

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Dr. Oscar Jerez Riveros

**EFECTO DE LOS CATIONES EN EL COMPORTAMIENTO
MECÁNICO E HIDRÁULICO DE MINERALES CON ALTOS
CONTENIDOS DE ARCILLAS.**

Gustavo Armando Urizar Cartes

Informe de Memoria de Título

Para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Diciembre, 2018

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo general estudiar el comportamiento mecánico e hidráulico en mezclas minerales de contenidos variables de cuarzo y minerales de arcilla (caolinita bien cristalizada, montmorillonita-Na y montmorillonita-Ca) proporcionados por The Clay Minerals Society en diferentes soluciones acuosas, tales como agua destilada, agua de mar, CaCl_2 y NaCl . Esto se realizó mediante pruebas que incluyen la determinación de los Límites de Atterberg y ensayos de permeabilidad. Adicionalmente, se llevó a cabo una lixiviación de un mineral oxidado de cobre proveniente del yacimiento Centinela de Antofagasta Minerals S.A. Este material perteneciente a un depósito tipo pórfido con enriquecimiento supérgeno y alteración hidrotermal argílica fue analizado mediante análisis granulométrico, ensayo de permeabilidad, Límites de Atterberg, análisis mineralógico, análisis químico y ensayos metalúrgicos.

Las pruebas de plasticidad arrojaron como resultados que la caolinita no presenta variaciones respecto de las soluciones catiónicas empleadas en el análisis de su comportamiento mecánico e hidráulico, ya que para todas sus muestras presenta una clasificación de baja plasticidad, mientras que su permeabilidad tampoco manifestó una variación. Esto debido a su estructura eléctricamente neutra. En otras palabras, no necesita adsorber agua o algún catión presente en el sistema para poder estabilizarse, explicando de esta manera su baja interacción con el medio.

En el caso de las montmorillonitas, estas mostraron un cambio significativo al utilizar soluciones catiónicas, disminuyendo de manera importante su plasticidad y un aumento relevante en su permeabilidad. Esto indica que la utilización de cationes en la solución puede aumentar la conductividad hidráulica al doble en el caso de la montmorillonita-Ca y en dos órdenes de magnitud para la montmorillonita-Na utilizando un catión bivalente (Ca^{2+}), debido a la contracción de la doble capa eléctrica, disminuyendo los fenómenos de repulsión electrostática la que actúa inhibiendo su expansión.

Respecto la lixiviación en columna, se encontró que en la columna de agua destilada, los glómeros comenzaron a desagregarse, llevando consigo el transporte y posterior sedimentación de finos llevando consigo una disminución en la permeabilidad. Los resultados de la recuperación de cobre demuestran que lixiviar con agua de mar presenta un mejor rendimiento con un 50.45%, dado principalmente a la presencia del ion cloruro en la solución, el cual incrementa la solubilidad del hierro generando Fe^{3+} . Mientras que la columna de agua destilada fue sólo de 22.57%. Además, los resultados de los procesos de lavado y elución indican que existió un atrapamiento mecánico dado por la expansión de las arcillas, los cuales se ven favorecido en agua destilada, al igual que los procesos de intercambio catiónico producidos durante la elución.

ABSTRACT

The general objective of the present work was the mechanical and hydraulic behavior in minerals of variable content of quartz and clay minerals (well crystallized kaolinite, montmorillonite-Na and montmorillonite-Ca) provided by The Clay Minerals Society in different aqueous solutions such as distilled water, seawater, CaCl_2 and NaCl . This was done by tests that included the determination of the Atterberg Limits and permeability tests. Additionally, the leaching of oxidized copper ore from the Centinela deposit of Antofagasta Minerals S.A, was simulated, this material belonging to a porphyry type with supergene enrichment and hydrothermal alteration was analyzed by granulometric analysis, Atterberg Limit, mineralogical analysis, chemical analysis and metallurgical test.

The plasticity tests showed that the kaolinite did not present a change to the cationic solutions used in its mechanical and hydraulic behavior, which for all the samples presented a classification of low plasticity, while its permeability did not show a variation either. This, due to its electrically neutral structure, in other words, is that it does not need to adsorb the water or any component present in the system in order to stabilize, explaining in this way its low interaction with the environment.

In contrast, in the case of montmorillonites, a significant change when using cationic solutions, significantly decreasing their relevance and plasticity in their permeability. This indicates that the use of cations in the solution can increase the hydraulic conductivity to double in the case of montmorillonite-Ca and in two orders of magnitude for the montmorillonite-Na using a bivalent cation (Ca^{2+}) due to the contraction of the double electrical capacity, decreasing the electrostatic repulsion phenomena that inhibits its expansion.

Regarding the column simulation, allow to observe that the water column is distilled, the elements began to disintegrate, carry with it the transport and the subsequent sedimentation of ends that lead to a decrease in permeability. The results of the recovery of copper have a 50.45% difference with respect to the solubility of the iron in the solution, which increases the solubility of the iron generating Fe^{3+} . While the water column was only 22.57%. In addition, the results of the washing and elution processes indicate that there was a mechanical entrapment given by the expansion of clays, which are favored in distilled water, as well as the processes of cation exchange by elution.

ÍNDICE

	Pág
1 Introducción	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
2 Revisión de literatura y marco teórico	3
2.1 Lixiviación de minerales de cobre.....	3
2.1.1 Recursos hídricos en lixiviación.....	3
2.1.2 Lixiviación en pilas.....	4
2.1.3 Etapas del proceso de lixiviación en pilas.....	5
2.1.3.1 Chancado.....	5
2.1.3.2 Aglomeración y curado ácido.....	5
2.1.4 Factores que afectan el drenaje de la pila.....	6
2.1.4.1 Granulometría y permeabilidad del mineral.....	6
2.2 Minerales de arcilla.....	8
2.2.1 Origen hidrotermal de las arcillas.....	8
2.2.2 Estructura de los minerales de arcillas.....	9
2.2.2.1 Estructuras del tipo 1:1 (TO).....	9
2.2.2.2 Estructura del tipo 2:1 (TOT).....	10
2.2.2.3 Superficie específica.....	11
2.2.2.4 Capacidad de intercambio catiónico.....	11
2.2.2.5 Capacidad de absorción.....	12
2.2.2.6 Hidratación y expansión.....	13
2.3 Permeabilidad.....	14
2.3.1 Flujo unidimensional.....	14
2.3.2 Coeficiente de permeabilidad.....	14
2.3.3 Ensayos de laboratorio para determinar la permeabilidad.....	18
2.3.3.1 Ensayo de carga constante.....	18
2.3.3.2 Ensayo de carga variable.....	19

2.3.4 Factores que afectan el valor de la permeabilidad medida en laboratorio.....	20
2.4 Plasticidad.....	21
2.4.1 Límites de consistencia.....	21
2.4.2 Límites de Atterberg.....	22
2.4.3 Actividad.....	23
2.5 Comportamiento de los minerales de arcilla en sistemas acuosos.....	24
2.5.1 Sistema arcilla – agua – electrolito.....	24
2.5.2 Distribución de iones en sistemas de agua – arcilla.....	24
2.5.3 Influencia de las variables del sistema en la doble capa.....	26
2.5.3.1 Efectos de la concentración de electrolito.....	27
2.5.3.2 Efecto de la valencia de cationes.....	27
3 Desarrollo experimental.....	28
3.1 Material y equipo.....	28
3.1.1 Muestra sintética.....	28
3.1.2 Muestra mineral.....	29
3.2 Ensayos realizados.....	29
3.3 Equipo utilizados.....	30
3.3.1 Curva granulométrica.....	30
3.3.1.1 Análisis granulométrico para partículas con diámetros mayores a 0.074 mm.....	30
3.3.1.2 Análisis granulométrico para partículas con diámetros menores a 0.074 mm.....	30
3.3.2 Análisis de rayos X.....	31
3.3.3 Límite plástico (LP).....	32
3.3.4 Límite líquido (LL).....	32
3.3.5 Coeficiente de permeabilidad (k).....	33
3.4 Procedimiento experimental de lixiviación en columna.....	34
3.4.1 Homogenización de la muestra mineral.....	35
3.4.2 Aglomeración.....	35
3.4.3 Lixiviación en columnas de laboratorio.....	35
3.4.4 Lavado del mineral.....	35
3.4.5 Elución del mineral.....	36

4 Resultados	37
4.1 Pruebas hidráulicas y mecánicas con material sintético.....	37
4.1.1 Análisis granulométricos.....	38
4.1.2 Límites de Atterberg.....	39
4.1.2.1 Índice de plasticidad.....	39
4.1.2.2 Actividad.....	41
4.1.3 Permeabilidad.....	46
4.2 Prueba de lixiviación primaria en columnas.....	50
4.2.1 Análisis granulométrico.....	51
4.2.2 Caracterización mineralógica del mineral de cabeza.....	52
4.2.2.1 Fluorescencia de rayos X.....	53
4.2.2.2 Difracción de rayos X en roca total.....	53
4.2.2.3 Difracción de rayos X en la fracción < 2 μm	53
4.2.2.4 Semi-cuantificación de minerales de arcilla.....	55
4.2.2.4 Semi-cuantificación del contenido.....	55
4.2.2.6 Análisis químicos.....	55
4.2.3 Pruebas mecánicas e hidráulicas con muestra mineral.....	56
4.2.3.1 Límite de Atterberg.....	56
4.2.3.1.1 Índice de plasticidad.....	56
4.2.3.1.2 Actividad.....	57
4.2.3.2 Permeabilidad.....	58
4.2.4 Lixiviación de minerales de cobre.....	58
4.2.4.1 Aglomeración y curado ácido.....	58
4.2.4.2 Carga de mineral en columnas.....	60
4.2.4.3 Caracterización hidrodinámica de las columnas.....	61
4.2.4.4 Cinética de recuperación de cobre.....	63
4.2.4.5 Recuperación másica de cobre.....	66
4.2.4.6 Cinética consumo de ácido sulfúrico.....	67
4.2.4.7 DRX en roca total de ripio.....	68
5 Conclusiones y recomendaciones	70
6 Referencias	72
7 Anexos	75

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág
Figura 1: Pilas de lixiviación dinámica en minera Antucoya.....	4
Figura 2: Variación de la granulometría debido al chancado químico.....	7
Figura 3: Diagrama esquemático de la estructura de la caolinita.....	10
Figura 4: Diagrama esquemático de la estructura de la montmorillonita.....	10
Figura 5: Arcilla grupo de la esmectita en estado a) anhidro, b) intercambiando cationes y expandiendo y c) delaminando dando forma a una suspensión coloidal.....	14
Figura 6: Influencia de la gradación en la permeabilidad de los suelos granulares.....	15
Figura 7: Relación entre la permeabilidad y el grado de saturación para varias arenas.....	16
Figura 8: Rango de permeabilidades y drenaje para distintos tipos de suelos.....	17
Figura 9: Permeámetro de carga constante.....	18
Figura 10: Permeámetro de carga variable.....	19
Figura 11: Limite entre estados de consistencia de una muestra de suelo.....	22
Figura 12: Cambio de volumen potencial de suelos arcillosos.....	23
Figura 13: Distribuciones de iones adyacentes a una superficie de arcilla de acuerdo con el concepto de la doble capa difusa.....	25
Figura 14: Representación de la doble capa eléctrica.....	25
Figura 15: El plano está representado por la línea punteada entre dos partículas de esmectitas.....	27
Figura 16: Esquema general de funcionamiento de un equipo de medición de partículas por difracción láser.....	31
Figura 17: Bastones con fracturas junto a estándar de 3 mm.....	32
Figura 18: Cuchara Casagrande.....	33
Figura 19: Permeámetro Humboldt HM-5891A.....	34
Figura 20: Muestra no saturada por capa impermeable de montmorillonita-Na.....	37
Figura 21: Curva granulométrica promedio de las 23 muestras de cuarzo.....	38
Figura 22: Relación entre el índice de plasticidad y la fracción arcilla para las mezclas con caolinita (KGA).....	42
Figura 23: Relación entre el índice de plasticidad y la fracción arcilla para las mezclas con montmorillonita-Ca (SAZ).....	44
Figura 24: Relación entre el índice de plasticidad y la fracción arcilla para las mezclas con montmorillonita-Na (SWY).....	45

Figura 25: Variación de la doble capa eléctrica a distinta concentración.....	49
Figura 26: Curvas granulométricas, partículas con diámetro sobre 0.074 mm.....	51
Figura 27: Curvas granulométricas, partículas con diámetro bajo 0.074 mm.....	52
Figura 28: DRX en la fracción inferior a 2 μm	54
Figura 29: Efectos de los cationes en la plasticidad del material.....	57
Figura 30: Curado con agua de mar.....	59
Figura 31: Curado con agua destilada.....	59
Figura 32: Curado con agua destilada después de 72 horas.....	59
Figura 33: Curado con agua de mar después de 72 horas.....	59
Figura 34: Formación de aglomerados y arrastre de finos con agua de mar.....	60
Figura 35: Formación mínima de aglomerados y arrastre de finos con agua destilada.....	60
Figura 36: Flujo y niveles freáticos en columna con agua de mar versus tiempo.....	61
Figura 37: Flujo y niveles freáticos en columna con agua destilada versus tiempo.....	61
Figura 38: Disgregación y arrastre de finos hacia el fondo de la columna de agua destilada..	62
Figura 39: Cinética de recuperación de cobre.....	63
Figura 40: Cinética de disolución de hierro.....	64
Figura 41: Potencial REDOX y pH de la columna de agua de mar en el tiempo.....	65
Figura 42: Potencial REDOX y pH de la columna de agua destilada en el tiempo.....	65
Figura 43: Masa recuperada (kg/Ton) en las columnas de agua de mar y agua destilada.....	66
Figura 44: Cinética de consumo de ácido del mineral.....	67
Figura 45: Velocidad de consumo de ácido en el tiempo.....	68
Figura 46: DRX a roca total de ripio para muestras cabeza, columna agua destilada y columna agua de mar.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág
Tabla 1: Producto típico de reemplazo por alteración.....	8
Tabla 2: Valores de superficies específica de algunas arcillas.....	11
Tabla 3: Valores de CIC de algunas arcillas.....	12
Tabla 4: Mezclas de muestras sintéticas utilizadas (% en peso).....	28
Tabla 5: Ensayos realizados.....	29
Tabla 6: Tamices utilizados según norma ASTM 11/95.....	30
Tabla 7: Resumen de procedimiento y variables de lixiviación.....	34
Tabla 8: Resumen de parámetros obtenidos del estudio de granulometría láser para las muestras con contenido variable de caolinita.....	38
Tabla 9: Resumen de parámetros obtenidos del estudio de granulometría láser para las muestras con contenido variable de montmorillonita Ca.....	39
Tabla 10: Resumen de parámetros obtenidos del estudio de granulometría láser para las muestras con contenido variable de montmorillonita Na.....	39
Tabla 11: LL, LP, IP y clasificación por plasticidad según Villalobos (2015) para las mezclas con caolinita (KGA).....	40
Tabla 12: LL, LP, IP y clasificación por plasticidad según Villalobos (2015) para las mezclas con montmorillonita Ca (SAZ).....	40
Tabla 13: LL, LP, IP y clasificación por plasticidad según Villalobos (2015) para las mezclas con montmorillonita Na (SWY).....	41
Tabla 14: Actividades y clasificación según Skempton (1953) de la caolinita (KGA).....	41
Tabla 15: Actividades y clasificación según Skempton (1953) de la montmorillonita Ca (SAZ).....	43
Tabla 16: Actividades y clasificación según Skempton (1953) de la montmorillonita Na (SWY).....	44
Tabla 17: Coeficiente de permeabilidad, humedad retenida y cambio de volumen para las mezclas con caolinita con distintas soluciones a temperatura de ensayo.....	46
Tabla 18: Coeficiente de permeabilidad, humedad retenida y cambio de volumen para las mezclas con montmorillonita Ca con distintas soluciones a temperatura de ensayo.....	46
Tabla 19: Coeficiente de permeabilidad, humedad retenida y cambio de volumen para las mezclas con montmorillonita Na con distintas soluciones a temperatura de ensayo.....	47
Tabla 20: Resumen de parámetros obtenidos del estudio de granulometría láser para las muestras de columnas de lixiviación.....	52

Tabla 21: Composición química de la muestra cabeza.....	53
Tabla 22: Resumen de la mineralogía identificada mediante difracción de rayos X en el mineral de cabeza.....	53
Tabla 23: Resultado semi-cuantitativo mediante difracción de rayos X en la fracción arcilla..	55
Tabla 24: Contenido de minerales de arcilla total de las muestras columnares.....	55
Tabla 25: Valores de cobre total, cobre soluble, hierro total y hierro soluble.....	56
Tabla 26: LL, LP, IP y clasificación por plasticidad según Villalobos (2015)	56
Tabla 27: Clasificación USCS de las muestras columnares utilizadas.....	57
Tabla 28: Actividades y clasificación según Skempton (1953) de las muestras columnares..	58
Tabla 29: Coeficiente de permeabilidad, humedad retenida y cambio de volumen de las muestras columnares.....	58
Tabla 30: Análisis iónico del agua de mar de la bahía de Concepción (mg/L).....	63
Tabla 31: Recuperación de cobre en las columnas de agua de mar y destilada.....	66

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág
ANEXO A. Granulometría por difracción laser del cuarzo.....	76
ANEXO B. Límites de Atterberg para mezcla sintética.....	80
ANEXO C. Ensayo de permeabilidad con carga variable mezclas sintéticas.....	84
ANEXO D. Curva granulométrica, partículas con diámetro sobre 0.074 mm.....	88
ANEXO E. Curva granulométrica, partículas con diámetro bajo 0.074 mm.....	90
ANEXO F. Difracción de rayos x en roca total.....	92
ANEXO G. Difracción de rayos x en fracción arcilla.....	95
ANEXO H. Ensayo de permeabilidad con carga variable.....	96
ANEXO I. Límites de Atterberg para muestras mineral.....	98
ANEXO J. Datos experimentales de lixiviación.....	100

NOMENCLATURA

PLS	: Pregnant leach solution
FRX	: Fluorescencia de rayos X
Q	: Caudal
A	: Sección transversal a la muestra
l	: Largo de la muestra
k	: Constante de proporcionalidad denominada coeficiente hidráulico
i	: Gradiente hidráulico (adimensional)
h	: Altura
t	: Tiempo
V	: Volumen
d_c	: Diámetro de la muestra
LL	: Limite líquido
LP	: Límite plástico
IP	: Índice plástico
ASTM	: American society for testing and materials
σ	: Densidad de carga superficial
ψ_0	: Potencial de superficie
η_0	: Concentración del electrolito
ν	: Valencia del catión
D	: Constante dieléctrica del medio
T	: Temperatura
1/K	: Espesor de la doble capa eléctrica
Ω	: Permitividad relativa



1 Introducción

1.1 Introducción

En la actualidad la industria minera debe hacer frente a distintos factores perjudiciales a los procesos mineros, uno de estos factores son los yacimientos con leyes cada vez menores y un deterioro en la calidad de los minerales. Es por esto que resulta necesario optimizar los procesos productivos para afrontar esta problemática. Una forma de hacer frente a esto mediante la implementación de nuevas prácticas que permitan un mejoramiento en las operaciones, pero también es necesario realizar un trabajo multidisciplinario en que trabajen de manera cooperativa geólogos e ingenieros.

Durante el proceso de lixiviación la interacción entre la fase líquida y el mineral genera cambios en la mineralogía del material, lo que conduce a modificaciones en las propiedades hidráulicas y mecánicas de las pilas de lixiviación, generando problemas de estabilidad mecánica, bajas en la recuperación, aumento en el tiempo de circuito y en la razón de lixiviación o un mayor consumo de reactivos. Además, este tipo de problemas se ve acentuado por la aparición de ganga reactiva en el mineral que es alimentado a las plantas de lixiviación debido principalmente al aporte de minerales de arcilla.

Actualmente, el diseño de las pilas de lixiviación se realiza considerando principalmente variables metalúrgicas, no obstante, la experiencia ha mostrado la necesidad de incorporar variables geotécnicas tanto en el diseño como también durante el procesamiento del mineral para asegurar la permeabilidad de la masa a lixiviar, de manera que el líquido lixivante pase a través de todo el material y que el contacto entre el agente lixivante y el mineral sea el óptimo.

En los últimos años se han ejecutado distintos estudios con el fin de comprender los aspectos fenomenológicos involucrados en la lixiviación desde un mineral heterogéneo, mostrando que los parámetros asociados al mineral tales como, granulometría, mineralogía, composición de la ganga, interacción entre especies de ganga y especies metálicas, son de gran importancia para la optimización del proceso productivo.

Esta memoria de título tiene como objetivo estudiar los aspectos relativos a la permeabilidad del mineral y su plasticidad, evaluando mezclas artificiales de contenido variables de cuarzo y minerales de arcilla (caolinita, montmorillonita-Ca y montmorillonita-Na), y su interacción con distintas soluciones catiónicas.

Adicionalmente, se simuló la lixiviación de un mineral oxidado de cobre, perteneciente a un depósito tipo pórfido con enriquecimiento supérgeno y alteración hidrotermal argílica. Dicha simulación se realizó en columnas a escala laboratorio, con el propósito de observar el efecto en la recuperación de cobre, humedad retenida, atrapamiento mecánico que pudieron ocurrir durante el escurrimiento de las soluciones y el intercambio catiónico que producen los minerales de arcilla al intercambiar cobre durante la lixiviación con agua destilada y agua de mar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de distintas soluciones catiónicas en el comportamiento mecánico e hidráulico de minerales con altos contenidos de arcillas y verificar la modificación de la respuesta metalúrgica en una lixiviación columnar a escala laboratorio.

1.2.2 Objetivos específicos

- A través de la mezcla artificial de cuarzo y arcillas puras, evaluar el efecto de distintas soluciones catiónicas en el comportamiento hidráulico, utilizando un permeámetro de carga variable.
- A través de la mezcla artificial de cuarzo y arcillas puras, evaluar el efecto de distintas soluciones catiónicas en el comportamiento mecánico, medido a través de los límites líquidos, plásticos e índice de plasticidad.
- En función de los datos de comportamientos hidráulicos y mecánicos, evaluar las mejores condiciones para la operación exitosa del proceso de lixiviación con minerales con altos contenidos de arcilla.

2 Revisión de literatura y marco teórico

2.1 Lixiviación de minerales de cobre

La lixiviación de minerales de cobre es un proceso hidrometalúrgico, que consiste en una disolución de los compuestos de cobre en soluciones ácidas, formada principalmente, por ácido sulfúrico y agua. El incentivo para el desarrollo de este proceso provenía del hecho que los minerales oxidados de baja ley no eran susceptibles de ser concentrados por la operación convencional de flotación, es por ello que este proceso ha sido utilizado para procesar minerales de cobre de baja ley, sumado a su bajo costo de operación.

En este proceso se genera normalmente una fase acuosa rica llamada pregnant leach solution (PLS) y un residuo insoluble, los cuales pueden ser separados con un proceso sólido-líquido.

Los métodos mediante los cuales se puede desarrollar la lixiviación de cobre son variados e incluyen entre otros; lixiviación in-situ, botaderos, bateas inundadas, autoclave, etc. ^[1]

Hoy en día, el diseño de pilas de lixiviación suele considerar principalmente variables metalúrgicas. Bard (2004), ha puesto en evidencia la necesidad de incorporar variables geotécnicas que, en algunos casos, podrían condicionar el diseño. ^[2]

2.1.1 Recursos hídricos en lixiviación

El desarrollo de los procesos hidrometalúrgicos está siendo estimulado por la necesidad de procesar minerales de baja ley y/o minerales complejos que contienen calcopirita, la disminución general de las leyes de mineral, la explotación extensiva de óxidos de baja ley y la escasez hídrica, entre otros. En general, los minerales con mayores leyes requieren menos agua para el procesamiento y viceversa. Con el agotamiento de los recursos, la explotación de minerales de baja ley va en aumento, lo que genera un crecimiento en la demanda de agua.

El acceso al agua en la zona norte de Chile se está transformando en un recurso cada vez más escaso, provocando que la utilización de agua de mar en minería esté siendo una opción cada vez más rentable e incluso, la única posibilidad factible técnica y económica para muchas faenas mineras. El uso de agua de mar en el procesamiento de minerales ha ido en ascenso, con alternativas que consideran tanto la desalinización, como su uso directo sin tratamiento previo.

Los antecedentes indican que en 1987 la compañía minera de Tocopilla S.A (planta Tocopilla, Chile), fue pionera en poner en marcha la operación de lixiviación de mineral de cobre con agua de

mar. Posteriormente, la Minera Michilla (Chile) lixivía su mineral de óxidos y sulfuros secundarios de cobre usando agua de mar al igual que la planta de Tocopilla, pero adicionando CaCl_2 en medio ácido sulfúrico. [3]

En la actualidad la Minera Antucoya perteneciente al grupo AMSA, después de los estudios experimentales (2010-2011) decide iniciar su proceso de lixiviación de limonitas de cobre, óxidos verdes y mixtos, usando agua de mar. [3]

2.1.2 Lixiviación en pilas

Las pilas de lixiviación se trata de terraplenes de gran extensión y en algunos casos, de gran altura, compuestos de minerales de cobre oxidados, sulfurados y mixtos de alta ley. Las pilas son regadas por sistema de goteo y/o aspersores que vierten lentamente una solución de agua con ácido sulfúrico en la superficie de la pila. Esta solución disuelve el cobre contenido en los minerales, formando una solución rica de sulfato de cobre (PLS), la que es recolectada por el sistema de drenaje y llevada fuera del sector de las pilas en canaletas impermeabilizadas, donde es dirigida hacia piscinas desarenadoras.

De acuerdo con su modo de operación existen dos tipos de pilas: dinámicas y permanentes. Las pilas dinámicas son aquellas en las cuales una vez que el mineral ha sido lixiviado, este es removido de la pila y trasladado a botaderos, donde eventualmente podría ser sometido a un proceso de lixiviación secundaria como se puede apreciar en la Figura 1. Por otra parte, las pilas estáticas se construyen y riegan por niveles. Una vez finalizada la lixiviación de un nivel, se carga uno sobre el anterior, aprovechando o no la impermeabilización existente, lo que depende de la capacidad de drenaje de la pila.



Figura 1: Pilas de lixiviación dinámica en Minera Antucoya. [4]

2.1.3 Etapas del proceso de lixiviación en pilas

Para que la lixiviación en pilas tenga éxito se tienen que considerar una serie de factores que determinan la eficiencia del proceso, tales como la reducción de tamaño, aglomeración, curado ácido, la técnica de apilamiento y la percloración. A continuación se detallan algunas de estas etapas.

2.1.3.1 Chancado

El primer paso en el acondicionamiento del mineral para su lixiviación, es la reducción de tamaño. Esta consiste en un proceso de trituración y se realiza, en general, en varias etapas: chancado primario, secundario y en la mayoría de los casos terciarios, con el objeto de obtener un material mineralizado de un tamaño máximo entre $\frac{3}{4}$ y 2". Este tamaño es suficiente para dejar expuesta la superficie de las partículas de mineral a la infiltración de la solución lixiviante. Es importante notar que, la reducción de tamaño es favorable, ya que aumenta la recuperación de cobre, no obstante, disminuye la permeabilidad del mineral, afectando el drenaje de la pila y la recuperación de las soluciones.

2.1.3.2 Aglomeración y curado ácido

El proceso de aglomeración consiste en mezclar el material chancado con agua y ácido sulfúrico en un tambor rotatorio, de tal manera que las partículas finas se adhieran entre ellas y con las partículas más gruesas, formando lo que se conoce como glómeros, los cuales evitan que se produzcan arrastres de finos debido a la estratificación en la pila durante el riego posterior a éstas.

La cantidad de agua que se debe agregar depende fuertemente de las características del mineral: contenido y plasticidad de los finos, tamaño máximo de partículas, etc. Schmidt (2001) indica que un exceso de agua produce glómeros muy plásticos y poco estables que se destruyen, y que al cargarlos en una pila se deforman produciendo una compactación del mineral antes de iniciar el regado, afectando el drenaje de la pila. Por otra parte, una falta de agua produce glómeros muy débiles mecánicamente y esponjosos, lo que hace que, al llegar a las pilas, el mineral quede con muy baja densidad y al regar la pila se produzca una gran compactación que puede provocar canalizaciones favoreciendo flujos preferenciales durante el proceso de lixiviación.^[5]

La adición de ácido sulfúrico en el proceso de aglomeración, provoca un ataque químico denominado curado ácido. Este proceso genera la sulfatación de los minerales oxidados y de algunos sulfuros de cobre expuestos al contacto con el ácido. El curado ácido es una práctica común en las plantas hidrometalúrgicas, ya que disminuye el tiempo de lixiviación, aumenta la

concentración del PLS, disminuye la cantidad de agente lixivante utilizado en el riego y aumenta la recuperación.

2.1.4 Factores que afectan el drenaje de la pila

El proceso de lixiviación es un proceso químico complejo, donde intervienen diversos factores. El éxito de éste depende, en gran medida, de realizar un diseño que permita obtener el PLS de manera eficaz y eficiente, para que la lixiviación sea económicamente factible, se debe obtener una gran cantidad de cobre en un periodo limitado de tiempo. Es aquí donde un drenaje pobre de la pila es una de las causas más comunes del fracaso en los proyectos de lixiviación.

En general, el diseño de la pila se basa, principalmente, en variables hidrometalúrgicas, las cuales determinan el ciclo de lixiviación, la altura óptima de la pila, el porcentaje de cobre recuperado, etc. No obstante, ya se ha puesto en evidencia que es necesario incorporar variables geotécnicas en el diseño de las pilas de lixiviación, relativo al drenaje o flujo de solución rica en cobre. Las variables geotécnicas que pueden condicionar el diseño son: granulometría, ganga reactiva, permeabilidad del mineral, homogeneidad de los minerales y humedad de apilamiento, entre otras.

2.1.4.1 Granulometría y permeabilidad del mineral

Normalmente la granulometría es seleccionada por las distintas pruebas metalúrgicas que se realizan. Cabe notar que siempre un menor tamaño de partículas dará mejores resultados en la recuperación de cobre, sin embargo, la disminución de tamaño tiene como consecuencia una disminución de la permeabilidad, lo que puede causar problemas operacionales debido a inundaciones e incluso la imposibilidad de que la solución se infiltre a través de la pila. Además, al disminuir el tamaño, si bien mejora la recuperación de cobre, también aumentan los costos por chancado.

Otro aspecto de importancia es la posibilidad que la solución penetre por las microfisuras de las partículas más finas, se produzca un “chancado químico”, generando partículas más finas y afectando el drenaje de la pila. Este chancado químico podría sumarse a los efectos que producen cambios en la granulometría del mineral como, por ejemplo: el chancado debido a la operación y carguío, como también la migración de finos desde los sectores más altos de la pila, hasta los sectores más bajos.

Bard (2004) ha presentado evidencia de chancado químico, en la Figura 2 se presenta la granulometría de dos muestras minerales antes y después de la lixiviación, observando que por efecto del chancado químico se puede producir una variación en las fracciones de arenas, limos y

arcillas. Se debe tener en cuenta que el chancado químico ocurrirá en los minerales de mena y ganga, ya que algunos de ellos también podrían lixiviarse. El chancado químico corresponde a una importante fuente de estudio, debido a que tiene gran relevancia en el comportamiento de la pila en el tiempo, afectando especialmente la permeabilidad del mineral debido al aumento de porcentaje de finos.

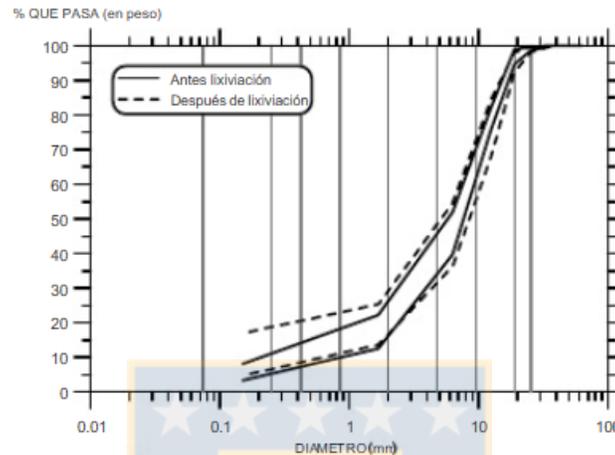


Figura 2: Variación de la granulometría debido al chancado químico. [1]

La permeabilidad de una muestra depende principalmente de la granulometría, el porcentaje de finos, la densidad y plasticidad de los finos. Si la permeabilidad de la pila es alta, el tiempo de residencia de la solución en la pila es bajo. En este caso, la solución alcanzaría a lixiviar superficial y parcialmente las partículas que constituyen la pila. Por lo tanto, una buena permeabilidad es aquella que permite al flujo de solución descender con facilidad, pero también permite que la solución reaccione con la mayor cantidad de mineral posible.

En el caso de las pilas de lixiviación, este parámetro es muy difícil de cuantificar debido a que su valor se ve fuertemente afectado por condiciones de operación. A continuación, se enumeran los principales factores por lo que este valor se puede ver afectado en una pila de lixiviación:

1. Disminución de la permeabilidad por aumento de porcentaje de finos del mineral debido a chancado químico.
2. Diminución de la permeabilidad por densificación de los materiales depositados por efecto de su propio peso, saturación con ácido o debido a un apilamiento inadecuado.
3. Disminución de la permeabilidad en los sectores inferiores y aumento en los sectores superiores, debido a la migración de finos desde la parte superior hacia la parte inferior de la pila.

2.2 Minerales de arcilla

Los minerales de arcilla pertenecen a la familia de los minerales denominados filosilicatos. El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados.

Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 2 μm).

En mecánica de suelos, el término arcilla no tiene connotaciones mineralógicas, sino de tamaño de partícula, en este sentido se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a 2 μm . Según esto, todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaño, incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldespato, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas cuando estén incluidos en un sedimento arcilloso y su tamaño no supera los 2 μm .

2.2.1 Origen hidrotermal de las arcillas

En la naturaleza, la gran mayoría de los depósitos minerales metálicos están de una u otra forma ligados a los procesos hidrotermales. Dichos efectos quedan evidenciados en asociaciones de minerales de alteración y de mena, ya que son dependientes de factores tales como composición del fluido hidrotermal, composición de la roca huésped, temperatura, pH, Eh, razón agua/roca y tiempo de interacción, entre otros. ^[4] La Tabla 1 muestra los productos típicos de reemplazo por alteración.

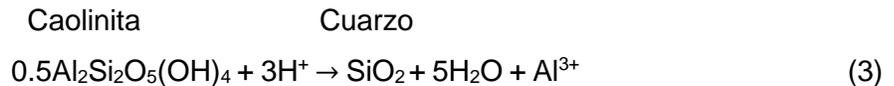
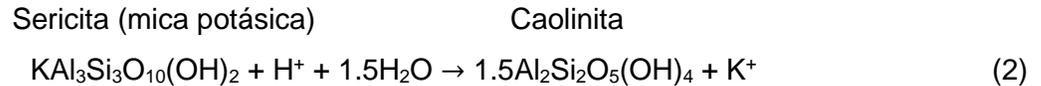
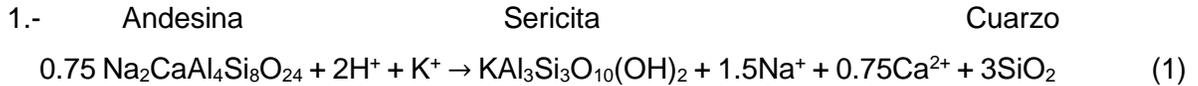
Tabla 1: Producto típico de reemplazo por alteración. ^[6]

Mineral original	Producto de reemplazo hidrotermal
Vidrio volcánico	Zeolitas, montmorillonita y cuarzo
Piroxeno/olivino/calcita/biotita	Clorita, Illita y cuarzo
Plagioclasa cálcica	Calcita, montmorillonita, clorita, Illita y cuarzo

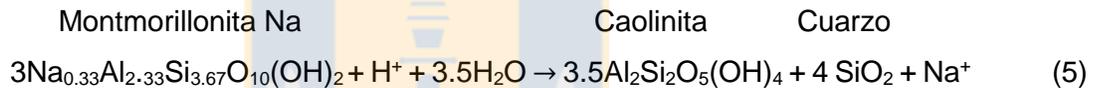
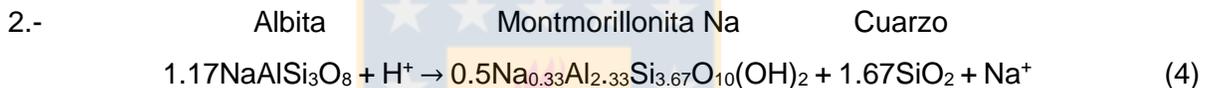
Las reacciones de hidrólisis son muy importantes en los procesos de alteración hidrotermal, donde algunos tipos de alteraciones son el resultado de distinto grado de hidrólisis de los minerales constituyentes de las rocas. ^[7]

En términos químicos esto se puede representar por las siguientes reacciones:

Alteración de plagioclasa → sericita → arcillas → cuarzo



Alteración de plagioclasa → arcillas → cuarzo



El clima, a través de los parámetros de humedad y temperatura, controla fuertemente el proceso formador de arcilla a partir de los silicatos. Así, en condiciones de calor y humedad la hidrólisis dará lugar a la formación de arcillas caoliniticas. Por el contrario, en climas áridos la arcilla predominante resultará ser del grupo de las esmectitas. ^[1]

2.2.2 Estructura de los minerales de arcilla

Los minerales de arcilla consisten en apilamientos poliméricos tipo sandwich de capas de tetraedros y octaedros. Las capas tetraédricas (T) están compuestas por Si-O, mientras que las octaédricas (O) de Al-O y Al-(OH). El silicio puede ser sustituido por aluminio en las capas tetraédricas y el aluminio por cationes divalentes (Mg^{2+} , Fe^{2+}) en las capas octaédricas. Dependiendo de la organización espacial de las capas (TO, TOT y TOT-O) los minerales de arcilla pueden formar diferentes tipo o estructuras tales como 1:1, 2:1 y 2:1:1.

2.2.2.1 Estructura del tipo 1:1 (TO)

Los minerales de arcilla que presentan estructura del tipo 1:1 se componen de una capa tetraédrica unida a una octaédrica como se muestra esquemáticamente en la Figura 3, donde representa de manera esquemática la caolinita.

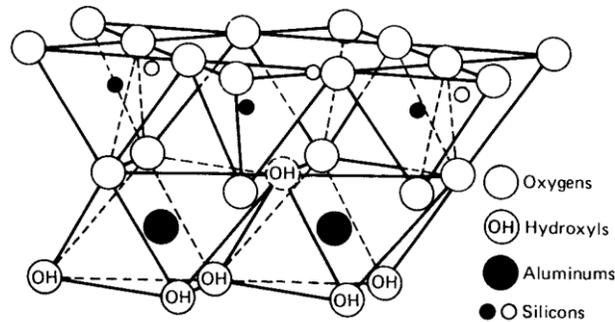


Figura 3: Diagrama esquemático de la estructura de la caolinita. [7]

La unión entre las capas sucesivas puede ser de naturaleza iónica o en algunos casos pueden ser enlaces de hidrógeno o fuerzas de Van der Waals. Es por ello que la unión es lo suficiente fuerte como para que no haya una expansión de la capa intermedia en presencia de agua u otra solución. [7]

2.2.2.2 Estructura del tipo 2:1 (TOT)

Los minerales arcillosos de este tipo están constituidos por una capa octaédrica (O) unida a la manera de un sandwich por dos capas tetraédricas (T), quedando ordenada como se muestra esquemáticamente en la Figura 4 donde se representa a la montmorillonita. Tres grupos de arcillas presentan esta estructuración: micas, vermiculitas y esmectitas.

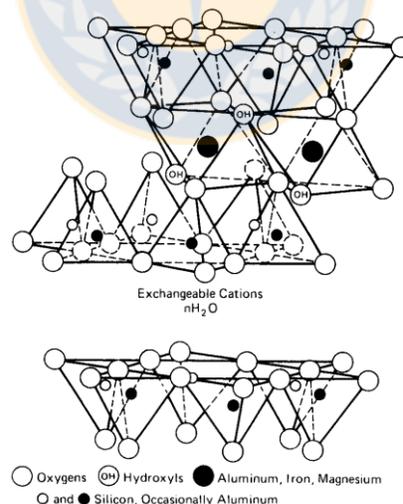


Figura 4: Diagrama esquemático de la estructura montmorillonita. [7]

Los oxígenos de las capas tetraédricas que se disponen arriba y debajo de la octaédrica en las estructuras tipo 2:1, se distribuyen formando hexágonos con un hueco central. Si se produce una sustitución en la capa octaédrica de Al^{3+} por Mg^{2+} o Fe^{2+} , el exceso de cargas negativas hará que la superficie de oxígenos de los tetraedros adquiera una carga que permite ligar cationes en los huecos

anteriormente mencionados. Si además se producen sustituciones de Si^{4+} por Al^{3+} en los tetraedros, la carga negativa, y por lo tanto capacidad de atracción de cationes se incrementará aún más. También se desarrollan cargas negativas en los bordes del armazón de las arcillas, aunque su importancia disminuye del tipo 1:1 al 2:1.

La unión entre capas sucesivas es por fuerzas de Van de Waals y por cationes que equilibran cargas deficientes en la estructura. Estos enlaces son débiles y se separan fácilmente por absorción de agua u otros líquidos polares.

2.2.2.3 Superficie específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa.

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

A continuación, se muestra en la Tabla 2 algunos ejemplos de superficie específica de arcillas:

Tabla 2: Valores de superficies específica de algunas arcillas. ^[7]

Arcilla	Área específica (m ² /g)
Caolinita bien cristalizada	15
Caolinita pobremente cristalizada	50
Halloisita	60
Illita	50
Montmorillonita	80-300
Sepiolita	100-240
Paligorskita	100-200

2.2.2.4 Capacidad de intercambio catiónico

Es una propiedad que presentan todos los minerales de arcillas, pero son una característica fundamental del grupo de las esmectitas. Estas son capaces de cambiar fácilmente los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH ^[8]. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas de la estructura
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas
- Disociación de los hidroxilos accesibles

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80% de la carga neta de la partícula; además, es independiente de las condiciones de pH y de actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH, actividad iónica y corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20% de la carga total de la lámina ^[9].

A continuación, en la Tabla 3 se muestran algunos ejemplos de capacidad de intercambio catiónico.

Tabla 3: Valores de CIC de algunas arcillas. ^[8]

Arcilla	CEC (mec/100g)
Caolinita	3-5
Halloisita	10-40
Clorita	10-50
Illita	10-50
Montmorillonita	80-200
Vermiculita	100-200
Sepiolita -Paligorskita	25-35

2.2.2.5 Capacidad de absorción

Algunos minerales de arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes, ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlamilar (esmeclitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso el mineral de arcilla y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de absorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para un mismo mineral de arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua en arcillas absorbentes es mayor al 100% con respecto al peso.

2.2.2.6 Hidratación y expansión

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características del grupo de las esmectitas y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar a la expansión. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectitas, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si, por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio, su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida. ^[10]

Algunos investigadores afirman que si el porcentaje de sodio intercambiable, definido como PSI ($[\text{Na intercambiable} / \text{capacidad de intercambio catiónico}] \times 100 \%$), es superior a un 15% y se encuentra completamente saturada, se producirá la desintegración de la arcilla. Si, por el contrario tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de expansión será mucho más reducida. ^[11-13]

Según esta afirmación, si se trabaja con montmorillonita Ca como es el caso de este estudio, el valor PSI será bajo perdiendo la facultad de delaminarse y solo tenderá a expandirse. Caso contrario a la montmorillonita Na, donde el valor PSI será alto y lo más probable es que esta arcilla se expanda para posteriormente delaminarse.

Diversos estudios han demostrado en muestras que presentan un alto PSI puede provocar dispersión y expansión de las partículas de arcillas (Figura 5). La dispersión y el consecuente reordenamiento de las partículas obstruirán los espacios porosos, disminuyendo así la conductividad hidráulica y como consecuencia se producirá un importante aumento en la humedad retenida.

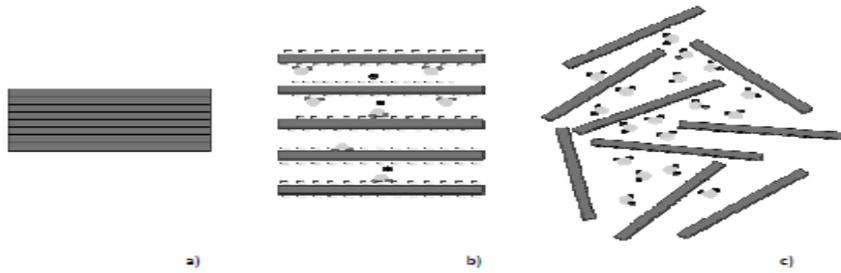


Figura 5: Arcilla grupo de la esmectita en estado a) anhidro, b) intercambiando cationes y expandiendo y c) delaminando dando forma a una suspensión coloidal.^[7]

2.3 Permeabilidad

2.3.1 Flujo unidimensional

El flujo unidimensional corresponde a aquel en que todos los parámetros del fluido, tales como presión, velocidad, temperatura, etc., se mantienen constantes en una sección perpendicular a la dirección del flujo. El flujo puede ser denominado, además, como laminar si las líneas de flujo son paralelas y el fluido no se mezcla, dicho de otra forma, si existe un movimiento continuo del fluido en capas o láminas. Por el contrario, el flujo puede ser denominado turbulento si existe mezcla del fluido, si existe un movimiento tridimensional al azar.

La relación entre velocidad y gradiente hidráulico en medio poroso fue obtenida experimentalmente en 1856 por el ingeniero Henry Darcy^[14]. Darcy demostró que, para arenas limpias, saturadas y bajo un flujo laminar, la tasa del flujo es proporcional al gradiente hidráulico. Esta ley suele escribirse como se muestra en la Ecuación 6:

$$Q = v \times A = k \times i \times A = k \times \frac{\Delta h}{l} \times A \quad (6)$$

Donde:

Q: Caudal (cm³/s);

A: Sección transversal a la muestra (cm²);

i: Gradiente hidráulico (adimensional);

l: Largo de la muestra (cm);

k: Constante de proporcionalidad denominada coeficiente de permeabilidad (cm/s).

La constante de permeabilidad de un suelo representa la facilidad con la que un fluido puede escurrir en él. A mayor valor de la permeabilidad se dirá que una muestra es más permeable.

2.3.2 Coeficiente de permeabilidad

Lo primero que es importante establecer, es que la constante de permeabilidad no es una función que solo depende de las propiedades que contenga la muestra, sino que también es una

función de las propiedades del fluido que pasa a través de él. Los factores del material en estudio que influyen en la permeabilidad son variados, como se menciona a continuación.

El tamaño de los granos es el factor con mayor influencia en la permeabilidad. Mientras menor es el tamaño de estos, mayor es la superficie de contacto con el fluido contenido en los poros; este aumento en el área superficial provoca un incremento en la resistencia friccional al flujo, lo que disminuye la permeabilidad. [15]

La distribución granulométrica de una muestra es otra variable que tiene influencia en la permeabilidad, no obstante, diversas investigaciones desarrolladas en esta área han concluido que en una muestra con distintos tamaños de granos, la permeabilidad depende principalmente del tamaño de las partículas más pequeñas. La Figura 6 presenta, a modo de ejemplo, una correlación entre permeabilidad y el D_5 (diámetro por el que pasa el 5% de la muestra). En esta figura se observa que la distribución granulométrica tiene una baja influencia en comparación al tamaño de las partículas más pequeñas. De todos modos, es posible probar que, si se selecciona un tamaño fijo del diámetro medio de los granos, la permeabilidad del suelo será mayor mientras más uniforme sea la muestra [16]. Lo anterior se debería a que, en las muestras de suelos bien graduados, los granos de menor tamaño ocuparán parte de los poros de las partículas del suelo, disminuyendo la permeabilidad de éste.

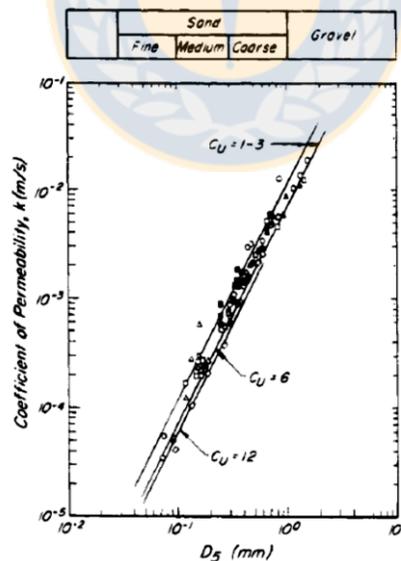


Figura 6: Influencia de la gradación en la permeabilidad de muestras granulares. [17]

En muestras de suelo parcialmente saturados, el grado de saturación también influye en la permeabilidad. Burbujas de aire atrapadas en la muestra bloquean el paso del fluido por los canales de flujo, haciendo disminuir el valor de la permeabilidad. Además, debido a que las burbujas de aire disminuyen su tamaño con la presión del fluido, la permeabilidad también aumenta con el aumento

de la presión del fluido. La Figura 7 presenta la influencia del grado de saturación en distintas arenas, donde se observa un aumento de la permeabilidad con el grado de saturación. La magnitud de este aumento es distinta para las diferentes arenas consideradas.

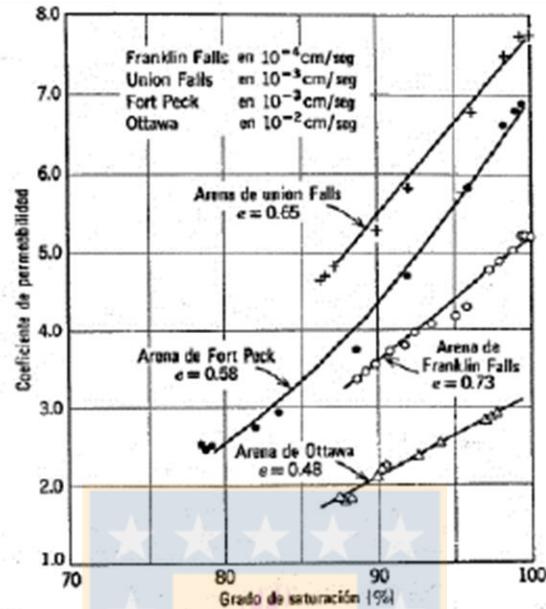


Figura 7: Relación entre la permeabilidad y el grado de saturación para varias arenas. ^[18]

Otros factores que afectan la permeabilidad, son la forma de los vacíos y la trayectoria del flujo a través de los poros, llamada tortuosidad.

La propiedad del fluido que afecta mayormente el valor de la permeabilidad es la viscosidad, la cual es inversamente proporcional a la permeabilidad. A su vez, la viscosidad decrece con el aumento de la temperatura.

Pese a todos los factores que influyen en la permeabilidad, diversos autores han llevado a cabo análisis matemáticos y mediciones de flujo a través de medio permeables con el fin de conocer las propiedades más influyentes. En estos análisis se ha demostrado que la permeabilidad es determinada principalmente por las áreas de los poros individuales normales a la dirección del flujo, la forma de los poros a lo largo de la dirección del flujo y el área total de poros por unidad de área normal a la dirección del flujo ^[17]. El tamaño de las partículas de suelo determina el tamaño de los poros individuales. La forma y arreglo de las partículas determinan la forma de los poros y el tamaño, forma y arreglo de los poros en conjunto, determinan la porosidad.

En la literatura es posible encontrar valores referenciales para diversos tipos de suelos según sea su clasificación, los cuales deben ser utilizados sólo como referencia debido a la gran variación que puede presentar la permeabilidad de una muestra de suelo, con pequeñas variaciones de los parámetros que la afectan. Se debe notar además, que muchos de los valores que se encuentran

en la bibliografía no corresponden a muestras de suelos naturales. Rangos típicos de valores de permeabilidad para distintos tipos de suelos se presentan en la Figura 8, la cual fue desarrollada por Casagrande [14]. En esta figura también se incluyen las características de drenaje para los distintos rangos de permeabilidad.

Coeficiente de permeabilidad, (cm/s)					
100 10 1 10 ⁻¹ 10 ⁻² 10 ⁻³ 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁶ 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁸ 10 ⁻⁹					
Drenaje	Bueno			Pobre	Prácticamente impermeable
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava	Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada	Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición. ^c	Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.				
	Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.				
Determinación indirecta de k		Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados	Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.	Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.	
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.			Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia	

Figura 8: Rango de permeabilidades y drenaje para distintos tipos de suelos. [14]

En esta figura, Casagrande destaca ciertos valores del coeficiente de permeabilidad (1.0 , 10^{-4} y 10^{-9} cm/s). Estos se conocen como los puntos de referencia de Casagrande y son bastante útiles al realizar estudios de flujo en distintas muestras. Por ejemplo:

- $k = 1.0$ cm/s: Es la frontera entre flujo laminar y turbulento, además separa las gravas limpias de las arenas limpias y gravas arenosas.
- $k = 10^{-4}$ cm/s: Es la frontera entre permeable y suelos de drenaje pobre bajo gradientes pequeños.
- $k = 10^{-9}$ cm/s: Es aproximadamente el límite inferior de la permeabilidad en una muestra de suelo, aunque se han encontrado permeabilidades tan bajas como 10^{-11} cm/s para arcillas muy plásticas en el límite de contracción.

Casagrande recomienda que la permeabilidad debe relacionarse al punto de referencia más cercano, por ejemplo, 0.01×10^{-4} cm/s en vez de 10^{-6} . [14]

2.3.3 Ensayos de laboratorio para determinar la permeabilidad.

En laboratorio, la permeabilidad se obtiene a través de un aparato conocido como permeámetro. Éste se compone de una cámara o molde, en la cual se ubica la muestra. Si la muestra es reconstituida, el valor de la permeabilidad que se obtenga sólo será un valor aproximado del valor real. Se debe tener un cuidado especial con la densidad a la que se reconstituye la muestra, debido a que los permeámetros pueden hacer variar fuertemente la permeabilidad real. Los ensayos se pueden dividir en ensayos a carga constante y ensayos a carga variable. Cada uno de ellos se explica a continuación.

2.3.3.1 Ensayo de carga constante

Un esquema de este tipo de permeámetro se muestra en la Figura 9. Este permeámetro consiste en un contenedor dentro del cual se ubica la muestra material. Bajo y sobre la muestra, es necesario colocar piedras porosas o geotextiles para uniformizar el flujo y disminuir la migración de partículas finas.

En este caso, un estanque de carga hidráulica provee una alimentación de agua (u otro fluido, si fuera el caso) a una carga constante (carga hidráulica), con lo que el agua se observa a través de la muestra hasta alcanzar un régimen de equilibrio o estado estacionario. Para medir la permeabilidad se genera un flujo a través de la muestra y luego que se alcanza una situación de equilibrio, se mide el caudal de salida desde el permeámetro, Q , así como la diferencia de carga entre el estanque de nivel constante y el nivel de agua en la salida, h .

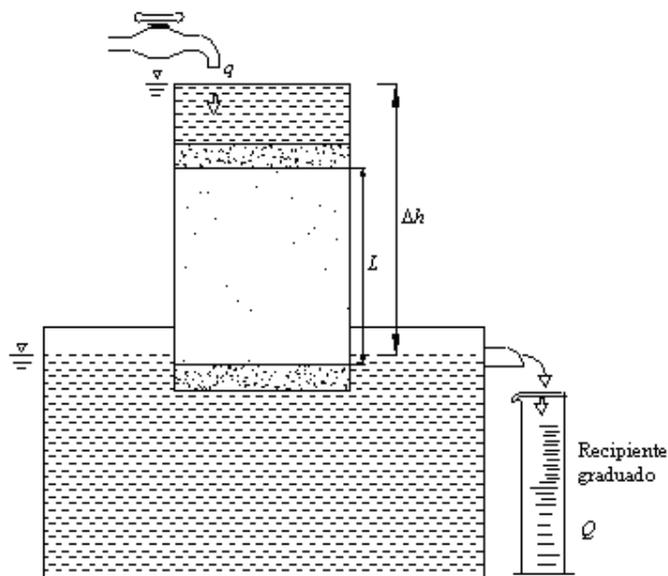


Figura 9: Permeámetro de carga constante. [19]

Aplicando la ley de Darcy, se obtiene la permeabilidad como se muestra en la Ecuación 7:

$$k = \frac{V \times l}{A \times h \times t} \quad (7)$$

Es decir, para una altura constante del estanque de solución, debe medirse el volumen de fluido que pasa por una muestra de suelo de área transversal A y largo l , en un tiempo determinado t . Para una correcta interpretación de los resultados de una prueba en permeámetro de carga constante, se debe utilizar varios gradientes hidráulicos y estos deben tener magnitudes similares a los observados en terreno.

Se debe tener en cuenta que el ensayo de carga constante es realizado en general, en muestras no cohesivas, debido a que en éstos la permeabilidad es suficientemente alta para obtener caudales que puedan ser medidos fácilmente.

2.3.3.2 Ensayos de carga variable

En los ensayos de carga variable, el estanque de carga hidráulica de nivel constante, se reemplaza por un tubo vertical en el cual se produce el descenso del nivel de fluido utilizado a medida que esta atraviesa la muestra, como se observa en la Figura 10. Para la determinación de la permeabilidad, se anota el nivel del fluido inicial en el tubo, h_1 (para un tiempo arbitrario, t_1). Luego de un periodo de tiempo, Δt , se mide la nueva posición del fluido en el tubo vertical, h_2 . El diámetro interior del tubo, d , el área del diámetro interior del tubo, a , la longitud de la muestra, L y el área de la muestra, A , son valores conocidos.

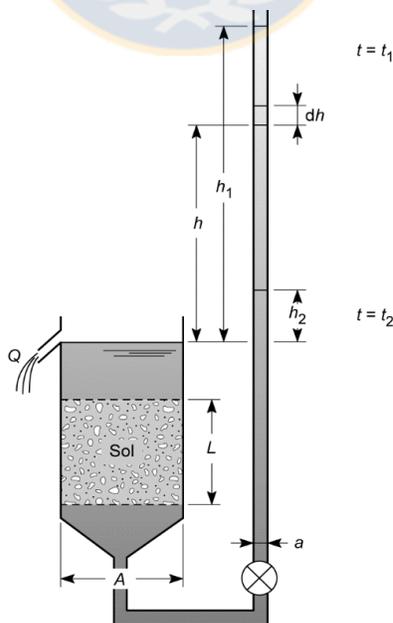


Figura 10: Permeámetro de carga variable. ^[19]

A partir de la ley de Darcy, en el tiempo t , el flujo que sale del tubo queda determinado por la Ecuación 8:

$$q_{\text{sale}} = k \times i \times A = k \times \frac{h}{l} \times A \quad (8)$$

Debido a la continuidad del flujo, se tiene:

$$q_{\text{entra}} = -a \frac{dh}{dt} = k \frac{h}{L} A = q_{\text{sale}} \quad (9)$$

Separando variables e integrando para tiempo t_1 y t_2 arbitrarios:

$$-a \int_{h_2}^{h_1} \frac{dh}{h} = k \frac{A}{L} \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (10)$$

Se obtiene:

$$k = \frac{aL}{A \Delta t} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) ; \text{ donde } \Delta t = t_2 - t_1 \quad (11)$$

2.3.4 Factores que afectan el valor de la permeabilidad medida en laboratorio

Diversos factores pueden afectar el coeficiente de permeabilidad medida en laboratorio. En este apartado se presentan los principales factores que deben tenerse en cuenta al realizar ensayos para medir la permeabilidad.

1. El primer factor que es necesario mencionar es el aire dentro de la probeta, ya que es posible que queden burbujas de aire atrapadas. De esta forma la saturación sería menor al 100%, obteniendo un valor de la permeabilidad menor al valor saturado, debido a la disminución de los canales de flujo para el escurrimiento de la solución.
En algunos tipos de muestras, principalmente arenas y limos, se debe tener cuidado con la migración de finos y con la solución que se desear utilizar, ya que éstos podrían tapar los filtros (piedras porosas o geotextiles) y por lo tanto, se determinaría un valor de la permeabilidad incorrecto. Pero también la migración de finos aumenta el flujo y por lo tanto, el coeficiente de permeabilidad.
2. La variación de temperatura también afecta el valor del coeficiente de permeabilidad, sobre todo si el ensayo es de larga duración. En el caso en que la temperatura en terreno sea muy diferente a la que se tiene en el laboratorio, se debe realizar una corrección por la viscosidad del fluido.
3. También se debe velar por conseguir una muestra representativa para ensayar en laboratorio, ya que las condiciones de terreno pueden variar bastante respecto a las de laboratorio. La condición más difícil de representar en laboratorio es la heterogeneidad, la

cual afecta fuertemente a la permeabilidad, debido a que ésta es sensible a la dirección del flujo respecto de la distribución de las muestras de diferente granulometría.

2.4 Plasticidad

En muestras de grano grueso las fuerzas de gravitación predominan sobre cualquier otra fuerza. El comportamiento mecánico e hidráulico de estas muestras se puede definir por características tales como compacidad del depósito y la orientación de sus partículas individuales. Sin embargo, en muestras que presentan una alta cantidad de minerales arcillosos, son las fuerzas electromagnéticas las que hacen posible el intercambio catiónico e iónico, lo cual influye en el comportamiento. En estos últimos se presenta el caso en que al ser remoldeados en condición húmeda, adoptan una consistencia característica denominada plástica. La plasticidad es en ese sentido, una propiedad que ha servido por siglos para clasificar suelos en forma puramente descriptiva.

La mecánica de suelo busca establecer relaciones empíricas y teóricas entre la plasticidad y las propiedades fisicoquímicas determinantes del comportamiento mecánico de las arcillas. La plasticidad de una muestra, es una propiedad relacionada con la capacidad de interactuar con el agua que tienen los minerales de caolinita, montmorillonita e illita que componen la arcilla. La forma laminar de las partículas influencia importantemente la compresibilidad de dicha muestra, mientras que el pequeño tamaño propio de estas partículas reduce considerablemente la permeabilidad de la muestra como se describió anteriormente.

2.4.1 Límites de consistencia

Una de las características más importantes de las arcillas es su plasticidad. La magnitud de la plasticidad que presenta una arcilla natural depende de su composición mineralógica y contenido de humedad. La consistencia de un mineral de arcilla varía con el contenido de humedad, desde un estado sólido en condición seca, pasando por un estado semi-sólido para bajos contenidos de humedad en que la muestra se desmorona y no presenta plasticidad, pasando también por un estado plástico para altos contenido de humedad, hasta llegar finalmente a un estado prácticamente líquido para contenidos de humedad muy altos. ^[20]

sólido → semi-sólido → plástico → líquido

El contenido de humedad para el cual la consistencia cambia de un estado a otro, varía dependiendo del tipo de mineral de arcilla como se mencionó anteriormente. Como estos cambios

son graduales, se establecen límites arbitrarios entre los diferentes estados denominados límites de Atterberg.

2.4.2 Límites de Atterberg

Cuando una muestra arcillosa se mezcla con una cantidad excesiva de agua, la muestra puede fluir como un líquido viscoso o incluso escurriendo como un líquido. Si luego es secado gradualmente, se comportará como un material plástico, semi-sólido o sólido, dependiendo del contenido de agua. El contenido de agua en porcentaje, con el que el suelo cambia de un estado plástico a líquido se define como Límite Líquido, LL. Del mismo modo, el contenido de agua, en porcentaje, con el que la muestra cambia de un estado plástico a uno semi-sólido se denomina Límite Plástico, LP. Por su parte, el cambio de un estado semi-sólido a uno sólido se define como Límite de Retracción, LR, como se puede apreciar en la Figura 11.

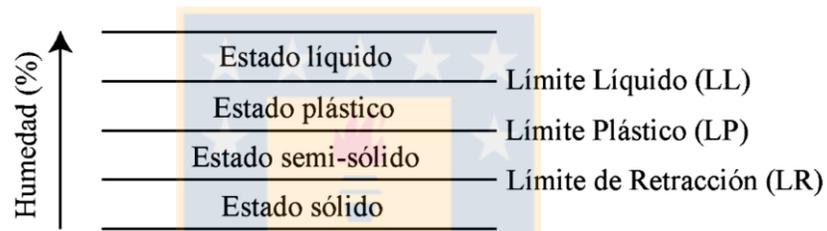


Figura 11: Límites entre estados de consistencia de una muestra. ^[20]

Por medio de estos límites de consistencia se ha establecido el Índice de Plasticidad IP ^[21], definido como

$$IP = LL - LP \quad (12)$$

Donde sí,

- $IP = 0 \rightarrow$ material no plástico
- $IP < 7 \rightarrow$ material de baja plasticidad
- $7 < IP < 17 \rightarrow$ material medianamente plástico
- $IP > 17 \rightarrow$ material altamente plástico

El LL y el IP son utilizados por los sistemas de clasificación de suelos para diferenciar si el suelo fino que contiene una muestra es limo o arcilla y si es de baja o alta plasticidad.

2.4.3 Actividad

La presencia de pequeñas cantidades de minerales de arcillas puede tener grandes efectos en el comportamiento de la muestra. La actividad de una arcilla es un indicador del efecto que pudiera tener un cierto porcentaje de arcilla. La Ecuación 13, muestra la determinación de la actividad, donde el porcentaje de arcilla corresponde a las partículas de tamaño menor a 2 μm

$$\text{Actividad} = \frac{\text{IP \%}}{\text{porcentaje de arcilla}} \quad (13)$$

En general, arcillas compuestas de caolinita tendrán baja actividad y por lo tanto serán estables, no así en el caso de contener montmorillonita, lo cual podría conducir valores altos de actividad dependiendo de la cantidad de agua absorbida, repercutiendo en grandes cambios volumétricos. Dicho lo anterior, la actividad se puede clasificar de la siguiente manera.

- Actividad < 0.75 → la arcilla es prácticamente inactiva
- 0.75 < Actividad < 1.25 → la arcilla es normal
- Actividad > 1.25 → la arcilla es prácticamente activa

La Figura 12 muestra esquemáticamente el potencial volumétrico (bajo, medio, alto y muy alto) en función de la Actividad de una muestra de arcilla. A partir de este gráfico, McCarthy (1998) establece que la expansión potencial de un volumen de la muestra es menor a un 2% para el caso bajo, entre un 2 y 5% para el caso medio, entre 5 y 10% para el caso alto y mayor a un 10% para el caso muy alto. [22]

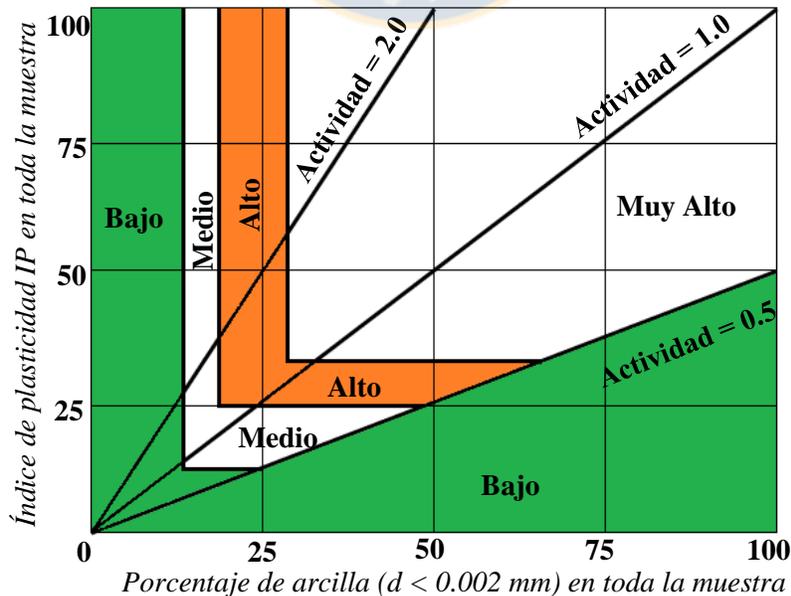


Figura 12: Cambio de volumen potencial de muestras arcillosas. [22]

2.5 Comportamiento de los minerales de arcilla en sistemas acuosos

2.5.1 Sistema arcilla – agua – electrolito

En las arcillas al estar en contacto con el agua, se genera una hidratación del espacio interlaminar, propiedad característica del grupo de las esmectitas y no del grupo de las caolinitas, ya que se encuentran desbalanceadas por la sustitución isomórfica a causa de que el sitio que normalmente ocupa un catión formador de red cristalina (Si^{4+} , Al^{3+} , Mg^{2+} , etc.) es ocupado por otro catión, asimismo formador de red y con un tamaño similar. La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia su expansión debido a la separación de sus láminas para que así desaparezca el desbalance inicial.

Los antecedentes antes mencionados, reflejan su comportamiento eminentemente plástico, debido a su morfología laminar, elevada área superficial y tamaño de partícula.

Existe una gran variación en la plasticidad para los diferentes minerales de arcilla, en función del catión de intercambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula. En general, cuanto más pequeña son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.^[7]

2.5.2 Distribución de iones en sistemas de agua – arcilla

Cuando una solución tiene cationes, estos son adsorbidos y se mantienen fuertemente en la superficie de las partículas de arcilla que se encuentran cargadas negativamente. Los cationes adsorbidos, debido a su alta concentración cerca de la superficie de las partículas, intentan difundir para igualar la concentración en todo el fluido que se encuentra en los poros del mineral de arcilla. Sin embargo, su libertad para hacerlo está restringida tanto por el campo eléctrico negativo que se origina en la superficie de las partículas, como por interacciones ion-superficie que son exclusiva de los cationes específicos. La tendencia de escape debido a la difusión y la atracción electrostática opuesta conducen a distribuciones de iones adyacentes a una sola partícula de arcilla en suspensión que a menudo se idealizan como se muestra en la Figura 13.

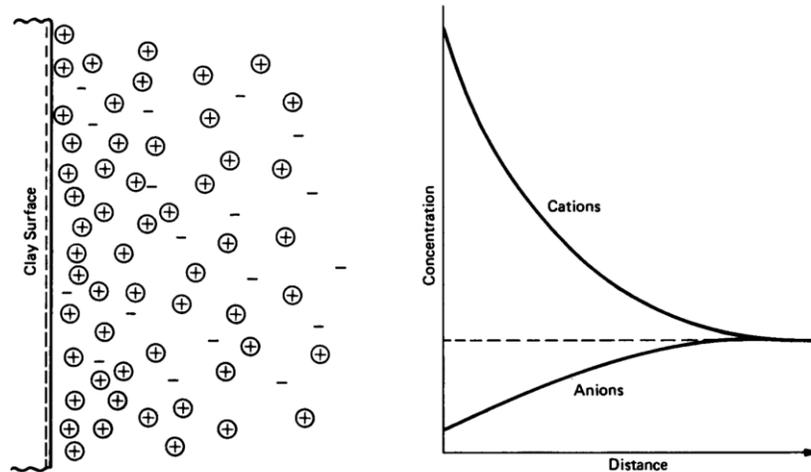


Figura 13: Distribuciones de iones adyacentes a una superficie de arcilla de acuerdo con el concepto de la doble capa difusa. [7]

La superficie cargada y la carga distribuida en la fase adyacente se denominan juntas, la doble capa eléctrica. Se han propuesto varias teorías para la descripción cuantitativa de distribuciones de iones adyacentes a superficies cargadas. La teoría más frecuentemente citada para la distribución iónica fue desarrollada por Gouy (1910) y Chapman (1913) [7]. Posteriormente, Derjaguin (1941) y Verwey extendieron la teoría de Gouy-Chapman a la descripción de las energías repulsivas y las fuerzas de interacción entre las partículas coloidales y predicción de la estabilidad de las suspensiones coloidales. Su teoría ahora se conoce a menudo como la teoría DLVO. [7]

En la Figura 14, se puede distinguir una lámina de montmorillonita cargada. Como esta se encuentra cargada negativamente sucederá que atraerá una carga positiva de la solución con cationes como por ejemplo Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y/o Mg^{2+} , entre otros, los cuales ingresan en la intercapa logrando balancear la superficie y compensar de esta manera el déficit de cargas generados por las sustituciones isomórficas que se generan en la red cristalina.

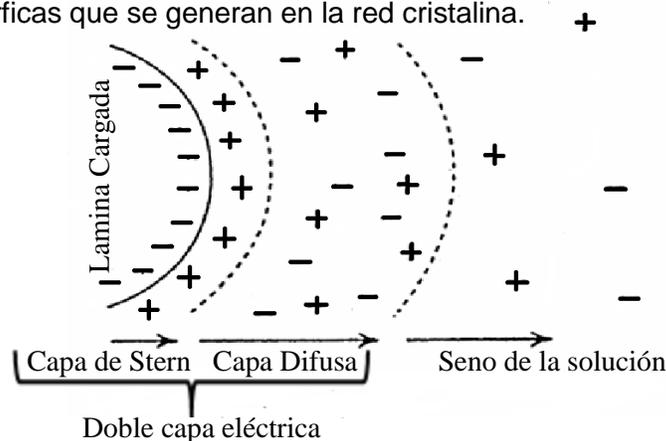


Figura 14: Representación de la doble capa eléctrica. [7]

La primera capa que se pueda apreciar en la Figura 14 después de la superficie cargada negativamente es la capa de Stern, en el cual hay una gran concentración de contraiones que son adsorbidos en la superficie de la lámina cargada.

Posteriormente, hay una capa difusa en la cual, si bien hay una concentración iónica menor, esto se debe a un aumento en la distancia desde la lámina cargada como aparece en la Figura 14. Aquí, al igual que la capa de Stern habrá un acercamiento de los contraiones, pero será menor debido al aumento de la distancia, ya que a medida que se aumenta la distancia se encontrará el seno de la solución donde está la concentración de equilibrio del sistema.

Esta teoría describe razonablemente la distribución real de iones solo para partículas de esmectitas suspendidas en soluciones de electrolitos monovalentes a concentraciones muy bajas (menos de 100 mol/m^3 o 1 mM)^[7]. No obstante, puede ser útil para comprender varios aspectos de las fuerzas físico-químicas de interacción, agregación, floculación, dispersión y defloculación, además de las relaciones con la formación de la estructura del suelo y la compresión y expansión de la arcilla.

2.5.3 Influencia de las variables del sistema en la doble capa

Las concentraciones de iones y las distribuciones de potencial adyacentes a las superficies cargadas son sensibles a las variaciones en la densidad de carga superficial σ o el potencial de superficie ψ_0 , la concentración de electrolito η_0 , la valencia del catión v , la constante dieléctrica del medio D y la temperatura T . Las medidas aproximadas de las influencias de η_0 , v , D y T vienen dadas por las definiciones previamente expresadas por el espesor de la doble capa, $1/K$ de la Ecuación 14.^[8]

$$\frac{1}{K} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 D k T}{2 \eta_0 e^2 v^2}} \quad (14)$$

Esta relación muestra que el espesor varía inversamente con la valencia y la raíz cuadrada de la concentración y directamente con la raíz cuadrada de la constante dieléctrica y la temperatura, permaneciendo constante otros factores.

En general, cuanto más gruesa es la capa difusa, menor es la tendencia de las partículas en suspensión a flocular y mayor es la presión de expansión en las muestras con minerales de arcilla del tipo 2:1 expandibles.

2.5.3.1 Efecto de la concentración de electrolitos

El espesor efectivo de la capa difusa, $1/K$, varía inversamente con la raíz cuadrada de la concentración de la solución de poro (Ecuación 14). Además, un aumento en la concentración de electrolito reduce el potencial de superficie para la condición de carga superficial constante y la disminución del potencial con la distancia es mucho más rápida. La capa difusa se vuelve más delgada. La concentración del plano medio y el potencial eléctrico para la interplaca de las partículas de arcilla a un espaciado dado disminuyen a medida que aumenta la concentración, por lo tanto, las fuerzas de repulsión interpartícula disminuyen. [8]

Una explicación para la expansión de las arcillas se basa en las interacciones de la capa difusa. Por consiguiente, el comportamiento de expansión dependerá de la concentración de electrolito en el agua intersticial.

2.5.4.2 Efecto de la valencia de cationes

Para soluciones de la misma concentración y carga superficial constante, un cambio en la valencia del catión disminuye tanto el potencial superficial como el espesor de la doble capa eléctrica. El efecto de la valencia en el grosor de la capa difusa es grande, como se puede ver en $1/K \propto 1/v$. Un aumento en la valencia suprime la concentración del plano medio (plano medio entre dos partículas de arcillas) (Figura 15) y el potencial entre las placas que interactúan, lo que conduce a una disminución en la repulsión interplanar.

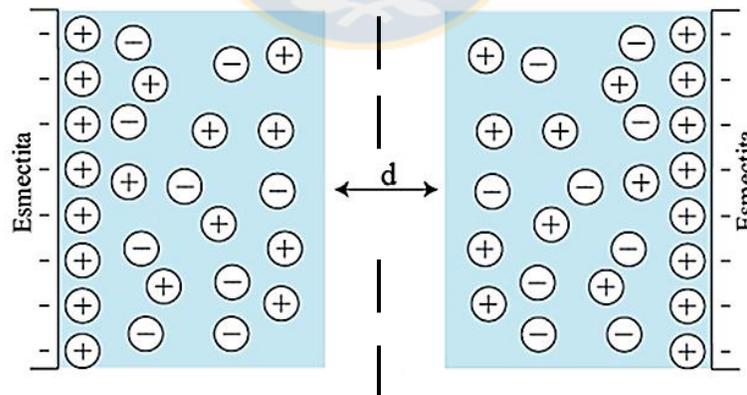


Figura 15: El plano medio está representado por la línea segmentada entre dos partículas de esmectitas. [8]

La adsorción preferencial de cationes multivalentes, que es un hecho experimental bien establecido, significa que incluso cantidades relativamente pequeñas de cationes bi o trivalentes añadidos a los sistemas electrolíticos monovalentes de agua-arcilla tienen una influencia significativa en las interacciones de capa difusa y propiedades físicas relacionadas.

3 Desarrollo experimental

3.1 Materiales y equipos

3.1.1 Muestra sintética

En esta investigación se realizaron ensayos con 4 de tipos de mezclas minerales de contenidos variables de cuarzo y minerales de arcillas. Los minerales de arcillas utilizadas para desarrollar este trabajo fueron estándares minerales proporcionados por The Clay Minerals Society.

Los estándares minerales empleados son:

- Caolinita bien cristalizada (KGA-1b)
- Montmorillonita-Ca (SAZ-1)
- Montmorillonita-Na (SWY-1)

Las composiciones de las mezclas sintéticas utilizadas en este estudio representan escenarios extremos para demostrar la interacción del mineral arcilloso con las distintas soluciones como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Mezclas de muestras sintéticas utilizadas (% en peso).

Material	Muestra	Proporciones (%)	
		Cuarzo (%)	Arcilla (%)
Blanco	M1	100	0
Caolinita bien cristalizada (KGA)	M2	99	1
	M3	97	3
	M4-M15-M18-M21	95	5
	M5	90	10
Montmorillonita-Ca (SAZ)	M6	99	1
	M7	97	3
	M8-M16-M19-M22	95	5
	M9	90	10
Montmorillonita-Na (SWY)	M10	99.5	0.5
	M11	99	1
	M12	98	2
	M13	97	3
	M14-M17-M20-M23	95	5

3.1.2 Muestra mineral

Para la realización de las pruebas de lixiviación se utilizó una muestra de 20 kg, correspondiente a minerales oxidados del yacimiento Centinela de Antofagasta Minerals S.A. Para el desarrollo del estudio se utilizaron dos muestras de 5 kg cada una para observar diferencias en los distintos ensayos a realizar en agua destilada y agua de mar.

3.2 Ensayos realizados

Los 4 tipos de mezclas sintéticas descritas en la sección anterior fueron sometidas a un programa de pruebas que incluye la determinación de los límites de Atterberg y ensayos de permeabilidad con agua destilada y soluciones de CaCl_2 (2M), NaCl (2M) y agua de mar. La Tabla 5 presenta los ensayos realizados en todas las muestras sintéticas como también las de mineral utilizado en las pruebas de lixiviación.

Tabla 5: Ensayos realizados.

Ensayo	Detalle
Análisis granulométrico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Análisis granulométrico mediante tamices para partículas con diámetro mayores a 0.074 mm. 2. Análisis granulométrico mediante la técnica de difracción láser para partículas con diámetros menores a 0.074 mm.
Ensayo de permeabilidad	<ol style="list-style-type: none"> 1. Determinación de la constante de conductividad hidráulica mediante permeámetro de carga variable con agua destilada, soluciones catiónicas y agua de mar.
Límites de Atterberg	<ol style="list-style-type: none"> 1. Determinación del Límite Líquido con agua destilada, soluciones catiónicas y agua de mar. 2. Determinación del Límite Plástico con agua destilada, soluciones catiónicas y agua de mar.
Análisis mineralógicos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Análisis mediante difracción de rayos X a muestra de mineral en la roca total y la fracción inferior a 2 μm
Análisis químicos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Determinación de la composición química de la muestra mineral mediante fluorescencia de rayos X.
Ensayos metalúrgicos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pruebas de lixiviación. 2. Consumo de ácido. 3. Recuperación de cobre. 4. Cinéticas de lixiviación.

3.3 Equipos utilizados

3.3.1 Curva granulométrica

3.3.1.1 Análisis granulométrico para partículas con diámetros mayores a 0.074 mm

Toda la muestra de cuarzo adquirida fue triturada en una chancadora de mandíbula a 99% -1" para lograr que la totalidad de las mezclas presenten una granulometría -10# ASTM. Posteriormente el material fue separado por los tamices 10#, 18#, 35#, 60#, 100# y 200# ASTM (Tabla 6). Se determinó la masa del material retenido en cada tamiz utilizando una balanza técnica LIBROR EB-330S con una sensibilidad de ± 0.01 g. Con esta información fue calculado el porcentaje de material retenido en cada uno de los tamices para posteriormente de manera gráfica observar los resultados de las curvas granulométricas en el Capítulo 4.

Tabla 6: Tamices utilizados según norma ASTM 11/95.

Tamiz	Abertura (mm)
10#	2
18#	1
35#	0.5
60#	0.25
100#	0.15
200#	0.074

Se generó un total de 23 kg de material inferior 10#, con el que se realizaron las pruebas mecánicas para determinar los Límites de Atterberg y las pruebas hidráulicas para medir el coeficiente de permeabilidad.

3.3.1.2 Análisis granulométrico para partículas con diámetros menores a 0.074 mm

Para un análisis granulométrico más acabado de la fracción -10# ASTM, se utilizó el equipo de análisis granulométrico láser Fritsch Analysette 22 MicroTec Plus con unidad de dispersión húmeda, en una cantidad cercana a 1 g. Este equipo cuenta con un baño ultrasónico interno para asegurar la dispersión de las partículas.

La prueba se basa en la formación de figuras de difracción de un haz de luz monocromático según la teoría de difracción de Fraunhofer ^[30], las cuales son generadas por la dispersión del láser a medida que pasa por las diferentes partículas de la muestra (Figura 16). Esta teoría indica que las partículas pequeñas dispersaran el haz de luz en ángulos mayores, formando figuras de interferencia

con anillos más cercanos, mientras que para partículas de mayor tamaño los anillos poseen una mayor separación. El equipo posee un rango de medición que va desde 0.08 a 2000 μm .

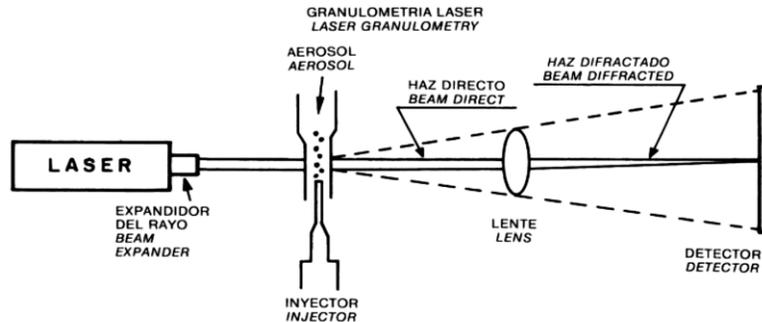


Figura 16: Esquema general de funcionamiento de un equipo de medición de partículas por difracción láser.^[23]

3.3.2 Análisis de rayos X

Las muestras fueron caracterizadas mediante técnicas de difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX) a partir de 50 g de muestra. El material fue previamente pulverizado en un molino planetario de carburo de tungsteno marca Fritsch modelo Pulverisette 6, durante cinco minutos a 450 rpm, para asegurar que al menos el 95% de la muestra posea un tamaño menor a 200# ASTM (75 μm).

El análisis de DRX en la roca total se realizó en el equipo marca Bruker modelo D4 Endeavor utilizando radiación K_{α} de Cu y filtro de radiación K_{β} de Ni. Este se configuró para leer los ángulos 2θ entre 3 y 70° con mediciones durante 1 s y 0.02° entre estaciones. Las interpretaciones de los difractogramas fueron realizadas utilizando el *software* Evaluation de Bruker.

Para el análisis mineralógico mediante DRX de la fracción arcilla, se separó una muestra de 100 g la cual fue sobresaturada en agua durante 24 horas y posteriormente sometida a ultrasonido para lograr una suspensión coloidal. Posteriormente, la muestra fue llevada a centrifugación durante 1 minuto y 35 s a 3000 rpm, para sedimentar las partículas superiores a 2 μm . Los sólidos de la suspensión resultante fueron recuperados mediante un filtro de celulosa y montados en una lámina de vidrio para su análisis.

En esta fracción se efectuaron cuatro mediciones: Orientada, saturada en etilenglicol, a 375 y a 550 °C, las que se realizaron en los ángulos 2θ entre 2° y 45° por 0.2 s en cada estación con una separación de 0.02°.

3.3.3 Límite plástico (LP)

Para determinar el LP se preparó 50 g de muestra sintética y mineral húmeda, la cual se amasa manualmente hasta la aparición de ligeras fisuras.

Posteriormente se separa en tres porciones, las cuales se rolean sobre una superficie de vidrio esmerilado hasta obtener cilindros de aproximadamente 3 mm (Figura 17). El proceso se repite hasta que el cilindro comienza a desmoronarse. En este punto, se determina el porcentaje de humedad tomando una muestra del material y registrando su masa, para luego ser secada por 24 horas en una estufa a 110°C y posteriormente dejada en un desecador durante 1 hora para evitar que la muestra se vuelva a humedecer durante el enfriamiento. La prueba se realiza tres veces ensayando cada porción por separado. El promedio de estas humedades corresponde al LP de la muestra.



Figura 17: Bastones con facturas junto a estándar de 3 mm.

3.3.4 Límite líquido (LL)

La determinación del LL se puede realizar a partir del procedimiento estandarizado desarrollado por Casagrande ^[21]. El método consiste en colocar una cantidad específica de material previamente humedecido y amasado sobre el cucharón de Casagrande (Figura 18). Posteriormente se aplana la superficie del material por medio de un ranurador, haciendo una hendidura que llegue al fondo del cucharón de bronce. Una vez ranurada la muestra, el cucharón se somete a una serie de golpes sucesivos por medio de una manivela que levanta y deja caer el cucharón. Se detiene los golpes cuando la ranura se cierra, con ellos se determina el número de golpes necesarios para hacer cerrar la ranura. La humedad se calcula extrayendo el material de la cuchara, registrando su peso y secándolo al horno como se describe en el ensayo anterior.



Figura 18: Cuchara Casagrande.

Con los datos obtenidos de reiterativos ensayos, en los cuales se varía la humedad con que se realiza el experimento sobre una misma muestra, es posible obtener una serie de puntos en un gráfico semi-logarítmico que relaciona el número de golpes y la humedad de la muestra. De la línea recta de mejor ajuste a estos puntos se obtiene el LL, como la humedad a la cual corresponden los 25 golpes necesarios para que la ranura en la muestra desaparezca.

3.3.5 Coeficiente de permeabilidad (k)

Los coeficientes de permeabilidad fueron determinados a través del ensayo de carga variable utilizando un permeámetro Humboldt HM-5891^a (Figura 19). Este ensayo es recomendado para suelos de granulometría fina, como arenas finas, limos y mezclas de éstos, para los cuales las permeabilidades esperadas están en el rango entre 10^{-7} y 10^{-4} m/s ^[20]. En este estudio se utilizó la fracción -10# ASTM de las muestras y una masa aproximada de 700 g montada a densidad libre (sin compactación previa). Antes de comenzar la medición la muestra se debe lograr una saturación del 100%, para evitar la presencia de burbujas de aire, lo que puede generar errores en los resultados.



Figura 19: Permeámetro Humboldt HM-5891A.

El procedimiento consiste en registrar la variación de la altura de la columna de agua del manómetro (h) en el tiempo.

3.4 Procedimiento experimental de lixiviación en columna

A continuación, se puede apreciar en la Tabla 7 el resumen de las variables y actividades realizadas en las 2 columnas.

Tabla 7: Resumen de procedimiento y variables de lixiviación.

Ítem	Unidad	Agua de mar	Agua destilada
Mineral por columna	kg	5	5
Altura del mineral	cm	13.5	13.5
Diámetro de columna	cm	20	20
Granulometría		100% - 1"	100% - 1"
Curado ácido	kg H ⁺ /ton	25	25
Reposo del mineral	Días	2	2
Tiempo de lixiviación	Horas	54	54
Tasa de riego	l/h*m ²	5-10-15-20	5-10-15-20
Razón de lixiviación	m ³ /ton	1.6	1.6
Concentración de ácido	g/l	10	10
Volumen para lavado	l	1 l agua destilada	1 l agua destilada
Numero de lavados		3	3
Elución de rípios	l	1 l de KCl [2M]	1 l de KCl [2M]
Número de eluciones		1	1

3.4.1 Homogenización de la muestra mineral

Las muestras no debieron ser chancadas debido a que el mineral ya provenía con la granulometría del proceso de la Minera Centinela. Sin embargo, se realizó un proceso de homogenización y posteriormente fueron cuarteadas con un cortador de rifles estándar.

Las muestras preparadas se dividieron en una muestra para análisis de difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X y análisis granulométrico mediante la técnica de difracción láser (200 g) y 2 muestras de 5 kg para las pruebas de lixiviación.

3.4.2 Aglomeración

La aglomeración se realizó mediante la adición de ácido sulfúrico al 95%, con una tasa de curado de 25 kg ácido/ton de mineral. El ácido concentrado fue aplicado como spray sobre la superficie del mineral extendido sobre una carpeta, con el fin de establecer el máximo contacto con el ácido.

3.4.3 Lixiviación en columnas de laboratorio

La carga se realizó en forma homogénea en el volumen interior de la columna, con el fin de minimizar la formación de capas freáticas producto de la ubicación preferencial de finos en algunos sectores de la columna.

La lixiviación se realizó con una solución de 10 g/l de concentración de ácido sulfúrico en ambas columnas con agua destilada y agua de mar. Una vez depositado el mineral en las columnas estas fueron regadas por 51 horas a un flujo de 5 L/hr*m².

Una vez terminado el ciclo, la tasa de riego se modificó para poder apreciar aumento en los niveles freáticos. Esto quiere decir que a la hora 52 la tasa de riego fue de 10 L/hr*m², hasta llegar a los 20 L/hr*m².

3.4.4 Lavado del mineral

Terminada la etapa de lixiviación, el mineral fue lavado con agua destilada con el fin de poder cuantificar el atrapamiento mecánico producido por la lixiviación. Esto implicó que se realizaran 3 lavados con un 1 L de agua destilada cada uno.

3.4.5 Elución del mineral

Posterior al lavado, el mineral de ambas columnas se sometió a una elución con una solución salina con KCl (2M) para la liberación de los iones metálicos intercambiados por las arcillas durante la lixiviación.



4 Resultados

4.1 Pruebas hidráulicas y mecánicas con material sintético

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de todos los ensayos realizados con las muestras sintéticas. Inicialmente se llevó a cabo un análisis granulométrico por difracción laser en dispersión húmeda al cuarzo de fracción -10# ASTM con la finalidad que las 23 muestras tuviesen una misma granulometría y esta variable no incida sobre el resultado de las pruebas hidráulicas y mecánicas.

Como se mencionó en la sección 3.1.1, se evaluó el comportamiento hidráulico y mecánico con una adición de 1, 3, 5 y 10% de arcilla para el caso de la caolinita y montmorillonita-Ca.

Para el caso de la montmorillonita-Na se debía evaluar el comportamiento hidráulico y mecánico con la misma cantidad de arcilla con el fin de poder realizar una buena comparación de sus resultados, pero antes de comenzar la medición de permeabilidad, la muestra 24 con un 10% de arcilla no logró una saturación del 100%, debido a que la montmorillonita-Na tiene una gran capacidad de expansión, creando una capa impermeable como se puede apreciar en la Figura 20. Es por ello que se decidió eliminar esa mezcla y trabajar hasta un máximo de 5% de adición como se observa en la Tabla 4.

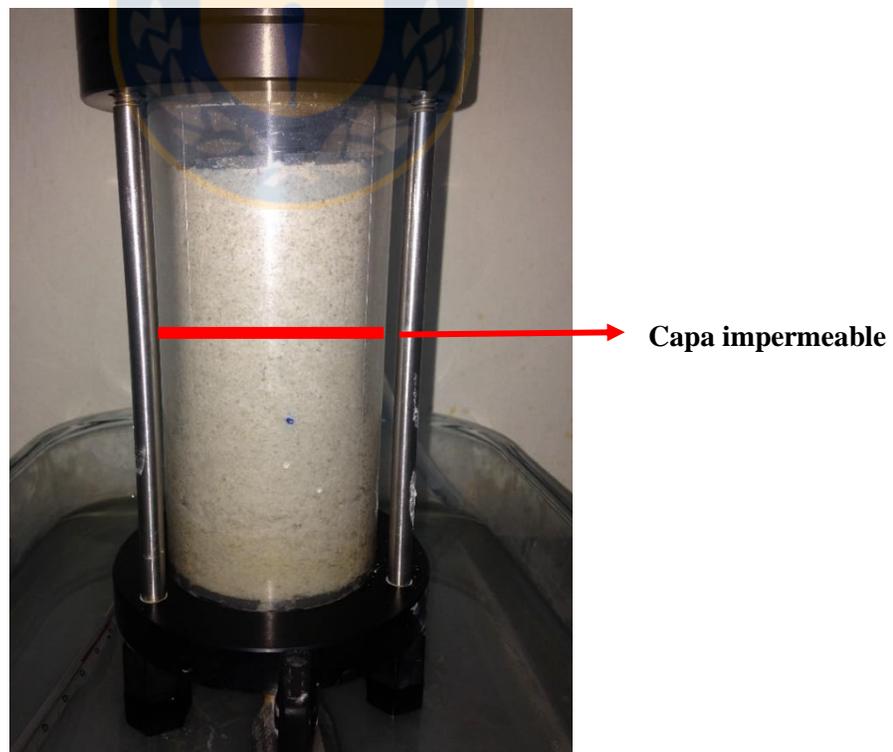


Figura 20: Muestra no saturada por capa impermeable de montmorillonita-Na.

4.1.1 Análisis granulométricos

Como primer análisis mecánico se construyó una representación gráfica de la distribución granulométrica promedio de las 23 muestras de cuarzo (Figura 21) por medio de difracción laser en dispersión húmeda, cuyo detalle por muestra se encuentra en el anexo A.

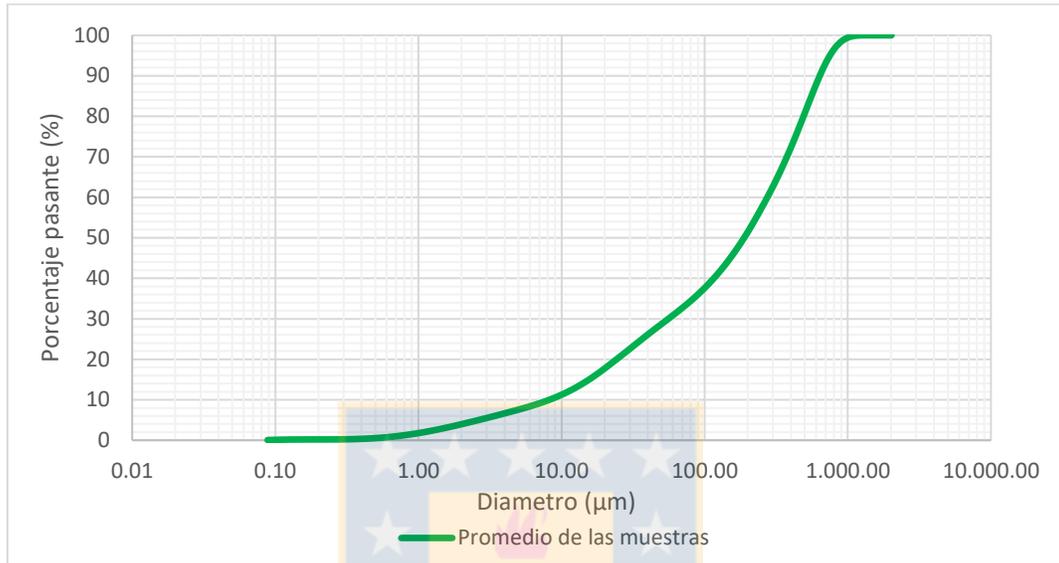


Figura 11: Curva granulométrica promedio de las 23 muestras de cuarzo.

En las Tablas 8, 9 y 10 se encuentran los valores granulométricos más importantes del material obtenido de esta prueba. En el anexo B se encuentran todas las variables de la medición para cada ensayo, además de las curvas de distribución granulométrica para cada una de las muestras analizadas.

Tabla 8: Resumen de parámetros obtenidos del estudio de granulometría láser para las muestras con contenido variable de caolinita.

Cantidad de arcilla (%)	<10# (%)	<100# (%)	<200# (%)	<2 μm (%)	P ₈₀ (μm)
0	100	45.2	33.7	3.9	502.1
1	100	56.7	44.8	7.0	309.1
3	100	55.2	44.7	10.4	349.4
5	100	59.0	49.3	11.8	316.2
10	100	68.9	60.5	17.8	234.3

Tabla 9: Resumen de parámetros obtenidos del estudio de granulometría láser para las muestras con contenido variable de montmorillonita-Ca.

Cantidad de arcilla (%)	<10# (%)	<100# (%)	<200# (%)	<2 μm (%)	P ₈₀ (μm)
0	100	45.2	33.7	3.9	502.1
1	100	72.5	57.3	7.1	183.8
3	100	57.4	47.2	8.6	326.9
5	100	63.6	54.4	9.4	284.0
10	100	85.8	75.4	7.9	103.6

Tabla 10: Resumen de parámetros obtenidos del estudio de granulometría láser para las muestras con contenido variable de montmorillonita-Na.

Cantidad de arcilla (%)	<10# (%)	<100# (%)	<200# (%)	<2 μm (%)	P ₈₀ (μm)
0	100	45.2	33.7	3.9	502.1
0.5	100	45.4	34.2	4.1	455.5
1	100	56.1	44.2	11.7	327.1
2	100	42.1	33.4	4.8	588.0
3	100	44.7	35.7	8.3	603.1
5	100	59.7	49.3	8.9	306.0

4.1.2 Límites de Atterberg

Este estudio se enfoca en la determinación del LL y LP, debido al rol que posee en sistemas permeables. Todas las pruebas para determinar los límites de consistencia se realizaron con agua destilada, agua de mar, NaCl y CaCl₂ para observar posibles cambios en las propiedades mecánicas con la interacción con distintas cargas iónicas.

4.1.2.1 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad (IP) es el rango de humedad entre LL y LP. Este refleja la sensibilidad del comportamiento mecánico del material ante cambios en la humedad.

Los ensayos fueron realizados siguiendo el procedimiento de las normas ASTM (N° D4318-95a) ^[24], donde luego de tamizado y secado el material se humedecieron las mezclas sintéticas, añadiendo paulatinamente las distintas soluciones catiónicas hasta encontrar los diferentes límites.

En las Tablas 11, 12 y 13 se observan los valores de IP para las distintas soluciones empleadas y también la clasificación para diferenciar si la muestra es de baja, media o alta plasticidad según la clasificación propuesta por Villalobos (2015).

Tabla 11: LL, LP, IP y clasificación por plasticidad según Villalobos (2015) para las mezclas con caolinita (KGA).

Solución	Cantidad de arcilla (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Plasticidad
Agua Destilada	1	13.80	13.60	0.20	Baja
	3	14.90	14.09	0.81	Baja
	5	16.70	15.01	1.69	Baja
Agua de Mar	1	13.50	13.30	0.20	Baja
	3	14.80	14.10	0.70	Baja
	5	16.70	15.00	1.70	Baja
NaCl	1	13.80	13.52	0.28	Baja
	3	14.90	14.18	0.72	Baja
	5	16.80	14.90	1.90	Baja
CaCl ₂	1	13.70	13.46	0.24	Baja
	3	14.80	14.12	0.68	Baja
	5	16.80	15.05	1.75	Baja

Tabla 12: LL, LP, IP y clasificación por plasticidad según Villalobos (2015) para las mezclas con montmorillonita-Ca (SAZ).

Solución	Cantidad de arcilla(%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Plasticidad
Agua Destilada	1	17.40	13.60	3.80	Baja
	3	20.30	15.20	5.10	Baja
	5	24.50	17.40	7.10	Media
Agua de Mar	1	16.70	13.30	3.40	Baja
	3	18.60	14.50	4.10	Baja
	5	22.10	16.20	5.90	Baja
NaCl	1	16.60	13.50	3.10	Baja
	3	17.60	13.90	3.70	Baja
	5	21.40	16.00	5.40	Baja
CaCl ₂	1	16.50	13.46	3.04	Baja
	3	17.30	14.10	3.20	Baja
	5	20.80	15.80	5.00	Baja

Tabla 13: LL, LP, IP y clasificación por plasticidad según Villalobos (2015) para las mezclas con montmorillonita-Na (SWY).

Solución	Cantidad de arcilla (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Plasticidad
Agua Destilada	1	17.80	17.09	0.71	Baja
	3	29.10	19.43	9.67	Media
	5	39.30	22.28	17.02	Alta
Agua de Mar	1	17.20	16.40	0.80	Baja
	3	25.30	18.61	6.69	Media
	5	30.40	21.49	8.91	Alta
NaCl	1	17.00	16.12	0.88	Baja
	3	21.30	16.21	5.09	Baja
	5	26.40	20.80	5.60	Media
CaCl ₂	1	16.50	15.91	0.59	Baja
	3	19.40	16.07	3.33	Baja
	5	23.40	19.50	3.90	Baja

4.1.2.2 Actividad

Las muestras sintéticas estudiadas muestran valores de actividad con distintos porcentajes de partículas inferiores 2 μm permitiendo clasificarlos como arcillas inactivas, normales y activas según los criterios de clasificación de Skempton (1953) ^[25]. El índice de plasticidad es tomado de la sección 4.1.2.1.

En la Tabla 14 se resume los porcentajes bajo los 2 μm , actividad y clasificación para cada experiencia realizada para las mezclas con caolinita.

Tabla 14: Actividades y clasificación según (Skempton, 1953) de la Caolinita (KGA).

Solución	Cantidad de arcilla (%)	%<2 μm	Actividad	Clasificación
Agua Destilada	1	7.00	0.28	Arcilla Inactiva
	3	10.40		
	5	11.80		
Agua de Mar	1	7.00	0.27	Arcilla Inactiva
	3	10.40		
	5	11.90		
NaCl	1	7.00	0.28	Arcilla Inactiva
	3	10.40		
	5	12.10		
CaCl ₂	1	7.00	0.29	Arcilla Inactiva
	3	10.40		
	5	11.50		

El material trabajado corresponde a una muestra de baja plasticidad según la clasificación de USCS y Villalobos (2015) [8]. Este presenta plasticidades bajas y tiene como máximo un IP de 1.75% (Tabla 13, muestra con 5% de arcilla en la solución de CaCl_2) mostrando así una baja actividad. Si bien, la cantidad de partículas bajo los $2\ \mu\text{m}$ va en aumento, esta es una arcilla carente de plasticidad. Su componente mayoritario es una caolinita muy ordenada y bien cristalizada presentando una baja área superficial, con pequeño tamaño de partícula, es por ello su aumento bajo los $2\ \mu\text{m}$. Además, como se vio en la Tabla 13, el efecto del aumento de humedad sobre las propiedades de la muestra sintética, no es importante debido a que tiene una escasa probabilidad de expansión dado que la unión entre capas mediante las fuerzas de Van de Waals y enlaces de hidrógeno son lo suficientemente fuerte como para que no haya una expansión de la capa intermedia en presencia de agua.

Otro factor que incide en que la caolinita presente una baja plasticidad y por consiguiente se clasifique como una arcilla inactiva, es que su capacidad de intercambio catiónico se encuentra en el rango de 3 a 15 (meq/100 g) [8]. Por lo tanto, las partículas de caolinita tendrán una baja interacción con los cationes de las soluciones utilizadas.

En la Figura 22, se grafica el IP versus el contenido de arcilla produciendo una línea recta que pasa por el origen para las cuatro soluciones. La pendiente (números entre paréntesis) de la línea para cada electrolito da como resultado su actividad. En él, se puede apreciar claramente que la actividad de la caolinita varía de 0.27 a 0.29 para los 4 tipos de soluciones utilizadas en este trabajo.

Esto nos indica que independiente del electrolito empleado el valor de la actividad no tendrá variación alguna quedando dentro de la clasificación de arcilla inactiva, ya que la doble capa eléctrica no se verá modificada.

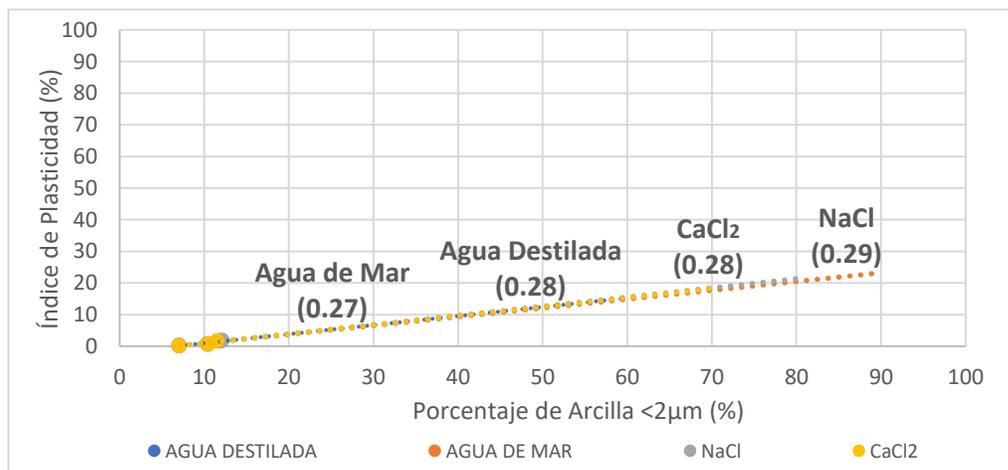


Figura 22: Relación entre el índice de plasticidad y la fracción arcilla para las mezclas con caolinita (KGA).

En la Tabla 15 se resume los porcentajes bajo los 2 μm , actividad y clasificación para cada experiencia realizada para las mezclas con montmorillonita-Ca.

Tabla 15: Actividades y clasificación según (Skempton, 1953) para las mezclas con montmorillonita-Ca (SAZ).

Solución	Cantidad de arcilla (%)	%<2 μm	Actividad	Clasificación
Agua Destilada	1	7.10	1.32	Arcilla Activa
	3	8.60		
	5	9.40		
Agua de Mar	1	7.10	1.05	Arcilla Normal
	3	8.60		
	5	9.20		
NaCl	1	7.10	0.83	Arcilla Normal
	3	8.60		
	5	9.80		
CaCl ₂	1	7.10	0.72	Arcilla Inactiva
	3	8.60		
	5	9.70		

Debido a las múltiples sustituciones de la capa tetraédrica de Si^{4+} por Al^{3+} y/o sustituciones en la capa octaédrica de Al^{3+} por Mg^{2+} dan lugar a que la estructura de esta arcilla se cargue negativamente, generando de esta manera una alta capacidad de intercambio catiónico, que es balanceada incorporando cationes o agua.

Además, esta arcilla presenta un valor elevado del área superficial y a la vez, muestra una gran cantidad de superficie activa en comparación con la caolinita viéndose acentuada la capacidad intercambio catiónico (CIC).

Como se observa en la Tabla 15, la utilización de agua destilada genera una expansión de la doble capa eléctrica, favoreciendo los fenómenos de repulsión electrostática, lo que traduce en una máxima expansión de esta arcilla, presentando una plasticidad media con un valor de IP de 7.10% (Tabla 12, muestra con 5% de arcilla en la solución de agua destilada).

Por el contrario, al usar las soluciones catiónicas produce una disminución de la doble capa eléctrica favoreciendo la contracción de esta arcilla, provocando una baja en la plasticidad para el caso de la solución con CaCl_2 .

Al realizar la gráfica de IP versus el contenido de arcilla se puede observar (Figura 23), que los valores presentan un rango variable de actividad con un máximo de 1.32 con agua destilada a

un mínimo de 0.72 con CaCl_2 demostrando que la utilización de una solución con un catión divalente, contraerá aún más la doble capa eléctrica en comparación con el catión monovalente.

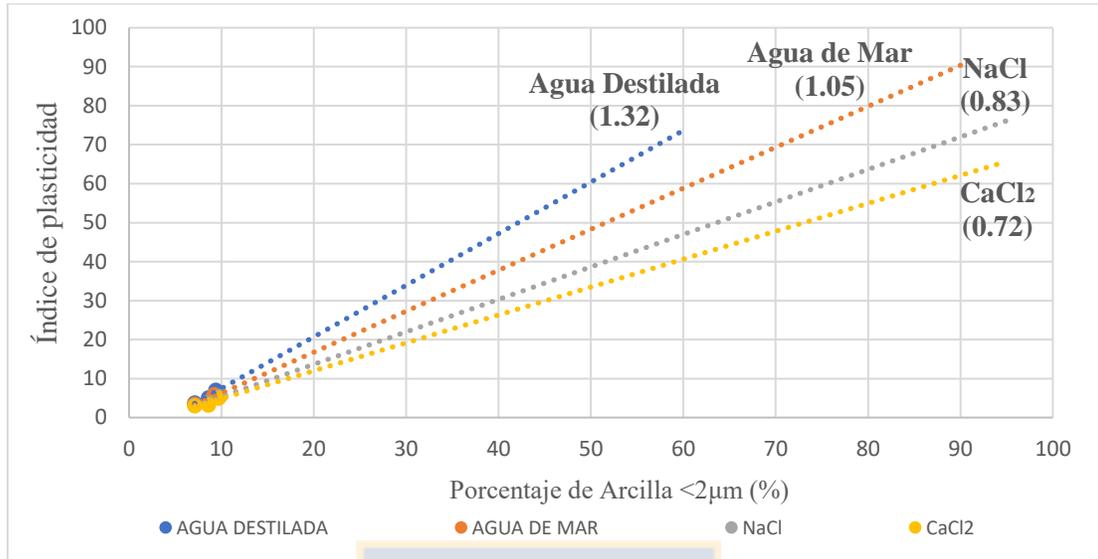


Figura 23: Relación entre el índice de plasticidad y la fracción arcilla de la Montmorillonita-Ca (SAZ).

En la Tabla 16 se resume los porcentajes bajo los $2\ \mu\text{m}$, actividad y clasificación para cada experiencia para la montmorillonita-Na.

Tabla 16: Actividades y clasificación según (Skempton, 1953) para las mezclas con montmorillonita-Na (SWY).

Solución	Cantidad de arcilla (%)	%<math><2\mu\text{m}</math>	Actividad	Clasificación
Agua Destilada	1	6.50	6.37	Arcilla Activa
	3	8.30		
	5	8.90		
Agua de Mar	1	6.50	3.04	Arcilla Activa
	3	8.30		
	5	9.20		
NaCl	1	6.50	2.05	Arcilla Activa
	3	8.30		
	5	8.90		
CaCl_2	1	6.50	1.23	Arcilla Normal
	3	8.30		
	5	9.00		

La montmorillonita-Na posee un área superficial mucho más elevada que la misma montmorillonita-Ca, lo que se debe a su morfología laminar y el pequeño tamaño de los cristales. Por lo general, presenta una superficie específica de 25 a $50\ \text{m}^2/\text{g}$, mientras que en suspensión

acuosa este valor se eleva a $300 \text{ m}^2/\text{g}$, siendo mucho mayor que la montmorillonita-Ca (ver sección 2.2.2.3).^[9]

Por lo tanto, la montmorillonita-Na al tener una elevada área superficial implicará que su capacidad de intercambio catiónico aumente y por ende se encontrará más desbalanceada que la estructura de la montmorillonita-Ca, por consiguiente, necesitará incorporar cationes para lograr balancearse.

Los resultados reportados para el agua destilada indican una alta plasticidad, llegando hasta un 17.02% de IP (Tabla 13, muestra con 5% de arcilla en agua destilada), debido a la expansión de la doble capa eléctrica provocando la máxima expansión de esta arcilla.

En cambio, cuando la muestra sintética con montmorillonita-Na es contactada con algún electrolito, desarrolla un perfil de concentración de iones alrededor de esta arcilla produciendo un adelgazamiento de la doble capa eléctrica, minimizando de esta manera su expansión.

De la Tabla 13, se aprecia un cambio significativo a la hora de utilizar las distintas soluciones catiónicas, disminuyendo su plasticidad, dado por la contracción de la doble capa eléctrica, la que actúa inhibiendo su expansión viéndose reflejado en la humedad retenida final. Además, queda en evidencia que la utilización de cationes bivalente tiene un impacto mucho más significativo en su comportamiento que el aumento de concentración de un mismo catión monovalente como en el agua.

Al analizar la actividad de la montmorillonita-Na según la solución a utilizar, se observa que los resultados obtenidos varían desde un rango de arcilla activa para el agua destilada, a una arcilla normal para la solución con CaCl_2 (Figura 24).

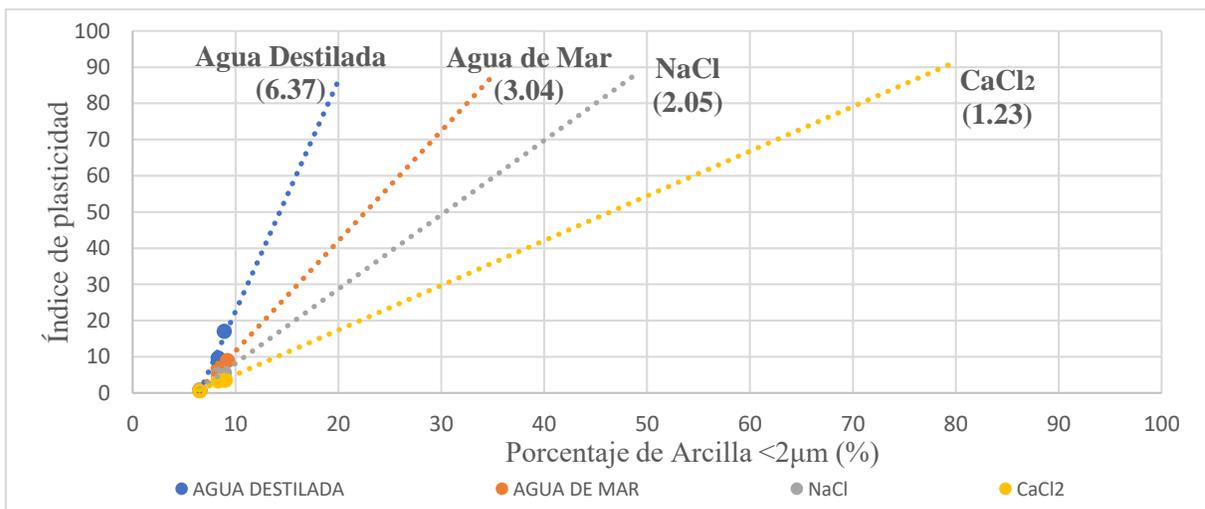


Figura 24: Relación entre el índice de plasticidad y la fracción arcilla de la Montmorillonita-Na (SWY).

4.1.3 Permeabilidad

Los coeficientes de permeabilidad fueron calculados a través de la Ley de Darcy.

Como se mencionó previamente, se prepararon muestras homogéneas con contenido variable de caolinita, montmorillonita-Ca y Na, y se evaluaron utilizando soluciones de agua destilada, agua de mar, NaCl (2M) y CaCl₂ (2M).

Los coeficientes de permeabilidad de los 3 tipos de arcillas en estudio se muestran en las Tablas 17, 18 y 19 en función de la cantidad de arcilla adicionada. En general, las muestras poseen una baja conductividad hidráulica del orden de 10⁻⁶ cm/s para las mezclas con montmorillonita-Na y de 10⁻⁴ cm/s para las mezclas con caolinita y montmorillonita-Ca. También se muestra los valores de humedad retenida al terminar los ensayos (HR) y el cambio de volumen al saturar la muestra (ΔV).

Tabla 17: Coeficiente de permeabilidad, humedad retenida y cambio de volumen para las mezclas con caolinita con distintas soluciones a temperatura de ensayo.

Solución	Cantidad de arcilla (%)	k (cm/s)	H.R (%)	ΔV (%)
Agua Destilada	1	6.15E-4	18.6	-4.51
	3	5.56E-4	18.6	-6.11
	5	5.07E-4	18.8	-7.81
	10	4.59E-4	19.1	-10.82
Agua de Mar	5	5.20E-4	18.9	-7.58
NaCl	5	5.68E-4	18.0	-8.02
CaCl ₂	5	5.24E-4	18.2	-8.49

Tabla 18: Coeficiente de permeabilidad, humedad retenida y cambio de volumen para las mezclas con montmorillonita-Ca con distintas soluciones a temperatura de ensayo.

Solución	Cantidad de arcilla (%)	k (cm/s)	H.R (%)	ΔV (%)
Agua Destilada	1	2.34E-4	19.0	-4.04
	3	1.41E-4	20.5	-2.20
	5	1.29E-4	20.7	-1.12
	10	4.91E-5	22.4	-0.73
Agua de Mar	5	2.54E-4	19.5	-2.57
NaCl	5	2.81E-4	19.2	-3.23
CaCl ₂	5	3.74E-4	18.0	-4.00

Tabla 19: Coeficiente de permeabilidad, humedad retenida y cambio de volumen para las mezclas con montmorillonita-Na con distintas soluciones a temperatura de ensayo.

Solución	Cantidad de arcilla (%)	k (cm/s)	H.R (%)	ΔV (%)
Agua Destilada	0.5	8.80E-5	19.6	-1.84
	1	2.16E-5	20.9	-1.48
	2	9.13E-6	21.9	0
	3	3.23E-6	22.3	+0.75
	5	1.31E-6	25.8	+3.76
Agua de Mar	5	5.56E-5	24.4	+0.36
NaCl	5	7.93E-5	23.7	-1.08
CaCl ₂	5	2.23E-4	21.79	-3.19

Para comprender de mejor manera los datos de las Tablas 17, 18 y 19 es conveniente separar las variables que influyen en la determinación del coeficiente de permeabilidad en dos grupos: variables mecánicas y variables fisicoquímicas.

Las variables mecánicas que influyeron en este estudio para la determinación del coeficiente de permeabilidad fueron la forma y la distribución geométrica de las partículas de arcilla.

Cuanto menor es el tamaño de partícula de la arcilla, menor es el tamaño de los canales de flujo. Aquí el gran rango de tamaños de los canales de flujos es una de las razones de las diferencias en el valor del coeficiente de permeabilidad. Las montmorillonitas-Ca y Na presenta una proporción de tamaño de partícula más pequeño y la caolinita más grande debido a que se encuentra bien cristalizada como se aprecia en el anexo C demostrando de esta manera que la caolinita exhibirá una mejor permeabilidad que las montmorillonitas en todas sus proporciones estudiadas.

Otro factor mecánico como se mencionó es la geometría y forma de las partículas de arcilla, dado que influirá en la geométrica del canal de flujo. Para las arcillas laminares, la aplicación de una solución en la parte inferior, da como resultado una orientación de estas partículas en la dirección del fluido. Esta orientación es mayor para partículas que presentan un área laminar superior a su grosor. Es decir que aumenta de caolinita a montmorillonita explicando de esta manera que el coeficiente de permeabilidad de la caolinita es mayor que el de las montmorillonitas.

En cambio, los factores que más predominaron en este ensayo fueron los fisicoquímicos como se pueden observar en las tablas 17, 18 y 19. Los resultados indican que los coeficientes de permeabilidad son mayores para las distintas soluciones catiónicas en comparación con el agua destilada. Además, el coeficiente de permeabilidad es menor cuando los cationes adsorbidos son monovalentes en lugar de divalente.

Igualmente, el aumento en la concentración del electrolito tiende a aumentar el coeficiente de permeabilidad, pero el efecto de la concentración disminuye a medida que aumenta la valencia de los cationes.

La existencia de una carga negativa debido al desbalance eléctrico que presentan las arcillas del grupo esmectíticas conduce a la adsorción de moléculas de agua o cationes en poros intersticiales, espacios interlaminares o sitios polares en la superficie. Cuando se realiza la experiencia con agua destilada, se produce una expansión de la doble capa eléctrica traduciendo en una máxima expansión de dichas arcillas, creando un bloqueo a los canales de flujo, reduciendo de manera significativa su permeabilidad.

En cambio, la utilización de soluciones catiónicas genera una contracción de la doble capa eléctrica produciendo una tendencia mínima a bloquear los canales de flujo logrando aumentar su permeabilidad.

Por lo tanto, de los resultados obtenidos de la Tabla 19 para la caolinita, se encontró que la permeabilidad no disminuye de manera significativa (orden de magnitud), como sí ocurre con las otras arcillas en estudio. Esto se debe principalmente a que la estructura cristalina de la caolinita no se encuentra desbalanceada eléctricamente, por tanto, posee una baja capacidad de intercambio catiónico. Además, su estructura se encuentra unida entre las capas por fuerzas de Van der Waals, esta unión es sumamente fuerte cuando se acercan mucho entre capas es por ello que la estructura de la caolinita (Figura 4) están tan cerca que prácticamente se encuentra adherida la capa tetraédrica con la capa octaédrica dejando una baja superficie específica dado que no tienen canales intermedios.

En consecuencia, los ensayos realizados con agua destilada presentan un coeficiente de permeabilidad que va desde 6.15×10^{-4} (cm/s) hasta 4.59×10^{-4} (cm/s) con 1% y 10% de caolinita, respectivamente. La disminución del valor viene dada por un aumento gradual en la fracción menor a $2 \mu\text{m}$ (ver Tabla 10).

Al momento de correlacionar el coeficiente de permeabilidad con las soluciones catiónicas, estos no mostraron variación alguna con respecto al agua destilada puesto que la caolinita bien cristalizada presenta una baja capacidad de intercambio catiónico y por ende no modifica su comportamiento. Otro factor que presentó una variación fue la humedad retenida, puesto que la retención de agua por capilaridad debió aumentar, ya que se acrecienta la cantidad de finos.

De la Tabla 17, 18 y 19, se puede ver que se utilizó agua de mar y NaCl con la finalidad de poder ver diferencias cuando las soluciones tienen un mismo catión de intercambio, pero con

distintas concentraciones. Es decir, la solución que tiene una mayor concentración de Na^+ es NaCl con un contenido de 2 mol/l de Na^+ , versus el agua de mar que aporta aproximadamente 0.5 mol/l de Na^+ [26].

Dado que ambas soluciones tienen el mismo elemento en estudio implicará que tendrán la misma carga eléctrica. Sin embargo, como la concentración de Na^+ en la solución de NaCl es mayor, habrá una menor fuerza de difusión al seno de la solución y por tanto la doble capa eléctrica tendrá un espesor menor, tal como se muestra en la Figura 25.

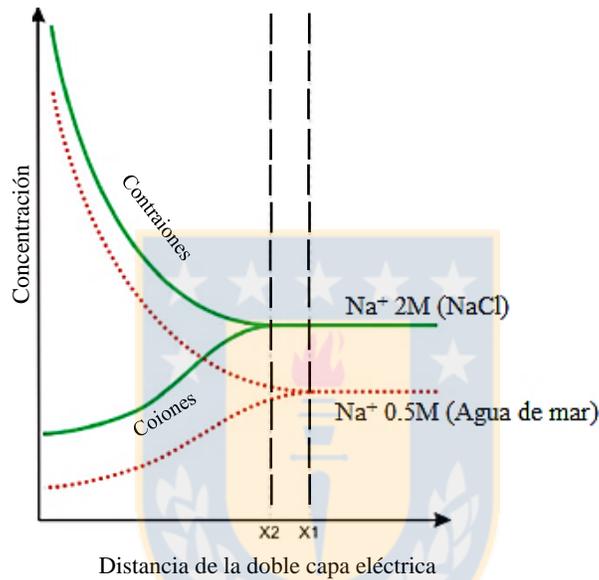


Figura 25: Variación de la doble capa eléctrica a distinta concentración. [8]

Las experiencias realizadas con un 5% de montmorillonita-Ca presentaron un coeficiente de permeabilidad de 1.29×10^{-4} (cm/s) con agua destilada versus un 2.81×10^{-4} (cm/s) con NaCl, esto implica un incremento de 117% en la conductividad hidráulica. Además, se puede ver que hubo una reducción de volumen de 2.5% y una disminución en la humedad retenida de 3.2% con respecto a las medidas con agua destilada (Tabla 20).

En cambio, al evaluar la montmorillonita-Na con agua destilada presentó una permeabilidad de 1.31×10^{-6} (cm/s), considerándose casi impermeable en la mezcla con 5% de arcilla. [14] Los coeficientes de permeabilidad obtenidos confirman la investigación realizada por Barreto (2003) en donde afirma que, si hay un aumento en Na intercambiable en las muestras, esto conlleva una gran reducción de la conductividad hidráulica. Esto explica que la montmorillonita-Na es más impermeable que la montmorillonita-Ca, siendo que ambas pertenecen a la familia de las esmectitas.

Un punto a destacar es la reducción del volumen en las mezclas de montmorillonita-Na, ya que con agua destilada llegó a una diferencia positiva de +3.76% debido al desbalance eléctrico que presenta este mineral de arcilla lo que se tradujo en una máxima expansión de la doble capa eléctrica generando un recubrimiento de agua absorbida, provocando un aumento de la humedad retenida, pero cuando se trabajó con NaCl este índice bajo a un -1.08% a causa de la disminución de la doble capa eléctrica reduciendo su capacidad de expansión.

Para el caso de la caolinita, no se aprecian cambios significativos en el comportamiento hidráulico a medida que aumenta la cantidad de esta arcilla en la mezcla. Esto debido a su estructura eléctricamente neutra, es decir que no necesita adsorber agua o algún catión presente en el sistema para poder estabilizarse, explicando de esta manera su baja interacción con el medio y así ver un posible cambio en algún parámetro.

Por otro lado, se decidió estudiar la influencia de la carga del catión de intercambio, ya que también incide en la disminución de la doble capa eléctrica. Lo que se describe, es un segundo sistema en donde se tiene una misma concentración, pero distinta carga. Es decir, un catión monovalente (Na^+) proveniente de la solución de NaCl 2M y un catión bivalente (Ca^{2+}) de CaCl_2 2M.

Como se mencionó anteriormente, si se tiene un catión con mayor carga implicará un aumento en la fuerza de atracción electroestática entre las láminas cargadas y si las concentraciones son iguales, la difusión será la misma, provocando una disminución de la doble capa eléctrica y una contracción de las láminas de montmorillonita.

De los resultados obtenidos, se establece que al aumentar la carga del catión, el coeficiente de permeabilidad se acrecienta en dos órdenes de magnitud para la montmorillonita-Na y al triple para la montmorillonita-Ca en comparación con el agua destilada.

4.2 Prueba de lixiviación primaria en columnas

Una vez realizados las pruebas mecánicas e hidráulicas con el material sintético, su análisis permitió un mejor entendimiento del comportamiento de las distintas arcillas con soluciones catiónicas.

La finalidad de este escalamiento fue centrarse en aspectos hidrodinámicos que se presentan en las pilas de lixiviación, pero a una escala menor, representadas en experiencias de laboratorio en columnas de lixiviación.

De los resultados obtenidos, las pruebas mecánicas e hidráulicas realizadas con CaCl_2 son bastante promisorios a la hora de realizar la lixiviación, pero el aumento sistemático de los proyectos mineros y la escasez de agua dulce, principalmente en el norte de Chile, es una preocupación en la planificación de la industria minera al mediano y largo plazo. Por ello, cada vez más compañías optan por utilizar o incrementar el uso de agua de mar en sus procesos como una fuente hídrica alternativa, debido a esto se tomó la determinación de utilizar agua de mar como base de solución lixiviante.

4.2.1 Análisis granulométrico

Los resultados de los análisis granulométricos en las dos muestras utilizadas en esta prueba se presentan en las Figuras 26 y 27. Éstos fueron realizados según las metodologías de ensayo descritas en el Capítulo 3. Debe notarse que ambas curvas granulométricas para partículas con diámetro sobre 0.074 mm y bajo 0.074 mm (anexo D y E) son idénticas, esto con la finalidad de que la granulometría no sea un factor a la hora de interpretar los resultados como por ejemplo la permeabilidad.

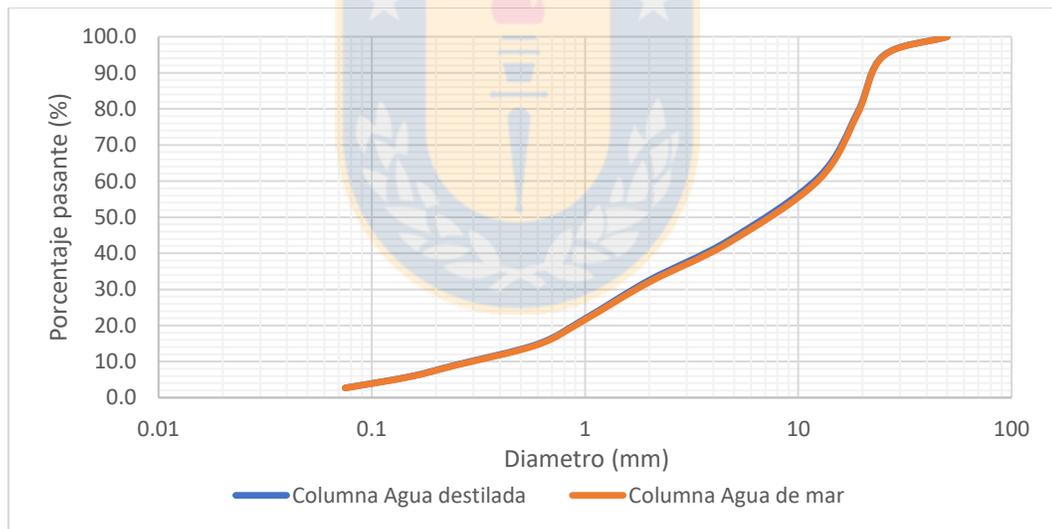


Figura 26: Curvas granulométricas, partículas con diámetro sobre 0.074 mm.

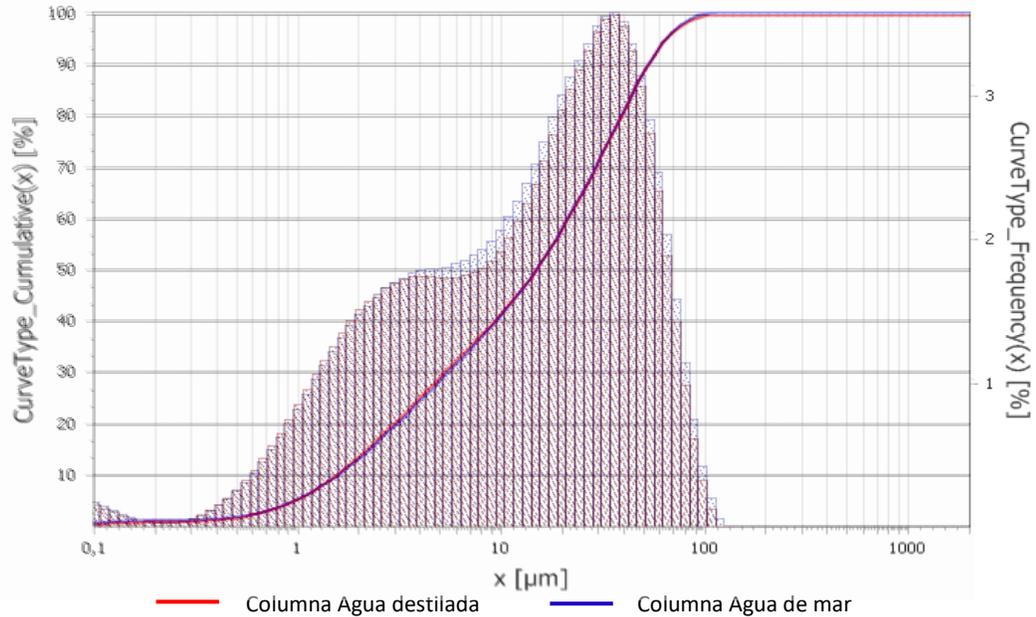


Figura 27: Curvas granulométricas, partículas con diámetro bajo 0.074 mm.

En la Tabla 20 se encuentran los parámetros más importantes del material obtenidos de esta prueba. En el anexo B se encuentran todas las variables de la medición para cada ensayo, además de las curvas de distribución granulométrica para cada una de las muestras analizadas.

Tabla 20: Resumen de parámetros obtenidos del estudio de granulometría laser para las muestras mineral.

Columna	<10# (%)	<100# (%)	<200# (%)	<2 µm (%)	P ₈₀ (mm)
Agua destilada	32.5	5.82	2.71	0.44	19.33
Agua de mar	32.01	5.75	2.68	0.46	19.50

4.2.2 Caracterización mineralógica del mineral de cabeza

4.2.2.1 Fluorescencia de rayos X

La composición química de la muestra de cabeza fue determinada mediante fluorescencia de rayos X como apoyo a las técnicas de identificación mineralógica. Esta técnica entrega la concentración en la forma de óxidos de los elementos presentes en la muestra con un límite de detección de 0.03%, aproximadamente.

Las concentraciones de los elementos con mayor abundancia se encuentran en la Tabla 21.

Tabla 21: Composición química de la muestra de cabeza.

Muestra /%wt	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	CuO	P ₂ O ₅
Cabeza	3.58	1.17	3.61	6.50	15.24	62.97	0.46	0.48	0.17	3.49	1.50	0.17

4.2.2.2 Difracción de rayos X en roca total

El mineral que se procesó en la lixiviación fue sometido a análisis de DRX en roca total con un montaje aleatorio pulverizado. Esta técnica permite una identificación de las fases cristalinas presentes, con una abundancia >0.5%, de manera rápida y a bajo costo.

El difractograma de identificación mineralógica de la muestra de cabeza se encuentra en el anexo F. En la Tabla 22 se resume las especies minerales encontradas en el mineral de cabeza.

La mena oxidada fue reconocida como atacamita, sin embargo, no se descarta la posibilidad de que exista otra especie de mineral oxidado, ya que este se puede encontrar en un porcentaje de abundancia menor al 0.5%.

Tabla 22: Resumen de la mineralogía identificada mediante difracción rayos X en el mineral de cabeza.

Especie mineralógica	Formula química
Cuarzo	SiO ₂
Calcita	CaCO ₃
Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈
Albita	NaAlSi ₃ O ₈
Caolinita	Al ₄ (OH) ₈ (Si ₄ O ₁₀)
Atacamita	Cu ₂ Cl(OH) ₃
Hematita	Fe ₂ O ₃
Moscovita	KMgAlSi ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Yeso	Ca(SO ₄)(H ₂ O) ₂
Clinocloro	Mg _{4.54} Al _{0.97} Fe _{0.46} Mn _{0.03} (Si _{2.85} Al _{1.15} O ₁₀)(OH) ₈

4.2.2.3 Difracción de rayos X en la fracción <2µm

Un punto importante en esta investigación es conocer la naturaleza de los minerales de arcilla, dada sus características intrínsecas que influyen durante el proceso de lixiviación. En este trabajo, esto se basó en reconocer la presencia de los cuatro grupos de filosilicatos: caolines (1:1), esmectitas (2:1 expandibles), ilitas (2:1 no expandibles) y cloritas (2:1:1).

Para la identificación de los filosilicatos mencionados anteriormente es necesario aplicar cuatro lecturas mediante difracción de rayos X a una misma muestra, a la cual se le aplican diferentes procedimientos como se puede ver en la Figura 28.

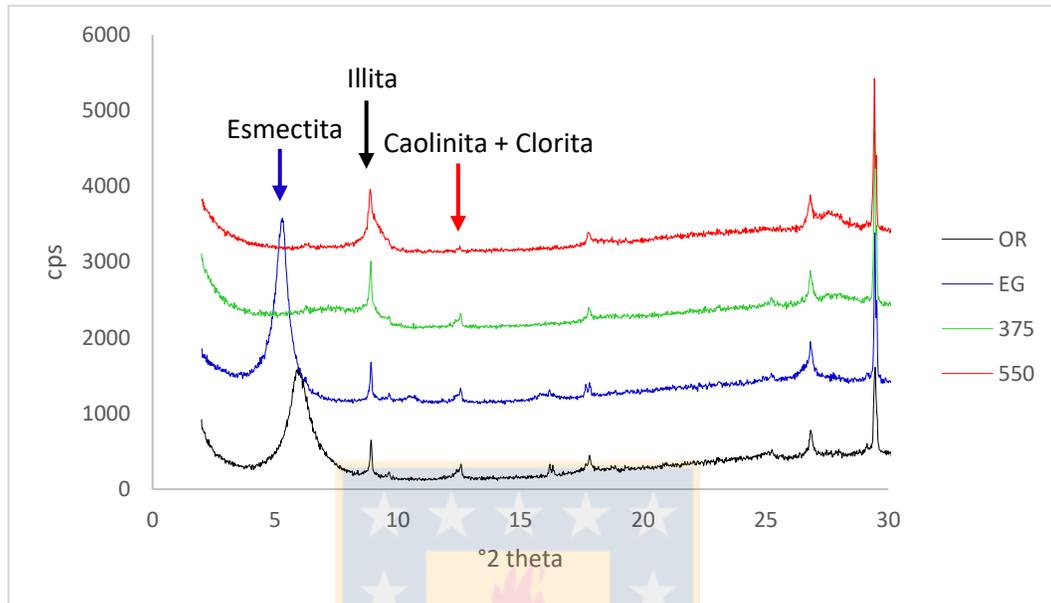


Figura 28: DRX en la fracción inferior a $2\ \mu\text{m}$.

El orientado (OR, difractograma negro) permite lograr una orientación preferencial de los filosilicatos, mediante la aplicación de un esfuerzo de cizalle en la superficie de la muestra de manera de provocar la orientación y facilitar su detección.

El etilenglicol (EG, difractograma azul) tiene como propósito lograr la expansión de la esmectita, durante este procedimiento las esmectitas son detectadas debido a su expansión e incremento del espaciado interlaminar de 14 a 18 Å.

Posteriormente la muestra es calentada a 375°C (difractograma verde), para colapsar en forma irreversible la estructura de las esmectitas y de esta manera, excluir a las cloritas las cuales no sufren ninguna alteración.

Finalmente se realiza nuevamente un calentamiento, pero esta vez a 550°C (difractograma rojo) para que colapsen las caolinitas y permitir la identificación de las cloritas.

En el caso de la illita, esta es reconocida debido a las líneas características que posee; comúnmente en el difractograma orientado.

4.2.2.4 Semi-cuantificación de minerales de arcilla

Para semi-cuantificar los principales grupos de arcillas se utilizó el método de Kahle.^[27] Este procedimiento consiste en realizar una ponderación de las especies presentes en cada muestra, para esto se utilizó como primera aproximación los conteos de las reflexiones de los difractogramas obtenidos mediante el procedimiento de etilenglicol (EG).

La ponderación solamente se refiere a los filosilicatos presentes a una muestra y no considera restos de cuarzo o feldespato.

La Tabla 23 muestra los porcentajes de cada grupo de arcilla normalizado al 100% de estas fases. El estudio determinó que la mineralogía de la muestra destaca el gran porcentaje de esmectita cuyo valor es del 39%, relativo a la semi-cuantificación de los tres grupos de arcillas.

Tabla 23: Resultado semi-cuantitativo mediante difracción de rayos X en la fracción arcilla.

Muestra	Mineralogía semi-cuantitativa en la fracción arcilla, %		
	Esmectita	Illita/mica	Caolinita/Clorita
Cabeza	39	41	20

4.2.2.5 Semi-cuantificación del contenido de arcilla en el total de la muestra

Para relacionar los minerales de arcilla de mejor manera con los parámetros mecánicos e hidráulicos, fue utilizado el supuesto que la semi-cuantificación de la mineralogía en la fracción arcilla de la sección 4.2.2.3 corresponde al 100% de la fracción menor a 2 μm obtenida mediante difracción laser (sección 4.2.1). La Tabla 24 indica los contenidos de minerales de arcilla en el total de cada muestra.

Tabla 24: Contenidos de minerales de arcilla total de la muestra.

Muestra	Mineralogía semi-cuantitativa en la fracción arcilla, %		
	Esmectita	Illita/mica	Caolinita/Clorita
Cabeza	0.17	0.18	0.08

4.2.2.6 Análisis químico

Los análisis descritos a continuación, permitirán realizar los balances de masa necesarios para la cuantificación de los fenómenos de disolución del mineral que ocurren en la columna.

Los resultados de cobre total, cobre soluble, hierro total y hierro soluble son presentados en la Tabla 25.

Tabla 25: Valores de cobre total, cobre soluble, hierro total, hierro soluble y razones de solubilidad.

Muestra	Cu _T (%)	Cu _S (%)	Razón de solubilidad Cu	Fe _T (%)	Fe _S (%)	Razón de solubilidad Fe
Cabeza	1.04	0.94	0.90	2.04	0.23	0.11

4.2.3 Pruebas mecánicas e hidráulicas con muestra mineral

A continuación, se muestra los resultados de las diferentes pruebas mecánicas e hidráulicas realizadas a la muestra mineral bajo las condiciones de agua destilada y agua de mar.

4.2.3.1 Límite de Atterberg

Como se mencionó en los capítulos anteriores, los límites de Atterberg se ven afectados por tres factores: contenido de partícula menores a 2 μm , mineralogía de arcilla y el catión de intercambio. Es por ello que a continuación se presenta los resultados de índice de plasticidad y actividad

4.2.3.1.1 Índice de plasticidad

Al igual que las muestras sintéticas, los ensayos fueron realizados siguiendo el procedimiento de las normas ASTM.

En la Tabla 26 se puede apreciar los valores de IP con agua destilada y agua de mar.

Tabla 36: LL, LP, IP y clasificación por plasticidad según Villalobos (2015).

Solución	Columna	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Plasticidad
Agua destilada	1	15.80	15.43	0.37	Plasticidad Baja
Agua de mar	2	15.00	14.68	0.32	Plasticidad Baja

Adicionalmente, se presenta los resultados de estos ensayos en la carta de plasticidad que aparece en la Figura 29.

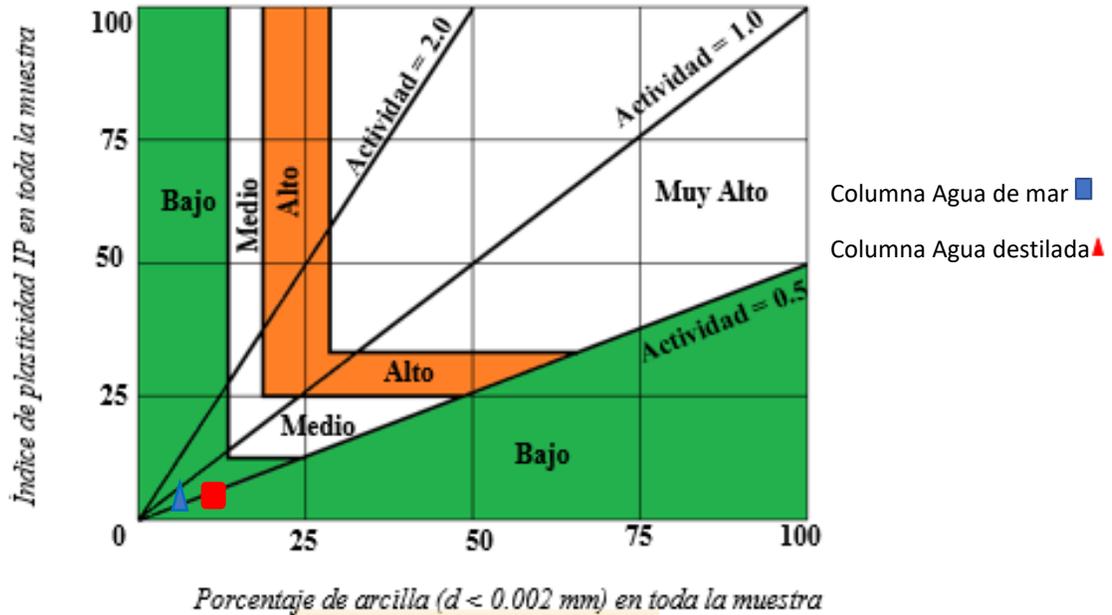


Figura 29: Efecto de los cationes en la plasticidad del material.

En las muestras con agua destilada y agua de mar, no se observan cambios significativos en la plasticidad de los finos debido a la poca cantidad de arcilla expandible. Si bien, se ve una disminución en el IP, este es marginal. Este comportamiento particular se ha observado en las muestras sintéticas, donde la plasticidad sí se ve afectada por la utilización de soluciones catiónicas.

Con los análisis granulométricos y los límites de Atterberg medidos en forma tradicional, se realizó la clasificación de los suelos según el sistema USCS. Estos resultados se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27: Clasificación USCS de las muestras utilizadas.

Muestra	Clasificación USCS
Columna agua destilada	SP
Columna Agua de mar	SP

Se observa a partir de la Tabla 26, que los suelos de ambas columnas clasifican como arena pobremente graduada, de acuerdo al sistema de clasificación USCS.

4.2.3.1.2 Actividad

Las muestras de las columnas muestran valores de actividad que permiten clasificarlo como arcillas normales (Tabla 28), según los criterios de clasificación de Skempton (1953). El IP y % de arcilla es tomado de las secciones 4.2.3.1.1 y anexo F.

Tabla 28: Actividades y clasificación según Skempton (1953) de las muestras columnares.

Columna	% <2 μ m	Actividad	Clasificación
Agua destilada	0.37	1.00	Arcilla Normal
Agua de mar	0.35	0.86	Arcilla Normal

4.2.3.2 Permeabilidad

La Tabla 29 presenta los resultados de las permeabilidades para ambas columnas. Además, se pone en evidencia que la utilización del agua de mar tiene un aumento en la conductividad hidráulica dado principalmente por la contracción de la doble capa eléctrica, favoreciendo de esta manera que dichas arcillas no se expandan. Además, se puede apreciar una reducción en la humedad retenida y volumen final en la columna de agua de mar dada por la reducción de la doble capa eléctrica, lo que disminuye su capacidad de expansión de los minerales de arcillas que se encuentran en la muestra mineral.

Tabla 29: Coeficiente de permeabilidad, humedad retenida y cambio de volumen de las muestras.

Columna	k (cm/s)	H.R (%)	ΔV (%)
Agua destilada	1.73E-4	17.7	-2.33
Agua de mar	5.01E-4	16.1	-4.26

4.2.4 Lixiviación de minerales de cobre

Las pruebas desarrolladas corresponden al proceso de lixiviación en columnas de laboratorio. Previo a la lixiviación propiamente tal, el mineral es curado con distinta solución (agua de mar y agua destilada) según el protocolo antes mencionado. Terminado el proceso se realizan los procesos de lavados y elución, con los que se completan los datos necesarios para cuantificar el atrapamiento mecánico y químico de la solución cargada en las columnas.

4.2.4.1 Aglomeración y curado ácido

Cada muestra mineral fue curada con una dosis de 25 kg/ton de ácido sulfúrico al 95%. Las muestras fueron dejadas en reposo por un periodo de 3 días.

En la Figura 30 se puede apreciar que el material aglomerado con agua de mar presenta una buena aglomeración debido a la adhesión de las partículas finas a las gruesas, por lo que se podría asegurar un buen coeficiente de permeabilidad en comparación con el mineral que fue aglomerado con agua destilada (Figura 32).

Sin embargo, en la Figura 31 se observa claramente que la presencia de ganga reactiva lleva a un aumento en la retención de humedad, ya que la muestra mineral no tiene la capacidad aglomeración como se aprecia en la Figura 33 permitiendo que la humedad dinámica se alcance en un mayor tiempo ocasionando una disminución en la recuperación final de cobre.



Figura 30: Curado con agua de mar.



Figura 31: Curado con agua destilada.



Figura 32: Curado con agua de mar después de 72 horas.



Figura 33: Curado con agua destilada después de 72 horas.

4.2.4.2 Carga de mineral en columnas

El mineral una vez curado y aglomerado, fue cargado en las columnas de la manera más homogénea posible, describiendo un movimiento en espiral ascendente con el fin de minimizar la formación de capas freáticas producto de la ubicación preferencial de finos en ciertos sectores de la columna. En promedio se logró una altura de mineral en las columnas de 13.5 cm como se observa en la Figura 34 y 35.

De las curvas granulométricas exhibidas anteriormente, la cantidad de material fino es idéntica en cada columna, pero se puede apreciar un claro arrastre de finos por parte de la columna de agua destilada (Figura 35), debido principalmente a la dificultad de generar un buen aglomerado de mayor tamaño por el aumento de la humedad retenida por parte de la ganga reactiva.

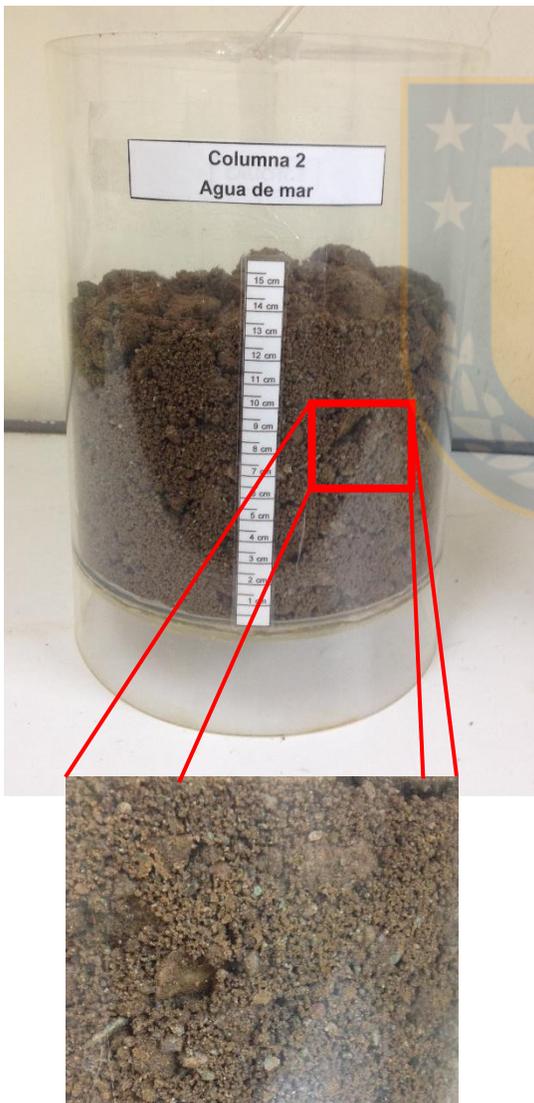


Figura 34: Formación de aglomerados y arrastre de finos con agua de mar.

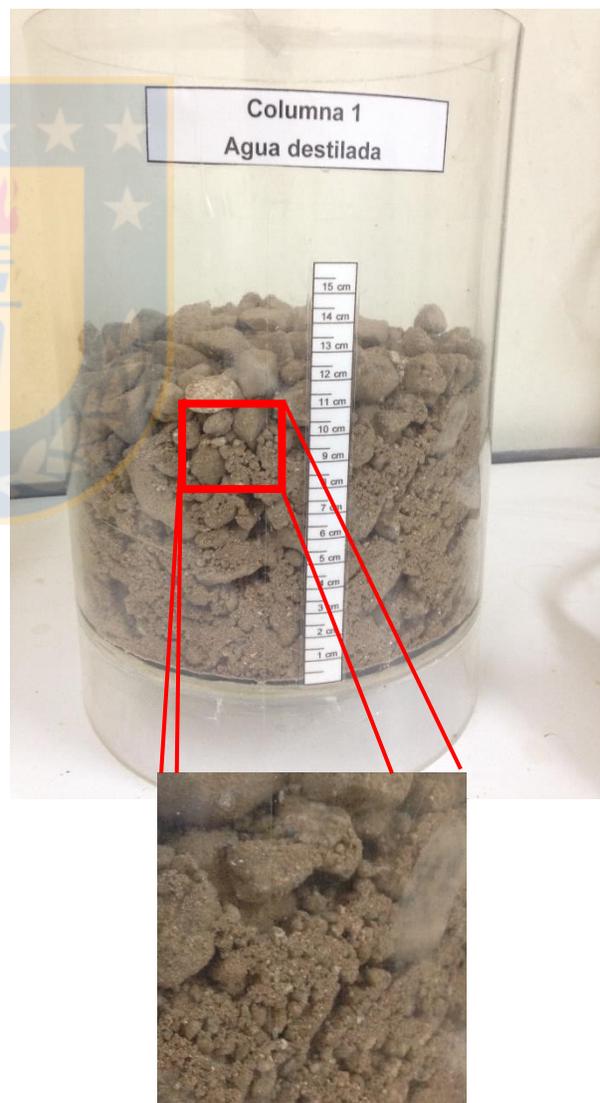


Figura 35: Formación mínima de aglomerados y arrastre de finos con agua destilada.

4.2.4.3 Caracterización hidrodinámica de las columnas

Los fenómenos físicos que ocurren en cada columna de lixiviación tales como niveles del mineral y flujos en las columnas se presentan en el anexo K. Estos muestran los historiales de cada columna.

De las Figuras 36 y 37 se desprende que ambas columnas presentan una buena conductividad, lo que sugiere que estas columnas no exhiben problemas de permeabilidad, dado por el bajo nivel freático que muestran. Además, esto podría exponer problemas con respecto al tiempo que la solución lixivante están en contacto con el mineral dado que el flujo de entrada con el de salida son similares perjudicando la recuperación de cobre proyectada.

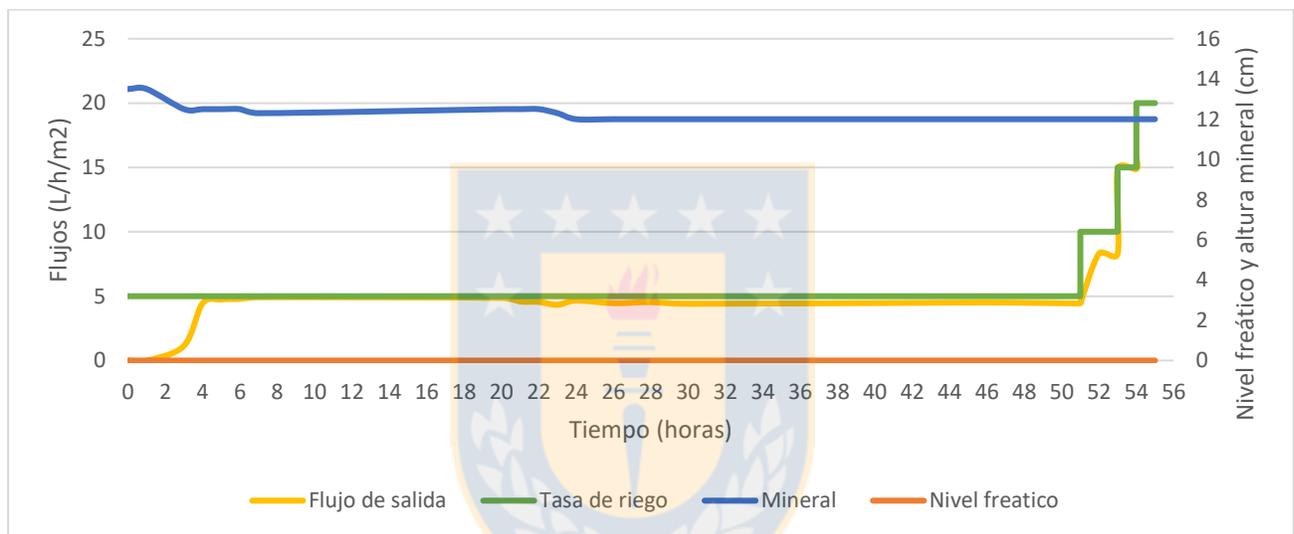


Figura 36: Flujos, niveles freáticos y altura de mineral en columna con agua de mar versus tiempo.

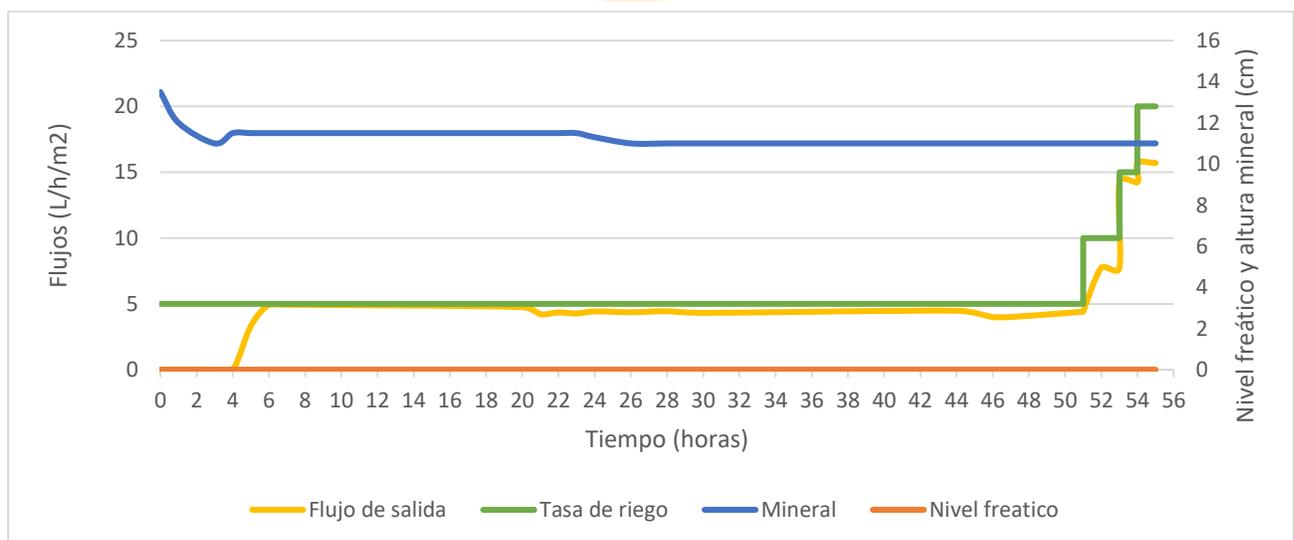


Figura 37: Flujos, niveles freáticos y altura mineral en columna con agua destilada versus tiempo.

De la Figura 36 y 37 se observa la clara estabilidad de ambas columnas al ser manejadas con un flujo de $5 \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$. Adicionalmente, se aprecia que el nivel freático se mantiene bajo debido a que el flujo de salida (PLS) es un poco menor al de entrada (solución lixiviante) por lo que no fue necesario realizar un corte en el riego, a causa de alguna inundación de la columna.

Como estudio complementario, se realizó un cambio en la tasa de riego con la finalidad de observar un aumento en el nivel freático y posibles inundaciones en la columna, pero como se puede apreciar en ambas figuras la tendencia fue la misma.

Adicionalmente, se pudo observar una disminución de la altura promedio del mineral en ambas columnas y deslizamiento en ciertos sectores con la visible disgregación de algunos clastos sobre todo en la columna de agua destilada, generando un nuevo arreglo espacial del mineral. Ver Figura 38.



Figura 38: Disgregación y arrastre de finos hacia el fondo de la columna de agua destilada.

4.2.4.5 Cinética de recuperación de cobre

En la Figura 39 se presentan los resultados obtenidos de las cinéticas de lixiviación de cobre para las dos pruebas realizadas (agua de mar y agua destilada).

Por otro lado, los parámetros indicados en este ítem, dan las primeras indicaciones sobre cual mezcla se comporta de mejor forma durante el proceso.

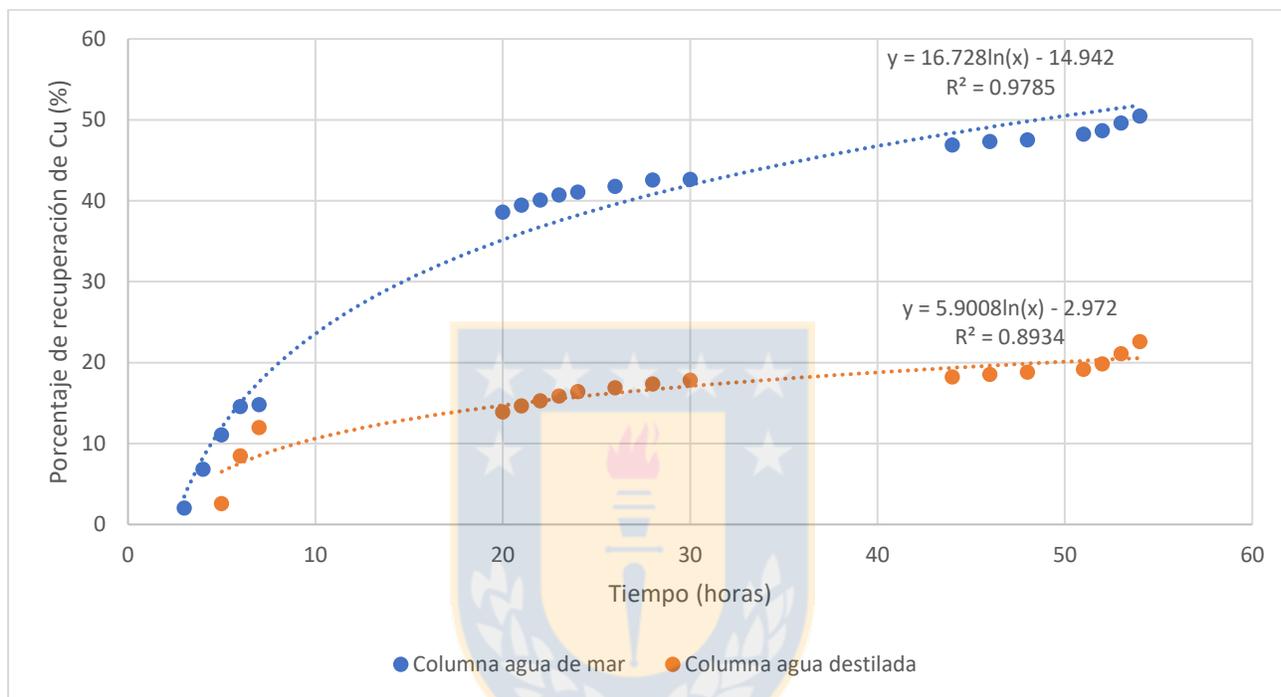


Figura 39: Cinética de recuperación de cobre.

Observando la Figura 39, se puede decir como tendencia general, que para la utilización del agua de mar en la solución, la recuperación de cobre es mayor debido a la alta concentración de iones cloruros presentes en el agua de mar (~19 g/L) como se aprecia en la Tabla 30.

Tabla 30: Análisis iónico del agua de mar de la Bahía de Concepción (mg/L). [5]

Elemento	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	B ³⁺	Cu ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
Concentración (ppm)	9480	1190	386	374	4.6	0.072	18765	2771	142	2.05

La presencia del ion de cloruro incrementa las solubilidades del hierro y de otros metales como se ve en la Figura 41. Además, las propiedades redox mejoraron debido a la estabilización de los iones cúpricos y cuprosos mediante la formación de cloro-complejos (CuCl⁺, CuCl₂ y CuCl₃). [28]

Aunque la disolución de hierro aumenta con el tiempo para ambas soluciones lixiviantes como se observa en la Figura 40, es baja en comparación con la disolución de cobre, alcanzando menos del 0.5%. Esto podría atribuirse al hecho de que la mayor parte del hierro medido en la solución lo proporciona la hematita, ya que es ligeramente soluble debido al ser un mineral muy refractario al ataque ácido (véase Tabla 19).

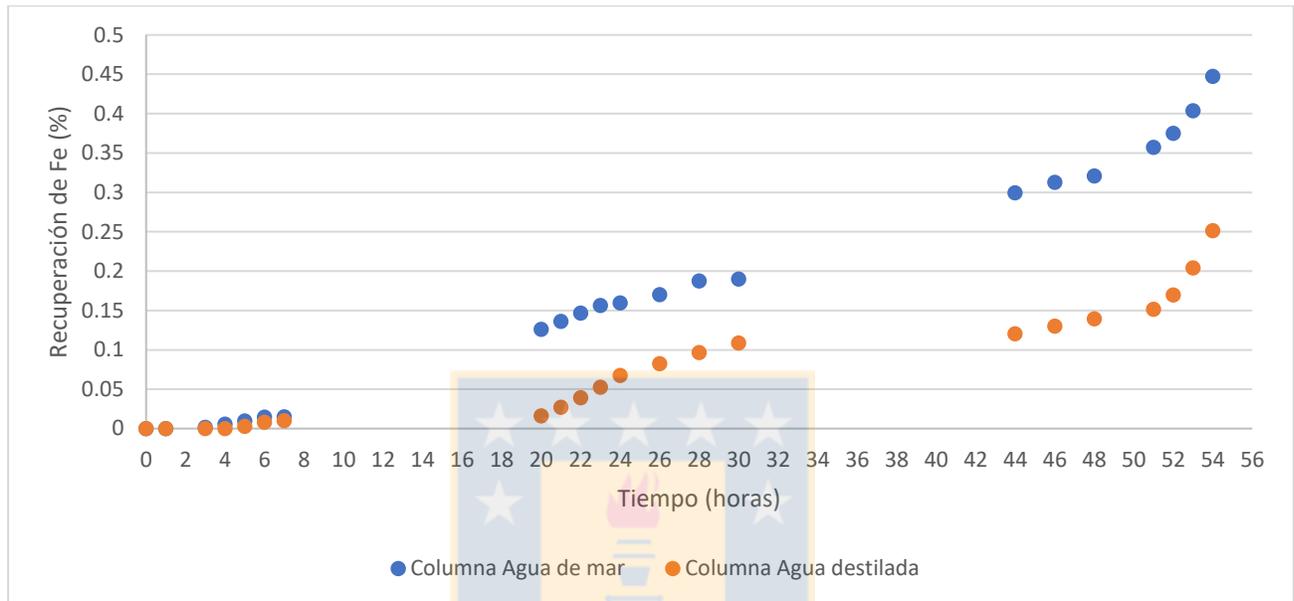


Figura 40: Cinética de disolución de hierro.

En la lixiviación con agua de mar se promueve la formación de especies cloro-cobre que tienden a modificar los potenciales de óxido-reducción disminuyéndolo a medida que aumenta la concentración del ligando, es decir del Cl^- , mejorando la cinética y magnitud de la lixiviación del mineral. Esto es favorable para cuando se quiere lixiviar minerales de cobre en forma de sulfuros, óxidos e hidróxidos.

Además, estos sistemas clorurados, debido a su baja energía de activación, tienen la capacidad de modificar la morfología de la capa de producto que se va produciendo durante el proceso de lixiviación, haciendo de esta capa una barrera porosa donde la difusión de la solución lixiviante al interior del mineral sea continua.^[29]

Por otra parte, Senanayake (2007) postuló que un medio con cloruros presenta una cinética de lixiviación favorable en condiciones atmosféricas debido al mejoramiento de la actividad del protón y de la formación de complejos con los iones metálicos viéndose reflejado en la recuperación de cobre.^[30]

De las Figuras 41 y 42, se observa que el potencial de solución (óxido-reducción) aumenta con el tiempo para ambas soluciones lixiviante, pero en mayor magnitud en la columna de agua de mar como resultado de la acumulación de iones Cl^- proveniente del agua de mar, esta concentración de iones cloruro favorece la solubilidad del hierro generando Fe^{3+} durante el proceso de lixiviación llevando consigo un aumento en el potencial.

Con respecto al pH, las primeras muestras de ambas columnas comienzan con un pH de 3.1 y 3.6 para el agua de mar y agua destilada respectivamente, por el consumo propio de la ganga reactiva y las distintas reacciones de disolución de cobre presentes en el mineral. Recordemos que la utilización de agua de mar provoca un cambio en el comportamiento de las arcillas que se encuentra en la muestra, disminuyendo su doble capa eléctrica, traduciéndose en una mínima expansión de dichas arcillas viéndose reflejado en la disminución del pH.

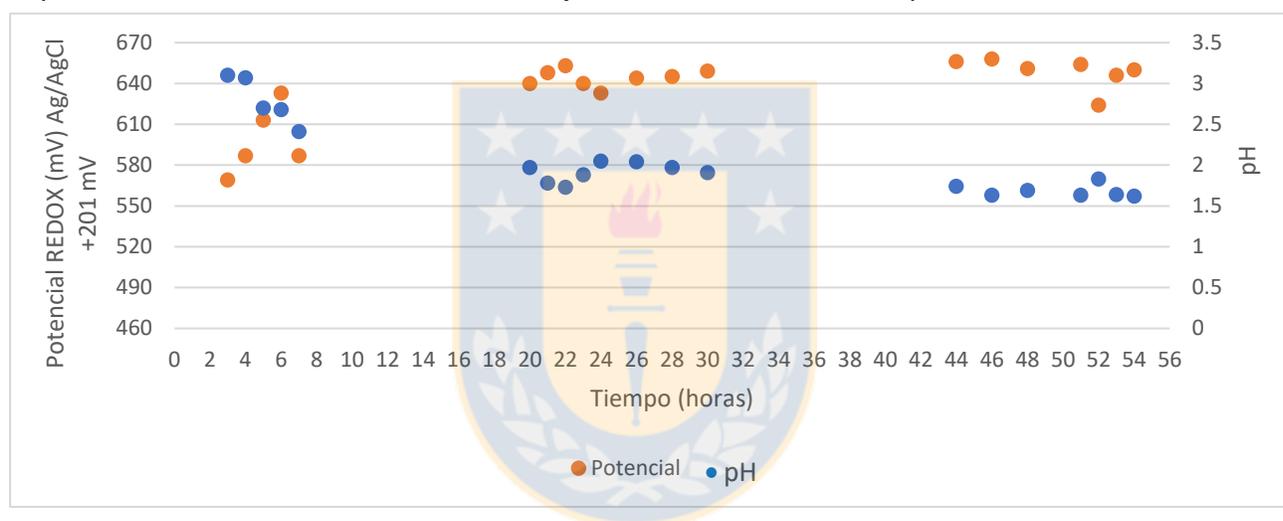


Figura 41: Potencial REDOX y pH de la columna de agua de mar en el tiempo.

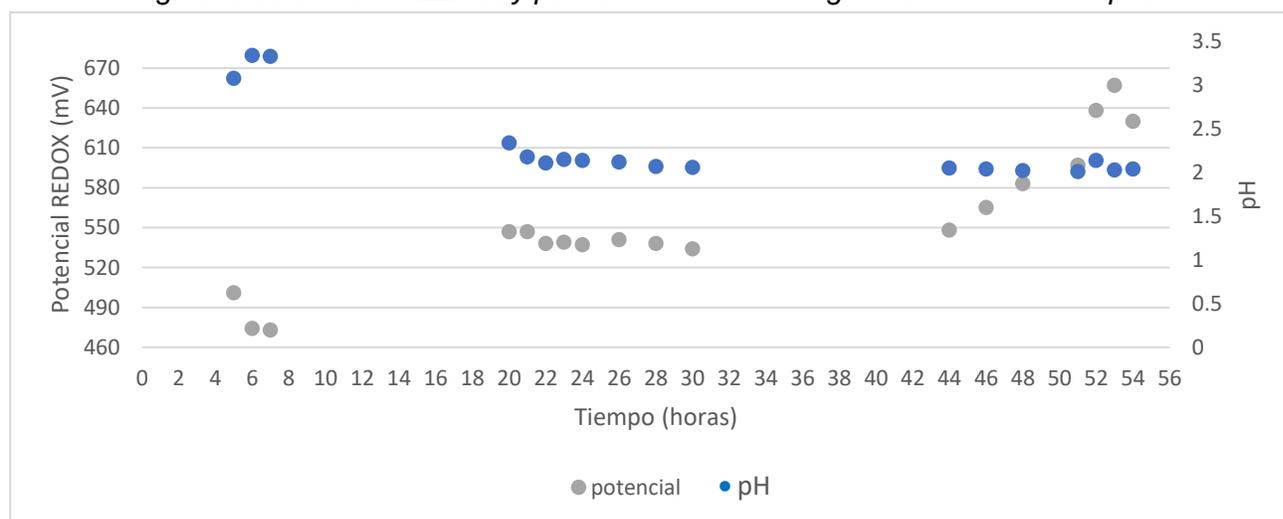


Figura 42: Potencial REDOX y pH de la columna de agua destilada en el tiempo.

En la Tabla 31, se presenta los resultados obtenidos en las etapas de lixiviación, lavado y elución, para ambas columnas.

Tabla 31: Recuperación de cobre en las columnas de agua de mar y destilada.

Etapa	Recuperación con agua de mar (%)	Recuperación con agua destilada (%)
Lixiviación	50.45	22.57
Lavado	2.29	3.40
Elución	0.48	0.88
Total	53.22	26.85

De la Tabla 31, se aprecia que el lavado en la columna de agua de mar presenta un menor atrapamiento mecánico de la solución, incluso la recuperación de cobre en agua de mar en la etapa de elución fue menor dada por la alta concentración de iones de sodio que fueron adsorbidos por las arcillas desbalanceadas dejando una baja probabilidad de que el cation de cobre interactúe con dichas arcillas. Además, el agua de mar genera un adelgazamiento de la doble capa eléctrica, induciendo una disminución en los fenómenos de repulsión electrostática traduciendo en una mínima expansión de dichas arcillas.

4.2.4.6 Recuperación másica de cobre

Una forma de observar de mejor manera los efectos de cada una de las etapas, en ambos ciclos, se presentan la Figura 43, que muestra la recuperación másica de las distintas etapas.

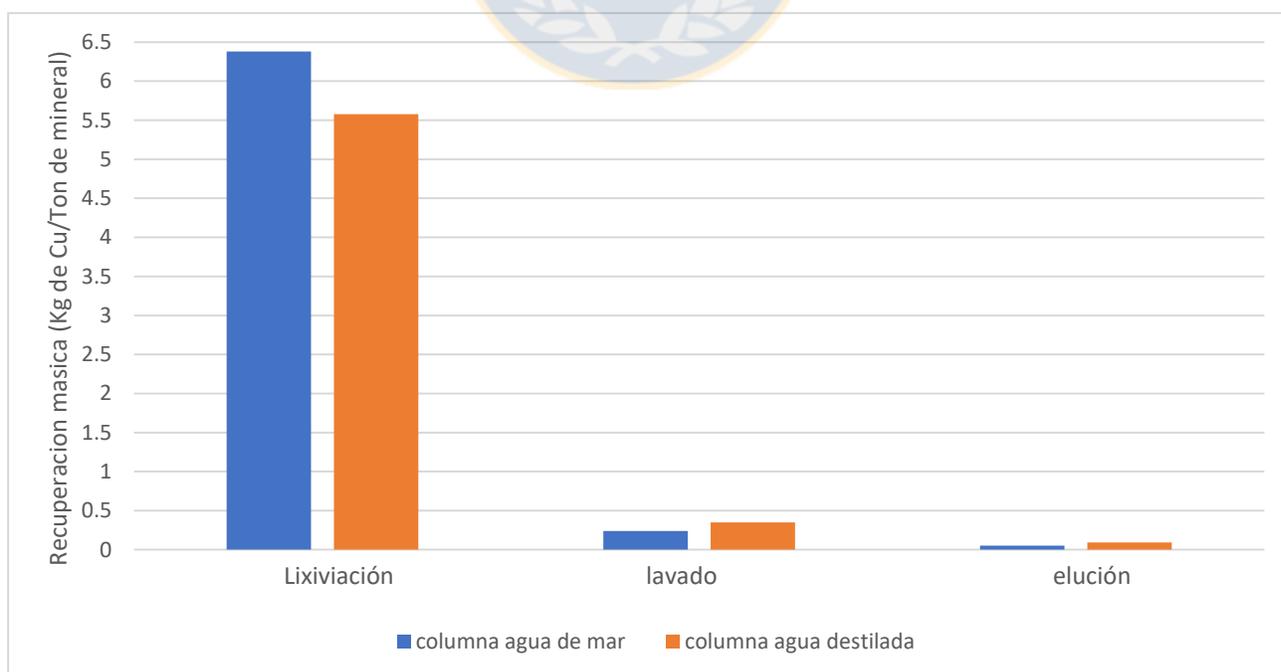


Figura 43: masa recuperada (kg/Ton) en las columnas de agua de mar y agua destilada.

Se observa una mayor recuperación en la etapa de lixiviación en la columna de agua de mar logrando 6.38 Kg/Ton. Sin embargo, los valores obtenidos para el lavado y la elución son mayores para la columna de agua destilada, en contraste con lo obtenido en la etapa de lixiviación.

En la elución queda en evidencia que la utilización de agua destilada presenta una mayor recuperación másica de cobre debido al atrapamiento químico que se produce por la adsorción de cationes de cobre por las arcillas desbalanceadas que se encuentran en la columna de lixiviación a causa de la baja concentración de otros cationes presentes en el medio, resultando en 0.097 kg/Ton versus los 0.05 kg/Ton que aporta la columna de agua de mar.

4.2.4.7 Cinética consumo de ácido sulfúrico

En la Figura 44 se muestra el gráfico de consumo de ácido sulfúrico acumulado en el tiempo por parte del mineral para las dos pruebas realizadas con distintas soluciones lixiviantes.

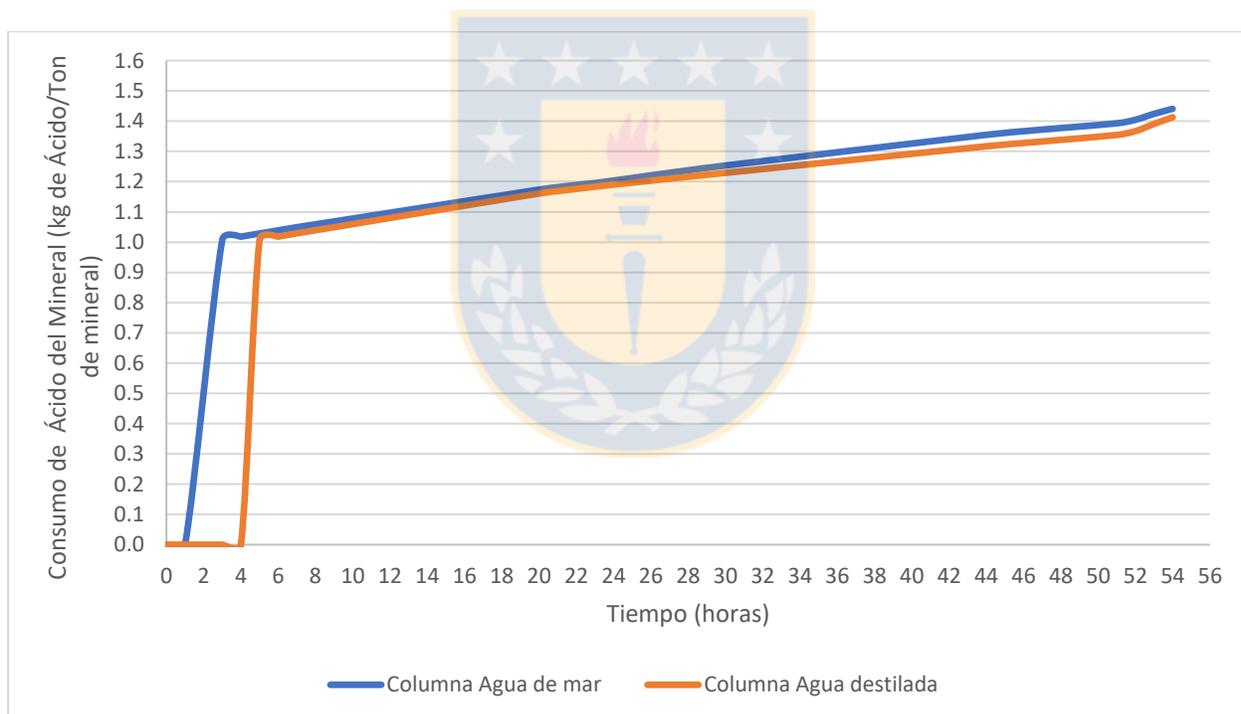


Figura 44: Cinética de consumo de ácido del mineral.

En base a la Figura 44, se puede visualizar que la utilización de agua de mar como solución lixivante produce un consumo de ácido levemente superior por parte del mineral, acelerándose la cinética. El máximo consumo logrado por las pruebas fue aproximadamente de 1.441 (kg de ácido/ton de mineral) para el agua de mar y de 1.413 (kg de ácido/ton de mineral) para el agua destilada.

Por otro lado, para analizar la velocidad de consumo de ácido a través del tiempo se construye el siguiente gráfico de la Figura 45.

La velocidad de consumo que se observa en la Figura 45 corresponde a la razón entre la masa de ácido que es utilizada por el mineral y el intervalo de tiempo en el que se produce este consumo. La razón por la cual se construyó este gráfico es para mostrar de mejor forma los fenómenos que ocurren entre el mineral y la solución lixivante a utilizar.

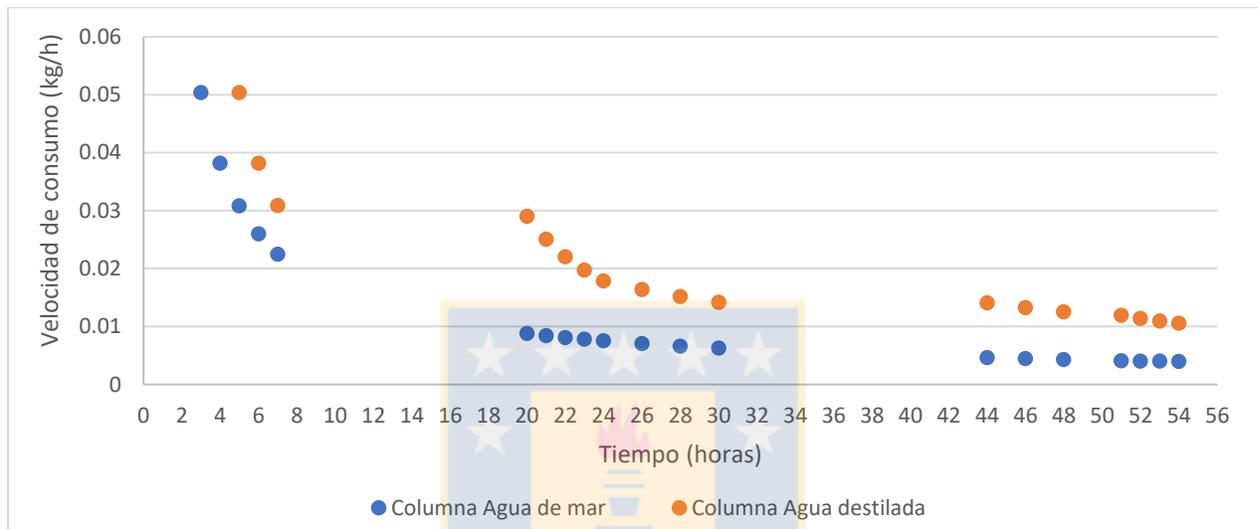


Figura 45: Velocidad de consumo de ácido en el tiempo.

4.2.4.8 DRX en roca total de ripio

Los análisis realizados a los ripios mediante la difracción de rayos X a la roca total en Figura 46, no aportaron nueva información acerca de los fenómenos de disolución y formaciones de nuevos compuestos durante el proceso de lixiviación.

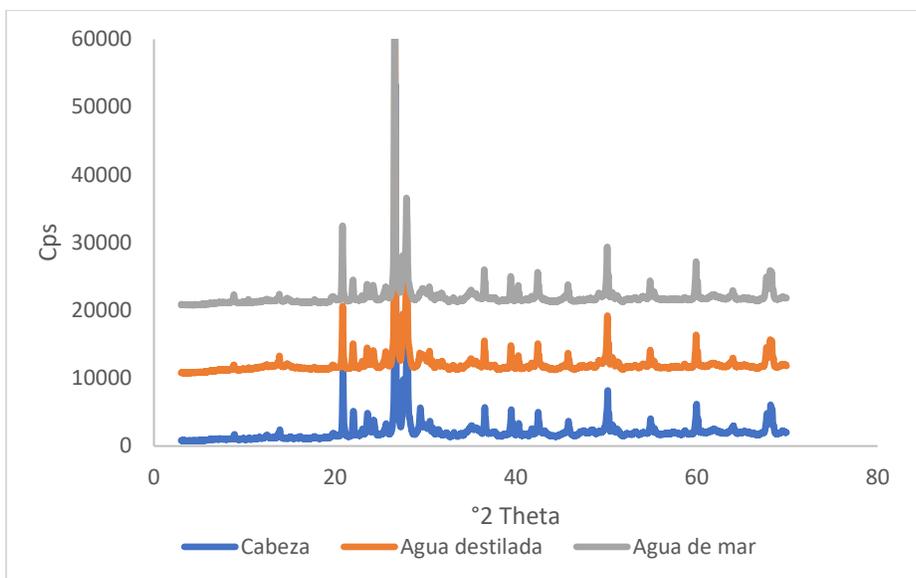


Figura 46: DRX a roca total de ripio para muestra cabeza, columna agua destilada y columna agua de mar.



5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las pruebas realizadas con mezclas artificiales de cuarzo y minerales de arcilla para evaluar el comportamiento mecánico e hidráulico con soluciones de distinta carga iónica demostraron que la caolinita no presentó variaciones significativas a la hora de utilizar agua destilada y soluciones catiónicas en el comportamiento hidráulico y mecánico a medida que aumenta la cantidad de dicha arcilla. Esto debido principalmente a su estructura eléctricamente neutra, es decir que no necesita adsorber agua o absorber algún catión presente en el sistema para lograr estabilizarse, explicando de esta manera su baja interacción con el medio.

Para el caso de las mezclas sintéticas con montmorillonitas, estas exhibieron un cambio significativo a la hora de utilizar distintas soluciones catiónicas, disminuyendo su plasticidad y aumentando la permeabilidad. Los resultados obtenidos indican que la adición de cationes a la solución puede aumentar de 1.29×10^{-4} a 3.74×10^{-4} (cm/s), es decir al doble su conductividad hidráulica y clasificándose como de baja plasticidad en el caso de la montmorillonita-Ca. En cambio, la montmorillonita-Na se acrecentó de 1.31×10^{-6} a 2.23×10^{-4} (cm/s), es decir en dos órdenes de magnitud su conductividad hidráulica y con una clasificación que pasa de una plasticidad alta a baja. Esto se debe a la contracción de la doble capa eléctrica, disminuyendo los fenómenos de repulsión electroestáticas, la que actúa inhibiendo su expansión produciendo una tendencia mínima a bloquear los canales de flujos viéndose acentuado con la utilización de un catión bivalente (Ca^{2+}). Si bien, la reducción de volumen tiene directa relación con la cantidad de montmorillonita presente en la muestra, esta se vio afectada para todas las proporciones estudiadas.

Respecto a la lixiviación en columnas permitió observar que no hubo un aumento en el nivel freático, por el contrario, este se mantiene en la base de la columna a causa de la buena conductividad hidráulica que presentó el mineral debido a la baja cantidad de finos y minerales de arcilla presentes en la muestra suministrada por la empresa minera.

En la columna con agua destilada, los glómeros comenzaron a desagregarse, llevando consigo el transporte y posterior sedimentación de finos, los cuales provocaron una disminución en la permeabilidad, favoreciendo el arrastre de finos. Los resultados de la recuperación de cobre indican que la lixiviación con agua de mar presentó un mejor rendimiento con un 50.45%, mientras que la columna de agua destilada fue solo de 22.57%. El aumento en la recuperación de cobre en la columna de agua de mar se debe principalmente a la presencia del ion cloruro en la solución, el cual incrementa la solubilidad del hierro generando iones férricos, sumado al mejor escurrimiento de la solución lixivante producto del ion de sodio, tal como fue descrito durante la observación de la experiencia.

Evaluando la cantidad de cobre recuperado, es posible comparar el mejor rendimiento entre ambas soluciones. De acuerdo a lo anterior, la columna de agua de mar presenta una recuperación de lixiviación de 6.38 kg/Ton, lavado 0.24 kg/Ton y elución 0.05 kg/Ton, mientras que su contraparte, la columna de agua destilada recupero por lixiviación de 5.58 kg/Ton, lavado 0.35 kg/Ton y elución 0.097kg/Ton quedando de manifiesto que existe una mayor recuperación en la utilización de agua de mar.

Por lo tanto, esta investigación confirma que es necesario incorporar variables geotécnicas además de las variables metalúrgicas al diseño de las pilas de lixiviación.

Analizados los resultados en la experiencia de mezclas sintéticas y posterior lixiviación de minerales oxidados proveniente de la empresa minera, mediante la aplicación de dos soluciones lixivante, de manera de obtener respuesta en función de la influencia de la ganga reactiva, se recomienda:

1. Realizar un estudio más acabado de los efectos del uso de soluciones catiónicas en materiales con presencia de otros minerales de arcilla que no fueron estudiadas en esta investigación, con el fin de poder determinar los cationes y concentraciones óptimas para el mejoramiento de la conductividad hidráulica.
2. Para complementar los alcances de esta investigación, se recomienda una evaluación de capacidad de intercambio catiónico, superficie específica y cristalinidad del mineral, debido a que estas propiedades determinan el comportamiento de estos minerales al interactuar con soluciones.
3. El cambio de volumen que ocurren en los ensayos de permeabilidad es correlacionable a las presiones de expansión de los minerales de arcillas expandibles. Este parámetro puede ser determinado mediante el uso de un consolidómetro, lo cual traduce en una nueva consideración en el diseño geotécnico de las pilas de lixiviación.
4. Llevar los resultados obtenidos con los minerales de arcillas estándar a un escalamiento piloto a fin de identificar de manera más detallada los fenómenos físicos y químicos que ocurren en la pila de lixiviación.
5. Con una mayor información de ensayos es posible realizar una conciliación con información del proceso a escala industrial, lo que permitiría generar una metodología predictiva del comportamiento hidráulico y mecánico de las pilas de lixiviación a bajo costo, incluyendo una nueva variable en los modelos geometalúrgicos.

6 REFERENCIAS

- [1] JEREZ, O. 2006. Efecto de la ganga reactiva en la lixiviación de mezclas de minerales sulfurados y oxidados de cobre. Compañía minera Cerro Colorado. Tesis de Pregrado. Universidad de Concepción. p. 132.
- [2] BARD, E. 2004. Aspectos geotécnicos en el diseño de pilas y botaderos de rípios lixiviados, V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica, 2004
- [3] IPINZA, J. 2013. Experiencias de uso de agua de mar en hidrometalurgia. Presentación en VIII Congreso de Mediana Minería 2013.
- [4] AMSA. 2016. Antofagasta Minerals S.A, www.aminerals.cl
- [5] SCHMITH, P. 2001. Criterios de diseño de un proceso hidrometalúrgico para minerales de cobre oxidados. Tesis de Pregrado. Universidad de Chile. p. 182.
- [6] MAKSAEV, V. 2001. Metalogénesis. Departamento de geología. Ed. Universidad de Chile. p. 631.
- [7] MITCHELL, J. SOGA, K. 2005. Fundamentals of Soil Behaviour Third Edition. John Wiley & Sons. p. 533
- [8] BADILLO, E. RODRIGUEZ, A. 2005. Mecánica de suelos: Tomo 1. Fundamentos de la mecánica de suelos. Editorial Limusa S.A. p. 642.
- [9] ROJAS, F. 2010. Análisis del efecto de arcillas/finos en el proceso de lixiviación de Radomiro Tomic. Tesis de Pregrado. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. p. 153.
- [10] MESRI, G. OLSONS, R. 1971. Mechanism controlling the permeability of clays. Clays and Clays Minerals. Vol. 19. p. 151-158
- [11] ZHANG X. C., NORTON L. D. 2002. Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils. Journal of Hydrology, V. 260, p. 194-205.

- [12] BARRETO F., CARVALLO H., GHEYI H. 2003. Conductividad hidráulica en un suelo aluvial en respuesta al porcentaje de sodio intercambiable. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, V.7, n.2, p.403-407.
- [13] TAKEO, E. RWAICHI, J. 2004. Correlation of hydraulic conductivity of clay-sand compacted specimens with clay properties. Applied Clay Science. V. 26. p. 3-12
- [14] HOLTZ, R. KOVACS, W. 1981. An introduction to geotechnical engineering. Prentice-hall civil engineering an engineering mechanism series.
- [15] DORNES, J. DOROTA, D. 2007. La permeabilidad del aire y conductividad hidráulica saturada como herramienta para la caracterización funcional de los poros del suelo. Revista Suelo Natural. V.7. p. 1-13
- [16] TERZAGHI, K. 1925. Principle of soils mechanics: III – Determination of permeability of clay, Engineering news record Vo. 25. No. 21. p. 832-836.
- [17] TERZAGHI, K; PECK, R. MESRI, G. 1996. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons. Inc, New York.
- [18] WALLACE, M. 1948. Experimental investigation of the effect of degree of saturation on the permeability of sand. Thesis Dept. of Civil Engr. M.I.T. Cambridge.
- [19] LOPEZ, E. 2012. Estudio experimental de la permeabilidad de materiales depositados en pilas de lixiviación. Tesis de pregrado. Universidad de Chile. p.180
- [20] VILLALOBOS, F. 2015. Mecánica de suelos. Universidad Católica de la Santísima Concepción. p. 428.
- [21] CASAGRANDE, A. 1932. Research on the Atterberg limits of soils. Public Roads. Vol. 13. p. 121-130.
- [22] McCARTHY, D. 1998. Essencials of Soil Mechanics and Foundations: Basic Geotechnics. Prentice Hall. p. 730. New Jersey.
- [23] FRIAS, M.; LUXAN, M. P. SÁNCHEZ DE ROJAS, M. 1988. Espectrometría de difracción por rayos láser. Materiales de construcción. Vol. 38. p. 37-52.

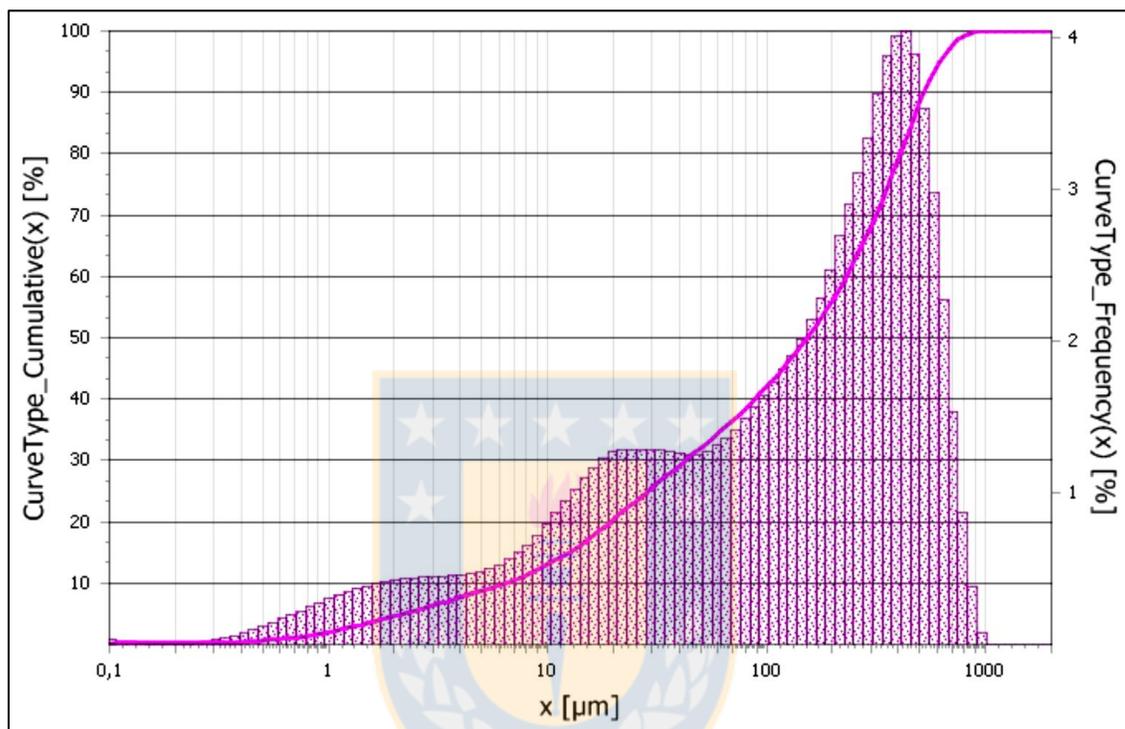
- [24] ASTM D 4318-10. 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International. West Conshohocken. Pennsylvania. US.
- [25] SKEMPTOM, A. 1953. The Colloidal Activity of Clays. 3rd International Conference of Soil Mechanics. V.5. p. 57-61.
- [26] JEREZ. O. MARCHANT, A. 2017. Influencia de la mineralogía de alteración en el comportamiento hidráulico y mecánico del mineral en el proceso de lixiviación en pilas, Anales CONAMET-SAM 2017.
- [27] Kahle, M., Kleber, M., Jahn, R. 2002. Review of XRD-based quantitative analyses of clay minerals in soils: the suitability of mineral intensity factors. Geoderma, 109, 3-4. p. 191-205.
- [28] MANZOR, R. 2014. Lixiviación de concentrado calcopirítico de cobre en medio ácido con presencia de iones cloruro. Tesis de Pregrado. Universidad de Santiago de Chile. p. 162.
- [29] Watling H. 2013. Chalcopirite hydrometallurgy at atmospheric pressure: 1. Review of acidic sulfate, sulfate-chloride and sulfate-nitrate process options. Hydrometallurgy. p. 163-180.
- [30] Senanayake, J. 2007. Chalcopirite hydrometallurgy at atmospheric pressure: 2. Review of acidic chloride process options. Hydrometallurgy. p. 96-110



A CONTINUACIÓN, SE PRESENTARÁN A MODO DE EJEMPLO ALGUNOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS DISTINTOS ANÁLISIS

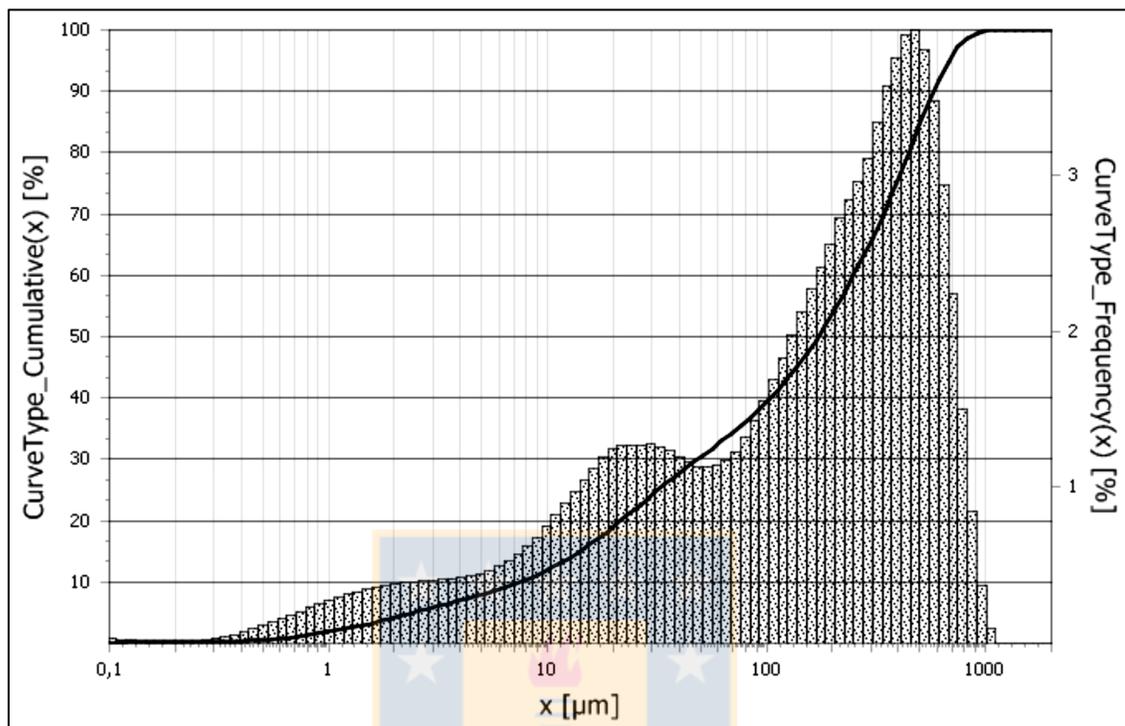
ANEXO A. GRANULOMETRÍA POR DIFRACCIÓN LASER DEL CUARZO

MUESTRA 1 (BLANCO)



Q3(x) [%]	x[μm]
1	0.6
5	2.2
10	6.4
20	19.5
30	42.3
40	88.3
50	153.2
60	231
70	315.7
80	408
90	527.1
95	616.8
99	777.2

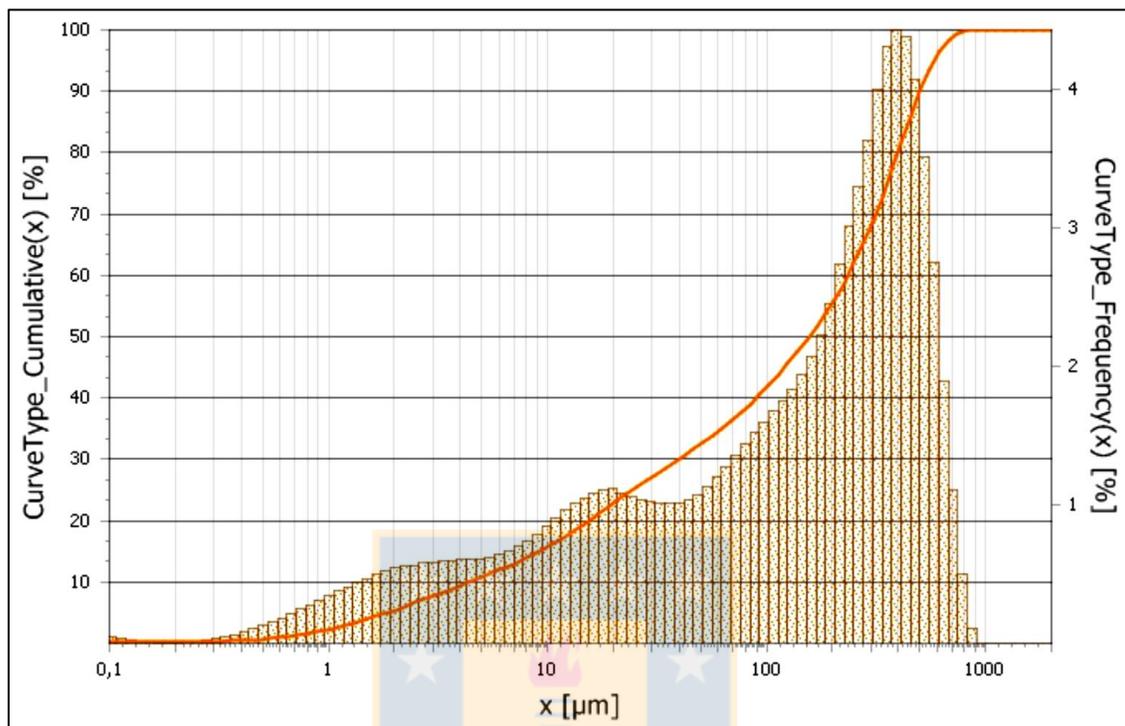
Q3(x) [%]	x[μm]
0.6	0.5
2.1	1
4.6	2
7.7	4
13	10
20.3	20
28.6	38
37.3	74
49.1	147
74	351
99.6	833
100	1651
100	2000

MUESTRA 2 (KGA-1B 1%)


Q3(x) [%]	x[μm]
1	0.7
5	2.4
10	7.4
20	21.5
30	48.1
40	104.4
50	171.5
60	249.6
70	342.2
80	446.3
90	579.5
95	678.8
99	856.9

Q3(x) [%]	x[μm]
0.6	0.5
1.9	1
4.2	2
7	4
12	10
19.1	20
27.2	38
35	74
46.5	147
70.9	351
98.8	833
100	1651
100	2000

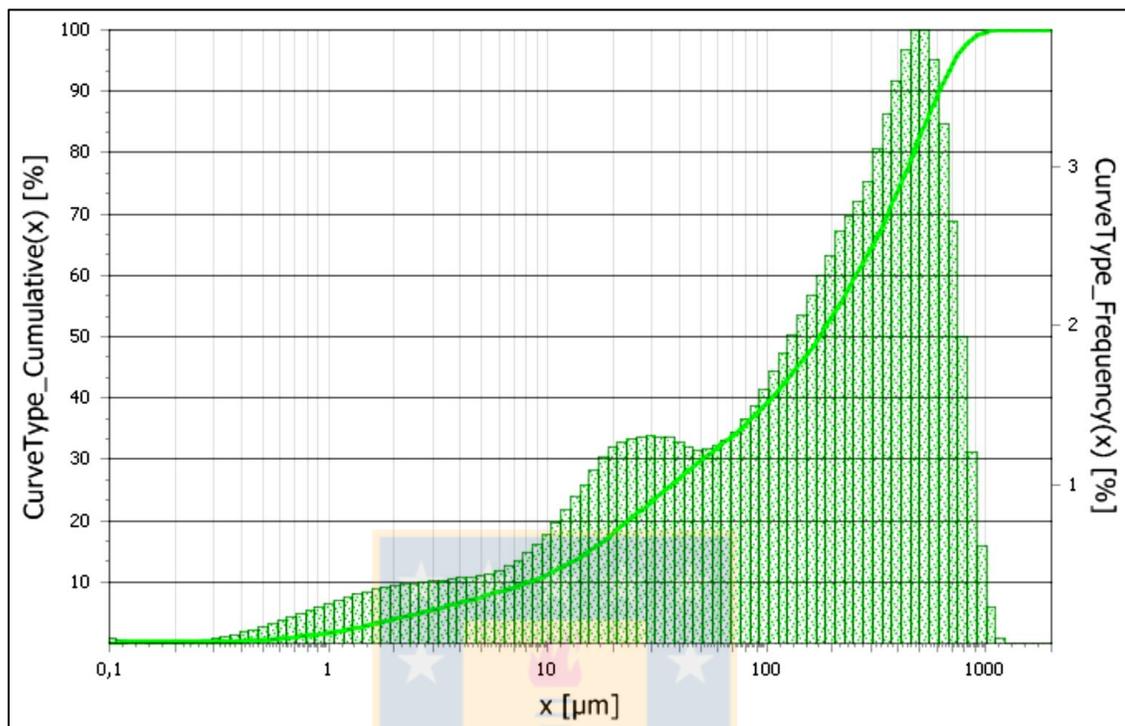
MUESTRA 6 (SAZ 1%)



Q3(x) [%]	x[μm]
1	0.6
5	1.8
10	4.4
20	15.5
30	39.6
40	89.2
50	156.8
60	235.2
70	314.5
80	397.4
90	501.1
95	583.7
99	722.6

Q3(x) [%]	x[μm]
0.7	0.5
2.3	1
5.4	2
9.5	4
15.7	10
22.8	20
29.6	38
37.3	74
48.7	147
74.5	351
99.9	833
100	1651
100	2000

MUESTRA 10 (SWY 0.5)



Q3(x) [%]	x[μm]
1	0.7
5	2.6
10	8.2
20	23.4
30	51.1
40	105.2
50	173.9
60	257.2
70	357.8
80	471
90	611.7
95	720.9
99	902.8

Q3(x) [%]	x[μm]
0.5	0.5
1.8	1
4	2
6.7	4
11.3	10
18	20
26.3	38
34.7	74
46.3	147
69.4	351
98	833
100	1651
100	2000

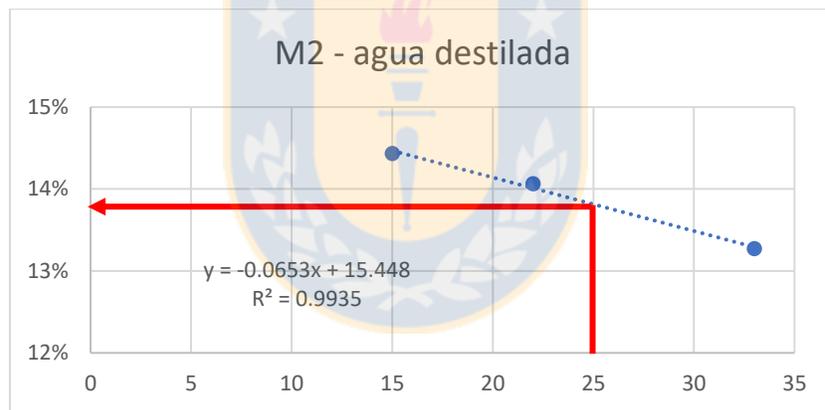
ANEXO B. LÍMITES DE ATTERBERG PARA MUESTRA SINTETICA

B.1 LÍMITE LÍQUIDO

B.1.1 CAOLINITA

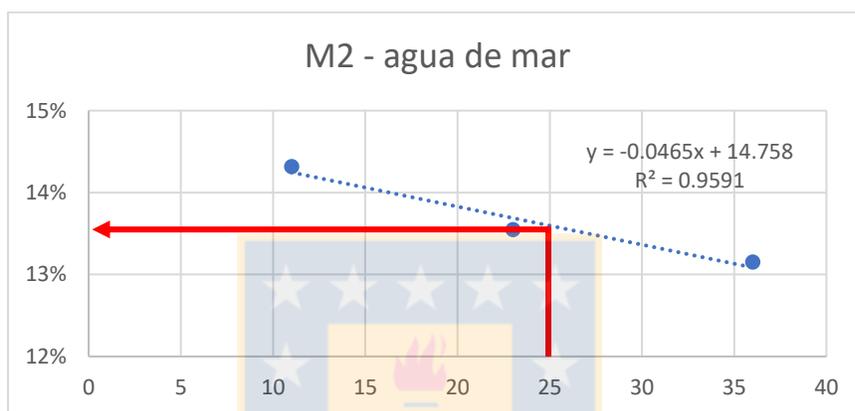
MUESTRA 2 – AGUA DESTILADA

Prueba	1	2	3
Peso muestra húmeda más frasco	23.46	20.21	23.07
Peso muestra seca más frasco	22.21	19.39	21.95
Peso agua	1.25	0.82	1.12
Peso muestra seca	8.66	5.83	8.44
Contenido de humedad	14.43	14.07	13.27
Numero de golpes	15	22	33
Humedad promedio	13.8		

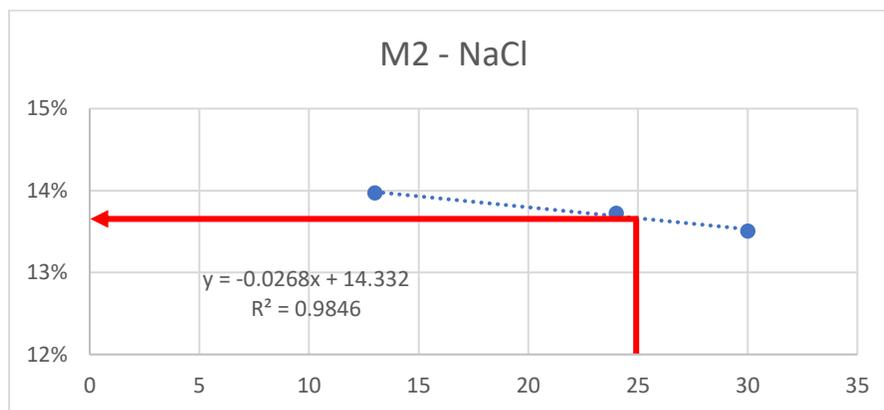


MUESTRA 2 – AGUA DE MAR

Prueba	1	2	3
Peso muestra húmeda más frasco	23.45	20.18	23.06
Peso muestra seca más frasco	22.21	19.39	21.95
Peso agua	1.24	0.79	1.11
Peso muestra seca	8.66	5.83	8.44
Contenido de humedad	14.32	13.55	13.15
Numero de golpes	11	23	36
Humedad promedio	13.5		

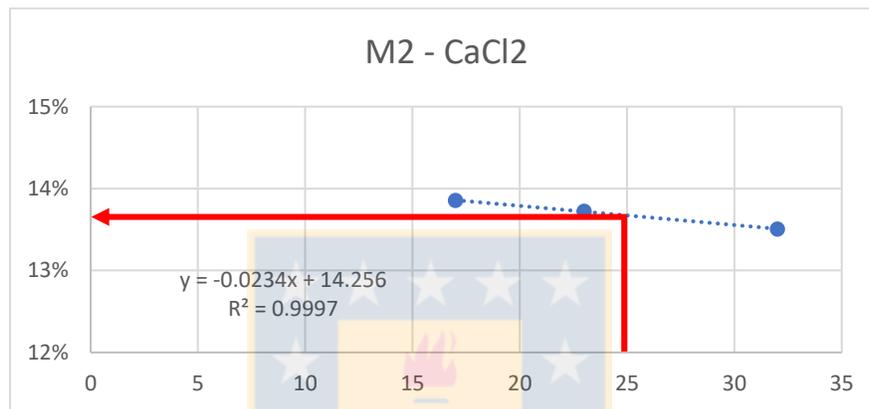
**MUESTRA 2 – NaCl**

Prueba	1	2	3
Peso muestra húmeda más frasco	23.42	20.19	23.09
Peso muestra seca más frasco	22.21	19.39	21.95
Peso agua	1.21	0.8	1.14
Peso muestra seca	8.66	5.83	8.44
Contenido de humedad	13.97	13.72	13.51
Numero de golpes	13	24	30
Humedad promedio	13.8		



MUESTRA 2 – CaCl₂

Prueba	1	2	3
Peso muestra húmeda más frasco	23.41	20.19	23.09
Peso muestra seca más frasco	22.21	19.39	21.95
Peso agua	1.2	0.8	1.14
Peso muestra seca	8.66	5.83	8.44
Contenido de humedad	13.86	13.72	13.51
Numero de golpes	17	23	32
Humedad promedio	13.7		

**C.2 LÍMITE PLASTICO****C.1.1 CAOLINITA****MUESTRA 2 – AGUA DESTILADA**

Prueba	1	2	3
Peso muestra húmeda más frasco	21.03	22.93	23.53
Peso muestra seca más frasco	20.14	21.8	22.29
Peso agua	0.89	1.13	1.24
Peso muestra seca	6.73	8.29	8.9
Contenido de humedad	13.22	13.63	13.93
Humedad promedio	13.60		

MUESTRA 2 – AGUA DE MAR

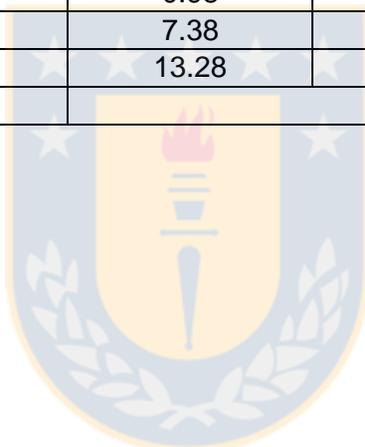
Prueba	1	2	3
Peso muestra húmeda más frasco	22.46	24.34	22.98
Peso muestra seca más frasco	21.42	23.05	21.87
Peso agua	1.04	1.29	1.11
Peso muestra seca	7.86	9.58	8.24
Contenido de humedad	13.23	13.47	13.47
Humedad promedio	13.30		

MUESTRA 2 – NaCl

Prueba	1	2	3
Peso muestra húmeda más frasco	28.59	19.91	22.68
Peso muestra seca más frasco	26.79	19.18	21.6
Peso agua	1.8	0.73	1.08
Peso muestra seca	13.19	5.44	8
Contenido de humedad	13.65	13.42	13.50
Humedad promedio	13.52		

MUESTRA 2 – CaCl₂

Prueba	1	2	3
Peso muestra húmeda más frasco	21.91	25.82	25.63
Peso muestra seca más frasco	20.93	24.34	24.19
Peso agua	0.98	1.48	1.44
Peso muestra seca	7.38	10.87	10.71
Contenido de humedad	13.28	13.62	13.45
Humedad promedio	13.46		

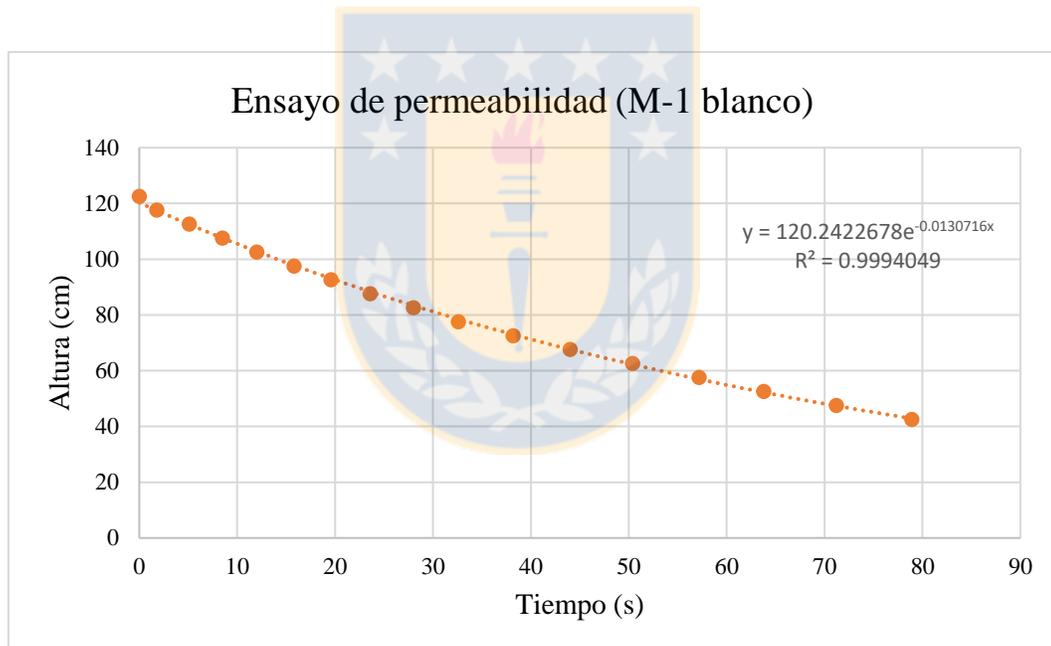


ANEXO C. ENSAYO DE PERMEABILIDAD CON CARGA VARIABLE EN MEZCLAS SINTETICAS

MUESTRA 1

Tiempo (s)	Altura total (cm)
0	122.6
1.8	117.6
5.1	112.6
8.5	107.6
12	102.6
15.8	97.6
19.6	92.6
23.6	87.6
28	82.6

Tiempo (s)	Altura total (cm)
32.6	77.6
38.2	72.6
44	67.6
50.4	62.6
57.2	57.6
63.8	52.6
71.2	47.6
78.9	42.6



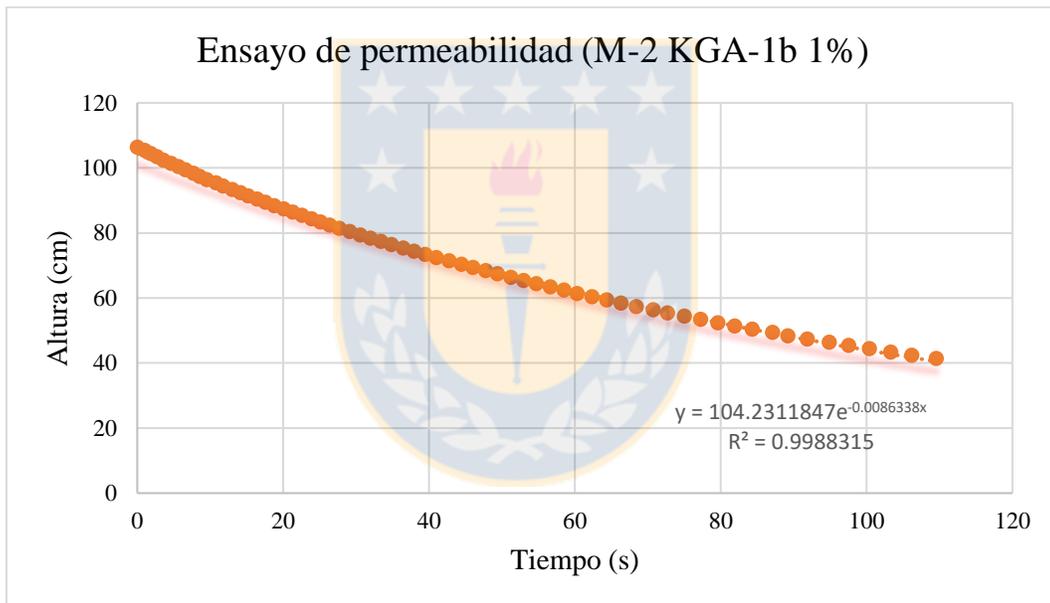
a (cm²)	0.178139348
A (cm²)	31.6692915
L (cm)	12.7
T (°C)	19
Volumen inicial (cm³)	421.20
Volumen final (cm³)	402.20
Cambio de volumen (%)	-4.51

k	9.48×10^{-4}
----------	-----------------------

MUESTRA 2

Tiempo (s)	Altura total (cm)
0	106.4
1.01	105.4
1.86	104.4
2.73	103.4
3.61	102.4
4.66	101.4
5.63	100.4
6.62	99.4
7.68	98.4

Tiempo (s)	Altura total (cm)
8.55	97.4
9.54	96.4
10.78	95.4
11.77	94.4
13.03	93.4
14.16	92.4
15.19	91.4
16.43	90.4
17.56	89.4



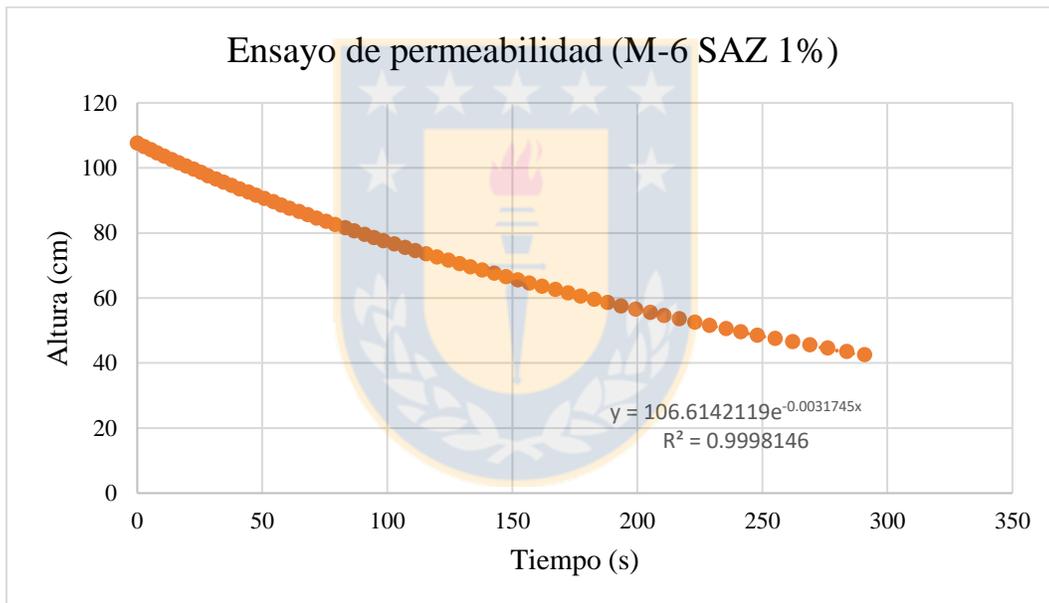
a (cm²)	0.178139348
A (cm²)	31.6692915
L (cm)	12.7
Volumen inicial (cm³)	421.20
Volumen final (cm³)	402.20
Cambio de volumen (%)	4.51

k	6.15E-04
----------	----------

MUESTRA 6

Tiempo (s)	Altura total (cm)
0	107.6
2.7	106.6
5.46	105.6
7.97	104.6
10.77	103.6
13.78	102.6
16.63	101.6
19.46	100.6
22.53	99.6

Tiempo (s)	Altura total (cm)
25.45	98.6
28.32	97.6
31.48	96.6
34.6	95.6
37.73	94.6
40.96	93.6
44.42	92.6
47.56	91.6
50.86	90.6



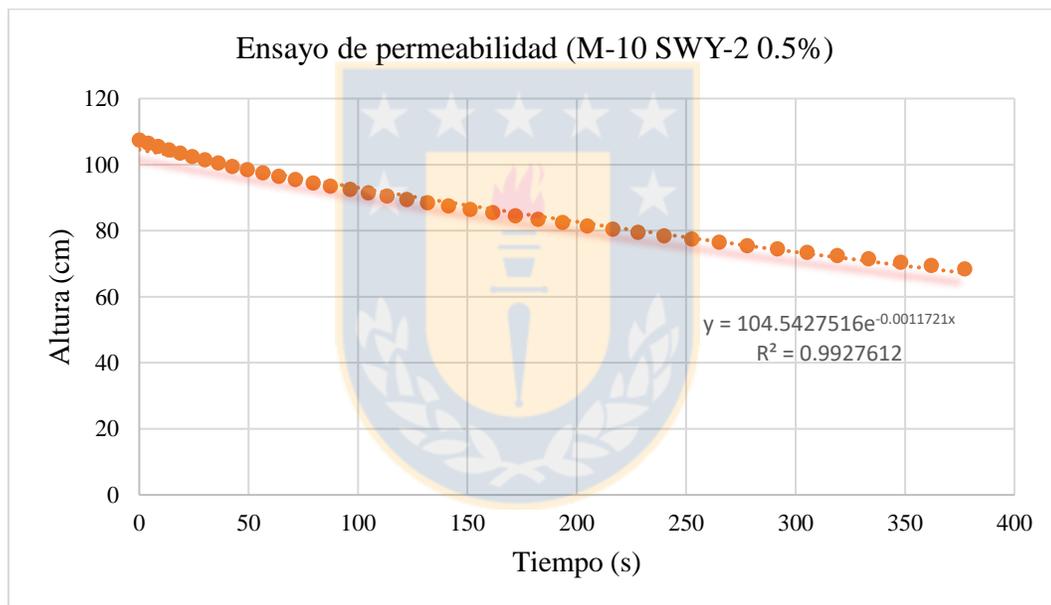
a (cm²)	0.178139348
A (cm²)	31.6692915
L (cm)	13.05
Volumen inicial (cm³)	430.70
Volumen final (cm³)	413.28
Cambio de volumen (%)	4.04

k	2.34E-04
----------	----------

MUESTRA 10

Tiempo (s)	Altura total (cm)
0	107.5
4.05	106.5
8.69	105.5
13.5	104.5
18.72	103.5
24.22	102.5
30.06	101.5
36.11	100.5
42.54	99.5

Tiempo (s)	Altura total (cm)
49.41	98.5
56.46	97.5
63.83	96.5
71.32	95.5
79.55	94.5
87.4	93.5
96.33	92.5
104.73	91.5
113.23	90.5

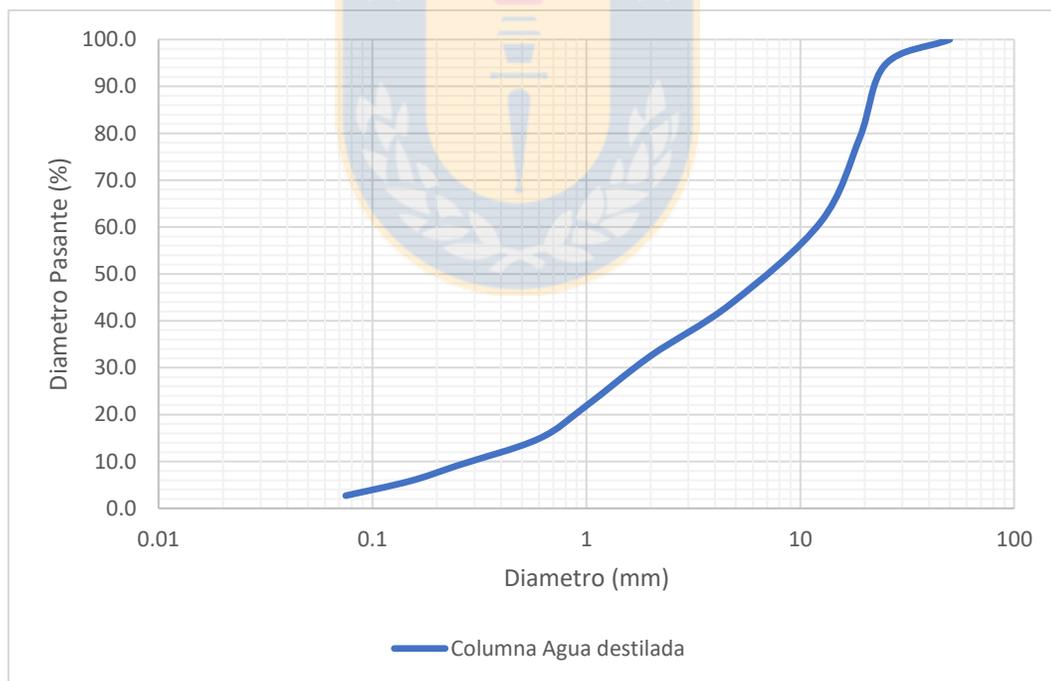


a (cm²)	0.178139348
A (cm²)	31.6692915
L (cm)	13.35
Volumen inicial (cm³)	430.70
Volumen final (cm³)	422.79
Cambio de volumen (%)	1.84

k	8.97E-05
----------	----------

ANEXO D. CURVA GRANULOMÉTRICA, PARTÍCULAS CON DIÁMETRO SOBRE 0.074 MM
COLUMNA AGUA DESTILADA

Columna Agua destilada					
tamiz	abertura (mm)	masa (gr)	% retenido	% retenido acumulado	% Acumulado pasante
2"	50	0	0.0	0.0	100.0
1'	25	265	5.3	5.3	94.7
3/4'	19	775	15.6	20.9	79.1
1/2'	12.5	895	18.0	38.9	61.1
#4	4.75	870	17.5	56.3	43.7
#10	2	555	11.1	67.5	32.5
#18	1	530	10.6	78.1	21.9
#30	0.6	350	7.0	85.1	14.9
#60	0.25	285	5.7	90.9	9.1
#100	0.15	165	3.3	94.2	5.8
#200	0.075	155	3.1	97.3	2.7
fondo		135	2.7	100.0	0.0
masa total		4980			

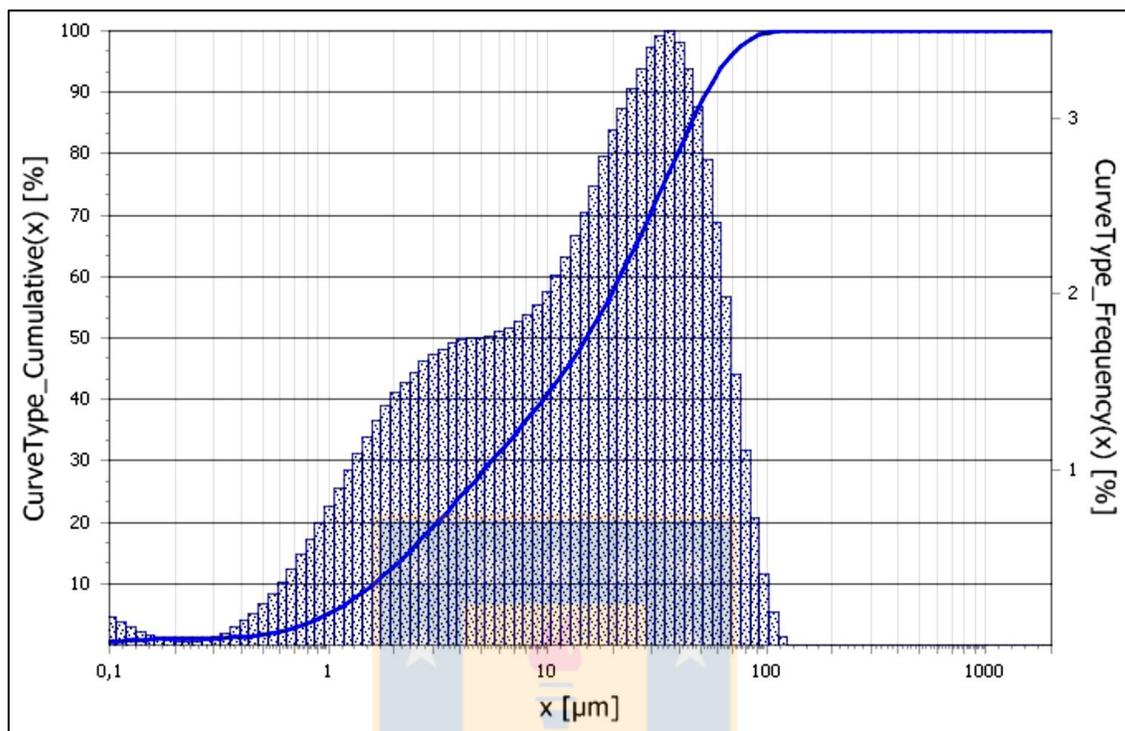


COLUMNA AGUA DE MAR

Columna Agua de mar					
tamiz	abertura (mm)	masa (gr)	% retenido	% retenido acumulado	% Acumulado pasante
2"	50	0	0.0	0.0	100.0
1'	25	275	5.5	5.5	94.5
3/4'	19	800	15.9	21.3	78.7
1/2'	12.5	925	18.3	39.6	60.4
#4	4.75	875	17.3	57.0	43.0
#10	2	555	11.0	68.0	32.0
#18	1	525	10.4	78.4	21.6
#30	0.6	350	6.9	85.3	14.7
#60	0.25	285	5.6	91.0	9.0
#100	0.15	165	3.3	94.3	5.7
#200	0.075	155	3.1	97.3	2.7
fondo		135	2.7	100.0	0.0
	masa total	5045			



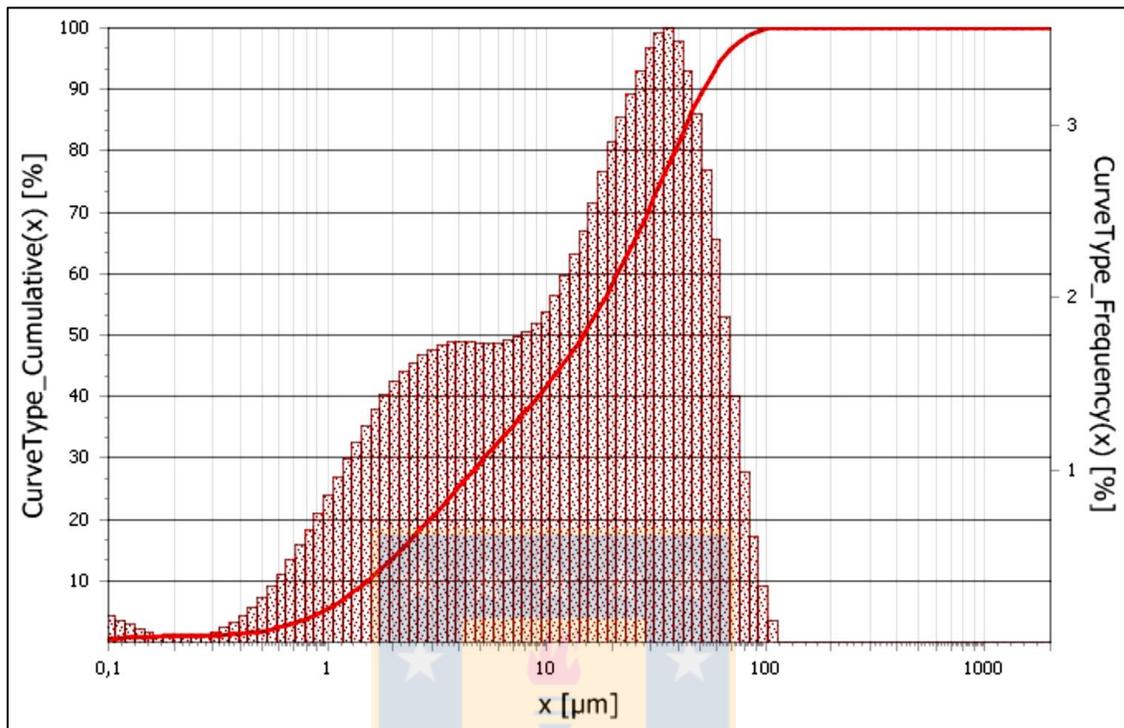
**ANEXO E. CURVA GRANULOMÉTRICA, PARTÍCULAS CON DIÁMETRO BAJO 0.074 MM
COLUMNA AGUA DESTILADA**



Q3(x) [%]	x[μm]
1	0.2
5	1
10	1.6
20	3.1
30	5.6
40	9.6
50	15
60	21.5
70	29.3
80	39
90	53.3
95	65.6
99	88.4

Q3(x) [%]	x[μm]
1.8	0.5
5.1	1
12.9	2
24.1	4
40.9	10
57.9	20
79.1	38
97.1	74
100	147
100	351
100	833
100	1651
100	2000

COLUMNA AGUA DE MAR

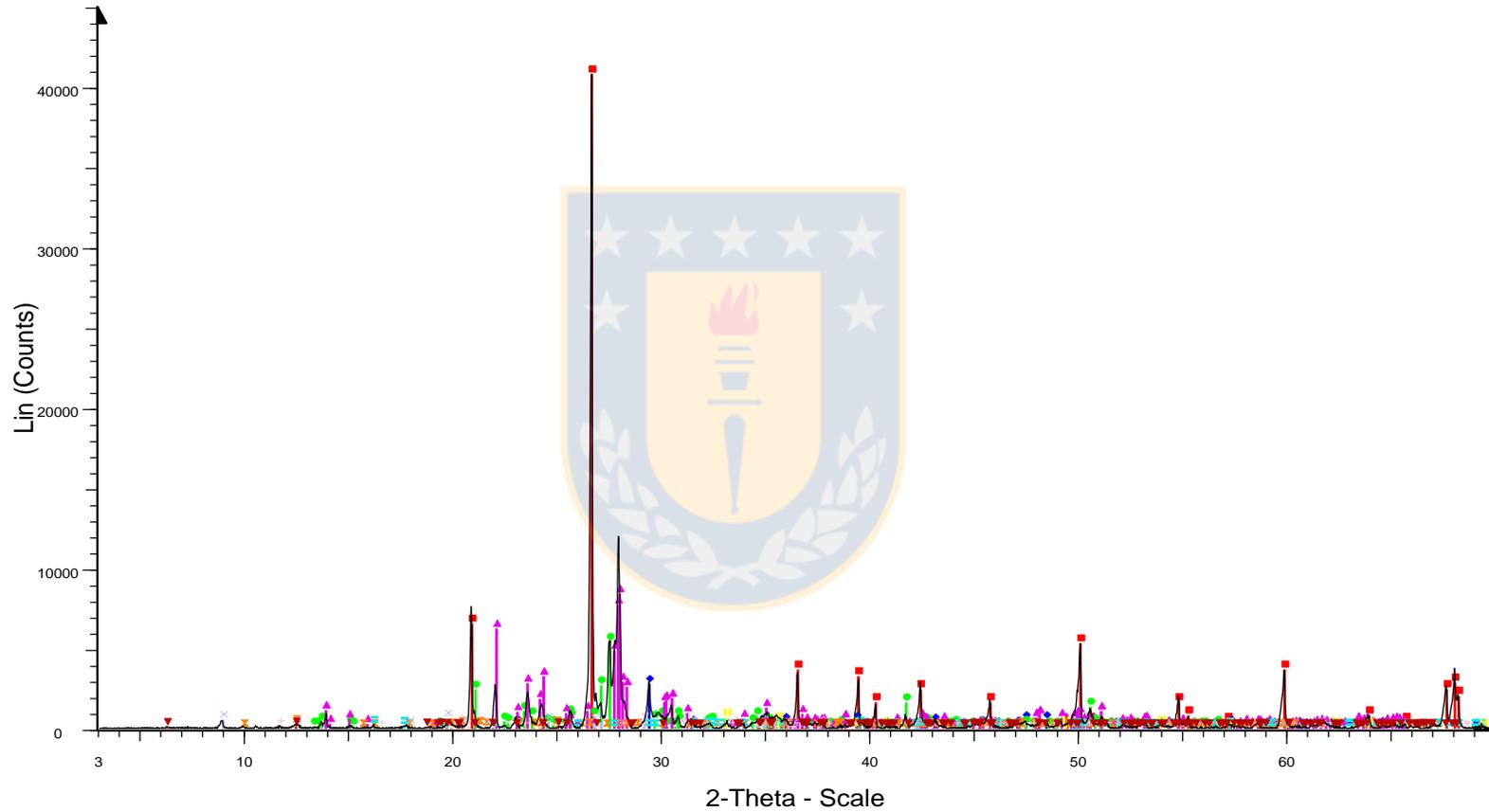


Q3(x) [%]	x[μm]
1	0.2
5	0.9
10	1.5
20	2.9
30	5.2
40	9.1
50	14.7
60	21.2
70	28.9
80	38.3
90	52
95	63.6
99	84.9

Q3(x) [%]	x[μm]
1.8	0.5
5.5	1
13.8	2
25.4	4
41.8	10
58.2	20
79.7	38
97.5	74
100	147
100	351
100	833
100	1651
100	2000

ANEXO F. DIFRACCION DE RAYOS X EN ROCA TOTAL
IDENTIFICACION MINERALOGICA

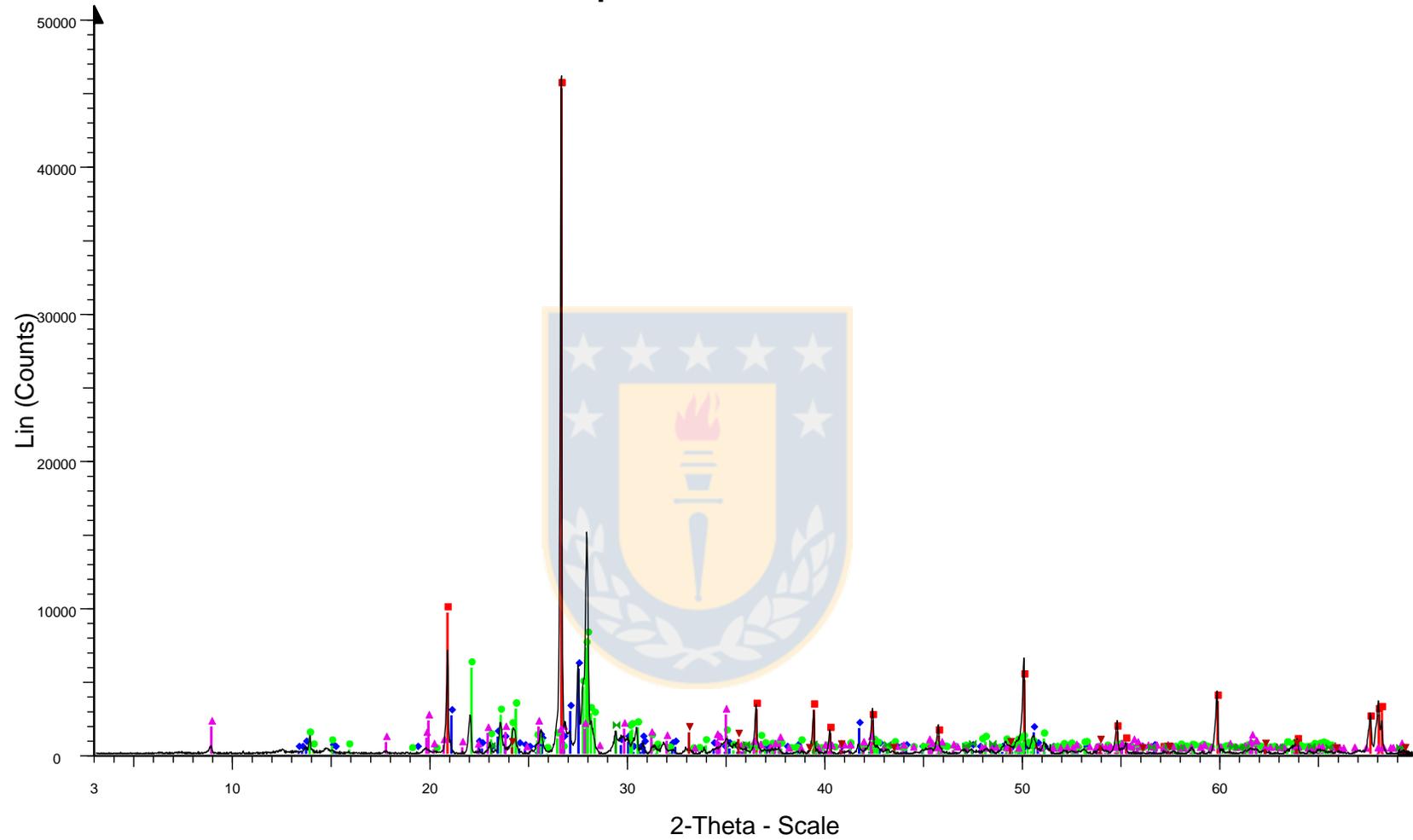
Cabeza



Cabeza - File: Cabeza.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 69.930 ° - Step: 0.02
 Operations: X Offset -0.041 | Strip kAlpha2 0.500 | Background 1.000,1.000 | Import

<input checked="" type="checkbox"/> 00-046-1045 (*) - Quartz, syn - SiO ₂ - Y: 100.00 %	<input checked="" type="checkbox"/> 01-089-0596 (C) - Hematite, syn - Fe ₂ O ₃ - Y: 1.69 %
<input checked="" type="checkbox"/> 01-081-2027 (C) - Calcite, syn - Ca(CO ₃) - Y: 6.80 %	<input checked="" type="checkbox"/> 00-021-0993 (I) - Muscovite-1M, Mg-rich - KMgAlSi ₄ O ₁₀ (OH) ₂ - Y: 1.55 %
<input checked="" type="checkbox"/> 00-019-0932 (I) - Microcline, intermediate - KAlSi ₃ O ₈ - Y: 13.21 %	<input checked="" type="checkbox"/> 01-070-0982 (C) - Gypsum - Ca(SO ₄)(H ₂ O) ₂ - Y: 0.30 %
<input checked="" type="checkbox"/> 01-084-0752 (C) - Albite low - Na(AlSi ₃ O ₈) - Y: 20.57 %	<input checked="" type="checkbox"/> 01-080-1119 (C) - Clinocllore - Mg _{4.54} Al _{0.97} Fe _{0.46} Mn _{0.03} (Si _{2.85} Al _{1.15} O ₁₀)(OH) ₈ - Y: 0.
<input checked="" type="checkbox"/> 01-078-2109 (C) - Kaolinite - Al ₄ (OH) ₈ (Si ₄ O ₁₀) - Y: 0.63 %	
<input checked="" type="checkbox"/> 00-025-0269 (I) - Atacamite - Cu ₂ +2Cl(OH) ₃ - Y: 0.53 %	

Ripio destilada

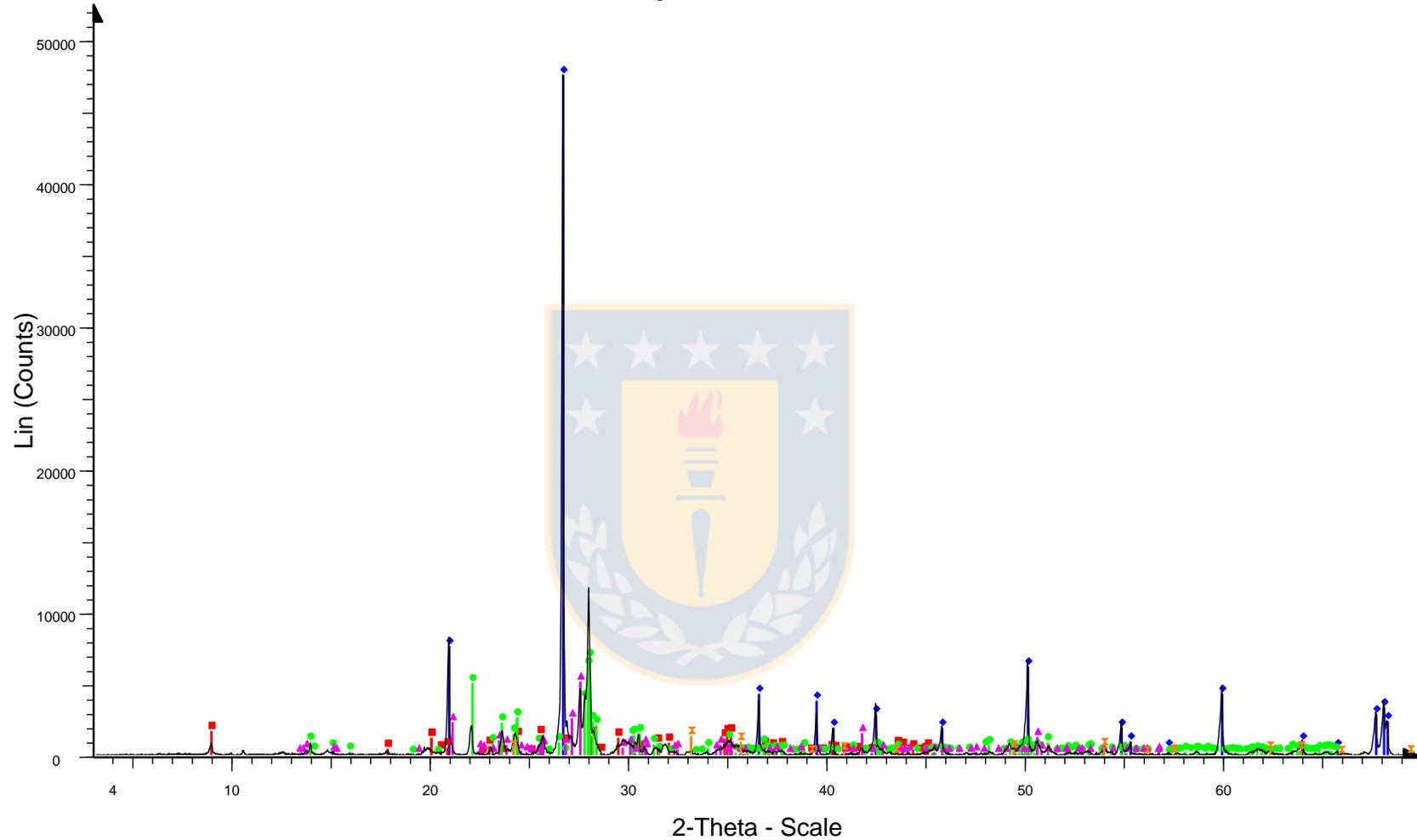


Ripio destilada - File: Ripio destilada.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 69.930 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 141. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 25 s - 2-Theta: 3.000 °

Operations: Strip kAlpha2 0.500 | Background 1.000,1.000 | Import

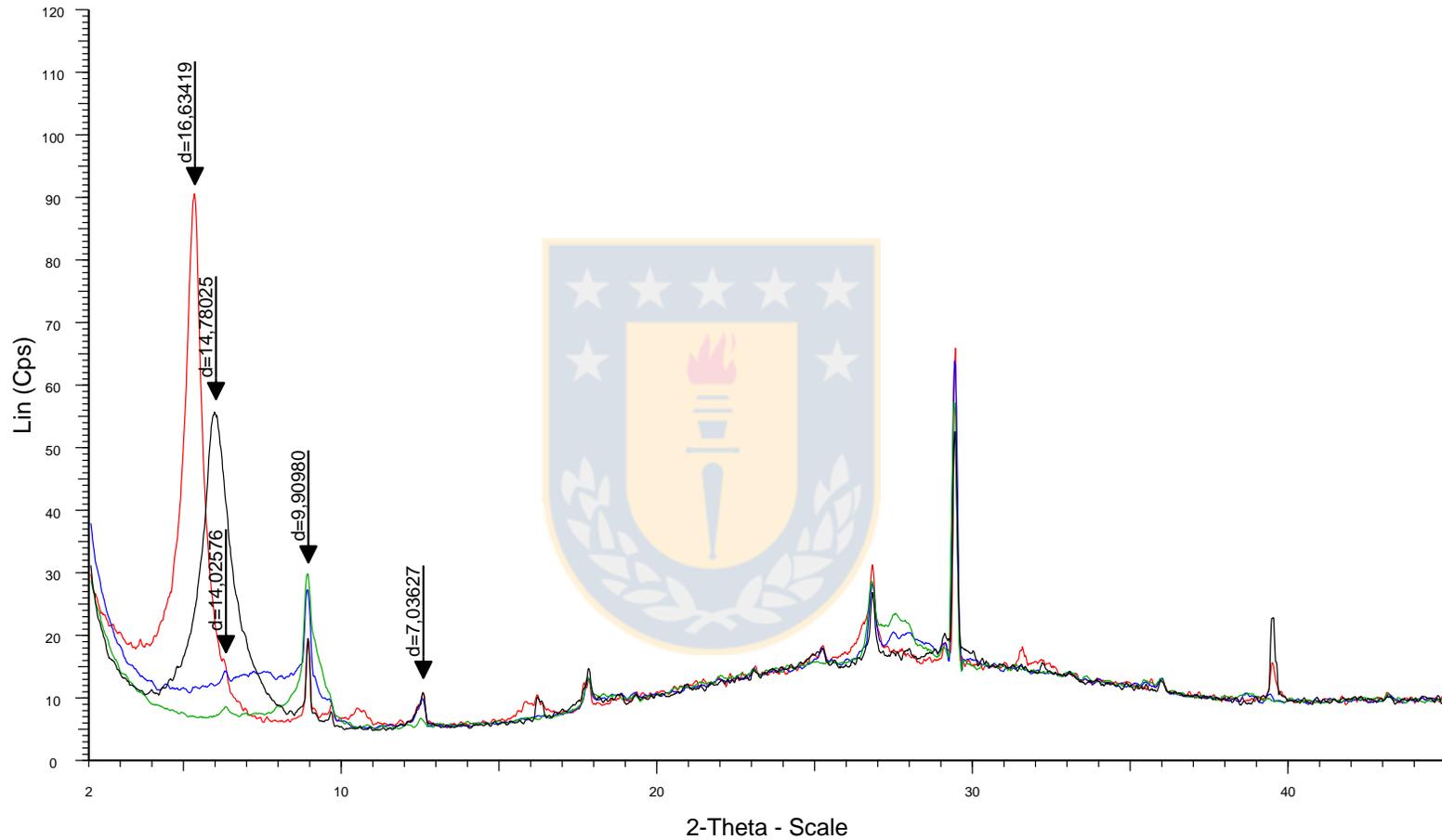
- 01-086-1630 (C) - Quartz low - SiO₂ - Y: 98.19 %
- 00-019-0932 (I) - Microcline, intermediate - KAlSi₃O₈ - Y: 12.55 %
- 01-084-0752 (C) - Albite low - Na(AlSi₃O₈) - Y: 17.09 %
- 01-072-1503 (C) - Muscovite - KAl₂(Si₃Al)O₁₀(OH)₂ - Y: 5.79 %
- 01-086-0174 (C) - Calcite, syn - Ca(CO₃) - Y: 3.39 %
- 01-089-0598 (C) - Hematite, syn - Fe₂O₃ - Y: 3.14 %

Ripio mar



- Ripio mar - File: Ripio mar.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 69.930 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 141. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 23 s - 2-Theta: 3.000 ° - Theta: 1.
 Operations: X Offset 0.017 | Strip kAlpha2 0.500 | Background 1.000,1.000 | Import
- 00-046-1045 (*) - Quartz, syn - SiO₂ - Y: 100.00 %
 - 00-034-0175 (C) - Muscovite-2M2 - (K,Na)Al₂(Si,Al)₄O₁₀(OH)₂ - Y: 3.53 %
 - 01-084-0752 (C) - Albite low - Na(AlSi₃O₈) - Y: 14.25 %
 - 00-019-0932 (I) - Microcline, intermediate - KAlSi₃O₈ - Y: 10.81 %
 - 01-089-0598 (C) - Hematite, syn - Fe₂O₃ - Y: 2.82 %

ANEXO G. DIFRACCION DE RAYOS X EN FRACCION ARCILLA IDENTIFICACION MINERALOGICA



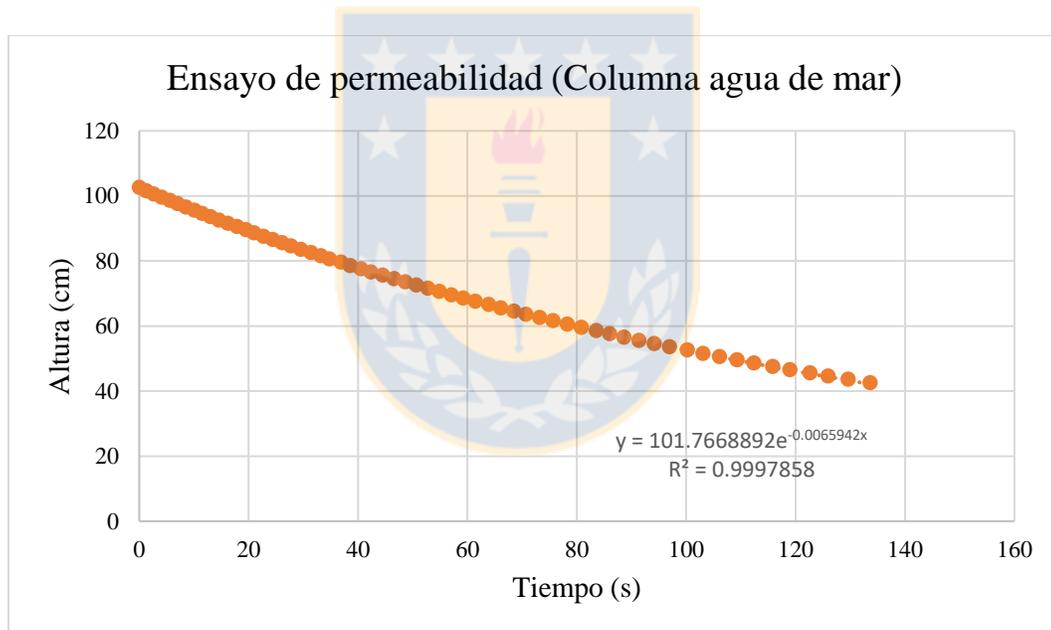
M1 OR - File: M1 OR.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 44.991 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 28.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 23 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.000 ° - Chi: 0.0
 M1 EG - File: M1 EG.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 44.991 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 28.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 21 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.000 ° - Chi: 0.0
 M1 375 - File: M1 375.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 44.991 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 28.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 23 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.000 ° - Chi: 0.00
 M-1 550 - File: M1 550.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 44.991 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 28.2 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 21 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.000 ° - Chi: 0.0

ANEXO H. ENSAYO DE PERMEABILIDAD CON CARGA VARIABLE

MUESTRA COLUMNA AGUA DE MAR

Tiempo (s)	Altura total (cm)
0	102.6
1.3	101.6
2.62	100.6
4.11	99.6
5.61	98.6
7.01	97.6
8.5	96.6
10.06	95.6
11.46	94.6

Tiempo (s)	Altura total (cm)
12.99	93.6
14.54	92.6
16.21	91.6
17.91	90.6
19.51	89.6
20.98	88.6
22.73	87.6
24.43	86.6



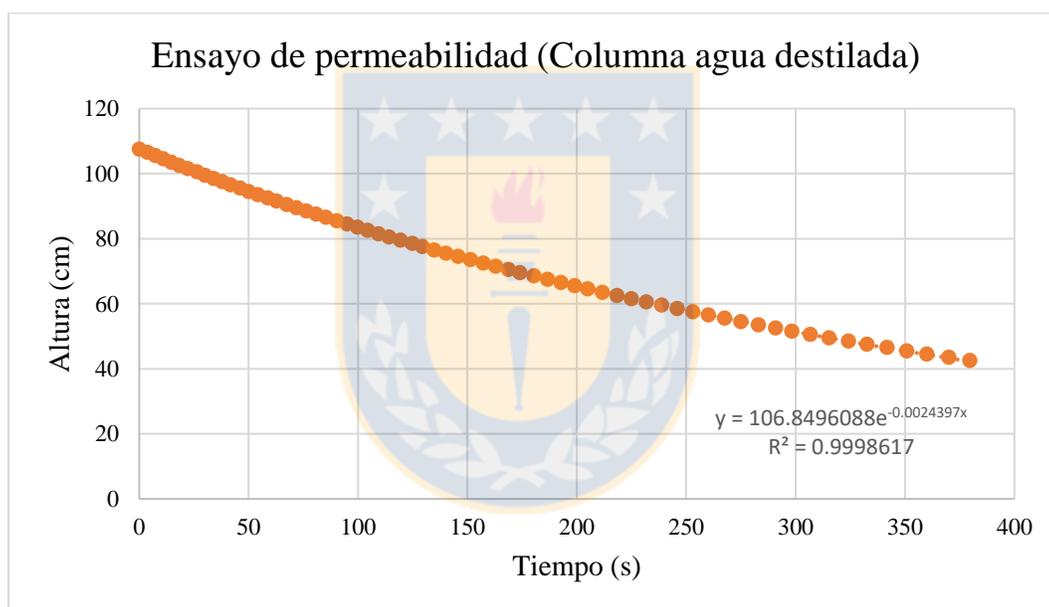
a (cm²)	0.178139348
A (cm²)	31.6692915
L (cm)	13.5
Volumen inicial (cm³)	446.54
Volumen final (cm³)	427.54
Cambio de volumen (%)	-4.26

k	5.00×10^{-4}
----------	-----------------------

MUESTRA COLUMNA AGUA DESTILADA

Tiempo (s)	Altura total (cm)
0	107.6
3.83	106.6
7.27	105.6
10.98	104.6
14.52	103.6
18.16	102.6
22.09	101.6
26.31	100.6
30.07	99.6

Tiempo (s)	Altura total (cm)
33.99	98.6
37.87	97.6
41.7	96.6
46.02	95.6
50	94.6
54.12	93.6
58.71	92.6
62.7	91.6



a (cm²)	0.178139348
A (cm²)	31.6692915
L (cm)	12.6
Volumen inicial (cm³)	408.53
Volumen final (cm³)	399.03
Cambio de volumen (%)	-2.33

k	1.73×10^{-4}
----------	-----------------------

ANEXO I. LÍMITES DE ATTERBERG PARA MUESTRAS MINERAL

I.1 LÍMITE PLASTICO

MUESTRA COLUMNA AGUA DE MAR

Prueba	1	2	3
Peso muestra húmeda más frasco	24.37	18.65	20.09
Peso muestra seca más frasco	23.12	17.99	19.31
Peso agua	1.25	0.66	0.78
Peso muestra seca	9.66	4.19	5.08
Contenido de humedad	12.94	15.75	15.35
Humedad promedio	14.68		

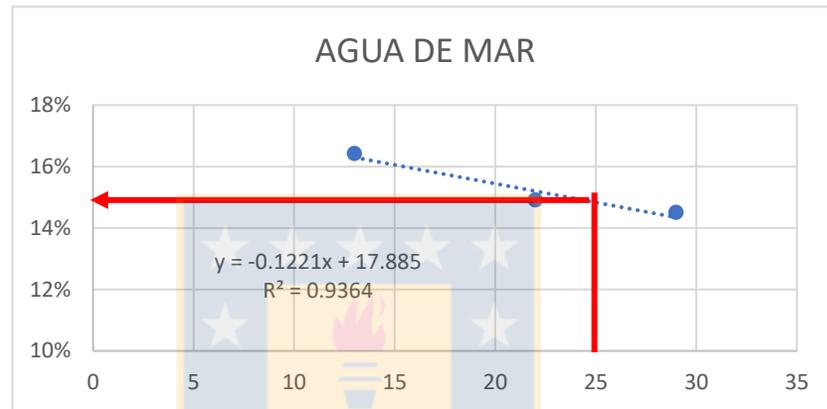
MUESTRA COLUMNA AGUA DESTILADA

Prueba	1	2	3
Peso muestra húmeda más frasco	24.44	18.72	20.09
Peso muestra seca más frasco	23.01	18.02	19.29
Peso agua	1.43	0.7	0.8
Peso muestra seca	9	4.54	5.34
Contenido de humedad	15.89	15.42	14.98
Humedad promedio	15.43		

I.2 LÍMITE LÍQUIDO

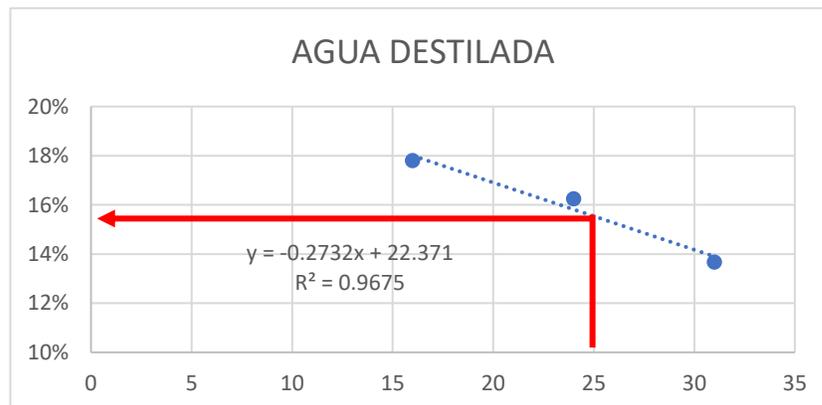
MUESTRA COLUMNA AGUA DE MAR

Prueba	1	2	3
Peso muestra húmeda más frasco	17.52	17.89	19.13
Peso muestra seca más frasco	16.95	17.34	18.39
Peso agua	0.57	0.55	0.74
Peso muestra seca	3.47	3.69	5.1
Contenido de humedad	16.43	14.91	14.51
Numero de golpes	13	22	29
Humedad promedio	15.0		



MUESTRA COLUMNA AGUA DESTILADA

Prueba	1	2	3
Peso muestra húmeda más frasco	18.12	17.83	17.95
Peso muestra seca más frasco	17.49	17.25	17.38
Peso agua	0.63	0.58	0.57
Peso muestra seca	3.54	3.57	4.17
Contenido de humedad	17.80	16.25	13.67
Numero de golpes	16	24	31
Humedad promedio	15.8		



ANEXO J. DATOS EXPERIMENTALES DE LIXIVIACION

COLUMNA AGUA DESTILADA

Muestra	Tasa de riego	Tiempo (hrs)	Altura (cm)	Volumen (mL)	pH	mV	Cu (ppm)	Fe (ppm)
1	5	5	13.5	104.2	3.08	501	25744	52
2	5	6	12	154.8	3.34	474	13871	18
3	5	7	11	155.0	3.33	473	9523	8.0
4	5	20	11.5	1938.0	2.34	547	3875	78
5	5	21	11.5	132.0	2.18	547	2244	86
6	5	22	11.5	136.5	2.11	538	2378	100
7	5	23	11.5	134.0	2.15	539	2297	103
8	5	24	11.3	139.0	2.14	537	1855	113
9	5	26	11.0	274.0	2.12	541	1771	110
10	5	28	11.0	279.0	2.07	538	1705	96
11	5	30	11.0	271.0	2.06	534	1696	89
12	5	44	11.0	1967.0	2.05	548	1359	79
13	5	46	11.0	251.0	2.04	565	1213	75
14	5	48	11.0	257.0	2.02	583	1124	75
15	5	51	11.0	415.0	2.01	597	1348	103
16	10	52	11.0	243.0	2.14	638	1535	49
17	15	53	11.0	447.0	2.03	657	1366	108
18	20	54	11.0	493.0	2.04	630	1805	88
Lavado 1	-	-	-	784.0	-	-	712	17
Lavado 2	-	-	-	815.0	-	-	421	6.4
Lavado 3	-	-	-	791.0	-	-	381	6.3
Elución	-	-	-	952.0	-	-	582	1.6

COLUMNA AGUA DE MAR

Muestra	Tasa de riego	Tiempo (hrs)	Altura (cm)	Volumen (mL)	pH	mV	Cu (ppm)	Fe (ppm)
1	5	3	13.5	108.2	3.1	569	19372	30
2	5	4	13.0	140.0	3.07	587	16208	27
3	5	5	12.8	149.0	2.7	613	13586	31
4	5	6	12.5	150.5	2.68	633	10620	34
5	5	7	12.5	154.5	2.41	587	8674	48
6	5	20	12.5	1986.0	1.97	640	3789	66
7	5	21	12.5	144.0	1.78	648	2461	76
8	5	22	12.3	143.0	1.73	653	2134	79
9	5	23	12.5	136.0	1.88	640	2636	62
10	5	24	12.5	146.5	2.05	633	2289	38
11	5	26	12.5	280.0	2.04	644	2914	113
12	5	28	12.3	285.0	1.97	645	2783	133
13	5	30	12.0	277.0	1.91	649	2736	117
14	5	44	12.0	1978.0	1.74	656	1731	109
15	5	46	12.0	283.0	1.63	658	1214	86
16	5	48	12.0	282.0	1.69	651	1145	88
17	5	51	12.0	418.0	1.63	654	583	89
18	10	52	12.0	261.0	1.83	624	1253	50
19	15	53	12.0	467.0	1.64	646	774	75
20	20	54	12.0	500.0	1.62	650	1036	104
Lavado 1	-	-	-	984.0	-	-	409	16
Lavado 2	-	-	-	961.0	-	-	192	4.8
Lavado 3	-	-	-	982.0	-	-	197	2.1
Elución	-	-	-	997.0	-	-	304	0.9

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALÚRGICA
HOJA RESUMEN MEMORIA DE TITULO**

Título: Efecto de los cationes en el comportamiento mecánico e hidráulico de minerales con altos contenidos de arcillas		
Nombre memorista: Gustavo Armando Urizar Cartes		
Modalidad	Investigación	Profesor patrocinante
Concepto		Prof. Oscar Jerez Riveros Institución: Universidad de Concepción
Calificación		
Fecha		
Prof. Eugenia Araneda Hernández		
Comisión (Nombre y Firma)		
Prof. Eugenia Araneda Hernández		Prof. Fernando Parada Luna
Resumen		
<p>En este trabajo se estudiaron los aspectos relativos a la permeabilidad del mineral y su plasticidad, evaluando mezclas artificiales de contenidos variables de cuarzo y minerales de arcilla (caolinita, montmorillonita-Ca y montmorillonita-Na), y su interacción con soluciones de distinta carga iónica. Adicionalmente, se simuló la lixiviación de un mineral oxidado de Cu, perteneciente a un depósito tipo pórfido con enriquecimiento supérgeno y alteración hidrotermal argílica. La simulación se realizó en columnas a escala laboratorio, con el propósito de revisar el efecto en la recuperación de Cu y la humedad retenida, al utilizar soluciones con agua destilada y agua de mar.</p> <p>Los resultados obtenidos en las pruebas de plasticidad indican que la caolinita no tiene variación respecto de las soluciones catiónicas. En su lugar, las montmorillonitas mostraron un cambio significativo al utilizar soluciones catiónicas, disminuyendo el índice de plasticidad de 17.0 a 3.9 en el caso de la montmorillonita-Na. La conductividad hidráulica también se vio mejorada en dos órdenes de magnitud cuando se aumentó la carga del catión en la solución. Respecto de la simulación en columna, con la adición del agua de mar se logró un aumento del 30% en la recuperación de Cu y una menor retención de humedad final, en comparación al agua destilada.</p>		