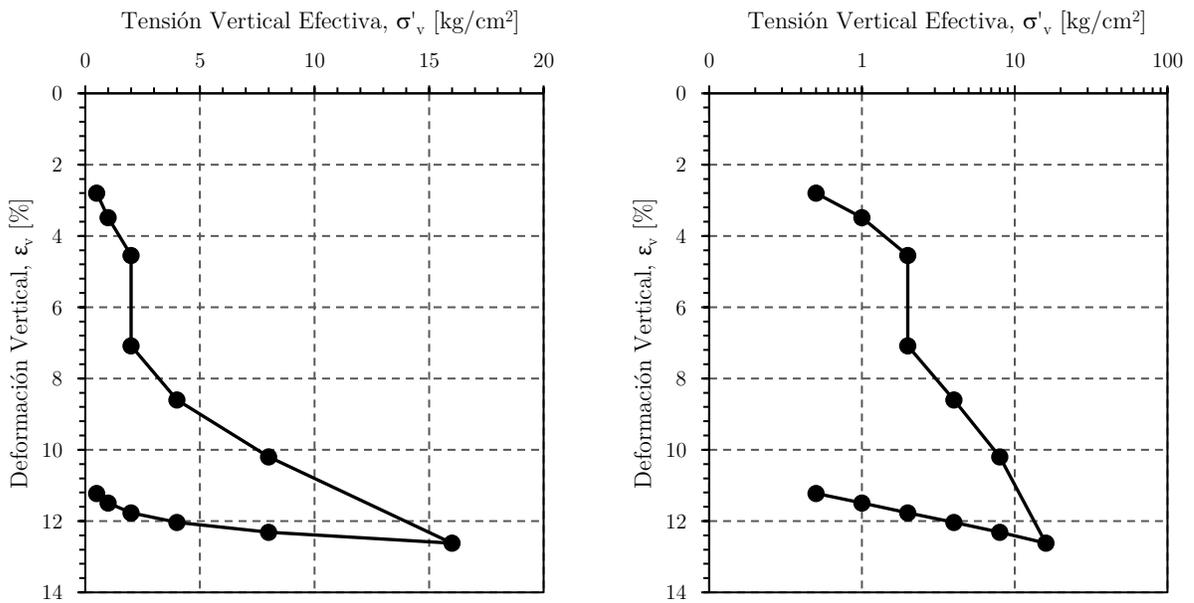


Figura A.4. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=12\%$ y $Sw=0\%$.

- Índice de vacíos vs Tensión Vertical Efectiva

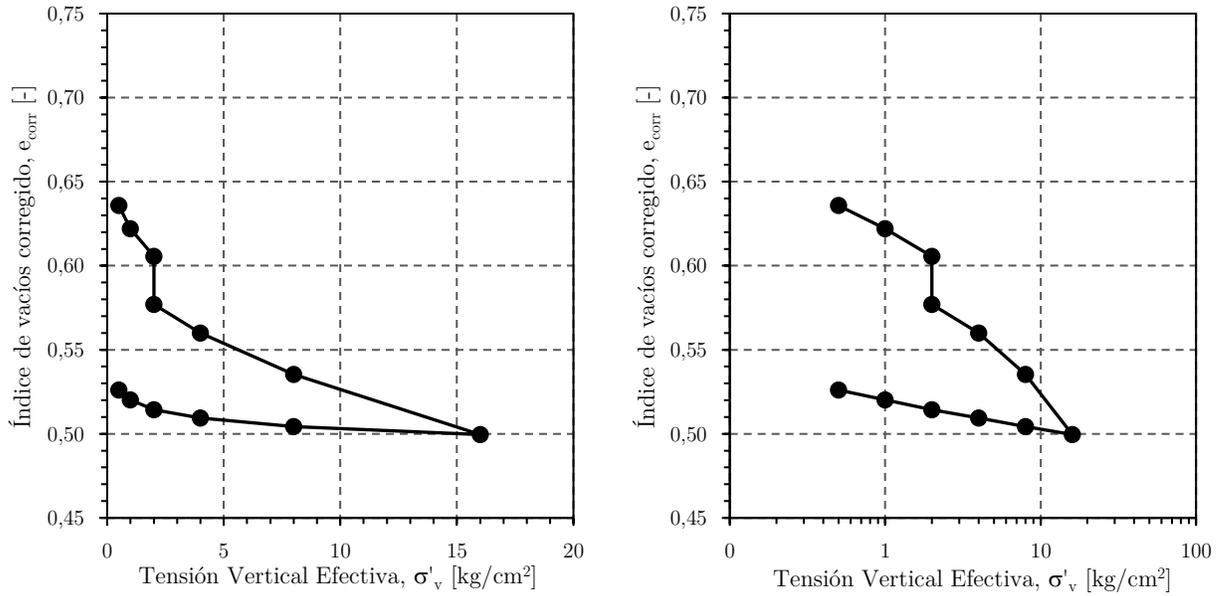


Figura A.5. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para $S=2\%$ y $Sw=0\%$.

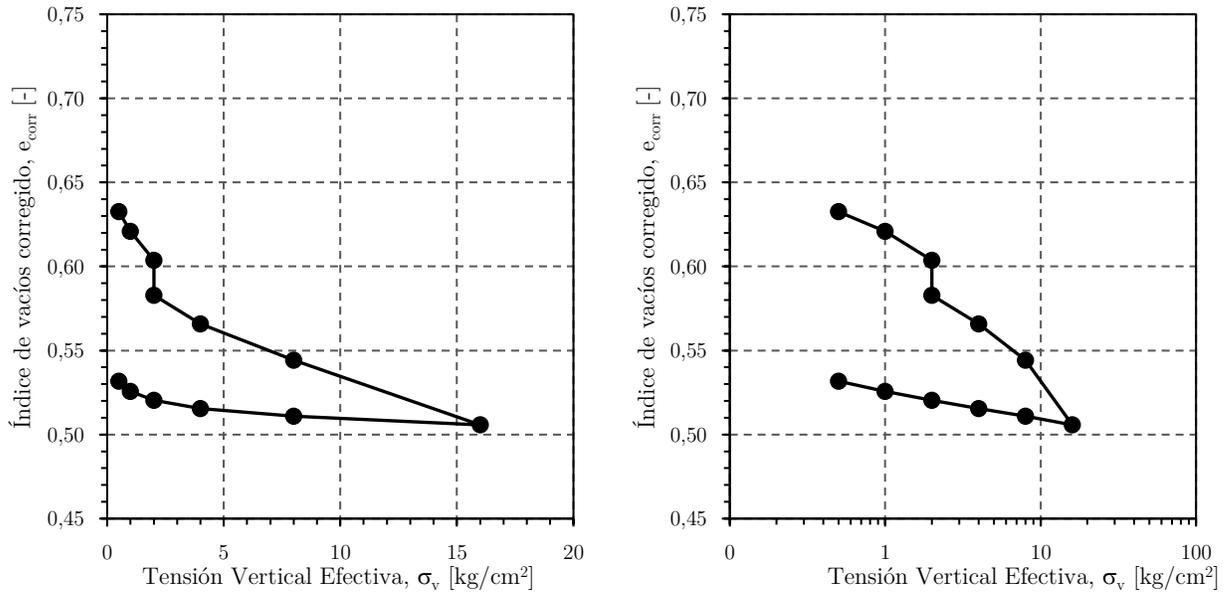


Figura A.6. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para $S=3,5\%$ y $Sw=0\%$.

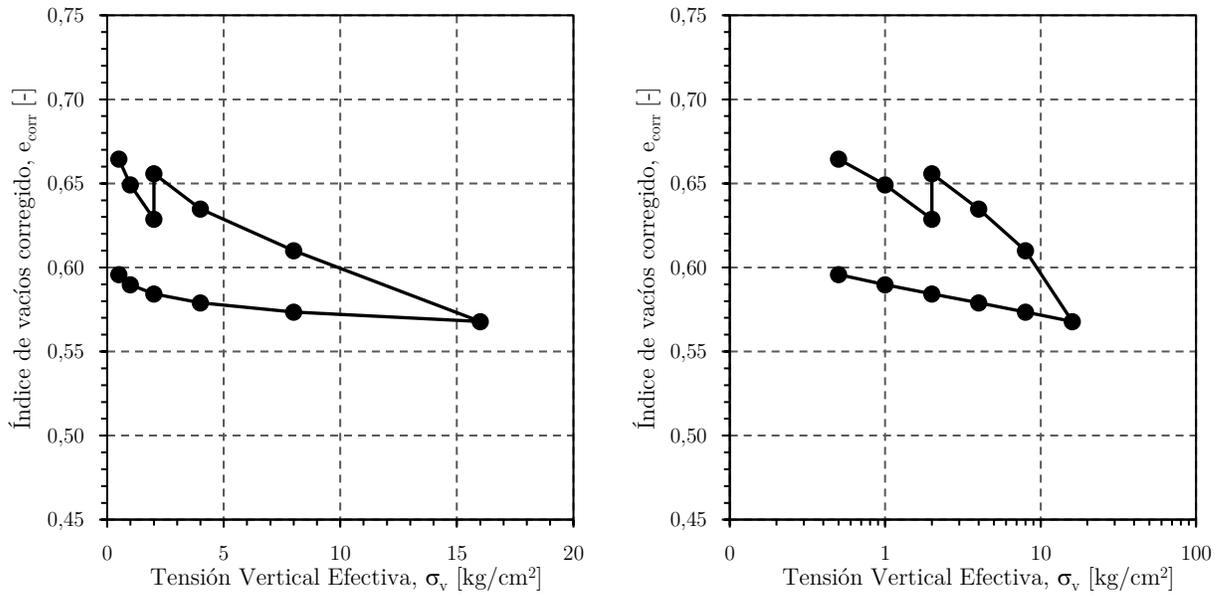


Figura A.7. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para $S=7\%$ y $Sw=0\%$.

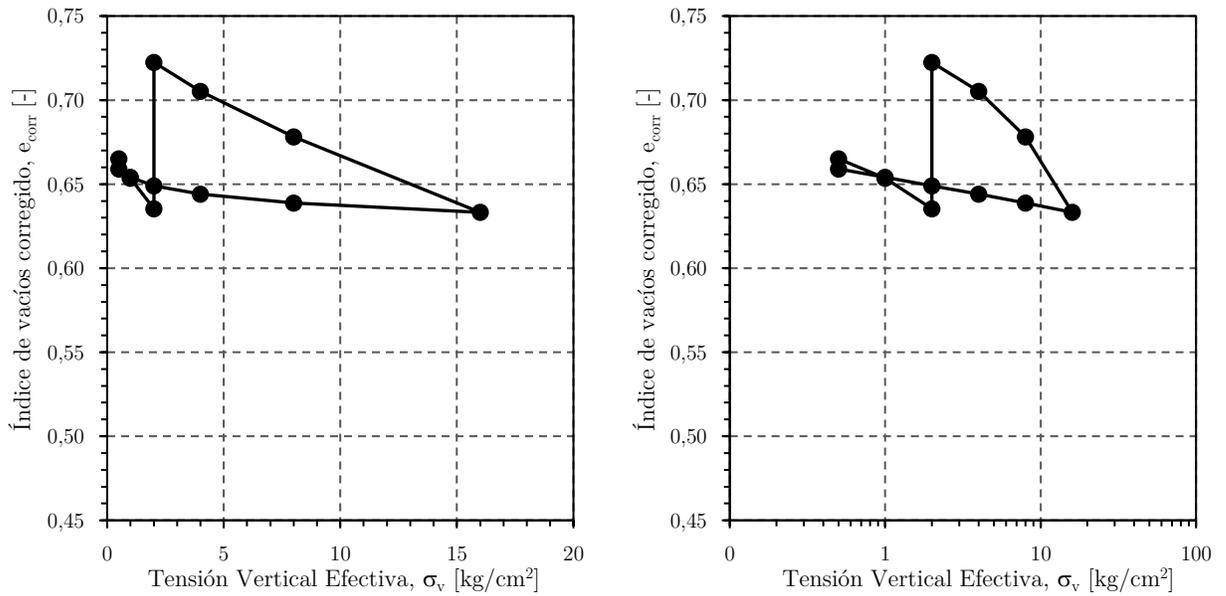


Figura A.8. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para $S=12\%$ y $Sw=0\%$.

- Deformación por infiltración en el tiempo

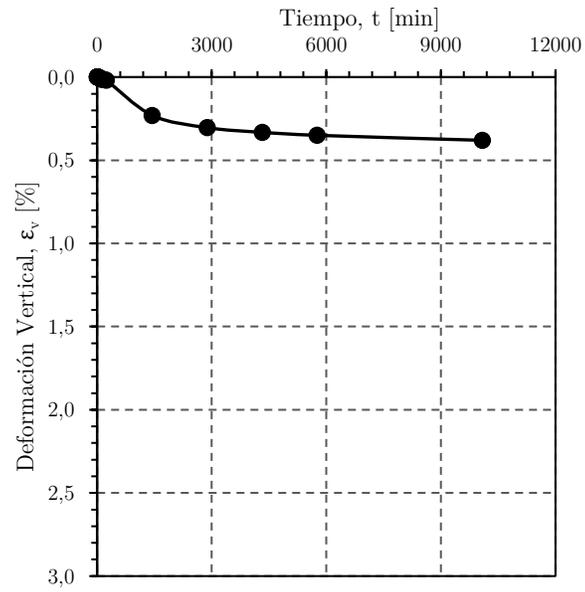


Figura A.9. De deformación unitaria por disolución vs tiempo S=2% y Sw=0%.

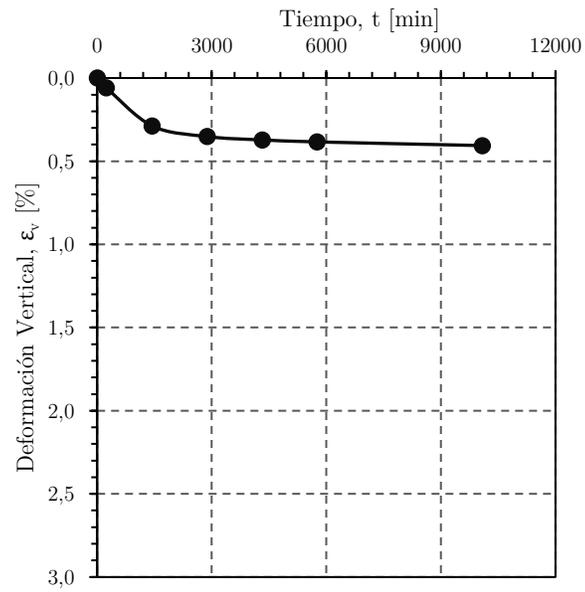


Figura A.10. De deformación unitaria por disolución vs tiempo S=3,5% y Sw=0%.

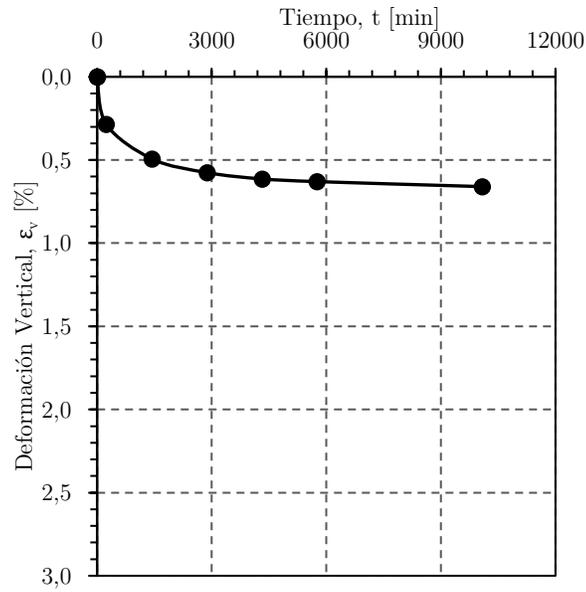


Figura A.11. De deformación unitaria por disolución vs tiempo $S=3,5\%$ y $S_w=0\%$.

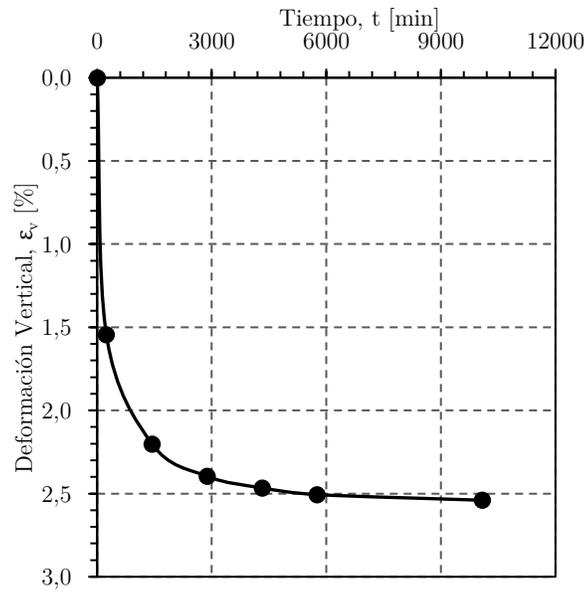


Figura A.12. De deformación unitaria por disolución vs tiempo $S=12\%$ y $S_w=0\%$.

Anexo B. Ensayo Edométrico con infiltración de salmuera

- Deformación Vertical vs Tensión Vertical Efectiva

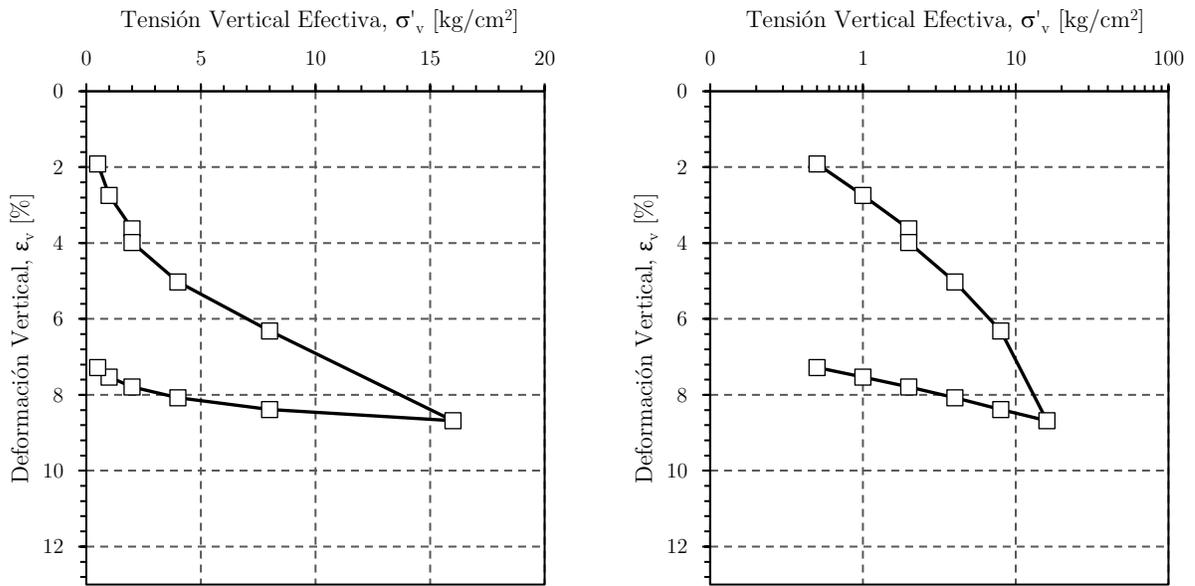


Figura B.1. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=2\%$ y $Sw=15\%$.

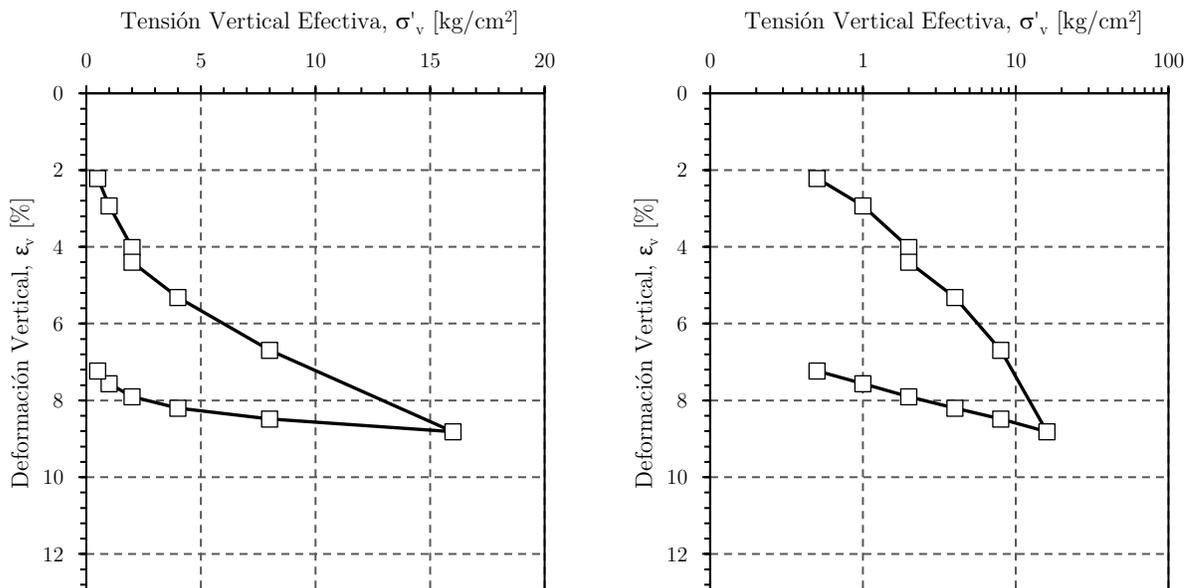


Figura B.2. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=3,5\%$ y $Sw=15\%$.

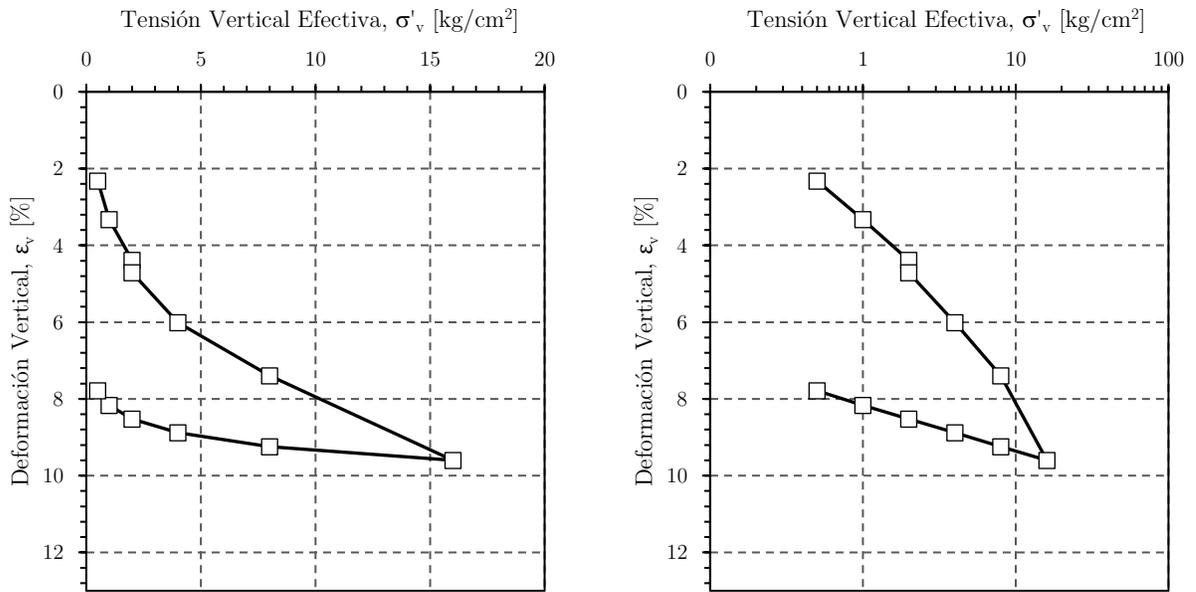


Figura B.3. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=7\%$ y $Sw=15\%$.

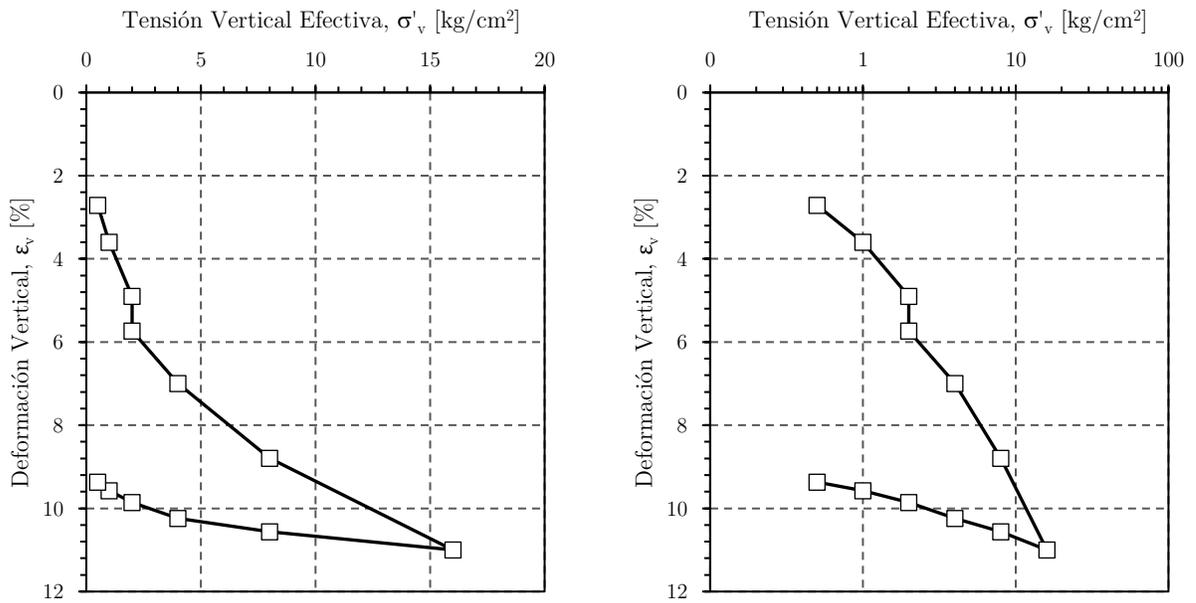


Figura B.4. Deformación Vertical vs tensión vertical efectiva para $S=12\%$ y $Sw=15\%$.

- Índice de vacíos vs Tensión Vertical Efectiva

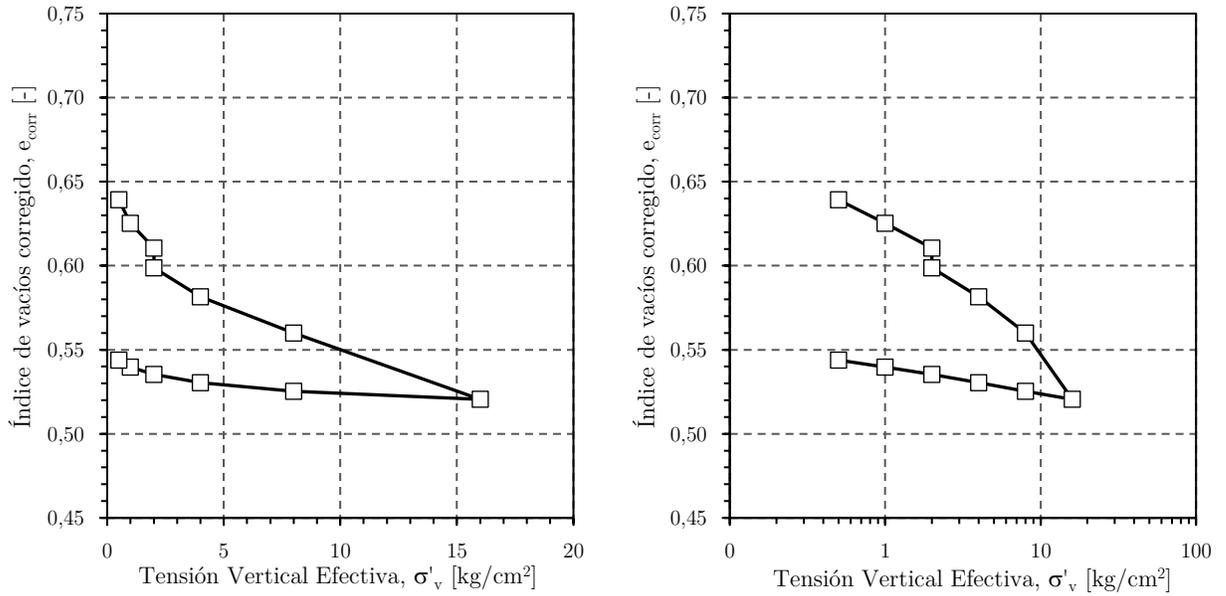


Figura B.5. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para S=2% y Sw=15%.

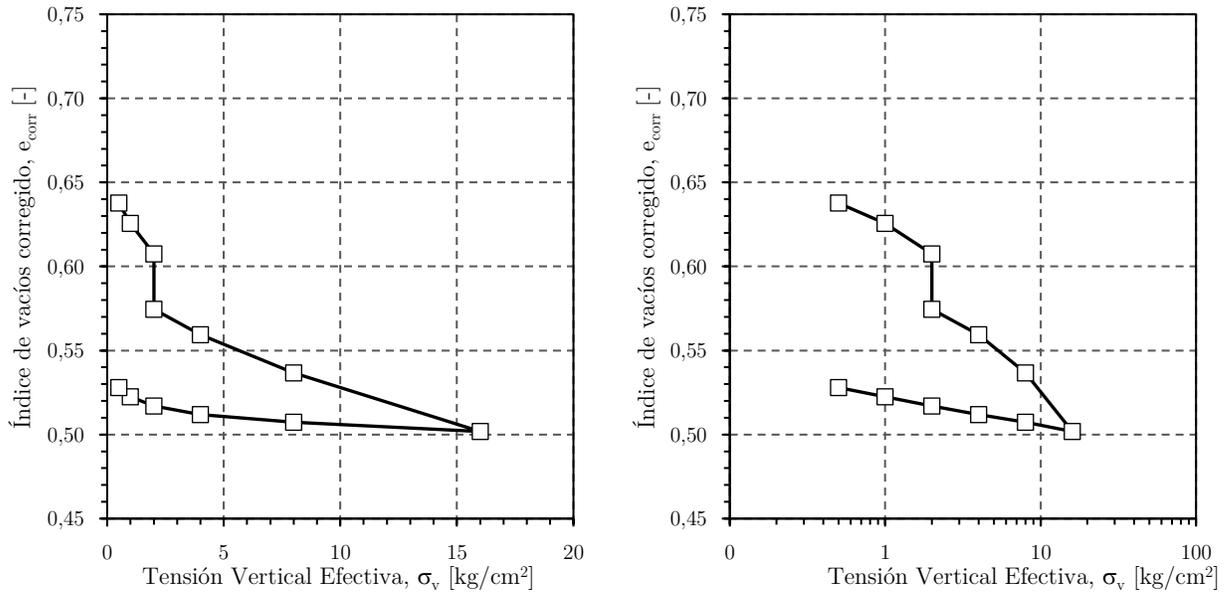


Figura B.6. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para S=3,5% y Sw=15%.

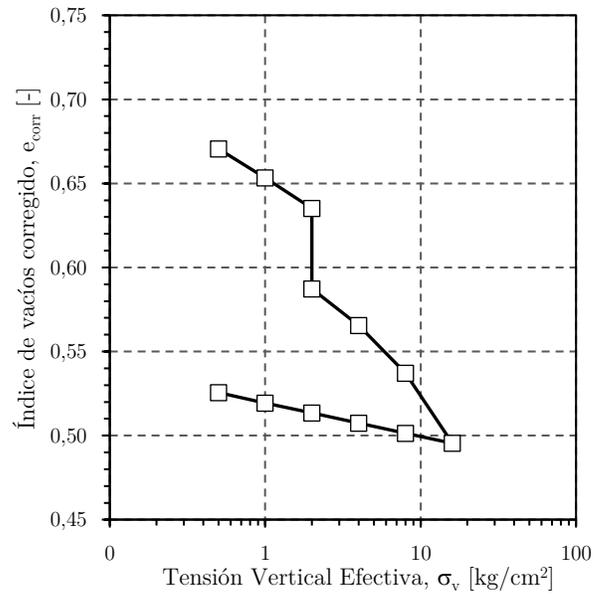
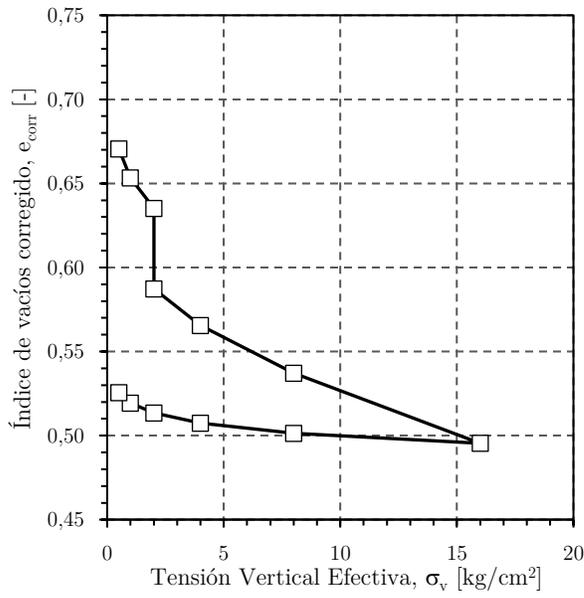


Figura B.7. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para $S=7\%$ y $Sw=15\%$.

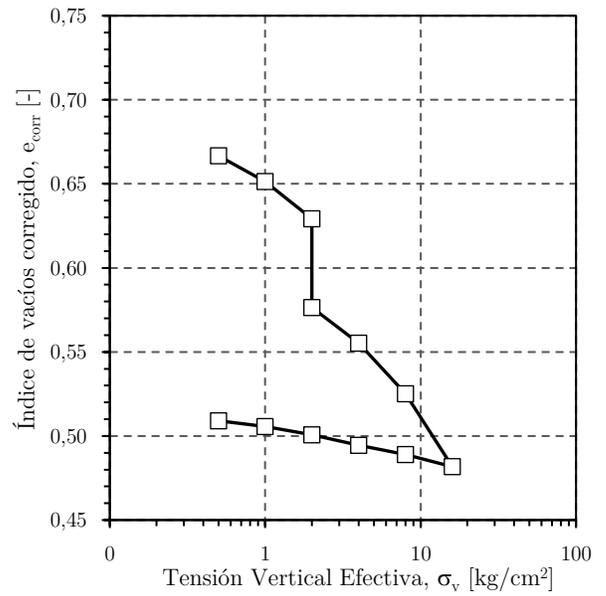
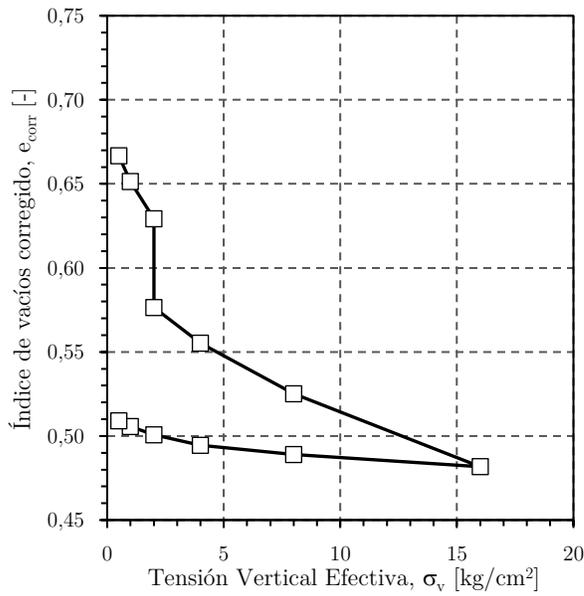


Figura B.8. Índice de vacíos vs tensión vertical efectiva para $S=12\%$ y $Sw=15\%$.

- Deformación por infiltración en el tiempo

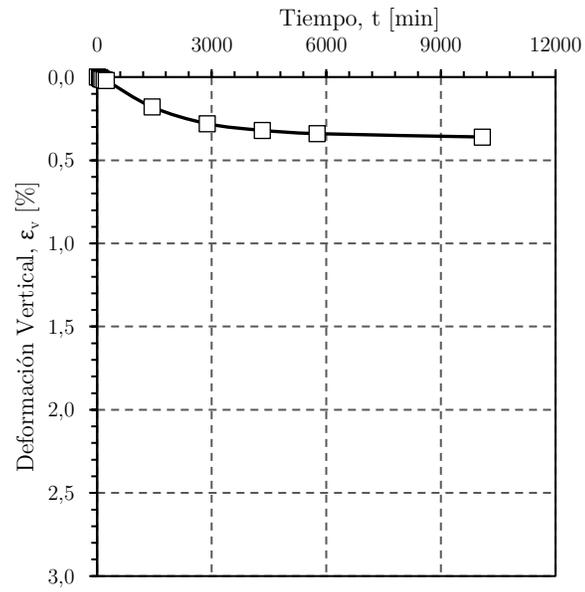


Figura B.9. Deformación unitaria por disolución vs tiempo S=2% y Sw=15%.

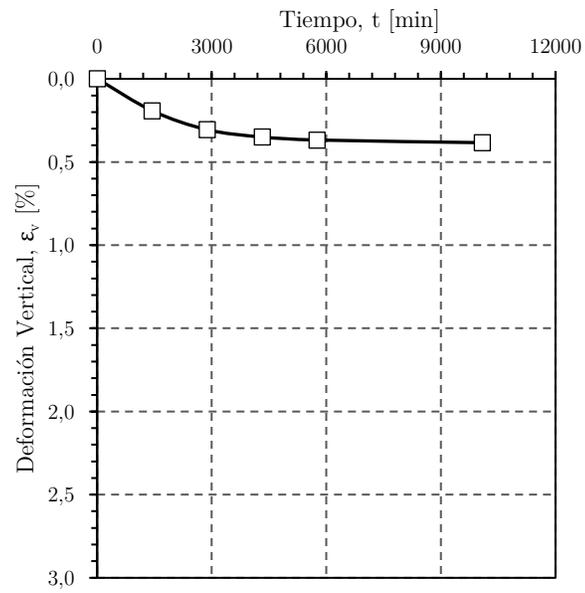


Figura B.10. Deformación unitaria por disolución vs tiempo S=3,5% y Sw=15%.

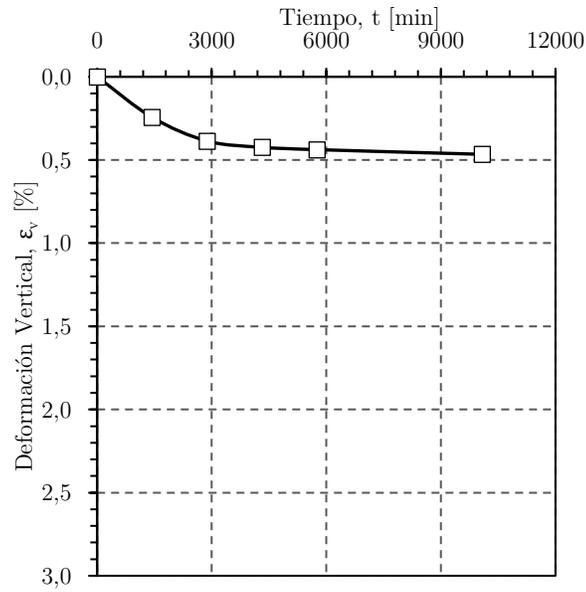


Figura B.11. Deformación unitaria por disolución vs tiempo S=7% y Sw=15%.

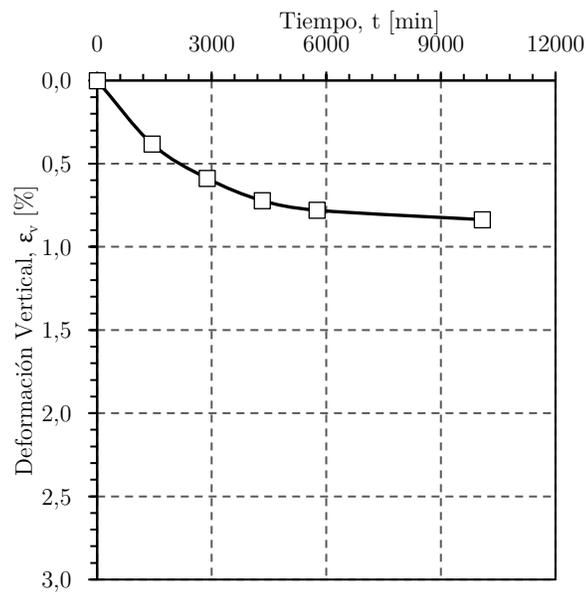


Figura B.12. Deformación unitaria por disolución vs tiempo S=12% y Sw=15%.

Anexo C. Salinidad Máxima

Para determinar el máximo contenido de sales que puede contener un suelo salino, se considera que el volumen de vacíos del material está ocupado completamente por las sales solubles. Luego, el peso de las sales contenidas queda definido como función su gravedad específica y del volumen de vacíos:

$$W_{ss} = V_v \cdot G_{ss}$$

A su vez, el volumen de vacíos se define en función del volumen de sólidos no solubles y del índice de vacíos del material:

$$W_{ss} = e \cdot V_s \cdot G_{ss}$$
$$W_{ss} = e \cdot \frac{W_s}{G_s} \cdot G_{ss}$$

Además, el peso de las sales puede ser expresado como el producto de la salinidad del suelo por el peso de los sólidos no solubles:

$$W_{ss} = S \cdot W_s$$

Por lo tanto, la salinidad máxima que puede ser contenida en el suelo es una función de la gravedad específica de la sal soluble, gravedad específica de los sólidos no solubles y del índice de vacíos del material:

$$S_{max} = e \cdot \frac{G_{ss}}{G_s}$$

Anexo D. Tabla de distribución de χ^2

Tabla D.1. Distribución de χ^2

v/p	0,001	0,0025	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,15
1	10,8274	9,1404	7,8794	6,6349	5,0239	3,8415	2,7055	2,0722
2	13,8150	11,9827	10,5965	9,2104	7,3778	5,9915	4,6052	3,7942
3	16,2660	14,3202	12,8381	11,3449	9,3484	7,8147	6,2514	5,3170
4	18,4662	16,4238	14,8602	13,2767	11,1433	9,4877	7,7794	6,7449
5	20,5147	18,3854	16,7496	15,0863	12,8325	11,0705	9,2363	8,1152
6	22,4575	20,2491	18,5475	16,8119	14,4494	12,5916	10,6446	9,4461
7	24,3213	22,0402	20,2777	18,4753	16,0128	14,0671	12,0170	10,7479
8	26,1239	23,7742	21,9549	20,0902	17,5345	15,5073	13,3616	12,0271
9	27,8767	25,4625	23,5893	21,6660	19,0228	16,9190	14,6837	13,2880
10	29,5879	27,1119	25,1881	23,2093	20,4832	18,3070	15,9872	14,5339
11	31,2635	28,7291	26,7569	24,7250	21,9200	19,6752	17,2750	15,7671
12	32,9092	30,3182	28,2997	26,2170	23,3367	21,0261	18,5493	16,9893
13	34,5274	31,8830	29,8193	27,6882	24,7356	22,3620	19,8119	18,2020
14	36,1239	33,4262	31,3194	29,1412	26,1189	23,6848	21,0641	19,4062
15	37,6978	34,9494	32,8015	30,5780	27,4884	24,9958	22,3071	20,6030
16	39,2518	36,4555	34,2671	31,9999	28,8453	26,2962	23,5418	21,7931
17	40,7911	37,9462	35,7184	33,4087	30,1910	27,5871	24,7690	22,9770
18	42,3119	39,4220	37,1564	34,8052	31,5264	28,8693	25,9894	24,1555