



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

**ANÁLISIS DE LA COLAPSABILIDAD DE SUELOS SALINOS EN  
FUNDACIONES DE MUROS PARA DEPÓSITOS DE RELAVES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**BENJAMÍN IGNACIO LATORRE TORRES**

PROFESOR GUÍA:  
JOSÉ TOMÁS ERRÁZURIZ BLAU

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
CÉSAR PASTÉN PUCHI  
MAURICIO ABDALLAH RUIZ

SANTIAGO DE CHILE  
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: **BENJAMÍN IGNACIO LATORRE TORRES**  
FECHA: 2021  
PROF. GUÍA: JOSÉ TOMÁS ERRÁZURIZ BLAU

## **ANÁLISIS DE LA COLAPSABILIDAD DE SUELOS SALINOS EN FUNDACIONES DE MUROS PARA DEPÓSITOS DE RELAVES**

El norte de Chile se caracteriza por la presencia de suelos salinos, los cuales pueden presentar importantes pérdidas de volumen cuando entran en contacto con agua y se produce la disolución de las sales en su interior. Sobre estos suelos se emplazan grandes estructuras como muros para depósitos de relaves, por lo que es fundamental comprender los asentamientos que se pueden generar, con el objetivo de anticipar y prevenir potenciales daños en la estructura.

Este trabajo recoge las investigaciones realizadas por Skorin (1971), Tamblay (1983) y Olguín (2006) para el estudio de los suelos en el norte de Chile. A partir de esto, se identifican los procesos formativos de los depósitos salinos y se estudian sus características principales.

Se describen los modelos de fases y parámetros índices presentados por Olguín (2006) para el estudio de suelos salinos, con el objetivo de identificar indicadores con el mejor potencial para estimar las eventuales deformaciones producidas por la disolución de sales. Para esto se analizan las características particulares de cada parámetro descrito.

Para los estudios de deformaciones en suelo salino se pueden realizar ensayos de colapsos, los cuales permiten reproducir las condiciones en terreno y evaluar directamente los asentamientos. A partir de estos resultados, se elabora una metodología para estimar asentamientos considerando diferentes niveles de carga sobre el estrato salino analizado.

Este trabajo contempla la recopilación de una base de datos obtenida de informes de laboratorios para el estudio de un depósito de relaves emplazado en el norte de Chile. Se presentan las descripciones de las muestras, granulometrías, densidades, contenido de sales y resultados de deformaciones obtenidas de ensayos de colapso. A partir de esta base de datos, se establecen correlaciones entre la deformación producida por únicamente por efecto de la disolución de sales y los distintos parámetros índice, con el objetivo de estimar la magnitud de estas deformaciones.

Los resultados de este trabajo muestran que el parámetro de densidad seca sin sales presenta un mayor potencial de correlación con las deformaciones por disolución de sales. A partir de esto, se elabora una metodología simplificada para estimar los máximos asentamientos que se pueden producir en un estrato salino, conociendo el parámetro de densidad seca sin sales y la carga vertical sobre el punto medio del estrato analizado.

*A mi familia.*

# Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mis padres, Claudia y Jaime, por todo su amor, por siempre querer lo mejor para mí y apoyarme en todo. Por enseñarme a ser una mejor persona con su ejemplo. A mis hermanos, a mis abuelos y a toda mi familia por su cariño y preocupación. A mi bisabuela por cuidarme y preocuparse por mí.

A mi grupo de amigos de la universidad: Álvaro, Constanza, Dania, David, Flavia, Maca, Marya, Simón y Vale. Por los almuerzos, las juntas, las risas y todos los momentos compartidos durante estos años.

A mis amigos de civil, por los estudios en la salita y las risas de cada día. A Nico por todo su apoyo durante la carrera y por una amistad que valoro mucho. A Fran por su compañía y apoyo. A Karina por su particular sentido del humor.

A mis amigos del colegio, que a pesar de juntarnos con menos frecuencia que antes, siempre está el apoyo y las risas.

A todas las personas que fui conociendo en la universidad, que con sólo un saludo o una conversación hacían más agradable el día a día.

A Cata, por su preocupación, por hacerme reír y por motivarme siempre. Por hacer de este último año y proceso una mejor experiencia.

Por último, agradecer a mi profesor guía, Tomás Errázuriz, por el compromiso en este trabajo y por darse el tiempo de explicarme todo las veces que fuera necesario. A pesar de las dificultades durante este trabajo, siempre se mantuvo preocupado para que saliera todo bien. Agradecer al profesor César Pastén por participar en esta memoria y por sus comentarios. También agradecer a Mauricio Abdallah y Roberto León por su interés en este trabajo.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Estructura del informe . . . . .	2
<b>2. Marco Conceptual</b>	<b>4</b>
2.1. Origen y características de los depósitos salinos del norte de Chile . . . . .	4
2.1.1. Procesos geológicos . . . . .	4
2.1.2. Tipos de depositación . . . . .	6
2.1.3. Zonificación y características de los depósitos salinos . . . . .	7
2.1.4. Geomorfología . . . . .	9
2.1.5. Clima . . . . .	14
2.1.6. Formaciones salinas típicas . . . . .	16
2.2. Tipos y solubilidad de las sales . . . . .	18
2.2.1. Definición de las sales . . . . .	18
2.2.2. Solubilidad de las sales . . . . .	18
<b>3. Modelo de Fases y Parámetros Índice de Suelos Salinos</b>	<b>20</b>
3.1. Modelo de fases en suelos salinos . . . . .	20
3.2. Parámetros índice para suelos salinos . . . . .	21
3.3. Discusión de parámetros índice para el análisis de deformaciones . . . . .	24
<b>4. Deformaciones por Disolución de Sales en Suelos Salinos</b>	<b>27</b>
4.1. Introducción al estudio de deformaciones en suelos salinos . . . . .	27
4.2. Ensayos de colapso . . . . .	27
4.3. Estimación de deformaciones para distintos niveles de carga . . . . .	30
4.4. Metodología para estimación de asentamiento a partir de modelos de carga . . . . .	32
<b>5. Recopilación de Datos de Proyecto de Muro para Depósitos de Relaves en Suelos Salinos</b>	<b>35</b>
5.1. Antecedentes de los datos utilizados . . . . .	35
5.2. Tipos de muestras . . . . .	36
5.3. Granulometrías referenciales . . . . .	38
5.4. Clasificación USCS y unidades geológicas . . . . .	41
5.5. Salinidad, densidad seca con sales y densidad seca sin sales . . . . .	43
5.6. Índice de vacíos y porosidad . . . . .	47

5.7. Resultados de ensayos de colapso . . . . .	49
5.7.1. Deformación acumulada . . . . .	49
5.7.2. Deformación producto de la disolución de sales . . . . .	51
<b>6. Análisis de Correlaciones</b>	<b>53</b>
6.1. Correlaciones de los diferentes parámetros índice . . . . .	53
6.2. Efecto de la carga vertical sobre la muestra . . . . .	57
6.3. Relación potencial de vacíos . . . . .	60
6.4. Estimación de máximas deformaciones por disolución de sales . . . . .	61
<b>7. Metodología Simplificada para la estimación de Asentamientos Máximos</b>	<b>63</b>
7.1. Desarrollo de metodología simplificada para la estimación de asentamientos máximos . . . . .	63
7.2. Comparación de metodologías para la estimación de asentamientos . . . . .	67
7.2.1. Metodología a partir de modelos de carga . . . . .	67
7.2.2. Metodología simplificada para estimación de asentamientos máximos	69
<b>8. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>70</b>
8.1. Conclusiones . . . . .	70
8.2. Recomendaciones: . . . . .	72
<b>Bibliografía</b>	<b>73</b>
<b>Anexo A. Demostración del parámetro densidad seca sin sales</b>	<b>74</b>
<b>Anexo B. Determinación del contenido real de sales en la muestra</b>	<b>76</b>
<b>Anexo C. Variación de altura en muestras durante el ensayo de colapso</b>	<b>79</b>
<b>Anexo D. Crecimiento de deformación en función de la carga vertical</b>	<b>81</b>

# Índice de Tablas

2.1.	Análisis químico sobre muestra de camanchaca condensada, Antofagasta (Erickson, 1963 [5]; Olgúin, 2006 [10]) . . . . .	7
2.2.	Tipo de Depósito Salino en relación al Origen Geológico de las Sales Solubles Presentes (Olgúin, 2006 [10]) . . . . .	8
2.3.	Aniones y Cationes típicos en los Depósitos Salinos del Norte de Chile (Olgúin, 2006 [10]) . . . . .	18
2.4.	Solubilidades de las Sales más comunes del Norte de Chile (Olgúin, 2006 [10])	19
5.1.	Tipo de prospección y profundidad de cada muestra, Campaña A . . . . .	36
5.2.	Tipo de prospección y profundidad de cada muestra, Campaña B . . . . .	36
5.3.	Tipo de prospección y profundidad de cada muestra, Campaña C . . . . .	37
5.4.	Tipo de prospección y profundidad de cada muestra, Olgúin . . . . .	37
5.5.	Clasificación USCS y descripción de las unidades geológicas, Campaña A . . .	41
5.6.	Clasificación USCS y descripción de las unidades geológicas, Campaña B . . .	42
5.7.	Descripción de las unidades geológicas, Campaña C . . . . .	42
5.8.	Densidad seca con sales ( $\gamma_{dCS}$ ), salinidad ( $S$ ), densidad seca sin sales ( $\gamma_{dSS}$ ) y $G_S$ , Campaña A . . . . .	44
5.9.	Densidad seca con sales ( $\gamma_{dCS}$ ), salinidad ( $S$ ), densidad seca sin sales ( $\gamma_{dSS}$ ) y $G_S$ , Campaña B . . . . .	44
5.10.	Densidad seca con sales ( $\gamma_{dCS}$ ), salinidad ( $S$ ), densidad seca sin sales ( $\gamma_{dSS}$ ) y $G_S$ , Campaña C . . . . .	44
5.11.	Densidad seca con sales ( $\gamma_{dCS}$ ), salinidad ( $S$ ), densidad seca sin sales ( $\gamma_{dSS}$ ) y $G_S$ , Campaña C . . . . .	45
5.12.	Índice de vacíos, porosidad, índice de vacíos salino y porosidad salina de cada muestra, Campaña A . . . . .	47
5.13.	Índice de vacíos, porosidad, índice de vacíos salino y porosidad salina de cada muestra, Campaña B . . . . .	47
5.14.	Índice de vacíos, porosidad, índice de vacíos salino y porosidad salina de cada muestra, Campaña C . . . . .	48
5.15.	Índice de vacíos, porosidad, índice de vacíos salino y porosidad salina de cada muestra, Olgúin . . . . .	48
5.16.	Deformaciones obtenidas a partir del ensayo de colapso, Campaña A . . . . .	49
5.17.	Deformaciones obtenidas a partir del ensayo de colapso, Campaña B . . . . .	50
5.18.	Deformaciones obtenidas a partir del ensayo de colapso, Campaña C . . . . .	50
5.19.	Deformación por disolución de sales, Campaña A . . . . .	51
5.20.	Deformación por disolución de sales, Campaña B . . . . .	51
5.21.	Deformación por disolución de sales, Campaña C . . . . .	52
5.22.	Deformación por disolución de sales, Olgúin . . . . .	52

7.1.	Variables de ejemplo para la estimación de asentamientos máximos (metodología simplificada) . . . . .	65
7.2.	Parámetros de ajuste para los modelos de carga de la muestra CC-S10-M1 . .	67
7.3.	Variables del problema para la estimación de asentamientos (modelos de carga)	68
7.4.	Variable del problema para la estimación de asentamientos máximos (metodología simplificada) . . . . .	69
B.1.	Cálculo de la salinidad corregida, Campaña C . . . . .	78
C.1.	Variación de alturas de probetas durante ensayo de colapso, Campaña A . . .	79
C.2.	Variación de alturas de probetas durante ensayo de colapso, Campaña B . . .	79
C.3.	Variación de alturas de probetas durante ensayo de colapso, Campaña C . . .	80



# Índice de Ilustraciones

2.1.	Avances y Regresiones del paleo-océano pacífico (Hervé y Corvalán, 1982 [7], Olgúin, 2006 [10]) . . . . .	5
2.2.	Esquema de distribución de los Depósitos Salinos (Tamblay, 1983 [8]; Olgúin, 2006 [10]) . . . . .	9
2.3.	Perfil Geográfico del Norte Grande de Chile (Fuente: IGM) . . . . .	10
2.4.	Geomorfología, Región de Arica y Parinacota (Fuente: Educarchile) . . . . .	12
2.5.	Geomorfología, Región de Tarapacá (Fuente: Educarchile) . . . . .	12
2.6.	Geomorfología, Región de Antofagasta (Fuente: Educarchile) . . . . .	13
2.7.	Geomorfología, Región de Atacama (Fuente: Educarchile) . . . . .	14
2.8.	Mapa Climático General del Norte Grande (Fuente: Atlas Escolar IGM-SM, 2015)	16
3.1.	Esquema teórico del modelo de fases para suelos salinos (Modificado Olgúin [10])	20
3.2.	Esquema de muestras con alta densidad seca sin sales . . . . .	25
3.3.	Esquema de muestras con baja densidad seca sin sales . . . . .	25
4.1.	Esquema representativo del del montaje de la muestra en el edómetro (Elaboración propia) . . . . .	28
4.2.	Gráfico representativo de los resultados del ensayos de colapso . . . . .	29
4.3.	Determinación de modelos de carga para estado seco y con sales disueltas (ecuación 4.3) . . . . .	31
4.4.	Esquema representativo para el diseño de un muro para depósito de relave (metodología a partir de modelos de carga) . . . . .	32
4.5.	Esquema representativo de la trayectoria de deformaciones por efecto de una carga de muro en la fundación . . . . .	33
5.1.	Descripción de la nomenclatura asignada a la muestras . . . . .	35
5.2.	Resumen con profundidades para cada prospección según campaña . . . . .	38
5.3.	Granulometría referencial, Campaña A . . . . .	39
5.4.	Granulometría referencial, Campaña B . . . . .	39
5.5.	Granulometría referencial, Campaña C . . . . .	40
5.6.	Granulometría referencial, Olgúin . . . . .	40
5.7.	Salinidad vs profundidad de extracción . . . . .	45
5.8.	Densidad seca con sales vs profundidad de extracción . . . . .	46
5.9.	Densidad seca sin sales vs profundidad de extracción . . . . .	46
6.1.	Salinidad vs deformación por disolución de sales, según campaña . . . . .	53
6.2.	Densidad seca con sales vs deformación por disolución de sales, según campaña	54
6.3.	Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales, según campaña	55
6.4.	Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales (descipción de límites) . . . . .	55
6.5.	Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales (rangos de salinidad)	56

6.6.	Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales para puntos sobre $\gamma_{dSS} = 1,55$ [t/m <sup>3</sup> ] . . . . .	56
6.7.	Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales (según carga aplicada en saturación) . . . . .	57
6.8.	Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales a un esfuerzo de referencia. Campañas A, B y C. . . . .	58
6.9.	Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales a un esfuerzo de referencia. Campañas A, B y C. (Sobre $\gamma_{dSS} = 2,0$ [t/m <sup>3</sup> ]) . . . . .	59
6.10.	Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales (datos a un esfuerzo de referencia de 2 [kg/cm <sup>2</sup> ]) . . . . .	59
6.11.	RPV vs deformación por disolución de sales . . . . .	60
6.12.	Determinación de máxima deformación por disolución de sales a partir de la carga y la densidad seca sin sales . . . . .	61
7.1.	Esquema representativo para el diseño de un muro para depósito de relave . .	63
7.2.	Ejemplo de metodología para cálculo de asentamientos (Variación de espesor de estrato salino considerando valores de tabla 7.1) . . . . .	65
7.3.	Ejemplo de metodología para cálculo de asentamientos (Variación de altura de muro considerando valores de tabla 7.1) . . . . .	66
7.4.	Determinación de modelos de carga para la muestra CC-S10-M1 . . . . .	67
D.1.	Crecimiento de la deformación por disolución de sales en función de la carga vertical (para $\gamma_{dSS} = 1,55$ [t/m <sup>3</sup> ]) . . . . .	81

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

En el norte de Chile es posible identificar la presencia de suelos salinos, los cuales se caracterizan por un cambio de estructura interna en caso de disolverse sus sales. Sobre estos suelos, en el ámbito de la gran minería del cobre, se pueden fundar grandes estructuras como muros para depósitos de relaves, por lo que resulta fundamental conocer el comportamiento de estos suelos cuando son expuestos a condiciones de humedad o flujos de agua. En el caso particular de los depósitos de relaves, uno de los requisitos fundamentales es asegurar una revancha operacional mínima para el almacenamiento de relaves y un desempeño estructural adecuado. Para esto se requiere un estudio completo de las deformaciones de los suelos en la fundación, debido a que se pueden generar asentamientos generalizados del muro (pérdida de revancha) o asentamientos diferenciales (grietas y eventuales problemas de desempeño estructural).

Los depósitos de suelos salinos en su condición natural presentan una apreciable competencia geomecánica, asociada a una importante rigidez y elevada resistencia al corte. Esta competencia se debe principalmente a las propiedades cementantes que aportan las sales a la estructura del suelo [2]. Cuando estos suelos entran en contacto con agua, sus sales se pueden disolver y alterar la estructura causando cambios de volumen, lo que se refleja en importantes asentamientos verticales.

Las deformaciones en suelos salinos se pueden estudiar con ensayos edométricos especiales, llamados ensayos de colapso. Estos permiten evaluar directamente en laboratorio los asentamientos sobre muestras inalteradas obtenidas en terreno. La principal limitación de este ensayo corresponde al tiempo de ejecución, debido a que puede durar varias semanas. Sumado a esto, existe una escasez de equipos ya que ciertos laboratorios sólo cuentan con los equipos necesarios.

A partir de esta problemática, es necesario contar con metodologías alternativas que permitan ampliar el estudio de deformaciones por disolución de sales. Para esto, el presente trabajo considera el estudio de correlaciones entre la deformación provocada por la disolución de las sales y diferentes parámetros índice, con el objetivo de elaborar nuevas metodologías (una en detalle y otra simplificada) para estimar asentamientos en fundaciones de muros para depósitos de relaves.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

El objetivo general de este trabajo es proponer metodologías de análisis para evaluar la magnitud de las deformaciones esperadas por la disolución de sales en fundaciones de muros para depósitos de relaves, basado en el estudio de correlaciones entre resultados de ensayos de colapsos y distintos parámetros índice.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

En particular, se tienen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión bibliográfica de trabajos anteriores sobre suelos salinos
- Analizar conceptualmente la posibilidad de establecer un parámetro índice que sirva como indicador de la magnitud de eventuales deformaciones producidas por la disolución de sales
- Proponer una metodología de análisis del ensayo de colapso orientada a la estimación de asentamientos en muros.
- Realizar una recopilación y análisis de resultados de laboratorio en un caso real de fundaciones de suelo salino de un muro para depósito de relaves en el norte de Chile.
- Identificar correlaciones entre los parámetros índice para suelos salinos y las deformaciones por disolución de sales.
- Elaborar metodología simplificada para la estimación de deformaciones por disolución de sales utilizando los resultados de las correlaciones con parámetros índice.

## **1.3. Estructura del informe**

A continuación se presenta la organización de los capítulos presentes en este trabajo:

### **Capítulo 2:**

En este capítulo se recopilan antecedentes de trabajos anteriores sobre suelos salinos. En particular, se estudia el origen geológico y características de los diferentes depósitos salinos ubicados en el norte de Chile. Además se realiza un estudio de las propiedades particulares de las sales.

### **Capítulo 3:**

A partir de lo propuesto por Olgún (2006), se presentan los modelos de fases y parámetros índice orientados a describir el comportamiento de los suelos salinos en cuanto a deformación por disolución de sales. Sumado a esto, se realiza un análisis particular de los parámetros que conceptualmente podrían ser indicadores de deformaciones por disolución de sales.

## **Capítulo 4:**

En este capítulo se describe el procedimiento y las características particulares de los ensayos de colapsos en suelos salinos. Además, se propone una metodología para estimar asentamientos para distintos niveles de tensión vertical en función de este ensayo.

## **Capítulo 5:**

Este capítulo considera la recopilación de una base de datos asociada al diseño de una serie de muros para un depósito de relaves en el norte de Chile. La totalidad de datos utilizados en este trabajo contempla descripciones de muestras, granulometrías referenciales de la zona, densidades, contenido de sales y resultados de ensayos de colapso.

## **Capítulo 6:**

En este capítulo se estudian las correlaciones entre la deformación por disolución de sales y los parámetros índice descritos en el capítulo 3. A partir de estos resultados, se estiman las deformaciones máximas producidas por la disolución de las sales.

## **Capítulo 7:**

A partir de los resultados del capítulo anterior, se elabora una metodología simplificada para estimar asentamientos máximos producidos por la disolución de las sales al interior del estrato salino. Finalmente, se comparan las dos metodologías de estimación de asentamientos elaboradas en este trabajo.

## **Capítulo 8:**

Se presentan las principales conclusiones del estudio. Se resumen las dos metodologías planteadas, identificando sus ventajas y limitaciones. Por último, se plantean recomendaciones sobre futuras líneas de investigación en el tema.

# Capítulo 2

## Marco Conceptual

### 2.1. Origen y características de los depósitos salinos del norte de Chile

#### 2.1.1. Procesos geológicos

A fines de la era Paleozoica se produjeron eventos magmáticos y tectónicos que aumentaron el metamorfismo de las rocas que conformaban el paleo-océano pacífico. Además, durante este periodo se produjeron importantes flujos volcánicos que originaron la formación de las primeras montañas.[10]

Durante el Triásico se habrían producido 3 eventos importantes:

- Erosión de las montañas paleozoicas, lo que conllevó a una nivelación del relieve en el territorio.
- La intensa actividad volcánica originó una intrusión del magma en las fisuras de la corteza terrestre, lo que provocó que la lava se depositara sobre el relieve.
- Debido a esta nivelación, el Océano Pacífico ingresa desde el oeste hacia el continente, inundando las cuencas occidentales.

A finales del Triásico y comienzos del Jurásico se habría formado la zona conocida como Depresión Intermedia, que comprende desde el Norte Grande hasta el paralelo 39°S aproximadamente. Durante este periodo se produce el ingreso del océano pacífico, inundando gran parte del territorio, con una duración aproximada de 50 millones de años.

El mar comienza a retirarse gradualmente al término del Jurásico, lo que generó la aparición de diferentes depósitos evaporíticos en la zona norte y central andina, compuestos principalmente por yeso y anhidrita. Luego de este retiro marino, se habría producido un segundo ingreso del mar con una duración aproximada de 6 millones de años. Es durante este periodo en que el continente emerge definitivamente.

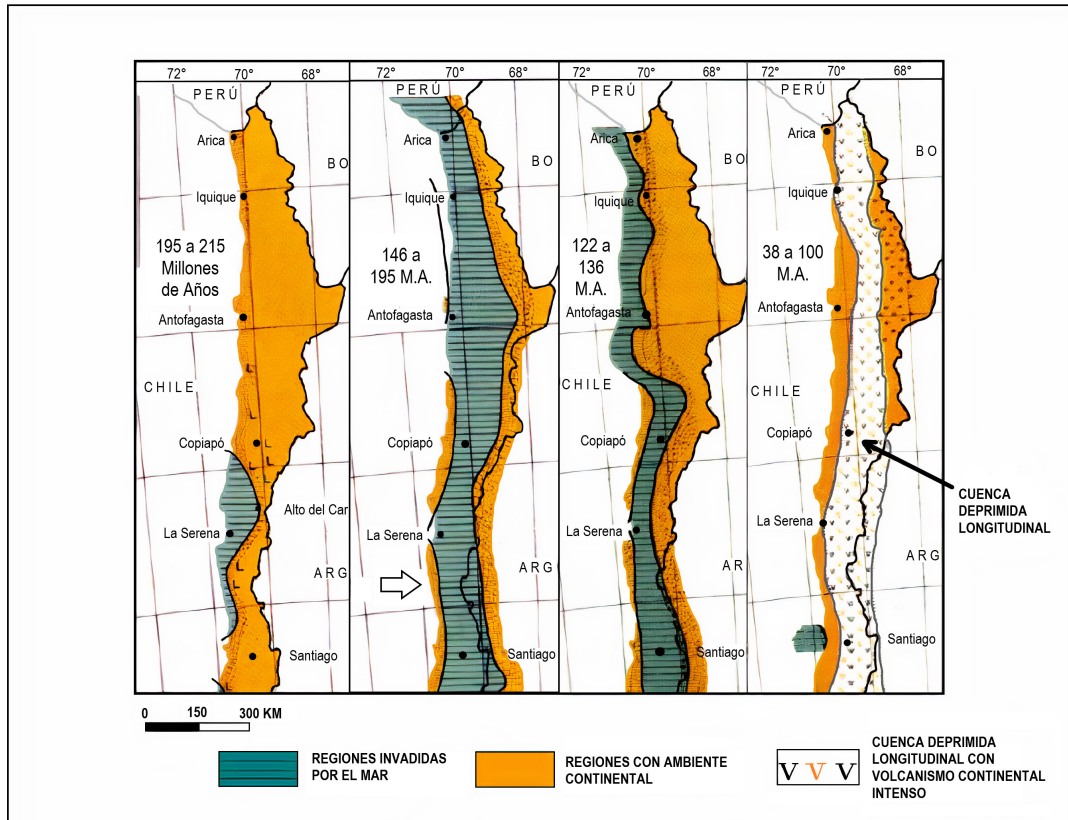


Figura 2.1: Avances y Regresiones del paleo-oceano pacífico (Hervé y Corvalán, 1982 [7], Olgún, 2006 [10])

Hacia finales del Cretácico y comienzos del Terciario, las fuerzas tectónicas compresionales produjeron plegamientos que dieron origen a la formación de la actual Cordillera de Domeyko por el este y al sollevamiento de la Cordillera de la Costa por el oeste, generando un gran número de cuencas cerradas que serían rellenadas con materiales lacustres salinos, como los salares pre-andinos y los depósitos salinos de la Pampa.[10]

A finales del Terciario y comienzos del Cuaternario se forman lagos a diferentes alturas, conectados por sistemas fluviales que fueron erosionando la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de la Costa, lo que provocó intrusiones y regresiones del mar. Se depositaron conglomerados fosilíferos, areniscas y limos calcáreos.[8]

Desde el Cuaternario al Reciente, la actividad volcánica ha originado importantes conos volcánicos que constituyen las principales cumbres de la Cordillera de los Andes en el Norte de Chile. Además, se ha producido una intensa erosión hasta alcanzar el relieve actual, con la depositación de sedimentos aluviales, coluviales y depósitos lacustres [8].

Hacia el reciente, se produce la evaporación de cauces superficiales debido al clima árido. Todos los cauces actuales se desarrollan subterráneamente (excepto el río Loa), lo que provocó un aumento en la concentración de sales en los lagos, dando paso a los actuales salares [10]. Durante este periodo se configura la actual Planicie Costera, originada por causa de las constantes regresiones e intrusiones marinas a escala reducida.

## 2.1.2. Tipos de depositación

A partir de los procesos geológicos enseñados anteriormente, es posible identificar el origen de los depósitos salinos según el tipo de depositación descritos en la tesis de Olguín (2006) [10].

### Procesos evaporíticos antiguos

Luego de la inundación del continente ocurrida durante la Era Jurásica, el agua comenzó a retirarse, formando diferentes depósitos de sales. Producto de la radiación solar, las aguas saturadas se fueron evaporando, permitiendo la depositación de las sales.

Evidencias geológicas de esto son la presencia de minerales cuyos principales componentes son carbonatos, cloruros e iones de calcio, ya que esto se puede relacionar directamente con ambientes sedimentarios lacustres o marinos expuestos a altas tasas de evaporación.

### Movilidad salina superficial y subterránea

Este proceso está asociado a épocas recientes y consiste en el transporte de las sales disueltas en las aguas de cauces superficiales y subterráneos, las que son depositadas en cuencas endorreicas con altas tasas de evaporación. Estas aguas se van salinizando debido a la lixiviación y disolución de sales presentes en rocas fracturadas de origen volcánico, rocas carbonatadas y otras formaciones sedimentarias existentes a lo largo del cauce[10].

La lixiviación y disolución de las sales se ve acrecentada por la intensa meteorización a la que son sometidas las rocas por efecto del clima: elevados gradientes de temperatura, intensos vientos y la formación de cristales de hielo entre las grietas.[10] Los aportes de agua son mayores en las cuencas endorreicas ubicadas en cotas más elevadas. Debido a esto, no sólo son rellenadas con sedimentos insolubles y sales cristalizadas (como en el caso de los depósitos de nitratos), sino que también al acumular agua líquida salobre, dan origen a los numerosos salares y lagos andinos existentes en el norte grande chileno.

### Depositaciones marinas recientes

La presencia del océano pacífico actúa como aporte directo de sales solubles al continente, principalmente en la zona de la planicie costera. Existen dos mecanismos de traslado e inclusión de sales a los suelos del continente: a través de neblina o “camanchaca” y/o mediante la salinización de la napa freática en dichas áreas continentales. [10]

Durante las noches se levanta una espesa neblina conocida como “camanchaca”, la que transporta por vía aérea partículas de sal (principalmente cloruro de sodio) desde océano pacífico disueltas, a través de gotas de neblina. Esta capa húmeda es capaz de sobrepasar el sollevamiento de la Cordillera de la Costa, alcanzando el Valle Central. Este ciclo se repite a diario, humedeciendo la superficie por las noches y secándola durante el día.

El agua condensada durante este proceso se infiltra a través de los suelos existentes (material coluvial permeable, material granular fino depositado eólicamente y rocas fracturadas), donde posteriormente es evaporada producto de la radiación solar, originando la cristalización de las



sales[10]. Por otra parte, la sal proveniente del mar, disuelta en las napas freáticas, también cristaliza al subir por capilaridad hasta la superficie y evaporarse debido al incremento de la temperatura. Estos dos últimos fenómenos dan origen a la conocida “costra salina” de la Planicie Costera, estudiada por Skorin (1971) y Tamblay (1983).

La tabla 2.1 muestra un análisis químico de la camanchaca realizado en la ciudad de Antofagasta (Erickssen, 1963[5]). En este estudio se obtuvo una muestra de 2 litros mediante la condensación de la niebla en mallas de finas fibras de nylon.

Tabla 2.1: Análisis químico sobre muestra de camanchaca condensada, Antofagasta (Erickssen, 1963 [5]; Olgúin, 2006 [10])

<b>Iones</b>	<b>Concentración [mg/l]</b>
Ca <sup>2+</sup>	12
Mg <sup>2+</sup>	6,1
Na <sup>+</sup>	30
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	32
Cl <sup>-</sup>	46
NO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	19
Otros	17,3
Total sólidos disueltos	154
pH a 23°C	6,8

## Deposiciones provenientes de la atmósfera

En estudios realizados por Fuenzalida (2004) [6], se ha desmotrado que fenómenos meteorológicos también originan la precipitación de sales solubles, específicamente de nitratos. Durante el invierno altiplánico y a causa de las intensas tormentas eléctricas en el altiplano, el nitrógeno y el oxígeno que se encuentran en la atmosfera en estado gaseoso se enlazan químicamente debido a la elevada energía desarrollada en la atmosfera durante estos eventos climáticos. Estas reacciones químicas darían como resultado concentraciones de nitratos que precipitan y que son transportados a través de cauces superficiales o subterráneos.[10]

### 2.1.3. Zonificación y características de los depósitos salinos

Los depósitos salinos se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de depositación en los siguientes grupos:

- Lagos de agua salada secos (Salares)
- Lagos Subterráneos (Pampa del Tamarugal)
- Depósitos de nitratos
- Rellenos coluviales/aluviales
- Lentas arenosas eólicas

- Depósitos marinos
- Rocas sedimentarias evaporíticas
- Depositaciones salinas sobre rocas y en diaclasas

En la tabla 2.2 se muestran los depósitos mencionados anteriormente, asociado a los eventos naturales que habrían originado su formación.

Tabla 2.2: Tipo de Depósito Salino en relación al Origen Geológico de las Sales Solubles Presentes (Olguín, 2006 [10])

<b>Génesis Salina</b>	<b>Tipo de Depósito Salino</b>
Procesos Evaporíticos Jurásicos	Rocas Sedimentarias Evaporíticas
	Depósitos Marinos
Movilidad Salina en Cauces Superficiales y Subterráneos (*)	Salares
	Lagos Subterráneos
	Depósitos de Nitratos
	Depositaciones Salinas sobre Rocas y en Diaclasas
Contribución Directa del Mar (*)	Rellenos Coluviales/Aluviales de la Planicie Costera
	Lentes Arenosos Eólicos
	Depositaciones Salinas sobre Rocas y en Diaclasas
Fenómenos Atmosféricos (*)	Depósitos de Nitratos

En la figura 2.8 se presenta un perfil del norte de Chile, en el cual se muestra la distribución espacial de los distintos depósitos salinos. Como se observa en el esquema, estos se producen en su mayoría en franjas longitudinales con dirección norte-sur debido a los procesos tectónicos y sedimentarios que han configurado la geomorfología de esta parte del Norte Grande de Chile. Podemos apreciar como muchos de estos depósitos se encuentran ubicados en cuencas endorreicas topográficas naturales, en donde las aguas saturadas con variados tipos de sales se acumulan y estancan, para luego cristalizarse a causa de las altas tasas de evaporación.

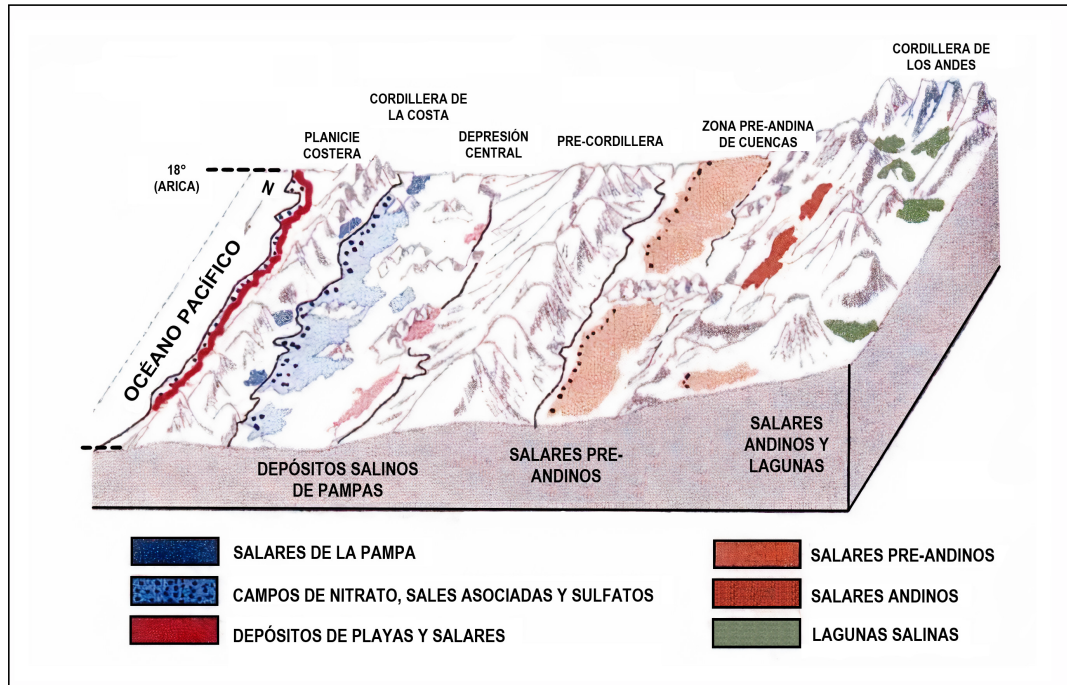


Figura 2.2: Esquema de distribución de los Depósitos Salinos (Tamblay, 1983 [8]; Olgún, 2006 [10])

De esta forma, el relieve transversal del país y las diferentes cuencas endorreicas actúan como piscinas decantadoras naturales, en las cuales las sales van precipitando en cotas menores. Esta constatación de franjas norte-sur es igualmente válida en los depósitos de cobre y otros minerales según ha sido observado en el norte grande.[10]

#### 2.1.4. Geomorfología

Los fenómenos geológicos y las sucesivas inundaciones marinas del continente no son la única forma de explicar la aparición de depósitos salinos en el norte del país. Un aspecto importante es la morfología actual del territorio, que condiciona los movimientos de aguas superficiales. A raíz de esto, es posible distinguir 5 zonas geográficas características y que son presentadas de oeste a este a continuación:

- Planicie Costera
- Cordillera de la Costa
- Valle Central
- Precordillera o Cordillera de Domeyko
- Cordillera de los Andes

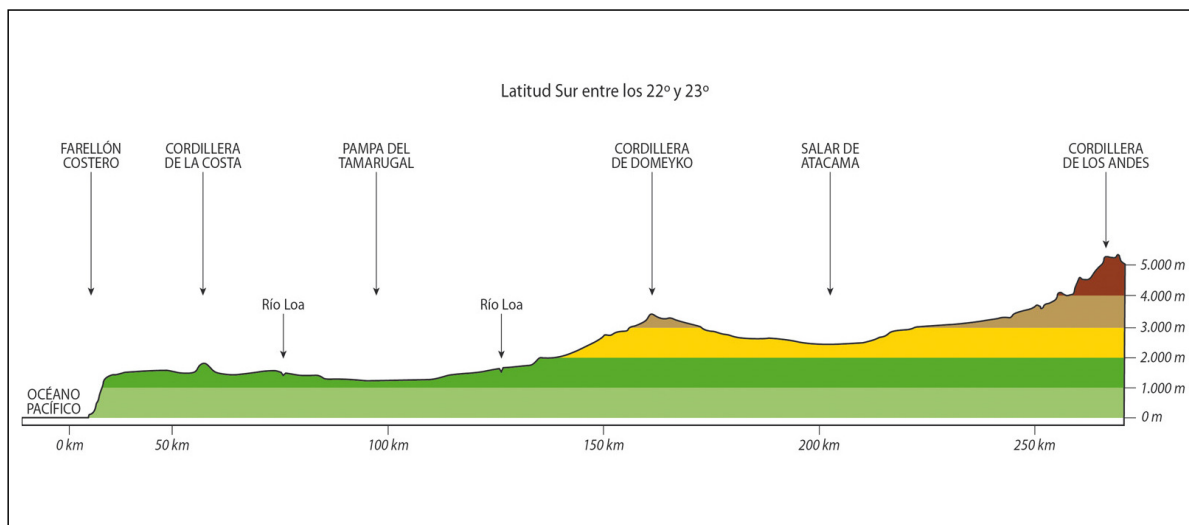


Figura 2.3: Perfil Geográfico del Norte Grande de Chile (Fuente: IGM)

### Planicie Costera:

Corresponde a una franja de ancho reducido pero variable, ubicada al oeste del continente y que se encuentra en contacto directo con el océano pacífico, presentando taludes pronunciados. El sollevamiento de la cordillera de la Costa restringe el ancho de la Planicie Costera. En el extremo norte, el levantamiento de la Cordillera de la Costa es de menor magnitud al que se desarrolla entre las ciudades de Iquique y Antofagasta [10].

Debido al abrupto levantamiento de la Cordillera de la Costa desde Iquique al sur, se genera una zona conocida como Farellón Costero. En el límite norte de la ciudad de Iquique se elimina por completo la presencia de Planicie Costera.

Los materiales geotécnicos que predominan en esta zona corresponden a suelos granulares gruesos de origen coluvial o escombros de falda, provenientes de la erosión de los taludes de la Cordillera de la Costa. También es posible encontrar arenas originadas por la erosión del mar sobre las rocas costeras, además de material granular de grano medio a fino depositado eólicamente. Todos estos materiales han sido depositados sobre el batolito basal de relieve irregular [10].

El mar aporta constantemente sales solubles, las que cristalizan y cementan el material coluvial, generando las llamadas costras salinas. Además del aporte superficial del mar, estas costras salinas son originadas por acuíferos subterráneo debido a la ascensión de las sales por capilaridad.

### Cordillera de la Costa:

La cordillera de la Costa se ubica al este de la Planicie Costera y se distinguen diferentes alturas desde Arica a Copiapó. En Arica presenta una topografía plana atravesada por numerosas quebradas, mientras que en Iquique el sollevamiento de la cordillera alcanza sus mayores alturas, con un valor aproximado de 800 m. Desde la región de Antofagasta hasta Atacama se produce una leve disminución de la altura, con un promedio de 700 m.s.n.m. [10]

### **Valle Central:**

También conocido como Depresión Intermedia, corresponde a una franja varios kilómetros de ancho y que se desarrolla al este de la Cordillera de la Costa. Presenta una elevación promedio de 600 m.s.n.m., con una leve pendiente creciente hacia el oriente [10].

En el tramo Iquique-Antofagasta se ensancha considerablemente el Valle Central, quedando confinado entre la Cordillera de Costa y la cordillera de los Andes.

Hacia el sur de Iquique se presenta una ausencia de quebradas, por lo que sólo existe un flujo superficial que cruza desde el Valle Central hasta desembocar en el mar, correspondiente al Río Loa. El resto de las quebradas que desembocan en el mar corresponden a cuencas al lado oeste de la Cordillera de la Costa. Como consecuencia de esto, se genera un drenaje subterráneo originando depósitos salinos al lado este de la cordillera de la costa.

El material geotécnico presente en esta zona corresponde a suelos granulares gruesos, con presencia de lentes de arcilla en la zona este del Valle y suelos granulares gruesos o escombros de falda en la zona oeste. Todos estos suelos se han depositado sobre rocas de origen volcánica como formaciones riolíticas de lavas terciarias y cuaternarias [10].

### **Precordillera:**

Este cordón montañoso intermedio (también conocido como Cordillera de Domeyko) se desarrolla entre las ciudades de Antofagasta y Calama, a una altura aproximada entre los 2000 y 3000 m [10]. La litología típica de esta zona corresponde a suelos de origen coluvial y aluvial depositados sobre rocas volcánicas extrusivas (cenizas volcánicas como tobas e ignimbritas).

En esta zona se desarrollan planicies y cuencas endorreicas que no presentan desagüe superficial hacia zonas de menor altura, facilitando la generación de depósitos salinos al oriente. Debido esto, prevalecen la evaporación y drenaje subterráneo en este sector.

En la zona norte de Copiapó la morfología cambia drásticamente debido a que desaparece el cordón precordillerano y los valles toman una orientación este-oeste (conocidos como los valles transversales del Norte Chico), lo que facilita el drenaje hacia el mar. Debido a esto último, sumado con el cambio en las condiciones climáticas, los depósitos salinos desaparecen en esta zona.

### **Cordillera de los Andes:**

Se desarrolla al este de la Precordillera, donde existen numerosas cumbres de montañas y volcanes que alcanzan alturas por sobre los 5500 m. Al igual que en la Precordillera, en esta zona se desarrollan cuencas endorreicas que facilitan la depositación salina. La litología presente en esta zona corresponde principalmente a rocas de origen volcánico extrusivo[10].

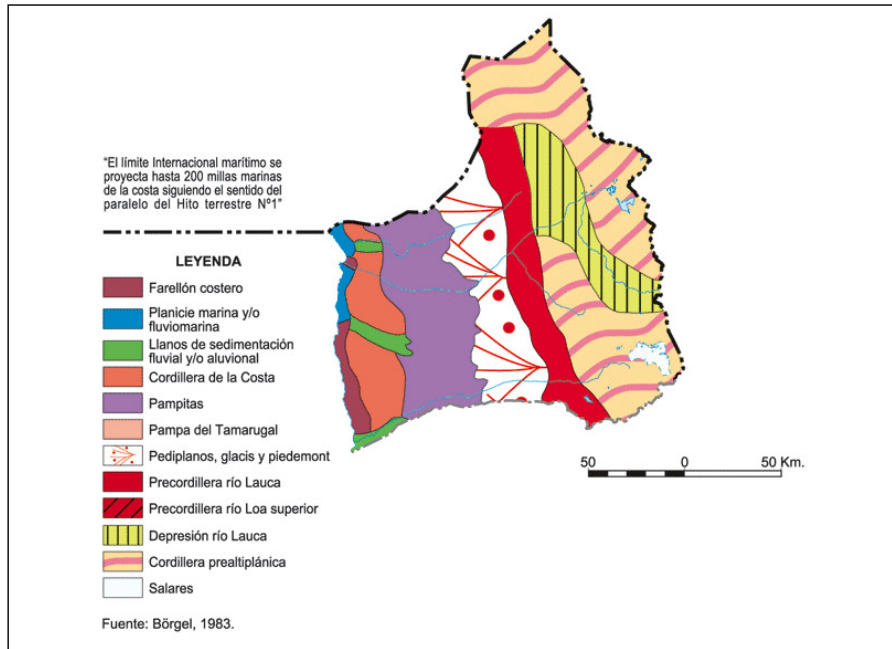


Figura 2.4: Geomorfología, Región de Arica y Parinacota (Fuente: Educarchile)

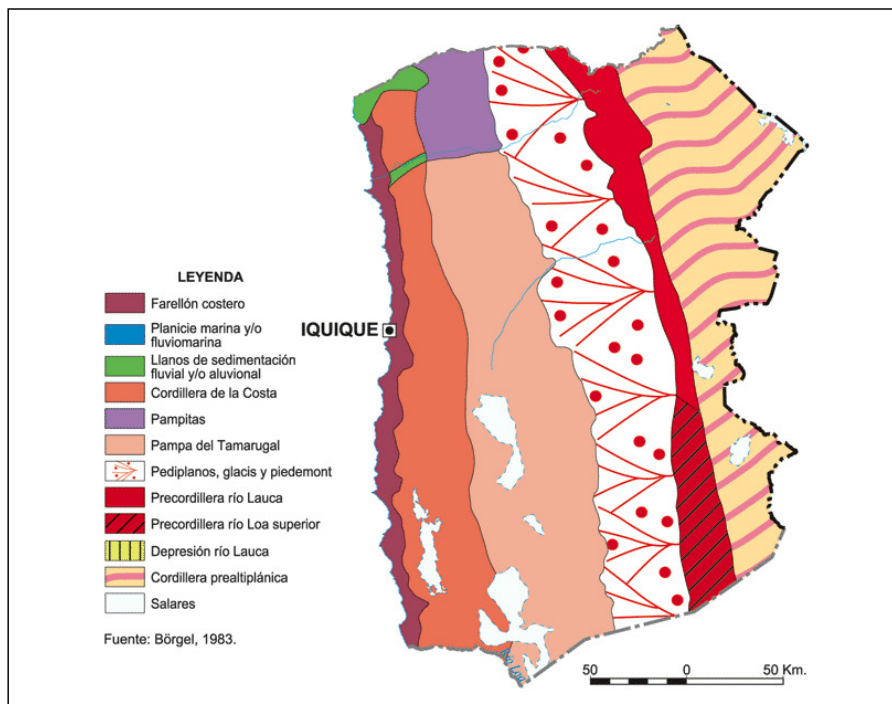


Figura 2.5: Geomorfología, Región de Tarapacá (Fuente: Educarchile)

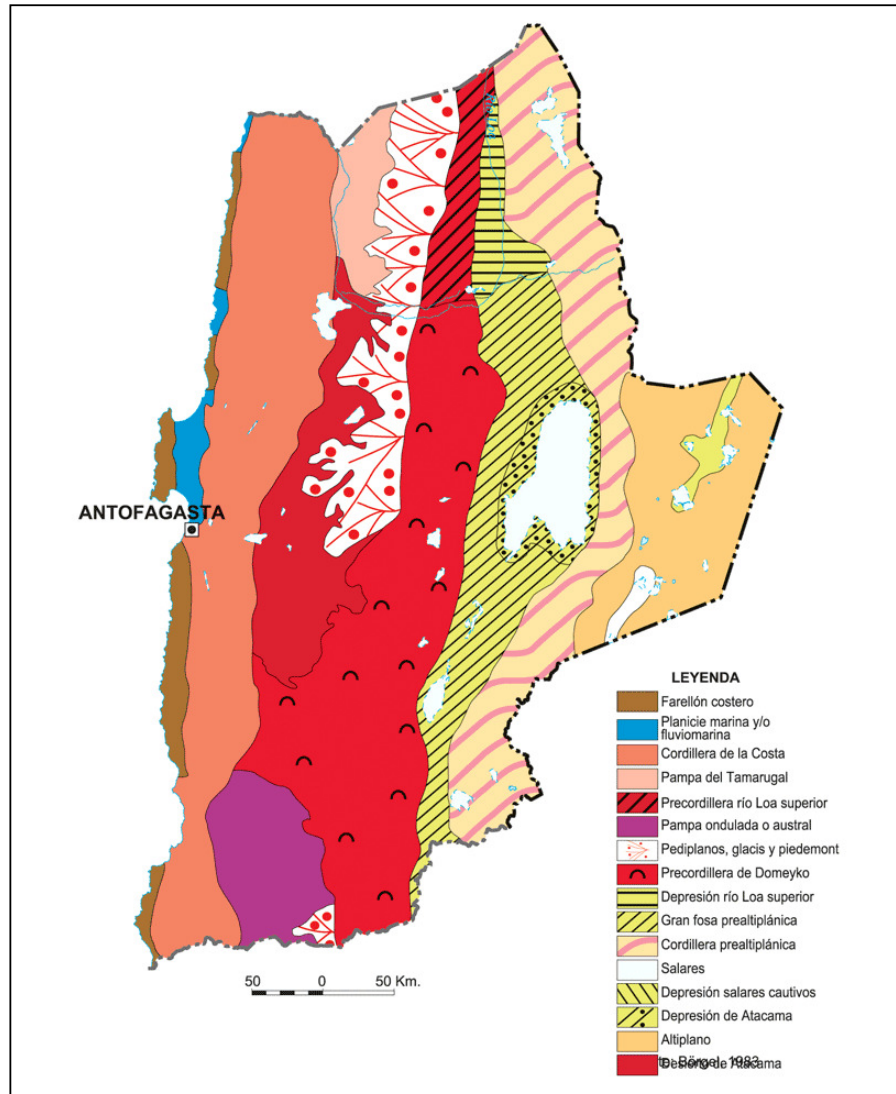


Figura 2.6: Geomorfología, Región de Antofagasta (Fuente: Educarchile)

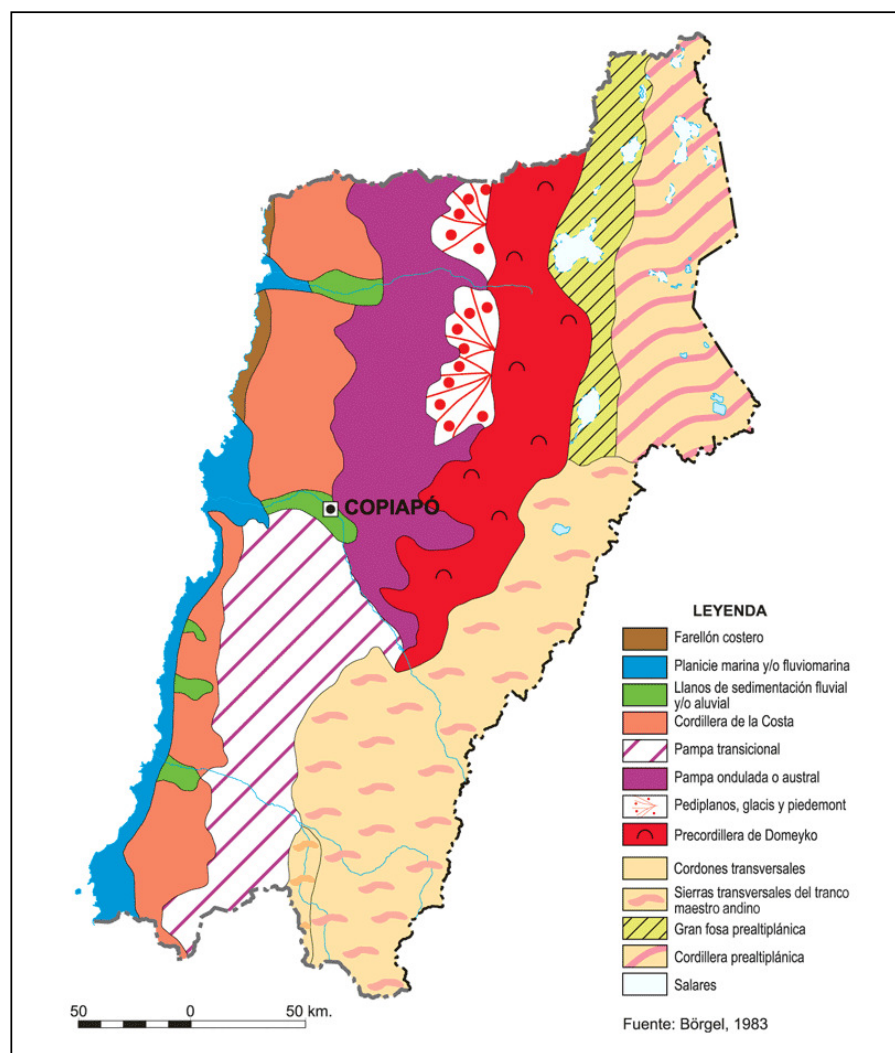


Figura 2.7: Geomorfología, Región de Atacama (Fuente: Educarchile)

### 2.1.5. Clima

La zona del Norte Grande se caracteriza por tener un clima seco y desértico, con la presencia de diferentes tipos de sub-climas a lo largo del perfil transversal, lo que condiciona las características de los depósitos salinos. A continuación, se describen los distintos tipos de sub-climas presentes en la zona, mencionados previamente en la tesis de Roberto Olguín [10]:

#### Clima desértico costero nuboso

Presente en la zona de la Planicie Costera, se caracteriza por espesas y abundantes nieblas matinales, conocidas localmente como “camanchaca”. Este fenómeno es originado por la corriente fría de Humboldt y consiste en un transporte de iones (que dan origen a las sales) desde el océano pacífico a través de gotas de neblina. Este es un proceso que ocurre a diario, humedeciendo la superficie del terreno por las noches y que posteriormente es secada durante el día, provocando que esta agua se evapore y de origen a la cristalización de sales. Las concentraciones de iones son bajas, pero corresponden a un aporte constante de sales solubles a través del tiempo, principalmente del tipo cloruros.



Las temperaturas medias anual se encuentran en torno a los 18°C, con leves variaciones entre máximas y mínimas a lo largo del año. La cantidad de agua caída en un año normal no supera el milímetro, mientras que la máxima cantidad registrada ha alcanzado valores cercanos a los 2,6 mm en un año [10].

### **Clima desértico interior**

Presente en la zona del Valle Central, a una altura de 1000 m.s.n.m., se caracteriza por ser un clima de extrema aridez, con precipitaciones nulas y temperaturas anuales medias que alcanza los 18°C promedio. Se tiene un importante gradiente de temperatura, con máximas que alcanzan los 35°C de día y 0°C durante la noche. Además, la humedad relativa promedio de este clima es del 50 %.

### **Clima desértico marginal de altura**

Se presenta en zonas sobre los 2000 m.s.n.m., con una media anual promedio de 10°C y con un importante gradiente de temperatura. Las lluvias varían entre los 50 y 100 mm anuales, concentrándose en los meses de verano debido al fenómeno climático conocido como el “Invierno Boliviano”. Este último se caracteriza por intensas tormentas eléctricas y precipitaciones que se desarrollan en la Cordillera de los Andes y el Altiplano Boliviano. El resto del año las precipitaciones son prácticamente nulas.

### **Clima de estepa en altura**

Se presenta en el sector Cordillerano y Altiplánico del Norte Grande, por sobre los 3000 m de altura. En comparación con los otros climas, este se caracteriza por un aumento en las precipitaciones, que alcanza los 300 mm de agua caída al año. Estas se concentran en los meses de verano debido al fenómeno del “Invierno Boliviano”. La temperatura anual promedio es de 9°C, con máximas que no superan los 20°C durante el día, mientras que en la noche estas descienden varios grados bajo cero.

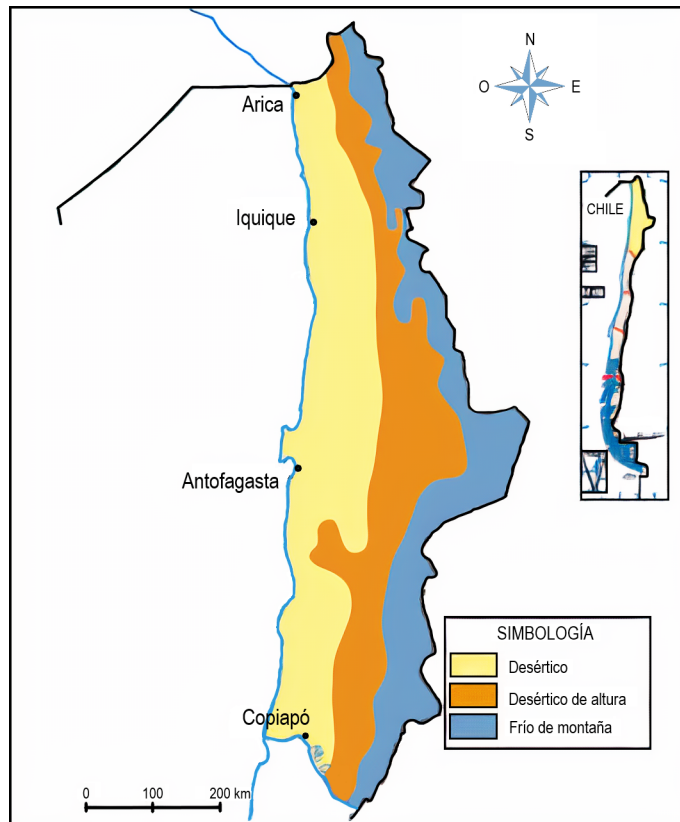


Figura 2.8: Mapa Climático General del Norte Grande (Fuente: Atlas Escolar IGM-SM, 2015)

El clima de extrema aridez presente en el Norte Grande de Chile condiciona las características hidrogeológicas. Esto se refleja en que la mayor parte de los flujos se desarrollan a través de acuíferos subterráneos que escurren de este a oeste. En las zonas precordilleranas y cordilleranas es posible encontrar rocas volcánicas fracturadas, con litologías que corresponden a coladas, brechas y tobas andesíticas con permeabilidad media, asociadas al periodo Terciario y Cuaternario.

Al este del Valle Central predominan los estratos acuíferos compuestos por material coluvial grueso como rodados, escombros de falda y arenas. Hacia el oeste del Valle Central existe una disminución del tamaño de partículas, donde es posible encontrar depósitos de arcillas y limos con intercalaciones de lentes de arena.[10]

La Cordillera de la Costa actúa como dique natural, embalsando las aguas que provienen desde el oeste, las cuales drenan lenta y subterráneamente en sentido norte-sur hasta desembocar en la cuenca del Río Loa, único río que llega al océano pacífico en el Norte Grande, exceptuando la zona de Arica[10].

### 2.1.6. Formaciones salinas típicas

Skorin (1971) [11] propone diferenciar los tipos de concentraciones salinas encontradas en el Norte Grande según el origen y el proceso de depositación, de acuerdo a los siguientes grupos:

## **Afloramientos salinos sobre antiguos lagos de agua salada**

Constituyen el estado inicial de concentraciones de sales. Se originan a partir de los lagos de agua salada que fueron confinados al interior del continente producto de los movimientos tectónicos. Un ejemplo de concentración de sales de este tipo se presenta en el Salar de Atacama.

## **Afloramientos salinos sobre lagos subterráneos**

Producto de la intensa evaporación de grandes superficies, el nivel de las aguas ha descendido varios metros de profundidad bajo la superficie del suelo. Este tipo de concentraciones afloran principalmente en zonas de menor cota. Un ejemplo de concentración de sales de este tipo se presenta en la Pampa del Tamarugal.

## **Costra salina en depósitos de nitratos**

Este tipo de concentraciones se origina a partir de las sales solubles disueltas en lagos cordilleranos o cristalizadas en formaciones montañosas, las cuales son desplazadas hacia niveles inferiores de topografía plana. Otro origen de concentraciones salinas con predominancia de nitratos se debe a transformaciones químicas con participación del nitrógeno atmosférico. Ejemplos de este caso son las pampas salitreras.

## **Costras salinas en rellenos coluvial-aluvional**

Este tipo de concentraciones salinas se encuentran generalmente encima de los conos de deyección de las desembocaduras de las quebradas costeras. Su aspecto es similar al de una roca sedimentaria debido a la dureza ocasionada por la “cohesión salina”. Debido a la recristalización de las sales es posible observar desplazamientos en los granos del suelo. Se presentan cohesionando suelos de origen coluvial-aluvional formados principalmente por arenas y gravas.

## **Costras salinas en estratos arenosos eólicos**

En este tipo de costras salinas, las sales se encuentran cohesionando arenas finas de origen eólico. De este modo se van formando capas horizontales de espesores de salinidades semejantes a los que se encuentran en costras salinas de depósitos de arenas gravosas de origen coluvial-aluvional.

## **Costras salinas en depósitos marinos**

El retorno de las sales solubles hacia el mar dio origen a costras salinas en depósitos de conchuelas marinas de distintos niveles de trituración. Es posible encontrar este tipo de concentraciones cerca de la costa, sobre la roca basal que aflora en diferentes puntos.

## **Incrustaciones salinas en rocas agrietadas**

Este tipo de concentraciones se presenta únicamente en rocas, ocupando las grietas de éstas. Debido a que en la mayoría de las veces es sal pura, la salinidad es la más alta de todos los casos.

## 2.2. Tipos y solubilidad de las sales

### 2.2.1. Defnición de las sales

Las sales son un compuesto químico formado por un enlace iónico entre Cationes (iones con carga positiva) y Aniones (iones con carga negativa). La solubilidad de las sales se refiere a la capacidad de estas de disolverse (pasar de un estado sólido a uno líquido) al entrar en contacto con un solvente, generando una solución acuosa.

En los depósitos salinos del Norte Grande de Chile se pueden encontrar los siguientes aniones y cationes típicos:

Tabla 2.3: Aniones y Cationes típicos en los Depósitos Salinos del Norte de Chile (Olguín, 2006 [10])

Tipo de Ion	Nombre	Fórmula Química
Aniones	Cloruros	$\text{Cl}^-$
	Sulfatos	$\text{SO}_4^{2-}$
	Carbonatos	$\text{CO}_3^{2-}$
Cationes	Sodio	$\text{Na}^+$
	Calcio	$\text{Ca}^{2+}$
	Magnesio	$\text{Mg}^{2+}$

Estos iones se enlazan, generando de manera natural diferentes tipos de sales solubles. Algunas de las sales solubles más comunes en depósitos salinos son las siguientes:

- Cloruro de Sodio
- Cloruro de Sodio
- Nitrato de Sodio
- Carbonato de Calcio

Debido a la formación y configuración de la estructura atómica cristalina, cada tipo de sal tiene características y propiedades físicas/químicas diferentes, como lo son el color, la dureza, el peso específico, la forma del cristal y la solubilidad. Esta última es la responsable de los procesos mecánicos que originan los colapsos en las estructuras de suelo.

### 2.2.2. Solubilidad de las sales

Como se mencionó anteriormente, la propiedad química que dice relación con la facilidad con la que se disuelve una sal es la solubilidad. Esta se define como la máxima cantidad de soluto (sal) que puede disolverse en una determinada cantidad de solvente (agua u otros solventes), a una determinada temperatura. Puede expresarse en gramos de soluto en 100 gramos de solvente (g /100 g de solvente).

A continuación se presentan diferentes factores que condicionan la solubilidad de las sales:

### Tipo de sal

En la tabla 2.4 se muestra la solubilidad de las sales típicas del Norte Grande de Chile:

Tabla 2.4: Solubilidades de las Sales más comunes del Norte de Chile  
(Olgún, 2006 [10])

Tipo de Sal	Fórmula Química	Solubilidad [g de sal/ 100 g de agua]
Carbonato de Calcio (Calcita)	$\text{CaCO}_3$	$1,3 \times 10^{-3}$
Sulfato de Calcio (Yeso)	$\text{CaSO}_4$	$2,2 \times 10^{-1}$
Nitrato de Calcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	$1 \times 10^2$
Cloruro de Sodio (Halita)	$\text{NaCl}$	$3,6 \times 10^1$
Nitrato de Sodio (Salitre)	$\text{NaNO}_3$	$8,2 \times 10^1$
Cloruro de Magnesio	$\text{MgCl}_2$	$2,8 \times 10^2$
Nitrato de Magnesio	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	$2,2 \times 10^2$

### Temperatura del solvente

La solubilidad de las sales depende de la temperatura a la que se encuentra el solvente. Generalmente la solubilidad aumenta a medida que aumenta la temperatura del solvente, excepto en el caso del Cloruro de Sodio (Halita), donde la solubilidad resulta independiente de la temperatura del agua destilada.

### Grado de cristalinidad de las sales solubles

Esta característica hace referencia al nivel de ordenamiento de los aniones al formar una estructura atómica cristalina de una sal soluble. El grado de ordenamiento está directamente relacionado con las condiciones de evaporación a la que estuvo sometida la sal. Si la evaporación ocurre rápidamente, la sal desarrollará una estructura amorfa, con alta superficie específica y baja resistencia. Por otro lado, una evaporación gradual conlleva a una estructura más ordenada, con baja superficie específica y mayor resistencia. Esta propiedad es medida a través de refracción de rayos X.

Una estructura bajo grado de cristalinidad (amorfa) se disolverá más rápido que una estructura con alto grado de cristalinidad (más ordenada).

### Composición química del solvente

Existe una variación en la solubilidad de las sales según el tipo de solvente con el que se encuentra en contacto. A pesar de que el agua es el solvente que comúnmente afecta a los suelos en los proyectos de ingeniería, existen otros tipos como solventes ácidos, lo cuales se pueden encontrar en minería, industria o rellenos sanitarios. Además, la cantidad y tipos de sólidos disueltos presentes en el agua afectan su capacidad de disolver sales.

# Capítulo 3

## Modelo de Fases y Parámetros Índice de Suelos Salinos

### 3.1. Modelo de fases en suelos salinos

El modelo trifásico para describir la composición de estructuras de suelo considera sólidos, líquidos y gases. Los espacios entre partículas sólidas se llaman vacíos y están compuestos por agua y aire principalmente [3]. Cuando los vacíos están conformados en su totalidad por agua, se dice que la estructura de suelo se encuentra saturada.

En el caso de las estructuras de suelos salinos, este modelo requiere ampliarse para discriminar entre sólidos solubles (sales) y sólidos no solubles. A partir de esto, se describe un modelo de fases que es particular para el caso de suelos salinos, el cual fue propuesto por Olgúin (2006)[10] en su tesis. En la figura 3.1 se presenta un esquema teórico del modelo de fases propuesto.

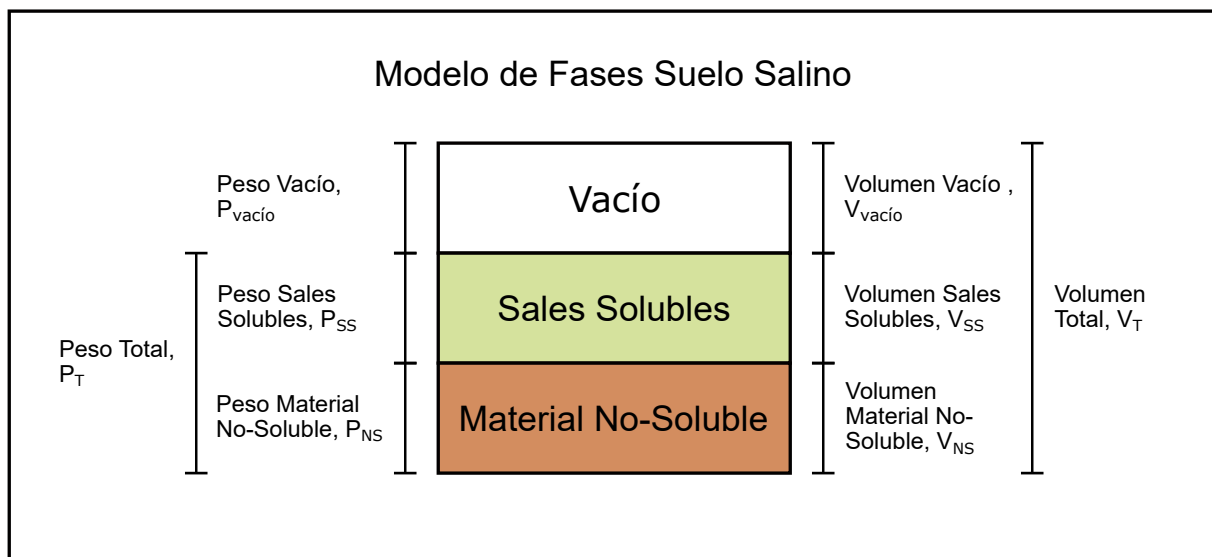


Figura 3.1: Esquema teórico del modelo de fases para suelos salinos (Modificado Olgúin [10])

Este nuevo modelo presenta las siguientes 3 fases: sólidos no solubles, sales solubles y vacíos. Los parámetros físicos que describen estos tipos de suelos estarán influenciados por la proporción de cada una de estas nuevas fases. Los vacíos se pueden considerar como aire en condiciones de aridez, aunque es posible encontrar bajas concentraciones de agua en el suelo. Esto último ocurre principalmente en zona superficiales debido a la infiltración de agua presente en la atmósfera.

El modelo de fases presentado en este trabajo no hace distinción entre los diferentes tipos de sales presentes en el suelo y tampoco se describe el grado de cristalinidad estas. Diferencias en las sales puede reflejarse en los tiempos de disolución, pero en este trabajo no se considera esa variable.

## 3.2. Parámetros índice para suelos salinos

En esta sección se definen los parámetros índice para describir los suelos salinos, basados en el modelo de fases presentado en la sección anterior. Todas estas definiciones fueron presentadas en la tesis de Olgún (2006)[10].

### 1. Salinidad:

La Salinidad (S) se define como la razón (expresada en porcentaje) entre el peso seco de las sales solubles y el peso seco del material insoluble [10]. Tanto el peso de las sales solubles como el peso del material no soluble se deben encontrar en las mismas unidades. Este parámetro se expresa de la siguiente forma:

$$S(\%) = \frac{P_{SS}}{P_{NS}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Donde:

$P_{SS}$ : Peso de las sales solubles.

$P_{NS}$ : Peso del material no soluble.

### 2. Densidad seca con sales:

La densidad seca con sales se define como la razón entre el peso total de la muestra seca y su volumen total. Como se muestra en la figura 3.1, el peso total se puede expresar como la suma entre el peso del material insoluble y el peso de las sales solubles. Esta densidad se suele expresar en  $[t/m^3]$ . Este parámetro se describe a partir de la siguiente ecuación:

$$\gamma_{dCS} = \frac{P_{SS} + P_{NS}}{V_T} \quad (3.2)$$

Donde:

$P_{SS}$ : Peso de las sales solubles.

$P_{NS}$ : Peso del material no soluble.

$V_T$ : Volumen total de la muestra.

### 3. Densidad seca sin sales:

La densidad seca sin sales se define como la razón entre el peso del material insoluble y el volumen total de la muestra. Este parámetro considera sólo el aporte del material no soluble, es decir, suponiendo que no existe presencia de sales solubles al interior del suelo.

La ecuación para describir este parámetro es la siguiente:

$$\gamma_{dSS} = \frac{P_{NS}}{V_T} \quad (3.3)$$

Donde:

$P_{NS}$ : Peso del material no soluble.

$V_T$ : Volumen total de la muestra.

Es posible expresar la densidad seca sin sales en función de la salinidad y la densidad seca con sales (demostración en Anexo A). La relación entre los parámetros se puede representar de la siguiente forma:

$$\gamma_{dSS} = \frac{\gamma_{dCS}}{S + 1} \quad (3.4)$$

Donde:

$\gamma_{dCS}$ : Densidad seca con sales.

$S$ : Salinidad de la muestra (se trabaja con el valor sin transformar a porcentaje).

### 4. Índice de vacíos salino:

El índice de vacíos salino corresponde una versión modificada del índice de vacíos tradicional. La diferencia viene dada en que el volumen de las sales se considera como potencial volumen de vacíos. Por lo tanto, este parámetro se define como la razón entre el volumen de vacíos más el volumen de sales solubles y el volumen del material no soluble.

$$e_{salino} = \frac{V_{vacío} + V_{SS}}{V_{NS}} \quad (3.5)$$

Donde:

$V_{vacío}$ : Volumen de vacío.

$V_{SS}$ : Volumen de las sales solubles.

$V_{NS}$ : Volumen del material no soluble



Además, es posible expresar este parámetro de la siguiente forma:

$$e_{salino} = \frac{G_S \cdot \gamma_w}{\gamma_{dCS}} \cdot (S + 1) - 1 \quad (3.6)$$

Donde:

$G_S$ : Gravedad específica de los sólidos no solubles.

$\gamma_w$ : Densidad del agua ( $4^\circ\text{C} = 1 \text{ [t/m}^3\text{]}$ ).

$S$ : Salinidad de la muestra.

$\gamma_{dCS}$ : Densidad seca con sales.

## 5. Porosidad salina:

Al igual que el índice de vacíos salino, la porosidad salina corresponde a una versión modificada de la porosidad tradicional, considerando el volumen de las sales como potencial volumen de vacíos. Se define como la razón entre el volumen de vacío más el volumen de sales solubles y el volumen total de la muestra. Se expresa como:

$$n_{salino} = \frac{V_{vacío} + V_{SS}}{V_T} \quad (3.7)$$

Donde:

$V_{vacío}$ : Volumen de vacío.

$V_{SS}$ : Volumen de las sales solubles.

$V_T$ : Volumen total de la muestra.

Además, es posible expresar la porosidad salina en función del índice de vacíos salino de la siguiente forma:

$$n_{salino} = \frac{e_{salino}}{1 + e_{salino}} \quad (3.8)$$

Donde:

$e_{sal}$ : Índice de vacíos salino.

### 3.3. Discusión de parámetros índice para el análisis de deformaciones

La definición de los parámetros presentados en este capítulo permite caracterizar de distintas formas los tipos de estructuras de suelos salinos, basados en la proporción de cada una de las fases presentes.

La salinidad corresponde a una forma de cuantificar el contenido de sales en la muestra. En un principio, conocer la cantidad de sales puede ser razonable para estimar las deformaciones, debido a que la disolución produce un cambio en las propiedades geomecánicas de la estructura. La limitación de este parámetro es que no considera la estructura espacial del suelo (distancia entre partículas y cantidad de vacíos). Por este motivo, resulta difícil estimar la magnitud de las deformaciones por disolución de sales.

La densidad seca con sales se puede utilizar para considerar el efecto de la estructura, ya que funciona como indicador de la cantidad de espacios de vacíos al interior de la muestra. A partir de esto, se espera que estructuras con baja densidad estén asociadas a importantes reacomodos de partículas. Sin embargo, este parámetro no distingue cuánto del peso sólido es soluble o insoluble, lo cual es un factor influyente en la magnitud del asentamiento.

Como se muestra en la ecuación 3.4, el parámetro de densidad seca sin sales considera los efectos de la densidad seca con sales y cantidad de sales presentes en la muestra. A partir de esto, se genera la posibilidad de utilizar este parámetro como indicador del potencial de colapso en una estructura salina dado que refleja la densidad seca efectiva (descartando los sólidos que se disolverán) de la muestra.

La densidad seca sin sales permite representar la estructura de suelo que queda cuando desaparecen todas las sales producto de la disolución. La disolución de las sales genera espacios adicionales que permiten un grado mayor de reacomodo de las partículas insolubles presentes en la muestra. Además, con la disolución se elimina el efecto de cementación original en el suelo.

En las figuras 3.2 y 3.3 se presentan los casos de dos estructuras con variaciones del contenido de sales en su interior. Tanto A1 como A2 presentan la misma estructura cuando desaparecen las sales y es posible esperar menores deformaciones con respecto a B1 y B2, los cuales tienen más vacíos posibles en el mismo volumen.

Al comparar los casos A1 y A2, es posible notar que presentan distinta densidad seca con sales. Sin embargo, se espera que luego de la desaparición de las sales se deformen lo mismo. Esta misma situación se da al comparar B1 y B2. Este contraejemplo permite mostrar que la densidad seca con sales no es un parámetro infalible para estimar las deformaciones por disolución de sales.

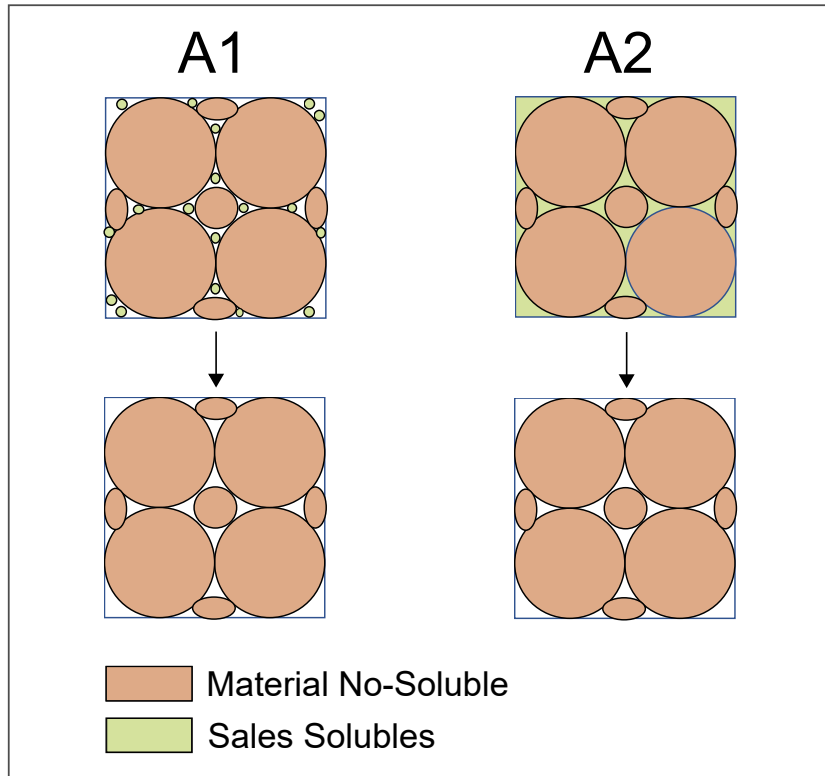


Figura 3.2: Esquema de muestras con alta densidad seca sin sales

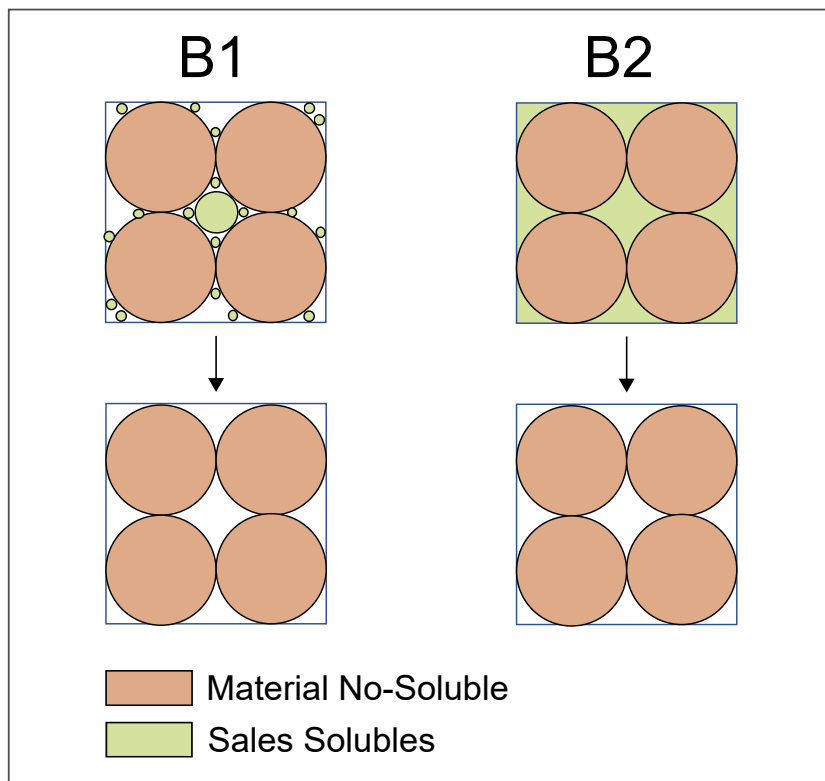


Figura 3.3: Esquema de muestras con baja densidad seca sin sales

El esquema B1 (figura 3.3) presenta un menor contenido de sales con respecto al esquema A2 (figura 3.2). A pesar de esto, se espera que luego de la disolución de las sales el caso B1 tenga mayores deformaciones que A2. Esto se debe principalmente a los vacíos de las estructuras post disolución de sales. Esto muestra un contraejemplo para el caso la salinidad  $S$  como indicador de deformaciones por disolución de sales.

Al observar las estructuras sin sales resultantes, es posible esperar mayores deformaciones en los casos B1 y B2 con respecto a los casos A1 y A2. De esta forma, se espera que mientras mayor sea la cantidad de partículas insolubles por unidad de volumen, menores serán las deformaciones. Por lo tanto, el parámetro de densidad seca sin sales se considera con mayores capacidades entre los parámetros evaluados para correlacionarse con el nivel de deformaciones por disolución de sales.

Olgún (2006) [9] propone un parámetro llamado Relación Potencial de Vacíos (RPV). Este corresponde a la razón entre el volumen de aire de la muestra sin sales y el volumen de aire de la muestra en estado natural.

$$RPV = \frac{V_{vacío\ SS}}{V_{vacío}} = \frac{e_{salino}}{e} \quad (3.9)$$

El problema de este parámetro se refleja en el ejemplo que se muestra a continuación:

Si se considera una muestra de suelo salino de 100 [cm<sup>3</sup>], se presentan dos casos hipotéticos de suelos para calcular el valor de RPV:

**Caso A:**

- Volumen de vacíos sin sales = 15 [cm<sup>3</sup>]
- Volumen de vacíos con sales = 10 [cm<sup>3</sup>]

**Caso B:**

- Volumen de vacíos sin sales = 30 [cm<sup>3</sup>]
- Volumen de vacíos con sales = 20 [cm<sup>3</sup>]

Es posible notar que en ambos casos el valor de RPV será igual a 1,5, pero el volumen de vacíos sin sales del Caso B es el doble del volumen de vacíos sin sales del Caso A. Por lo tanto, se considera como un parámetro falible para ser usado como indicador de deformaciones producto de la disolución de sales.

En los siguientes capítulos se analizan los parámetros mencionados anteriormente, con especial énfasis en la densidad seca sin sales, de manera de establecer correlaciones con el nivel de deformación que se produce en suelos salinos luego de la disolución de las sales.

# Capítulo 4

## Deformaciones por Disolución de Sales en Suelos Salinos

### 4.1. Introducción al estudio de deformaciones en suelos salinos

Los colapsos que se producen en estructuras de suelo corresponden a un cambio de volumen, reflejado en una disminución de la altura cuando se analizan las deformaciones verticales. En el caso de los suelos salinos, esta disminución de volumen se produce por la disolución de las sales, las cuales inicialmente (en estado natural) actúan como cementantes en la estructura, otorgando una mayor rigidez.

La disolución de las sales se produce cuando el agua ingresa a los espacios intersticiales del suelo. Debido a la disolución de las sales, los contactos entre partículas se rompen y el esqueleto granular no soluble se encarga de tomar la carga. Esto genera un reordenamiento de las partículas y como consecuencia de esto, variaciones en el volumen.

Los estudios realizados en terreno por Skorin (1971) [11], Tamblay (1983) [8] y Olgún (2006) [10] han demostrado que el comportamiento de los suelos salinos no se limita únicamente al nivel de carga y el tipo de sales solubles, sino que también depende de la estructura granular del suelo.

### 4.2. Ensayos de colapso

Para evaluar la colapsabilidad de una muestra de suelo, se realizan ensayos edométricos especiales, llamados ensayos de colapso. Estos permiten reproducir la condición de terreno<sup>1</sup> de la muestra de suelo salino y evaluar directamente los asentamientos que pueden ocurrir por la disolución de las sales. Para evaluar las fundaciones es importante conservar la estructura del suelo en terreno, por lo que se requiere trabajar con muestras inalteradas.

Este ensayo se realiza en un edómetro (también llamado consolidómetro) de pared rígida y

<sup>1</sup> En terreno puede existir flujo. Esta condición no se evalúa directamente en el ensayo de colapso. No se produce necesariamente una saturación completa de la probeta.

su metodología basa en la norma ASTM 4645-14 [4]. En la figura 4.1 se presenta un esquema representativo del montaje de la muestra en el edómetro.

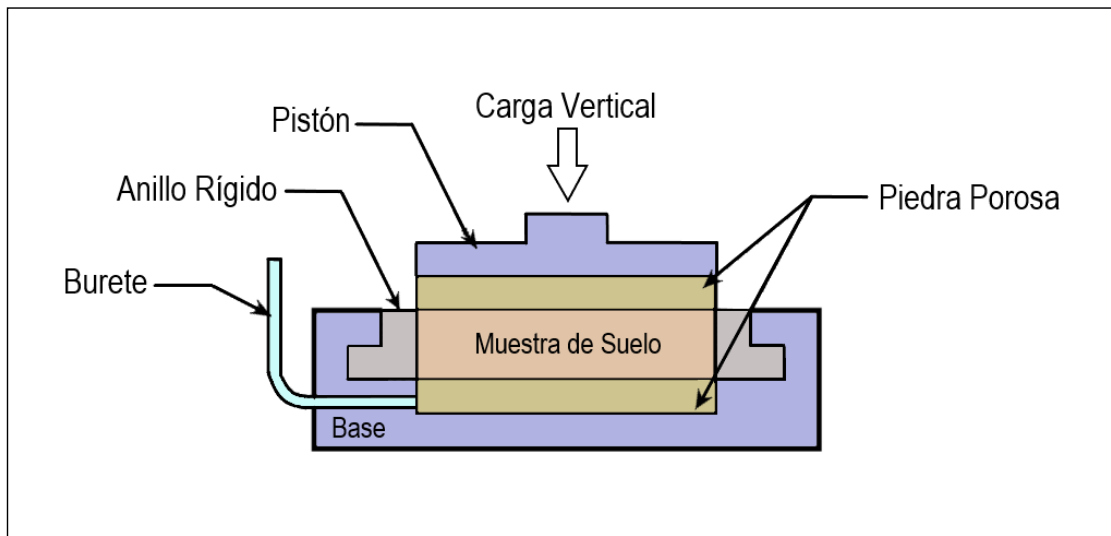


Figura 4.1: Esquema representativo del del montaje de la muestra en el edómetro (Elaboración propia)

A continuación, se detallan los pasos de este procedimiento:

1. Se toma una muestra de suelo inalterada y se ubica en el edómetro, manteniendo la misma dirección que tenía la muestra en el estrato original. El diámetro mínimo debe ser de 50 mm, mientras que la altura mínima 20 mm. La altura de la probeta debe ser al menos 6 veces más grande que la partícula con mayor tamaño.
2. Antes de comenzar, el dispositivo de medición de deformaciones se debe colocar en 0 para la lectura inicial.
3. Se aplica una primera carga vertical sobre la muestra en condición seca. Seguidamente, se aplica un incremento de cargas, de manera de acumular diferentes niveles de tensión, hasta el valor con el que se desea estudiar el colapso. En cada etapa se van registrando las deformaciones sobre la muestra.
4. Para el nivel de tensión definido para estudiar el colapso, se satura<sup>2</sup> la probeta desde la piedra porosa inferior. Se mantiene la carga constante y se registran las deformaciones regularmente, hasta que no se observe una variación significativa en el volumen de la muestra. Se recomienda evaluar la salinidad del agua a través de pruebas de conductividad eléctrica para asegurar la estabilización de la carga<sup>3</sup>.
5. En el caso que se solicite, se sigue con el proceso de aplicación de cargas luego de la saturación, de manera de conocer el comportamiento de la muestra con sales disueltas.

<sup>2</sup> El grado de saturación máximo que se puede alcanzar se encuentra cercano al 90-95 % (no llega a 100 %)[4].

<sup>3</sup> Esta estabilización se produce por una disolución de sales mayoritaria. El agua sigue con capacidad para disolver sales.

6. Finalmente, se descarga la muestra. En caso de solicitarse, se mide la deformación de descarga.

Con los resultados de este ensayo es posible elaborar un gráfico de evolución de las deformaciones para cada nivel de carga vertical. La figura 4.2 muestra un gráfico representativo con las diferentes etapas del ensayo de colapso.

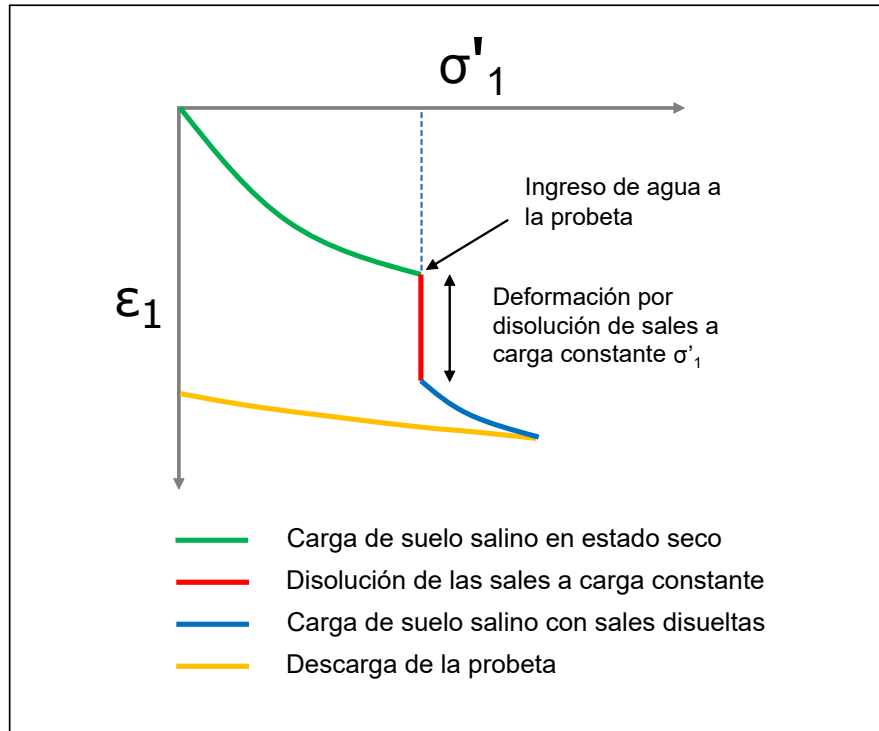


Figura 4.2: Gráfico representativo de los resultados del ensayo de colapso

A partir de este gráfico se pueden distinguir los siguientes tramos de manera secuencial:

- Tramo 1 (Verde): Curva de deformación del suelo producto de la aplicación de cargas en estado seco.
- Tramo 2 (Rojo): Curva de deformación del suelo producto de la saturación a carga constante. Se produce la disolución de las sales<sup>4</sup>, lo que genera una pérdida de volumen (se produce el colapso).
- Tramo 3 (Azul): Curva de deformación del suelo producto de cargas en estado a la saturación y con sales disueltas.
- Tramo 4 (Amarillo): Curva de deformación del suelo en descarga (sales disueltas).

La deformación vertical registrada en el ensayo se calcula como la variación de la altura de la probeta con respecto a la altura inicial de esta. A continuación, se presenta la ecuación para calcular la deformación a causa de un esfuerzo efectivo vertical ( $\sigma'_1$ ):

<sup>4</sup> Tramo de color rojo depende de las sales disueltas durante el ensayo de colapso. No se produce necesariamente una disolución total de las sales. Se espera que el resultado obtenido en laboratorio se asemeje a lo que puede ocurrir en terreno.

$$\varepsilon_1(\sigma'_1) = \frac{L_0 - L_{\sigma'_1}}{L_0} \quad (4.1)$$

Donde:

$L_0$ : Espesor inicial de la probeta de suelo sin carga.

$L_{\sigma'_1}$ : Espesor de la probeta de suelo para una carga  $\sigma'_1$ .

Por otro lado, cuando se analiza la deformación que se produce únicamente por la disolución de las sales a carga constante (tramo de color rojo en la figura 4.2), el cálculo se debe realizar con respecto a la altura que tiene la probeta justo antes de la saturación de la muestra, es decir, al inicio del tramo 2.

$$\varepsilon_{salina}(\sigma'_1) = \frac{L_{pre-agua} - L_{post-agua}}{L_{pre-agua}} \quad (4.2)$$

Donde:

$L_{pre-agua}$ : Espesor de la probeta al inicio de la saturación. Condición seca, sometida a carga definida para saturar ( $\sigma'_1$ ).

$L_{post-agua}$ : Espesor de la probeta luego de la estabilización de deformaciones.

Es importante destacar que el proceso de disolución de sales depende de los siguientes factores:

- Tipo de solvente: Propiedades químicas del líquido que entra en contacto con el depósito salino y el tiempo de exposición de este con el suelo. Generalmente se utiliza agua destilada para la ejecución del ensayo.
- Tipo de sal presente: Como se comentó en el capítulo 2, el tipo de sal está relacionado con la solubilidad que está tendrá.
- Estructura de suelo: En cuanto a su permeabilidad, se refiere al tamaño y la cantidad de poros, lo que condiciona la tasa de ingreso de agua que admite la estructura de suelo.

### 4.3. Estimación de deformaciones para distintos niveles de carga

Como se observa en la figura 4.2, el proceso de disolución de sales es imposible de repetir para una misma muestra, por lo que se define un carga para saturar el suelo estudiado (referida al proyecto particular a estudiar). Esta carga no es necesariamente la que se encontrará sobre la fundación en terreno al momento de la disolución de las sales.

Para estimar las deformaciones por disolución de sales para cualquier nivel de carga, se propone una metodología para parametrizar los resultados de ensayos de colapso (figura 4.2) con una función de tipo hiperbólica con parametros de ajustes  $\alpha$  y  $\beta$ . Esta función permite una representación apropiada del comportamiento observado en laboratorio, tanto para la curva en estado seco como cuando las sales se han disuelto.



Se define la función de parametrización de la siguiente forma:

$$\varepsilon_1 = \frac{\alpha \cdot \sigma'_1}{(\sigma'_1 + \beta)} \quad (4.3)$$

Para cada estado del suelo (seco o saturado con sales disueltas), se deben determinar los parámetros  $\alpha$  [-] y  $\beta$  [kg/cm<sup>2</sup>] que permitan el mejor ajuste de esta función con respecto a los resultados obtenidos en laboratorio. Luego de la determinación de los parámetros, es posible graficar los resultados y obtener las curvas proyectadas para cada caso.

Para estimar las deformaciones que ocurren por efecto de la disolución de las sales (tramo rojo en figura 4.2) para un cierto valor de carga vertical  $\sigma'_1$ , se calcula diferencia entre la deformación en estado con sales disueltas y la deformación en estado seco para el mismo valor de  $\sigma'_1$ .

$$\varepsilon_{salina}(\sigma'_1) = \varepsilon_{1 \text{ sales disueltas}}(\sigma'_1) - \varepsilon_{1 \text{ seco}}(\sigma'_1) \quad (4.4)$$

En la figura 4.3 se presenta un esquema representativo con los modelos de carga de suelo salino, tanto para un estado seco como para un estado del suelo con sales disueltas. Además, es posible distinguir la deformación producto de la disolución de las sales como la diferencia entre ambas curvas para un cierto valor de  $\sigma'_1$ . En el capítulo 7 de este trabajo se presenta un ejemplo con la aplicación de esta metodología para el estudio de deformaciones.

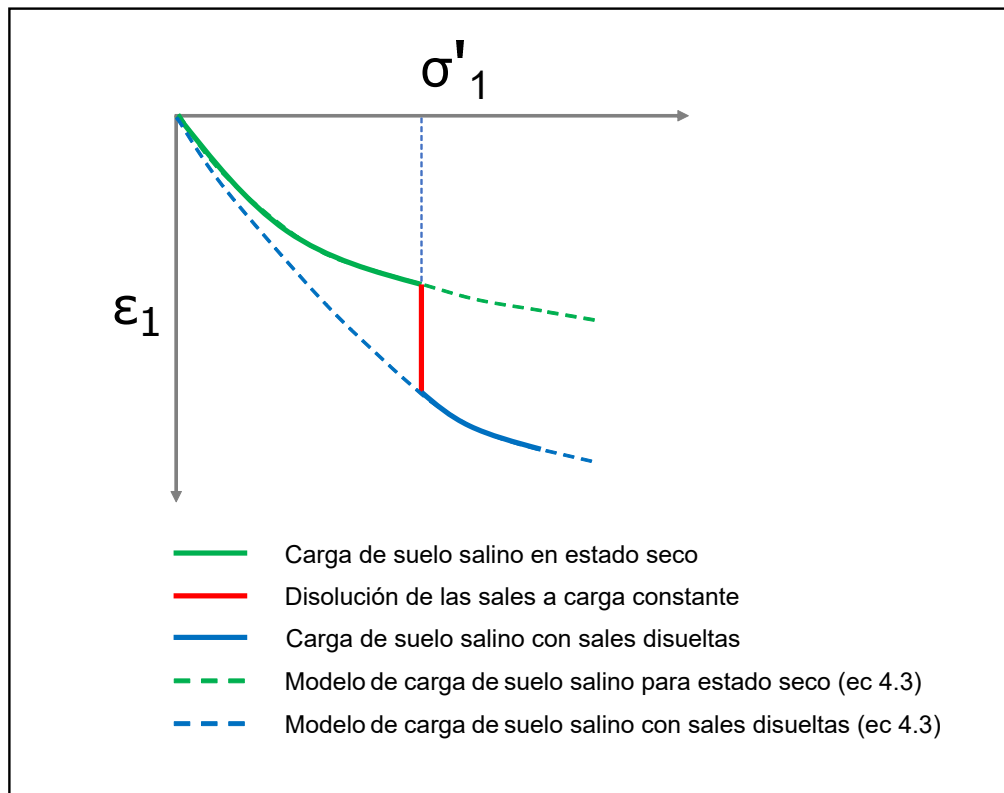


Figura 4.3: Determinación de modelos de carga para estado seco y con sales disueltas (ecuación 4.3)

Para el desarrollo de esta metodología se considera que existe una disolución mayoritaria de las sales, por lo que el tramo rojo (figura 4.2) es único y no existen otros descensos verticales importantes. A partir de esto, se debe reconocer que el proceso de disolución de sales podría ser parcial y no completo. Además, es posible que se desarrolle progresivamente y durante un periodo de tiempo prolongado.

#### 4.4. Metodología para estimación de asentamiento a partir de modelos de carga

A partir de la función de parametrización presentada en la sección anterior, es posible estimar asentamientos en muros para depósitos de relaves.

Se puede obtener el módulo de rigidez edométrico  $M(\sigma'_1)$  de la siguiente forma:

$$\frac{d\varepsilon_1}{d\sigma'_1} = \frac{1}{M(\sigma'_1)} \quad (4.5)$$

Donde:

$$M(\sigma'_1) = \frac{(\sigma'_1 + \beta)^2}{\alpha \cdot \beta} \quad (4.6)$$

Para calcular el asentamiento que se produce en un estrato salino producto de una carga de muro <sup>5</sup>  $\Delta\sigma'_1$  aplicada sobre la fundación <sup>6</sup>, se considera la trayectoria de carga desde un punto P1 (condición previa a la construcción del muro) a punto P2 (condición posterior a la construcción del muro).

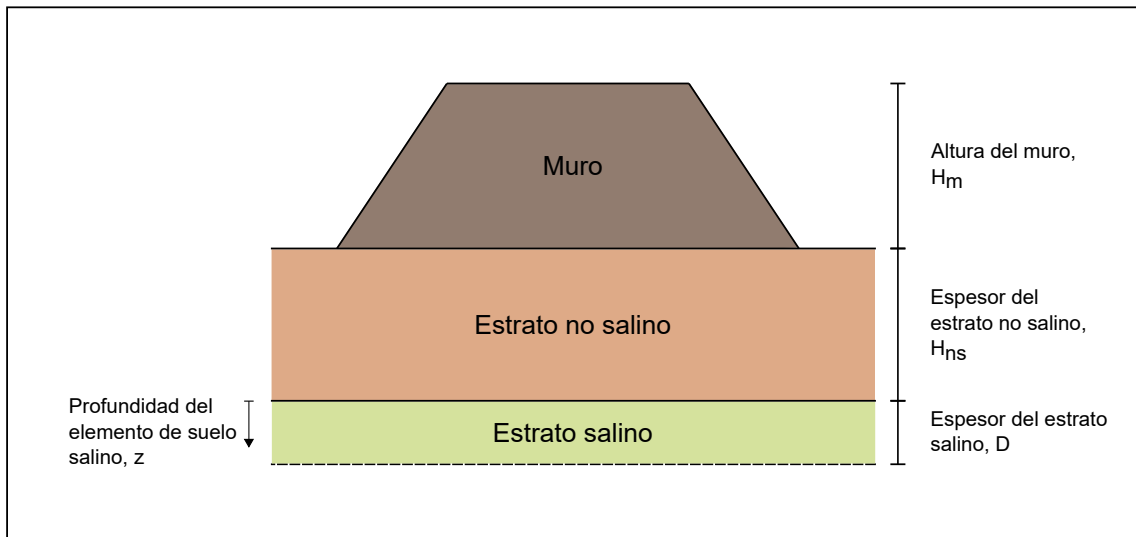


Figura 4.4: Esquema representativo para el diseño de un muro para depósito de relave (metodología a partir de modelos de carga)

<sup>5</sup> Depende de  $H_m$  para una densidad dada de material de construcción compatado de muro.

<sup>6</sup> Se considera que bajo la fundación del muro toda la carga de muro se transmite como carga infinita, lo cual, dados los anchos de base de muros, son una aproximación razonable.

La figura 4.5 muestra un esquema representativo de la trayectoria de carga, donde  $H_m$  corresponde a la altura del muro y  $z$  corresponde a la profundidad del elemento de suelo analizado (según figura 4.4).

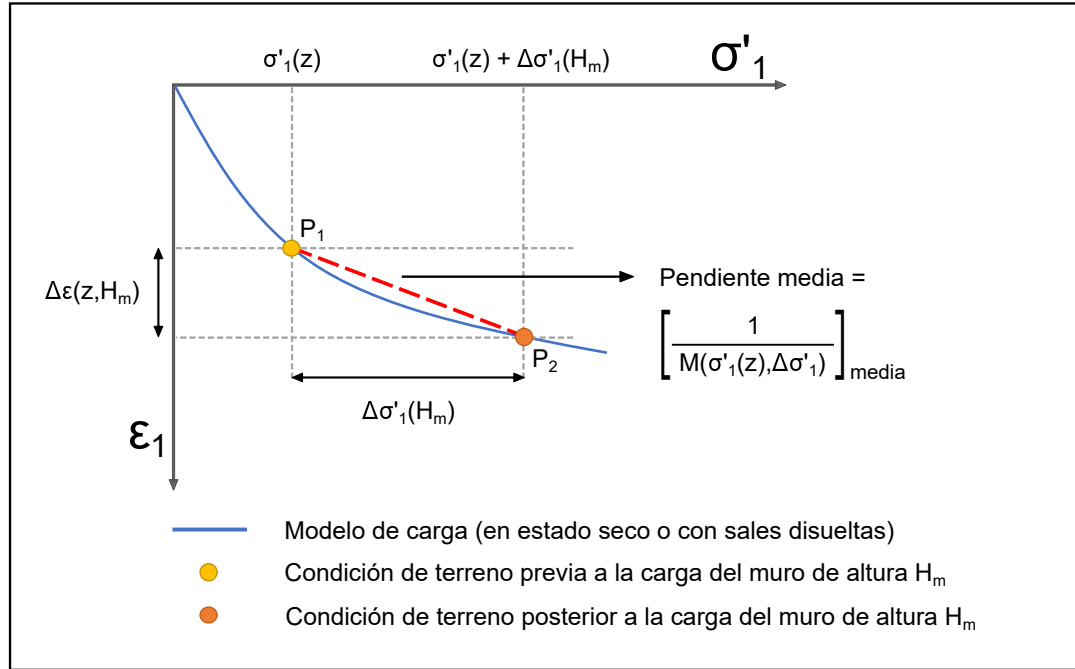


Figura 4.5: Esquema representativo de la trayectoria de deformaciones por efecto de una carga de muro en la fundación

A partir de lo mostrado en la figura 4.5, se tiene que el incremento de deformación vertical en un elemento de fundación a una profundidad  $z$  por el efecto de una carga de muro  $\Delta\sigma'_1$  se puede expresar de la siguiente manera:

$$\Delta\varepsilon(z, H_m) = \Delta\sigma'_1 \left[ \frac{1}{M(\sigma'_1(z), \Delta\sigma'_1)} \right]_{media} \quad (4.7)$$

Donde la pendiente media puede ser expresada en términos de una integral de la siguiente forma:

$$\left[ \frac{1}{M(\sigma'_1(z), \Delta\sigma'_1)} \right]_{media} = \int_{\sigma'_1(z)}^{\sigma'_1(z) + \Delta\sigma'_1} \frac{\alpha\beta}{(\sigma'_1 + \beta)^2} d\sigma'_1 \quad (4.8)$$

Para el desarrollo de esta integral se define la carga del suelo previa a la construcción del muro y la carga del muro.

**Carga antes de la construcción del muro ( $\sigma'_1(z)$ ):**

$$\sigma'_1(z) = H_{ns} \cdot \gamma_{ns} + z \cdot \gamma_{dCS} \quad (4.9)$$

Donde:

$H_{ns}$ : Espesor del estrato no salino

$\gamma_{ns}$ : Densidad seca del estrato no salino (se asumen condición inicial sin agua)

$\gamma_{dCS}$ : Densidad seca con sales del estrato salino

**Carga del muro ( $\Delta\sigma'_1$ ):**

$$\Delta\sigma'_1 = H_m \cdot \gamma_m \quad (4.10)$$

Donde:

$H_m$ : Altura del muro

$\gamma_m$ : Densidad del muro

Finalmente, para calcular el asentamiento a partir de las deformaciones, considerando un espesor de estrato salino  $D$ :

$$\delta_1 = \int_{z=0}^{z=D} \Delta\varepsilon(z, H_m) dz \quad (4.11)$$

Desarrollando la integral, se llega la siguiente expresión:

$$\delta_1 = \frac{\alpha\beta}{\gamma_{dCS}} \cdot \ln \left( \frac{(D \cdot \gamma_{dCS} + H_{ns} \cdot \gamma_{ns} + \beta)(H_m \cdot \gamma_m + H_{ns} \cdot \gamma_{ns} + \beta)}{(H_m \cdot \gamma_m + H_{ns} \cdot \gamma_{ns} + D \cdot \gamma_{dCS} + \beta) \cdot (H_{ns} \cdot \gamma_{ns} + \beta)} \right) \quad (4.12)$$

La ecuación 4.12 se puede aplicar tanto para el modelo de carga de suelo salino para estado seco como para el modelo de carga de suelo salino con sales disueltas (figura 4.3). La diferencia principal en los dos modelos vienen dada por la densidad utilizada en el estrato salino. Para el caso seco se considera la densidad seca con sales ( $\gamma_{dCS}$ ), mientras que para el caso con sales disueltas se considera que el nivel de agua se encuentra justo en el límite superior del estrato salino, por lo que se utiliza una densidad saturada sin sales ( $\gamma_{sat SS}$ ), es decir, la densidad seca sin sales descrita en el capítulo 3, pero considerando que todos sus vacíos están compuestos por agua.

Finalmente, el asentamiento debido únicamente a la potencial disolución de las sales queda representado por la diferencia de asentamiento del modelo seco y el modelo con sales disueltas.

$$\delta_{salino} = \delta_{1(carga\ con\ sales\ disuelta)} - \delta_{1(carga\ en\ estado\ seco)} \quad (4.13)$$

# Capítulo 5

## Recopilación de Datos de Proyecto de Muro para Depósitos de Relaves en Suelos Salinos

### 5.1. Antecedentes de los datos utilizados

Para el desarrollo de este trabajo se cuenta con resultados de laboratorio para el estudio de una serie de muros para un depósito de relaves del norte de Chile. Todos los datos incluidos en este trabajo fueron recopilados directamente desde informes de laboratorio.

Por temas de confidencialidad, no se menciona el nombre del proyecto y se ha decidido renombrar todas las campañas y muestras presentes en este trabajo. De esta forma, se presentan las campañas A, B y C, ejecutadas para el mismo depósito de relaves, pero para el estudio de diferentes zonas de muro.

Además de las campañas, se han renombrado todas las muestras recopiladas. Para esto, se elige un nuevo formato como se muestra en la figura 5.1, de manera que quede clara la procedencia de los datos utilizados.

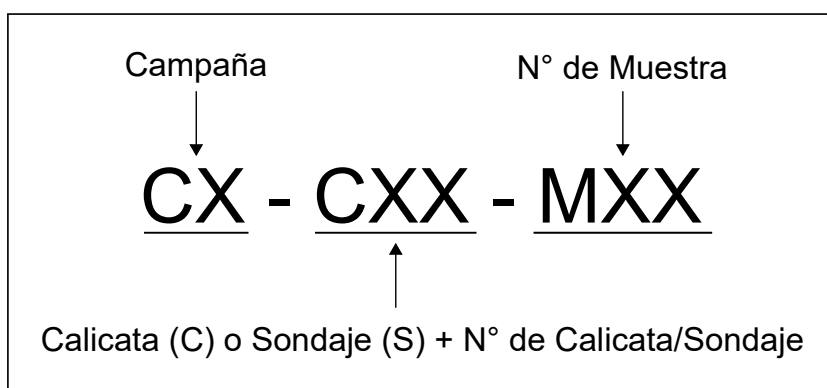


Figura 5.1: Descripción de la nomenclatura asignada a las muestras

Es importante destacar que al momento de ensayar las muestras, se cortan probetas de aproximadamente 3 cm de altura. En el caso de la campaña A, se hace una diferenciación debido a

que los informes de laboratorio describen que 5 probetas fueron saturadas con agua destilada mientras que otras 3 fueron saturadas con agua proveniente de ensayo de sales solubles (agua con presencia de sales disueltas). En este caso, la nomenclatura (S/S) se refiere a agua sin sales, mientras que (C/S) se refiere a agua con sales. La conductividad eléctrica que presentaba el agua con sales era de 9,02 [mS/cm] según lo registrado en los informes.

Finalmente, para complementar este estudio, se utilizaron los datos de la tesis de Olgún (2006) [10]. En este caso, se mantiene el nombre original de la muestras.

## 5.2. Tipos de muestras

### Campana A:

La campaña A está compuesta por muestras extraídas de sondajes y calicatas. En la tabla 5.1 es posible observar profundidades relativamente superficiales, exceptuando la muestra C1-S02-M1, donde se puede notar que la profundidad a la que fue extraída es considerablemente mayor con respecto al resto de las muestras. A continuación se presenta el tipo de prospección y profundidades de extracción de cada muestra:

Tabla 5.1: Tipo de prospección y profundidad de cada muestra, Campana A

Muestra	Prospecciones	Profundidad [m]
CA-C01-M1 (S/S)	Calicata	0,20-1,20
CA-C01-M1 (C/S)	Calicata	0,20-1,20
CA-C02-M1 (S/S)	Calicata	0,15-1,50
CA-C02-M1 (C/S)	Calicata	0,15-1,50
CA-S01-M1	Sondaje	2,60-2,90
CA-S02-M1	Sondaje	22,25-22,47
CA-S03-M1 (S/S)	Sondaje	1,50-2,00
CA-S03-M1 (C/S)	Sondaje	1,50-2,00

### Campana B:

Todas las muestras ensayadas en esta campaña fueron extraídas en una misma calicata, a una profundidad entre los 6 y 7 metros. Las profundidades de extracción se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.2: Tipo de prospección y profundidad de cada muestra, Campana B

Muestra	Prospecciones	Profundidad [m]
CB-C01-M1	Calicata	7,00
CB-C01-M2	Calicata	7,00
CB-C01-M3	Calicata	6,00

## Campana C:

En el caso de la campana C, las muestras fueron obtenidas desde diferentes sondajes y a diferentes profundidades, tal como se muestra en la tabla a continuación:

Tabla 5.3: Tipo de prospección y profundidad de cada muestra, Campana C

Muestra	Prospecciones	Profundidad [m]
CC-S01-M1	Sondaje	5,30-5,45
CC-S02-M1	Sondaje	7,30-7,48
CC-S03-M1	Sondaje	1,87-2,00
CC-S04-M1	Sondaje	5,58-5,53
CC-S05-M1	Sondaje	3,70-3,90
CC-S06-M1	Sondaje	3,35-3,60
CC-S07-M1	Sondaje	6,30-6,40
CC-S08-M1	Sondaje	5,87-5,97
CC-S09-M1	Sondaje	7,09-7,23
CC-S10-M1	Sondaje	5,70-5,92

## Olguín:

De acuerdo a lo presentado en el trabajo de Olguín [10], todas las muestras fueron extraídas de calicatas, ubicadas en diferentes localidades del Norte de Chile. Sólo se presenta la profundidad exacta de las muestras Arica 01, Arica 02 y Arica 03. Para la muestra Calama, se menciona que corresponde a una colpa superficial. Por otro lado, tanto las muestras AH 01 como AH 02 se encontraban bajo una capa superficial de arena suelta.

Tabla 5.4: Tipo de prospección y profundidad de cada muestra, Olguín

Muestra	Prospecciones	Profundidad [m]
Arica 01	Calicata	0,50 - 1,00
Arica 02	Calicata	0,50 - 1,00
Arica 03	Calicata	2,50
Calama	Calicata	Superficial
AH 01 <sup>a</sup>	Calicata	Superficial
AH 02	Calicata	Superficial

<sup>a</sup> Correspondientes a muestras obtenidas en Alto Hospicio

Finalmente, en la figura 5.2 se presenta un resumen gráfico con todas las profundidades de extracción para las 3 primeras campañas y para las 3 primeras muestras de la campaña de Olgúin.

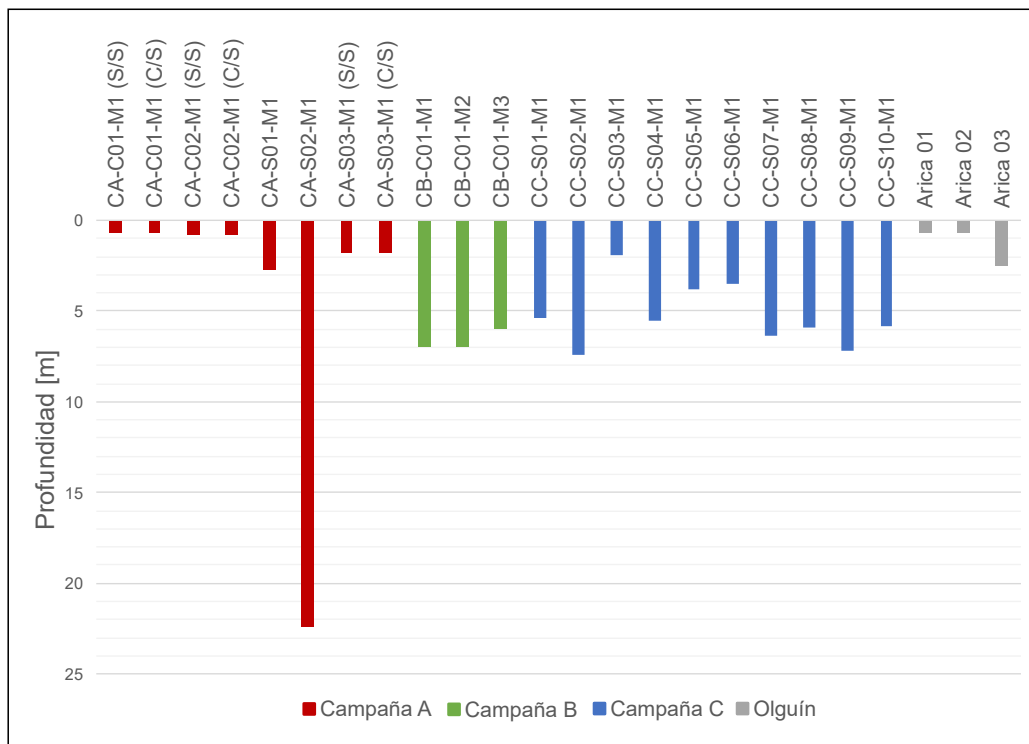


Figura 5.2: Resumen con profundidades para cada prospección según campaña

### 5.3. Granulometrías referenciales

Como se mencionó anteriormente, las campañas A, B y C fueron realizadas en el marco del estudio de un depósito de relaves. Además, cada campaña fue realizada para diferentes muros dentro de este depósito. En el trabajo de Olgúin [10] se menciona que todas las muestras fueron recogidas en diferentes localidades del norte de Chile (Arica, Calama, Alto Hospicio).

Por otra parte, en los informes de laboratorio de las primeras 3 campañas no se presenta la granulometría para cada muestra de colapso, pero se tienen resultados de granulometrías realizadas a diferentes muestras (tanto de sondajes como calicatas) extraídas en las cercanías de cada muro. Considerando esto, los gráficos que se presentan a continuación muestran granulometrías referenciales de cada área en el caso de las campañas A, B y C. La granulometría presentada para el caso de los datos de Olgúin no hace diferenciación por sector y se grafican en conjunto todos los resultados. Todas las granulometrías presentes corresponden a muestras lavadas, es decir, con sus sales disueltas.



### Campaña A:

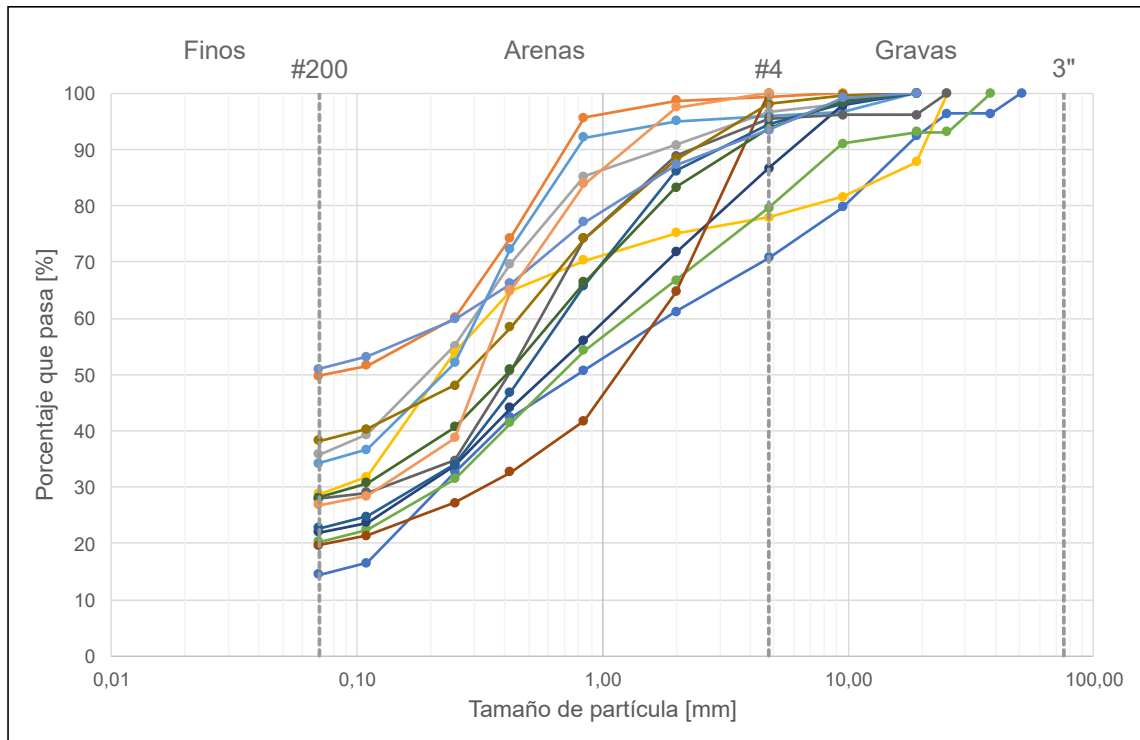


Figura 5.3: Granulometría referencial, Campaña A

### Campaña B:

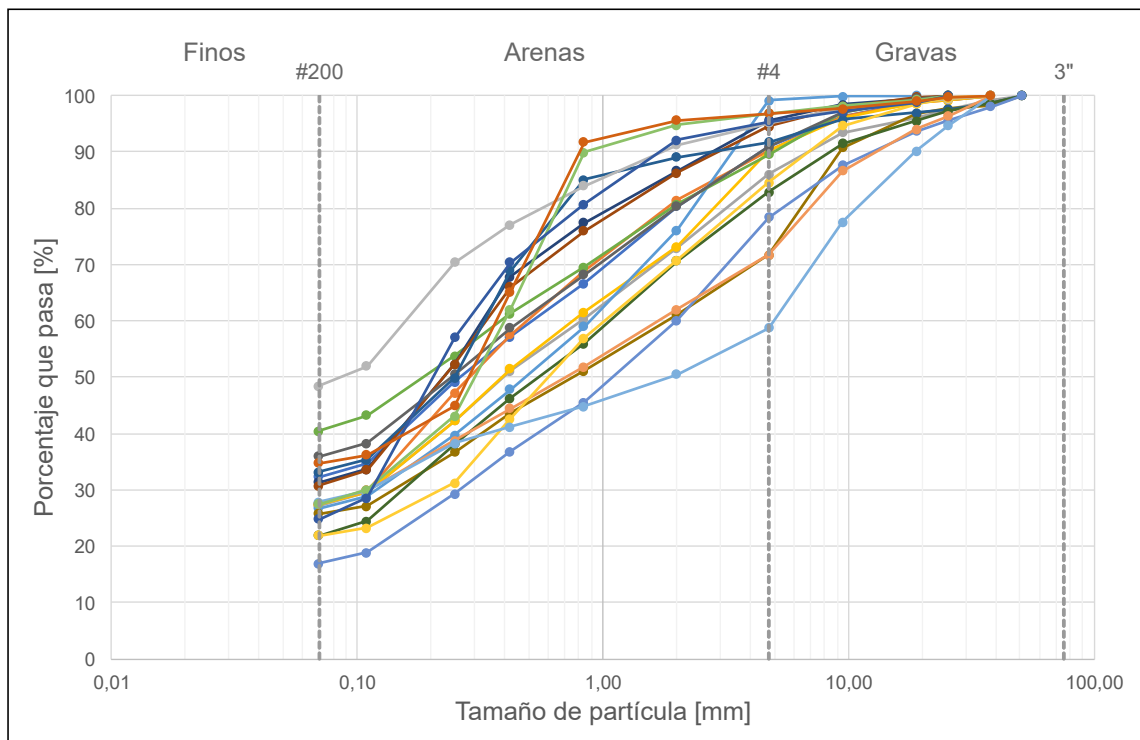


Figura 5.4: Granulometría referencial, Campaña B

### Campaña C:

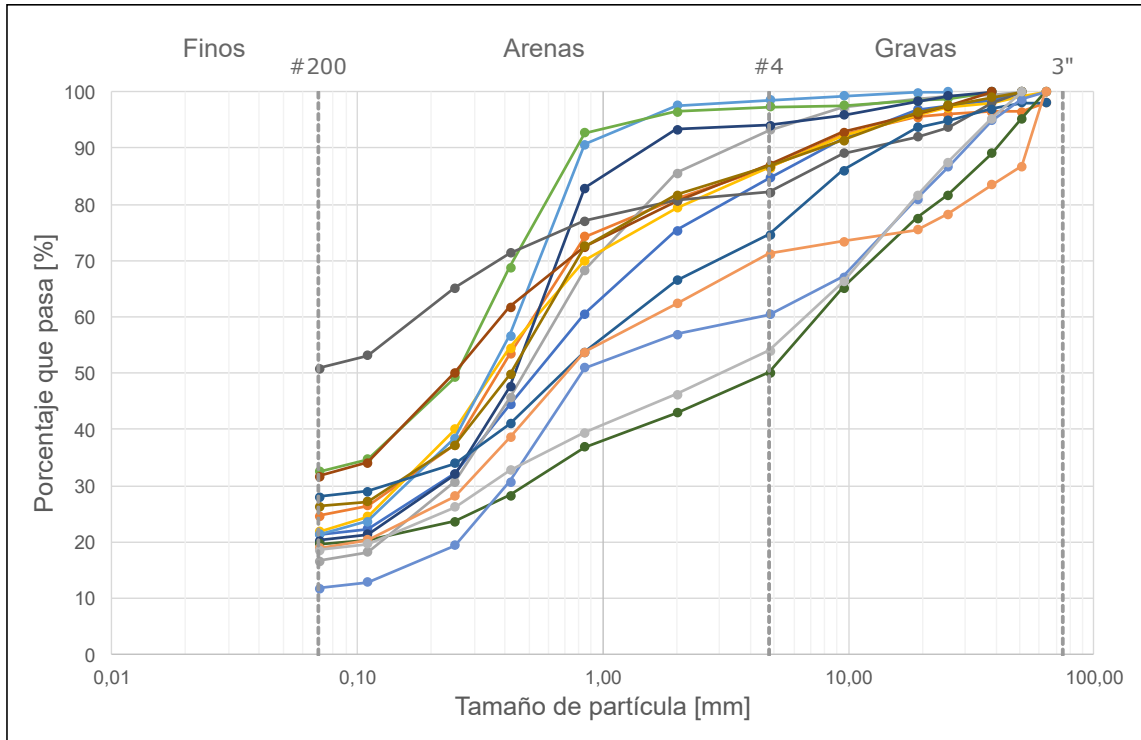


Figura 5.5: Granulometría referencial, Campaña C

### Olguín:

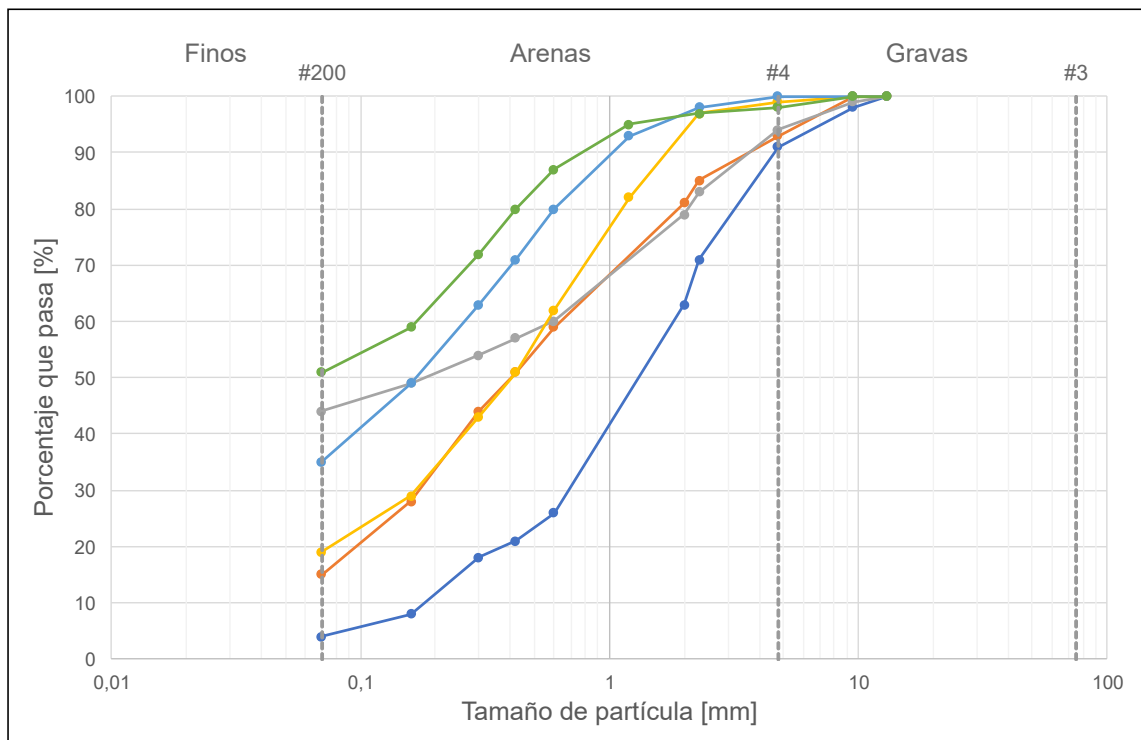


Figura 5.6: Granulometría referencial, Olguín

## 5.4. Clasificación USCS y unidades geológicas

En esta sección se presenta la clasificación USCS de todas las muestras, además de la unidad geológica de donde fueron extraídas. La información que se muestra en las siguientes tablas corresponden a resultados de laboratorios y descripciones presentes en los informes de cada consultora.

### Campaña A:

En la tabla 5.5 se presenta la clasificación USCS para cada muestra. Los resultados muestran que el tipo de suelo varía entre Arena Limosa (SM) y Arena Arcillosa (SC). Además, los materiales que constituyen estos suelos corresponden a caliche y chusca. Las muestras CA-S01-M1 y CA-S02-M1 no presentan descripciones de las unidades, pero se esperan materiales de características similares.

Tabla 5.5: Clasificación USCS y descripción de las unidades geológicas, Campaña A

Muestra	USCS	Unidad
CA-C01-M1 (S/S)	SC	Caliche
CA-C01-M1 (C/S)	SC	Caliche
CA-C02-M1 (S/S)	SC-SM	Caliche
CA-C02-M1 (C/S)	SC-SM	Caliche
CA-S01-M1	SM	-
CA-S02-M1	SM	-
CA-S03-M1 (S/S)	SC	Caliche/Chusca
CA-S03-M1 (C/S)	SC	Caliche/Chusca

A continuación se definen los materiales mencionados anteriormente:

- **Caliche:** Corresponde a un material que va desde arenas finas limosas a arenas gravosas, con una graduación pobre y presencia de finos de baja plasticidad. Las partículas presentan formas subangulares, de compacidad baja a media y cementación moderada a fuerte debido a la presencia de las sales. El color de este material varía entre pardo grisáceo, pardo amarillento y pardo rojizo.
- **Chusca:** Corresponde a un material que va desde arenas finas limosas a limos arenosos, con una graduación pobre. Presenta compacidad suelta, sin cementación. El color principal de este material corresponde a pardo claro.

En cuanto al contenido de finos registrados, las muestras CA-C01-M1 (S/S) y CA-C01-M1 (C/S) presentan 19 %, la muestras CA-C02-M1 (S/S) y CA-C02-M1 (C/S) presentan 26 % y las muestras extraídas del sondaje CA-S03-M1 presentan 38 %. No se tiene información del contenido de finos de las muestras restantes. Por otra parte, se tiene que la cantidad de arena presente en las muestras mencionadas anteriormente varía entre un 50 y 60 % de acuerdo a los informes.

## **Campaña B:**

En la tabla 5.6 se presenta el resumen con la clasificación USCS y la unidad estratigráfica de cada muestra. En esta campaña se esperan características similares debido a que corresponden a muestras cercanas entre ellas en profundidad.

Tabla 5.6: Clasificación USCS y descripción de las unidades geológicas, Campaña B

Muestra	USCS	Unidad
CB-C01-M1	SC	Caliche
CB-C01-M2	SM	Caliche
CB-C01-M3	SM	Caliche

## **Campaña C:**

Para esta campaña no se presenta una clasificación USCS de las muestras, pero en la sección anterior de este capítulo se muestran granulometrías referenciales de la zona donde se emplaza el muro. Los resultados de laboratorio de estas granulometrías referenciales muestran que la clasificación para el tipo de suelo presente en esta área corresponde a "SC-SM".

En los informes se presentan descripciones de las unidades, notando una predominancia de caliche. Además de este material, es posible encontrar sienogranito, diorita, brecha y material de transición, este último correspondiente a la zona superficial del macizo rocoso, la que se encuentra fuertemente meteorizada, alterada y fracturada. Las descripciones para esta campaña se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.7: Descripción de las unidades geológicas, Campaña C

Muestra	Unidad
CC-S01-M1	Caliche
CC-S02-M1	Brecha
CC-S03-M1	Sienogranito
CC-S04-M1	Caliche
CC-S05-M1	Caliche
CC-S06-M1	Caliche
CC-S07-M1	Caliche
CC-S08-M1	Diorita
CC-S09-M1	Caliche
CC-S10-M1	Transición

## Olguín:

A pesar de que no se presenta una clasificación USCS, Olguín describe cada una de las muestras, donde se puede observar lo siguiente [10]:

- Para las muestras Arica 01 y Arica 02 se tiene una matriz arenosa coluvial de cantos angulosos. El material insoluble corresponde a una arena fina de tamaño medio de partículas ( $D_{50}$ ) igual a 1,2 mm para Arica 01 y 0,4 mm para Arica 02. La muestra Arica 01 presenta un porcentaje de finos inferior a 5 %, mientras que en Arica 02 se tiene un 15 % de finos no plásticos [10].
- La muestra Arica 03 está constituida principalmente por una matriz de suelo fino arenararcilloso de compacidad alta, intercalada con clastos de tamaño máximo de 1 cm. El porcentaje de finos sin sales soluble (muestra lixiviada) está en torno a un 43 %.
- La muestra Calama está constituida principalmente por material fino limoso, cementado por las sales solubles cristalizadas. Presenta una escasa presencia de partículas con tamaños por sobre los 1 mm de diámetro. El porcentaje de finos para la muestra lixiviada es de un 50 %.
- Tanto la muestra AH 01 como AH 02 presentan una importante cantidad de sales solubles. En un rango bajo los 2 mm, la muestra AH 01 posee tamaños de partículas mayores con respecto a la muestra AH 02. Se menciona también que la alta cementación entre las sales y el material insoluble le otorga a la estructura una textura y dureza similar a la de una roca.

## 5.5. Salinidad, densidad seca con sales y densidad seca sin sales

En esta sección se presentan los resultados de contenido de sales, densidad seca con sales y densidad seca sin sales de todas las muestras. Los dos primeros parámetros fueron recogidos directamente de los informes de laboratorio, mientras que la densidad seca sin sales fue calculada según la ecuación 3.4 presente en el capítulo 3.

Los resultados de salinidad que se enseñan en este trabajo consideran las sales solubles totales en las muestras<sup>1</sup>. Para asegurar el registro de la totalidad de las sales, se realizan ensayos de sales solubles [1] posterior a los ensayos de colapso. Estos ensayos se realizan lavando la muestras cada 24 horas y midiendo en cada lavado la conductividad eléctrica, hasta que la variación entre dos registros consecutivos sea menor a un 1 %.

<sup>1</sup> Se consideran las sales registradas en el ensayo de colapso, sumado con las sales determinadas a partir de ensayos de sales solubles post ensayo de colapso[1]. En la sección Anexo B se muestra un ejemplo para la Campaña C

### **Campaña A:**

Tabla 5.8: Densidad seca con sales ( $\gamma_{dCS}$ ), salinidad ( $S$ ), densidad seca sin sales ( $\gamma_{dSS}$ ) y  $G_S$ , Campaña A

Muestra	$\gamma_{dCS}$ [t/m <sup>3</sup> ]	S [%]	$\gamma_{dSS}$ [t/m <sup>3</sup> ]	$G_S$ [-]
C1-C01-M1 (S/S)	1,40	23,68	1,13	2,71
C1-C01-M1 (C/S)	1,54	24,15	1,24	2,71
C1-C02-M1 (S/S)	0,91	57,33	0,58	2,69
C1-C02-M1 (C/S)	1,06	40,18	0,76	2,69
C1-S01-M1	1,83	11,39	1,64	2,75
C1-S02-M1	1,08	7,26	1,01	2,78
C1-S03-M1 (S/S)	1,67	11,35	1,50	2,76
C1-S03-M1 (C/S)	1,81	27,35	1,42	2,87

### **Campaña B:**

Tabla 5.9: Densidad seca con sales ( $\gamma_{dCS}$ ), salinidad ( $S$ ), densidad seca sin sales ( $\gamma_{dSS}$ ) y  $G_S$ , Campaña B

Muestra	$\gamma_{dCS}$ [t/m <sup>3</sup> ]	S [%]	$\gamma_{dSS}$ [t/m <sup>3</sup> ]	$G_S$ [-]
C2-C01-M1	1,38	39,19	0,99	2,94
C2-C01-M2	1,47	33,70	1,10	2,92
C2-C01-M3	1,43	54,30	0,93	3,01

### **Campaña C:**

Tabla 5.10: Densidad seca con sales ( $\gamma_{dCS}$ ), salinidad ( $S$ ), densidad seca sin sales ( $\gamma_{dSS}$ ) y  $G_S$ , Campaña C

Muestra	$\gamma_{dCS}$ [t/m <sup>3</sup> ]	S [%]	$\gamma_{dSS}$ [t/m <sup>3</sup> ]	$G_S$ [-]
C3-S01-M1	2,13	43,07	1,49	2,70
C3-S02-M1	1,90	8,27	1,75	2,70
C3-S03-M1	2,29	2,03	2,24	2,70
C3-S04-M1	2,14	4,92	2,04	2,70
C3-S05-M1	1,68	35,39	1,24	2,70
C3-S06-M1	1,95	55,46	1,25	2,70
C3-S07-M1	1,79	15,81	1,55	2,70
C3-S08-M1	2,23	2,76	2,17	2,70
C3-S09-M1	1,71	18,82	1,44	2,70
C3-S10-M1	2,04	10,19	1,85	2,70

## Olgúin:

Los resultados presentes en esta tabla son los registrados por Olgúin en su trabajo. En este caso, tanto las metodologías para el cálculo del contenido de sales solubles como para la determinación de la densidad seca con sales de las muestras son especificados en la tesis de Olgúin [10].

Tabla 5.11: Densidad seca con sales ( $\gamma_{dCS}$ ), salinidad ( $S$ ), densidad seca sin sales ( $\gamma_{dSS}$ ) y  $G_S$ , Campaña C

Muestra	$\gamma_{dCS}$ [t/m <sup>3</sup> ]	S [%]	$\gamma_{dSS}$ [t/m <sup>3</sup> ]	$G_S$ [-]
Arica 01	1,87	8,87	1,72	2,65
Arica 02	1,92	7,2	1,79	2,70
Arica 03	2,05	5,35	1,95	2,65
Calama	1,86	7,49	1,73	2,72
AH 01	2,01	82,03	1,10	2,68
AH 02	1,96	110,00	0,93	2,73

Finalmente, en los siguientes gráficos se presentan los parámetros de salinidad, densidad seca con sales y densidad seca sin sales en profundidad, diferenciando para calicatas y sondajes. Los datos utilizados para estos gráficos corresponden a las campañas A, B y C, junto con los datos de Olgúin que poseen información de la profundidad.

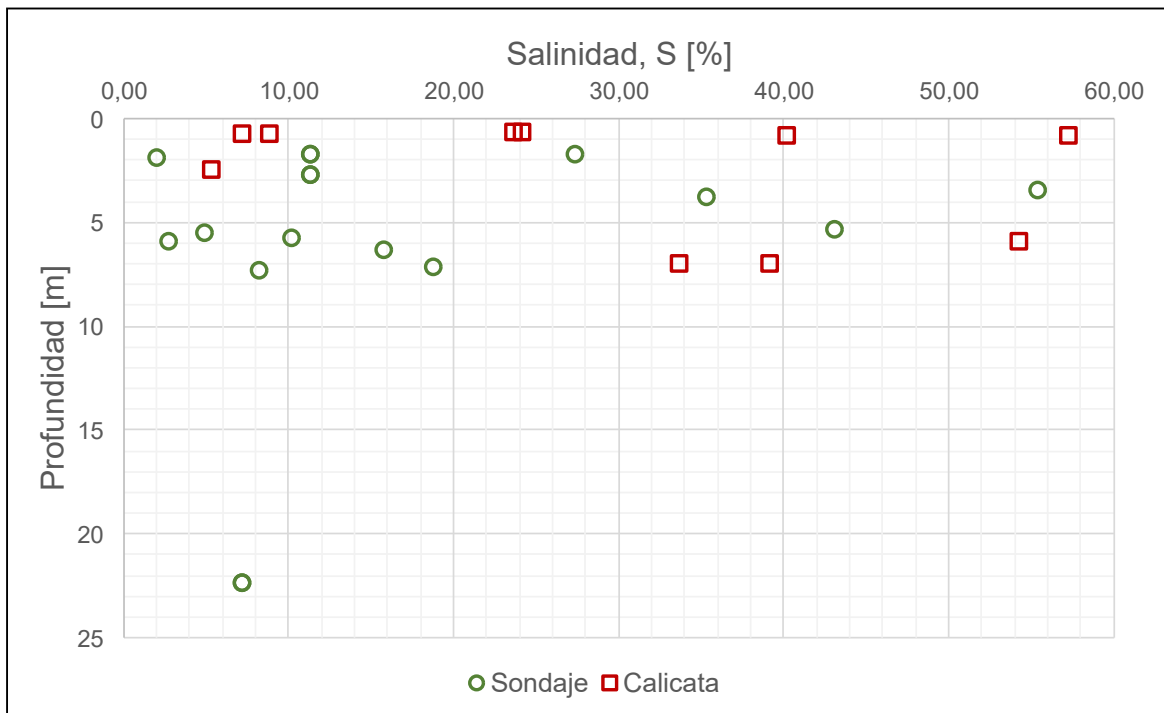


Figura 5.7: Salinidad vs profundidad de extracción

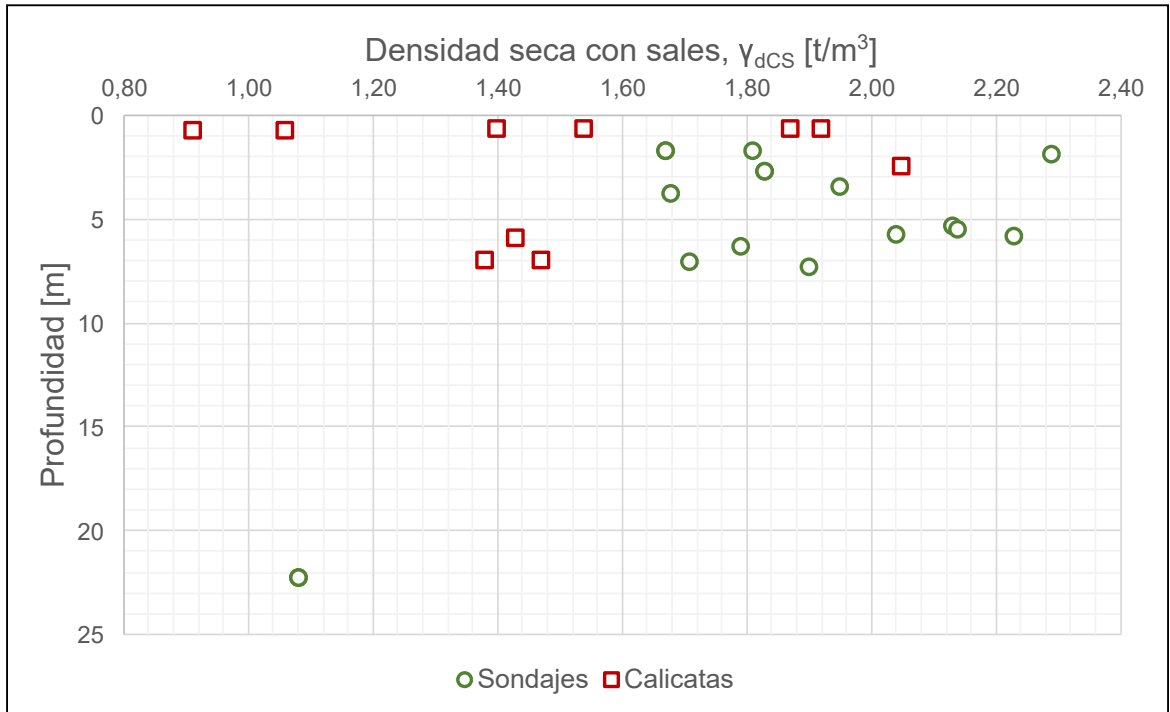


Figura 5.8: Densidad seca con sales vs profundidad de extracción

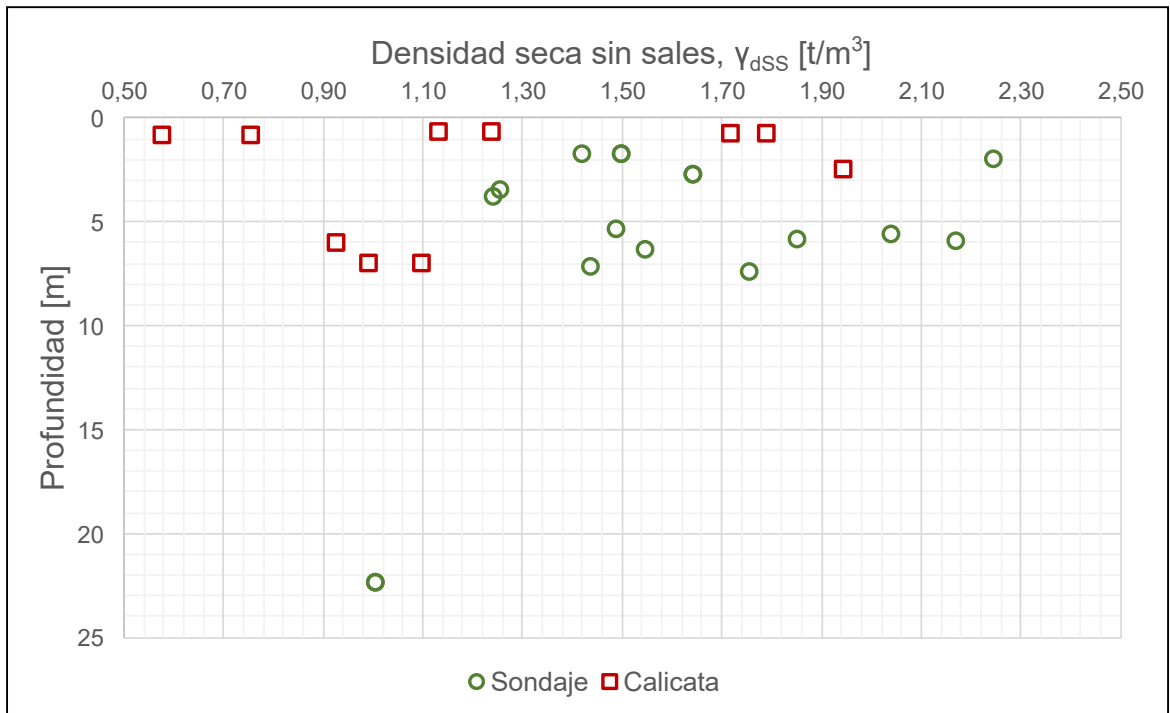


Figura 5.9: Densidad seca sin sales vs profundidad de extracción



## 5.6. Índice de vacíos y porosidad

Se presentan los valores de índice de vacíos ( $e$ ) y porosidad ( $n$ ) para todas las muestras. Además, se calculan los valores de índice de vacíos salino ( $e_{salino}$ ) y porosidad salina ( $n_{salino}$ ) según lo descrito en el capítulo 3.

### Campaña A:

Tabla 5.12: Índice de vacíos, porosidad, índice de vacíos salino y porosidad salina de cada muestra, Campaña A

Muestra	$e$ inicial [-]	$n$ inicial [-]	$e_{salino}$ inicial [-]	$n_{salino}$ inicial [-]
CA-C01-M1 (S/S)	0,94	0,48	1,39	0,58
CA-C01-M1 (C/S)	0,76	0,43	1,18	0,54
CA-C02-M1 (S/S)	1,96	0,66	3,65	0,78
CA-C02-M1 (C/S)	1,54	0,61	2,56	0,72
CA-S01-M1	0,50	0,33	0,67	0,40
CA-S02-M1	1,57	0,61	1,76	0,64
CA-S03-M1 (S/S)	0,65	0,39	0,84	0,46
CA-S03-M1 (C/S)	0,59	0,37	1,02	0,50

### Campaña B:

Tabla 5.13: Índice de vacíos, porosidad, índice de vacíos salino y porosidad salina de cada muestra, Campaña B

Muestra	$e$ inicial [-]	$n$ inicial [-]	$e_{salino}$ inicial [-]	$n_{salino}$ inicial [-]
CB-C01-M1	1,13	0,53	1,97	0,66
CB-C01-M2	0,99	0,50	1,66	0,62
CB-C01-M3	1,10	0,52	2,25	0,69

## Campaña C:

Tabla 5.14: Índice de vacíos, porosidad, índice de vacíos salino y porosidad salina de cada muestra, Campaña C

Muestra	$e$ inicial [-]	$n$ inicial [-]	$e_{salino}$ inicial [-]	$n_{salino}$ inicial [-]
CC-S01-M1	0,27	0,21	0,81	0,45
CC-S02-M1	0,42	0,30	0,54	0,35
CC-S03-M1	0,18	0,15	0,20	0,17
CC-S04-M1	0,26	0,21	0,32	0,24
CC-S05-M1	0,61	0,38	1,18	0,54
CC-S06-M1	0,38	0,28	1,15	0,54
CC-S07-M1	0,51	0,34	0,75	0,43
CC-S08-M1	0,21	0,17	0,24	0,20
CC-S09-M1	0,58	0,37	0,88	0,47
CC-S10-M1	0,32	0,24	0,46	0,31

## Olgúin:

Tabla 5.15: Índice de vacíos, porosidad, índice de vacíos salino y porosidad salina de cada muestra, Olgúin

Muestra	$e$ inicial [-]	$n$ inicial [-]	$e_{salino}$ inicial [-]	$n_{salino}$ inicial [-]
Arica 01	0,42	0,29	0,54	0,35
Arica 02	0,41	0,29	0,51	0,34
Arica 03	0,29	0,23	0,36	0,27
Calama	0,46	0,32	0,57	0,36
AH 01	0,33	0,25	1,43	0,59
AH 02	0,39	0,28	1,93	0,66

## 5.7. Resultados de ensayos de colapso

La medición de deformaciones usando el ensayo de colapso permite evaluar tanto el efecto de la salinidad como la estructura del suelo al momento de la aplicación de una carga y la disolución de las sales. Además, es posible evaluar características particulares de cada muestra como tamaño, dureza, forma y distribución de las partículas.

### 5.7.1. Deformación acumulada

En esta sección se muestra el registro de las deformaciones acumuladas sobre las probetas durante el desarrollo del ensayo de colapso (figura 4.2). Las deformaciones se calculan con respecto a la altura inicial de la probeta como se muestra en la ecuación 4.1 del Capítulo 4.

Las tablas presentan la deformación para cada nivel carga vertical aplicada. La nomenclatura (S) hace referencia a la saturación de la probeta durante la aplicación de esa carga. Todos los valores fueron extraídos directamente desde informes de laboratorio. En el caso de Olguín, no existe información disponible en cuanto al registro deformación acumulada.

En el Anexo C se presentan las tablas con la variación de las alturas para cada probeta.

#### Campana A:

Para esta campaña sólo existe un nivel de carga para cada probeta, seguido de la saturación para este nivel. Tampoco se registra el valor de deformación acumulada luego de la descarga.

Tabla 5.16: Deformaciones obtenidas a partir del ensayo de colapso, Campana A

Muestra	Tensión Vertical [kg/cm <sup>2</sup> ]						
	0	2	2 (S) <sup>a</sup>	6	6 (S)	12	12 (S)
	Deformación [%]						
CA-C01-M1 (S/S)	0,00	0,53	0,70	-	-	-	-
CA-C01-M1 (C/S)	0,00	0,78	1,13	-	-	-	-
CA-C02-M1 (S/S)	0,00	-	-	6,57	28,65	-	-
CA-C02-M1 (C/S)	0,00	-	-	0,64	10,43	-	-
CA-S01-M1	0,00	-	-	3,69	5,80	-	-
CA-S02-M1	0,00	-	-	3,18	11,04	-	-
CA-S03-M1 (S/S)	0,00	-	-	-	-	17,05	28,95
C1-S03-M1 (C/S)	0,00	-	-	-	-	14,63	31,76

<sup>a</sup> La nomenclatura (S) hace referencia a la carga a la cual se satura la muestra. Se considera como columna aparte debido a que se muestra el valor al final del proceso de saturación.

### Campaña B:

En esta campaña existen 2 niveles de cargas posteriores a la saturación de la muestra, es decir, cuando se ha producido la disolución de las sales. Además, se registra la deformación acumulada luego de la descarga.

Tabla 5.17: Deformaciones obtenidas a partir del ensayo de colapso, Campaña B

Muestra	Tensión Vertical [kg/cm <sup>2</sup> ]					
	0	5	5 (S)	10	20	0 (D)
	Deformación [%]					
CB-C01-M1	0	10,14	10,92	17,49	23,22	22,12
CB-C01-M2	0	7,30	17,87	22,87	24,30	23,39
CB-C01-M3	0	4,88	12,24	12,61	14,59	13,73

### Campaña C:

Como se muestra en siguiente tabla 5.2, existen dos niveles de carga antes de la saturación. Al igual que en la campaña A, no existe registro de deformación en descarga.

Tabla 5.18: Deformaciones obtenidas a partir del ensayo de colapso, Campaña C

Muestra	Tensión Vertical [kg/cm <sup>2</sup> ]				
	0	2	4	4 (S)	6
	Deformación [%]				
CC-S01-M1	0,00	0,43	0,70	18,04	36,43
CC-S02-M1	0,00	0,55	1,37	3,56	4,89
CC-S03-M1	0,00	0,74	1,42	1,58	1,99
CC-S04-M1	0,00	0,83	1,39	2,38	3,21
CC-S05-M1	0,00	0,67	1,73	13,07	14,40
CC-S06-M1	0,00	0,93	1,72	18,47	20,23
CC-S07-M1	0,00	1,12	2,10	14,98	17,87
CC-S08-M1	0,00	0,46	1,14	1,36	1,72
CC-S09-M1	0,00	1,02	2,03	10,76	14,48
CC-S10-M1	0,00	0,24	0,50	1,57	2,27

### 5.7.2. Deformación producto de la disolución de sales

En esta sección se registran los valores de deformación debido al efecto de la disolución de las sales al interior del suelo. Los valores registrados se extraen directamente de informes de laboratorio. El cálculo para obtener esta deformación se realiza de acuerdo a la ecuación 4.2, donde se considera que la altura inicial corresponde a la altura de la probeta justo antes del comienzo de la saturación, registrando las deformaciones con respecto a ese valor. Por otra parte, en cada tabla se presenta el valor de la carga constante aplicada durante el proceso de saturación de la probeta.

#### Campana A:

Tabla 5.19: Deformación por disolución de sales, Campana A

Muestra	$\varepsilon_{salina}$ [%]	$\sigma'_1$ (S) [kg/cm <sup>2</sup> ]
CA-C01-M1 (S/S)	0,17	2
CA-C01-M1 (C/S)	0,36	2
CA-C02-M1 (S/S)	23,63	6
CA-C02-M1 (C/S)	9,86	6
CA-S01-M1	8,12	6
CA-S02-M1	2,19	6
CA-S03-M1 (S/S)	14,35	12
CA-S03-M1 (C/S)	20,06	12

#### Campana B:

Tabla 5.20: Deformación por disolución de sales, Campana B

Muestra	$\varepsilon_{salina}$ [%]	$\sigma'_1$ (S) [kg/cm <sup>2</sup> ]
CB-C01-M1	0,87	5
CB-C01-M2	11,40	5
CB-C01-M3	7,73	5

## Campana C:

Tabla 5.21: Deformación por disolución de sales, Campana C

Muestra	$\varepsilon_{salina}$ [%]	$\sigma'_1$ (S) [kg/cm <sup>2</sup> ]
CC-S01-M1	17,46	4
CC-S02-M1	2,22	4
CC-S03-M1	0,16	4
CC-S04-M1	1,00	4
CC-S05-M1	11,54	4
CC-S06-M1	17,04	4
CC-S07-M1	13,16	4
CC-S08-M1	0,22	4
CC-S09-M1	8,91	4
CC-S10-M1	1,08	4

## Olguín:

Tabla 5.22: Deformación por disolución de sales, Olguín

Muestra	$\varepsilon_{salina}$ [%]	$\sigma'_1$ (S) [kg/cm <sup>2</sup> ]
Arica 01	5,9	2
Arica 02	2,88	2
Arica 03	0,22	2
Calama	5,22	2
AH 01	30,02	2
AH 02	12,78	2

# Capítulo 6

## Análisis de Correlaciones

### 6.1. Correlaciones de los diferentes parámetros índice

A partir de los resultados de laboratorio para cada muestra, se desarrolla un análisis con el objetivo de identificar correlaciones entre la deformación por disolución de sales (tramo rojo en figura 4.2) y los distintos parámetros definidos en el capítulo 3. De acuerdo a la discusión de parámetros presentada en la sección 3.3, se da especial énfasis en el estudio de la densidad seca sin sales como indicador del potencial de colapsos en estructuras de suelos salinos.

En la figura 6.1 se grafica la salinidad  $S$  y la deformación por disolución de sales  $\varepsilon_{salina}$ , mostrando cada campaña por separado.

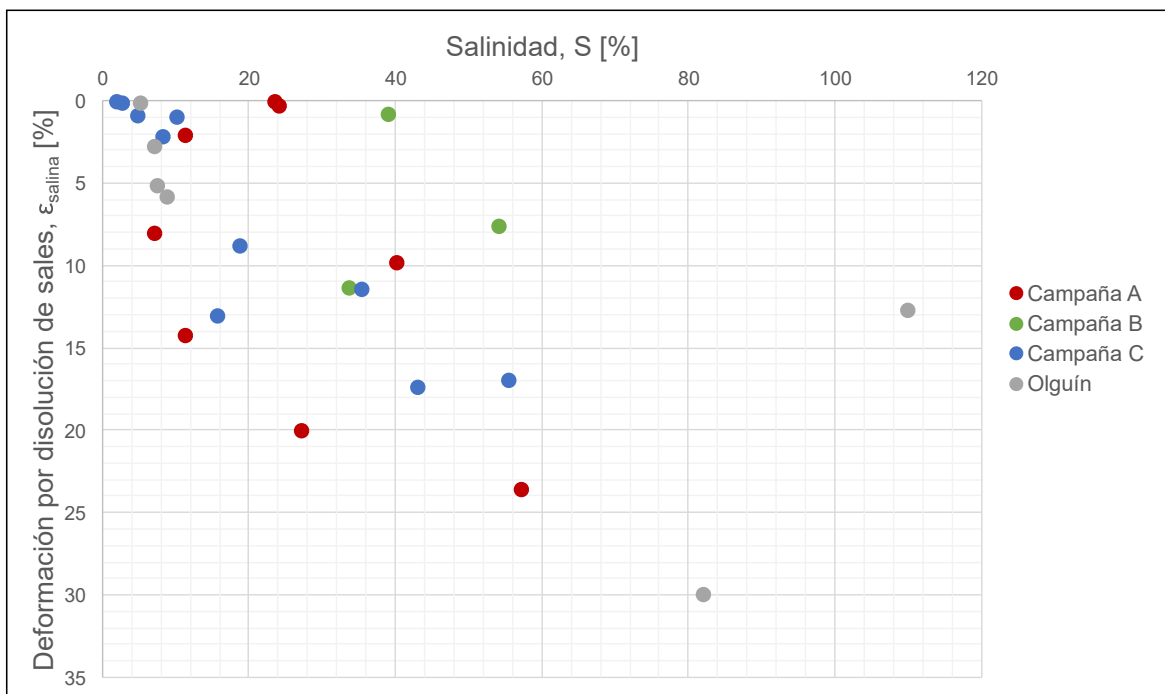


Figura 6.1: Salinidad vs deformación por disolución de sales, según campaña

Es posible notar que existe una tendencia en relación al nivel de deformaciones a medida que aumenta el contenido de sales en la muestra. Además, se observa la existencia de un límite superior de deformaciones constituido principalmente por puntos de color rojo (Campaña A). Por otro lado, se observa que a partir de salinidades cercanas al 5% la dispersión de datos aumenta considerablemente, donde se aprecian diferencias en la deformación por disolución de sales de hasta un 20% para datos con salinidades similares. A raíz de esto último, se descarta que la salinidad por sí sola corresponda a un parámetro confiable para la estimación de deformación por disolución de sales.

En el caso de la densidad seca con sales  $\gamma_{dCS}$  (figura 6.2), no es posible apreciar una tendencia clara entre este parámetro y la deformación por disolución de sales  $\varepsilon_{salina}$ . Se puede notar una importante dispersión de datos para el rango de valores de densidades mostrados.

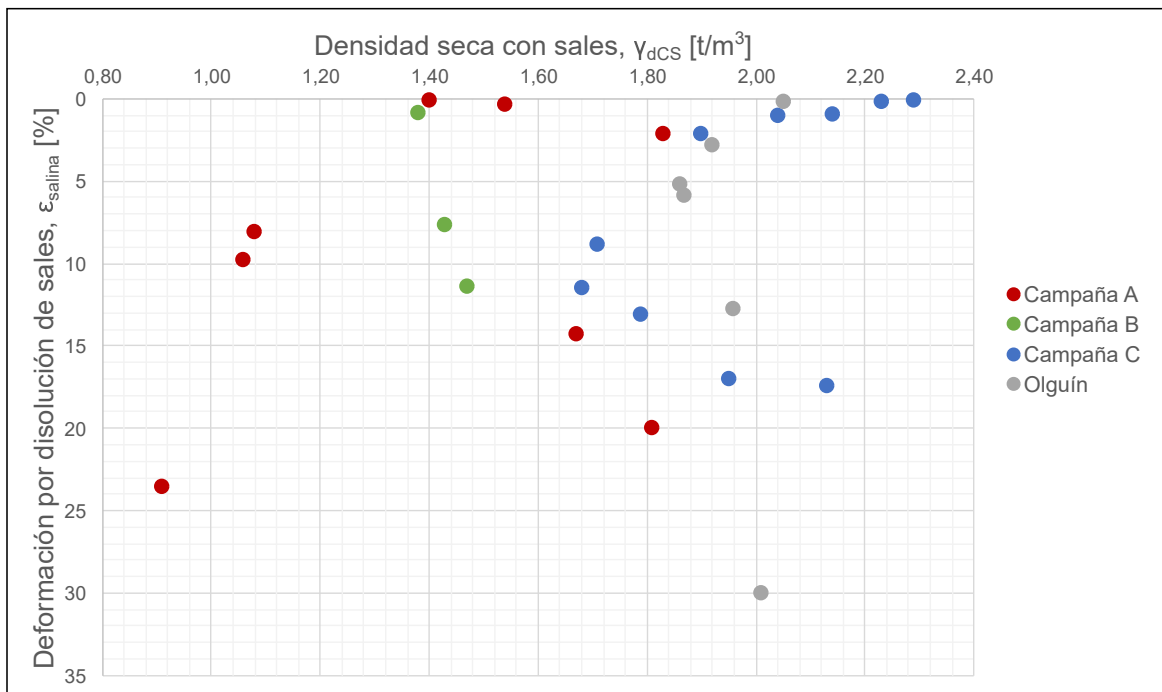


Figura 6.2: Densidad seca con sales vs deformación por disolución de sales, según campaña

La baja correlación mostrada en el gráfico anterior permite considerar a la densidad seca con sales como parámetro falible para estimar deformaciones por disolución de sales.

En la figura 6.3 se grafica la densidad seca sin sales  $\gamma_{dSS}$  y la deformación por disolución de sales  $\varepsilon_{salina}$ , donde es posible notar una mejor tendencia de los puntos con respecto a los gráficos anteriores. El resultado más relevante de este gráfico es el límite superior de deformaciones que alinea puntos azules, rojos y grises. Esto muestra una superioridad estadística con respecto al límite superior de la salinidad, el cual sólo considera puntos rojos (Campaña A).



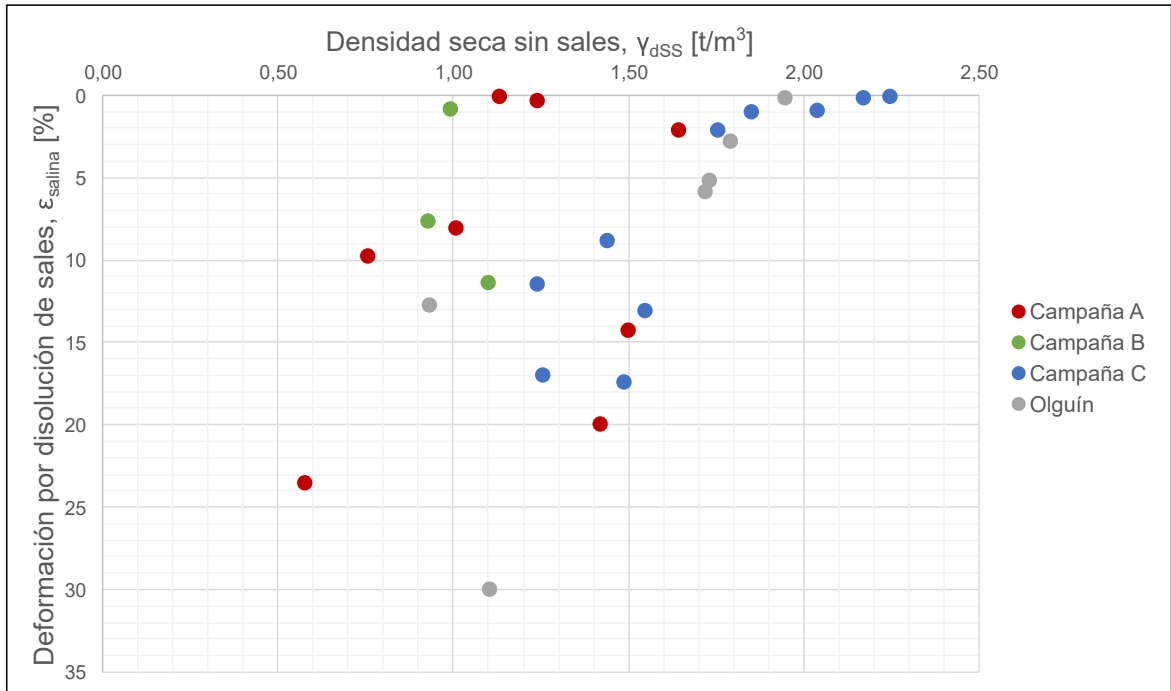


Figura 6.3: Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales, según campaña

Por otra parte, es posible apreciar un aumento en la dispersión de los puntos para densidades menores a  $1,55 [t/m^3]$ . Este aumento de dispersión y el límite superior de deformaciones descrito anteriormente se representan gráficamente en la figura 6.4.

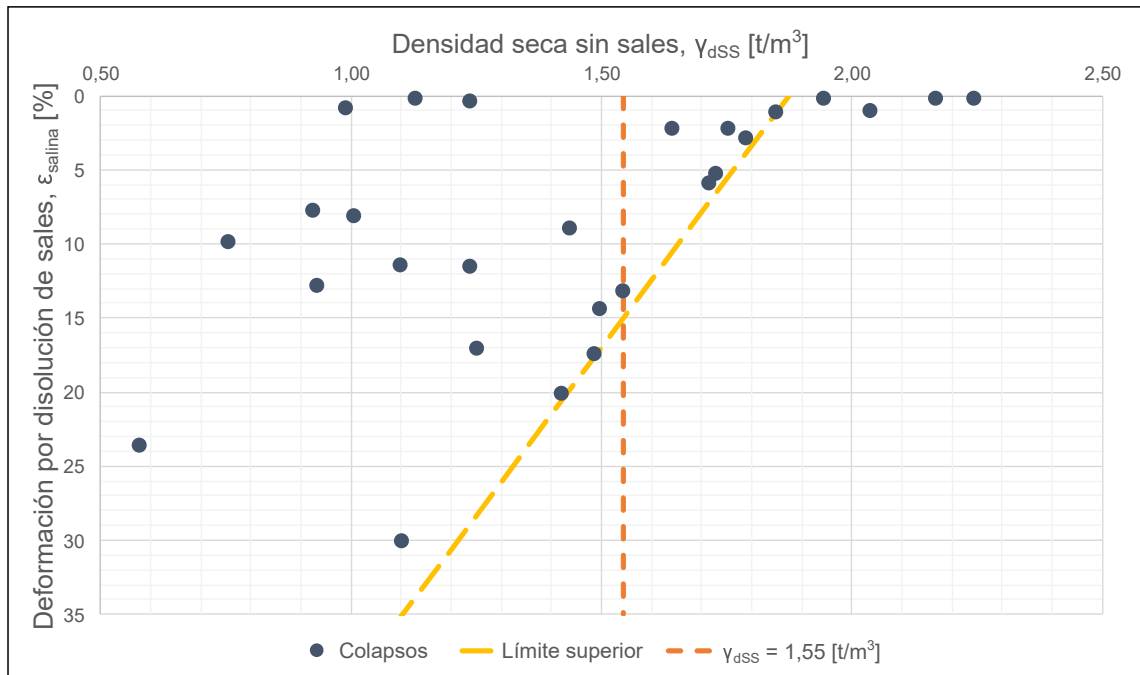


Figura 6.4: Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales (descripción de límites)

En la figura 6.5 se diferencian los puntos según rango de salinidades. A partir de esto se puede notar que los puntos con mayor contenido de sales no se encuentran en el límite superior de deformaciones descrito. Muestras con salinidades por sobre el 20% presentan una densidad seca sin sales menor a  $1,55 \text{ [t/m}^3\text{]}$ , con una importante dispersión en los valores de deformación.

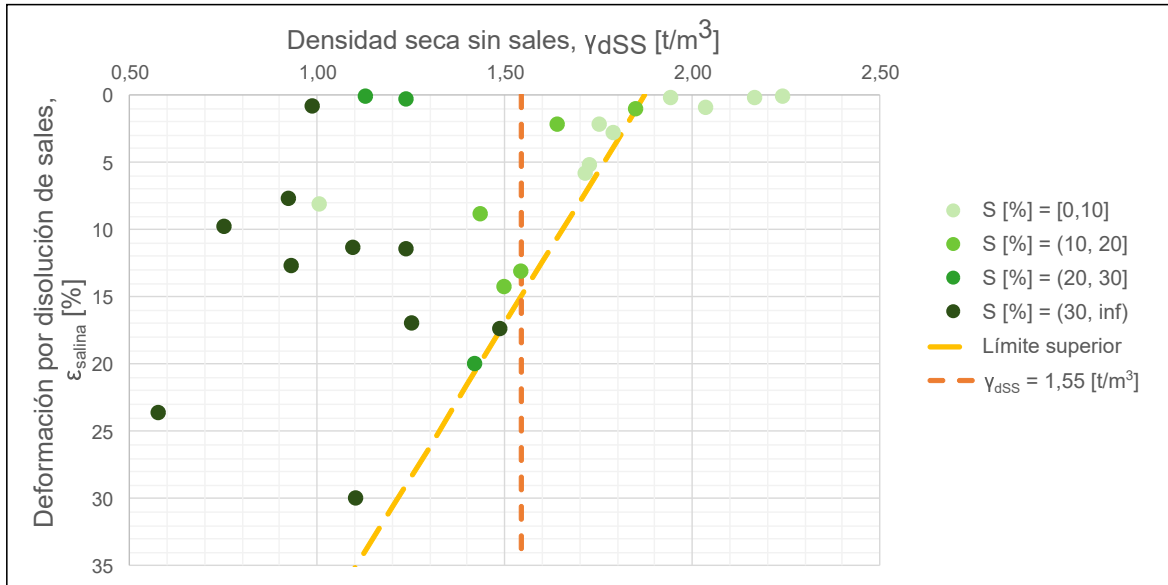


Figura 6.5: Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales (rangos de salinidad)

Al graficar los datos que se encuentran sobre el límite  $\gamma_{dSS} = 1,55 \text{ [t/m}^3\text{]}$ , es posible notar una importante correlación. Esta se encuentra descrita por una curva de tendencia exponencial ( $R^2 = 0,811$ ) como se muestra en el siguiente gráfico:

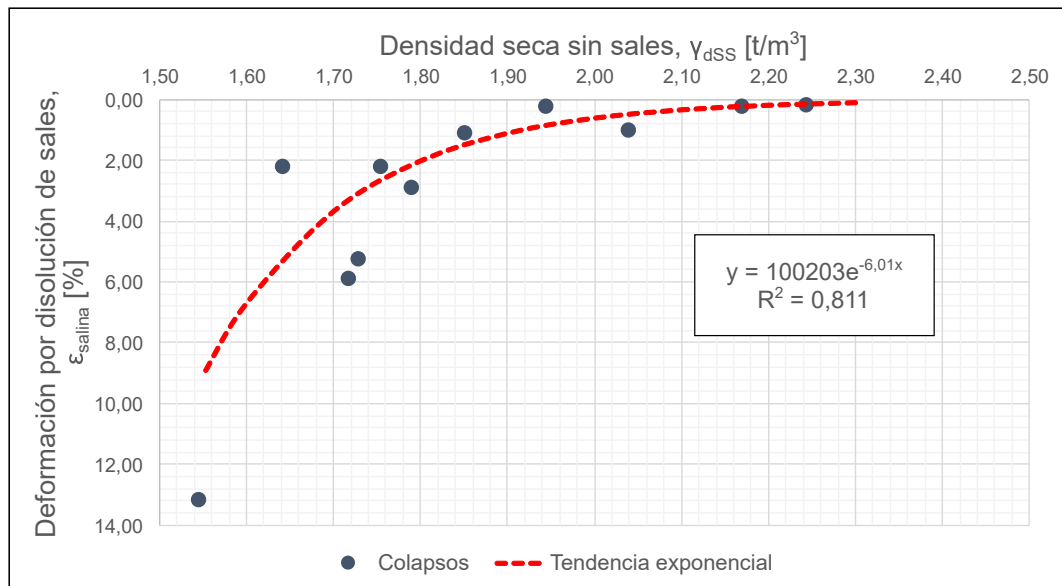


Figura 6.6: Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales para puntos sobre  $\gamma_{dSS} = 1,55 \text{ [t/m}^3\text{]}$

## 6.2. Efecto de la carga vertical sobre la muestra

Como se puede observar en la sección 5.7 del capítulo 5, existen diferentes valores de carga vertical al momento de la saturación de las muestras. Esto depende de las características y sollicitaciones particulares de cada muro. En la figura 6.7 se grafica la densidad seca sin sales  $\gamma_{dSS}$  y la deformación por disolución de sales  $\varepsilon_{salina}$ , diferenciando las cargas aplicadas al momento de la saturación.

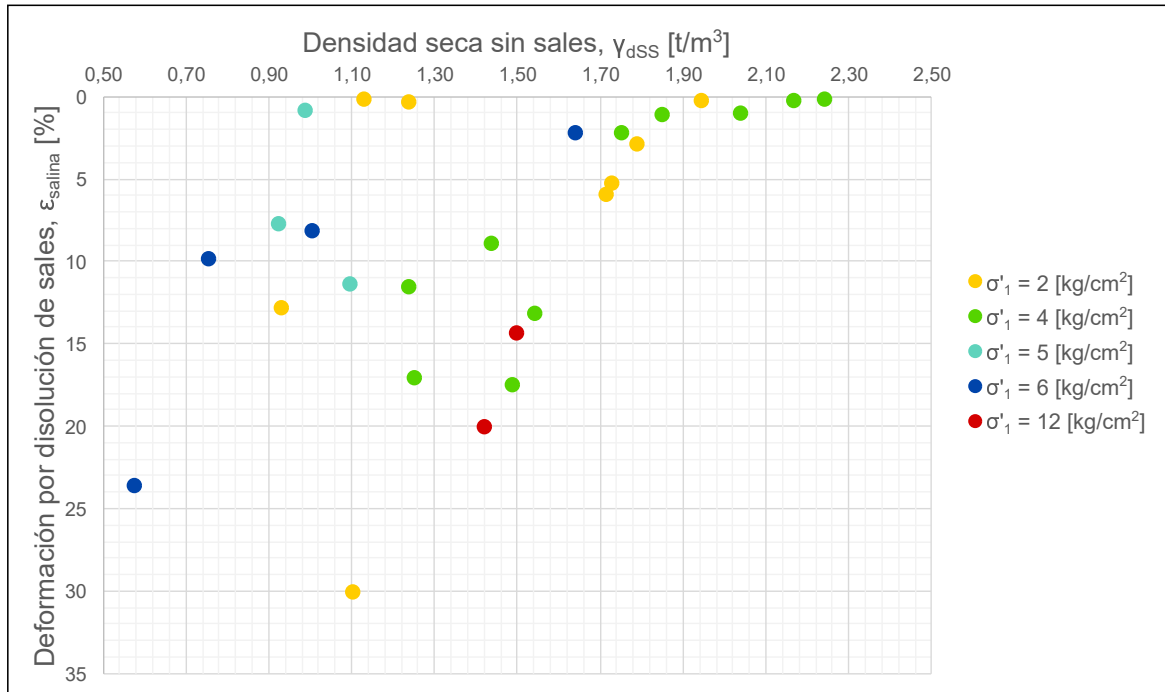


Figura 6.7: Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales (según carga aplicada en saturación)

Para corregir esta diferencia de cargas se trabaja con una estimación a esfuerzos de referencia, obtenidos a partir de la metodología presentada en la sección 4.3 del capítulo 4. Para el caso de Olgún no se cuenta con el registro de deformaciones del ensayo de colapso, por lo que esta estimación a esfuerzos de referencia se trabaja sólo con los datos de las primeras 3 campañas.

La figura 6.8 presenta el resultado gráfico con la variación de deformaciones según la estimación a esfuerzos de referencia. Esto se realiza para tensiones verticales de 2, 4 y 6 [kg/cm<sup>2</sup>].



Figura 6.8: Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales a un esfuerzo de referencia. Campañas A, B y C.

Es importante mencionar que casi todos los puntos siguen una misma tendencia al analizar el crecimiento de las deformaciones según la carga. El único punto que presenta un crecimiento diferente es la muestra CC-S01-M1 ( $\gamma_{dSS} = 1,49$  [t/m<sup>3</sup>]), donde se puede observar una deformación importante para una carga de 6 [kg/cm<sup>2</sup>] (deformación cercana a un 35% de deformación). Esto puede deberse a una subestimación del contenido real de sales al interior de la muestra. Como consecuencia de esto, no se desarrolla la disolución completa, generando que la deformación por el incremento de carga post saturación (tramo azul en figura 4.2) se vea afectada por la disolución de las sales remanentes.

Otro resultado relevante de este gráfico se puede observar en los puntos sobre  $\gamma_{dSS} = 2,0$  [t/m<sup>3</sup>]. Estos puntos muestran un reducido aumento de deformación a medida que aumenta la carga aplicada al saturar. La figura 6.8 presenta los resultados del gráfico anterior, pero con un acercamiento a los puntos sobre  $\gamma_{dSS} = 2,0$  [t/m<sup>3</sup>].



Figura 6.9: Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales a un esfuerzo de referencia. Campañas A, B y C. (Sobre  $\gamma_{dSS} = 2,0$  [t/m<sup>3</sup>])

Con el objetivo de validar los resultados del análisis realizado y comprobar que se mantiene la correlación para los puntos sobre  $\gamma_{dSS} = 1,55$  [t/m<sup>3</sup>], se replica el gráfico presentado en la figura 6.6 pero considerando los valores normalizados para una carga de 2 [kg/cm<sup>2</sup>]. Se elige esta carga para poder comparar los resultados con los datos de Olgúin.

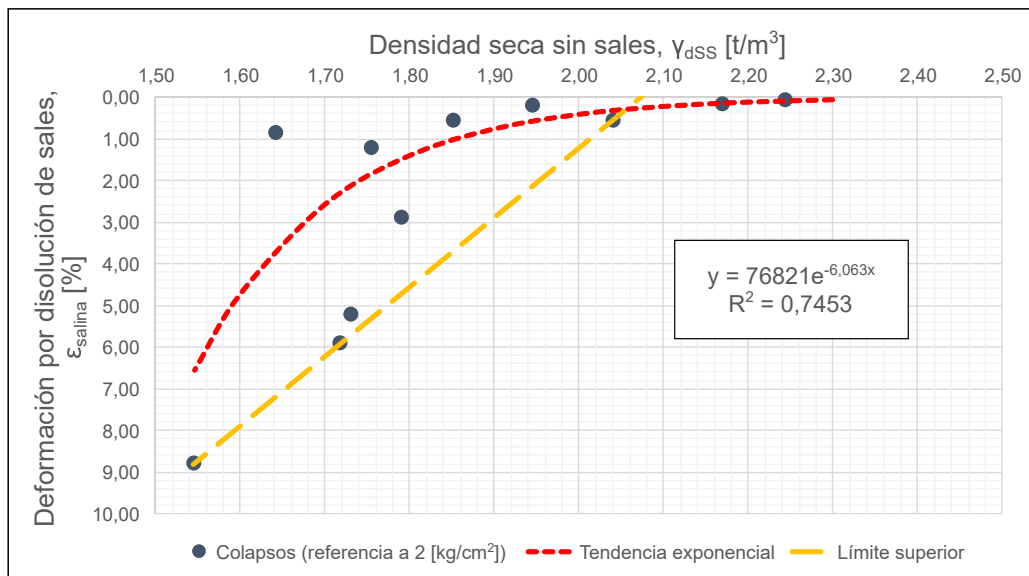


Figura 6.10: Densidad seca sin sales vs deformación por disolución de sales (datos a un esfuerzo de referencia de 2 [kg/cm<sup>2</sup>])

Los resultados de la figura 6.10 muestran una correlación fuerte ( $R^2 = 0,7453$ ). Al igual que en el figura 6.6, la curva sigue una tendencia de tipo exponencial. Se presenta el límite superior de deformaciones (recta amarilla) considerando los puntos sobre  $\gamma_{dSS} = 1,55$  [t/m<sup>3</sup>]. Este límite permite identificar las máximas deformaciones estimadas a partir de los resultados gráficos de este análisis.

### 6.3. Relación potencial de vacíos

En la figura 6.10 se presenta el análisis del parámetro RPV (Relación Potencial de Vacíos), descrito en el capítulo 3. A partir de este gráfico es posible notar que no existe una correlación clara con la deformación por disolución de sales. La mayoría de los puntos se encuentra en el rango [1,0 - 1,5] de RPV, con una importante variación en las deformaciones.

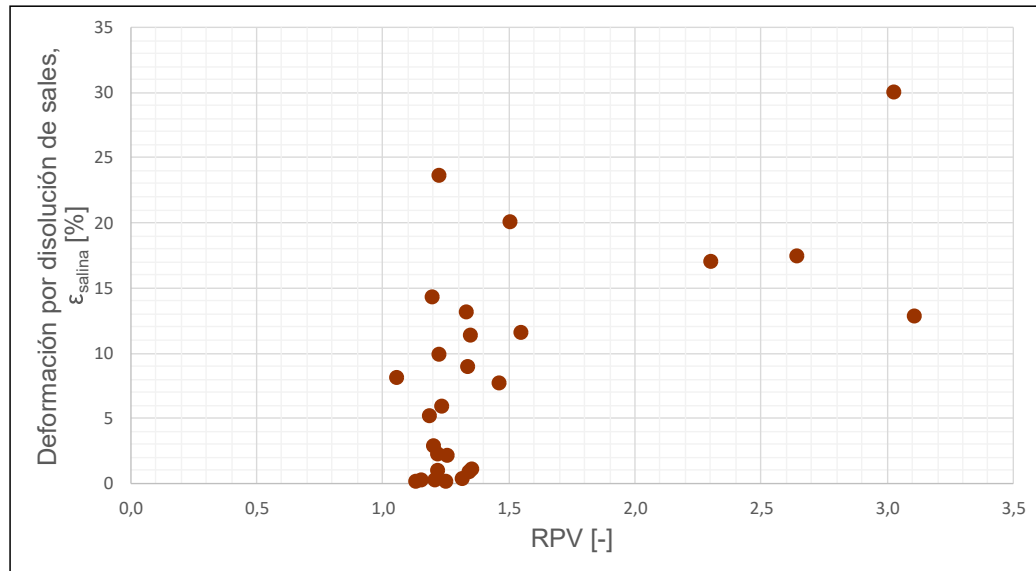


Figura 6.11: RPV vs deformación por disolución de sales

## 6.4. Estimación de máximas deformaciones por disolución de sales

Con los resultados de correlaciones, se construye un gráfico para estimar las deformaciones máximas esperadas. Para esto se toma como referencia el límite mostrado en la figura 6.10 (recta amarilla). Con el objetivo de simplificar el análisis, se considera que las deformaciones no superan un 2% para los puntos sobre  $\gamma_{dSS} = 2 \text{ [t/m}^3\text{]}$ . Esto se puede asumir a partir de los resultados gráficos mostrados en la figura 6.9, donde no se observa un incremento significativo en la deformación a medida que aumenta la carga.

Para proyectar estas rectas a diferentes niveles de carga se considera que el crecimiento de estas curvas está controlado por el punto ubicado en  $\gamma_{dSS} = 1,55 \text{ [t/m}^3\text{]}$ . Esto se asume tomando en cuenta los resultados mostrados en la figura 6.8, donde es posible notar que este punto presenta el mayor incremento de deformación a medida que aumenta la carga. La evolución de la deformación en este punto está representada por la ecuación 6.1 (gráfico en Anexo D).

$$\varepsilon_{salina}(\gamma_{dSS}=1,55[t/m^3]) = 5,724 \cdot \ln(\sigma'_1) + 4,9417 \quad (6.1)$$

Donde la carga vertical  $\sigma'_1$  se encuentra en unidades de  $[\text{kg/cm}^2]$ . Luego, las rectas que determinan los límites de deformación máximas están definidas en un extremo por el punto ( $2 \text{ [t/m}^3\text{]}$ ,  $2 \text{ [%]}$ ), mientras que el otro punto corresponde a  $\gamma_{dSS} = 1,55 \text{ [t/m}^3\text{]}$  con una deformación que depende de la carga, como se muestra en la ecuación 6.1.

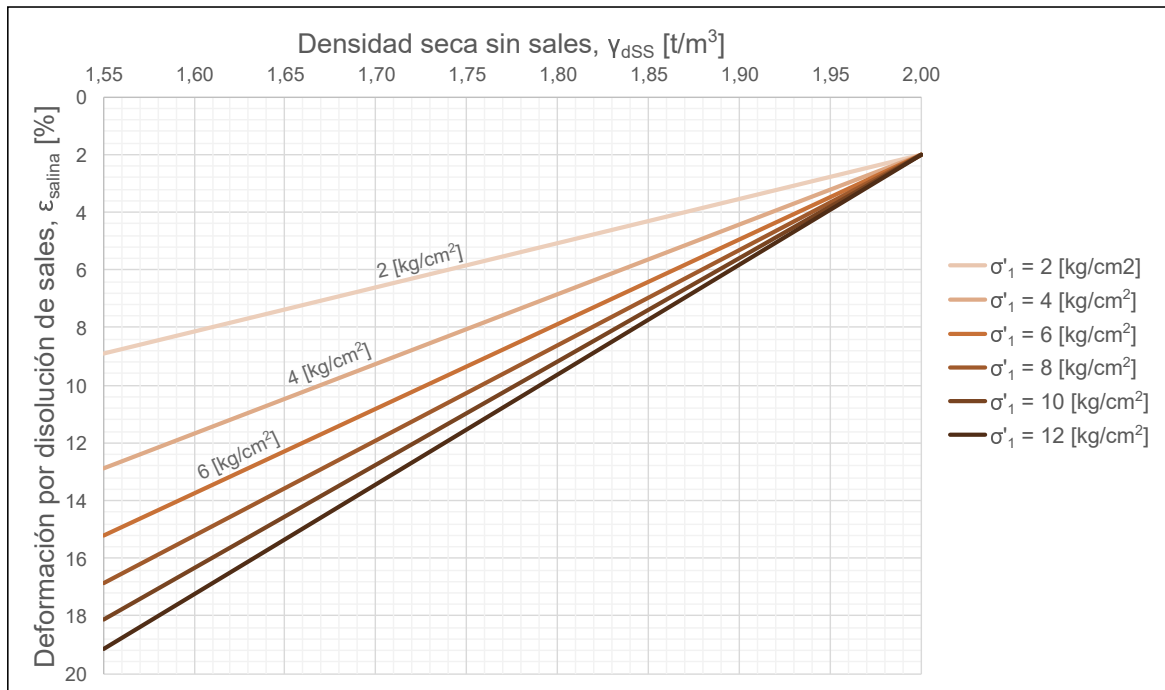


Figura 6.12: Determinación de máxima deformación por disolución de sales a partir de la carga y la densidad seca sin sales

Todas estas rectas dependen tanto de la densidad seca sin sales como de la carga aplicada al momento de saturar. Para establecer una ecuación única que permita parametrizar los resultados mostrados en la figura 6.12, primero se define la forma general de estas rectas:

$$\varepsilon_{salina} = \underbrace{m}_{[m^3/t]} \cdot \underbrace{\gamma_{dSS}}_{[t/m^3]} + \underbrace{n}_{[-]} \quad (6.2)$$

El aporte de la carga se puede incluir en las variables  $m$  y  $n$ . Para esto se grafican los valores de  $m$  y  $n$  con la carga asociada, donde se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$m = -12,72 \cdot \ln(\sigma'_1) - 6,5373 \quad (6.3)$$

$$n = 25,44 \cdot \ln(\sigma'_1) + 15,075 \quad (6.4)$$

En ambas ecuaciones la carga vertical  $\sigma'_1$  se debe trabajar en unidades de  $[\text{kg}/\text{cm}^2]$ . Finalmente, reemplazando estas expresiones en la ecuación 6.2 y reordenando, se llega a que la función para estimar las defomaciones por disolución de sales máximas queda definida de la siguiente forma:

$$\varepsilon_{salina}(\gamma_{dSS}, \sigma'_1) = (2 - \gamma_{dSS}) \cdot (12,72 \cdot \ln(\sigma'_1) + 6,5373) + 2 \quad (6.5)$$

Donde la densidad seca sin sales  $\gamma_{dSS}$  se encuentra en unidades de  $[\text{t}/\text{m}^3]$  y la carga vertical  $\sigma'_1$  en unidades de  $[\text{kg}/\text{cm}^2]$ .



# Capítulo 7

## Metodología Simplificada para la estimación de Asentamientos Máximos

### 7.1. Desarrollo de metodología simplificada para la estimación de asentamientos máximos

Para el desarrollo de la metodología presentada en este capítulo se considera un esquema simplificado de un muro para depósito de relaves, mostrado en la figura 7.1. Para esto se definen las alturas del muro, el espesor de un estrato no salino y el espesor de un depósito salino (estrato salino). Cada estrato definido tiene asociada una densidad seca. Además se define la profundidad del nivel freático, con el objetivo de estudiar el caso general y evaluar asentamientos considerando eventuales densidades saturadas en el estrato no salino.

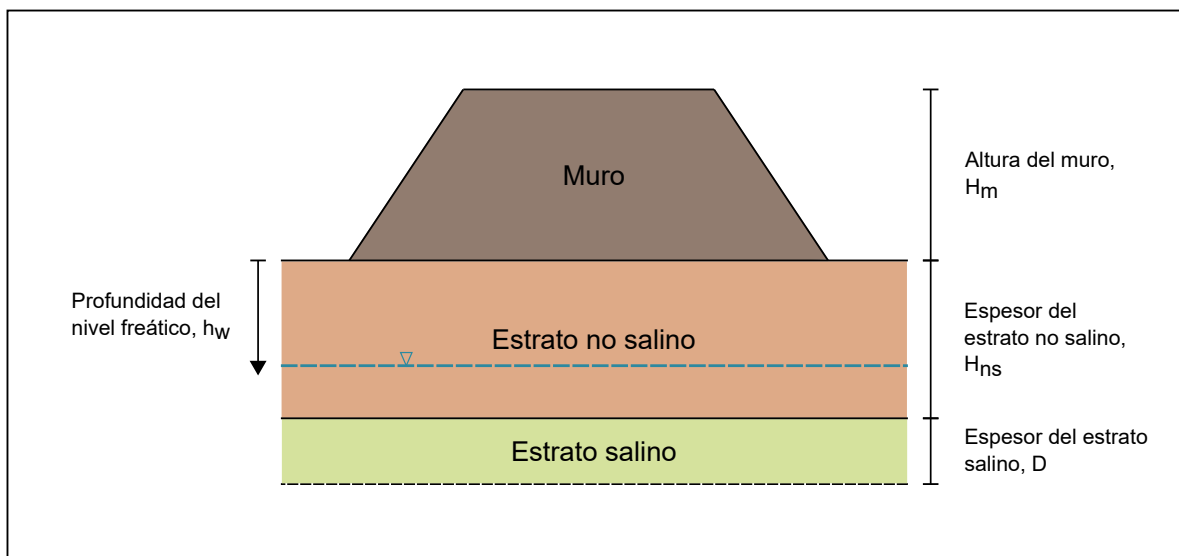


Figura 7.1: Esquema representativo para el diseño de un muro para depósito de relave

A partir de la expresión para estimar la deformación máxima esperada (ecuación 6.5) mostrada en el capítulo anterior, el asentamiento que se produce por la disolución de sales para un estrato salino de espesor  $D$  se define de la siguiente forma:

$$\delta_{salino} = D \cdot \varepsilon_{salina} \quad (7.1)$$

Donde  $\varepsilon_{salina}$  depende de la densidad seca sin sales y de la carga vertical aplicada como se observó en el capítulo anterior. Para calcular esta carga se considera el valor en el punto medio del estrato salino, por lo que se define la carga media de la siguiente forma:

$$(\sigma'_1)_{media} = (H_m \cdot \gamma_m) + (h_w \cdot \gamma_{ns}) + (H_{ns} - h_w) \cdot (\gamma_{sat\ ns} - \gamma_w) + \frac{D}{2} \cdot (\gamma_{sat\ SS} - \gamma_w) \quad (7.2)$$

Donde la altura del muro, los espesores de estratos y la profundidad del nivel freático se definen en la figura 7.1. Para determinar la densidad saturada del estrato no salino  $\gamma_{sat\ ns}$  y la densidad saturada del estrato salino  $\gamma_{sat\ SS}$  es necesario conocer el valor de  $G_S$  y los valores de densidad seca del estrato no salino  $\gamma_{ns}$  y densidad seca sin sales del estrato salino  $\gamma_{dSS}$ . Por último, se considera que la densidad del agua  $\gamma_w = 1$  [t/m<sup>3</sup>].

Luego, en la ecuación 7.3 se presenta la expresión para estimar los asentamientos máximos en fundaciones de muros producto de la disolución de las sales solubles. La densidad seca sin sales  $\gamma_{dSS}$  se encuentra en unidades de [t/m<sup>3</sup>], mientras que la carga vertical media  $(\sigma'_1)_{media}$  se trabaja en unidades de [kg/cm<sup>2</sup>].

$$\delta_{salino} = D \cdot ((2 - \gamma_{dSS}) \cdot (12,72 \cdot \ln((\sigma'_1)_{media}) + 6,5373) + 2) \quad (7.3)$$

Donde es posible notar la dependencia de todas las variables mencionadas anteriormente:

$$\delta_{salino} = \delta_{salino}(\gamma_{dSS}, \gamma_m, \gamma_{ns}, \gamma_w, H_m, H_{ns}, D, h_w, G_S) \quad (7.4)$$

Para utilizar esta ecuación es necesario trabajar las alturas, espesores y profundidades en unidades de [m], mientras que las densidades se deben trabajar en unidades de [t/m<sup>3</sup>]. Por otra parte, es importante mencionar que según la forma en la que se desarrolló el procedimiento para obtener esta expresión y considerando las unidades en que se suelen trabajar los informes de laboratorio, la carga debe ser ingresada en unidades de [kg/cm<sup>2</sup>].

A continuación se presenta un resumen con los pasos necesarios para la aplicación de la metodología descrita en este capítulo:

- Identificar alturas/espesores [m] y densidades [t/m<sup>3</sup>] de los diferetes estratos analizados
- Determinar profundidad del nivel freático [m]
- Calcular la carga vertical media  $(\sigma'_1)_{media}$  ([kg/cm<sup>2</sup>]) en la mitad del estrato salino.
- Reemplazar en ecuación 7.3 para obtener el asentamiento máximo esperado producto de la disolución de las sales

En las figuras 7.2 y 7.3 se presentan los resultados al aplicar la metodología simplificada. Para esto se consideran los datos mostrados en la tabla 7.1, variando el espesor del estrato salino y la altura del muro.

Tabla 7.1: Variables de ejemplo para la estimación de asentamientos máximos (metodología simplificada)

Variable	Valor	Unidad
$H_m$	30	m
$H_{ns}$	10	m
D	8	m
$h_w$	5	m
$\gamma_m$	2,00	t/m <sup>3</sup>
$\gamma_{ns}$	2,00	t/m <sup>3</sup>
$\gamma_{dSS}$	1,80	t/m <sup>3</sup>
$\gamma_w$	1,00	t/m <sup>3</sup>
$\gamma_{sat\ ns}$	2,26	t/m <sup>3</sup>
$\gamma_{sat\ SS}$	2,13	t/m <sup>3</sup>
$G_S$	2,70	-

Variación de espesor del estrato salino:

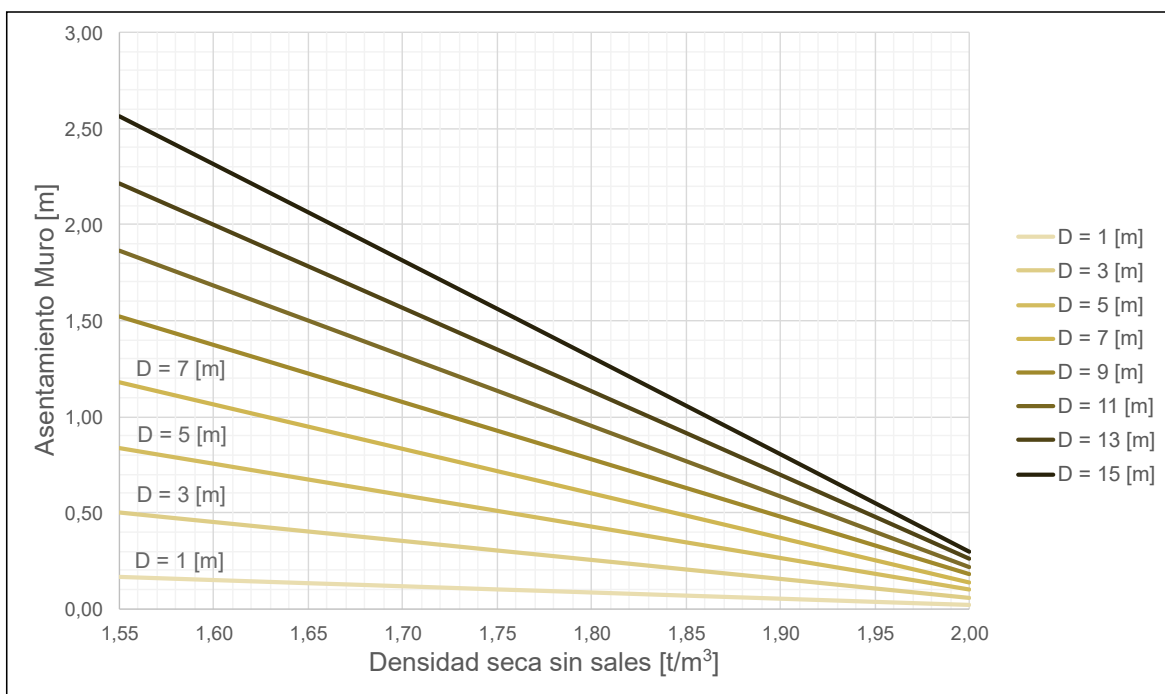


Figura 7.2: Ejemplo de metodología para cálculo de asentamientos (Variación de espesor de estrato salino considerando valores de tabla 7.1)

### Variación de altura del muro:

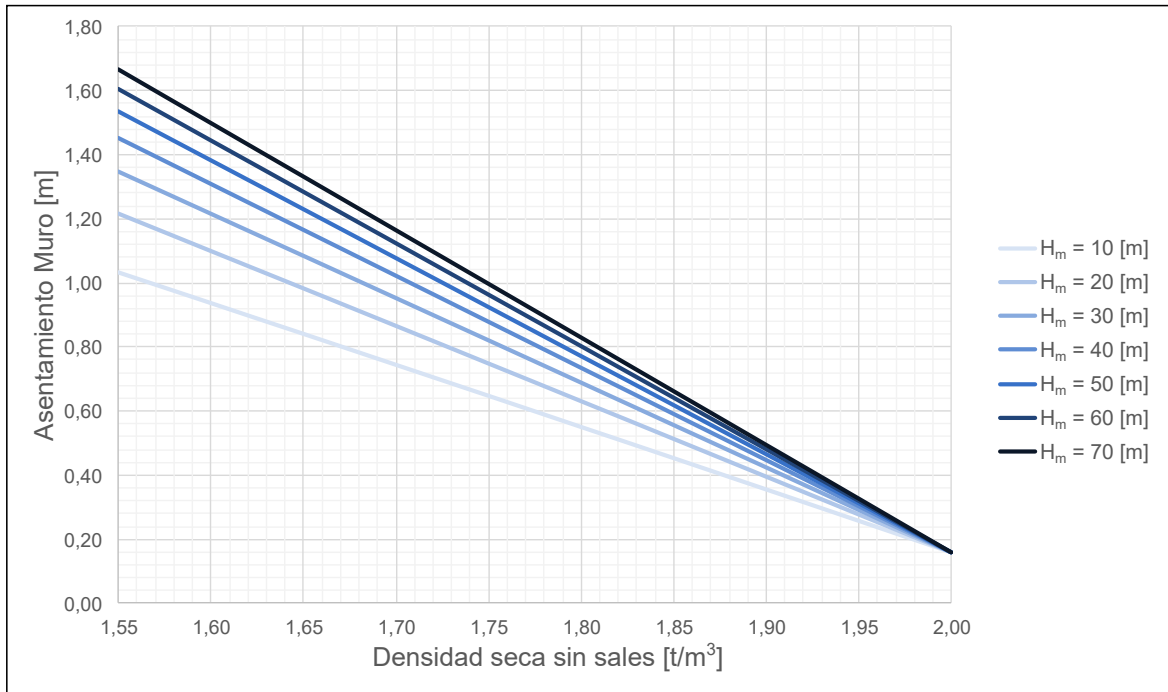


Figura 7.3: Ejemplo de metodología para cálculo de asentamientos (Variación de altura de muro considerando valores de tabla 7.1)

## 7.2. Comparación de metodologías para la estimación de asentamientos

En esta sección se comparan los resultados de asentamientos calculados con la metodología simplificada propuesta en este capítulo y la metodología a partir de modelos de carga enseñada en el capítulo 4.

### 7.2.1. Metodología a partir de modelos de carga

Para la aplicación de esta metodología se considera la muestra CC-S10-M1 (tabla 5.10), la cual presenta una densidad seca sin sales igual a  $1,85 \text{ [t/m}^3\text{]}$ . A partir de los resultados de ensayos de colapso (tabla 5.18) descritos en el capítulo 5, se obtienen los modelos de carga para el suelo en estado seco y con sales disueltas, según la metodología mostrada en la sección 4.3 del capítulo 4.

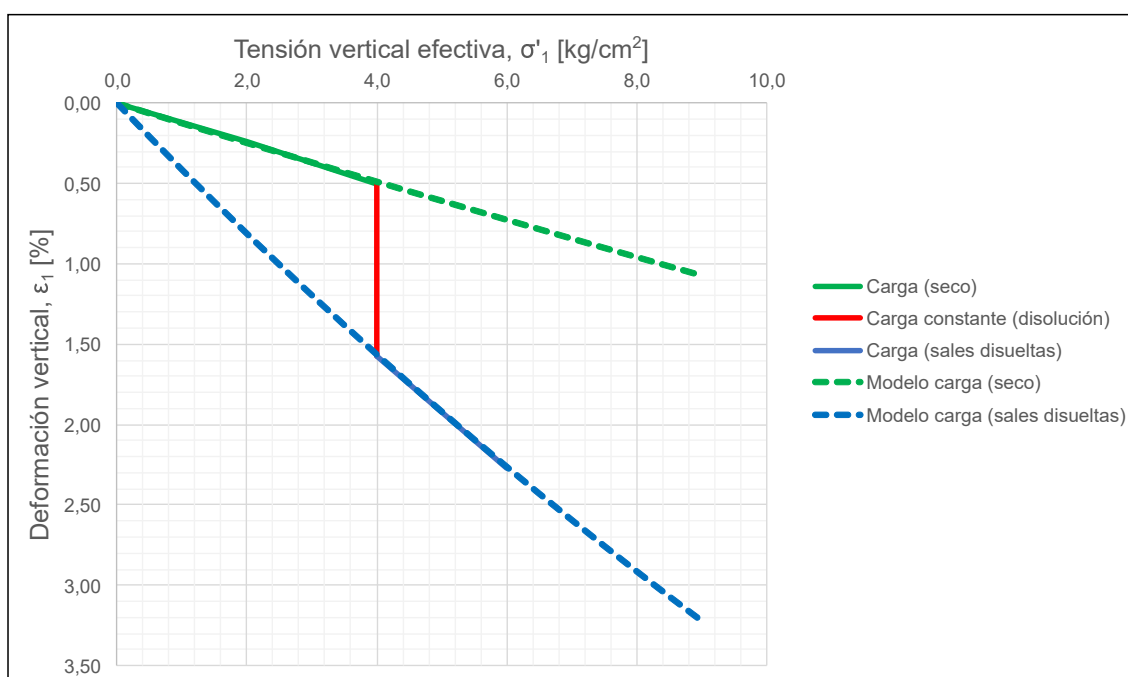


Figura 7.4: Determinación de modelos de carga para la muestra CC-S10-M1

Los valores de los parámetros de ajuste, tanto para el modelo de carga en estado seco como para el modelo de carga con sales disueltas, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 7.2: Parámetros de ajuste para los modelos de carga de la muestra CC-S10-M1

Curva	Parámetro	Valor	Unidad
Seca	$\alpha$	25	-
	$\beta$	200	$\text{kg/cm}^2$
Saturada	$\alpha$	21,1	-
	$\beta$	50	$\text{kg/cm}^2$

Para el cálculo de asentamientos es necesario definir la altura de muro, el espesor del estrato no salino y el espesor del estrato salino. Además, se definen las densidades asociadas a cada estrato.

Tabla 7.3: Variables del problema para la estimación de asentamientos (modelos de carga)

Variable	Valor	Unidad
$H_m$	30	m
$H_{ns}$	10	m
D	5	m
$\gamma_m$	2,00	t/m <sup>3</sup>
$\gamma_{ns}$	2,00	t/m <sup>3</sup>
$\gamma_{dCS}$	2,04	t/m <sup>3</sup>
$\gamma_{dSS}$	1,85	t/m <sup>3</sup>

Se utiliza la ecuación 4.12 para calcular los asentamientos para el modelo de carga en estado seco y para el modelo de carga con sales disueltas.

**Modelo de carga (seco):**

$$\delta_{salino} = 3,55 [cm] \quad (7.5)$$

**Modelo de carga (sales disueltas):**

$$\delta_{salino} = 10,30 [cm] \quad (7.6)$$

Luego, de acuerdo a la ecuación 4.13, el asentamiento debido únicamente a la disolución de las sales se calcula como la diferencia entre los asentamientos mostrados anteriormente.

$$\delta_{salino} = 6,75 [cm] \quad (7.7)$$

## 7.2.2. Metodología simplificada para estimación de asentamientos máximos

Para esta metodología se utilizan los mismos valores descritos en la tabla 7.3, agregando las densidades saturadas para el estrato no salino y para el estrato salino. Se define la profundidad del nivel freático justo al comienzo del estrato salino, es decir, el estrato no salino se encuentra seco.

Tabla 7.4: Variable del problema para la estimación de asentamientos máximos (metodología simplificada)

Variable	Valor	Unidad
$H_m$	30	m
$H_{ns}$	10	m
D	5	m
$h_w$	10	m
$\gamma_m$	2	t/m <sup>3</sup>
$\gamma_{ns}$	2	t/m <sup>3</sup>
$\gamma_{dSS}$	1,85	t/m <sup>3</sup>
$\gamma_w$	1,00	t/m <sup>3</sup>
$\gamma_{sat\ ns}$	2,26	t/m <sup>3</sup>
$\gamma_{sat\ SS}$	2,17	t/m <sup>3</sup>
$G_S$	2,70	-

Primero, los valores presentados en la tabla 7.4 se reemplazan en la ecuación 7.2 para obtener la carga en el punto medio de estrato salino. Esta carga se debe transformar a unidades de [kg/cm<sup>2</sup>]. Luego, reemplazando en la ecuación 7.3, se obtiene el valor para la máxima deformación producida por el efecto de la disolución de las sales.

$$\delta_{salino} = 34,92 \text{ [cm]} \quad (7.8)$$

Este valor de asentamiento resulta mayor al compararlo con la metodología en base a modelos de carga. Esto se debe a que la metodología simplificada considera el máximo de la estadística, es decir, se toma el máximo valor de deformación esperado para la configuración de densidad seca sin sales y carga vertical considerada.

# Capítulo 8

## Conclusiones y Recomendaciones

### 8.1. Conclusiones

**Correlaciones entre la deformación por disolución de sales y los distintos parámetros índice:**

El análisis realizado sobre la base de datos presentada en este trabajo permite poner en evidencia que tanto la salinidad como la densidad seca con sales no presentan por sí solos la capacidad de estimar deformaciones por disolución de sales de manera confiable debido a que no muestran una correlación clara.

Los resultados para salinidad muestran que a pesar de presentar una tendencia creciente con la deformación, existe una dispersión de datos importante para valores sobre un 5% de salinidad aproximadamente. Además, el límite superior de deformaciones se encuentra descrito por puntos de una sola campaña. En cuanto a la densidad seca con sales, a pesar de ser un término fácil de utilizar debido a que no considera las sales, no se encuentra una correlación favorable y se observa una importante dispersión. Por lo tanto, ambos parámetros se consideran falibles para la estimación de deformaciones por disolución de sales.

Por otra parte, al graficar la densidad seca sin sales con la deformación por disolución de sales, se observa una mejor correlación con respecto a los dos parámetros anteriores. A pesar de tener dispersión en los datos, se presenta un límite superior de deformaciones más consistente, compuesto por muestras de distintas campañas. La figura 6.5 muestra que los datos con densidad seca sin sales sobre  $1,55 \text{ [t/m}^3\text{]}$  presentan una tendencia exponencial importante ( $R^2 = 0,811$ ). Este límite de densidad seca sin sales tiene sentido práctico, debido a que no es recomendable fundar sobre suelos con densidades bajas.

Para considerar el efecto de la carga sobre el estrato salino analizado, se elaboró una metodología para estimar deformaciones para cualquier nivel de carga. Al considerar los datos de deformaciones para un esfuerzo de referencia, se observa que la correlación entre la densidad seca sin sales y la deformación por disolución de sales se mantiene para valores sobre  $1,55 \text{ [t/m}^3\text{]}$  con una tendencia exponencial y fuerza de correlación importante ( $R^2 = 0,7453$ ). Además, los resultados muestran que a pesar del incremento en la carga, no se supera un 2% de deformación para estructuras salinas con densidad seca sin sales sobre  $2 \text{ [t/m}^3\text{]}$ .



### **Estimación de asentamientos a partir de modelos de carga con ensayo de colapso en muestra particular:**

Esta metodología para estimación de asentamientos se formula a partir de los modelos de carga, desarrollados en base al estudio de deformaciones para distintos niveles de cargas vertical. Con los resultados del análisis realizado en el capítulo 4, se obtiene una expresión para evaluar asentamientos para cada estado del suelo (seco y con sales disueltas) descrita por la ecuación 4.12. Para el cálculo de asentamientos por disolución de sales, se utiliza la ecuación 4.13.

La ventaja de esta metodología se ve reflejada en la incorporación del comportamiento no lineal del suelo, ya que se considera la variación de la rigidez en profundidad. Además, permite estimar deformaciones para cualquier estado de carga, independiente de la carga aplicada sobre la muestra al momento de ser ensayada. Por otro parte, la principal limitación de esta metodología es que requiere de resultados de ensayos de colapso para su desarrollo.

### **Estimación de asentamientos máximos sin ensayo de colapso particular (metodología simplificada):**

A partir de los resultados de correlaciones entre la densidad seca sin sales y las deformaciones por disolución de sales, se elaboró una metodología simplificada para la estimación de asentamientos máximos esperados. La expresión para el cálculo de asentamientos máximos queda descrita por la ecuación 7.3 del capítulo 7. La ventaja de esta expresión es que sólo requiere de la densidad seca sin sales y la carga vertical para la estimación de asentamientos máximos sobre el estrato analizado.

Los ejemplos de aplicación de esta expresión muestran que, para densidades cercanas a 1,55  $[t/m^3]$ , aumentos en el espesor del estrato salino se ven reflejados en considerables aumentos en los asentamientos máximos estimados. Por otra parte, se observa que a medida que aumenta la altura de muro, las diferencias en asentamientos calculados se reducen gradualmente. Es importante mencionar que para anchos de muro considerables como los utilizados para depósitos de relaves, resulta apropiado considerar que la carga se distribuye como carga infinita.

Al comparar la metodología en base a modelos de carga con la metodología simplificada, se observan mayores asentamientos para esta última. Esto se debe a que se considera el máximo de la estadística, es decir, el límite superior de deformaciones mencionado en los análisis de correlaciones. A partir de esto, se esperan valores de asentamiento más conservadores y confiables con respecto a la metodología en base a modelos de carga.

Por último, de acuerdo a las características particulares de los suelos revisados en este estudio, la aplicación de la ecuación 7.3 resulta válida para suelos tipo SC-SM, correspondientes a arenas limosas y arenas arcillosas. Es posible que se observen comportamientos diferentes al analizar suelos con otras características.

## 8.2. Recomendaciones:

Se recomienda abordar los siguientes puntos para futuras investigaciones:

- Ampliar la cantidad de muestras estudiadas, con el objetivo de precisar los errores asociados a las curvas de correlación definidas en este trabajo.
- Realizar un estudio en profundidad sobre efecto del material fino en las deformaciones producidas por la disolución de las sales.
- Analizar las deformaciones considerando los efectos de la forma y tamaños de partículas presentes en el suelo.

# Bibliografía

- [1] Norma Chilena Oficial NCh 1444/1 Of. 1980. *Áridos para morteros y hormigones - Determinación de sales - Parte 1: Determinación de cloruros y sulfatos.*
- [2] Norma Chilena Oficial NCh 3394. *Suelo Salino - Requisitos geotécnicos y de Instalaciones sanitarias para diseño y ejecución de obras.*
- [3] Muni Budhu. *Soil Mechanics Fundamentals.* Wiley, New York, 2015.
- [4] ASTM D4546-14. *Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils.*
- [5] George Erickssen. *Geology of the Salt Deposits and the Salt Industry of Northern Chile.* 1963.
- [6] Humberto Fuenzalida. *Sobre el Origen del Nitrato en los Depósitos de Salitre del Norte de Chile.* Universidad de Chile, 2004.
- [7] José Corvalán & Francisco Hervé. *Origen Geológico de Chile. Chile - Escencia y Revolución.* Instituto de Estudios Regionales. Universidad de Chile, 1982.
- [8] Guillermo Tamblay Pinto. *Comportamiento de Fundaciones apoyadas en Suelos Salinos.* Universidad de Chile, 1983.
- [9] Roberto Olguín Pizarro. *Suelos Salinos del Norte de Chile - Parte II: Estructura y Propiedades Índices - Metodología.*
- [10] Roberto Olguín Pizarro. *Geotecnia de los Suelos Salinos del Norte de Chile.* Universidad de Chile, 2006.
- [11] Antonio Skorin. *Efectos de los Suelos Salinos sobre Estructuras.* Universidad de Chile, 2004.

# Anexo A

## Demostración del parámetro densidad seca sin sales

En esta sección de Anexo se demuestra la expresión de densidad seca sin sales en función de la salinidad y la densidad seca con sales.

A partir de la definición de densidad seca sin sales (ecuación 3.3), se tiene que:

$$\gamma_{dSS} = \frac{P_{NS}}{V_T} \quad (\text{A.1})$$

Es posible reordenar esta expresión de la siguiente forma:

$$\gamma_{dSS} = \frac{P_{NS} + P_{SS} - P_{SS}}{V_T} \quad (\text{A.2})$$

$$\gamma_{dSS} = \frac{P_{NS} + P_{SS}}{V_T} - \frac{P_{SS}}{V_T} \quad (\text{A.3})$$

Es posible identificar que los términos de la ecuación corresponden a la densidad seca con sales (ecuación 3.2), mientras que el segundo término corresponde a la densidad de las sales solubles, definida en la tesis de Olguín [10] de la siguiente forma:

$$\gamma_{d-salino} = \frac{P_{SS}}{V_T} \quad (\text{A.4})$$

Donde:

$P_{SS}$ : Peso de las sales solubles.

$V_T$ : Volumen total de la muestra.

Además, como lo demostró Olguín [10] en su trabajo, es posible expresar la densidad de las sales solubles de la siguiente manera:

$$\gamma_{d-salino} = \frac{S \cdot \gamma_{dCS}}{S + 1} \quad (\text{A.5})$$

Donde:

$\gamma_{dCS}$ : Densidad Seca con Sales.

$S$ : Salinidad de la muestra.

Luego, utilizando las ecuaciones 3.2 y A.4, se tiene que:

$$\gamma_{dSS} = \gamma_{dCS} - \gamma_{d\text{ salino}} \quad (\text{A.6})$$

Utilizando la ecuacion A.5 para la densidad de las sales solubles, se tiene que:

$$\gamma_{dSS} = \gamma_{dCS} - \frac{S \cdot \gamma_{dCS}}{S + 1} \quad (\text{A.7})$$

$$\gamma_{dSS} = \frac{\gamma_{dCS} \cdot (S + 1) - \gamma_{dCS} \cdot S}{S + 1} \quad (\text{A.8})$$

$$\gamma_{dSS} = \frac{\gamma_{dCS} \cdot (S + 1 - S)}{S + 1} \quad (\text{A.9})$$

Finalmente, reordenado la expresión, se tiene que:

$$\gamma_{dSS} = \frac{\gamma_{dCS}}{S + 1} \quad (\text{A.10})$$

## Anexo B

# Determinación del contenido real de sales en la muestra

Cuando se realizan ensayos de colapso, la disolución de las sales generalmente no es completa y se suelen realizar ensayos de sales solubles para determinar el contenido de sales real de la muestra. En este segundo ensayo se registra el contenido de sales del material luego de la realización del ensayo de colapso. A partir de este nuevo contenido de sales, es posible definir el parámetro de salinidad lavada ( $S_L$ ) de la siguiente forma:

$$S_L = \frac{P_{SS2}}{P_{NS}} \quad (\text{B.1})$$

Donde  $P_{SS2}$  corresponde al peso de las sales registrado en el ensayo de sales solubles. La ecuación B.2 muestra la expresión para calcular la salinidad real de la muestra:

$$S = S_L + \frac{(S_L + 1) \cdot (P_T - P_{post})}{P_{post}} \quad (\text{B.2})$$

### Demstración:

A partir de las definiciones presentadas en la figura 3.1, se tiene que:

- $P_T$  = Peso total de la muestra
- $P_{NS}$  = Peso del material insoluble
- $P_{SS}$  = Peso de las sales solubles

Además, es posible dividir el peso de las sales solubles de la siguiente manera:

$$P_{SS} = P_{SS1} + P_{SS2} \quad (\text{B.3})$$

Donde:

$P_{SS1}$ : Peso de las sales solubles disueltas durante la realización del ensayo de colapso.

$P_{SS2}$ : Peso de las sales solubles que no fueron disueltas en ensayo de colapso y que quedaron en la muestra luego del ensayo de colapso.

Se define la salinidad lavada de la muestra, correspondiente al contenido de sales obtenido a partir del ensayo de sales solubles:

$$S_L = \frac{P_{SS2}}{P_{NS}} \quad (\text{B.4})$$

Además, se define el peso seco del material remanente luego del ensayo de colapso:

$$P_{post} = P_{NS} + P_{SS2} \quad (\text{B.5})$$

De la figura 3.1, se tiene que:

$$P_T = P_{SS} + P_{NS} \quad (\text{B.6})$$

$$P_T = P_{SS1} + P_{SS2} + P_{NS} \quad (\text{B.7})$$

Utilizando la ecuación B.5 en B.7, se tiene:

$$P_T = P_{post} + P_{SS1} \quad (\text{B.8})$$

Luego, a partir de las ecuaciones B.3 y B.8, se tiene que:

$$P_{SS2} = P_{SS} - (P_T - P_{post}) \quad (\text{B.9})$$

Reemplazando en la ecuación B.4:

$$S_L = \frac{P_{SS} - (P_T - P_{post})}{P_{NS}} \quad (\text{B.10})$$

$$S_L \cdot P_{NS} = P_{SS} - (P_T - P_{post}) \quad (\text{B.11})$$

$$P_{SS} = S_L \cdot P_{NS} + (P_T - P_{post}) \quad (\text{B.12})$$

Luego, reemplazando con  $P_{SS} = P_T - P_{NS}$  (ecuación B.6):

$$P_T = S_L \cdot P_{NS} + P_T - P_{post} + P_{NS} \quad (\text{B.13})$$

$$P_T = (S_L + 1) \cdot P_{NS} + (P_T - P_{post}) \quad (\text{B.14})$$

$$(S_L + 1) \cdot P_{NS} = P_T - (P_T - P_{post}) \quad (\text{B.15})$$

$$P_{NS} = \frac{P_{post}}{S_L + 1} \quad (\text{B.16})$$

Es posible considerar la definición de salinidad para reescribir la ecuación B.10

$$S_L = \frac{P_{SS} - (P_T - P_{post})}{P_{NS}} \quad (\text{B.17})$$

$$S_L = S - \frac{(P_T - P_{post})}{P_{NS}} \quad (\text{B.18})$$

Reemplazando la ecuación B.16 en B.18, se tiene finalmente que:

$$S = S_L + \frac{(S_L + 1) \cdot (P_T - P_{post})}{P_{post}} \quad (\text{B.19})$$

### Resultados:

En la tabla B.1 se presentan los datos de peso inicial, peso post-colapso, salinidad lavada y salinidad real (ecuación B.19) para cada una de las muestras de la Campaña C.

Tabla B.1: Cálculo de la salinidad corregida, Campaña C

Muestra	$P_T$ [gr]	$P_{post}$ [gr]	$S_L$ [%]	S (Real) [%]
CC-S01-M1	252,89	197,17	11,55	43,07
CC-S02-M1	221,04	210,79	3,25	8,27
CC-S03-M1	211,33	210,13	1,45	2,03
CC-S04-M1	197,02	192,20	2,35	4,92
CC-S05-M1	148,95	114,36	3,95	35,39
CC-S06-M1	175,23	117,28	4,05	55,46
CC-S07-M1	189,31	168,37	3,00	15,81
CC-S08-M1	187,13	185,83	2,05	2,76
CC-S09-M1	146,04	128,62	4,65	18,82
CC-S10-M1	278,87	262,57	3,75	10,19



# Anexo C

## Variación de altura en muestras durante el ensayo de colapso

Tabla C.1: Variación de alturas de probetas durante ensayo de colapso, Campaña A

Muestra	Altura Muestra [cm]			
	Inicial	Pre-Saturación	Post-Saturación	Final
CA-C01-M1 (S/S)	3,010	2,994	2,989	2,989
CA-C01-M1 (C/S)	3,090	3,066	3,055	3,055
CA-C02-M1 (S/S)	2,946	2,753	2,102	2,102
CA-C02-M1 (C/S)	3,211	3,191	2,876	2,876
CA-S01-M1	1,990	1,917	1,875	1,875
CA-S02-M1	4,338	4,200	3,859	3,859
CA-S03-M1 (S/S)	2,000	1,659	1,421	1,421
CA-S03-M1 (C/S)	1,880	1,605	1,283	1,283

Tabla C.2: Variación de alturas de probetas durante ensayo de colapso, Campaña B

Muestra	Altura Muestra [cm]			
	Inicial	Pre-Saturación	Post-Saturación	Final
CB-C01-M1	2,830	2,543	2,521	2,204
CB-C01-M2	2,300	2,132	1,889	1,762
CB-C01-M3	2,550	2,426	2,238	2,200

Tabla C.3: Variación de alturas de probetas durante ensayo de colapso,  
Campaña C

Muestra	Altura Muestra [cm]			
	Inicial	Pre-Saturación	Post-Saturación	Final
CC-S01-M1	3,975	3,947	3,258	2,527
CC-S02-M1	3,929	3,875	3,789	3,737
CC-S03-M1	3,092	3,048	3,043	3,031
CC-S04-M1	3,084	3,041	3,011	2,985
CC-S05-M1	2,770	2,722	2,408	2,371
CC-S06-M1	3,000	2,949	2,446	2,393
CC-S07-M1	3,290	3,221	2,797	2,702
CC-S08-M1	2,798	2,766	2,760	2,750
CC-S09-M1	2,852	2,794	2,545	2,439
CC-S10-M1	4,191	4,170	4,125	4,096

# Anexo D

## Crecimiento de deformación en función de la carga vertical

Para una densidad seca sin sales  $\gamma_{dSS} = 1,55$  [t/m<sup>3</sup>], se tiene el siguiente resultado gráfico que relaciona el aumento de la deformación con la carga vertical considerada (estimación a esfuerzos de referencia):

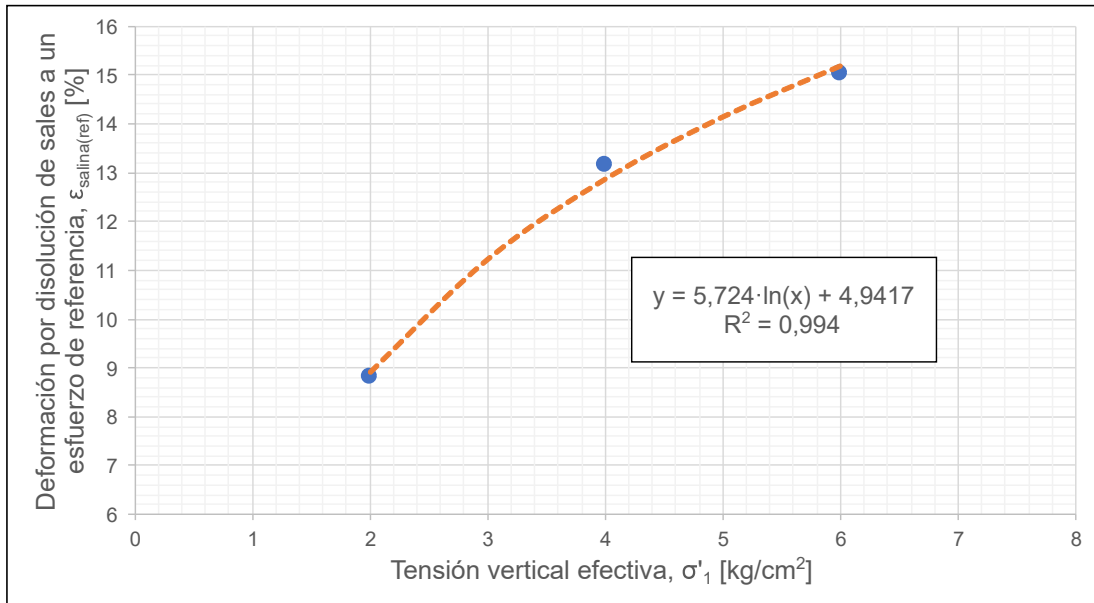


Figura D.1: Crecimiento de la deformación por disolución de sales en función de la carga vertical (para  $\gamma_{dSS} = 1,55$  [t/m<sup>3</sup>])