



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



VARIABLES QUE DETERMINAN LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS (PSD), OBTENIDA MEDIANTE DIFRACCIÓN LÁSER VÍA HÚMEDA EN ESTÁNDARES MINERALES DE FILOSILICATOS Y RESIDUOS MINEROS.



Memoria para optar al Título de Geóloga

Andrea Deniss Dupré Alvarado

Profesora Guía: Dra. Ursula Elizabeth Dorothea Kelm
Profesores Comisión: Dr. Oscar Alfonso Jerez Riveros
MSc. Abraham Elías González Martínez

Concepción, 2019

Resumen

Determinar la granulometría de un material, ayuda a predecir el comportamiento e interacción que tienen las partículas con su medio, de ahí la importancia de este tipo de análisis, que permite definir parámetros y protocolos en las diferentes etapas de un proceso industrial. Donde el análisis granulométrico mediante difracción láser, se ha establecido como el método óptimo para granulometrías finas. Sin embargo, no existe un procedimiento estándar para proceder con productos de la minería.

Con el propósito de identificar factores que influyen en un análisis granulométrico por difracción láser vía húmeda en materiales ricos en arcillas, se realiza el siguiente trabajo de memoria de título que pretende establecer la influencia de diversos parámetros propios del material e instrumentales en los resultados y, a través de la observación y comparación de estos mismos, determinar recomendaciones y condiciones óptimas para su manejo. Para lo anterior, se ensayaron muestras proporcionadas por *The Clay Minerals Society* (CMS), donde los resultados obtenidos nos entregaron las condiciones de borde para la respuesta de ellos frente a distintas soluciones. A las muestras anteriores se suman análisis realizados a rípios de lixiviación y relaves secos y húmedos. En los que cobra relevancia el estado de la muestra (en solución, seca, procesos naturales e inducidos de alteración).

El énfasis en minerales de arcilla se debe a que este tipo de filosilicato, es el producto más común de la meteorización, alteración hidrotermal y metamorfismo retrógrado, y al estar acompañando a un mineral de mena es inevitable que entren a un circuito de procesamiento, por lo tanto, cualquier técnica de concentrado y/o recuperación tendrá que lidiar con ellos.

Para cumplir con el objetivo propuesto, se han analizado las muestras mencionadas de manera sistemática modificando los parámetros instrumentales y condiciones de medición durante la obtención de datos.

Se concluye que la medición de una distribución de tamaños de partícula realizada en húmedo, corresponde a una respuesta supeditada a un contexto específico, donde su resultado final, dependerá de las características intrínsecas de cada muestra, parámetros de diseño del equipo utilizado, composición del líquido y del desarrollo de procesos de disolución, expansión, flotación, dispersión y/o floculación, que pueden llevarse a cabo durante la obtención de los datos. En este sentido, resulta importante, antes de considerar realizar un análisis granulométrico, evaluar el escenario en el que está situado el material que deseamos ensayar y de forma particular el objetivo para el que se requiere el análisis.

Se determina que los factores y variables que afectan el resultado de un análisis granulométrico por difracción láser vía húmeda son: ultrasonido y medio acuoso, como variables instrumentales que se pueden modificar experimentalmente, y la especie mineral presente y su estado, como variables intrínsecas de la muestra particulada.

ÍNDICE

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.-Objetivos	2
1.1.1.- Objetivos Generales.....	2
1.1.2.- Objetivos Específicos.....	3
1.2.- Muestras	3
1.2.1.- Estándares Filosilicatos.....	4
1.2.2.- Tranque Barahona	4
1.2.3.-Canal de Relave	4
1.2.4.- Pilas de Lixiviación.....	4
1.3.- Metodología de Trabajo	5
1.3.1.- Etapa de Gabinete I.....	5
1.3.2.- Etapa de Laboratorio	5
1.3.3.- Etapa de Gabinete II	6
1.4.- Agradecimientos	6
2.- GRANULOMETRÍA	8
2.1.- Tamaño y Forma de una Partícula	8
2.1.1.- Diámetro de la Esfera Equivalente	9
2.1.2.- Diámetro de una Circunferencia Equivalente	9
2.1.3.- Diámetros Derivados	10
2.1.4.- Diámetro Hidrodinámico	11
2.1.5.- Tamaño Malla de Tamiz	11
2.2.- Análisis Granulométrico	12

2.3.- Métodos Analíticos	14
2.3.1.- Tamizado	14
2.3.1.1.- Equipos	14
2.3.2.- Difracción Láser	17
2.3.2.1.- Ondas Electromagnéticas.....	18
2.3.2.2.- Fenómenos de Propagación	20
2.3.2.3.- Luz Láser	23
2.3.2.4.- Patrones de Difracción.....	25
2.3.3.- Entrega de Resultados	26
2.3.3.1.- Medidas de Tendencia central	27
2.3.3.2.- Estadísticos de Forma	31
2.3.3.3.- Estadísticos de Dispersión	32
2.3.3.4.- Tipos de Distribución.....	32
2.4.- Límites Texturales	36
2.5.- Aplicaciones de un Análisis de Distribución de Tamaño de partículas	37
2.5.1.- Diámetro Efectivo	38
2.5.2.- Fracción bajo 2 μm	39
3.- ARCILLA: CLASIFICACIÓN MINERAL	40
3.1.- Filosilicatos	41
3.1.1.- Unidades Estructurales Básicas	41
3.1.2.- Celda Unitaria o Capas	44
3.1.3.- Enlaces Intercapa	45
3.2.- Filosilicatos: Subclasificación	47
3.2.1.- Arcillas No Expansivas.....	48

3.2.1.1.- Caolinita.....	48
3.2.1.2.- Illita.....	49
3.2.2.- Arcillas Expansivas: Esmectitas.....	50
3.2.2.1.- Nontronita.....	51
3.2.2.2.- Montmorillonita.....	52
3.2.2.3.- Hectorita.....	52
3.3.- Carga Superficial y Reactividad.....	53
3.3.1.- Cargas Superficiales Permanentes.....	53
3.3.2.- Cargas Superficiales Variables.....	54
3.3.3.- Capacidad de Sorción.....	54
3.3.4.- Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).....	55
3.3.5.- Expansión de las Arcillas.....	56
3.3.6.- Distribución de Cargas.....	56
3.3.7.- Balance de Fuerzas: Teoría DVLO.....	59
3.3.8.- Comportamiento Coloidal: Floculación y Dispersión.....	61
4.- DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	64
4.1.- Caracterización Muestras.....	64
4.1.1.- Estándares Filosilicatos (CMS).....	64
4.1.2.- Estándares Illita.....	65
4.1.3.- Pilas de Lixiviación (L-1).....	66
4.1.3.1.- Tamizado Húmedo.....	66
4.1.3.2.- Caracterización Mineral.....	67
4.1.4.- Muestra Canal de Relave (M-1; M-2; M-5).....	70
4.1.5.- Tranque de Relave (M-50; M-11).....	70
4.2.- Difracción Láser.....	71

4.2.1.- Instrumentos	71
4.2.1.1.- Medidor de Tamaño de Partículas	71
4.2.1.2.- Instrumentos Complementarios	72
4.2.2.- Preparación Soluciones	73
4.2.3.- Preparación de Muestras	74
4.2.4.- Procedimiento	75
4.2.4.1.- Evaluación Ultrasonido en Fluido	75
4.2.4.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido	75
5.- RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	76
5.1.- Caolín (KGa-1b y KGa-2)	76
5.1.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido (T1)	76
5.1.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)	76
5.2.- Illita	80
5.2.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido (T1)	80
5.2.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)	81
5.3.- Montmorillonita Cálcica (Saz-1)	82
5.3.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido (T1)	82
5.3.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)	83
5.4.- Montmorillonita Sódica (SWy-2)	84
5.4.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido (T1)	84
5.4.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)	86
5.5.- Nontronita Verde (Nau-1)	87
5.5.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido (T1)	87
5.5.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)	88

5.6.- Nontronita Marrón (NAu-2)	89
5.6.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido (T1)	89
5.6.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)	90
5.7.- Hectorita	91
5.7.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido (T1)	92
5.7.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)	93
5.8.- Pilas de Lixiviación (L-1)	93
5.8.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido (T1)	93
5.8.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)	95
5.8.3.- Tamizado húmedo	96
5.9.- Canal de Relave (M-5)	97
5.9.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido (T1)	97
5.9.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)	98
5.10.- Tranque de Relave (M-50)	99
5.10.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido (T1)	99
5.10.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)	100
5.11.- Tranque de Relave (M-11)	101
5.11.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido (T1)	101
5.11.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)	102
6.- DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	103
6.1.- Ultrasonido y Medio Acuoso	104
6.2.- Especie Mineral	105
6.2.1.- Caolín	106
6.2.2.- Illitas	108

6.2.3.- Esmectitas	108
6.2.3.1.- Montmorillonitas	109
6.2.3.2.- Nontronitas	111
6.2.3.3.- Hectorita.....	112
6.3.- Estado de la Muestra	113
6.4.- Conclusiones	115
7.- REFERENCIAS	117

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1 Diagrama resumen etapas de laboratorio.....	6
2.1 Diámetro (d_v) de una esfera de volumen equivalente V de una partícula	9
2.2 Diámetros de Feret (d_f).....	10
2.3 Diámetros de Martin (d_m).....	10
2.4 Diámetro del máximo disco inscrito (d_{IV})	10
2.5 Tamaño de partícula según tamizado	11
2.6 Parámetros de malla de tamizaje.	16
2.7 Esquema difracción de luz teniendo como obstáculo una partícula esférica	17
2.8 Onda electromagnética y sus planos de vibración perpendiculares entre sí.....	18
2.9 Onda armónica y sus componentes	19
2.10 Fenómenos de propagación de la luz al presentarse un obstáculo	20
2.11 Ondas en fase	22
2.12 Ondas desfasadas	22
2.13 Patrón de interferencia dado por difracción de la luz	23
2.14 Átomos y niveles de energía.....	25
2.15 Amplificación de la luz por medio de lentes de alta reflectividad	25

2.16 Rangos de tamaño de partículas y límites texturales	36
2.17 Recuperación de Cu según tamaño de partícula	38
2.18 Rangos de tamaño de partículas	40
3.1 Empaquetamiento compacto del tetraedro SiO₄	41
3.2 Unidad fundamental (SiO₄)⁴⁻ enlazadas	42
3.3 Lámina tetraédrica de perfil	42
3.4 Octaedro regular en enlace formando lámina octaédrica	44
3.5 Apilamiento de unidades estructurales octaédrica y tetraédrica	44
3.6 Capa en coordinación trioctaédrica	45
3.7 Capa en coordinación dioctaédrica	45
3.8 Estructura TO	46
3.9 Estructura TOT	46
3.10 Estructura TOT-O	46
3.11 Capas TOT apiladas mediante enlace iónico	47
3.12 Estructura caolinita	49
3.13 Distribución de cargas en estructura simplificada de caolinita	49
3.14 Esquema estructura de la illita	51
3.15 Esquema estructura simplificada de la illita	51
3.16 Esquema estructura de las Esmectitas	52
3.17 Esquema estructura Montmorillonita	53
3.18 Tipos de superficies en arcillas tipo 1:1 y tipo 2:1	54
3.19 Superficies activas en arcillas tipo 1:1 y tipo 2:1	54
3.20 Cargas dependientes del pH. Ejemplo en arcillas tipo 2:1	55
3.21 Moléculas de agua y cationes adsorbidos en la doble capa difusa	58
3.22 Variación de concentraciones catiónicas y aniónicas en doble capa difusa	58



3.23	Variaciones en la doble capa difusa en gráfico de distancia v/s concentración	59
3.24	Distribución de la densidad de carga.....	59
3.25	Distribución del potencial eléctrico.....	59
3.26	Distribución de la energía de repulsión v/s Distancia	60
3.27	Distribución de las fuerzas atractivas de Van der Waals v/s distancia.....	60
3.28	Distribución de la energía neta de interacción. Resultante de la interacción entre fuerzas atractivas y repulsivas	61
3.29	Distribución de energía neta de interacción	62
4.1	Difractograma de roca total para muestra L-1	70
4.2	Difractograma de la fracción arcillosa para muestra L-1	70

ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Ejemplo de base de datos obtenida de tamizado	12
2.2	Algunas técnicas de medición y rangos recomendados de aplicación	14
2.3	Numero de malla y tamaño de aberturas según normas ISO 3310-1:2016 y ASTM E11-17.	15
2.4	Datos de tamaños de partículas	34
2.5	Datos para la construcción de la distribución gráfica en base a masa.....	34
2.6	Datos para la construcción de la distribución gráfica en base a n° de partículas	35
3.1	Comparación de clasificación de Filosilicatos y algunos ejemplos minerales	48
4.1	Estándar de filosilicatos e información asociada.....	65
4.2	Estándares Illita e información asociada	67
4.3	Resultado tamizado húmedo y composición mineral aproximada de los componentes principales de cada fracción	69
4.4	Soluciones con respectivos datos de pH y concentración iónica si corresponde	75
4.5	Gramaje de cada muestra para la preparación de suspensiones	76

6.1 Mayores y menores distribuciones de tamaño de partículas	107
6.2 Mayores y menores distribuciones de tamaño de partículas	107
6.3 Contenido de arcilla mineral de muestras.....	108

ÍNDICE DE GRÁFICOS

2.1 Ejemplo de curva granulométrica de frecuencia relativa obtenida por difracción láser.....	13
2.2 Ejemplo de curva granulométrica de frecuencia acumulada obtenida por difracción láser	13
2.3 Distribución gráfica de frecuencias acumuladas, denotando el d50 o mediana	30
2.4 Representación de frecuencias relativas, denotando una distribución unimodal	31
2.5 Distribución de tamaño de partículas con asimetría positiva	32
2.6 Distribución de tamaño de partículas con asimetría negativa	32
2.7 Distribución gráfica en base a masa y volumen de partículas	34
2.8 Distribución en base a número de partículas	35
2.9 Curva granulométrica con un P80 de 28 μm	39
5.1 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Caolín de alta cristalinidad en T1 y % < 2 μm	78
5.2 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Caolín de baja cristalinidad en T1 y % < 2 μm	79
5.3 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Caolín de alta cristalinidad en T2 y % < 2 μm	80
5.4 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Caolín de baja cristalinidad en T2 y % < 2 μm	81
5.5 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Illita (SW1) en T1 y % < 2 μm	82
5.6 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Illita (SW1) en T2 y % < 2 μm	83
5.7 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Montmorillonita cálcica en T1 y % < 2 μm	84

5.8 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Montmorillonita cálcica en T2 y % < 2µm	85
5.9 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Montmorillonita sódica en T1 y % < 2µm	86
5.10 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Montmorillonita sódica en T2 y % < 2µm	87
5.11 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Nontronita verde en T1 y % < 2µm	89
5.12 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Nontronita verde en T2 y % < 2µm	90
5.13 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Nontronita marrón en T1 y % < 2µm	91
5.14 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Nontronita marrón en T2 y % < 2µm	92
5.15 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Hectorita en T1 y % < 2µm	93
5.16 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Hectorita en T2 y % < 2µm	94
5.17 Diámetro efectivo vs medio acuoso para L-1 en T1 y % < 2µm.....	96
5.18 Diámetro efectivo vs medio acuoso para L-1 en T1 y % < 2 µm	97
5.19 Muestra L-1	98
5.20 Diámetro efectivo vs medio acuoso para M-5 en T1 y % < 2µm	100
5.21 Diámetro efectivo vs medio acuoso para M-5 en T1 y % < 2µm	101
5.22 Diámetro efectivo vs medio acuoso para M-50 en T1 y % < 2µm	102
5.23 Diámetro efectivo vs medio acuoso para M-50 en T1 y % < 2µm	103
5.24 Diámetro efectivo vs medio acuoso para M-11 en T1 y % < 2µm	104
5.25 Diámetro efectivo vs medio acuoso para M-11 en T1 y % < 2µm	105

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

4.1 Muestra L-1 de granulometría gruesa a fina.....	68
4.2 Set de tamiz utilizado en procedimiento.....	68
4.3 Balanzas utilizadas para determinar masa retenida	68

4.4 Fracción menor a la malla #18	68
4.4 Fragmentos de rocas ígneas con feldespatos alterados malla #1/4''	69
4.5 Cristal del yeso en su variedad fibrosa retenida en malla #100.....	69
4.6 Hematitas retenidas en malla #60.....	69
4.7 Muestras de canal de relave fresco	71
4.8 Muestra M-50	72
4.9 Muestra M-11	72
4.10 Analizador y sus dos módulos funcionales.....	73
4.11 Controlador de bomba para extracción de fluido en contenedores	73
4.12 Contenedor de agua, capacidad 25 L y bomba	73



1.- INTRODUCCIÓN

Cualquier proyecto que incluya reprocesar y/o analizar un relave minero debe comenzar por una caracterización mineralógica y química del material que lo compone. Esta caracterización, incluye la aplicación de diversos estudios de laboratorio, en los que se incluye la determinación de la distribución del tamaño de partículas (*particle size distribution* o PSD, siglas en inglés), mediante un análisis granulométrico.

Determinar la granulometría de un material, ayuda a predecir el comportamiento e interacción que tienen las partículas con su medio (reactividad, tasa de disolución, estabilidad en suspensión, flotabilidad, etc.). De ahí la importancia de este tipo de análisis, que permite definir parámetros y protocolos en las diferentes etapas de un proceso industrial. En manufacturas de diferentes áreas, por ejemplo, el PSD influye en el comportamiento del compuesto resultante: el brillo en pinturas, apariencia del concreto, resistencia de un artículo de cerámica, etc. (Hart *et al.*, 2011). Así, la industria de materias primas ha desarrollado diversos estándares de medición, para proceder con una gran variedad de materiales.

En general, dependiendo del objetivo final, presupuesto y de los rangos de tamaño de partículas con que se trabaja, se recomiendan diferentes técnicas de análisis para la determinación de la granulometría de una muestra.

En geología el método más usado para realizar un análisis granulométrico es el tamizado, que corresponde a un método físico centrado en la separación mecánica de la muestra y cuyo rango de aplicación comprende tamaños desde 20 μm hasta partículas centimétricas. Este procedimiento se encuentra regulado según las normas ASTM C136M-14 y C117-17, las que definen un protocolo a seguir en el caso de agregados con granulometrías finas a gruesas, y tamizado por lavado en muestras más finas que 75 μm respectivamente. Por su parte, la norma europea que se encarga de estandarizar el ensayo y asegurar la calidad de los instrumentos es la EN 933-1 y EN 933-2, además de la norma ASTM E11-17 y su equivalente ISO 3310-1, que establecen parámetros de calidad y de fabricación del set de tamices utilizado.

Sin embargo, cuando se habla de residuos de procesos mineros, por ejemplo de materiales que ya han sido tratados por flotación y en menor medida por lixiviación, se hace referencia, en su mayoría, a muestras que no exceden los 2 mm de diámetro, debido a los diversos tratamientos

químicos y mecánicos que han sufrido, siendo la difracción láser la técnica recomendada para analizar este rango de tamaño. Este último, es un método óptico que mide la respuesta de las partículas (difracción) a un estímulo (láser), y es capaz de medir partículas desde los 10 nm (rango final dependerá del tipo de tecnología que incorpore el analizador de tamaño específico).

Pese a establecerse como el método óptimo para muestras con granulometrías finas, no existe un procedimiento estándar para proceder con residuos de minería, debido a que éstos comprenden minerales arcillosos y fases secundarias como sulfatos hidratados (formadas durante el paso del tiempo), componentes reactivos, sólidos en suspensión, etc., que pueden afectar el resultado final de la medición.

Con el propósito de identificar factores que influyen en un análisis granulométrico por difracción láser vía húmeda en materiales ricos en arcillas, se realiza el siguiente trabajo de memoria que pretende establecer la influencia de diversos parámetros propios del material e instrumentales en los resultados y, a través de la observación y comparación de estos mismos, determinar recomendaciones y condiciones óptimas para su manejo.

La herramienta principal de trabajo utilizada para lo anterior corresponde a un medidor de tamaño de partículas perteneciente a los laboratorios del Instituto de Geología Económica Aplicada de la Universidad de Concepción, el cual realiza mediciones en un rango de tamaño que va desde los 0,08 μm a los 2 mm de diámetro. Mientras que las muestras analizadas corresponden a estándares de filosilicatos y a residuos mineros tratados por flotación y lixiviación.

Este trabajo ha sido financiado en conjunto con SMI-ICE-Chile mediante proyecto CORFO 13CEI-21844SMI-UdeC.

1.1.- Objetivos

1.1.1.- Objetivos Generales

Determinar factores y variables que influyen en el desarrollo de los análisis granulométricos vía húmeda mediante la técnica de difracción láser, dependiendo de la naturaleza y/o características físicas del mineral o material.

1.1.2.- Objetivos Específicos

- Analizar muestras de diferentes fuentes (estándares de arcillas proporcionados por *The Clay Minerals Society*: “*Source Clays*”, “*Special Clays*” y residuos mineros), de forma sistemática con respecto a su distribución de tamaño de partícula.
- Determinar parámetros de medición que tiendan a producir variaciones en los resultados.
- Recomendar en base a los resultados obtenidos, una manera óptima de realizar un análisis de tamaño de partículas por difracción láser vía húmeda.
- Comparar resultados de tamizado y difracción láser en tamaños 2 mm a 38 μm , rango en donde ambos métodos son efectivos.

1.2.- Muestras

Las muestras analizadas corresponden a estándares y muestras de referencia donde se incluyen 7 estándares de caolín y esmectitas proporcionados por *The Clay Minerals Society* (CMS), y 3 estándares de illita propuestos por Warr & Rice (1994) para la calibración de equipos de difracción de rayos X (DRX). Mientras que en el segundo grupo se incluyen 6 muestras, que corresponden a residuos tratados por lixiviación y por flotación. Estas serán revisadas con más detalle en el Apartado 4.1.- Caracterización Muestras.

El énfasis en minerales de arcilla se debe a que este tipo de filosilicato es el producto más común de la meteorización, alteración hidrotermal y metamorfismo retrógrado, y al estar acompañando a un mineral de mena es inevitable que entren a un circuito de procesamiento, por lo tanto, cualquier técnica de concentrado y/o recuperación tendrá que lidiar con ellos.

Entre sus características, algunos tienden a expandirse en presencia de agua (grupo de las esmectitas). Son minerales blandos, por lo que tienden a fraccionarse con mayor facilidad marcando una mayoritaria presencia en las partículas más finas. Al poseer estructura laminar, presentan una elevada área superficial, lo que los vuelve especialmente reactivos y susceptibles a sufrir cambios. Los bordes de las caras cristalinas de los filosilicatos presentan diferencias de cargas, lo que genera interacciones entre ellas, desencadenando la formación de estructuras tridimensionales que aumentan el comportamiento coloidal en suspensión. Todo esto influye en

los procesos de flotación, donde particularmente disminuyen la recuperación de minerales de mena.

1.2.1.- Estándares Filosilicatos

- Esmectitas di y trioctaédricas: Montmorillonita sódica, Montmorillonita cálcica, Nontronita marrón, Nontronita verde y finalmente Hectorita (Apartado 4.1.1.- Estándares Filosilicatos).
- Caolín: Caolín de alta cristalinidad y Caolín de baja cristalinidad (Apartado 4.1.1.- Estándares Filosilicatos).
- Estándares de Illita (Apartado 4.1.2.- Illitas) con distintos grados de cristalinidad (KI-CIS) y en consecuencia distintas temperaturas de formación (Warr & Ferreiro-Mählmann, 2015): en orden ascendente SW1 (diagenético KI-CIS 0,630), SW4 (anchizonal KI-CIS 0,380) y SW6 (epizonal KI-CIS 0,250).



1.2.2.- Tranque de Relave

Corresponde a un tranque de pórfido cuprífero con más de 80 años, de él han sido seleccionadas dos muestras secas de granulometría fina M-50 y granulometría fina a gruesa M-11. Ambas son parte de trabajos previos, donde ya han sido caracterizadas y analizadas.

1.2.3.- Canal de Relave Fresco

Tres muestras en suspensión, numeradas M-1, M-2 y M-5. Tomadas a diferentes distancias (km) desde la planta concentradora. Estas derivan de procesos productivos de yacimiento de pórfido cuprífero en mina subterránea.

1.2.4.- Pilas de Lixiviación

Una muestra (L-1) de granulometría gruesa a fina proveniente de una planta de lixiviación. Para el análisis de difracción láser se trabaja con la fracción bajo los 2 mm separada mediante tamizado húmedo.

1.3.- Metodología

1.3.1.- Etapa de Gabinete I

El trabajo de esta memoria de título se centra en la aplicación de la técnica de difracción láser vía húmeda, no obstante, previo a este trabajo, es necesario identificar los aspectos teóricos que sustentan la metodología empleada. En esta primera etapa de gabinete se hace una recopilación bibliográfica poniendo énfasis en trabajos previos, aplicaciones de la difracción láser y alternativas de medición. También, abarcando un aspecto teórico, se realiza un resumen de las características cristalográficas/minerales de los estándares de arcilla utilizados, información que facilitará el análisis de resultados y conclusiones.

1.3.2.- Etapa de Laboratorio

Corresponde al trabajo principal de esta memoria de título y consiste en aplicar el método de difracción láser vía húmeda a distintas muestras, tanto estándares minerales como residuos mineros de forma sistemática, variando las condiciones de medición y modificando parámetros instrumentales.

En una primera instancia, se realiza una caracterización de las muestras. Para los estándares minerales se realiza un resumen de la información química/mineral que entregan sus proveedores, mientras que las que corresponden a residuos mineros son caracterizadas mediante descripciones macroscópicas y DRX.

Una vez recopilada esta información, comienza el trabajo de medición que se divide en tres etapas, en las que se evalúa el efecto del ultrasonido (parámetro instrumental), según tipo de fluido y tiempo de permanencia en él (condiciones de medición), tal y como indica la Figura 1.1.

Todas las herramientas analíticas son proporcionadas por los laboratorios del Instituto de Geología Económica Aplicada de la Universidad de Concepción.



Figura 1.1 Diagrama resumen etapas de la metodología establecida en laboratorio

1.3.3.- Etapa de Gabinete II

Se seleccionan aquellos datos representativos de cada muestra, los que son agrupados y graficados para su posterior análisis. Asimismo se identifican los factores y variables más importantes que pueden influir o alterar los resultados.

1.4.- Agradecimientos

A la Dra. Ursula Kelm, por haberme confiado este trabajo y haber sido una guía importante durante todo el proceso.

Al Dr. Oscar Jeréz, quien desde el principio fue una fuente de soluciones a todos los problemas y dudas que se presentaron en el camino.

A la Sra. Miriam, Sra. Mónica y Miguel, por la buena voluntad y ayuda desinteresada.

A las amigas y amigos que conocí en el camino, sobre todo a esos que presionaban para que termine la memoria.

Finalmente a mi familia, en especial a mi mamá y a mi papá por la infinita paciencia, dos incondicionales que nunca han dejado de acompañarme.



2.- GRANULOMETRÍA

La palabra granulometría deriva de “gránulo” (pequeño grano) proveniente del latín “*granulum*” y “metría” (cualidad de medida) que deriva del griego “*metrón*” y hace referencia a la medición de las partículas que conforman un agregado.

Las partículas que en conjunto constituyen una muestra ya sea de origen artificial o natural, raramente poseerán las mismas dimensiones. Ante esta heterogeneidad, para distintos fines, es necesario definir cómo cualidad a evaluar las distintas fracciones de tamaño presente en ella, además de definir el concepto de tamaño de partícula, y cómo éste es afectado por la morfología.

Para efectos de este trabajo, se entiende como partícula, cualquier cuerpo sólido de tamaño y forma variada que es parte de una muestra proveniente de sedimentos, sistemas particulados como el suelo, lodos o agregados derivados de procesos industriales, entre otros, la que puede o no estar aglomerada. El punto en el cual un aglomerado puede ser considerado una partícula, dependerá del contexto específico en el cual esté siendo aplicado un estudio de granulometría.

2.1.- Tamaño y Forma de una Partícula

El tamaño de una partícula se entiende como una característica física dimensional (longitud en una, área en dos y volumen en tres dimensiones), mientras que, la forma de una partícula es adimensional. En general, no resulta conveniente expresar el tamaño de una partícula en μm^3 (Hart *et al.*, 2011). Debido a esto último, se utiliza una longitud característica para definir su tamaño, siendo ésta afectada por la forma y/u orientación de la partícula.

El tamaño de aquellas partículas que presentan uniformidad, como por ejemplo un cubo o una esfera, puede estar representado por una sola medida de longitud (radio, diámetro, lado, etc.), no obstante, en la práctica se trabaja con partículas irregulares, en las que es necesario definir un tamaño equivalente desde el punto de vista físico para describir sus tres dimensiones en un solo número. La dimensión de la partícula que se considera válida (longitud máxima o mínima, volumen, área superficial, etc.), puede variar según cuál sea la técnica que se utilice para hacer un análisis granulométrico y puede corresponder o no, a una medida verdadera de la partícula. Por ende, cada técnica proporcionará una respuesta diferente dependiendo de cuál sea la dimensión

que midan. Las más usadas han sido resumidas de Hart *et al.* (2011) y se describen a continuación:

2.1.1.- Diámetro de la esfera equivalente

Este método busca equiparar una propiedad de la partícula (irregular) en estudio, a una esfera cuyo tamaño puede ser expresado en una sola longitud: su diámetro (Figura 2.1).

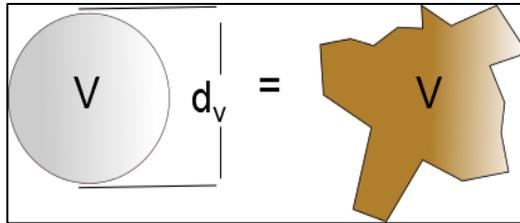


Figura 2.1 Diámetro (d_v) de una esfera de volumen equivalente V de una partícula. Modificado de Rawle (2002).

(a) Diámetro de una esfera con volumen equivalente (d_v), calculado a partir del volumen de la partícula (V) usando la siguiente fórmula (1).

$$d_v = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{1/3} \quad (1)$$

(b) Diámetro de una esfera de superficie equivalente (d_s): donde A es la superficie externa de la partícula.

$$d_s = \left(\frac{A}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2)$$

2.1.2.- Diámetro de una circunferencia equivalente

También llamado diámetro de una esfera de área proyectada equivalente. Donde A es el área proyectada de una partícula, que puede ser expresada como el diámetro de un disco (d_A) de área equivalente (A). Esta medida dependerá de la orientación que posea la partícula al momento de la proyección.

$$d_A = \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3)$$

2.1.3.- Diámetros derivados

a) Diámetros de Feret (d_F)

Corresponden a diámetros medidos por un set de calibradores a lo largo de diferentes orientaciones (Figura 2.2). En comparación con los métodos antes descritos, este tiene la ventaja de medir una dimensión física verdadera de la partícula, pues mide la distancia entre dos líneas paralelas entre sí, que son tangenciales a la partícula. Sin embargo, este método no detecta concavidades dentro de ella misma, sobreestimando en muchos casos el grosor. Las mediciones se realizan a través de análisis de imágenes digitales, en donde se escanean un número determinado de orientaciones, y luego se conserva el valor máximo y el mínimo. Este método a menudo es usado en microscopía.

b) Diámetros de Martin (d_M)

Corresponde a la longitud de una línea que bisecta una sección al azar proyectada, en dos áreas de igual superficie (Figura 2.3). Al igual que el Diámetro de Feret, se conserva más de un valor y es usado en microscopía.

c) Diámetro del máximo disco inscrito (d_{IN})

Corresponde al diámetro del disco de mayor tamaño que cabe totalmente dentro de la partícula (Figura 2.4). Esta es una medida verdadera de la partícula, siendo un método no sensible a la concavidad. El (d_{IN}) puede ser obtenido a través de imágenes digitales avanzadas y corresponde también a la medida crítica de una partícula al pasar en una malla de tamizaje.

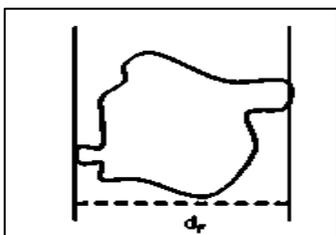


Figura 2.2 Diámetros de Feret (d_F).

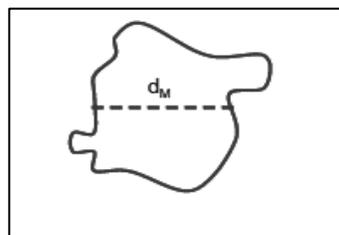


Figura 2.3 Diámetros de Martin (d_M).

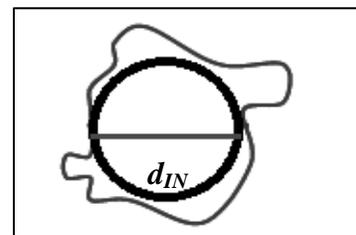


Figura 2.4 Diámetro del máximo disco inscrito (d_{IN}).

2.1.4.- Diámetro Hidrodinámico

Cuando una partícula esférica es suspendida en un fluido, esta tendrá un movimiento descendente debido a la fuerza de gravedad, acelerando hasta llegar a una velocidad terminal (constante), donde la fuerza de gravedad se igualará a la viscosidad del fluido. Al equiparar estas fuerzas y, basándose en la velocidad de asentamiento, es posible estimar el tamaño de la partícula, considerando una partícula irregular, la velocidad terminal de esta, puede ser comparada con una esfera de igual densidad en el mismo tipo de fluido. El diámetro estimado en este caso es el de una esfera que podría asentarse a través del fluido a la misma velocidad terminal. Esta medida es conocida como Diámetro de Stokes, pues deriva de la ley con el mismo nombre (Fórmula 4).

$$d_{st} = \left[\frac{18\eta v}{(\rho_p - \rho_f)g} \right]^{1/2} \quad (4)$$

Siendo d_{st} el diámetro de Stokes (m), ρ_p es la densidad de la partícula y ρ_f la densidad del fluido, ambos en (kg/m^3), η es la viscosidad del fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) y v la velocidad de asentamiento (m/s), la que puede ser en sentido vertical ascendente o descendente, dependiendo de las diferencias de densidades entre la partícula y el fluido. El diámetro hidrodinámico es ampliamente usado en la industria mineral, y puede ser obtenido a través de dispositivos que calculan distribución de tamaño de partículas basados en análisis de sedimentación.

2.1.5.- Tamaño Malla de Tamiz

Otra forma de realizar un análisis granulométrico, es realizar el fraccionamiento de un determinado agregado a través de un set de tamices, en donde cada tamiz tiene una determinada abertura de malla, siendo esta la longitud de borde de un agujero, el que puede tener forma cuadrada o circular. El tamaño de la partícula queda definido por la malla más fina a través de la cual puede pasar, y la malla más gruesa a través de la cual no puede (Figura 2.5).

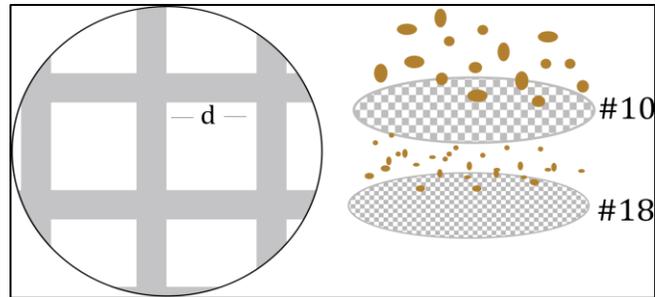


Figura 2.5 Tamaño de partícula según tamizado; “d” corresponde a la abertura de la malla. Donde malla #10= 2mm y malla #18= 1 mm, según norma ASTM E11-17. Así el tamaño de la menor sección de las partículas entre estos dos tamices queda definido como mayor a 1 mm y menor a 2 mm.

2.2.- Análisis Granulométrico

Un análisis granulométrico, también denominado análisis de distribución de tamaño de partículas (PSD, siglas en inglés), divide el conjunto de partículas que componen una muestra inicialmente homogénea, en determinadas fracciones de tamaño, obteniendo como resultado final una base de datos (Tabla 2.1) que normalmente se representa en forma gráfica a través de histogramas o diagramas de frecuencia.

Tabla 2.1 Ejemplo de base de datos obtenida de tamizado.

N° de malla ASTM	Tamaño (µm)	% en peso retenido	% que pasa
<400	<37	14,0	-
400	37	1,5	14,0
270	53	1,5	15,4
200	74	1,3	17,0
140	105	1,4	18,2
100	149	1,1	19,6
80	177	1,1	20,8
60	250	3,6	21,9
35	500	4,7	25,5
18	1000	6,9	30,2
10	2000	11,1	37,1
5	4000	11,9	48,2
1/4"	6300	29,7	60,1
1/2"	12500	10,2	89,8
3/4"	19000	0	100

Esta representación gráfica, muestra en la ordenada la recurrencia porcentual de un determinado tamaño, cuantificación que puede ser en base a volumen, masa o n° de partículas, y en la abscisa la dimensión, siendo esta última variable representada en escala logarítmica debido a la amplitud de los datos que pueden abarcar, desde micrómetros a centímetros, los que graficados en escala natural generan que los valores más pequeños queden excesivamente comprimidos dificultando su representación y posterior análisis (Gráfico 2.1).

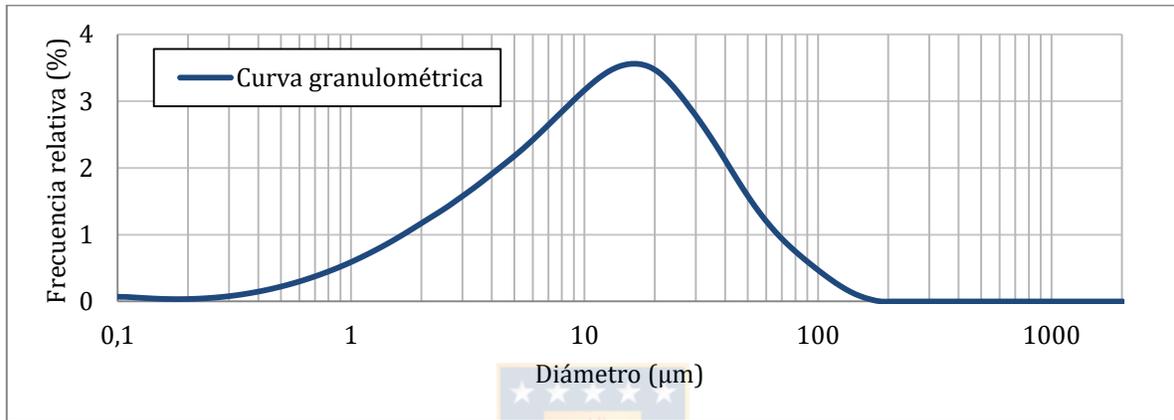


Gráfico 2.1 Ejemplo de curva granulométrica de frecuencia relativa obtenida por difracción láser.

Esta distribución también puede ser expresada de forma acumulativa (Gráfico 2.2), en tal caso, el gráfico muestra de manera explícita el porcentaje de partículas menor a un determinado tamaño o “porcentaje que pasa”. Ambas representaciones, a menudos son incluidas en un mismo gráfico.

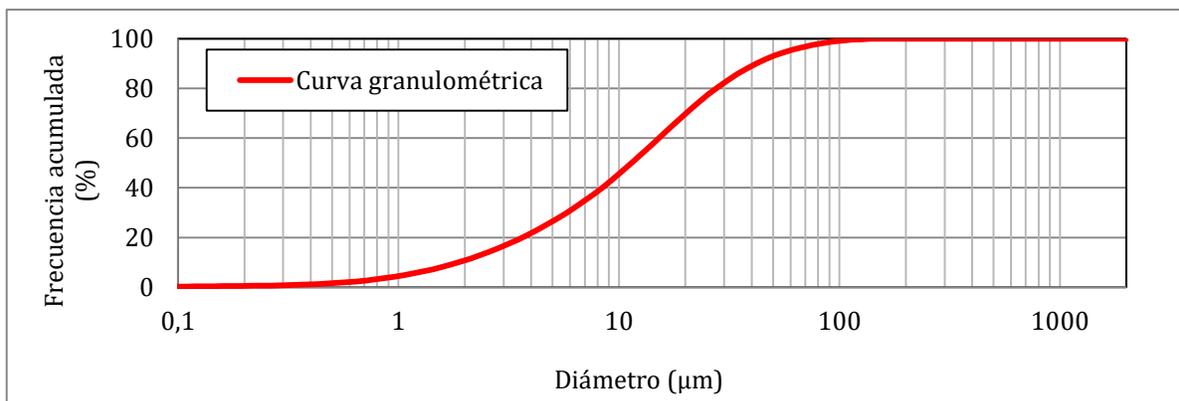


Gráfico 2.2 Ejemplo de curva granulométrica de frecuencia acumulada obtenida por difracción láser.

2.3.- Métodos Analíticos

Para realizar una caracterización granulométrica se utilizan tanto métodos físicos como ópticos, los primeros, centrados en la separación mecánica de las partículas, mientras que los segundos miden las respuestas de las partículas a diversos estímulos. El factor más importante que afecta un análisis de PSD es la irregularidad de la forma de las partículas (Konert & Vandenberghe, 1997; Dur *et al.*, 2004; en Pieri *et al.*, 2006), por lo que el resultado que arroja cada técnica depende del tamaño que se considere medir. En base al rango aproximado de tamaño, algunos autores recomiendan considerar técnicas como la difracción láser para muestras con rangos menores a 2 mm o el tamizado para muestras cuyo tamaño máximo nominal tenga un alcance centimétrico (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Algunas técnicas de medición y rangos recomendados de aplicación (Abbireddy & Clayton, 2009 en Villalobos, 2015).

Técnica de medición	Definición de tamaño	Rango de tamaño (μm)
Tamizado	Abertura cuadrada del tamiz	75-125000 ⁽¹⁾
Sedimentación	Diámetro de Stokes	2-60
Eléctrica	Diámetro esférico igual al volumen desplazado	0,4-1200
Difracción Láser	Diámetro esférico equivalente	0,02-2000 ⁽²⁾
Óptica	Diámetro circular equivalente a área proyectada	1-5000
Imagen	Largo mínimo de imagen proyectada	0,5-10000

⁽¹⁾ Norma ASTM C117-17 estandariza procesos de tamizaje para partículas menores que 75 μm mediante tamizado húmedo. ⁽²⁾ Rangos pueden variar según el proveedor de instrumentos y el tipo de tecnología usada por un medidor en específico.

A continuación, se describen los métodos usados en este trabajo y si corresponde, la estandarización que regula a cada uno, la que incluye tanto normas ISO (*International Organization for Standardization*) como normas A.S.T.M. (*American Society of Testing Materials*).

2.3.1.- Tamizado

Método físico que permite clasificar las partículas de un agregado sobre la base de la dimensión del área de su menor sección (Apartado 2.1.5.- Tamaño Malla de Tamiz), para lo cual se emplean tamices numerados y ordenados de forma decreciente. Las muestras son incorporadas en el set de tamices, para luego ser puesto en una plataforma vibratoria que permitirá que las aglomeraciones

de partículas se disgreguen de forma mecánica, clasificando cada partícula a medida que vayan pasando o siendo retenidas. El inconveniente de este método es que no toma en cuenta la forma de las partículas. De esta manera, formas aciculares pueden pasar a través de un tamiz a pesar de poseer un volumen mayor, mientras que partículas con formas laminares y delgadas pueden quedar retenidas, teniendo un volumen mucho menor.

2.3.1.1.- Equipos

a) Tamices

Los tamices de malla empleados para realizar este tipo de ensayo están regulados por las normas ASTM E11-17 e ISO 3310/1 (Tabla 2.3), las que discrepan en que el número de aberturas es menor para la primera. La ASTM E11, bajo la cual están normados los tamices utilizados en este trabajo, puntualiza que la malla (#) de alambre debe estar montada o unida a un marco o bastidor de material rígido no corrosivo (latón o acero inoxidable), sin distorsión, soldadura u ondulación, evitando que en esta unión se dé lugar a la acumulación del material tamizado. El fondo del bastidor debe permitir el acople y deslizamiento con cualquier otro tamiz del mismo diámetro.

Esta especificación se aplica para tamices con aberturas nominales que van desde los 125 mm a los 20 μm , donde cada uno se distingue y ordena según su número de malla, el cual indica la cantidad de alambres (en el tejido) que hay por pulgada lineal. De esta manera, a mayor número de malla, menor será la distancia de apertura (Figura 2.6). Asimismo, define rangos de tolerancia para el valor promedio de apertura en cada # (malla) y diámetro del alambre con sus respectivas varianzas.

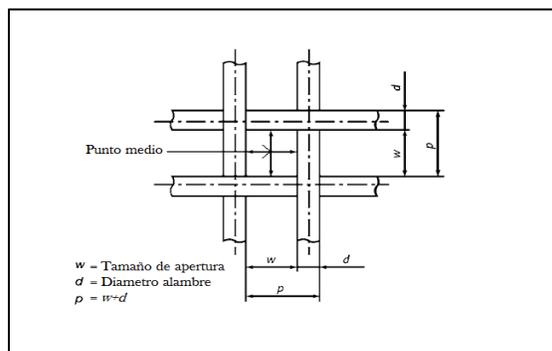


Figura 2.6 Parámetros de malla de tamizaje. Modificado de norma ASTM E11-17.

Tabla 2.3 Numero de malla y tamaño de aberturas según normas ISO 3310-1:2016 y ASTM E11-17.

ISO (mm)	ASTM (#)	ISO (mm)	ASTM (#)	ISO (mm)	ASTM (#)
125	5"	7,1	-	0,425	N°40
112	-	6,7	0,265"	0,4	-
106	4,24"	6,3	1/4"	0,355	N°45
100	4"	5,6	3 ^{1/2} "	0,315	-
90	3,5"	5	-	0,3	N°50
80	-	4,75	N°4	0,28	-
75	3"	4,5	-	0,25	N°60
71	-	4	N°5	0,224	-
63	2 ^{1/2} "	3,55	-	0,212	N°70
56	-	3,35	N°6	0,2	-
53	2,12"	3,15	-	0,18	N°80
50	2"	2,8	N°7	0,16	-
45	1 ^{3/4} "	2,5	-	0,15	N°100
40	-	2,36	N°8	0,14	-
37,5	1 ^{1/2} "	2,24	-	0,125	N°125
35,5	-	2	N°10	0,112	-
31,5	1 ^{1/4} "	1,80	-	0,106	N°140
28	-	1,70	N°12	0,1	-
26,5	1,06"	1,6	-	0,09	N°170
25	1"	1,40	N°14	0,08	-
22,4	7/8"	1,25	-	0,075	N°200
20	-	1,18	N°16	0,071	-
19	3/4"	1,12	-	0,063	N°230
18	-	1	N°18	0,056	-
16	5/8"	0,9	-	0,053	N°270
14	-	0,85	N°20	0,05	-
13,2	0,53"	0,8	-	0,045	N°325
12,5	1/2"	0,71	N°25	0,04	-
11,2	7/16"	0,63	-	0,038	N°400
10	-	0,6	N°30	0,036	-
9,5	3/8"	0,56	-	0,032	N°450
9	-	0,5	N°35	0,025	N°500
8	5/16"	0,45	-	0,02	N°635

b) Balanzas

Las balanzas deben contar con una precisión de 0,1 g o 0,1% de la masa de la muestra en caso de tratarse de un agregado fino. En caso de tratarse de un agregado grueso o una mezcla de ambas granulometrías se recomienda una balanza de precisión de 0,5 g o 0,1% de la masa de la muestra, cualquiera de las dos que sea mayor según especifica la norma ASTM C136/C136M – 05 (norma para el procedimiento de tamizaje en granulometrías finas a gruesas).

c) Agitador mecánico

Corresponde a una plataforma vibratoria cuyo fin es provocar el movimiento de las partículas para que estas reboten y giren adquiriendo diferentes orientaciones en la superficie del tamiz. Su uso no se recomienda por más de 10 minutos seguidos (ASTM C136/C136M – 14).

Finalmente el tamizaje puede ser seco o húmedo. El primero normado por ASTM C 136M-14 en agregados finos a gruesos, mientras que el segundo se aplica en agregados con partículas más finas que 75 μm según norma ASTM C 117-17 y es usado cuando no se puede generar una separación efectiva de las fracciones de tamaño, sobre todo las más pequeñas que tienden a aglomerarse.

En algunos casos, cuando hay un incentivo termodinámico para conformar un agregado (por ej. fuerzas de Van der Waals), estas partículas se reaglomerarán luego de una separación mecánica (molienda, ultrasonidos, etc.), para lo cual es necesario usar dispersantes químicos previo al tamizado (Hart *et al.*, 2011).

2.3.2.- Difracción Láser

A grandes rasgos, este método no mide el tamaño de las partículas directamente, sino que proyecta sobre partículas previamente dispersadas un rayo láser. Estas difractarán la luz incidente en todas direcciones, con un patrón de intensidad que dependerá del tamaño que esta posea (Higushi & Yoshida, 2012). Una determinada partícula dispersará luz frontalmente a un ángulo, inversamente proporcional a su tamaño, es decir, partículas pequeñas dispersarán la luz a grandes ángulos, y viceversa, dando origen a lo que conoce como anillo de Airy (Figura 2.7), mientras que la intensidad de dispersión será directamente proporcional al número de partículas (Frias *et*

al., 1988). Estos patrones, son evaluados por detectores de alta resolución para generar una distribución de tamaño de partículas basándose en las teorías Fraunhofer y Mie.

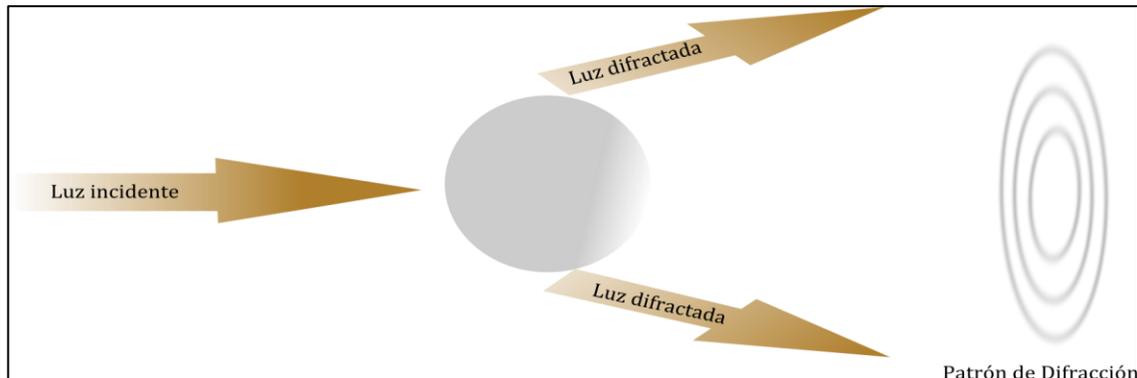


Figura 2.7 Esquema difracción de luz teniendo como obstáculo una partícula esférica.

Se asume para efectos de este método, que la forma de las partículas es esférica (Higushi & Yoshida, 2012), es decir, se ocupa como tamaño de referencia una esfera de volumen equivalente a la partícula irregular que es objeto de estudio y el resultado será independiente de la densidad de las partículas. Las ventajas de este método radican en la rapidez del análisis, su amplio rango de aplicación y la posibilidad de obtener una buena representatividad con una mínima cantidad de muestra. Sin embargo, resulta susceptible a la variación del índice de refracción de la muestra (Pieri *et al.*, 2006), sobre todo en partículas más pequeñas además de tender a subestimar la fracción de tamaño arcillosa, puesto que en la difracción laser las partículas no esféricas reflejan el área de una sección transversal, la cual puede ser mayor que una esfera del mismo volumen (Jonasz, 1987, en Pieri *et al.*, 2006).

2.3.2.1.- Ondas Electromagnéticas

Tradicionalmente la luz es interpretada dualmente. Se define como un haz de fotones para explicar los fenómenos de interacción (emisión y absorción de luz, ej. el efecto fotoeléctrico) y, como una onda electromagnética para explicar los fenómenos de propagación (reflexión, refracción, dispersión, interferencia, difracción y polarización). Estos comportamientos sustentan la base teórica de la difracción láser (Resumidos de referencia web 1).

Una onda electromagnética (OEM) es una perturbación, capaz de propagarse en un medio material (agua, aire, fibras ópticas, etc.) y en el vacío, a una velocidad constante transportando energía. Según la teoría de Maxwell, está conformada por dos campos perpendiculares entre sí

(un campo eléctrico y uno magnético) que vibran transversalmente a su dirección de propagación (Figura 2.8).

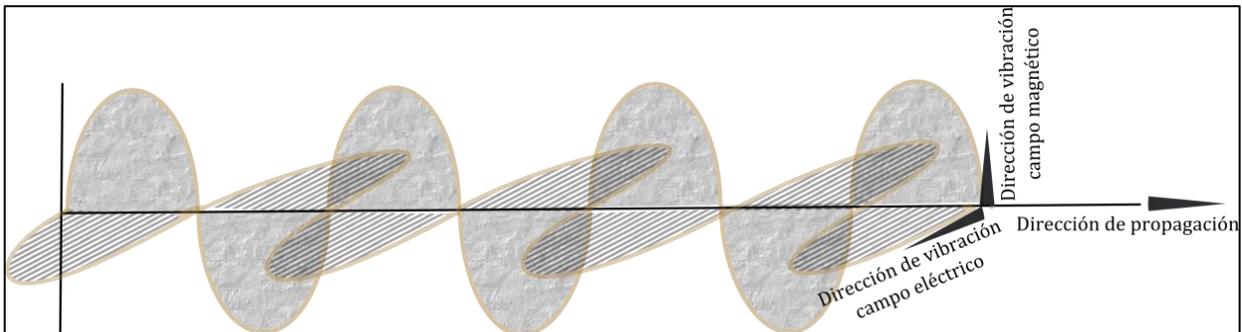


Figura 2.8 Onda electromagnética y sus planos de vibración perpendiculares entre sí.

Estos movimientos oscilatorios están caracterizados por (Figura 2.9):

Amplitud A : valor de elongación máxima de la onda, medido en metros (m).

Intensidad I : proporcional al cuadrado de la amplitud.

Longitud de onda λ : distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos, medido en metros (m).

Fase ϕ : estado de vibración de un punto de la onda.

Período T : corresponde al tiempo en segundos (s), que tarda la onda en recorrer una distancia igual a λ .

Frecuencia f (6): ciclos u oscilaciones por unidad de tiempo. Su unidad de medida es el Hertz ($\text{Hz}=\text{s}^{-1}$).

Velocidad de propagación v (7): desplazamiento efectuado por la onda en una unidad de tiempo.

Frecuencia angular ω (8): frecuencia expresada considerando un movimiento circular. Se expresa en radianes por segundo.

Número de onda k (5 y 9): número de veces que vibra una onda en una unidad de distancia (m^{-1})

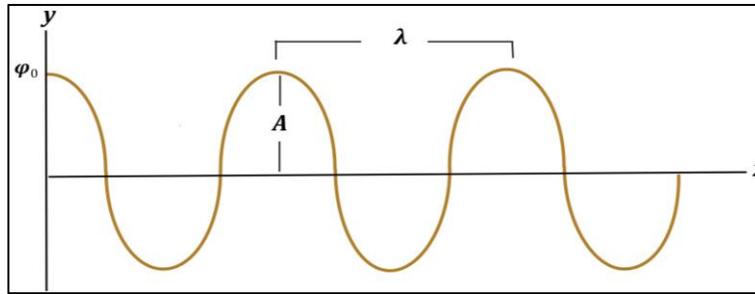


Figura 2.9 Onda armónica y sus componentes

$$k = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) = \quad (5) \qquad f = \left(\frac{1}{T}\right) \qquad (6) \qquad v = \left(\frac{\lambda}{T}\right) = \lambda f \qquad (7)$$

$$\omega = \left(\frac{2\pi}{T}\right) \qquad (8) \qquad k = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \qquad (9)$$

Matemáticamente, la ecuación que describe el movimiento oscilatorio de una onda armónica simple, está dada a continuación y se aplica para conocer la altura de la onda (y) a una cierta distancia (x) en un instante de tiempo (t).

$$y = y(x, t) = A \operatorname{sen} (\omega t - kx + \varphi_0) \qquad (10)$$

Además, cuando ésta perturbación se hace en un medio óptico (cualquier material a través del cual se propagan y transmiten las ondas electromagnéticas), es posible determinar el índice de refracción (n) del medio (Fórmula 11), que corresponde a la razón entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío (c) y la velocidad en el medio (v). La velocidad de propagación en un determinado medio es inversamente proporcional a la densidad del material.

$$n = \left(\frac{c}{v}\right) \qquad (11)$$

2.3.2.2.- Fenómenos de Propagación

Cuando una onda perturba uno o más medios materiales, su transmisión estará sujeta a la naturaleza de estos, pudiendo haber cambios en su velocidad y dirección. Estos cambios, se conocen como fenómenos de propagación y son resumidos a continuación (Figura 2.10).

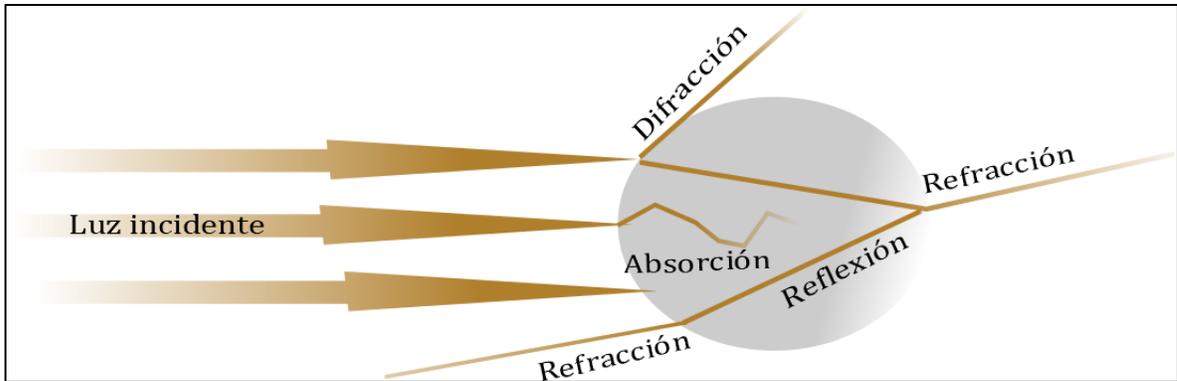


Figura 2.10 Fenómenos de propagación de la luz al presentarse un obstáculo.

Ocurre reflexión cuando una onda es reflejada al tomar contacto con la frontera entre dos medios, propagándose (en parte) en dirección opuesta a la inicial, con el mismo ángulo incidente (en relación a la normal a la superficie). Simultáneamente aquella luz que no es reflejada, sufre refracción, que consiste en un cambio de dirección del rayo, al propagarse en un segundo medio. Este último cambio de dirección, también va acompañado de un cambio en la velocidad de propagación debido a la diferencia de densidades en los medios. Ambos fenómenos ocurren al haber un contacto oblicuo entre el haz de luz y la superficie del medio. La absorción corresponde a una pérdida de la potencia o atenuación de la amplitud de la onda por la transmisión de la energía en medios materiales.

Otro fenómeno relativo a todos los movimientos ondulatorios es la interferencia, ésta se genera por la superposición de dos o más ondas en el espacio, lo que puede resultar en la composición de una nueva onda, cuyas características dependerán del tipo de interferencia producida. Hay interferencia constructiva al superponerse dos ondas con la misma frecuencia y en fase. Dos ondas están en fase si presentan el mismo desplazamiento en un mismo tiempo, matemáticamente esto quiere decir que presentan la misma frecuencia y que la diferencia de fase es igual a cero o es una constante múltiplo de la longitud de onda del haz de luz, gráficamente se evidencia si las crestas y valles de ambas ondas coinciden (misma posición en cualquier punto). La onda resultante está dada por la suma de las amplitudes individuales de las ondas que interactúan (Figura 2.11). Cuando las ondas de un rayo están en fase temporal y espacial, esta fuente de luz es considerada coherente.

En caso contrario, si dos ondas con la misma frecuencia están en oposición de fase (desplazadas en 90° o media longitud de onda) y poseen la misma amplitud, al superponerse se anularán, puesto que sus amplitudes se restan, la onda resultante tendrá una intensidad igual a cero, esto se conoce como interferencia destructiva (Figura 2.12).

Si la frecuencia y el desfase corresponden a un valor cualquiera, la onda resultante se obtiene sumando los vectores individuales de las amplitudes en cada punto.

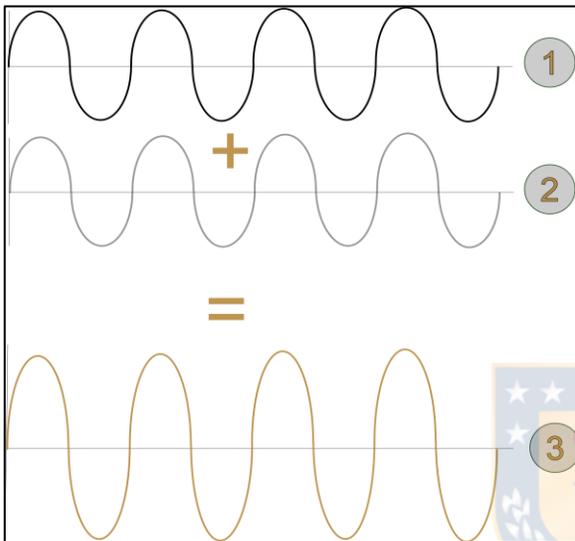


Figura 2.11 Ondas en fase. 1 y 2 originan interferencia constructiva. Onda resultante 3 posee amplitud mayor. Fuente de luz coherente, ondas en fase. Modificado de Referencia web 1.

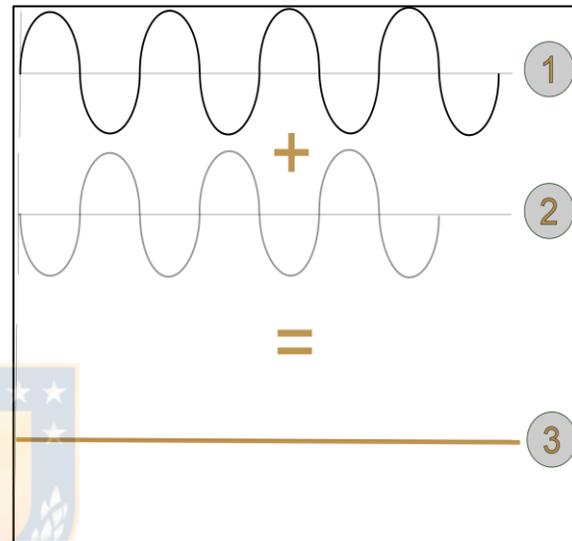


Figura 2.12 Ondas desfasadas. 1 y 2 generan interferencia destructiva. Onda resultante 3 posee amplitud= 0. Modificado de Referencia web 1.

La difracción por su parte, es la distorsión de la onda al encontrarse con un nuevo medio (obstáculo), sin atravesarlo. Esta interacción con el borde de una partícula o una rendija da origen a un nuevo foco emisor de onda de iguales características al rayo direccionado inicial. Así, la luz no se concentrará en un solo punto, sino que se dispersará produciendo una superposición de ondas, de tal manera que la difracción es un fenómeno de interferencia.

La interferencia de estos nuevos focos emisores de onda dará como resultado un patrón de difracción generado por las interferencias constructivas y destructivas. Si observamos este patrón en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda (por ej. un sensor como los usados en quipos de difracción láser) se obtiene una secuencia superpuesta de zonas circulares iluminadas y con sombras, lo que se conoce como Disco de Airy (Figura 2.13). La intensidad

luminosa de los anillos claros es directamente proporcional al número de partículas vistas con el haz luminoso, y los radios de los anillos son inversamente proporcionales al diámetro de las partículas (Frias *et al.*, 1988).



Figura 2.13 Patrón de interferencia dado por difracción de la luz: Disco de Airy. Modificado de Frias *et al.* (1988).

2.3.2.3.- Luz Láser

El espectro electromagnético que se puede encontrar en el universo es infinito, se extiende desde longitudes de onda muy pequeñas como los rayos cósmicos (10^{-15} m), hasta aquellas de mayor longitud como las ondas de frecuencia baja (del orden de 10 km). De todo este espectro solo una pequeña parte corresponde a la luz visible, cuyo rango comprende longitudes de onda desde los 380 a los 780 nm (Referencia web 1).

En el apartado anterior, se explicó la interferencia y difracción considerando una fuente de luz con una sola longitud de onda, la que estaba polarizada, es decir su dirección de vibración está contenida en un solo plano, lo que simplifica la evaluación de los fenómenos de propagación.

Por el contrario, un haz de luz blanca (un rayo de sol) estará conformado por ondas de todas las longitudes en el rango antes mencionado, con sus respectivos campos electromagnéticos vibrando en todas direcciones (perpendiculares a la dirección de propagación y entre sí), además de presentar desfases variables y azarosos entre ellas, estas características son propias de las fuentes de luz consideradas incoherentes. Este tipo de fuente de luz arrojará sombras borrosas, que

enmascaran los efectos producidos por la difracción, por lo que para producir un patrón de interferencia observable a escala micrométrica, como la Figura 2.9, es necesario contar con un frente de onda coherente, capaz de mantener la diferencia de fase constante. Este es el caso de la luz láser.

La luz láser acrónimo del inglés *Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation*, es producida por dispositivos que amplifican la luz y sus principios de generación se basan en el comportamiento atómico.

Los átomos (Figura 2.14) están conformados por electrones que se encuentran girando sobre un núcleo (conformado por protones y neutrones). Estos electrones giran en distintos niveles de energía definidos para cada tipo de átomo, siendo además, capaces de “saltar” de un nivel a otro, absorbiendo o emitiendo una unidad de luz (fotón), cuya energía es igual a la diferencia entre los dos niveles de la transición. Cuando un electrón se encuentra en un nivel de mayor energía tenderá espontáneamente a caer en uno de menor energía (relajación atómica), esto se conoce como “emisión espontánea” y es el principio que rige la producción de la mayor parte de la luz que vemos (fuentes naturales y artificiales). No obstante, este “salto” de un nivel mayor a otro inferior puede ser estimulado por un fotón cuya energía sea igual a la diferencia entre los dos niveles, provocando la generación de un nuevo fotón, idéntico al que indujo esta transición, esto es lo que se conoce como “emisión estimulada. El proceso, se basa en las probabilidades de producir una emisión por efecto de la radiación (Arosa & De la Fuente, 2015). Para lograr esta alta probabilidad de emisión es necesario generar lo que se denomina “una inversión de población” (Figura 2.14b), que consiste en provocar que la mayor parte de los átomos de un medio activo (por ej. un gas), se encuentren excitados, de manera que los electrones ocupen niveles elevados de energía, en los que tarden un tiempo relativamente largo en desexcitar por emisión espontánea, beneficiando la acumulación de electrones en un nivel superior, lo que favorece una posible emisión. De esta manera la interacción de un fotón (de determinada energía) con un átomo previamente excitado, provocará la emisión de dos fotones nuevos con las mismas características que el inicial (referencia web 3).

La luz láser se diferencia de otras fuentes de luz por conseguir muchos procesos de emisión estimulada al mismo tiempo. Esto gracias a que la cavidad (resonador óptico) en donde ocurre el

proceso de estimulación, está dispuesta entre dos o más espejos, así la luz saliente (fotones) del medio es reflejada nuevamente sobre él y esta nueva radiación induce nuevas emisiones con las mismas características, lo que permite su amplificación (Figura 2.15). Este sistema permite extraer en forma eficiente la energía en los átomos o moléculas contenidos en la cavidad amplificadora.

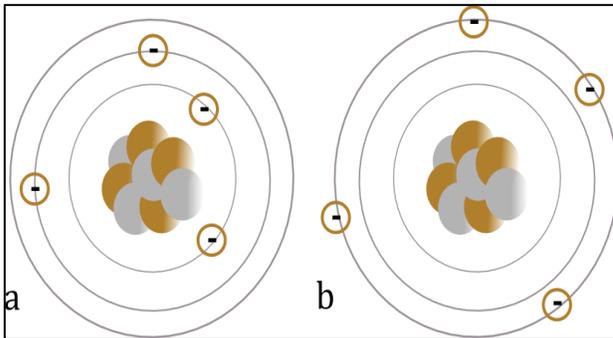


Figura 2.14 a) Átomo y sus niveles de energía en estado natural. b) átomo con inversión de población, con electrones ocupando niveles altos de energía.

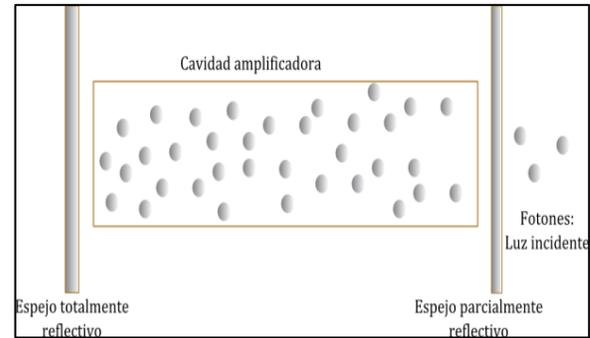


Figura 2.15 Amplificación de la luz por medio de lentes de alta reflectividad. Fotones emitiéndose desde la cavidad amplificadora. Basado en Ormachea (2007).

Así, el haz de luz resultante será monocromático (conformado por una sola longitud de onda), estará polarizado y direccionado (tendrá una sola dirección de vibración y de propagación), y estará en fase (las ondas tendrán la misma posición en el mismo tiempo), lo que lo convierte en una fuente de luz altamente coherente que puede emitirse en pulsos de corta duración y alcanzar una alta potencia debido a su capacidad de ser amplificado. Todo esto, permite que sea la fuente de luz ideal para la observación de un patrón de difracción.

2.3.2.4.- Patrones de Difracción

Como ya se explicó, la difracción en diferentes ángulos de un haz de luz, al encontrar un obstáculo (partícula) generará interacción entre las ondas, dando lugar a interferencias constructivas y destructivas respectivamente. Esto se traduce visualmente en la superposición de zonas donde la intensidad de luz es máxima y otras donde es mínima (luz y sombras), conocido como patrón de difracción o de interferencia (Figura 2.13). Cuanto mayor sea el tamaño de una partícula menores serán los ángulos de dispersión y menores las distancias entre los anillos de sombras. A través de las teorías de difracción de Fraunhofer y Mie, es posible calcular el tamaño

de las partículas. Estas teorías predicen la forma en que la luz es difundida, asociando los ángulos de difracción al tamaño de la partícula.

Según indican los proveedores de instrumentos de medición como Fritsch (referencia web 4), la Teoría de Fraunhofer describe aquella desviación de la luz que se produce solo por difracción sin considerar los fenómenos de difusión de la luz como la reflexión y refracción (Figura 2.10). Por lo tanto, para su aplicación se asume que el material es opaco y que todas las partículas difractan la luz con la misma eficiencia. Debido a esto, no se consideran las propiedades ópticas del material estudiado, como el índice de refracción. La fuente de luz debe corresponder a un frente de ondas paralelo ubicado en un campo lejano que se desplaza a través de un lente. La longitud de onda usada debe ser menor al tamaño de las partículas estudiadas. Equipos que usan este patrón de difracción miden generalmente hasta el rango de los $0,1 \mu\text{m}$.

Esta teoría deja de ser fiable en las partículas de diámetro demasiado pequeño o partículas que tienden a ser transparentes, donde los fenómenos de difusión (absorción, reflexión y refracción) son más significativos. Para ello, se utiliza a Teoría de Mie, que corresponde a una solución de las ecuaciones de Maxwell para la dispersión de ondas electromagnéticas en partículas esféricas. Los equipos capacitados para realizar este tipo de medición permiten medir partículas de hasta 10 nm y requieren conocer el índice de refracción del medio dispersante, así como también, del material objeto de medición con su correspondiente índice de absorción.

2.3.3.-Entrega de Resultados

El método de difracción láser entrega una base de datos con los resultados de tamaños de partículas. Es posible representar estos datos en una distribución gráfica que puede ser interpretada a través de valores característicos denominados “estadísticos”. Estos entregan una interpretación parcial de los datos y estarán sujetos al tipo de distribución en el cual se basa la medición y de cómo se presenten los datos, si estos son agrupados en intervalos o no, etc. Los más usados para describir e interpretar la granulometría de determinadas muestras son descritos a continuación:

2.3.3.1.- Medidas de Tendencia Central

Corresponden a valores descriptivos de un conjunto de datos que tienden a agruparse en un punto central.

a) Media aritmética

Es el promedio más usado en estadística y representa el centro de gravedad de la distribución. Se obtiene sumando todos los datos obtenidos, para luego dividir este total por el número de observaciones (Fórmula 12).

$$\text{Media aritmética} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (12)$$

En caso de tratarse de datos agrupados en intervalos (Fórmula 13), se considera la marca de clase (x_i), que corresponde al dato intermedio en un intervalo de tamaño, multiplicada por su frecuencia absoluta (n_i), la sumatoria de estos datos se divide por el número total de observaciones (n). Esto equivale a multiplicar la marca de clase por la frecuencia relativa (f_i).

$$\text{Media aritmética para datos agrupados} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i n_i}{n} = \sum_{i=1}^n f_i x_i \quad (13)$$

Se recomienda el uso de este estadístico cuando la distribución sea uniforme. En distribuciones asimétricas (Apartado 2.3.3.2.-Estadísticos de forma) su uso descriptivo no es recomendable, puesto que su representatividad es afectada por valores extremos. Cuando el intervalo máximo no tiene límite superior y/o el intervalo mínimo no tiene límite inferior, la media aritmética no se puede calcular.

A continuación, se muestra cómo se obtiene el promedio de diámetro de las partículas según los métodos analíticos usados, resumidos por Rawle (2002).

Si consideramos partículas esféricas, cuya representación numérica está dada por su diámetro (d_i), bastará con sumar estos valores y dividir por el número de datos. En términos matemáticos esta es una media numérica de longitud y se denota como $D(1,0)$, ya que los términos de diámetro que aparecen en el numerador de la ecuación están elevados a una potencia de 1 (d^1), y no aparecen términos de diámetro en el denominador (d^0). Técnicas como microscopía

electrónica o la medición mediante grátulas pueden generar este promedio que es idéntico a la media aritmética (Fórmula 15).

$$D(1,0) \text{ Media muestral} = \frac{\sum d_i}{n} \quad (14)$$

Ahora, si se considera el concepto de esfera con área superficial equivalente, cuya área está definida por $4\pi r^2$, se deben elevar al cuadrado los diámetros, dividir por el número de partículas, y luego sacar la raíz cuadrada para obtener el diámetro medio. En términos matemáticos se denomina D (2,0), ya que los términos de diámetro que aparecen en el denominador de la ecuación están elevados a una potencia de 2 (d^2) y no hay términos de diámetro en el denominador (d^0). En este caso se está frente a una media numérica de superficie, la que puede ser obtenida mediante técnicas que ocupen análisis de imágenes.

$$D(2,0) \text{ Media muestral} = \frac{\sum d_i^2}{n} \quad (15)$$

Si en otro caso, se quisiera comparar esferas sobre la base del peso ($\frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \rho$), se tendrán que elevar al cubo los diámetros, para luego dividir por el número de partículas y aplicar la raíz cúbica para obtener el diámetro medio. Considerando las potencias del numerador y denominador este quedaría denotado como D (3,0). Técnicas como un sensor de electrozona pueden generar este promedio.

$$D(3,0) \text{ Diámetro medio} = \frac{\sum d_i^3}{n} \quad (16)$$

Esta última, al igual que las demás medias numéricas descritas, tiene la desventaja de que el número de partículas es inherente a la fórmula, lo que implica la necesidad de contar un gran número de partículas.

No obstante, técnicas como la difracción láser reportan un promedio en el cual no es necesario conocer el número total de partículas. Estas se denominan “medidas del momento” que corresponden a promedios reportados por diferentes métodos de medición, hechos en base a volumen o área equivalente e introducen una ventaja para calcular la media, al no ser necesario conocer el número total de partículas.

Medida del momento del área superficial o diámetro medio “Sauter” $D(3,2)$, donde hay una dependencia sobre el d^3 :

$$\mathbf{D(3, 2)} \text{ Diámetro medio} = \frac{\sum d_i^3}{\sum d_i^2} \quad (17)$$

Medida del momento de masa o volumen, también llamado diámetro medio de “Brouckere” $D(4,3)$, en donde hay una dependencia del d^4 . Siendo esta ponderación, en base a volumen, la reportada por el método de difracción láser como media.

$$\mathbf{D(4, 3)} \text{ Diámetro medio} = \frac{\sum d_i^4}{\sum d_i^3} \quad (18)$$

b) Mediana (Me)

Estadísticamente, si se tienen datos no agrupados y ordenados de forma creciente y si estos son un número impar de observaciones la mediana es el dato que queda en el centro de la ordenación (Fórmula 19). En cambio para un número par de datos corresponderá al promedio de los dos valores centrales de la distribución (Fórmula 20):

$$Me = \frac{x_{n+1}}{2} \quad (19)$$

$$Me = \frac{x_{\frac{n}{2}}}{2} + \frac{x_{\frac{n}{2}+1}}{2} \quad (20)$$

Al trabajar con datos agrupados en intervalos se calcula según (Fórmula 21), donde i es el primer intervalo cuya frecuencia acumulada supera a $n/2$, L_i es el límite inferior real del intervalo de la mediana; n es el número de datos; F_{i-1} es la frecuencia acumulada anterior al intervalo de la mediana; a es la amplitud del intervalo.

$$Me = L_i + \left(\frac{\frac{n}{2} - F_{i-1}}{f_i} \right) \times a \quad (21)$$

En un análisis granulométrico se denota como d_{50} , y corresponde a la dimensión bajo o sobre la cual se encuentra el 50% del volumen, masa o n° de partículas medidas. Se puede obtener directamente del gráfico que muestra la frecuencia relativa porcentual acumulada (Gráfico 2.3)

Su uso se recomienda en distribuciones asimétricas, característica recurrente en análisis granulométricos, pues su valor no se ve afectado por valores extremos (tamaños de partículas más pequeños y más grandes), o cuando estos no están definidos (en distribuciones con intervalos abiertos en el límite superior o inferior de tamaño).

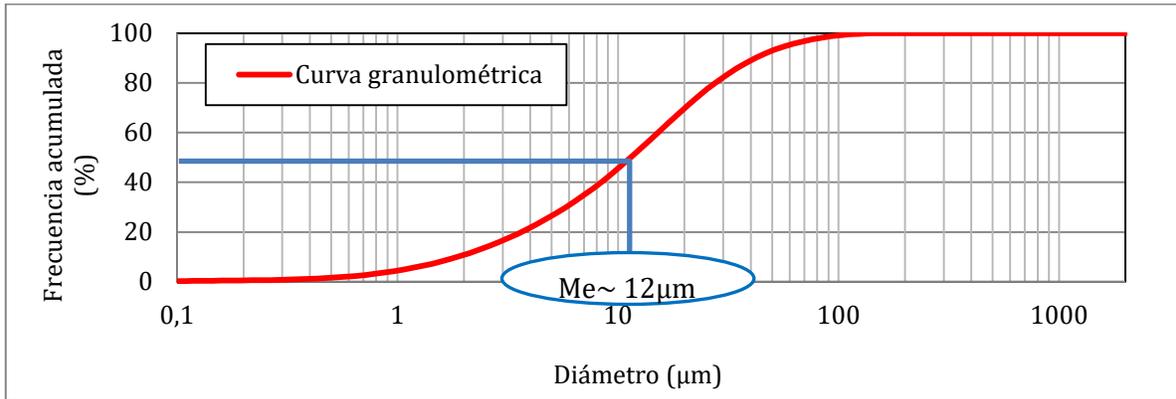


Gráfico 2.3 Distribución gráfica de frecuencias acumuladas, denotando el d_{50} o mediana, que indica que el 50% de la muestra posee un diámetro igual o menor a $12 \mu\text{m}$.

c) Moda (M_o)

La moda es el valor que más se repite. Se puede identificar directamente en un gráfico de frecuencia relativa porcentual o absoluta, correspondiendo a los puntos más altos de la curva y puede abarcar más de un valor, en cuyo caso le confiere un carácter uni, bi o multimodal a la distribución en cuyo caso resulta útil para dividir la distribución en estratos (poblaciones). Al trabajar con datos agrupados, se considera la marca de clase del intervalo que más se repite.

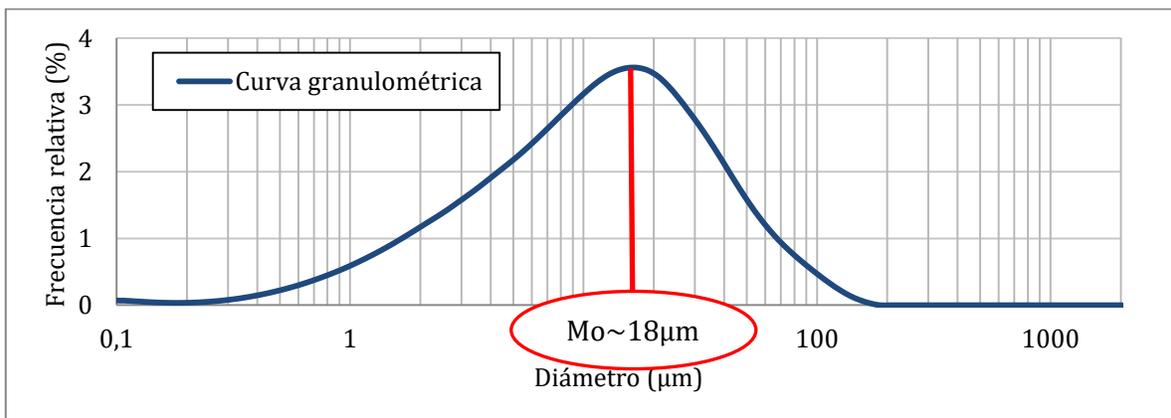


Gráfico 2.4 Representación de frecuencias relativas, denotando una distribución unimodal (un solo *peak* de frecuencia). La mayoría de las partículas de esta muestra tienen un diámetro igual a $18 \mu\text{m}$.

2.3.3.2.-Estadísticos de Forma

a) Simetría

De manera práctica, el grado de simetría de una curva de frecuencias se determina y será comparada en este trabajo de manera visual. Se habla de simetría si se observa cierta equidistancia de los valores de la variable con aquel que se considera centro de la distribución. Es decir, las frecuencias de un intervalo aumentan hasta un punto máximo (*peak* de frecuencia) y luego disminuyen como una imagen especular.

La curva se considera asimétrica cuando los datos no presentan uniformidad, en tal caso, dependiendo de cómo se agrupen estos y del sesgo o alargamiento de la curva, la distribución puede ser:

I) Asimétrica con sesgo hacia la derecha (asimetría positiva) en caso de que los datos se concentran hacia la izquierda de la curva.

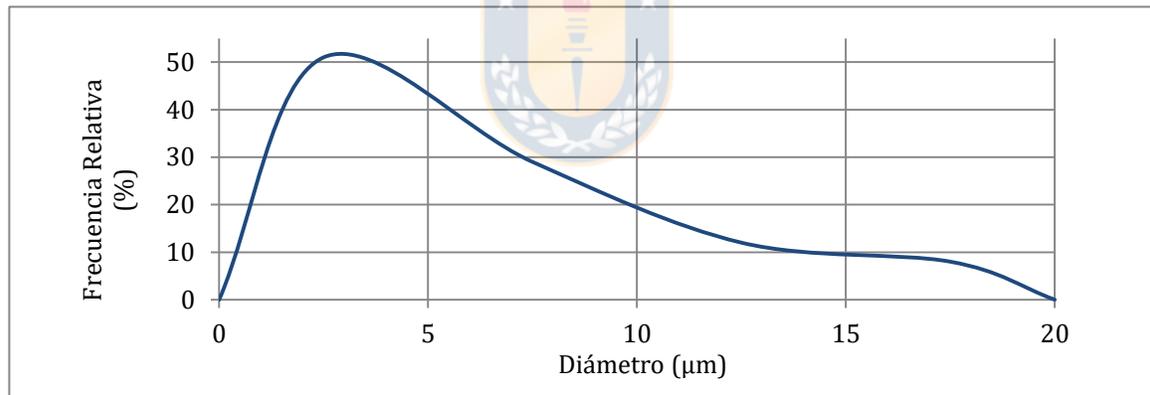


Gráfico 2.5 Distribución de tamaño de partículas con asimetría positiva.

II) Asimétrica con sesgo hacia la izquierda (asimetría negativa) si los datos se concentran en el lado derecho de la curva de distribución.

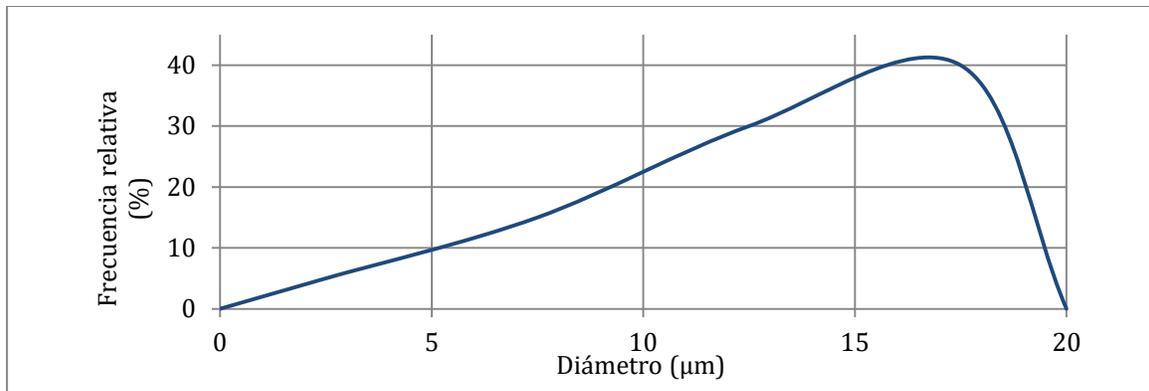


Gráfico 2.6 Distribución de tamaño de partículas con asimetría negativa.

Para el caso específico de una distribución granulométrica, habrá asimetría positiva si en la muestra hay predominancia de tamaños pequeños. Por el contrario, si hay asimetría negativa predominarán las partículas de mayor tamaño.

2.3.3.3.-Estadísticos de dispersión

Dos conjuntos de datos pueden tener los mismos valores de promedio, moda o mediana pero diferir mucho en términos de dispersión, de esta manera un estadístico de dispersión describe el grado de variación de los datos.

a) Rango

Indica el número de valores que toma la variable en estudio. En términos prácticos corresponde a la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de tamaño de partículas.

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (22)$$

2.3.3.4.- Tipos de distribución

Todos los estadísticos antes descritos darán un valor representativo que ayuda en la interpretación y posterior uso de la información. Sin embargo, estos valores pueden variar dentro de una misma muestra dependiendo en base a qué parámetro se haya hecho el análisis granulométrico, que como es sabido, puede ser realizado en base a volumen, masa y, aunque menos frecuente, a número de partículas. Una muestra de granulometría heterogénea, puede dar como resultado una curva en donde los datos y centros de distribución se concentran hacia la derecha si ésta es hecha en base a su masa, considerando que los rangos de tamaño mayores concentrarán la mayor

cantidad de masa. Pero en caso de que el estudio granulométrico sea hecho en base a n° de partículas, las que en cantidad numérica tienden a concentrarse en los rangos más pequeños de tamaño, la curva tendrá el *peak* de frecuencia y concentración de datos hacia el lado izquierdo del gráfico, modificando con ello los estadísticos antes descritos. Técnicas como el tamizado, entregan una distribución en base a la masa de las partículas, la difracción láser, por el contrario, entrega una distribución en base a volumen. Si la densidad de una muestra es uniforme ambas distribuciones (en base a volumen y masa) resultarían equivalentes, esto último fundamentado en que la masa es el producto del volumen por la densidad de un cuerpo.

Se tiene el siguiente ejemplo de datos agrupados (Tabla 2.4), donde se cuenta con una población de partículas esféricas de tamaños variables cuya densidad es uniforme, agrupados en intervalos semiabiertos. Como la densidad es uniforme, la distribución en base a volumen es homóloga a la obtenida en base a la masa (misma distribución relativa) y se obtiene multiplicando los datos de masa por la constante “a” que en este caso corresponde al recíproco de la densidad. La dispersión de los datos se ha hecho simple a modo de ejemplo, sin la necesidad de tener escala logarítmica en el eje x. Se observa que hay un mayor número de partículas de menor tamaño, pero las partículas más grandes poseen mayor masa. Como se considera en este ejemplo que la densidad es uniforme, el volumen de cada fracción de tamaño se obtiene multiplicando la masa por una constante, de manera que las proporciones relativas serán las mismas.

Al construir la distribución gráfica en base a la masa de las partículas (equivalente en este caso a la distribución en base a volumen), se calcula la frecuencia relativa porcentual de cada fracción de tamaño, y su correspondiente frecuencia acumulada (Tabla 2.5).

Tabla 2.4 Datos de tamaños de partículas. Donde “a” corresponde a una constante (recíproco de la densidad de la muestra).

Tamaño (μm)	Masa (g)	Volumen (μm^3)	n° partículas
[1-5)	15	$15 \cdot a$	70
[5-10)	35	$35 \cdot a$	40
[10-15)	50	$50 \cdot a$	17
[15-20]	13	$13 \cdot a$	10

Tabla 2.5 Datos para la construcción de la distribución gráfica en base a masa.

Tamaño (μm)	X _i (μm)	Masa (g)	% masa	% acumulado masa	Volumen (μm ³)	% volumen
[1-5)	2,5	15	13,27	13,27	15•a	13,27
[5-10)	7,5	35	30,97	44,24	35•a	3,97
[10-15)	12,5	50	44,23	88,47	50•a	44,23
[15-20]	17,5	13	11,53	100	13•a	11,53
Total	-	113	100	-	113•a	100

La curva granulométrica resultante será la siguiente (Gráfico 2.7)

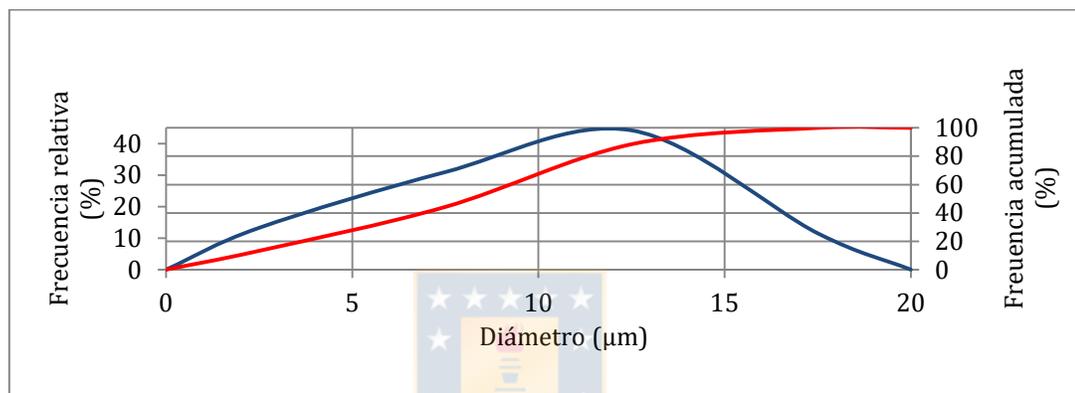


Gráfico 2.7 Distribución gráfica en base a masa y volumen de partículas. Curva de frecuencia relativa (azul) y acumulada (rojo).

Si se aplica, por ejemplo, la Fórmula 13 para el cálculo de la media aritmética, se tiene un promedio de tamaño de 10 μm.

$$\frac{(2,5 \times 15) + (7,5 \times 35) + (12,5 \times 50) + (17,5 \times 13)}{113} = 10$$

Por su parte la moda y la mediana quedarían en 12,5 y 7,5 μm respectivamente.

Si ahora se consideran los datos de números (n°) de partículas, los datos calculados de frecuencia relativa y acumulada serán las siguientes:

Tabla 2.6 Datos para la construcción de la distribución gráfica en base a n° de partículas.

Tamaño (μm)	X _i (μm)	n° partículas	% n° partículas	% acumulado n° partículas
[1-5)	2,5	70	51	51
[5-10)	7,5	40	29	80
[10-15)	12,5	17	12	92
[15-20]	17,5	10	8	100
Total	-	137	100	-

Así, la distribución gráfica tomará la siguiente forma (Gráfico 2.8):

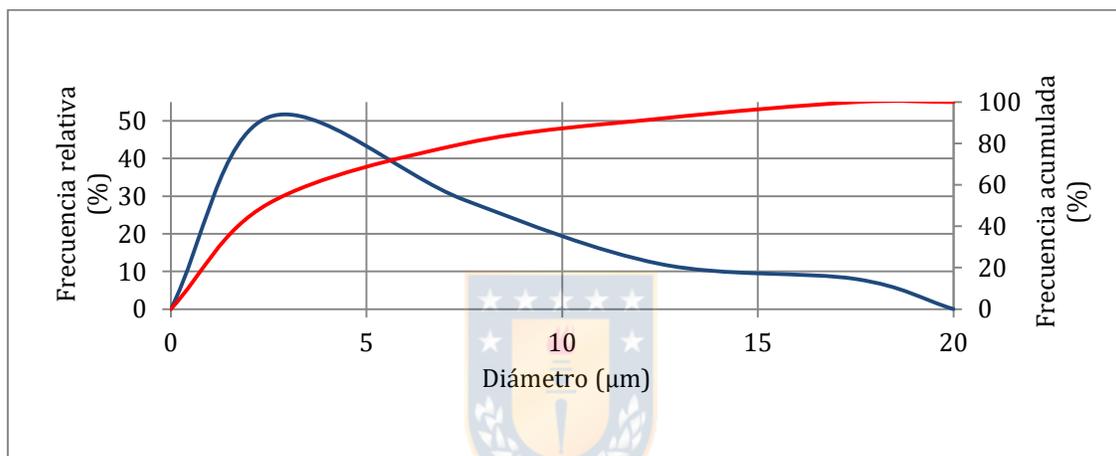


Gráfico 2.8 Distribución en base a número de partículas. Curva granulométrica de frecuencia relativa (azul) y acumulada (rojo) para distribución en base a n° de partículas.

Como la mayor cantidad de partículas, está en una fracción de tamaño menor, esta vez el promedio queda en 6 μm según la fórmula anterior.

$$\frac{(2.5 \times 70) + (7.5 \times 40) + (12.5 \times 17) + (17.5 \times 10)}{137} = 6$$

Por su parte la moda y la mediana coincidirán en el valor de 7,5 μm.

En ningún caso, alguna de estas distribuciones es inválida. Todo dependerá del objetivo para el cual se realiza el análisis y el método analítico escogido, según la naturaleza de la muestra.

Existen a su vez, fórmulas para realizar conversiones del promedio entregado entre técnicas que calculan longitud, área, volumen y peso. Sin embargo, al realizar la conversión entre ellas, hay un aumento en el cálculo del error.

2.4.- Límites Texturales

Como ya se ha especificado, un análisis granulométrico permite clasificar a las partículas según su tamaño. Según el rango en que se encuentren serán catalogadas como Limo, Arcilla, Arena, Grava, etc. Este tipo de denominación que corresponde a una clasificación textural, se hace de forma arbitraria y dependiendo del área de estudio los límites texturales pueden variar o incluir subcategorías (por ejemplo, arena fina, media, gruesa, etc.). En sedimentología, para la clasificación de terrígenos se ocupa la nomenclatura de Udden-Wentworth (1992), la que clasifica como arcillas a aquellas partículas bajo los $4\ \mu\text{m}$ y el rango de las arenas considera un límite máximo de 2 mm. Diferente es la Clasificación Unificada de Suelos (*Unified Soil Classification System*, USCS siglas en inglés) y su designación ASTM D2487-17, usada en ingeniería, agricultura, etc., que considera como tamaño arcilla a aquellas partículas bajo los $2\ \mu\text{m}$ y sitúa el tamaño máximo de las arenas en los 4,75 mm. Para efectos de este trabajo, esta última será la nomenclatura considerada (Figura 2.16).

Malla #4		Malla #200	
Grava	Arena	Limo	Arcilla
	5 mm	75 μm	2 μm

Figura 2.16 Rangos de tamaño de partículas y límites texturales.

Es importante entender que la clasificación textural de una partícula de tamaño arcilla, nada tiene que ver con la clasificación mineralógica que define al grupo de las arcillas (filosilicatos) en base a la composición química y arreglo atómico de su estructura interna.

2.5.- Aplicaciones de un Análisis de Distribución de Tamaño de Partículas

La granulometría influye en las propiedades físicas y químicas de un agregado (ya sea materia prima o producto final) como: resistencia al desgaste, velocidad de reacción, conductividad, miscibilidad, absorción, etc. Por esta razón muchas áreas de la ciencia e industrias recurren a este tipo de análisis.

En geología tiene objetivos e interpretaciones distintas dependiendo de la especialidad en el cual se utilice. Por ejemplo: En sedimentología, el objetivo del análisis es determinar las características energéticas del medio de transporte y del ambiente de sedimentación. Para fines sedimentológicos, la muestra de sedimento debe corresponder a una unidad de sedimentación (facies) y se deben considerar limitantes como el contenido de material orgánico, sales, etc.

En geología económica y en específico en el área de producción minera, continuamente se monitorea el tamaño de partículas con el fin de caracterizar mineralógicamente distintos tipos de muestras. El tamaño que éstas posean influye en los protocolos de molienda y extracción además de estar relacionados a la recuperación de minerales de mena. Ejemplo de lo último, son estudios que indican que la eficiencia de la flotación de cobre tiene relación con el tamaño de partículas (Figura 2.17), viéndose disminuida con valores extremos (bajo los 20 μm y sobre los 150 μm).

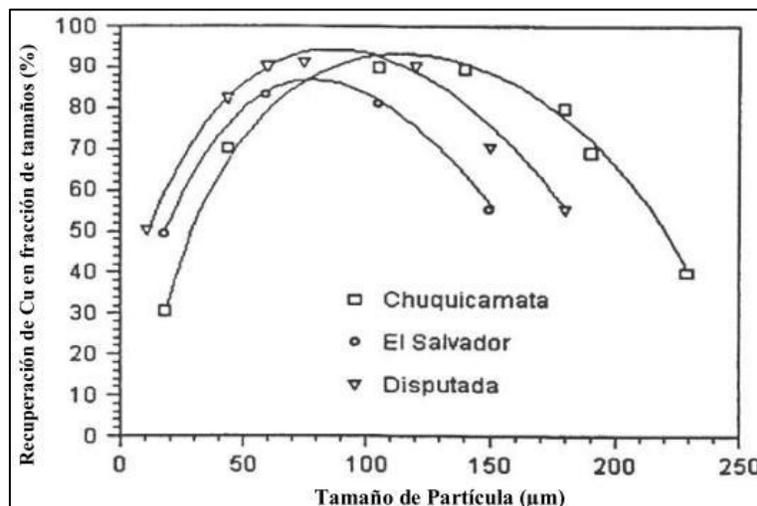


Figura 2.17 Recuperación de Cu según tamaño de partícula.
Extraído de Bulatovic (2007).

Así, un estudio granulométrico aplicado en un proceso extractivo considera parámetros más específicos que derivan de los estadísticos antes descritos y cuyo significado e importancia están ligados exclusivamente a un contexto metalúrgico.

2.5.1.- Diámetro Efectivo

A partir de una distribución granulométrica es posible obtener lo que se denomina diámetro efectivo, que denota el tamaño de partícula bajo el cual se encuentra un determinado porcentaje de muestra. Dicho de otra manera y considerando, por ejemplo, un tamizado, se asocia a un porcentaje “que pasa” bajo un cierto tamaño. Un equipo analizador de tamaño mediante difracción láser arroja estos datos tabulados, aunque también es posible identificarlos de manera sencilla en una curva de frecuencia acumulada (Gráfico 2.9). En mecánica de suelos, se denotan como d_x (siendo “x” el porcentaje considerado) y son utilizados para calcular los denominados coeficientes de uniformidad y curvatura (se ocupan: d_{10} , d_{30} y d_{60}), los que definen la resistencia del material a roturas (por ej. suelos uniformes suelen ser más susceptibles a roturas). En minería el diámetro efectivo más usado es el conocido como P80, indicador granulométrico que permite por ejemplo: catalogar la eficiencia de los procesos de molienda que anteceden a la flotación. Por lo que resulta importante de monitorear en distintas etapas, para no afectar el resultado del proceso total.

Análogamente para describir el rango, en este trabajo se usará el P99, tamaño bajo el cual se encuentran el 99% de las partículas que componen la muestra en estudio asumiendo un 1% de error instrumental.

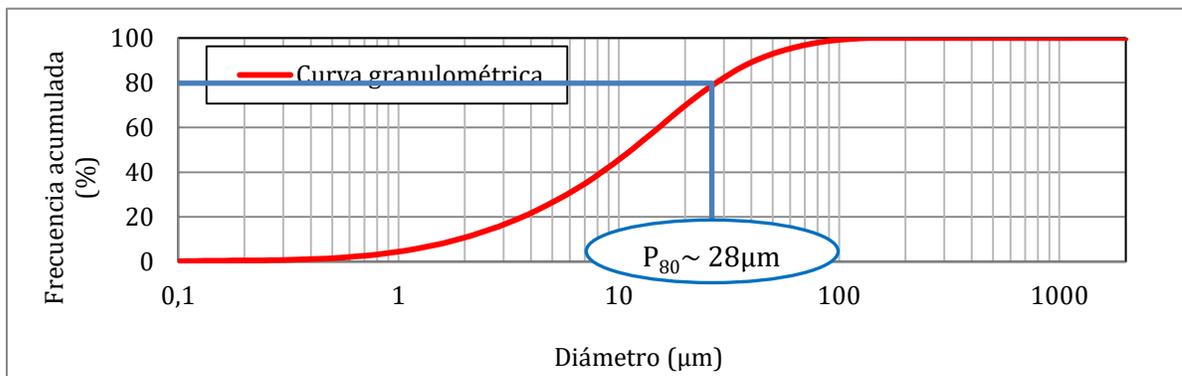


Gráfico 2.9 Curva granulométrica con un P80 de 28 μm . El 80% de las partículas de esta muestra tienen un diámetro igual o menor a 28 μm .

2.5.2.- Fracción bajo 2 μm

De manera similar a los diámetros efectivos, en este tipo de estudios se reporta el % bajo una fracción determinada de tamaño. En general, la fracción bajo los 2 μm resulta importante de determinar, pues es la que más afecta la adsorción e intercambio del soluto (Hillel, 1998 en Pieri *et al.*, 2006).

En circuitos mineros la recuperación de minerales de mena, se ve afectado por el tamaño de partículas y en específico por la presencia de filosilicatos. Este grupo mineral tiende a tener una ocurrencia natural en tamaños de partículas menores a 2 μm (tamaño arcilla), además de ser blandos por consiguiente más susceptibles a procesos de molienda, marcando una presencia mayoritaria en las fracciones de menor tamaño (Figura 2.18).

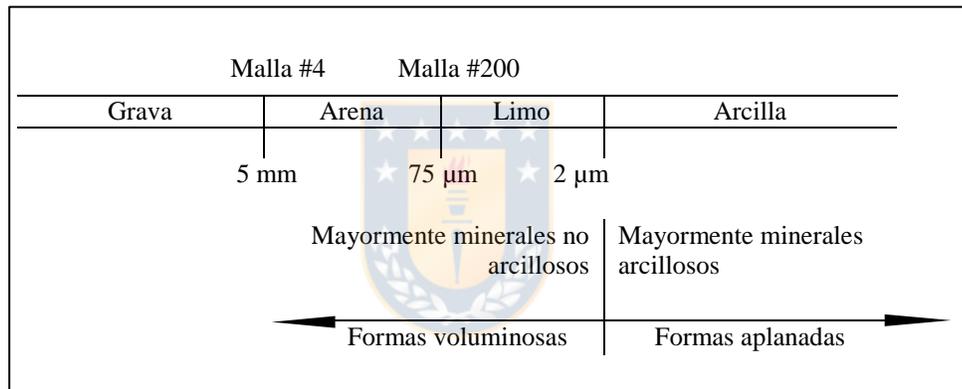


Figura 2.18 Rangos de tamaño de partículas. Modificado de Mitchell & Soga (2005).

3.- ARCILLA: CLASIFICACION MINERAL

Para entender el comportamiento de las partículas de arcilla mineral primero es importante entender la complejidad y variabilidad de su estructura. En este capítulo se abordan los aspectos teóricos básicos de ésta, información que explica gran parte de las propiedades físicas de los minerales de arcilla así como también las conclusiones finales de este trabajo. El fin de ello, es que los resultados obtenidos puedan ser aplicados y considerados no necesariamente por geólogos, sino en otras áreas.

La denominación arcilla es un término petrográfico, que hace referencia a un material de grano fino, terroso, que se comporta de forma plástica al ser mezclado con agua. Desde el punto de vista mineralógico, arcilla es un grupo de sustancias cristalinas del subgrupo de los Filosilicatos, compuestas principalmente por silicatos aluminicos hidratados, con sustituciones parciales que le confieren una carga neta negativa en su superficie cristalina (Klein & Hurlbut, 1997).

Se definen como silicatos aquellos minerales cuya estructura interna presenta como unidad fundamental un tetraedro regular formado por 4 iones de O^{2-} en los vértices (Figura 3.1), en coordinación con un ión de Si^{4+} en el centro). El empaquetamiento compacto de este tetraedro se logra por un enlace considerado 50% iónico y 50% covalente entre el Si y el O. Es decir, aunque existe una atracción entre las cargas contrarias de los iones, también hay un reparto de electrones y una interpenetración de las nubes electrónicas de éstos, estando el enlace intensamente localizado en la proximidad de los electrones compartidos (Klein & Hurlbut, 1997).

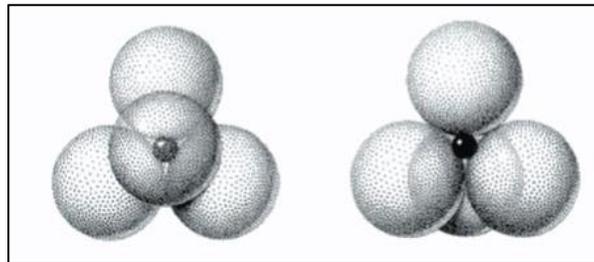


Figura 3.1 Empaquetamiento compacto del tetraedro SiO_4^{4-} (Klein & Hurlbut, 1997).

La distribución de la energía del enlace Si-O permite que cada ión O^{2-} participe de esta unidad fundamental, tenga energía disponible para la formación de un segundo enlace que compense su carga negativa restante. Para ello, el átomo de O^{2-} puede unirse a otro ión Si^{4+} en cuyo caso, dos

tetraedros adyacentes estarán unidos entre sí mediante la compartición de un ión O^{2-} , pudiendo compartir hasta sus 4 iones participantes con otras unidades contiguas o bien, puede enlazarse a otros cationes dando lugar a la asociación de grupos tetraédricos independientes.

Esta capacidad, le confiere a los silicatos una significativa variabilidad estructural que permite clasificarlos según su configuración interna la que además, se manifiesta en propiedades físicas comunes. Esta clasificación estructural distingue:

- Nesosilicatos u ortosilicatos: aquellos silicatos que derivan de la combinación de grupos tetraédricos SiO_4 independientes. En ellos las cargas negativas de los iones O_2^- se compensa con cationes metálicos mediante enlaces iónicos.
- Sorosilicatos o disilicatos: silicatos con dos grupos tetraedros conectados y que dan lugar al grupo $(Si_2O_7)^{6-}$.
- Ciclosilicatos: formados por la unión de más de dos tetraedros que dan lugar a una estructura cerrada en forma de anillo de composición general Si_xO_{3x} .
- Inosilicatos o silicatos en cadena: formados por la unión infinita de tetraedros en cadena cuya composición unitaria es $(Si_2O_6)^{4-}$. Dichas cadenas pueden ser dobles o simples.
- Filosilicatos: originados por la unión de 3 de los 4 iones de O^{2-} con tetraedros contiguos, dando lugar a láminas planas de extensión infinita cuya composición unitaria es $(Si_2O_5)^{2-}$.
- Tectosilicatos: silicatos cuya estructura corresponde a una red tridimensional de tetraedros cuya composición unitaria es SiO_2 .

3.1.- Filosilicatos

Derivado del griego *phylon* que significa “hoja”, los miembros de esta subclase corresponden a minerales silicatados cuya estructura es laminar. Dicha estructura se origina por el apilamiento de unidades estructurales básicas o láminas (unidad o lámina tetraédrica y octaédrica) las que dan origen a una celda unidad o capa (TO; TOT; TOT-O).

3.1.1.- Unidades Estructurales Básicas

En los filosilicatos el tetraedro SiO_4^{4-} se encuentra enlazado a otras unidades similares mediante la compartición de 3 de los 4 iones O^{2-} , que corresponden a los oxígenos basales dando origen a un plano de extensión indefinida de composición unitaria $(Si_2O_5)^{2-}$ denominada unidad estructural

o lámina tetraédrica (Figura 3.2). En ella, las unidades fundamentales se enlazan formando una red de anillos con simetría hexagonal (también llamada simetría senaria) cuando no hay distorsión en la red cristalina. El cuarto ión de O^{2-} ubicado la zona apical del tetraedro, a menudo se encuentra enlazado con grupos hidroxilos (OH^-), los que se ubican en el centro de los anillos (Figura 3.3). De esta manera, es posible que un ión externo a la capa se enlace a ella, coordinando con 2 iones O^{2-} apicales y un grupo OH^- .

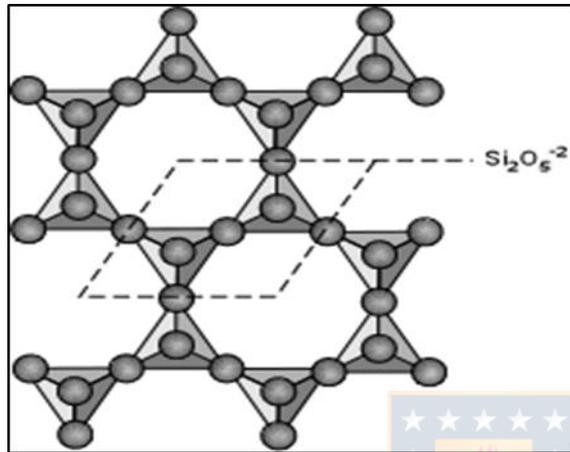


Figura 3.2 Unidad fundamental $(SiO_4)^{4-}$ enlazadas formando la unidad estructural tetraédrica. Modificado de Klein & Hurlbut (1997). La distancia entre O-O es 2.55 Å, el espacio disponible para el catión central es 0,55 Å y el espesor de esta capa en arcillas es de 4,63 Å (Grim, 1968).

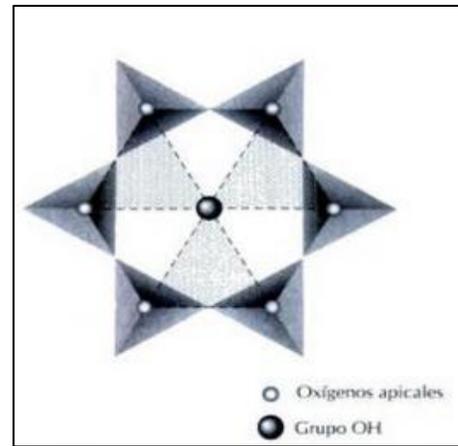


Figura 3.3 Lámina tetraédrica con O^{2-} apicales disponibles para enlazar con grupos OH^- . Extraído de Klein & Hurlbut (1997).

Esta forma de coordinación permite enlazar al unidad planar resultante (de composición $(Si_2O_5OH)^{3-}$), una lámina de octaedros regulares (Figura 3.4), denominada de forma general unidad estructural o lámina octaédrica. Este enlace entre planos provoca una distorsión en la simetría de ambas unidades estructurales, el que influye en la simetría global del mineral resultante, por ello, la gran mayoría de filosilicatos pertenecen al sistema monoclinico o triclínico (Figura 3.5).

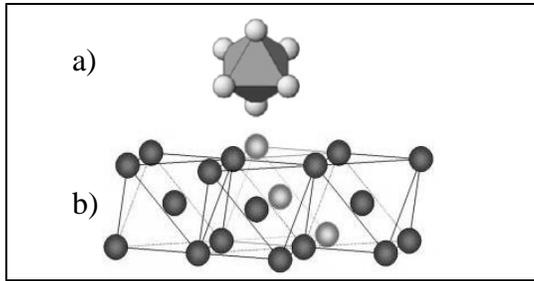


Figura 3.4 Octaedro regular (a) en enlace formando lámina octaédrica (b). La distancia O-O es 2,06 Å y el espacio disponible para el catión central es de 0,61 Å. El espesor de esta capa en arcillas es de 5,05 Å (Grim, 1968).

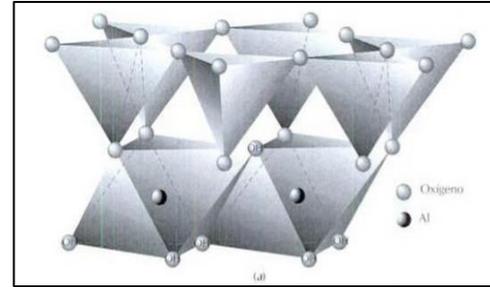


Figura 3.5 Apilamiento de unidades estructurales octaédrica y tetraédrica. Modificada de Klein & Hurlbut (1997).

El catión central de la unidad octaédrica además de Al^{3+} y Mg^{2+} puede incluir Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Ti^{4+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} , Li^+ (Mitchell & Soga, 2005). La forma de coordinación, determinada por el catión central divide a los filosilicatos en dos grupos principales: dioctaédricos y trioctaédricos.

Si el catión central del octaedro es divalente todas las posiciones catiónicas de la red de octaedros estarán ocupadas y cada catión tendrá capacidad de generar 6 enlaces, neutralizando así, la mitad de la carga del O^{2-} y toda la carga del grupo OH^- . Así, tanto el O^{2-} como el OH^- estarán rodeados por 3 cationes, derivando en la denominación trioctaédrica (Figura 3.6). Por el contrario, si la unidad octaédrica presenta un catión central trivalente, el balance de cargas se mantendrá mientras una de cada tres posiciones catiónicas esté desocupada, con lo que cada O^{2-} y grupo OH^- estará rodeado solo por dos cationes (Figura 3.7), dando lugar a la denominación dioctaédrica (Mitchell & Soga, 2005). Ambos tipos de coordinación, a menudo son referidas de forma alternativa por su analogía con las estructuras de los hidróxidos minerales como brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) y gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) respectivamente, aunque *The Clay Mineral Society* reporta estos términos como inapropiados.

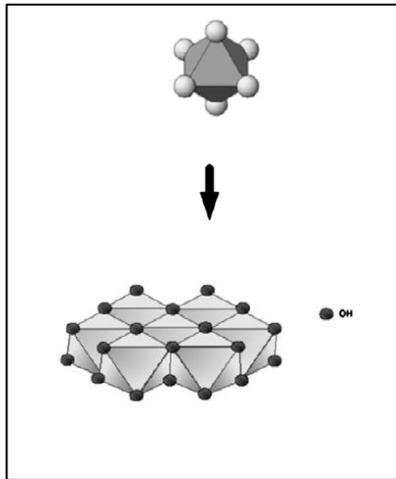


Figura 3.6 Capa en coordinación trioctaédrica. Modificado de Ndlovu *et al.* (2013).

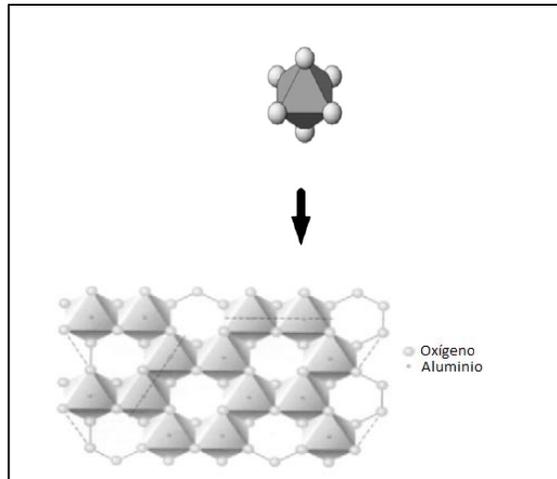


Figura 3.7 Capa en coordinación dioctaédrica. Modificado de Ndlovu *et al.* (2013).

3.1.2.- Celda Unitaria o Capas

El apilamiento de las unidades estructurales básicas (*sheet* en inglés, según nomenclatura de CMS): unidad o lámina octaédrica (o) y unidad o lámina tetraédrica (t), da origen a una celda unidad compuesta o capa (*layer* en inglés, según nomenclatura CMS), las que pueden configurarse de las siguientes formas:

- Capas to: denotadas como 1:1 en ellas las unidades tetraédrica y octaédrica se encuentran enlazadas por la compartición de iones O^{2-} apicales, por un solo lado de la estructura (Figura 3.9). En este plano común a ambas unidades, $2/3$ de los átomos son oxígenos, mientras que el tercio restante corresponde a grupos OH^- ubicados en el centro de los hexágonos de la red tetraédrica.
- Capas TOT: denotadas como 2:1 en ellas la unidad octaédrica está coordinada por ambos lados con una capa tetraédrica (Figura 3.10).
- Capas TOT-O: en algunas clasificaciones se añade esta forma de enlace como una variación de la estructuras de tipo 2:1, correspondiendo a una interestratificación entre una capa TOT y una unidad octaédrica adicional (Figura 3.11). Es encontrada en familia de las cloritas (Tabla 3.1).

Estas estructuras de apilamiento también llamadas “emparedados o *sandwich*”, son eléctricamente neutras, estructuralmente estables y en cada uno de ellos la unidad “o” puede ser di o trioctaédrica dependiendo de la valencia del catión central.

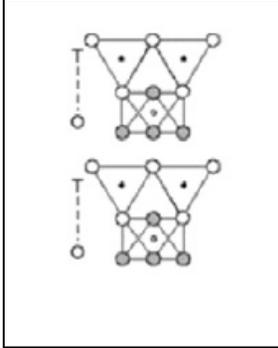


Figura 3.8 Estructura TO. Modificado de Ndlovu *et al.* (2013).

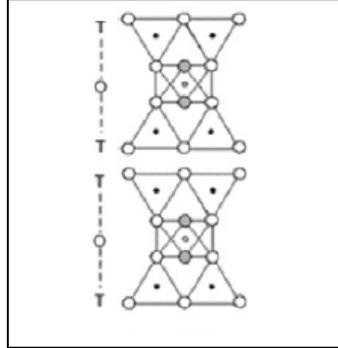


Figura 3.9 Estructura TOT. Modificado de Ndlovu *et al.* (2013).

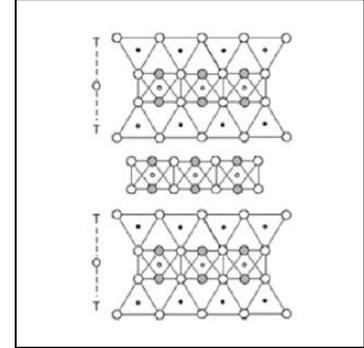


Figura 3.10 Estructura TOT-O. Modificado de Ndlovu *et al.* (2013).

3.1.3.- Enlaces Intercapa

La forma de enlace entre las capas también induce variabilidad en los tipos minerales encontrados. Estos pueden llegar a ser suficientemente débil como para que el comportamiento físico y químico del mismo mineral sea influenciado por la respuesta de estos enlaces a cambios en las condiciones ambientales (Mitchell & Soga, 2005).

Por ejemplo, entre capas neutras paralelas el enlace se produce mediante fuerzas de Van der Waals, las que debido a su carácter débil marcan una zona de exfoliación o clivaje. Ejemplo de ello son el talco y la pirofilita (Figura 3.10). Entre capas opuestas de O-OH u OH-OH se generan tanto enlaces de Van der Waals como enlaces de Hidrógeno (por ejemplo: Caolinita, Figura 3.8), estos últimos estables en agua, aunque en algunos casos, capas neutras de silicatos unidas por puentes de Hidrógeno, pueden ser separadas por capas de moléculas de H₂O de alta polaridad.

Entre capas 2:1 también pueden desencadenarse enlaces de naturaleza iónica (Figura 3.11), atribuidos a fenómenos de sustitución isomórfica, que pueden ocurrir en las posiciones catiónicas de los filosilicatos tanto en la lámina octaédrica como en la tetraédrica durante la formación del mineral o durante una alteración posterior.

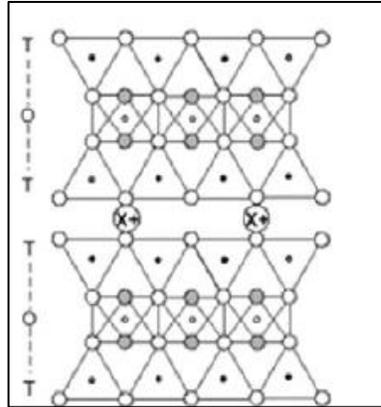


Figura 3.11 Capas TOT apiladas mediante enlace iónico. Modificado de Ndlovu *et al.* (2013).

Este proceso corresponde al remplazo de un ión en una posición determinada por otro ión diferente, sin que esto altere la estructura cristalina del mineral. Por ejemplo, si se produce una sustitución parcial de Si^{4+} por Al^{3+} , en la unidad fundamental tetraédrica, cada uno de estos reemplazos hará aparecer una carga eléctrica libre en la superficie del *sandwich* TOT. Si esta sustitución alcanza uno de cada cuatro Si^{4+} , la magnitud de la carga producida será suficiente para unir cationes monovalentes como K^+ y Na^+ por enlaces iónicos entre los emparedados TOT en coordinación regular 12 (Klein & Hurlbut, 1997). Físicamente esto se traduce en minerales de mayor dureza que los mencionados anteriormente integrados en grupo mineral Micas verdaderas (Tabla 3.1). Si esta sustitución alcanza uno de cada dos cationes Si^{4+} , se producirán dos cargas libres por cada emparedado permitiendo el enlace a través de cationes divalentes como el Ca^{2+} o Ba^{2+} , lo que aumenta la dureza y disminuye la calidad de la exfoliación (Klein & Hurlbut, 1997), los miembros del grupo mineral Micas frágiles (Tabla 3.1) presentan este tipo de sustitución.

Si la densidad de carga de la superficie es moderada las capas pueden adsorber moléculas polares y también el catión adsorbido puede hidratarse, resultando en una separación y expansión del espacio intercapa, esto último se observa en vermiculitas y esmectitas, denominadas arcillas expansivas.

3.2.- Filosilicatos: Subclasificación

De esta manera los filosilicatos a pesar de presentar una estructura relativamente similar se diferencian por las sustituciones isomórficas que presentan, tanto en la formación del mineral como en una posterior alteración y por la manera en que se apilan y enlazan las capas tetraédricas y octaédricas respectivamente. Debido a esta variabilidad, los sujetos minerales son subclasificados arbitrariamente según diversos principios (Tabla 3.1). Una de las clasificaciones más usada corresponde a la de Klein & Hurlbut (1997) que diferencia cuatro grupos principales: Serpentina, Arcilla, Mica, Clorita, otras como al de Deer *et al.* (1992), incluye un quinto grupo: Talco-pirofilita (los que en la primera clasificación son considerados dentro de los minerales de arcilla) asimismo, en el grupo de las Arcillas, diferencia aquellas de carácter expansivo de las no expansivas. En tanto, la nomenclatura usada por *The Clay Mineral Society* (Martin, 1991) ofrece una clasificación de primer orden para los filosilicatos según el tipo de ensamble en las capas y dentro de ella realiza una subclasificación aún más detallada, considerando la carga neta interlaminar (apartado 3.3.- Carga Superficial y Reactividad) y el material intercapa (iones, moléculas de agua, etc.).

Tabla 3.1 Comparación de clasificación de Filosilicatos y algunos ejemplos minerales.

Klein & Hurlbut (1997)	Deer <i>et al.</i> (1992)		Nomenclatura CMS (Martin, 1991)	Tipo capa	Mineral	
					Dioctaédrica	Trioctaédrica
Grupo de las Serpentininas	Grupo de las Serpentininas		Grupo Serpentina-caolín (x= 0)	(1:1)		Antigorita Crisotilo Lizardita
Grupo de las Arcillas	Grupo de las Arcillas	No expansivas		(1:1)	Caolinita Nacrita Dickita	
				(2:1)	Illitas ^[2]	
	Expansivas	Vermiculitas (x= 0,6-0,9)	(2:1)	Vermiculitas ^[1]		
		Esmectita (x= 0,2-0,6)	(2:1)	Montmorillonita Nontronita	Hectorita	
	Grupo Talco- pirofilita	Grupo Talco-pirofilita (x=0)	(2:1)	Pirofilita	Talco	
Grupo de las Micas	Grupo de las Micas		Micas Verdaderas (x= 0,6-0,1)	(2:1)	Moscovita Glauconita Illitas ^[4]	Flogopita Biotita Lepidolita
			Micas frágiles (x= 1,8-2,0)	(2:1)	Margarita	Clintonita
Grupo de la Clorita	Grupo de la Clorita		Grupo de la Clorita (x= variable)	(2:1:1)	Clinocloro Chamosita	Donbasita
					^[3] Sudoita; Cokeita	

[1] Se conocen mayoritariamente vermiculitas trioctaédricas. [2] Son mayoritariamente dioctaédricas, como la moscovita. [3] Unidad octaédrica de capa TOT y unidad interestratificada puede ser di o tri octaédrica, se añade a di-trioctaédrica cuando están presentes ambas combinaciones.[4]Illita incluida en el grupo de las micas verdaderas solo para la nomenclatura de *The Clay Mineral Society* (1991). [x]: carga neta laminar por formula unitaria.

Además de lo anterior, es posible diferenciar dentro de un mismo tipo mineral el grado de desarrollo que alcanza su estructura cristalina también llamada grado de cristalinidad, el que va desde muy baja (en inglés se utiliza el término *poor*) hasta una muy alta cristalinidad, además de diferentes politipos diferenciados por los patrones de rayos X resultantes, que se determinan según la dirección de ensamble de las capas, proceso que se ve afectada por la distorsión que se produce al ensamblar la capa O y la capa T.

Resulta importante aclarar que en la naturaleza es común encontrar minerales con sustituciones irregulares y apilación de capas de tipo mixto, donde su formación no necesariamente está ligada al ensamble directo de las unidades estructurales básicas (Mitchell & Soga, 2005). No obstante, para explicar el comportamiento, sustituciones y propiedades generales, se recurre a modelos idealizados y simplificados como los descritos.

A continuación se caracterizan desde el punto de vista teórico, las arcillas utilizadas en los ensayos de laboratorio para este trabajo de memoria

3.2.1.- Arcillas No Expansivas

3.2.1.1.- Caolinita

Grupo mineral caracterizado por el apilamiento de capas 1:1 de tipo dioctaédricas (Figura 3.12), cuya fórmula estructural es $(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}$ cristalizando en el sistema triclinico. Su distribución de carga está indicada en la Figura (3.13). La caolinita es el principal componente del caolín (junto a nacrita, dickita, halloysita, etc.).

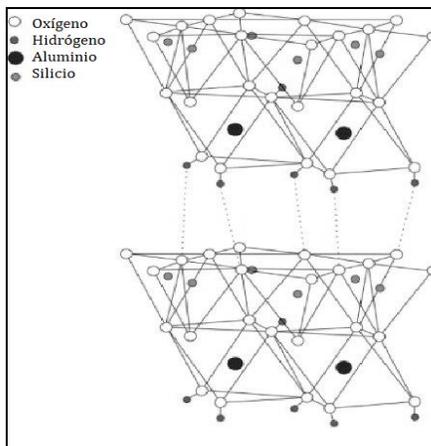


Figura 3.12 Estructura caolinita (Klein & Hurlbut, 1997).

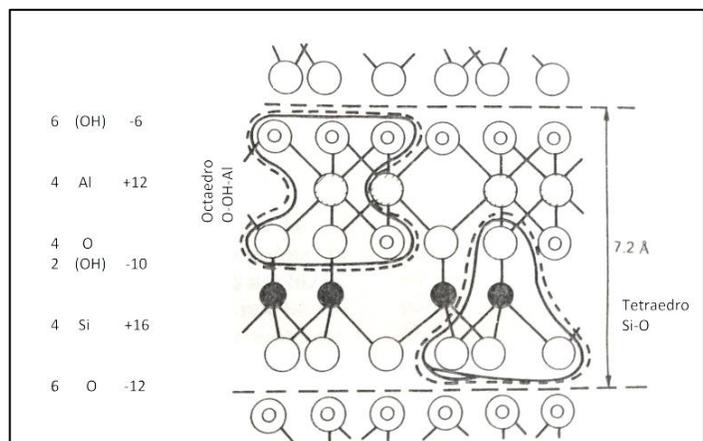


Figura 3.13 Distribución de cargas en estructura simplificada de Caolinita. Modificado de Mitchell & Soga (2005).

El enlace entre capas sucesivas se genera por fuerzas de Van der Waals y enlaces de Hidrógeno, siendo éstos, lo suficientemente fuertes para impedir la expansión por entrada de moléculas de H₂O entre las capas (Mitchell & Soga 2005). Los miembros de este grupo se diferencian en la forma de apilación de las capas dentro de la celda unidad (dos en el caso de la dickita y seis en el caso de la nacrita) y posiblemente por las posiciones disponibles para el Al³⁺ en la capa octaédrica. No ocurre separación intercapa en este grupo mineral, por lo que el balance ocurre por la adsorción de cationes en las superficies exteriores y bordes de las partículas. Se indica una capacidad de intercambio catiónico de 3 a 15 meq/100 g. En ambientes con bajo pH, las partículas de caolinita presentan carga positiva en sus bordes y una baja CIC, mientras que en ambientes de alto pH la carga es negativa y se obtienen altos valores de CIC (Mitchell & Soga 2005).

Las partículas bien cristalizadas de caolinita ocurren en placas hexagonales cuya dimensión lateral se encuentra en un rango de 0,1 a 5 µm, y su grosor de 0,05 a 2 µm, alcanzando superficies específicas en el rango de 15 m²/g. Aquellas de baja cristalinidad presentan un menor desarrollo de las placas hexagonales y tamaños menores que las variedades bien cristalizadas, sin embargo pueden alcanzar superficies específicas mayores de 50 m²/g (Mitchell & Soga 2005).

Son el producto de procesos supérgenos, ya sea meteorización o alteración hidrotermal de silicatos de aluminio, principalmente feldespatos (Klein & Hurlbut, 1997).

3.2.1.2.- Illita

Illita es un término general aplicado a los minerales micáceos de la arcilla a menuda referida como hidromica. Su estructura es similar al de las micas verdaderas aunque químicamente su composición es variable y sus límites poco claros (Besoin, 1985). Su fórmula idealizada por celda unitaria queda definida como K₂Al₄(Si₈Al₂)O₂₀(OH)₄ (Mithell & Soga 2005).

Estructuralmente está formada por el apilamiento de capas 2:1 mediante enlaces iónicos generado por la adsorción de cationes de K⁺ que logran balancear la carga negativa neta de las superficies generada por la sustitución isomórfica de Si⁴⁺ por Al³⁺ en las unidades tetraédrica. Este enlace es relativamente rígido lo que impide la entrada de agua en el espacio interlamina.

Difiere del resto de las micas en:

- Tienen menos sustituciones isomórficas de $\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Al}^{3+}$ que las micas, en estas últimas la sustitución llega a ser 1/4, mientras que en la Illita es 1/6 (Grim, 1968).
- Como consecuencia de lo anterior el desbalance de cargas se encuentra en el rango de 1,3 a 1,5, mientras que en las micas este valor llega a 2. Esto permite que la cantidad de cationes intercapa sea menor, por lo que este enlace es más débil haciendo menos regular la apilación de capas.
- En el espacio intercapa o interlaminar hay sustitución de $\text{K}^+ \rightarrow (\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+})$ incluyendo moléculas de H_2O en su estructura (Klein & Hurlbut, 1997). Mientras que en la unidad octaédrica pueden generarse sustituciones de $\text{Al} \rightarrow (\text{Mg}^{2+}, \text{Fe}^{2+})$
- Tienen a presentar tamaño de partículas de 1 a 2 μm , mucho menores que el resto de las micas.

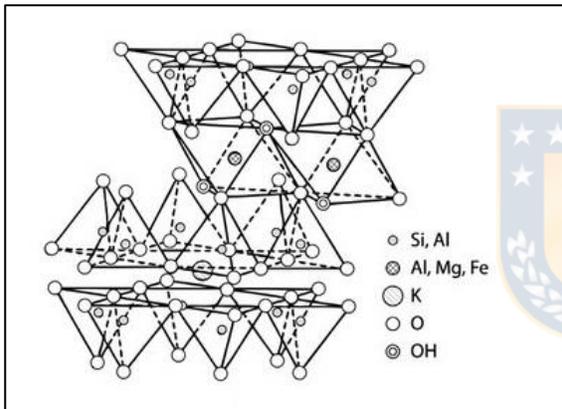


Figura 3.14 Esquema estructura de la illita. Modificado de Klein & Hurlbut (1997).

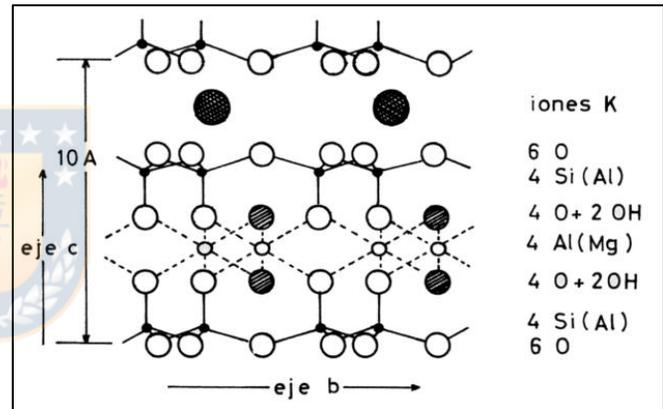


Figura 3.15 Esquema estructura simplificada de la illita. Extraído de Besoain (1985).

Son el constituyente principal de pizarras, es común encontrarla en rocas metamórficas donde su cristalinidad es un indicador del grado de metamorfismo de la roca, también se le encuentra como mineral accesorio en rocas sedimentarias, su génesis está ligada a procesos de alteración hidrotermal de micas y feldespatos. Alcanzan superficies específicas de hasta $50 \text{ m}^2/\text{g}$. Tienen una CIC en un rango de 10 a 40 meq/100g

3.2.2.- Arcillas Expansivas: Esmectitas

Grupo mineral caracterizado por el apilamiento de capas 2:1, las que se enlazan sucesivamente por enlaces de tipo Van der Waals o por la presencia de cationes que neutralizan las cargas

negativas en éstas superficies. Estos enlaces son suficientemente débiles como para permitir una separación de las capas dadas por el clivaje, o por la adsorción de líquidos polares como el agua. Su fórmula estructural, sin considerar las sustituciones isomórficas que se pueden dar en las variedades minerales, corresponde a $(\text{OH})_4\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, donde la capa de agua molecular se ubica en el espacio intercapa.

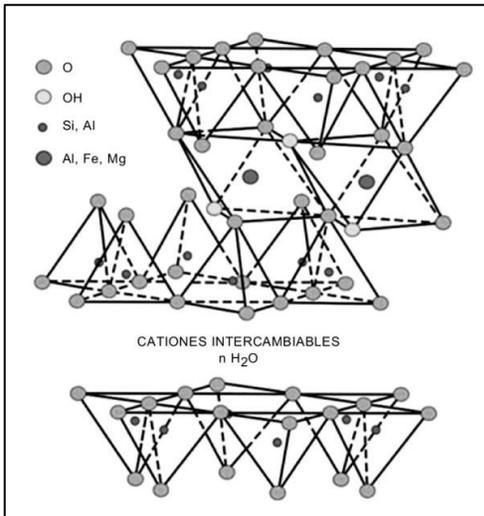


Figura 3.16 Esquema estructural de las esmectitas. Modificado Grim (1968).

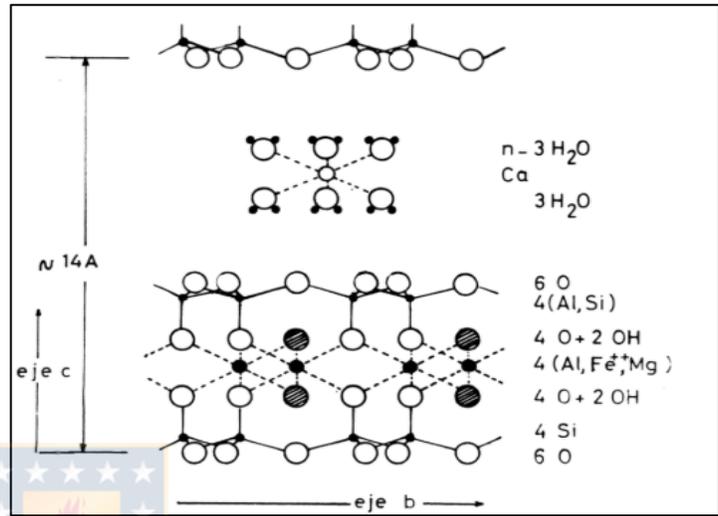


Figura 3.17 Esquema estructural simplificado de esmectita. Especie: montmorillonita con Ca^{2+} como catión de cambio, basado en modelo de Hofmann, Endell & Wilm. Extraído de Besoain (1985).

El desbalance de cargas varía de 0,65 a 0,80 y su origen está principalmente ligado a sustituciones en la unidad octaédrica. La carga negativa neta es balanceada por cationes intercambiables localizados en el espacio intercapa como en la superficie de las partículas. El tipo de catión interlaminaar determina la capacidad expansiva de la esmectita. Debido a la amplia gama de sustituciones isomórficas la capacidad de intercambio catiónico en los minerales de este grupo va desde los 80 a los 150 meq/100 g con superficies específicas que varían de 50 a 120 m^2/g la que puede llegar a 840 m^2/g al expandirse (Mitchell & Soga, 2005).

Su presencia es común en suelos, a excepción de la Hectorita. Son un producto común de procesos sedimentarios, metamórficos y alteración hidrotermal

3.2.2.1.- Nontronita

Esmectita dioctaédrica, presenta sustituciones de Al^{3+} por Fe^{3+} en la unidad octaédrica. Este reemplazo puede llegar a ser total representando más del 30% de Fe_2O_3 . En la unidad tetraédrica

también pueden haber sustituciones de Si^{4+} por Al o Fe, esta última puede inducir una distorsión y debilitamiento en la red (Besoian, 1985). Su fórmula por celda unidad queda definida como: $(\text{OH})_4(\text{Si}_{7,34} \text{Al}_{0,66})\text{Fe}_4^{3+}\text{O}_{20} \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

3.2.2.2.- Montmorillonita

Esmectita de tipo dioctaédrica. No presenta sustituciones isomórficas en la unidad tetraédrica, mientras que en la unidad octaédrica Mg^{2+} ocupa una de cada seis posiciones del Al^{3+} . Su fórmula por celda unidad queda definida como: $(\text{OH})_4\text{Si}_8(\text{Fe}_{3,34} \text{Mg}_{0,66}) \text{O}_{20} \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Alcanzan superficies específicas en el rango de 80-300 m^2/g . Las variedades cálcica y sódica hacen referencia al tipo de catión de cambio en su espacio interlamina, siendo la variedad sódica más susceptible de expandirse. Cuando el Catión de Ca^{2+} la montmorillonita se expande desde 10 a 20 Å que indica la penetración de 4 capas de agua molecular entre las láminas 2:1. En la variedad sódica esta dimensión aumenta hasta 160 Å (Besoain, 1985).

Su génesis está ligada a alteración de rocas piroclásticas básicas, tobas, plagioclasas, meteorización de micas,



3.2.2.3.- Hectorita

Esmectita de tipo dioctaédrica que presenta una total sustitución del Al^{3+} por Mg^{2+} . Y este a su vez por Li^+ . Puede alcanzar una capacidad de intercambio catiónico de 80 meq/100g. Su fórmula por celda unidad es $(\text{OH})_4\text{Si}_8 (\text{Mg}_{5,34} \text{Li}_{0,66})\text{O}_{20} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (Mitchell & Soga 2005).

Su génesis está ligada a alteración hidrotermal y alteración de cenizas volcánicas (Besoain, 1985).

3.3.- Carga Superficial y Reactividad

Cristalográficamente los minerales de la arcilla presentan distintos tipos de superficies con cargas eléctricas. Estas pueden ser paralelas al apilamiento de sus capas y unidades estructurales (y al mismo tiempo externas o externas) o perpendiculares en el caso de los bordes (Figura 3.18).

Aquellas correspondientes al plano basal de la unidad tetraédrica se denomina superficie siloxana y está formada por las uniones Si-O-Si. La segunda denominada superficie hidroxilo está constituida por uniones O-Al-OH de la unidad octaédrica y corresponde a un plano de grupos

(OH)⁻ que pueden eventualmente al estar expuestos ser disociados, generando con ello cargas superficiales (Figura 3.19). La tercera corresponde a bordes de ruptura donde se encuentran enlaces insaturados con grupos silanol (-Si-OH) y aluminol (-Al-OH), estos a menudo con carga positiva, presentan variaciones a cambios de pH (Carretero & Pozo, 2007).

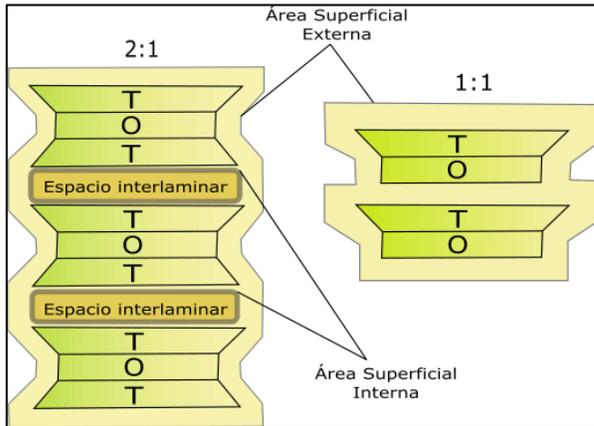


Figura 3.18 Tipos de superficies en arcillas tipo 1:1 y tipo 2:1. Modificado de Carretero & Pozo (2007).

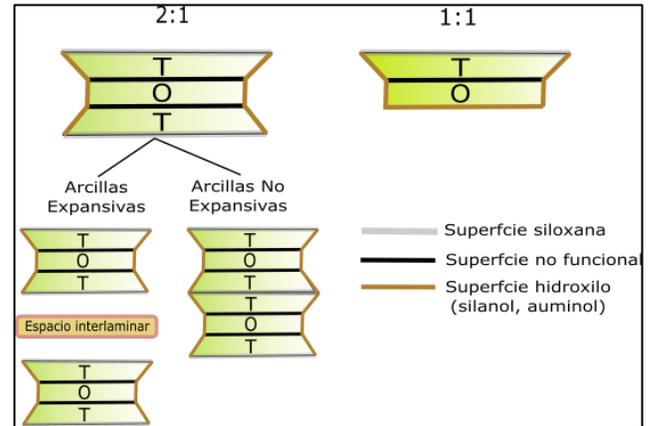


Figura 3.19 Superficies activas en arcillas tipo 1:1 y tipo 2:1. Modificado de Carretero & Pozo (2007).

El origen de las cargas eléctrica se atribuye tanto a sustituciones isomórficas, disociación de grupos funcionales expuestos y enlaces rotos en los bordes de las partículas que generan enlaces insaturados (Mitchell & Soga, 2005). Dependiendo de lo anterior, son catalogadas como permanentes o variables. De manera general, las superficies basales poseen carga negativa, mientras que los bordes pueden ser positivos. Pese a ello, el valor neto de la carga superficial, es decir la suma de todas las cargas, tiende a ser negativo. Este desbalance es el responsables de los fenómenos físicos y químicos como la capacidad de intercambio catiónico, capacidad de sorción y expansión, comportamiento en flujo, entre otros que serán explicados en este apartado

3.3.1.- Cargas Superficiales Permanentes

También llamada carga estructural (Duc *et al.*, 2005), se deben a sustituciones isomórficas dentro de las estructuras de arcilla al momento de formación del mineral y son independientes del pH del medio que las rodea. La intensidad y concentración de esta carga dependerá del lugar donde ocurra la sustitución. Si ocurre en la capa tetraédrica, por ejemplo: Si⁺⁴ por Al⁺³, el exceso de carga negativa se hallará más cerca de la superficie siloxana encontrándose más concentrada y con ello las uniones con iones de carga contraria serán de mayor intensidad. Si la sustitución

ocurre en la capa octaédrica, por ejemplo Al^{+3} por Mg^{2+} , la carga se encontrará deslocalizada y las uniones con iones de signo contrario serán de menor intensidad (Porta *et al.*, 2014).

3.3.2.- Cargas Superficiales Variables

Son cargas dependientes del pH del medio circundante, es decir están ligadas a las concentraciones relativas de H^+ y OH^- que interaccionan con grupos hidroxilos expuestos en las superficies y grupos silanol y aluminol expuestos en los bordes de las partículas. A pH alto se induce disociación o desprotonación del H^+ pertenecientes a los grupos funcionales, mientras que a pH bajo ocurre lo contrario, hay protonación, es decir los iones H^+ se adicionan a los átomos y/o moléculas en los bordes de la estructura, pudiendo generar cargas positivas.

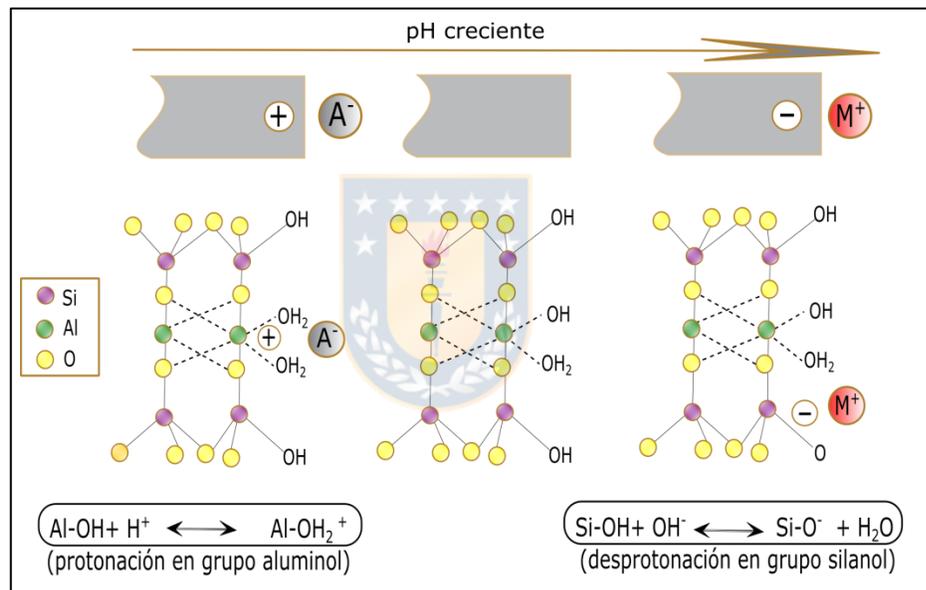


Figura 3.20 Cargas dependientes del pH. Ejemplo en arcillas tipo 2:1. Modificado de Carretero & Pozo (2007).

En las arcillas de tipo 2:1 predomina la carga laminar dada por sustituciones isomórficas, mientras que en las de tipo 1:1 predominan las cargas variables.

3.3.3.- Capacidad de Sorción

Debido al desbalance de cargas, una partícula de arcilla (sorbente) puede comportarse de diferentes maneras en presencia sustancias disueltas en una segunda fase (sorbato) la que puede ser líquida o gaseosa, es el caso de los procesos fisicoquímicos de absorción y adsorción.

La absorción, también llamada difusión, ocurre al haber una penetración en la fase absorbente, por ejemplo una partícula de arcilla, de una o más sustancias químicas pertenecientes a la segunda fase, atravesando la superficie y difundiéndose dentro de su estructura interna (Porta *et al.*, 2014), por ejemplo en espacios interlaminares de la estructura de una arcilla.

Por otra parte, la adsorción es el proceso fisicoquímico en el cual ocurre una fijación, acumulación o aumento de concentración de sustancias químicas de la segunda fase (sorbato), en la superficie de la fase sólida, también llamada interfase. Puede ser reversible en el caso de procesos de intercambio iónico o irreversible en el caso que ocurra quimisorción donde se generan enlaces covalentes entre las dos fases. Este proceso tiene gran importancia ambiental e industrial, pues es un mecanismo útil para retirar sustancias tanto orgánicas como inorgánicas que puedan resultar contaminantes en el suelo, agua potable, entre otros (Porta *et al.*, 2014).

Los mecanismos de sorción están determinados según las características de las partículas y las sustancias que la rodean:

- Fuerzas de Van der Waals: fuerzas intermoleculares de atracción, aditivas entre pares de átomos y relativamente débiles en comparación con aquellas que generan enlaces químicos. Están presentes en cualquier par de átomos. Resultan efectivas entre partículas próximas (0,1 a 0,2 nm) y tienen importancia en procesos de floculación.
- Fuerzas electrostáticas y enlaces iónicos: derivadas de campos electrostáticos existentes en las superficies de las partículas. Pueden ser de repulsión entre cargas del mismo signo o atracción entre cargas de signo contrario.
- Enlaces covalentes: enlaces estables producto de la compartición de electrones entre átomos. Se generan en procesos de adsorción, es decir, son reacciones de superficie, pero de carácter irreversible o difícilmente reversible (Porta *et al.*, 2014).

3.3.4.- Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

Debido a la carga eléctrica neta negativa en los minerales de arcillas, éstas tienden a enlazar en su superficie cationes de carácter intercambiable, es decir, pueden ser reemplazados o desplazados por otros existentes en una solución circundante. La cantidad de cationes reemplazables queda determinada por la “capacidad de intercambio catiónico” (CIC; CEC, siglas en inglés) y se expresa en miliequivalentes (meq) por 100 g de arcilla seca. Este es un indicador de la cantidad

de cargas negativas en la superficie de una partícula, por ende también será un indicador de la capacidad de retener cationes. Corresponde a un proceso de adsorción de carácter reversible, es decir hace referencia a una reacción de superficie que está determinada en parte por la disponibilidad de cationes en el medio circundante (Carretero & Pozo, 2007).

3.3.5.- Expansión de Arcillas

La hidratación de una partícula de arcilla es un proceso particular de absorción entre una fase sólida y agua. En él las moléculas de H₂O polares, penetran y se intercalan en forma de capas en el espacio interlaminar de los minerales de arcillas producto de atracción electrostática, dando lugar a una expansión y aumento sustancial de volumen. Este fenómeno se observa principalmente en el grupo de las esmectitas también conocidas como arcillas expansivas de tipo 2:1. El grado de hinchamiento o expansión depende del catión interlaminar y de la carga eléctrica superficial. Por ejemplo si el catión interlaminar es Na⁺, la esmectita puede alcanzar una gran expansión, pudiendo incluso generarse una disociación entre capas (Carretero & Pozo, 2007). Esto último, dependerá del porcentaje de sodio intercambiable (PSI), con respecto al contenido total de cationes intercambiables como Ca²⁺, K⁺, etc. (3.3.5.- Capacidad de Intercambio Cationico). Si el PSI excede el 15 % se ve afectado el proceso de expansión de las arcillas (Shainberg, 1990, en Barreto *et al.*, 2003), pudiendo generarse procesos de desintegración dado por la separación de las capas, con una subsecuente dispersión, en donde ocurre un reordenamiento de las partículas. Estudios en suelos arcillosos, confirman el 15% de PSI como punto crítico, sobre el cual hay un descenso importante en la conductividad hidráulica del suelo (Barreto *et al.*, 2003), el que podría deberse al efecto dispersante del Na⁺ intercambiable que conduce a una obstrucción de los espacios porosos.

Por el contrario, si el catión interlaminar es divalente como Ca²⁺ o Mg²⁺ la capacidad de hinchamiento será reducida debido a la mayor fuerza electrostática (Carretero & Pozo, 2007).

3.3.6.- Distribución de Cargas

Al estar inmersa en un medio acuoso con una determinada disponibilidad de iones, una partícula de arcilla, con un desbalance neto negativo, atraerá a su superficie iones con carga contraria como parte de un proceso de adsorción. La concentración de estos iones es mayor en la interfase y disminuye conforme se alejan de ella. Este perfil idealizado de concentraciones iónicas que

rodean a una partícula se conoce como modelo de doble capa eléctrica y se aplica a sistemas coloidales. Fue desarrollada por los investigadores Gouy (1910) y Chapman (1913), y luego modificada por Stern (1924).

En la proximidad de la interfase o superficie de la partícula de arcilla se genera una capa formada por iones positivos y moléculas dipolares de agua, ésta capa rígida recibe el nombre de capa de Stern. De manera continua otros iones positivos seguirán siendo atraídos por la partícula de arcilla pero serán repelidos por la capa de Stern también cargada positivamente, la que a su vez atraerá aniones presentes en la solución, esta dinámica de atracción-repulsión da origen a una segunda región llamada Capa difusa (Figura 3.21). De esta manera la concentración de cationes disminuirá conforme aumenta la distancia con la interfase de la partícula cargada negativamente hasta igualar las concentraciones iónicas del mismo catión en la solución. De manera análoga los aniones tienen una concentración menor en la interfase de la partícula la que aumenta conforma se aleja de ella (Figura 3.22).

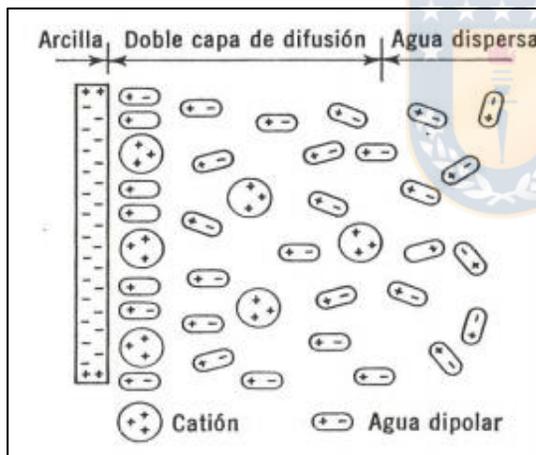


Figura 3.21 Moléculas de agua y cationes adsorbidos en la doble capa difusa. Extraído de Sowers (1972).

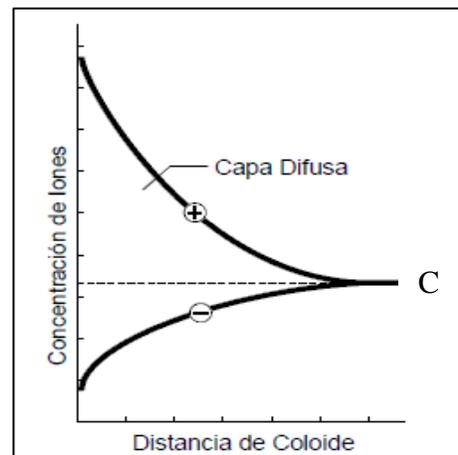


Figura 3.22 Variación de concentraciones catiónicas y aniónicas en doble capa difusa. “C” representa la concentración de la solución. Modificado de ZetaMeter Inc. (2003).

El espesor efectivo de la doble capa ($1/K$), definida como la distancia hasta donde llega la influencia de la superficie de la partícula, más allá de donde dejan de verse alteradas las propiedades de la fase acuosa, está determinada por la concentración y valencia de los iones. Su valor teórico se puede calcular como indica la Fórmula 23

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{kz\sqrt{C_0}} \quad (23)$$

En ella C_0 corresponde a la concentración del ión en la solución, z es el estado de oxidación del ión, y k corresponde a la constante de Boltzmann. En la práctica, la región afectada por la doble capa difusa es menor que la calculada de forma teórica. Como ejemplo, para cationes divalentes la doble capa calculada va desde los 0,5 nm a 50 nm para concentraciones de 10^{-1} mol/L y 10^{-5} mol/L respectivamente. Para las mismas concentraciones, considerando un catión monovalente se obtienen espesores de 1 nm a 100 nm (Porta *et al.*, 2014).

Así, a mayor concentración iónica habrá también una mayor concentración del catión en la interfase y con ello mayor atracción, disminuyendo su espesor (Figura 3.23a). Similar es el caso al aumentar la valencia del catión con lo que la atracción aumenta, disminuyendo el espesor de la doble capa (Figura 3.23b).

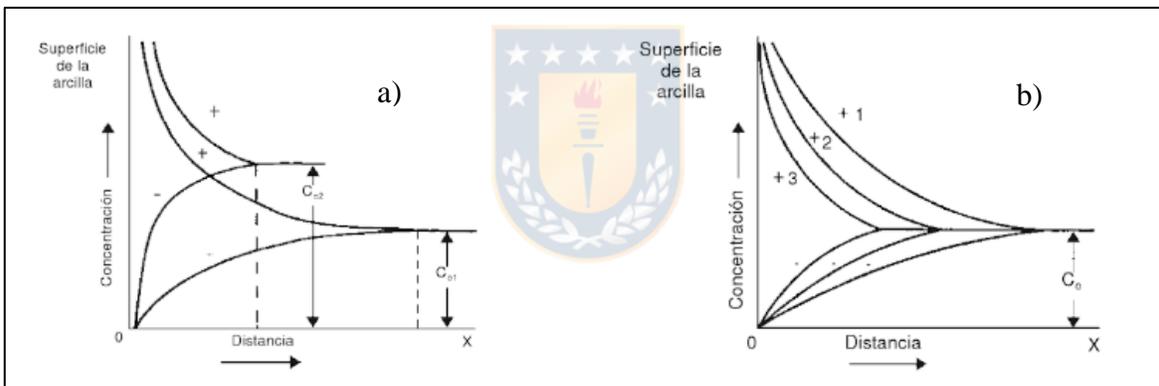


Figura 3.23 Variaciones en la doble capa difusa en gráfico de distancia v/s concentración. a) cambios en la concentración química b) influencia del número de valencia. Extraído de Besoain (2014).

Análogamente la diferencia de concentración entre iones positivos y negativos a una distancia determinada se conoce como densidad de carga (ZetaMeter Inc., 2003). La partícula con carga negativa y su atmósfera con carga positiva generan un potencial eléctrico el cual tiene un valor máximo en la superficie de la partícula y disminuye al alejarse de ella. El potencial donde se unen la Capa de Stern y la Capa Difusa con respecto a una referencia tomada lejos de la interfase, corresponde al Potencial Zeta (ζ). Este punto resulta de interés pues se puede medir y es un indicador de las fuerzas repulsivas entre las partículas. Disminuye y aumenta conforme lo hace el espesor de la doble capa, porque al igual que ella, está determinado por la naturaleza de la

superficie de la partícula y las características de medio de dispersión como concentración iónica y el pH.

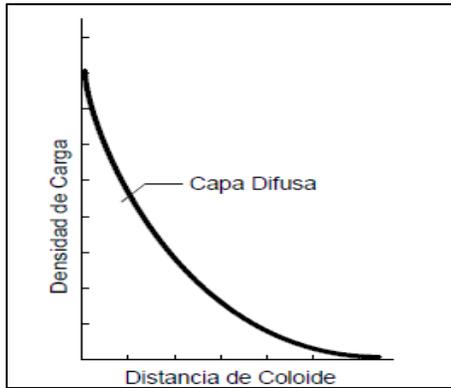


Figura 3.24 Distribución de la densidad de carga. Modificado de ZetaMeter Inc. (2003).

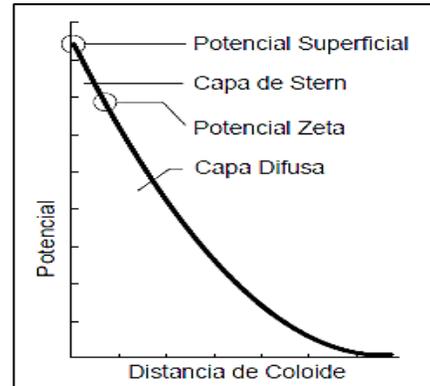


Figura 3.25 Distribución del potencial eléctrico. Modificado de ZetaMeter Inc. (2003).

El pH en cual el potencial zeta es igual a 0, se conoce como punto isoeléctrico (PIE; *IEP* siglas en inglés). En este pH es esperable que las partículas no experimenten repulsión y tiendan a aglomerarse.

3.3.7.- Balance de Fuerzas: Teoría DLVO

Teoría desarrollada por Derjaguin & Landau (1941) y Verwey & Overbeek (1948) en investigaciones independientes. Explica la tendencia de un agregado de partículas a aglomerarse o dispersarse por efecto de fuerzas atractivas y repulsivas en un sistema coloidal.

Las fuerzas repulsivas corresponden a fuerzas electrostáticas que se producen al haber aproximación de la doble capa de dos partículas. Esta aumenta cuanto menor sea la distancia entre las partículas y disminuye fuera de la doble capa. Su valor máximo está relacionado con el potencial eléctrico de la superficie de la partícula (Figura 3.26).

Las fuerzas atractivas de tipo de Van der Waals entre las partículas, son el resultado de las fuerzas entre las moléculas individuales de cada una. Es decir, una molécula de la primera partícula experimenta la atracción de Van der Waals de cada molécula de una segunda partícula y la fuerza total corresponde a la suma de todas ellas. Las variaciones de este tipo de fuerza son representadas por una curva de atracción (Figura 3.27).

Las fuerzas de Van der Waals son independientes de la solución, mientras que las fuerzas electrostática repulsivas pueden alterarse variando la concentración y valencia de los iones.

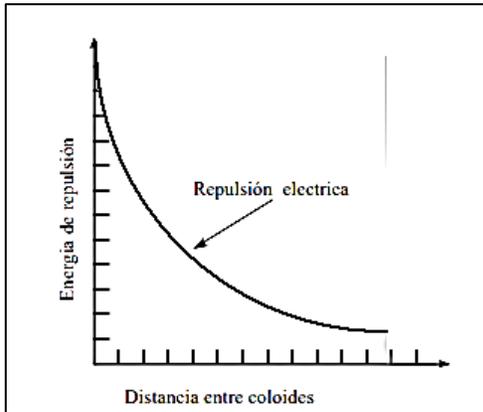


Figura 3.26 Distribución de la energía de repulsión v/s Distancia. Modificado de ZetaMeter Inc. (2003).

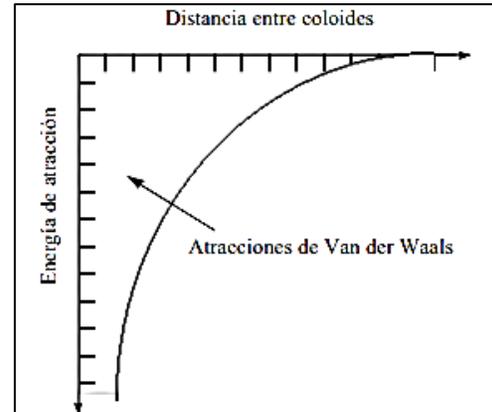


Figura 3.27 Distribución de las fuerzas atractivas de Van der Waals v/s distancia. Modificado de ZetaMeter Inc. (2003).

La teoría DLVO combina ambas curvas, la curva resultante corresponde a la “energía neta de interacción” y se obtiene restando las magnitudes de energía para una determinada distancia entre partículas (Figura 3.27). La energía neta de interacción se representa en el cuadrante superior si es repulsiva, mientras que si es atractiva se representa en el cuadrante inferior.

Si existe una zona repulsiva, entonces el punto de máxima energía de repulsión se llama la barrera de energía, la altura de esta barrera indica cuan estable es el sistema. Si la barrera desaparece, entonces la interacción neta es totalmente atractiva y consecuentemente las partículas se aglomeran. Esta región interna es referida como la trampa de energía, pues los coloides pueden considerarse como sistemas unidos por fuerzas de Van der Waals (ZetaMeter Inc., 2003).

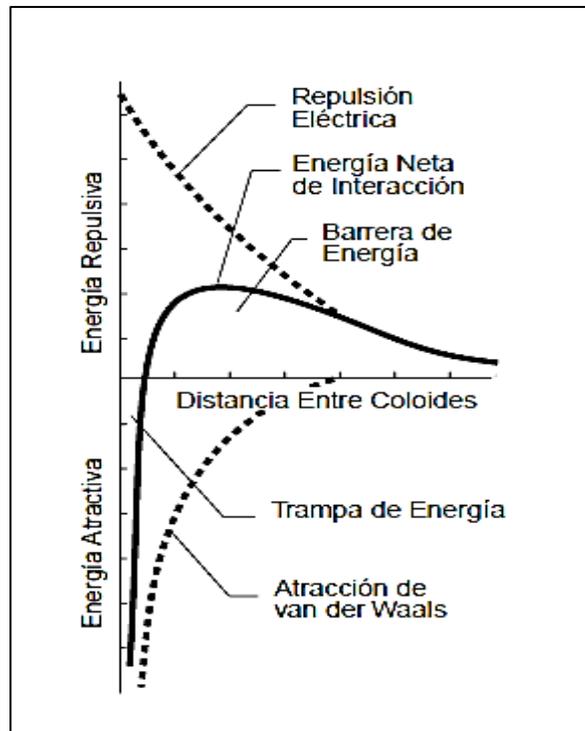


Figura 3.28 Distribución de energía neta de interacción. Resultante de la interacción entre fuerzas atractivas y repulsivas. Extraído de ZetaMeter Inc. (2003).

3.3.8.- Comportamiento Coloidal: Floculación y Dispersión

Un coloide es un sistema no homogéneo conformado por dos fases: una fluida o continua y una dispersa. Es una mezcla cuyo comportamiento se clasifica de manera intermedia entre una solución y una dispersión.

La fase dispersa presenta tamaños de partículas de van desde 1 a 1000 nm. Aunque estos valores no son estrictos basta con que una sola dimensión de la partícula posea un tamaño menor a los 1000 nm para que presente un comportamiento coloidal. Suelen tener una superficie específica muy elevada, presentan carga eléctrica superficial lo que los hace reactivos y suelen presentar movimientos brownianos que las mantiene en suspensión.

Floculación es el proceso de colisión y aglomeración de las partículas en suspensión al ser desestabilizadas. El proceso de desestabilización se denomina coagulación, y se logra adicionando especies químicas que anulen o disminuyan las fuerzas de repulsión. Esto conlleva a la formación de microflóculos y flóculos. Si se observa el diagrama DLVO, gráficamente lo que

ocurre es que se elimina la barrera de energía identificada en la curva de energía neta de interacción.

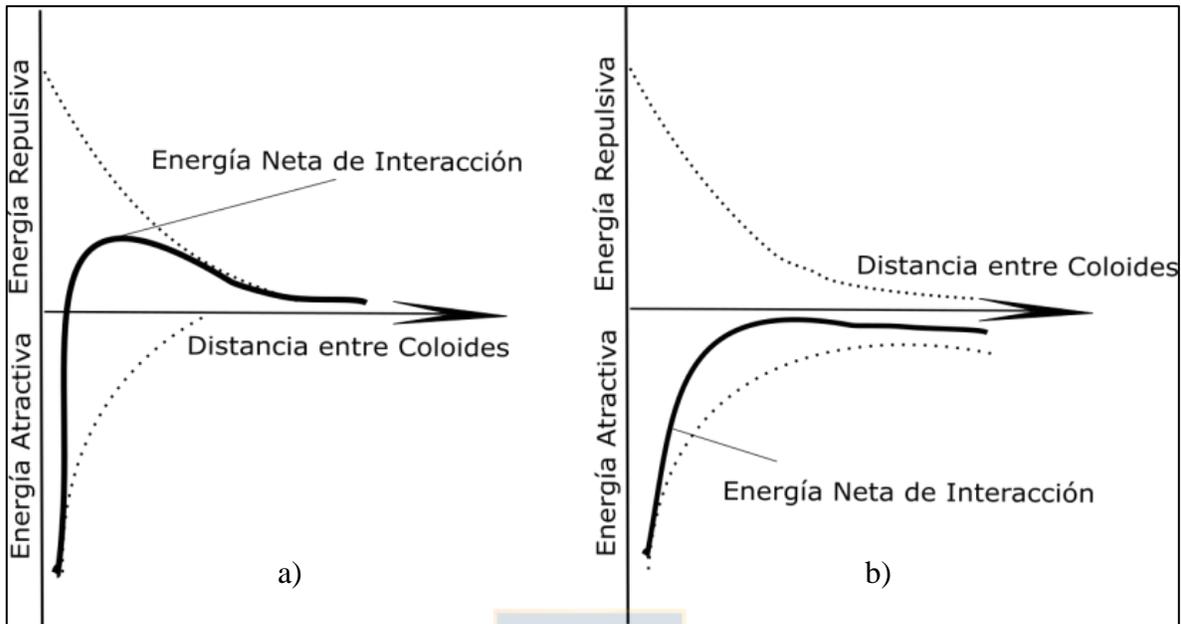


Figura 3.29 Distribución de energía neta de interacción. a) con fuerzas activas de repulsión. b) fuerzas de repulsión disminuidas. Modificado de ZetaMeter Inc. (2003).

Se puede generar floculación mediante:

- Compresión de la doble capa difusa que rodea a las partículas, permitiendo con ello que actúen las fuerzas atractivas de Van der Waals (aumentar concentración de electrolitos).
- Neutralización de la carga superficial de las partículas por medio de algún polímero catiónico que al ser adsorbido reduzca o neutralice a carga.
- Establecimiento de puentes interpartículas mediante floculantes orgánicos o inorgánicos capaces de generar puentes moleculares.
- Captura del coloide, mediante precipitación por exceso de coagulante como por ejemplo sales de hierro o aluminio que pueden inducir la precipitación de óxidos e hidróxidos.

Los tipos de interacciones entre superficies en minerales arcillosos que se pueden dar y que pueden conducir a un proceso de floculación:

- Asociación cara-cara (F-F): cuando la interacción se produce entre superficies basales, produciéndose una adhesión entre los planos de oxígenos. La energía de interacción de

Van der Waals en este caso es la más alta, dando lugar a apilamiento de las partículas más grueso que no flocula el sistema.

- Asociación borde-borde (E-E): cuando la interacción se produce en los bordes de las partículas con enlaces rotos. Genera arreglos de gran volumen y baja densidad.
- Asociación borde-cara (E-F): cuando la interacción se produce entre superficies basales y los bordes de las partículas. Da lugar a arreglos conocidos como “castillo de naipes” que también presentan gran volumen y baja densidad y generan fenómenos de floculación en suspensiones con pocos contenidos de arcillas. Tienen más probabilidades de formarse en condiciones de bajo pH que vuelve positiva la carga variable del borde de las partículas.

Los procesos de floculación son reversibles en la medida que los coagulantes se alejen de las cargas negativas de una partícula de arcilla, reactivando con ello las fuerzas repulsivas y haciendo que cada partícula se mueva como un ente individual, generando nuevamente dispersión.

El poder floculante de los iones depende de su radio iónico y de su valencia. Cuanto mayor sea la valencia y cuanto menor sea su radio iónico hidratado mayor será el poder floculante. Así cationes monovalentes como Na^+ , K^+ al estar en solución se encuentran rodeados de una importante capa de agua por lo que tienen un débil poder floculante, es decir, tienden a generar dispersión. Por el contrario cationes divalentes como el Ca^{2+} se encuentran rodeados por una capa más débil y tienden a generar floculación, en la misma línea aunque con un poder menor se encuentra el Mg^{2+} .

4.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1.- Caracterización Muestras

4.1.1.- Estándares Filosilicatos (CMS)

The Clay Minerals Society (CMS), provee estándares de arcilla previamente recolectados en su entorno natural, procesados y caracterizados en detalle, cuyo fin es servir de referencia, de modo que los materiales distribuidos a distintos destinatarios sean idénticos. Los estándares proporcionados por CMS se encuentran resumidos en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Estándar de filosilicatos e información asociada, suministrada por CMS.

Estándar Filosilicato	Código/ colección	Proveniencia	Mineralogía	Fracción <2 μm	CEC (meq/ 100g)	Área Superficial	
Arcilla Expansiva	Montmorillonita sódica (Ca ₁₂ Na ₃₂ K ₀₅) (Al _{3,01} Fe ₄₁ ³⁺ Mn ₀₁ Mg ₅₄ Ti ₀₂) (Si _{7,98} Al ₀₂) O ₂₀ (OH) ₄	SWy-2 / Source Clay	Fm. Newcastle (Cretácico). Crook Wyoming, EEUU.	75% esmectita, cuarzo (8%), feldespato (16%), yeso (1%); +/- mica/illita, caolinita, clorita.	95% esmectita	76,4	31,82 +/- 0,22
	Montmorillonita cálcica (Ca ₃₉ Na ₃₆ K ₀₂) (Al _{2,71} Mg _{1,11} Fe ₁₂ ³⁺ Mn ₀₁ Ti ₀₃) Si ₈ O ₂₀ (OH) ₄	Saz-1 / Source Clay	Fm. Bidahochi (Plioceno). Apache, Arizona, EEUU.	Esmectita (98%), cuarzo (1%), otros (1%)	99% esmectita	120	97,42 +/- 0,58
	Hectorita (Mg ₅₆ Na ₄₂ K ₀₅) (Mg _{4,60} Li _{1,39} Ti ₀₁) (Si _{7,75} Al _{1,17} Fe ₀₅ ³⁺) O ₂₀ (OH) ₄	SHCa-1 / Source Clay	Fm. Red Mountain Andesite (Plioceno). San Bernardino, California. EEUU.	Esmectita (50), calcita (43%), dolomita (3%), cuarzo (3%), otros (1%).	97% esmectita	43,0	63,19 +/- 0,50
	Nontronita marrón M ₇₂ (Si _{7,55} Al _{0,45}) (Fe _{3,683} Mg _{0,05}) O ₂₀ (OH) ₄	NAu-2/ Special Clay	Mina Uley, Península de Eyre, Australia.	Nontronita(95%), Plagioclasa (5%), Caolín (4%), Cuarzo (<1%)	93% esmectita	-	-
	Nontronita verde M _{1,05} (Si _{6,98} Al _{1,02}) (Al _{0,29} Fe _{3,68} Mg _{0,04}) O ₂₀ (OH) ₄	Nau-1/ Special Clay	Mina Uley, Península de Eyre, Australia.	Nontronita(90%), Caolín (4%), Cuarzo (2%), Biotita (<1%), Goetita (3%).	90% esmectita	-	-
Arcilla No Expansiva	Caolín alta cristalinidad (Mg ₀₂ Ca ₀₁ Na ₀₁ K ₀₁) (Al _{3,86} Fe ₀₂ ³⁺ Ti ₁₂) (Si _{3,83} Al _{1,17}) O ₁₀ (OH) ₈	KGa-1b/ Source Clay	Fm. Tuscaloosa, (Cretácico?). Washington, Georgia, EEUU.	Caolinita (96%), anatasa (3%), crandalita (1%), +/- dickita y cuarzo.	96% caolín	2,0	10,05 +/- 0,02 m ² /g
	Caolín baja cristalinidad (Al _{3,66} Fe ₀₇ ³⁺ Ti _{1,16}) (Si ₄) O ₁₀ (OH) ₈	KGa-2/ Source Clay	Secuencia del Terciario inferior. Warren, Georgia, EEUU.	Caolinita (96%), anatasa (3%), crandalita (1%), +/- cuarzo y mica-illita.	96% caolín	3,3	23,50 +/- 0,06 m ² /g

Estos materiales se incluyen dentro de dos colecciones, la más antigua denominada *Source Clay* suministra desde el año 1972 estándares homogenizados que alcanzan toneladas métricas de material asegurando una larga disponibilidad. Posteriormente el programa se expandió incluyendo la colección *Special Clays*, donde se encuentran aquellas muestras de arcilla que no son susceptibles de homogenizar o su disponibilidad está asegurada en cantidades pequeñas.

Para el caso de las nontronitas, ambos tipos difieren en que N Au-1 o Nontronita verde, presenta una mayor contenido de Al^{3+} ($\text{Al}_2\text{O}_3=8,2\%$) y se reconoce la presencia de Fe^{3+} ($\text{Fe}_2\text{O}_3=35,9\%$) mayoritariamente en posiciones octaédricas, mientras que en N Au-2 o Nontronita marrón hay un menor porcentaje de Al^{3+} ($\text{Al}_2\text{O}_3=3,1\%$) que está en posiciones octaédricas, mientras que el Fe^{3+} ($\text{Fe}_2\text{O}_3=37,9\%$) lo hace en las posiciones tetraédricas. Para ambos estándares se ha identificado al Ca^{2+} como catión de cambio en espacios interlaminares (Keeling J. *et al.*, 2000).

4.1.2.- Estándares Illita

Los estándares de Illita, corresponden a muestras de rocas pelíticas, provenientes del cinturón metamórfico de muy bajo grado *Variscan Belt*, ubicado al SO de Inglaterra, son comúnmente utilizados para la calibración de equipos de difracción de rayos-x debido a que en estas muestras los patrones de metamorfismo regional se encuentran bien definidos (Warr & Rice 1993).

Cada estándar presenta un índice de cristalinidad determinado (Tabla 4.2), conocido como Índice de Kubler (KI) o *Cristallinity Index Standards* (CIS) que permite identificar y/o diferenciar entre la diagénesis y el metamorfismo.

El KI-CIS se define como la anchura a la mitad de la altura de la primera reflexión basal de la illita y su valor disminuye al aumentar la cristalinidad (a menor valor KI-CIS mayor grado metamórfico.). Su determinación se hace mediante DRX y depende estrictamente de las condiciones experimentales, de ahí que resulte necesario la utilización de patrones conocidos para calibrar los resultados.

Tabla 4.2 Estándares Illita e información asociada proporcionada por Warr & Rice (1993) y sus correspondientes KI-CIS (Warr & Ferreiro-Mählmann, 2015).

Estándar Filosilicato	KI-CIS/ Zona	Proveniencia/Edad	Litología	Composición	Composición fracción <2µm	
Arcilla No expansiva	SW1	0,630/ diagenética	Fm. Bude, Widemouth Bay, costa norte Cornwall, Inglaterra/ Carbonífero Superior.	Limolita	Illita; Clorita; cuarzo, pirita; opacos detríticos +/- plagioclasa, feldespato potásico	Illita/esmectita; Clorita (Mg); Albita; Cuarzo.
	SW4	0,380/ anchizonal	Fm. Trevose Slate, Portgaverne Harbour, costa norte Cornwall, Inglaterra/ Devónico Medio.	Pizarra verde	Illita; muscovita; clorita; cuarzo, feldespato potásico y albita paragonita	Illita/ muscovita Clorita (Fe) +/- paragonita, cuarzo, albita
	SW6	0,250/ epizonal	Fm. Tredorn Slate, Trebarwith Strand, costa norte Cornwall, Inglaterra/ Devónico Tardío.	Pizarra verde grisácea	Muscovita; Clorita (Fe); Cuarzo; +/- albita, opacos.	Illita/muscovita, clorita (Fe); +/- cuarzo, albita, esmectita

4.1.3.- Pilas de Lixiviación (L-1)

Residuo derivado de procesos de lixiviación (Fotografía 4.1). La fracción gruesa ha sido caracterizada mineralógicamente mediante descripción macroscópica mientras que las más pequeñas han sido descritas mediante lupa binocular. Las descripciones son complementadas con análisis de DRX de roca total y de la fracción arcillosa (0,45 a 2 µm).



Fotografía 4.1 Muestra L-1 de granulometría gruesa a fina.

4.1.3.1.- Tamizado Húmedo

La muestra global presenta una distribución de tamaño de partículas gruesa a fina, con un diámetro máximo nominal cercano a los 5 cm (Fotografía 4.1), dado lo anterior la curva

granulométrica de la muestra se obtiene mediante tamizado húmedo para la fracción mayor a 38 μm . El procedimiento vía húmeda permite asegurar una mejor dispersión de las partículas y separación efectiva de las fracciones más finas, las que posteriormente son ensayadas por difracción láser.

Para ello, la muestra total (1,74 kg) es puesta sobre un set de tamices de malla metálica (Fotografía 4.2) estandarizados según norma ASTM E11-17 y luego sobre una plataforma vibratoria. Una vez realizado el tamizado en seco, de forma manual se incorpora agua en cada tamiz, con el fin de que las partículas más finas se movilizan gradualmente y sean retenidas en tamices con aberturas más pequeñas. La fracción menor a la malla 400 es contenida junto a toda el agua utilizada en el procedimiento en un recipiente amplio que permite la extracción del agua sobrante. Cada fracción de tamaño contenida en los distintos tamices y la fracción menor a la malla 400 son llevadas a estufa de secado a 40° C por tres días, para luego determinar su masa con balanzas de precisión 0,01 g (Fotografía 4.3). La masa obtenida para cada fracción se resume en la (Tabla 4.3).

Tomando en cuenta que esta técnica no considera la forma de las partículas, para asegurar que no existieran secciones granulares que excedieran los 2 mm, se toma una fracción representativa bajo la malla 18 para los análisis posteriores de difracción láser, es decir, aquella retenida a partir de la malla #35.



Fotografía 4.2 Set de tamiz.



Fotografía 4.3 Balanzas utilizadas para determinar masa retenida.



Fotografía 4.4 Fracción menor a la malla #18

4.1.3.2.- Caracterización Mineral

El contenido mineral indica un proceso típico de alteración hidrotermal (Tabla 4.3). La muestra presenta un color marrón predominante dado por alteración de óxidos de Fe. En los fragmentos

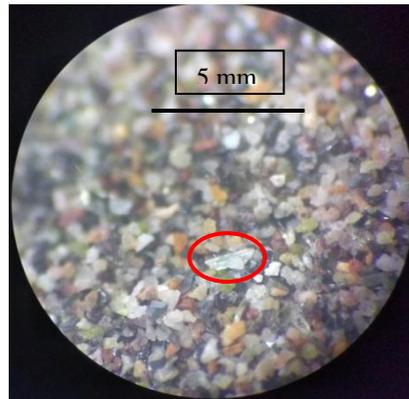
de mayor tamaño se reconocen relictos de rocas ígneas félsicas con abundante cuarzo y feldespatos con alteración moderada a arcilla/sericita cuyos componentes máficos corresponden a biotitas y en menor medida anfíboles (Fotografía 4.4). De forma aislada es posible encontrar crisocola y óxidos de Cu (<1%). En las fracciones más pequeñas se reconoce la mineralogía antes mencionada pero en cristales individuales liberados, además de cristales de yeso de hábito tabular y fibroso, micas y hematitas de hábito hojoso (Fotografía 4.5 y 4.6).

Tabla 4.3 Resultado tamizado húmedo y composición mineral aproximada de los componentes principales de cada fracción. Determinada por descripción en lupa binocular, aumento 1,5x.

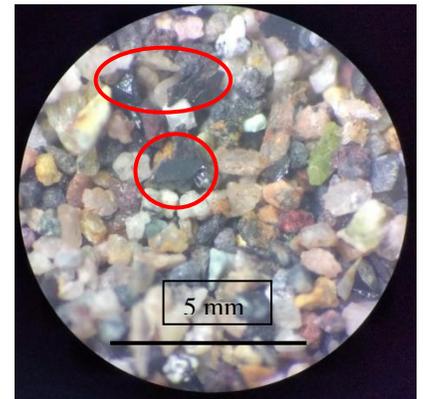
Malla	Tamaño (µm)	Masa retenida (g)	Cuarzo (%)	Feldespatos (%)	Hematita (%)	Micas (%)	Yeso (%)	Otros/ No determinado
< 400	< 37	168,6	10%	-	5	15	-	70
400	37	25,59	30	15	20	10	3	22
270	53	26,64	30	15	20	10	3	22
200	74	21,90	25	5	25	15	1	29
140	105	24,55	25	7	22	15	2	29
100	149	19,95	18	12	20	10	1	39
80	177	18,60	20	10	18	7	2	43
60	250	62,92	20	7	18	10	3	42
35	500	81,34	18	7	20	10	3	42
18	1000	119,9	15	10	10	5	1	59
10	2000	193,1	18	15	7	4	-	66
5	4000	205,9	18	10	10	4	-	68
1/4"	6300	515,0	12	18	8	5	-	67
1/2"	12500	177,4	15	14	10	4	-	67
3/4"	19000	0,0	-	-	-	-	-	-



Fotografía 4.4 Fragmentos de rocas ígneas retenidos en malla #1/4". Lupa binocular 1,5x.



Fotografía 4.5 Cristal de yeso en su variedad fibrosa retenido en malla #100. Lupa binocular 1,5x.



Fotografía 4.6 Hematitas retenidas en malla #60. Lupa binocular 1,5x.

Los resultados de DRX de roca total confirman la presencia de estos minerales e identifica dos tipos de micas: muscovita y clinocloro (Diagrama 4.1), mientras que en la fracción arcillosa se reconocen variedades de esmectita, caolín, clorita y mica/illita (Diagrama 4.2).

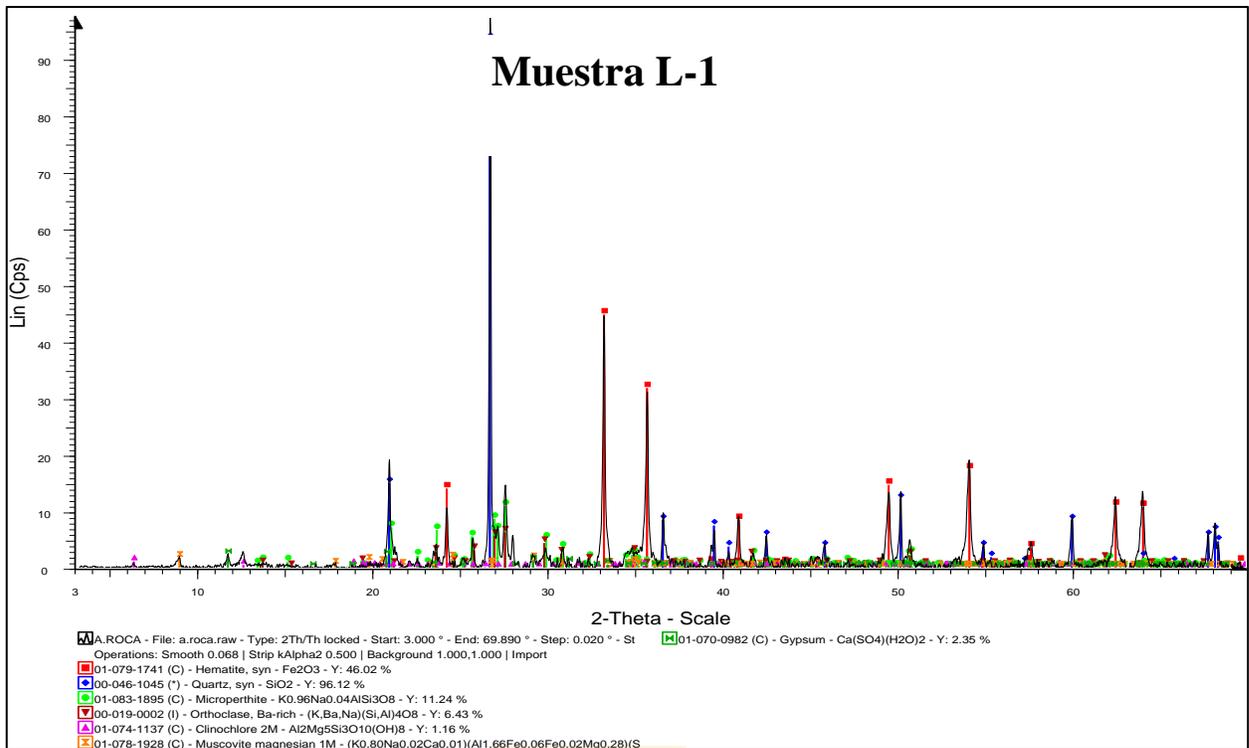


Figura 4.1 Difractograma de roca total para muestra L-1.

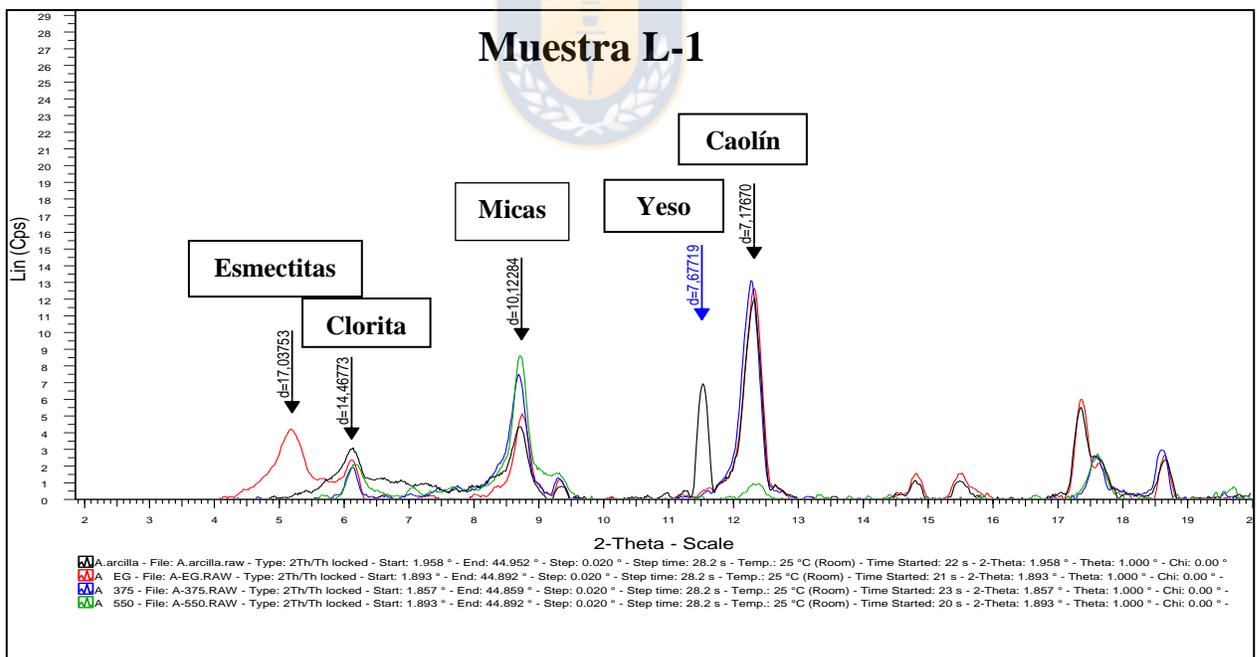
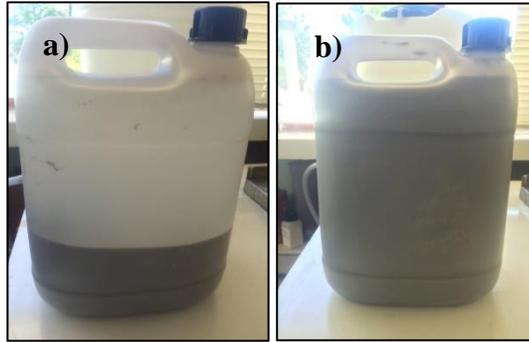


Figura 4.2 Difractograma de la fracción arcillosa para muestra L-1.

4.1.4.- Muestra Canal de Relave (M-1; M-2; M-5)

Corresponden a muestras de relave frescas, tomadas en el canal a distintas distancias desde la planta concentradora (Fotografía 4.7). Tienden a presentar una granulometría fina, que no se modifica de manera importante a lo largo del canal.



Fotografía 4.7 Muestras de canal de relave fresco. **a)** muestra M-5 decantada
b) muestra M-5 homogenizada.

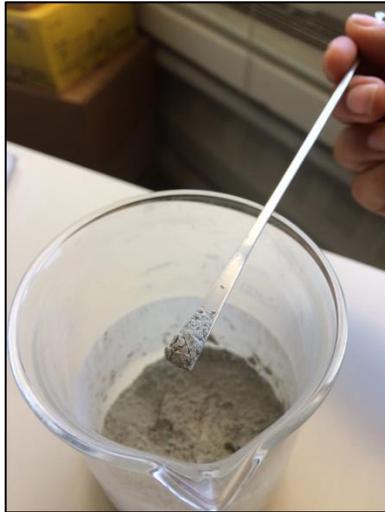
En muestreos anteriores, se reporta un contenido mineral similar en todas las muestras. Según se desprende de estos análisis de DRX la fase sólida está compuesta por partículas de cuarzo, feldespatos (plagioclasa y Feld K), micas (muscovita, clinocloro y flogopita), yeso, anhidrita y cantidades menores de minerales metálicos (pirita, molibdenita y magnetita). En tanto en la fracción arcillosa se reconocen trazas de esmectitas en todos los puntos muestreados, además de cloritas y micas.

4.1.5.- Tranque de Relave (M-50; M-11)

Corresponden a muestras provenientes de un tranque de relave de pórfido cuprífero de más de 80 años, inactivo, extraídas de un mismo sondaje a distintas profundidades. Han sido caracterizadas y analizadas en trabajos previos.

La muestra M-50 (Fotografía 4.8) de mayor profundidad presenta una granulometría fina a muy fina, mientras que la muestra M-11 (Fotografía 4.9) ostenta un máximo nominal tamaño arena. Composicionalmente no presentan mayores diferencias. Ambas contienen feldespatos (plagioclasa y Feld K), micas (biotita, clinocloro, muscovita), epidota, cuarzo, y metálicos (pirita,

hematita, magnetita, rutilo), en tanto en la fracción arcillosa la DRX reporta clorita, micas y caolín.



Fotografía 4.8 Muestra M-50.



Fotografía 4.9 Muestra M-11.

4.2.- Difracción Láser

4.2.1.- Instrumentos

4.2.1.1.- Medidor de Tamaño de Partículas



Corresponde a la herramienta principal de trabajo. La gran mayoría de estos instrumentos funcionan de manera similar, logrando en algunos casos mediciones a escala nanométrica, además de incorporar unidades anexas que adicionan distintas funciones.

Cuenta con 2 módulos funcionales o unidades, una dispersante y otra lectora, además de un software computacional que permite procesar las lecturas, obtener gráficos de manera directa y al mismo tiempo exportar esta base de datos en formatos más convencionales como XML.

La unidad de dispersión, como bien indica su nombre, se encarga de dispersar la muestra granulada. Lo hace vía líquida o seca, además de usar ultrasonido para deshacer aglomeraciones que potencialmente pueden afectar los resultados. La unidad lectora cuenta con una celda de medición por donde pasa la muestra dispersada y hacia donde apunta un láser el que se difracta en contacto con los granos, generando sombras cuya dimensión están en proporción directa con el tamaño de las partículas.

En este trabajo, las mediciones han sido realizadas en el Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción, utilizando el medidor de partículas “Analysette 22”, modelo “MicroTec Plus”, procedente del laboratorio de manufactura alemana Fritsch, el que realiza mediciones en el rango de los 0,08 a 2000 μm (Fotografía 4.10).

Para el caso específico del medidor utilizado, éste cuenta con un módulo que funciona vía húmeda. Normalmente se procede a utilizar agua potable de conexión regular (cañería) previamente filtrada. No obstante, mediante la conexión de un controlador de bomba (Fotografía 4.11) es posible realizar la dispersión con cualquier otro medio fluido contenido en un recipiente (Fotografía 4.12) que permita el almacenamiento del volumen necesario y su posterior extracción (por ej. un bidón de capacidad 5 a 25 L).

El software controlador del equipo permite de forma manual optar por una medición con o sin ultrasonido, además de admitir la regulación de su intensidad.

Ambos parámetros: tipo de fluido y ultrasonido, son las variables a considerar en el trabajo de laboratorio.



Fotografía 4.10 Analizador y sus dos módulos funcionales.



Fotografía 4.11 Controlador de bomba para extracción de fluido en contenedores.



Fotografía 4.12 Contenedor de agua, capacidad 25 L y bomba.

4.2.1.2.- Instrumentos Complementarios

Espátulas de laboratorio: principalmente plásticas, ocupadas para homogenizar la muestra y para seleccionar la pequeña porción que será medida. El tamaño de la curvatura debe tener relación con el tamaño de los granos. Materiales más gruesos (1-2 mm) necesitan espátulas más grandes para mejorar la representatividad de la muestra.

Vasos precipitados: usados para homogenizar y contener las muestras durante la medición.

Estufas de secado: es indispensable que las muestras estén secas previa medición. La humedad contenida entre los granos, contribuye a generar aglomeraciones que afectan el muestreo. Para el secado de las muestras se ocupan estufas de secado a no más de 50° C, para no dañar minerales más sensibles a la temperatura.

Balanzas: con precisión de 0,01 g cuando se ha requiera medir masa bajo los 300 g y de 0,1 g para rangos mayores.

4.2.1.- Preparación Soluciones

Los medios fluidos utilizados corresponden a agua potable, agua destilada, agua de mar y soluciones preparadas de NaCl (adición de NaCl), CaCl₂ (adición de CaCl₂•2H₂O) y SO₄²⁻ (adición de CaSO₄• 2H₂O; Na₂SO₄ y CuSO₄•5H₂O).

Las mediciones con agua potable se realizan mediante la conexión de cañería regular de la Universidad de Concepción en la ciudad de Concepción, Chile.

El agua destilada fue obtenida en los laboratorios del Instituto GEA, y puesta en el recipiente contenedor destinado a las mediciones (bidón plástico de 20 L).

El agua de mar fue recolectada desde Caleta Tumbes, Concepción, Chile, en bidones de 2 L, filtrada (0,2 μm) y refrigerada con el fin de anular cualquier actividad biológica que afecte la conservación de este fluido, posteriormente fue puesta en el recipiente plástico al momento de medir.

Las soluciones son preparadas sobre la base de agua destilada. La concentración del compuesto en el fluido se determina considerando la concentración de los iones (Cu, Na, Ca y Cl) en el fluido de las muestras de Relave Fresco, con el fin de acercarse al escenario químico en que las partículas se encontrarán en el proceso metalúrgico. Estas concentraciones aproximadas son detalladas en la Tabla 4.4 junto a datos de pH. Una modificación especial se realiza a la solución de sulfatos, a la que se le añade HCl, permitiendo evaluar el efecto de la disminución del pH sobre la medición.

Tabla 4.4 Soluciones con respectivos datos de pH y concentración iónica si corresponde.

Solución	pH	Concentración [mg/l]				
		Ca ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	Cu ²⁺
Agua potable	5,86					
Agua de mar	6,74					
Agua destilada	6,46	-	-	-	-	-
NaCl	4,98	-	72,5	113	-	-
CaCl ₂	4,82	64	-	113	-	-
SO ₄ ⁻ (S1)	4,92	339	340		1630	3,9x10 ⁻³
SO ₄ ⁻ + HCl (S2)	2,26	339	340		1630	3,9x10 ⁻³

4.2.3.- Preparación de Muestras

Aquellas muestras que corresponden a Estándares de Filosilicatos y de Tranque de Relave, son analizadas directamente previo secado y homogenización (con espátula), separando un pequeño gramaje de muestra.

Las muestras de Canal de Relave Frescas, son homogenizadas 24 horas antes y al momento de la medición, para luego extraer en vasos precipitados tres porciones de 200 ml de cada una. Las tres porciones extraídas de cada ejemplar, son medidas mediante difracción láser para comprobar que el muestreo esté bien realizado (las mediciones deben arrojar la misma granulometría para cada muestra). Posteriormente una porción de cada muestra es llevada a estufa de secado a 40° C hasta su evaporación total, mientras que se conserva un duplicado en su medio acuoso original. Esto último se realiza para comparar resultados en muestra seca y en solución corroborando así que los cambios en los resultados no se deban a un muestreo deficiente.

La muestra proveniente de Pilas de Lixiviación (L-1), es tamizada y se conserva una porción representativa de 100 g de muestra bajo la malla #18, la que es secada y homogenizada.

4.2.4.- Procedimiento

4.2.4.1.- Evaluación Ultrasonido en Fluido

En una primera instancia se realizan mediciones en agua potable (conexión regular de la ciudad de Concepción, Chile). Para cada muestra se realizan dos mediciones, una sin ultrasonido y otra con ultrasonido, con el fin de evaluar el efecto en los resultados de este parámetro instrumental.

Esta metodología se repite en agua destilada, agua de mar y en las soluciones con concentraciones especificadas en el apartado anterior.

4.2.4.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido

De forma paralela, en cada fluido se evalúa el efecto de la muestra puesta en suspensión por un periodo de 24 horas. Para realizar las suspensiones de las muestras se midió la masa necesaria para llevar a cabo una sola medición. Las muestras más finas necesitan menos muestra, mientras que las más gruesas necesitan más (Tabla 4.5). La masa calculada fue suspendida en 10 ml de fluido y reposada por 24 horas previa medición. Este proceso es repetido para cada fluido y cada suspensión es medida con y sin ultrasonido siguiendo con la metodología anterior.

Tabla 4.5 Gramaje de cada muestra para la preparación de suspensiones.

Muestra	Masa (g) para una medición	Muestra	Masa (g) para una medición
Caolín de alta cristalinidad	0,04	Illita (SW4)	0,10
Caolín de baja cristalinidad	0,03	Illita (SW6)	0,09
Hectorita	0,10	Pilas de Lixiviación (L-1)	0,17
Montmorillonita cálcica	0,13	Tranque de Relave M-50	0,09
Montmorillonita sódica	0,05	Tranque de Relave M-11	0,30
Nontronita verde	0,07	Canal de Relave M-1	0,10
Nontronita marrón	0,04	Canal de Relave M-2	0,12
Illita (SW1)	0,13	Canal de Relave M-5	0,12

5.- RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Tal como se indica en capítulos anteriores, un análisis granulométrico arroja una base de datos que puede ser representada gráficamente. Las representaciones gráficas construidas para cada muestra en cada solución con sus respectivos valores tabulados, han sido incluidas en el apartado 7.- Anexos, además de incluir una descripción detallada de cada medición y su resultado. Los datos mencionados, han sido integrados en un solo gráfico por muestra, donde se resumen los resultados obtenidos para cada una de ellas en los distintos medios acuosos, considerando los parámetros estadísticos: diámetros efectivos (P10, P30, P50, P80 y P99) y la fracción (%) < 2 μ m, resaltando aquellos resultados que presentaron mayores variaciones.

5.1.- Caolín (KGa-1b y KGa-2)

5.1.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido en T1

Ambos estándares de caolín se comportaron gráficamente de manera similar ante variaciones en las condiciones de medición. Ambos presentan una distribución bimodal y una curva de frecuencia acumulada que se desplaza hacia la izquierda con el uso del ultrasonido denotando una disminución en el tamaño de partículas detectado (Gráfico A-7.1 y A-7.10). En estos se observa una suavización de los *peaks* de frecuencia en la curva de frecuencia relativa. La disminución de tamaño más notoria, vale decir, donde se identifica una mayor diferencia entre la medición con y sin ultrasonido, se produce en agua destilada, donde en el caso de Caolín de alta cristalinidad incluso se observa un cambio de forma en la curva (Gráfico A-7.2), la que pierde su carácter bimodal para presentar una asimetría positiva al medir sin ultrasonido. El P80 del Caolín de baja cristalinidad disminuye de 23,6 a 12,67 μ m (Tabla A-7.7), mientras que la variedad de alta cristalinidad lo hace de 15,08 a 9,69 μ m (Tabla A-7.1), de tal manera que el agua destilada no favorece la dispersión del caolín.

En agua de mar (Agua M) y soluciones con sulfatos de sodio y calcio (S1) los resultados indican tamaños de partículas menores (Gráficos A-7.7, A-7.8, A-7.22 y A-7.19), a la vez que se aminora la respuesta al ultrasonido, es decir, hay menores diferencias entre las mediciones con y sin ultrasonido. En S1 el porcentaje de fracción menor a 2 μ m es más del doble que la medida en agua destilada (Agua D) sin ultrasonido (Gráfico 5.1 y 5.2).

No obstante, como se observa en los siguientes gráficos que integran los diámetros efectivos y sus frecuencias acumuladas en los diferentes fluidos, la respuesta al ultrasonido es más importante en el caso del Caolín de caja cristalinidad. Es decir, hay disminuciones más notorias que indican que la baja cristalinidad en una muestra que incluya caolín entre sus componentes, podría afectar la dispersión efectiva que ésta puede alcanzar. Esto se observa en las soluciones de NaCl y CaCl₂ específicamente (Gráfico 5.2).

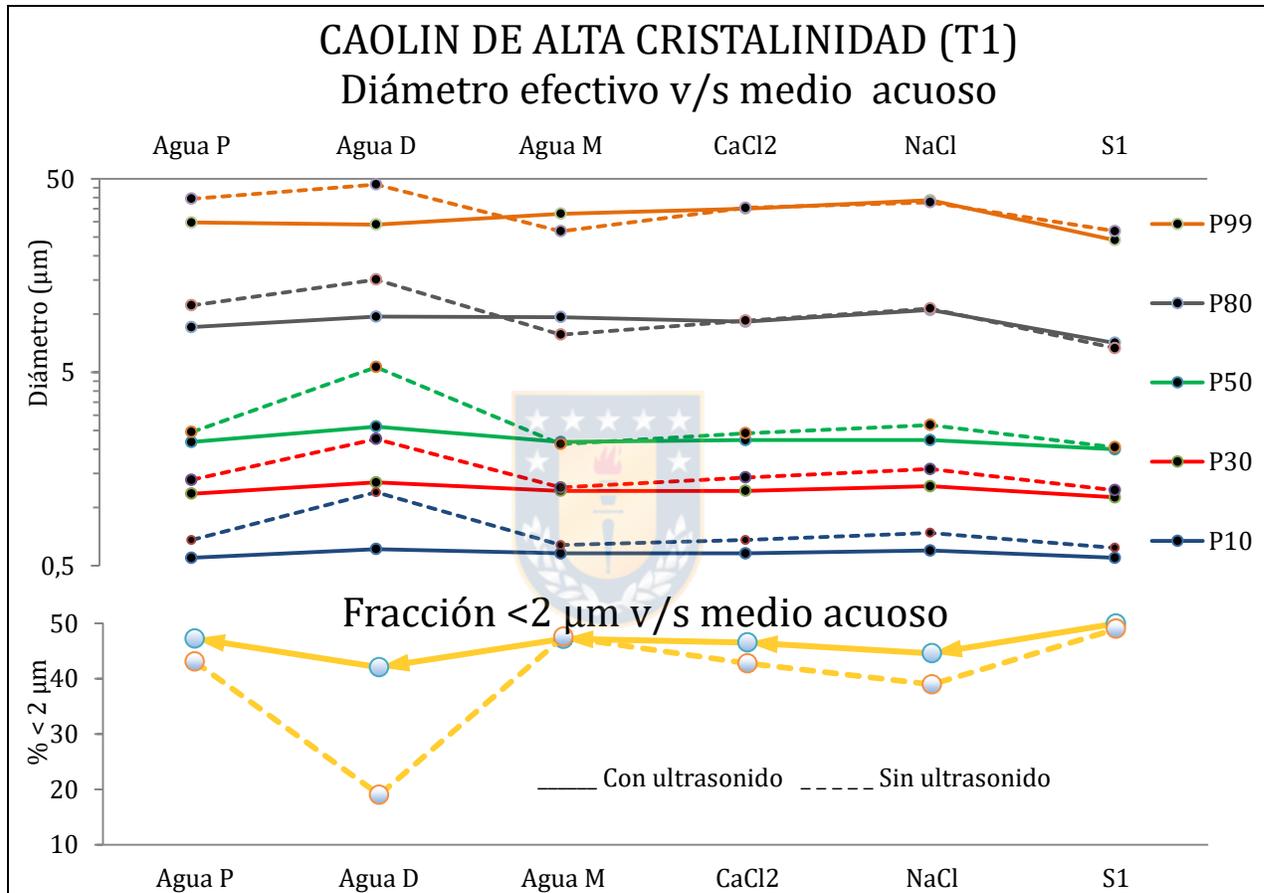


Gráfico 5.1 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Caolín de alta cristalinidad en T1 y % < 2µm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la Tabla A-7.1 a la A-7.5 del apartado 7.- Anexos.

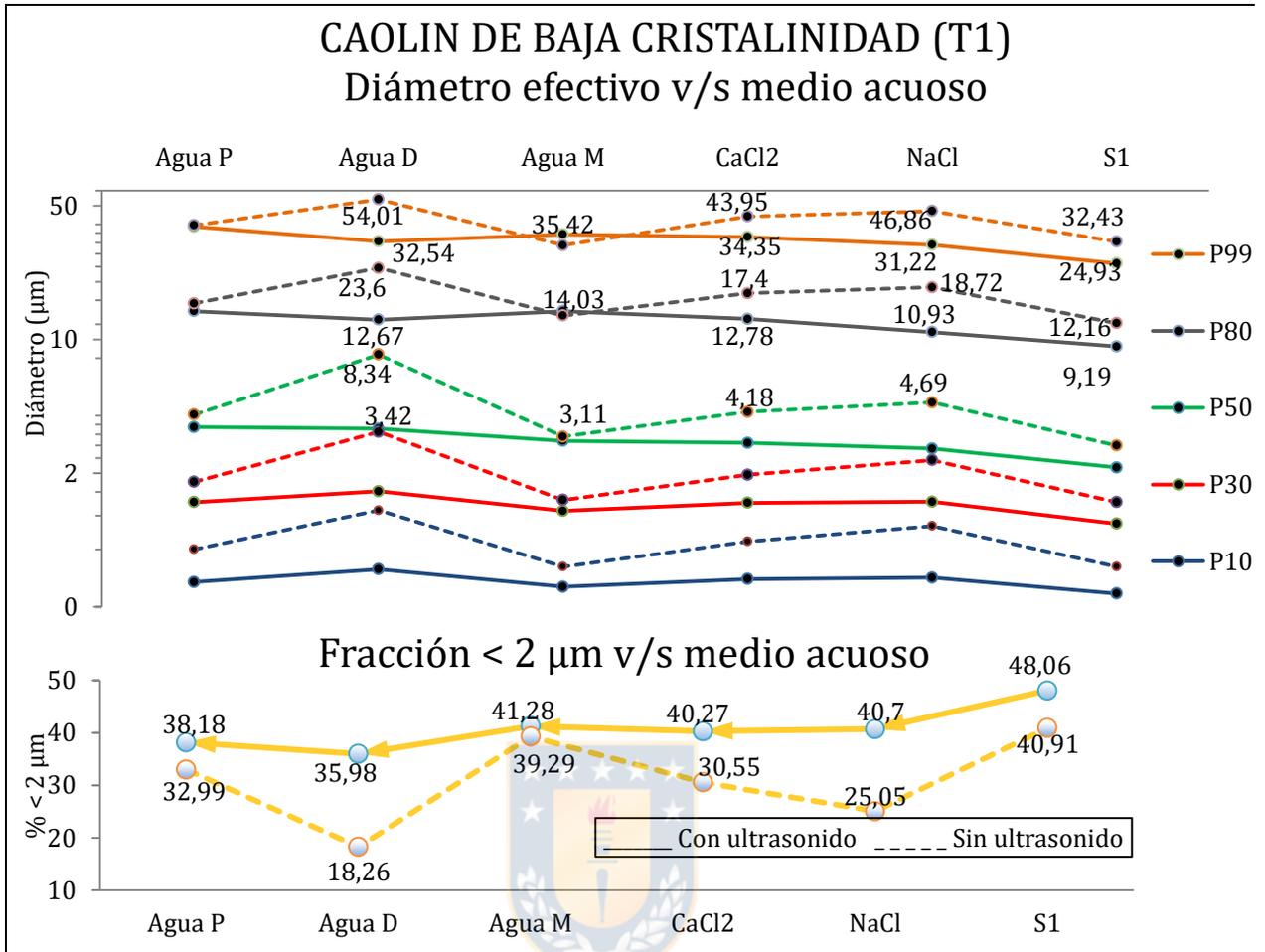


Gráfico 5.2 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Caolín de baja cristalinidad en T1 y % < 2 µm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la Tabla A-7.7 a la A-7.11 del apartado 7.- Anexos.

5.1.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)

La suspensión en Agua M y S1 por 24 horas (Gráfico 5.3 y 5.4) induce un leve aumento en el tamaño detectado (acercándose a los valores reconocidos en agua potable). Por lo anterior, se deduce que el efecto dispersante de ambos medios es de corto alcance y dependerá del tiempo de interacción con la muestra mineral. La variación del pH de las soluciones sulfatadas no genera variaciones.

Los demás resultados no se modifican en relación a la medición directa (T1).

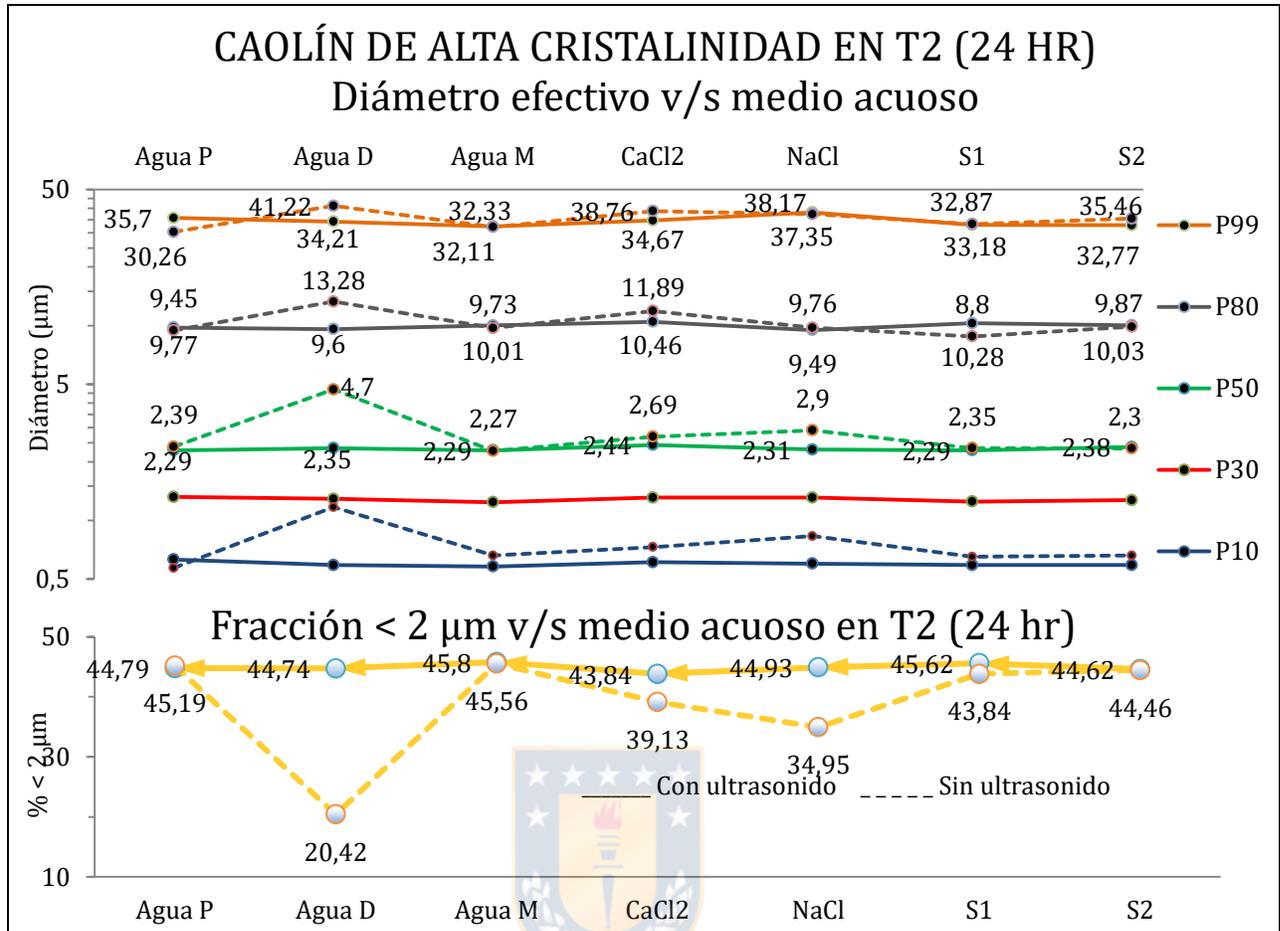


Gráfico 5.3 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Caolín de alta cristalinidad en T2 y % < 2 μm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la Tabla A-7.1 a la A-7.6 del apartado 7.- Anexos.

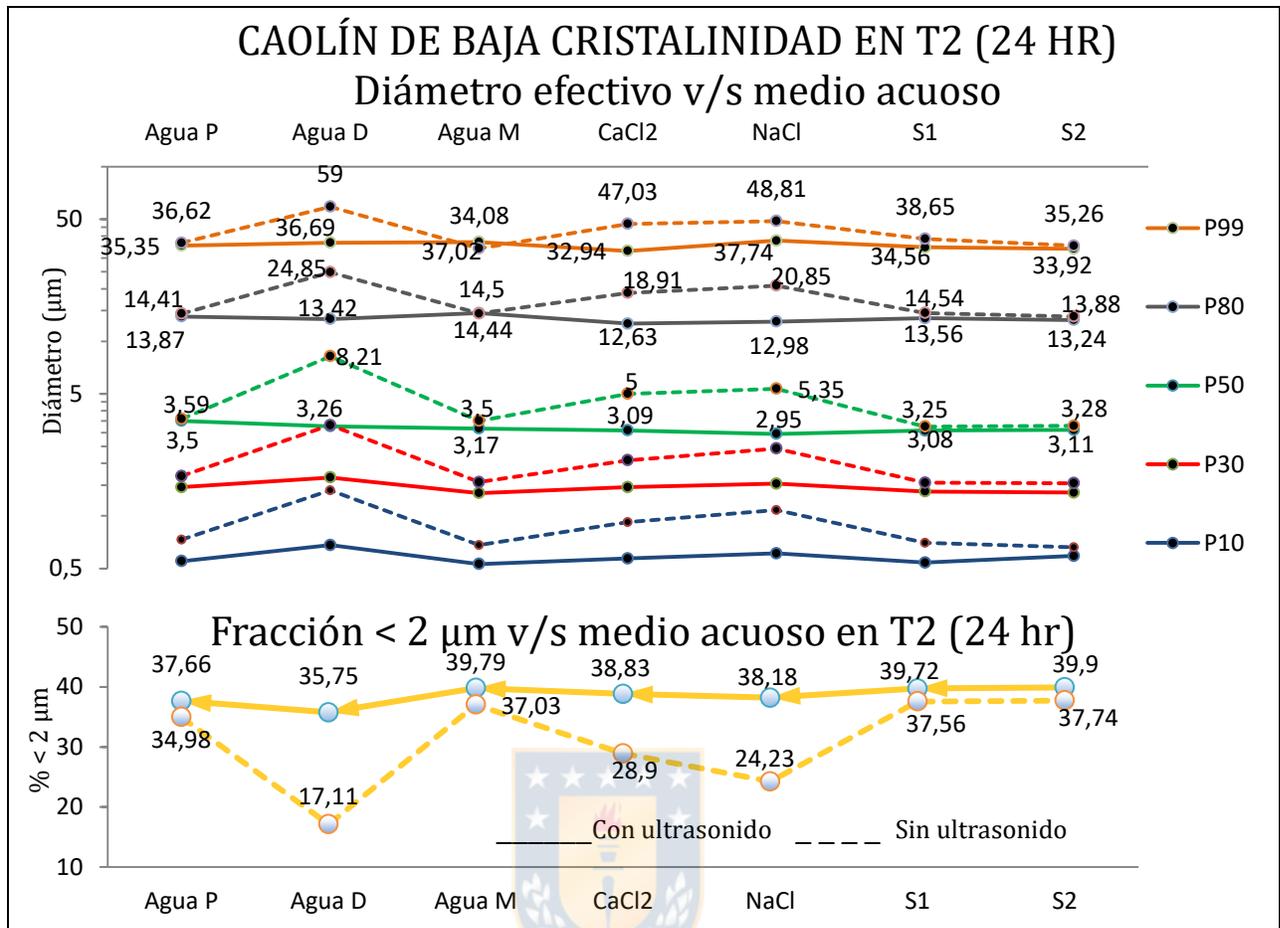


Gráfico 5.4 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Caolín de baja cristalinidad en T2 y % < 2 μm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la Tabla A-7.7 a la A-7.13 del apartado 7.- Anexos.

5.2.- Illita

5.2.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido (T1)

Los tres estándares pese a tener distribuciones gráficas muy distintas experimentan cambios similares al variar los parámetros instrumentales y condiciones de medición. Se exponen los resultados obtenidos para el estándar SW1 (Gráfico 5.5). Responden de forma importante al ultrasonido por lo que, para su dispersión se hace necesario el uso del parámetro instrumental, éste afecta principalmente a las fracciones mayores donde gráficamente es posible observar la atenuación de un *peak* mayor a los 100 μm (Gráfico A-7.17). Los resultados en agua potable, agua destilada y en las soluciones de CaCl₂ no presentan grandes diferencias (Gráfico A-7.117, A-7.119 y A-7.121). La solución de SO₄²⁻ (Ca, Na) induce una leve disminución de tamaño, sin

embargo para la correcta medición de la fracción bajo los 2 μm sigue siendo necesario el uso del ultrasonido.

En agua de mar al medir sin ultrasonido se anula por completo la fracción de mayor tamaño de esta distribución, debido a lo anterior el rango obtenido corresponde a la tercera parte de lo que se observa en agua potable (Tabla A-7.43 y Gráfico A-7.127).

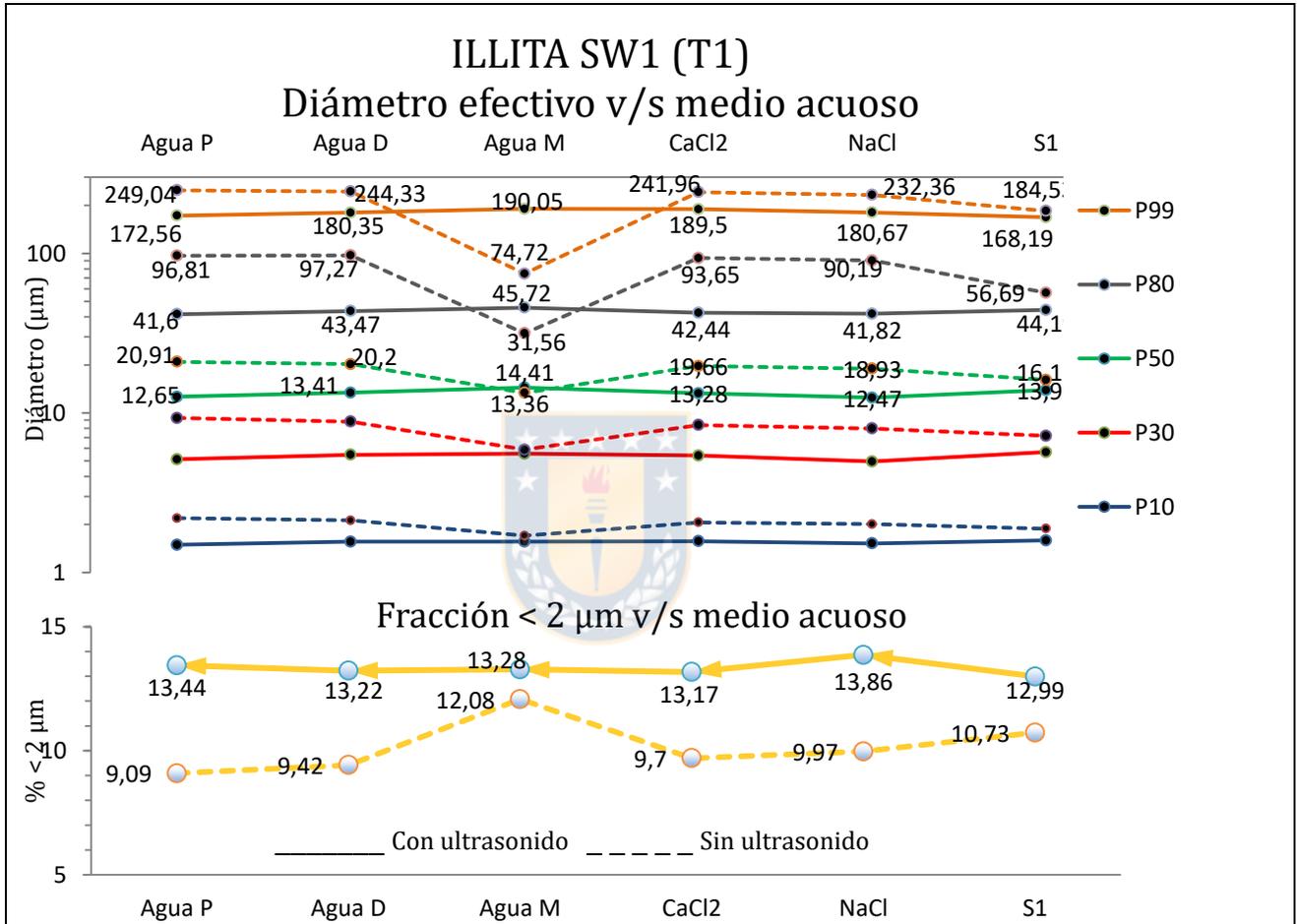


Gráfico 5.5 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Illita (SW1) en T1 y % < 2 μm . Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la Tabla A-7.40 a la A-7.44 del apartado 7.- Anexos.

5.2.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)

Los resultados en agua potable, agua destilada y en las soluciones de CaCl₂ no presentan diferencias de importancia. A la vez, se observa que en estos fluidos el tiempo de permanencia no afecta los resultados (Gráfico 5.6). En agua de mar el tiempo de permanencia en el fluido hace que la distribución disminuya aún más, sin embargo, al medir con ultrasonido, no se observa

ninguna variación con respecto a los resultados en agua potable (Gráfico A-7.128). La distribución obtenida en S2 tiende a ser levemente más baja que las demás (Tabla A-7.45).

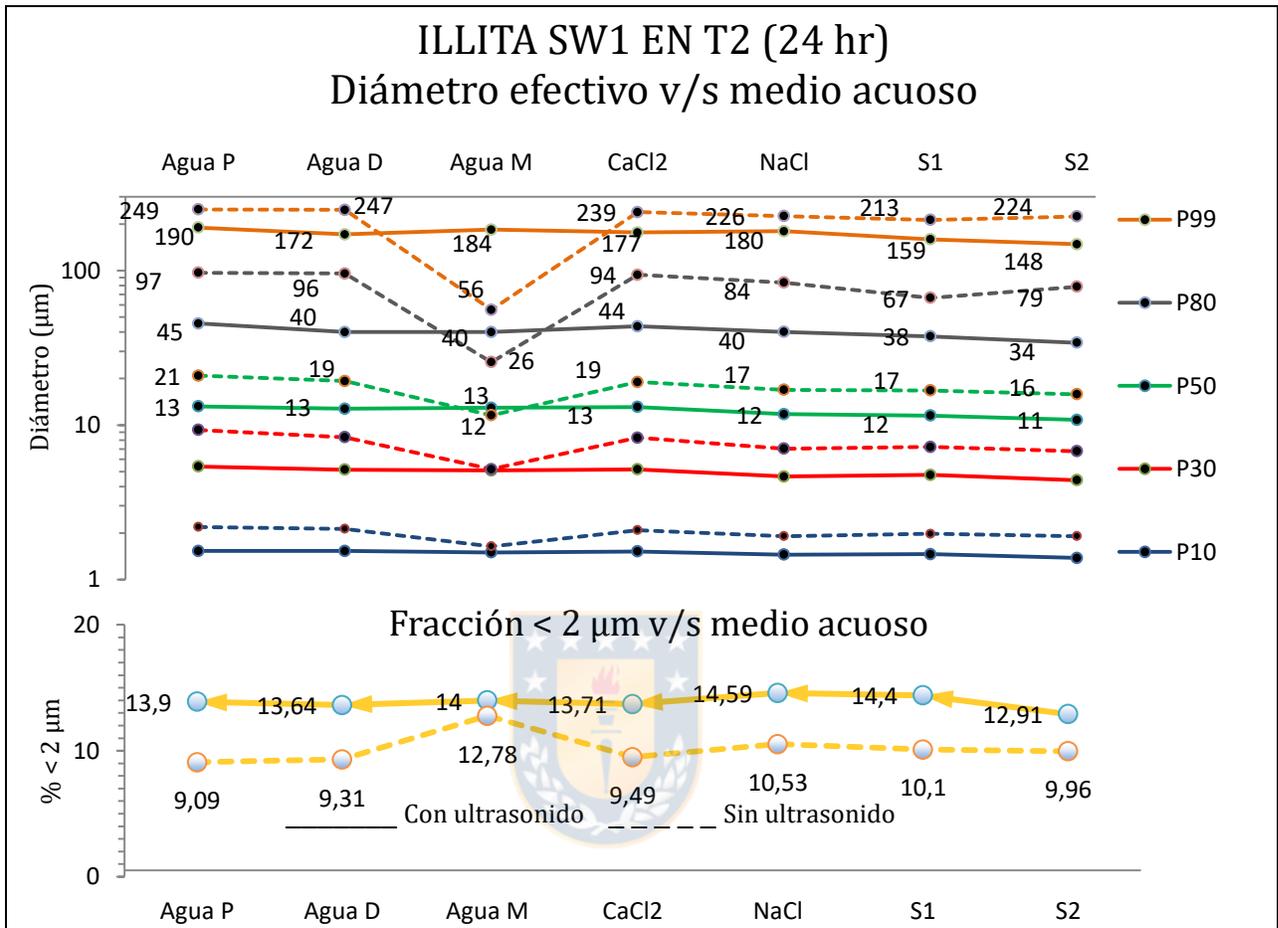


Gráfico 5.6 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Illita (SW1) en T2 y % < 2µm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la Tabla A-7.40 a la A-7.45 del apartado 7.- Anexos.

5.3.- Montmorillonita Cálctica (Saz-1)

5.3.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido en T1

La Montmorillonita cálcica presenta una distribución de frecuencia unimodal con asimetría negativa. Responde al ultrasonido desplazando la curva granulométrica hacia la izquierda, denotando una disminución en los diámetros de partículas detectados por el medidor (Gráfico A-7.27). Los valores de los diámetros efectivos pueden considerarse similares al realizar la medición con ultrasonido, mientras que sin ultrasonido se observan valores menores en agua de mar, gráficamente se observa una distribución apegada entre las mediciones con y sin ultrasonido (Gráfico A-7.38). Esto último acompañado de un *peak* en la fracción menor a 2 µm (Gráfico 5.7).

De manera que el agua de mar, favorece la dispersión de Montmorillonita cálcica. No obstante, el ultrasonido es el factor que favorece la dispersión por sobre el tipo de fluido.

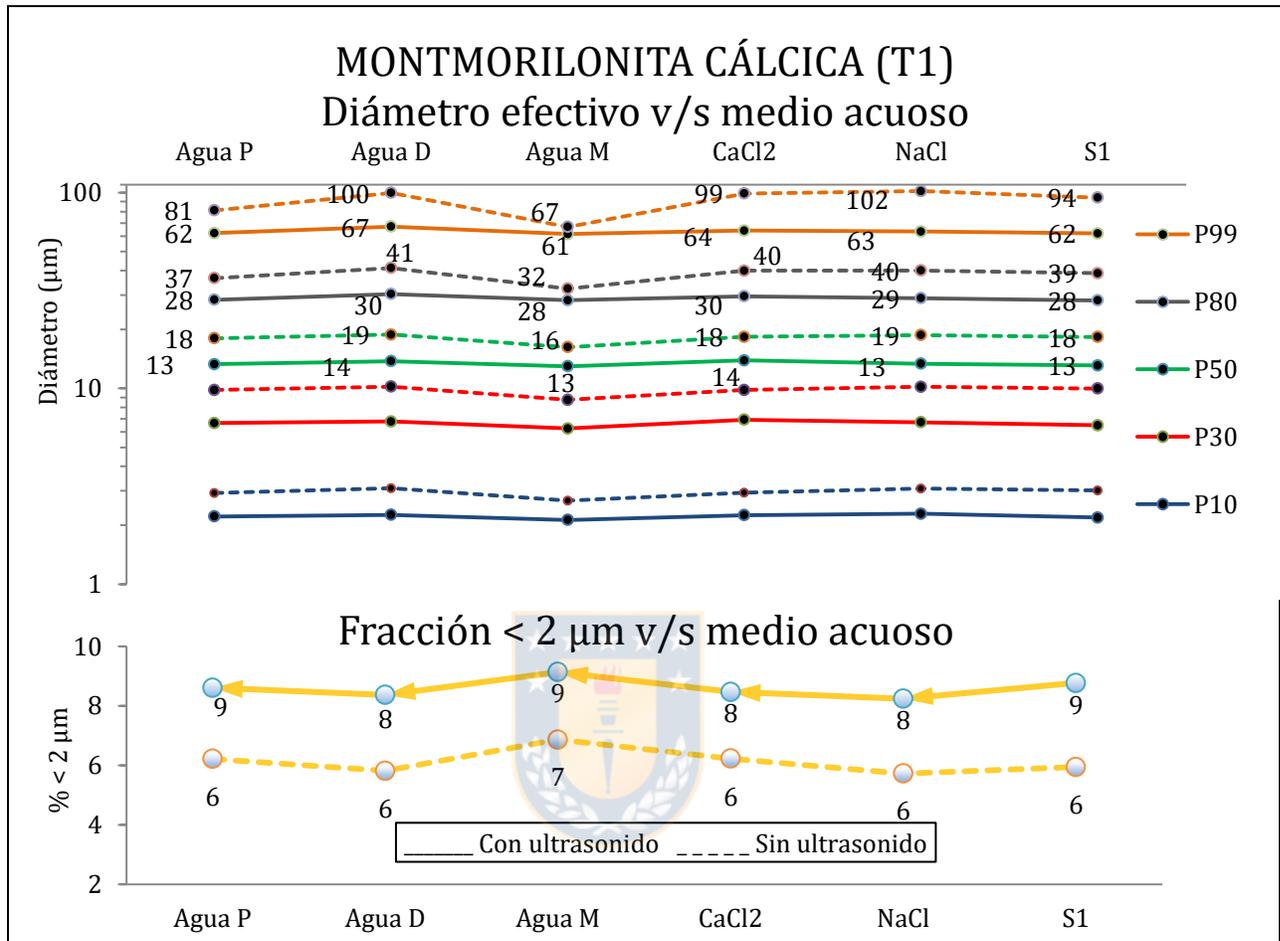


Gráfico 5.7 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Montmorillonita cálcica en T1 y % < 2 μm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la Tabla A-7.13 a la A-7.16 del apartado 7.- Anexos.

5.3.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)

La interacción con agua potable por 24 horas induce un aumento en el rango de tamaño detectado, el P99 aumenta desde 81,26 a 104,96 μm, por lo que en este medio el tiempo de permanencia afecta de manera negativa la dispersión.

En solución de NaCl y CaCl₂ el rango máximo de tamaño de partículas aumenta luego de 24 horas (pese a que parámetros como el P80 no se modifican de forma importante en relación a las mismas condiciones en T1). Por lo que la interacción de la muestra en ambas soluciones dificulta

la dispersión de aglomeraciones de mayor tamaño. Este aumento es contrarrestado nuevamente por el uso de ultrasonido el cual genera resultados similares en todos los medios acuosos. La disminución del pH se la solución sulfatada (S2) no genera cambios en los resultados.

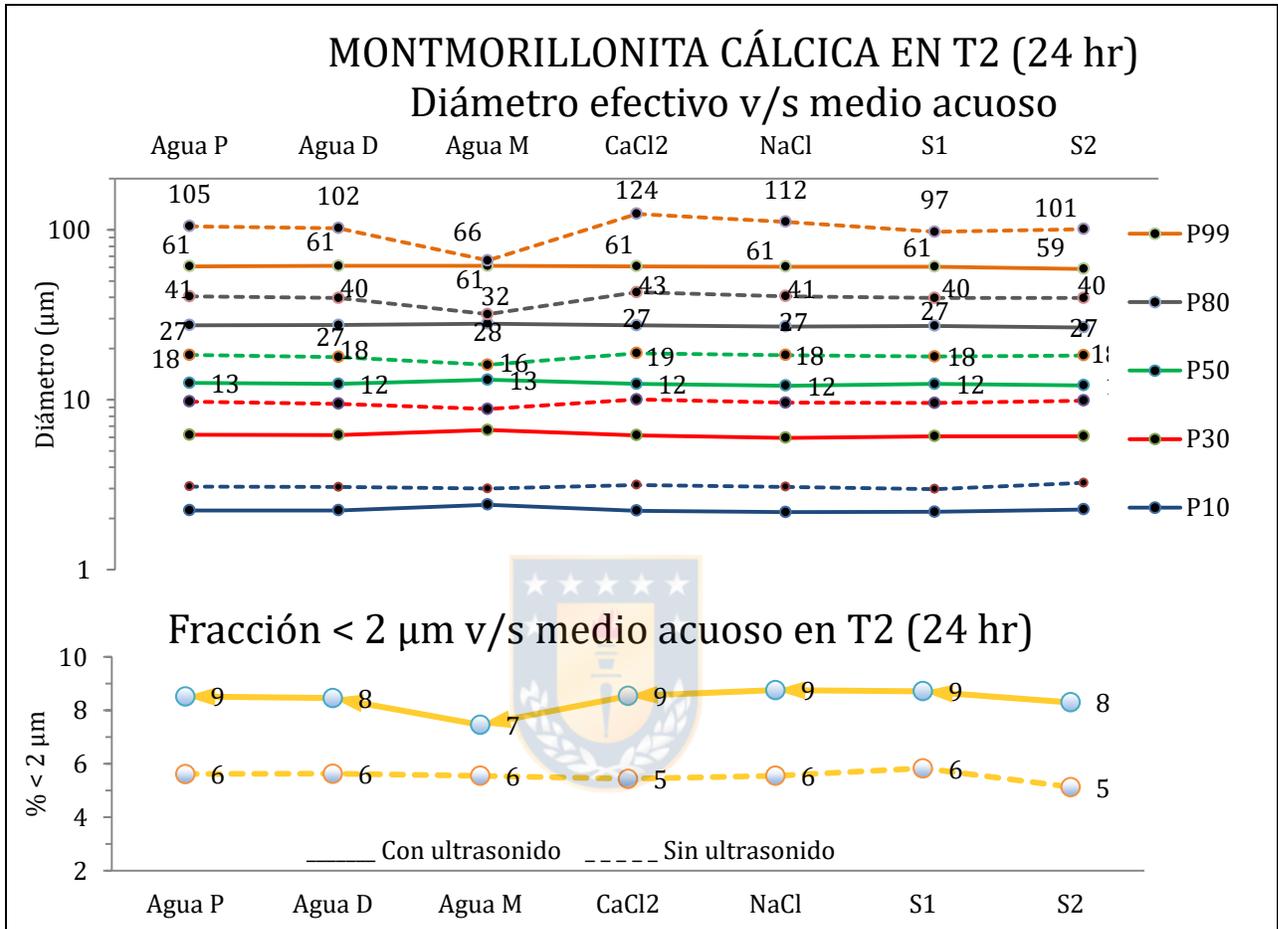


Gráfico 5.8 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Montmorillonita cálcica en T2 y % < 2 μm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.13 a la A-7.17 del apartado 7.- Anexos.

5.4.- Montmorillonita Sódica (SWy-2)

Este estándar presenta variaciones de importancia dependiendo del tipo de fluido en el cual se disperse y del pH.

5.4.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido en T1

Presenta una distribución unimodal relativamente simétrica. En todos los medios acuosos reacciona al ultrasonido desplazando la curva granulométrica hacia la izquierda.

En agua potable, a pesar de que el rango no se modifica, si lo hacen de manera importante la fracción menor a 2 μm que aumenta de 18,26 a 30,66% (Gráfico A-7.46).

En agua de mar y soluciones sulfatadas se producen los mayores aumentos en la distribución de tamaños en comparación a los demás medios acuosos (Gráfico 5.9). En agua de mar hay un cambio en el comportamiento de la curva de frecuencia relativa de tener una tendencia a ser simétrica, la curva se transforma en asimétrica negativa (Gráfico A-7.57) registrándose con ello los mayores aumentos y las respuestas al ultrasonido más drásticas, los diámetros efectivos disminuyen a una tercera parte como lo muestra la Tabla A-7.22, el P99 disminuye de 136,21 a 46,07 μm , mientras que el P80 lo hace desde 60,01 a 19,83 μm . La fracción bajo las 2 μm aumenta de 5,13 a 14,48% (Gráfico 5.9). El ultrasonido a pesar de ejercer una acción dispersante, no logra contrarrestar los procesos de floculación producidos por el mayor contenido salino del agua de mar. La fracción menor a 2 μm alcanza los valores mayores en agua destilada.

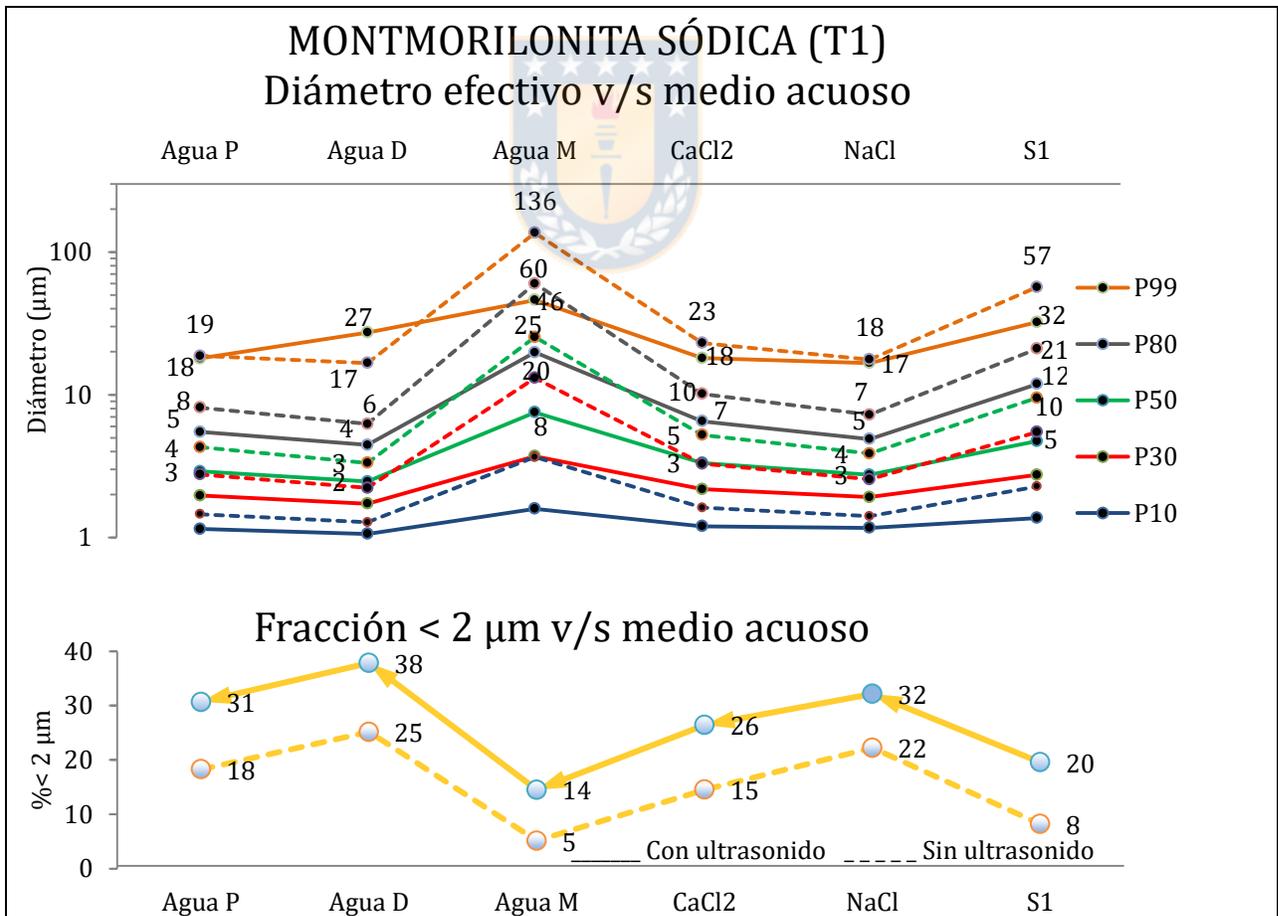


Gráfico 5.9 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Montmorillonita sódica en T1 y % < 2 μm . Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.18 a la A-7.22 del apartado 7.- Anexos.

5.4.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)

El tiempo de permanencia en agua de mar ayuda a generar dispersión pero los valores siguen resultando elevados (Gráfico A-7.57 y A-7.58) en comparación con las soluciones ya vistas. El ultrasonido contrarresta en gran medida los procesos de floculación disminuyendo los diámetros efectivos, sin embargo estos valores siguen siendo el doble o más que los calculados en las soluciones de NaCl, CaCl₂, agua potable y destilada (Tabla A-7.22). En S1 el ultrasonido disminuye casi a la mitad los diámetros efectivos (Gráfico A-7.61 y A-7.62), aun así, siguen estando muy por sobre los resultados obtenidos en agua potable, agua destilada y soluciones de NaCl y CaCl₂. La disminución del pH aumenta el rango de tamaño (Gráfico A-7.63 y A-7.64), mientras que los demás parámetros no experimentan mayores variaciones. La permanencia en NaCl favorece la dispersión de Montmorillonita sódica, alcanzando valores similares a los obtenidos en agua destilada (Gráfico A-7.55 y A-7.56; Tabla A-7.21), sin embargo en este último medio siguen predominando los valores más altos de la fracción menor a 2 μm .

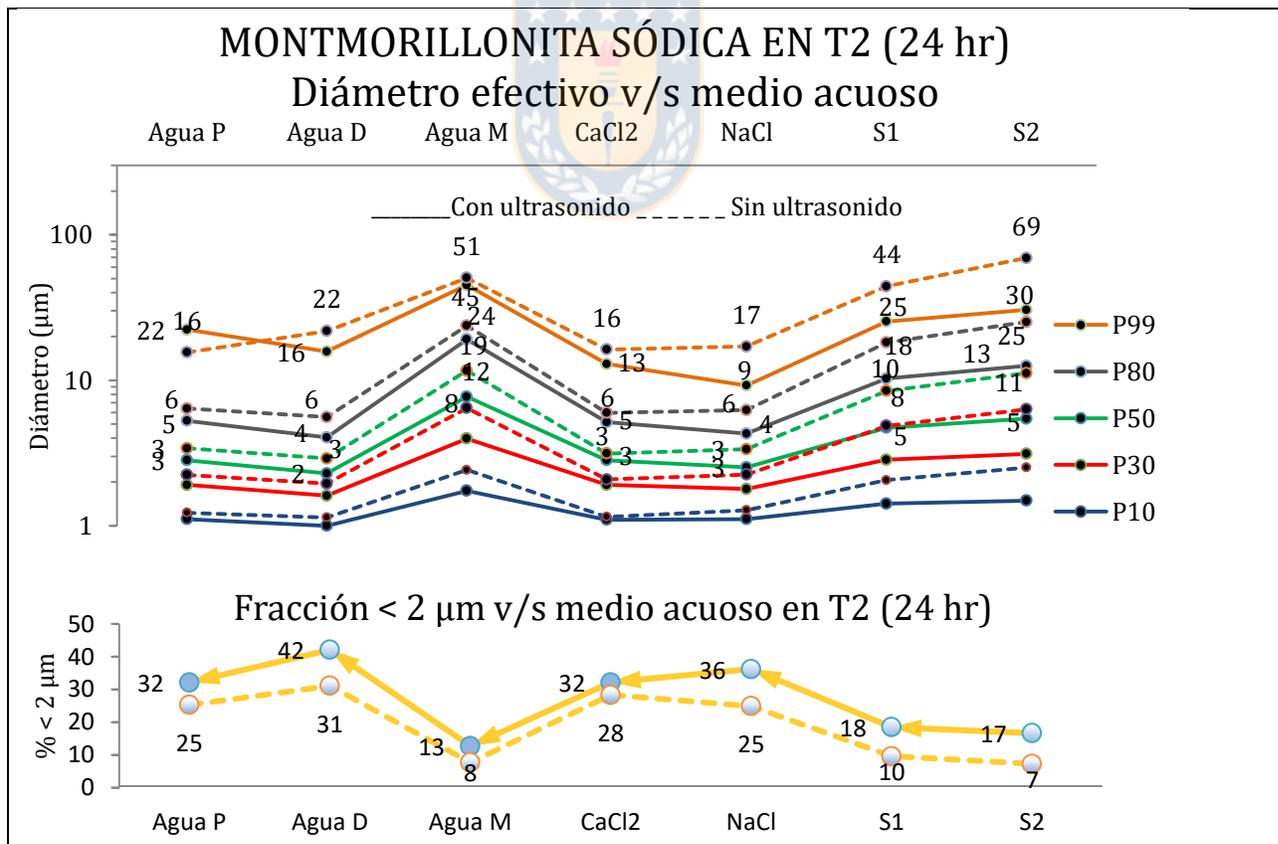


Gráfico 5.10 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Montmorillonita sódica en T2 y % < 2 μm . Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.18 a la A-7.23 del Apartado 7.- Anexos.

5.5.- Nontronita Verde (Nau-1)

5.5.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido en T1

Nontronita verde resulta ser sensible al ultrasonido y tipo de solución. Gráficamente el ultrasonido induce un cambio drástico en la forma de la curva de frecuencia relativa (Gráfico A-7.65), se transforma desde asimétrica positiva sin ultrasonido a asimétrica negativa. Con excepción de las mediciones realizadas en NaCl (Gráfico A-7.71) donde se alcanzan valores más bajos de tamaño de partículas y la curva tiende a disminuir su carácter asimétrico, todos los resultados gráficamente experimentaron cambios similares usando ultrasonido (Apartado A-7.1.5.- Nontronita Verde).

De manera general las mediciones sin ultrasonido pueden alcanzar un rango hasta 5 veces mayor y un P80 hasta 3 veces mayor que las realizadas con ultrasonido. De manera que se advierte que esta Nontronita muestra una resistencia a dispersar aglomeraciones, característica que es contrarrestada en gran medida por este parámetro instrumental (Gráfico 5.11). En resumen, el ultrasonido y la solución de NaCl favorecen la dispersión de Nontronita verde en medición directa. En agua de mar las mediciones sin ultrasonido disminuyen aún más que en NaCl. Pero con el ultrasonido los resultados equiparan la curva de frecuencias obtenida en agua potable. Esta se desplazada hacia la izquierda (Gráfico A-7.74), el P99 desciende de 113,38 a 39,13 μm y el P80 desde 50,31 a 18,83 μm (Tabla A-7.28). En tanto en agua potable y CaCl_2 se obtienen los mayores valores (Tabla A-7.26).

En cuanto a las fracciones $< 2 \mu\text{m}$, estas no mostraron variaciones importantes al variar el tipo de fluido, por lo que el efecto de dispersión del fluido no estaría afectando a esta porción de muestra (Gráfico 5.11), como sí lo hace el ultrasonido.

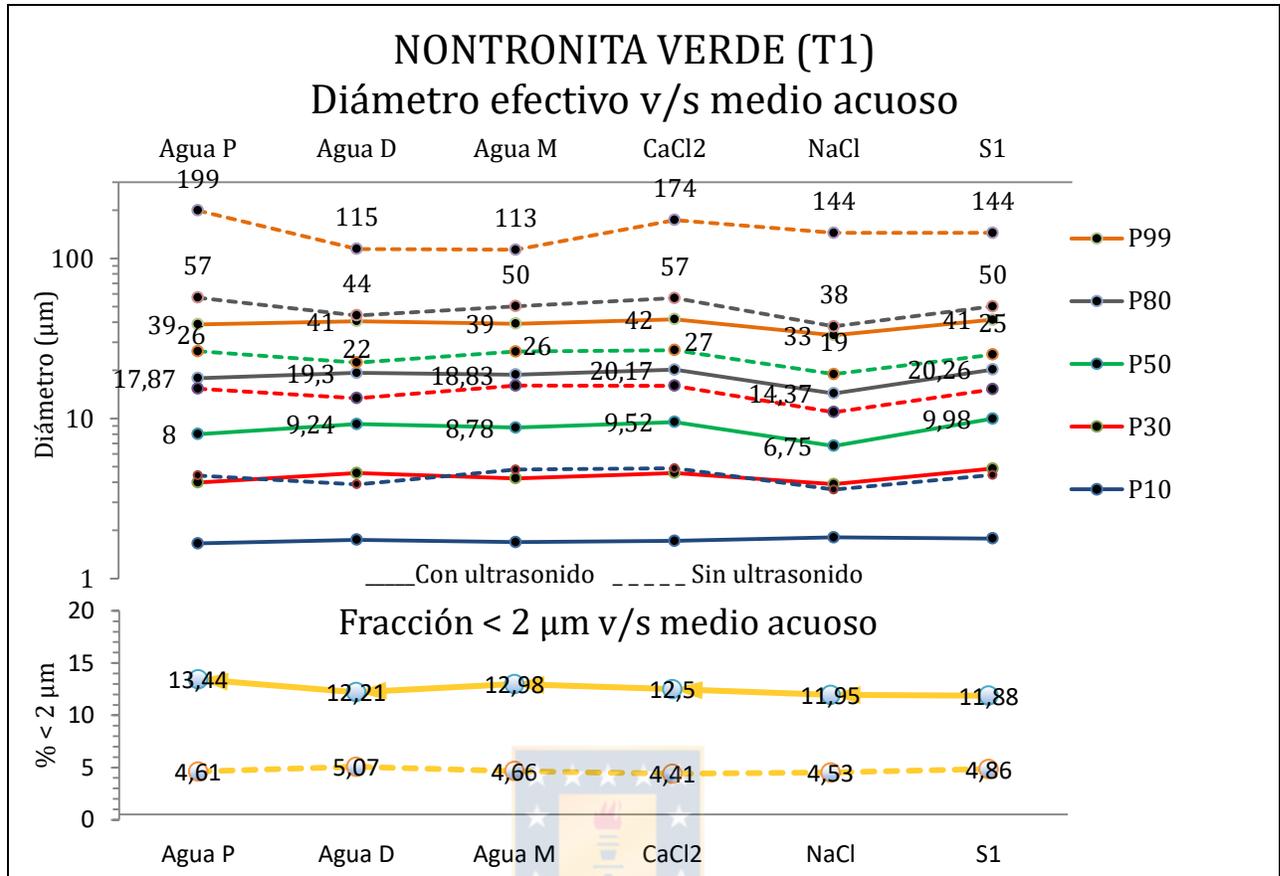


Gráfico 5.11 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Nontronita verde en T1 y % < 2 μm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.25 a la A-7.29 del apartado 7.- Anexos.

5.5.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)

Luego de 24 horas aquellas suspensiones en agua de mar y NaCl mostraron una disminución notoria en la distribución de tamaños de partículas (Gráficos A-7.72, A-7.73, A-7.75 y 76), los valores sin ultrasonido disminuyen sus diferencias con las mediciones con ultrasonido, no obstante, parámetros como el p80 disminuyen a la mitad con el uso de este parámetro instrumental, por lo que pese a que estos fluidos favorecen la dispersión, sigue primando en la dispersión el efecto del ultrasonido (Tabla A-7.28 y A-7.28). En agua potable también hay una disminución pero a menor escala. Mientras que en CaCl₂ y S1 hay un leve aumento de los parámetros estadísticos (Tabla A-7.26 y A-7.29). La disminución del pH de la solución sulfatada (S2) no muestra diferencias sustanciales con los resultados obtenidos en S1. Nuevamente la fracción bajo los 2 μm presenta un comportamiento similar en todos los fluidos, pero es especialmente sensible al ultrasonido.

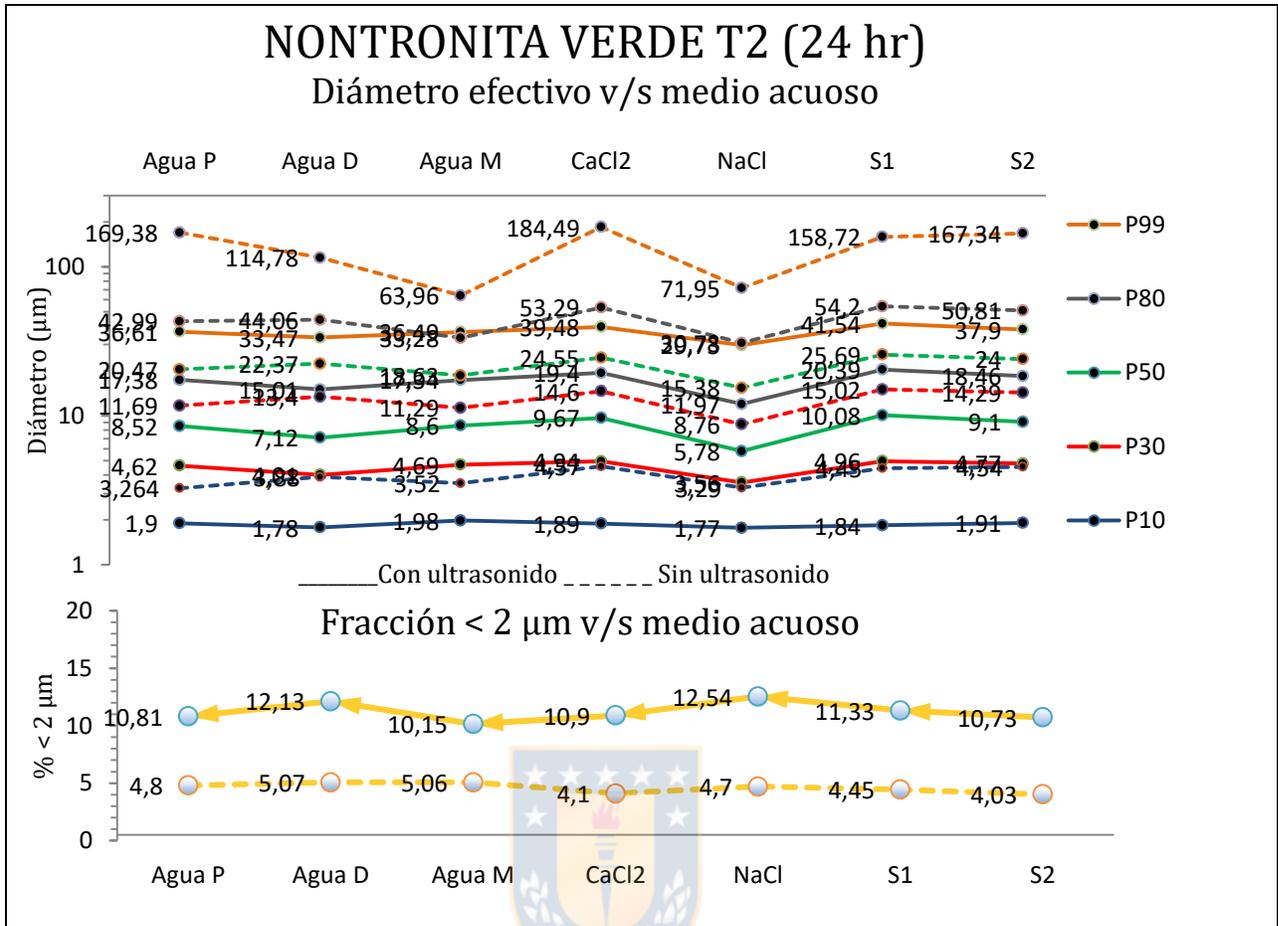


Gráfico 5.12 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Nontronita verde en T2 y % < 2µm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.25 a la A-7.30 del apartado 7.- Anexos.

5.6.- Nontronita Marrón (NAu-2)

5.6.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido en T1

La Nontronita marrón tiene una distribución unimodal con un *peak* de frecuencia bastante acentuado. El ultrasonido suaviza este *peak* y disminuye el valor modal (Gráfico A-7.82). Este efecto no se ve alterado por el tipo de fluido, aunque los valores de diámetros efectivos tienden a ser mayores en agua de mar (Tabla A-7.33), en NaCl, se observa un aumento en el rango de tamaño detectado, gráficamente asoma un incipiente *peak* cercano a los 100 µm (Gráfico A-7.89) el que es contrarrestado por el ultrasonido, mientras que los demás estadísticos presentan valores similares al agua potable, destilada y soluciones de CaCl₂ y S1. Pese a lo anterior la fracción < a 2µm experimenta su valor más alto al medir en NaCl cercano al 13%.

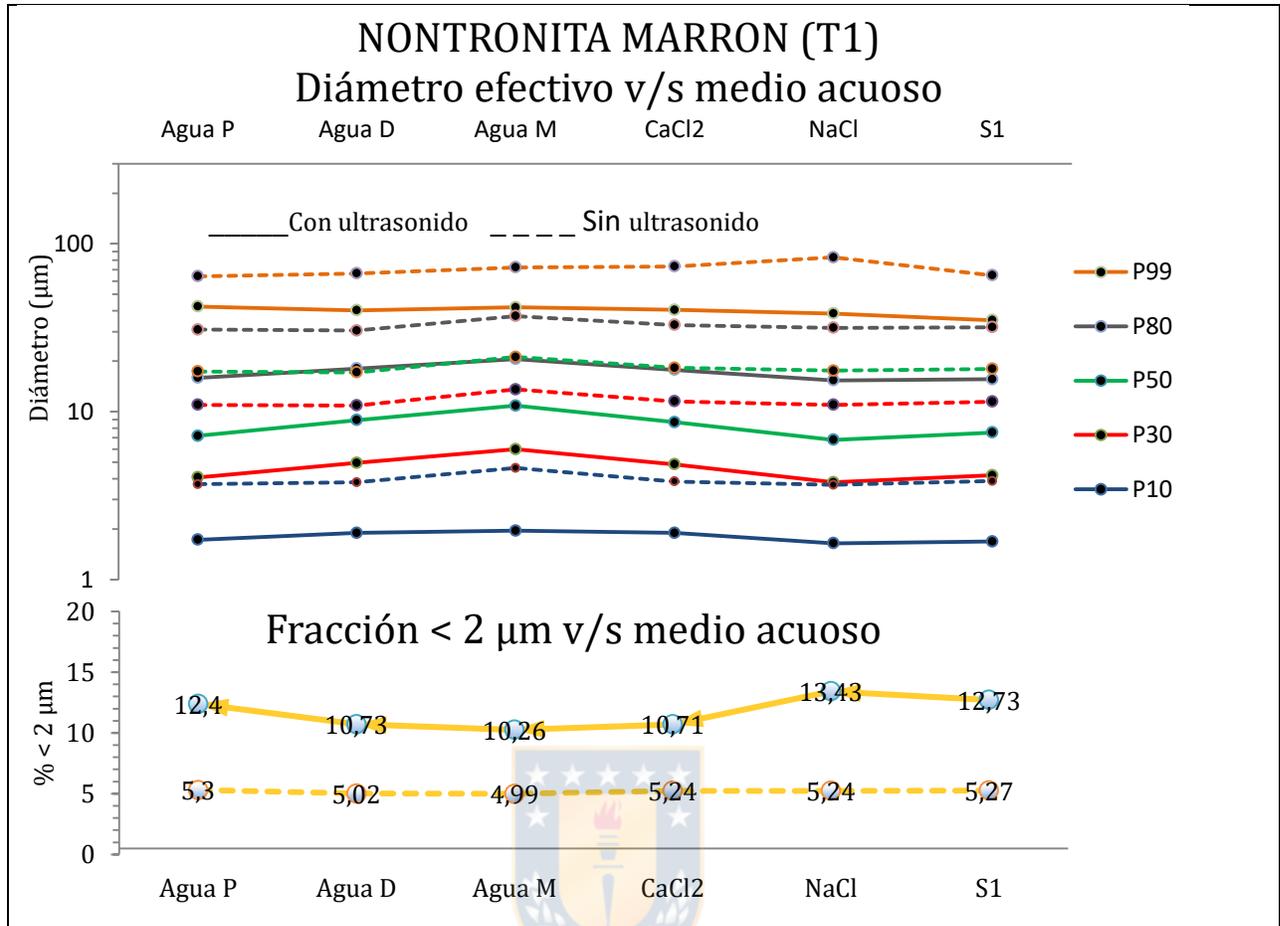


Gráfico 5.13 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Nontronita marrón en T1 y % < 2µm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.30 a la A-7.34 del apartado 7.- Anexos.

5.6.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)

Luego de 24 horas de manera general, la dispersión se ve favorecida. En estas mediciones el uso del ultrasonido produce una disminución de los parámetros estadísticos con excepción del rango (Gráfico 5.14), las curvas de frecuencia relativa, tienden a denotar un rango mayor que el observado en medición sin ultrasonido, lo que indicaría que el ultrasonido no estaría dispersando de manera efectiva las fracciones mayores de tamaño a la vez que genera una dispersión más eficaz en los rangos menores. Como excepción a lo anterior la dispersión se ve especialmente desfavorecida en el caso de la solución de NaCl donde el *peak* cercano a los 100 µm se acentúa y luego al aplicar ultrasonido se atenúa, haciendo que la curva cambie de forma (Gráfico A-7.90 y A-7.91), en esta medición se alcanzan los mayores valores de diámetros efectivos (Tabla A-7.32).

El pH de la solución sulfatada S2 produce un aumento de las distribuciones de tamaños (Gráfico A-7.98 y A-7.99) y una disminución de la fracción < a 2µm.

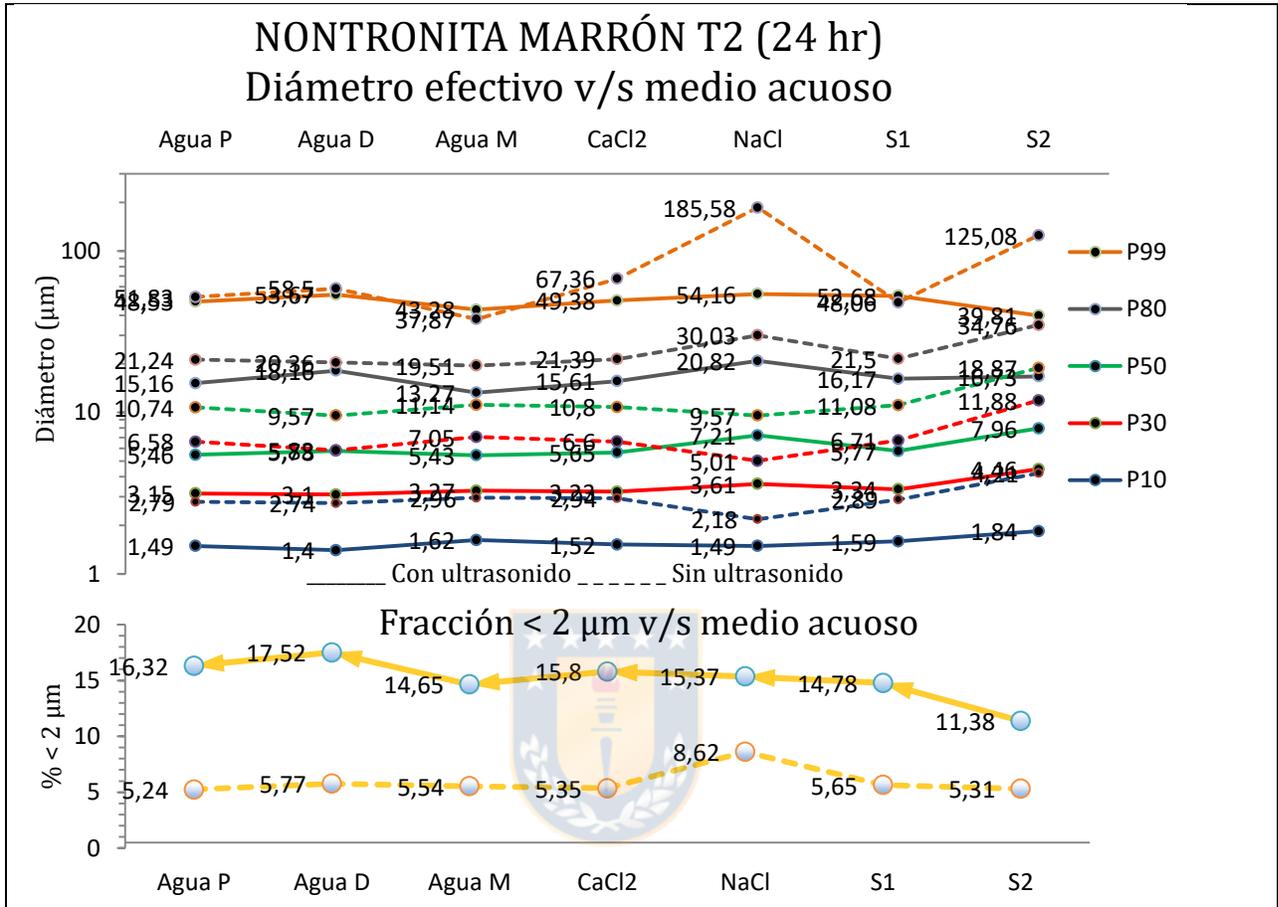


Gráfico 5.14 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Nontronita marrón en T2 y % < 2µm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.30 a la A-7.35 del apartado 7.- Anexos.

5.7.- Hectorita

5.7.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido en T1

La distribución de tamaño de la Hectorita resulta sensible al tipo de solución en que esté dispersada y al ultrasonido (Gráfico 5.15).

Las mediciones con ultrasonido resultan en una distribución menor de tamaños (Gráfico A-7.100). En agua potable induce una disminución de cerca de 15 µm en el rango (Tabla A-7.36). En NaCl y agua de mar esta respuesta es similar pero menor (Gráficos A-7.106 y A-7.109).

Mientras que, en solución de CaCl_2 , éste genera una disminución del 50% del rango y del P80 (Tabla A-7.36 y Gráfico A-7.103). En la solución sulfatada S1 se produce una disminución del 50% del rango detectado (Gráfico A-7.112), mientras que el P80 disminuye en un 30% su valor (Tabla A-7.39).

En estas S1 y CaCl_2 se encuentran los valores más altos de diámetros efectivos al medir sin ultrasonido, los que son contrarrestados en gran parte con su aplicación. En agua de mar se alcanzan los valores más altos de la serie de mediciones y el porcentaje más bajo de la fracción < a $2 \mu\text{m}$, al medir con ultrasonido. En agua potable la dispersión resulta ser óptima, tanto en las fracciones mayores como en la fracción menor a $2 \mu\text{m}$ donde alcanza los porcentajes más elevados.

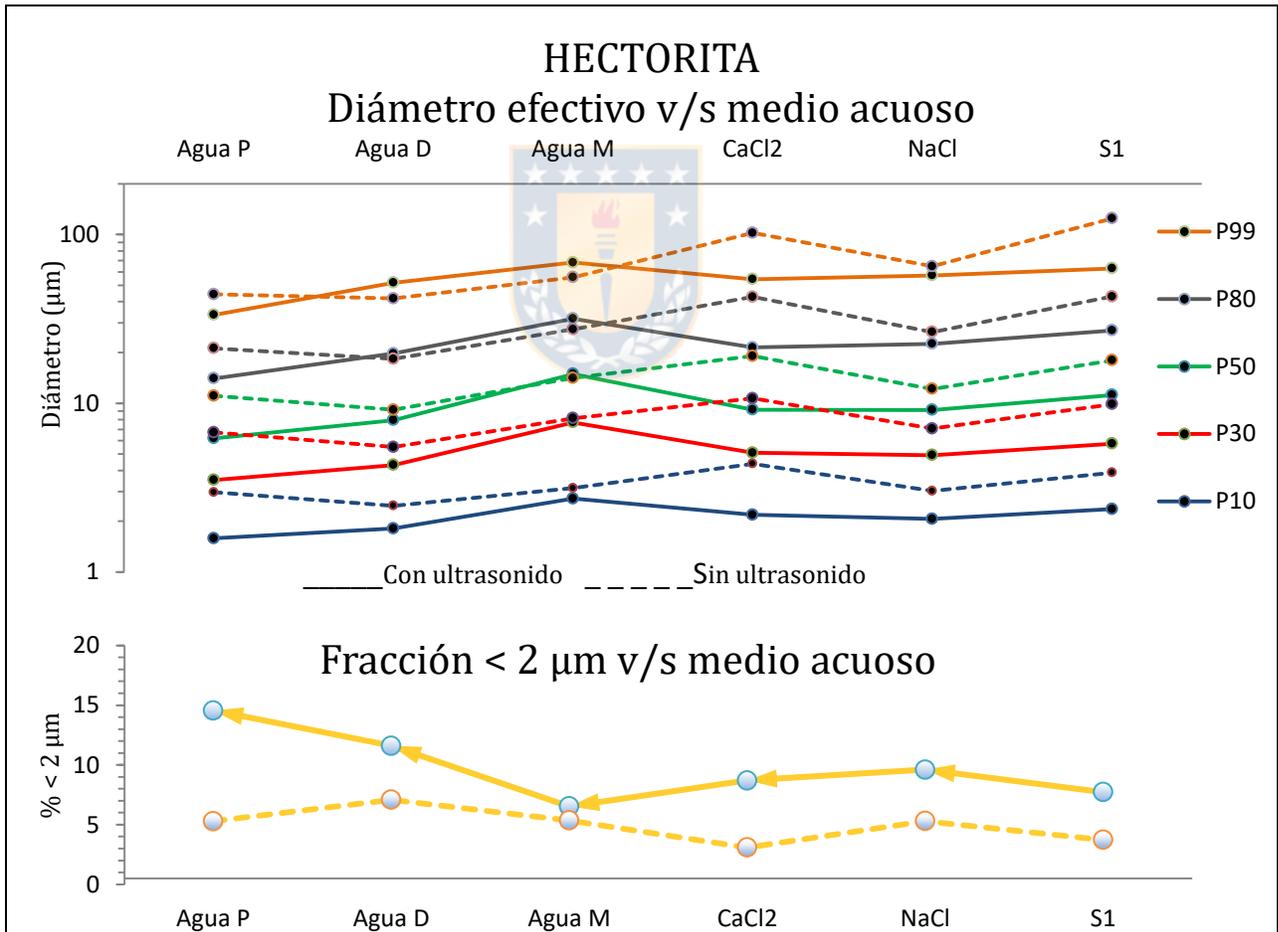


Gráfico 5.15 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Hectorita en T1 y % < $2 \mu\text{m}$. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.36 a la A-7.39 del apartado 7.- Anexos.

5.7.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)

El tiempo de permanencia en los medios acuosos ensayados no la afecta de forma importante salvo en la solución sulfatada en donde aumenta notoriamente su tamaño (Gráfico A-7.113 y A-7.114). Este aumento no varía al disminuir el pH (Gráfico A-7.15 y A-7.16).

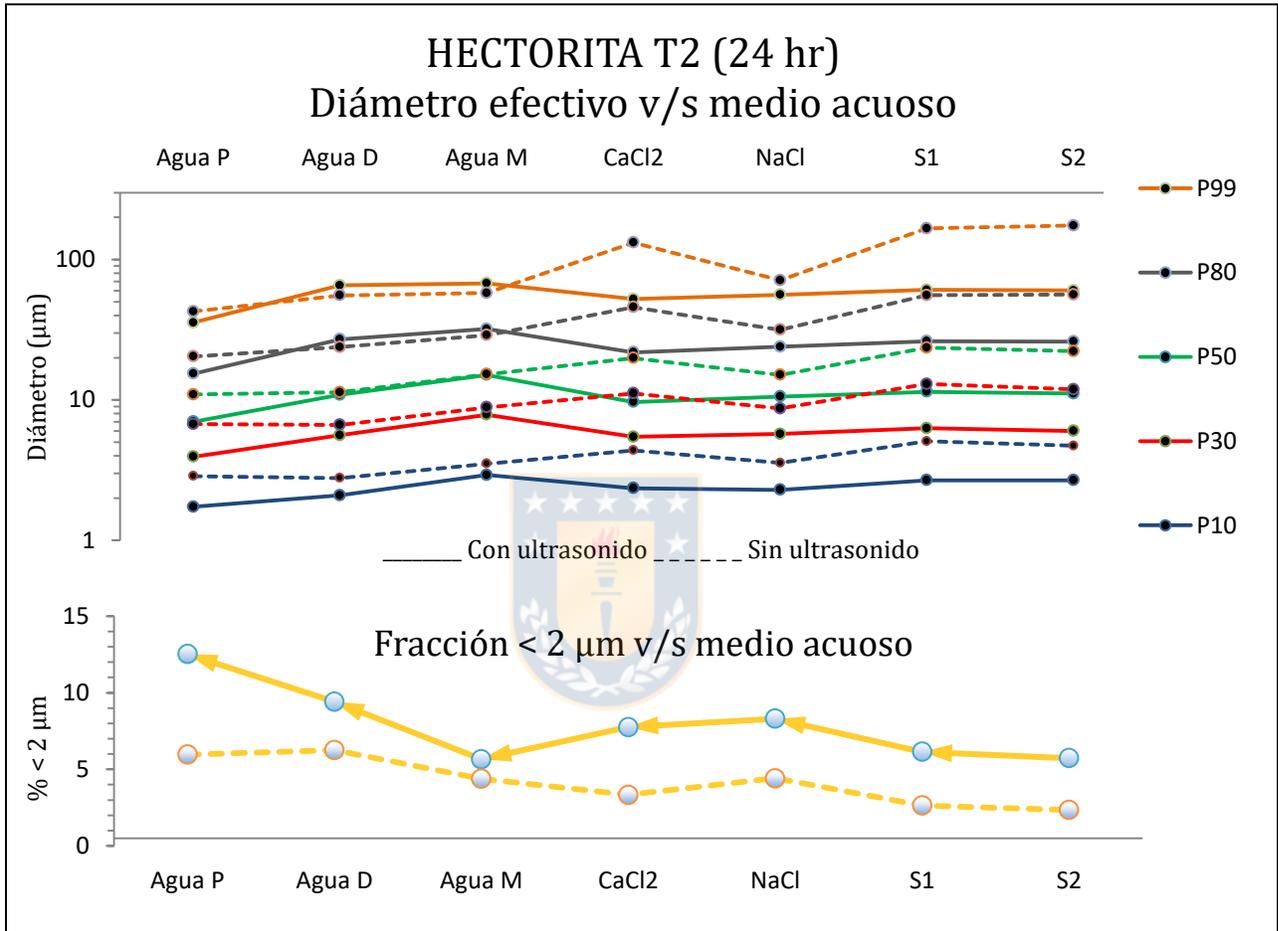


Gráfico 5.16 Diámetro efectivo vs medio acuoso para Hectorita en T2 y % < 2μm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.36 a la A-7.40 del apartado 7.- Anexos.

5.8.- Pilas de Lixiviación (L-1)

5.8.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido en T1

Esta muestra tiende a presentar variaciones muy notorias en los distintos medios fluidos (Gráfico 5.17). Reacciona al ultrasonido desplazando su curva granulométrica hacia la izquierda y reduciendo la intensidad de los *peaks* de frecuencias denotando una disminución en el tamaño de

grano. Ésta disminución está relacionada a una atenuación de la moda cuyo valor es mayor a 100 μm (Gráfico A-7.137). La mayor diferencia entre las mediciones con y sin ultrasonido se da en CaCl_2 y S1 (Gráfico A-7.139 y A-7.148), en ellas los aumentos de tamaño son contrarrestados con el ultrasonido.

En agua de mar ocurre un cambio en el comportamiento de la distribución, al realizar la medición directa sin ultrasonido las fracciones de mayor tamaño se anulan, provocando una disminución del rango en más de la mitad. Mientras que la medición con ultrasonido arroja una distribución mayor, que es similar a la obtenida en agua potable en las mismas condiciones de medición.

La efectividad en el proceso de dispersión que en este caso es evaluada en base a la fracción menor a 2 μm , fue mayor en agua potable con ultrasonido y menor en agua destilada y solución de CaCl_2 sin ultrasonido.

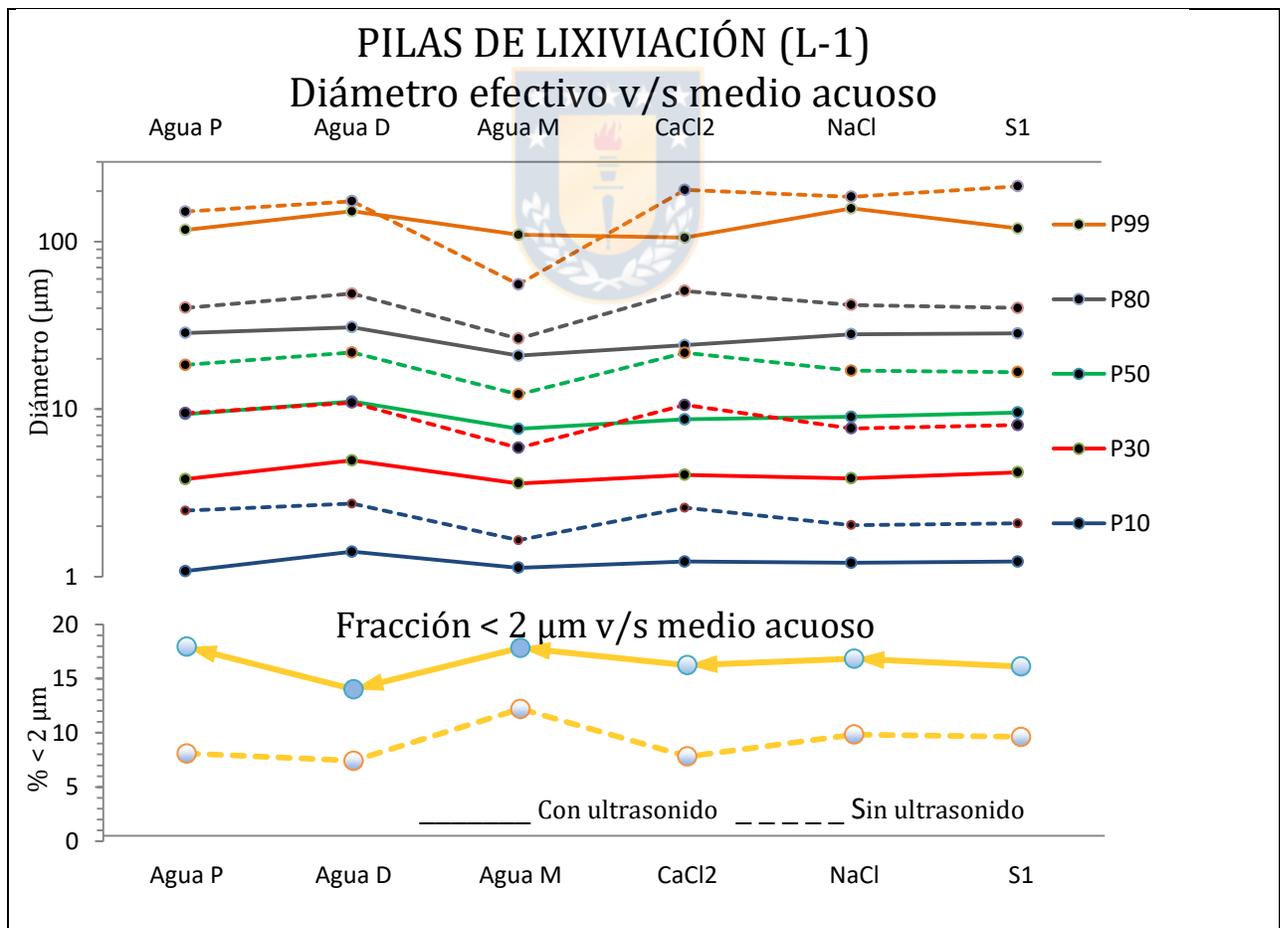


Gráfico 5.17 Diámetro efectivo vs medio acuoso para L-1 en T1 y % < 2 μm . Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.45 a la A-7.50 del apartado 7.- Anexos.

5.8.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)

El tiempo de permanencia por 24 horas en agua potable produce que se agudice un *peak* de frecuencia de mayor tamaño (superior a 150 μm), modificando con ello el rango de la distribución. El P99 sube de 151,15 μm en T1 a 203,05 μm en T2 (Tabla A-7.46). Sin embargo el resto de la distribución se desplaza hacia la izquierda, denotando un menor tamaño de partículas (Gráfico A-7.136), caso similar es el de la medición en agua destilada (Gráfico A-7.137). En CaCl_2 se favorece la dispersión de la muestra en la fracción menor a los 150 μm (Gráfico A-7.140). En NaCl la curva desplaza levemente la curva hacia la derecha indicando un aumento en la distribución de tamaño en relación al agua potable al medir sin ultrasonido (Gráfico A-7.143). Mientras que en la medición con ultrasonido, esta se desplaza hacia la izquierda denotando un menor tamaño de partículas. (A-7.144). En agua de mar hay una mayor efecto dispersivo (Gráfico A-7.146)

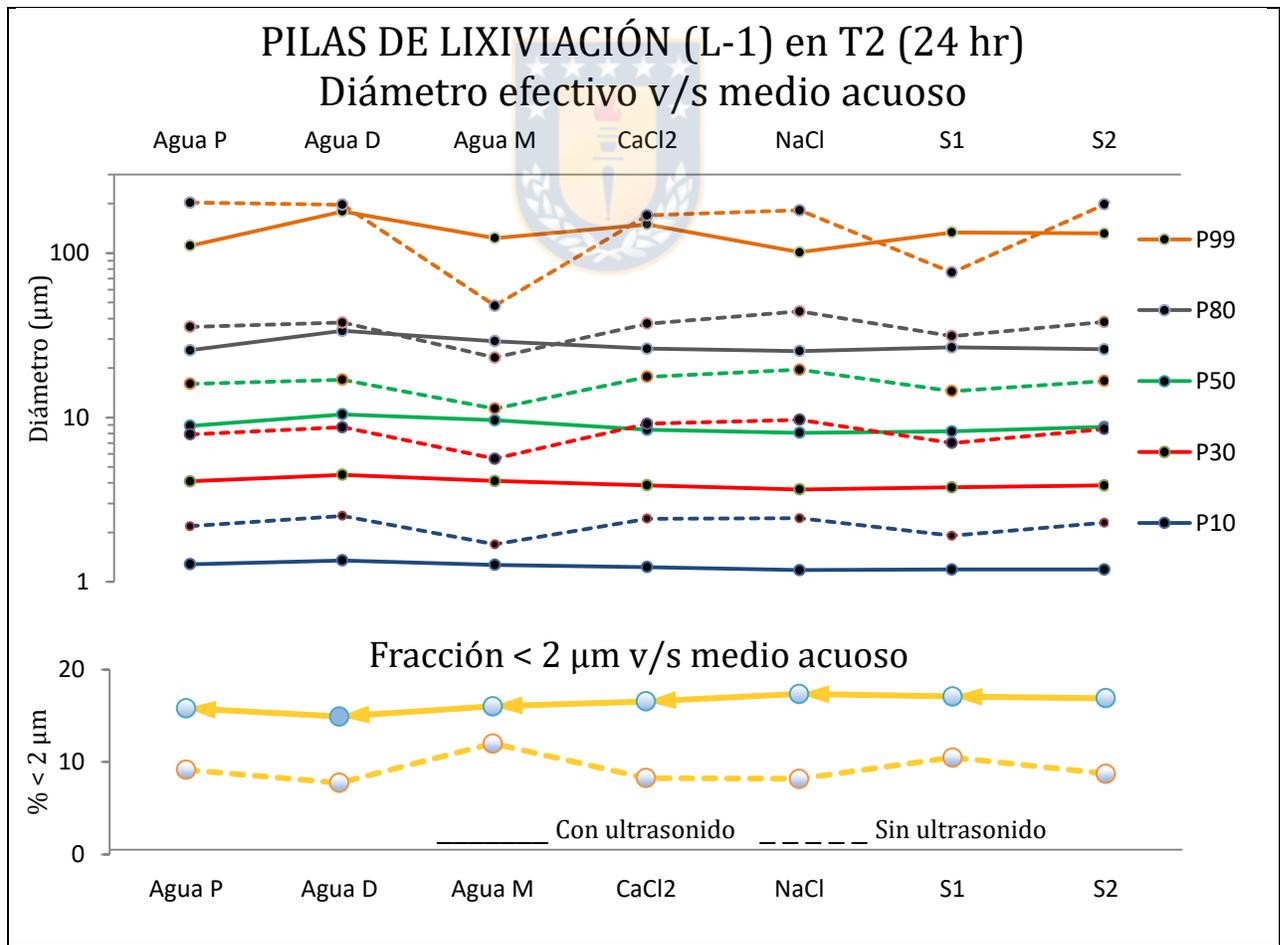


Gráfico 5.18 Diámetro efectivo vs medio acuoso para L-1 en T1 y % < 2 μm . Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.45 a la A-7.51 del apartado 7.- Anexos.

5.8.3.- Tamizado húmedo

Esta muestra, previo análisis por difracción láser fue fraccionada por tamizado húmedo. Sobre los 34 μm la curva granulométrica fue obtenida por tamizado, y bajo este tamaño por difracción láser (Gráfico 5.19). Se observa que todas las curvas obtenidas por difracción láser informan una menor distribución de tamaño de partículas. Aquellas que se acercan más corresponden a las que no utilizan ultrasonido. Se puede desprender de esto, que la dispersión que logra el tamizado húmedo subestima la fracción fina, no logrando dispersar por completo a las partículas más finas.

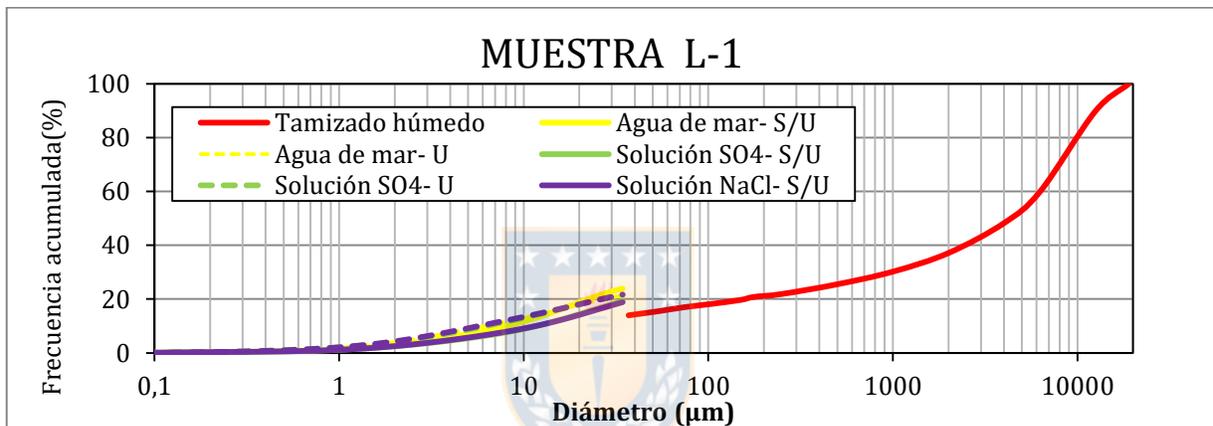


Gráfico 5.19 (a) Muestra L-1. Curva granulométrica de la totalidad de la muestra (fina y gruesa). Considerando tamizado húmedo para la fracción gruesa y difracción láser para la fracción fina en los distintos medios fluidos (NaCl, SO_4^{2-} (Ca, Na) y agua de mar) con y sin ultrasonido.

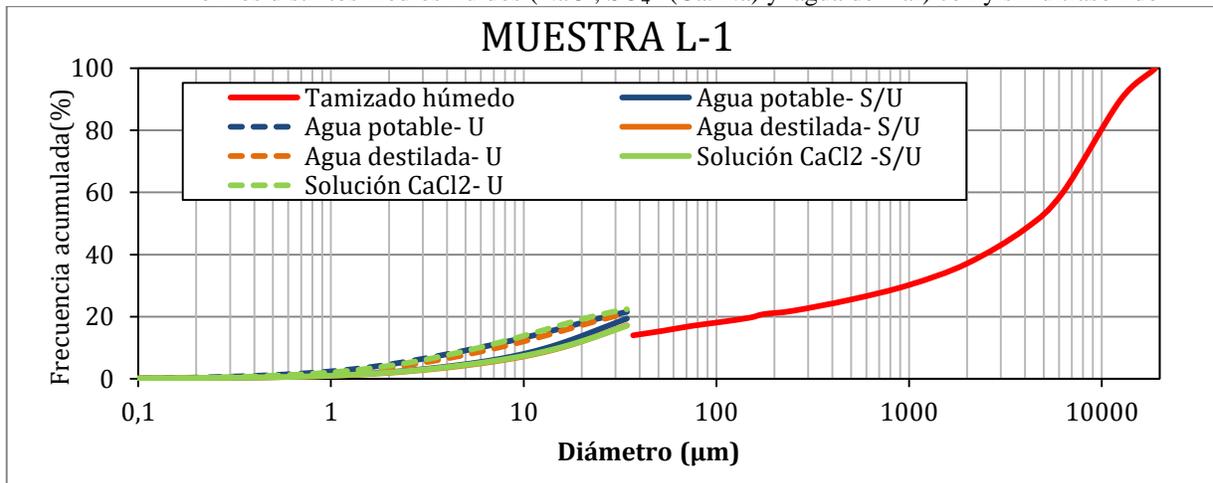


Gráfico 5.19 (b) Muestra L-1. Curva granulométrica de la totalidad de la muestra (fina y gruesa). Considerando tamizado húmedo para la fracción gruesa y difracción láser para la fracción fina en los distintos medios fluidos (CaCl_2 , agua destilada, agua potable) con y sin ultrasonido.

5.9.- Canal de Relave (M-5)

Las muestras provenientes del canal de relave fresco se comportaron de manera similar. Para ejemplificar y explicar sus resultados se ha utilizado la muestra M-5. Esta presenta una distribución unimodal que no se altera en toda la serie de mediciones.

5.9.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido en T1

En general estas muestras resultan poco sensibles al ultrasonido y sus resultados no presentan variaciones de un fluido a otro (Gráfico 5.20). De manera que el poseer una distribución de tamaño artificial dada por molienda además de la suspensión constante en fluidos con alta carga iónica favorece el estado de dispersión de la muestra. Excepción a esto es el comportamiento en agua de mar, donde se observa una disminución del rango de la distribución (Gráfico A-7.200) la medición sin ultrasonido presenta una disminución del tamaño de partículas y se anula la fracción de tamaño menor, el rango disminuye cerca de un 30%, aunque parámetros como el P80 mantienen sus valores (Tabla A-7.67)

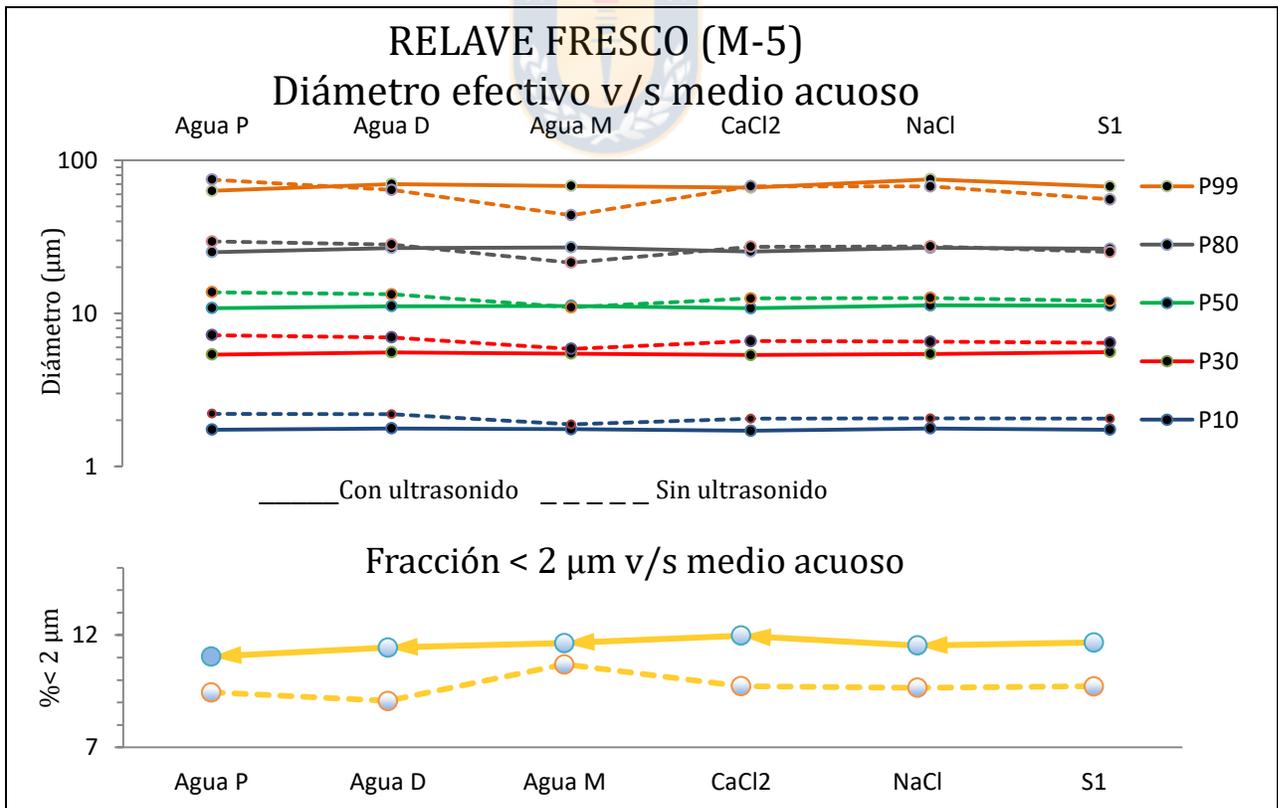


Gráfico 5.20 Diámetro efectivo vs medio acuoso para M-5 en T1 y % < 2μm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.67 a la A-7.71 del apartado 7.- Anexos.

5.9.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)

El tiempo de permanencia los distintos fluidos no altera los resultados en relación a los obtenidos en medición directa. La anomalía en agua de mar se sigue presentando y el pH menor de la solución S2 genera un aumento leve en rango detectado (Gráfico 5.21)

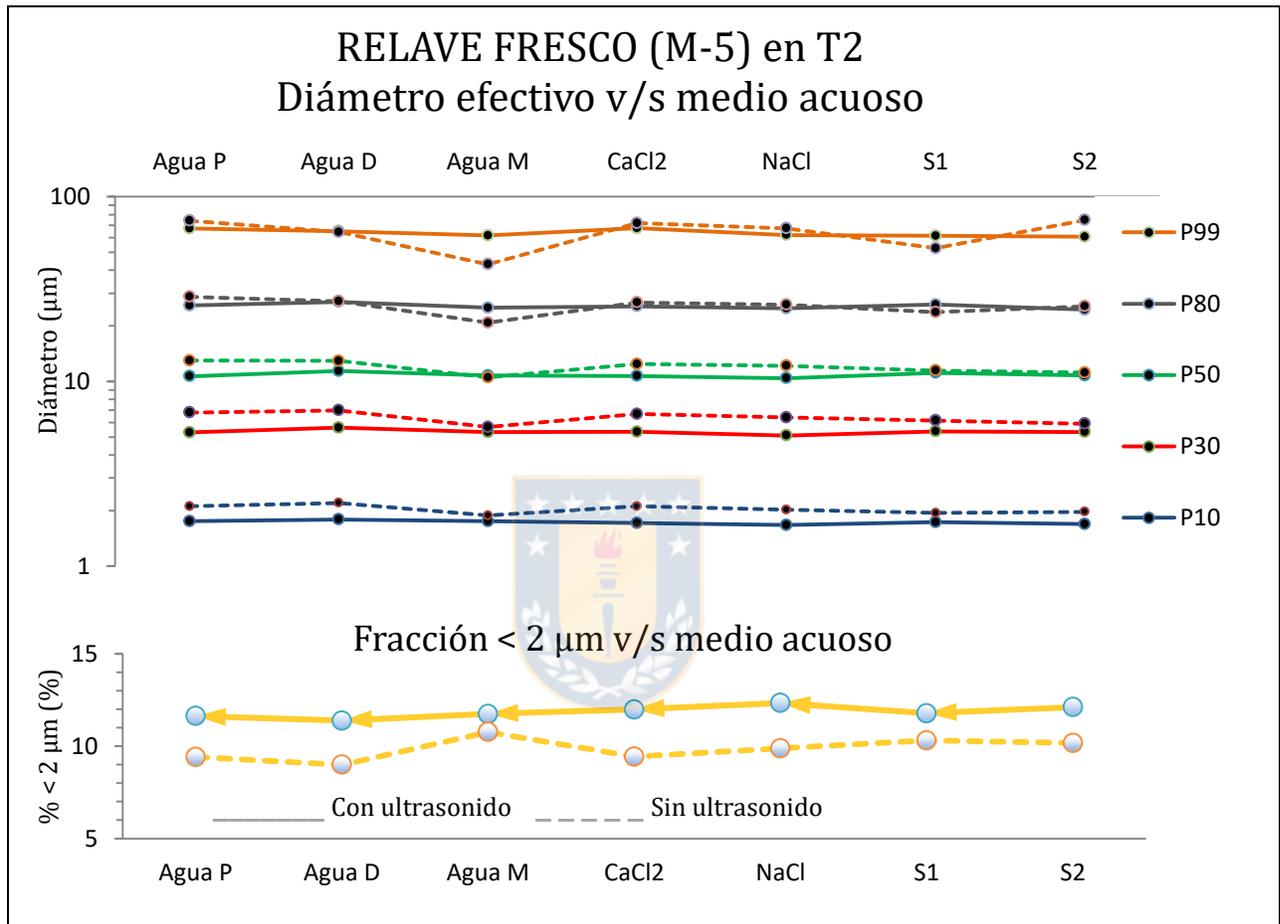


Gráfico 5.21 Diámetro efectivo vs medio acuoso para M-5 en T1 y % < 2μm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.67 a la A-7.52 del apartado 7.- Anexos.

5.10.- Tranque de Relave (M-50)

Tiende a presentar una curva unimodal con tendencia simétrica.

5.10.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido en T1

En agua potable, agua destilada y soluciones de NaCl y CaCl₂ se observa una distribución similar. La respuesta a ultrasonido es una disminución del tamaño de grano, gráficamente se

produce un desplazamiento hacia la izquierda de la curva de frecuencia relativa y acumulada (Gráficos A-7.190 al A-7.199). Al igual que ocurre en la muestra anterior, en agua de mar al medir sin ultrasonido se produce una anulación de las fracciones de mayor tamaño en la gráfica, disminuyendo el rango casi a la mitad en comparación con los fluidos mencionados anteriormente. Al medir con ultrasonido, hay una recuperación de esta fracción de mayor tamaño (Gráfico A-7.200). La solución sulfatada disminuye el rango de la medición sin ultrasonido. La fracción menor a 2 μm no experimenta mayores cambios.

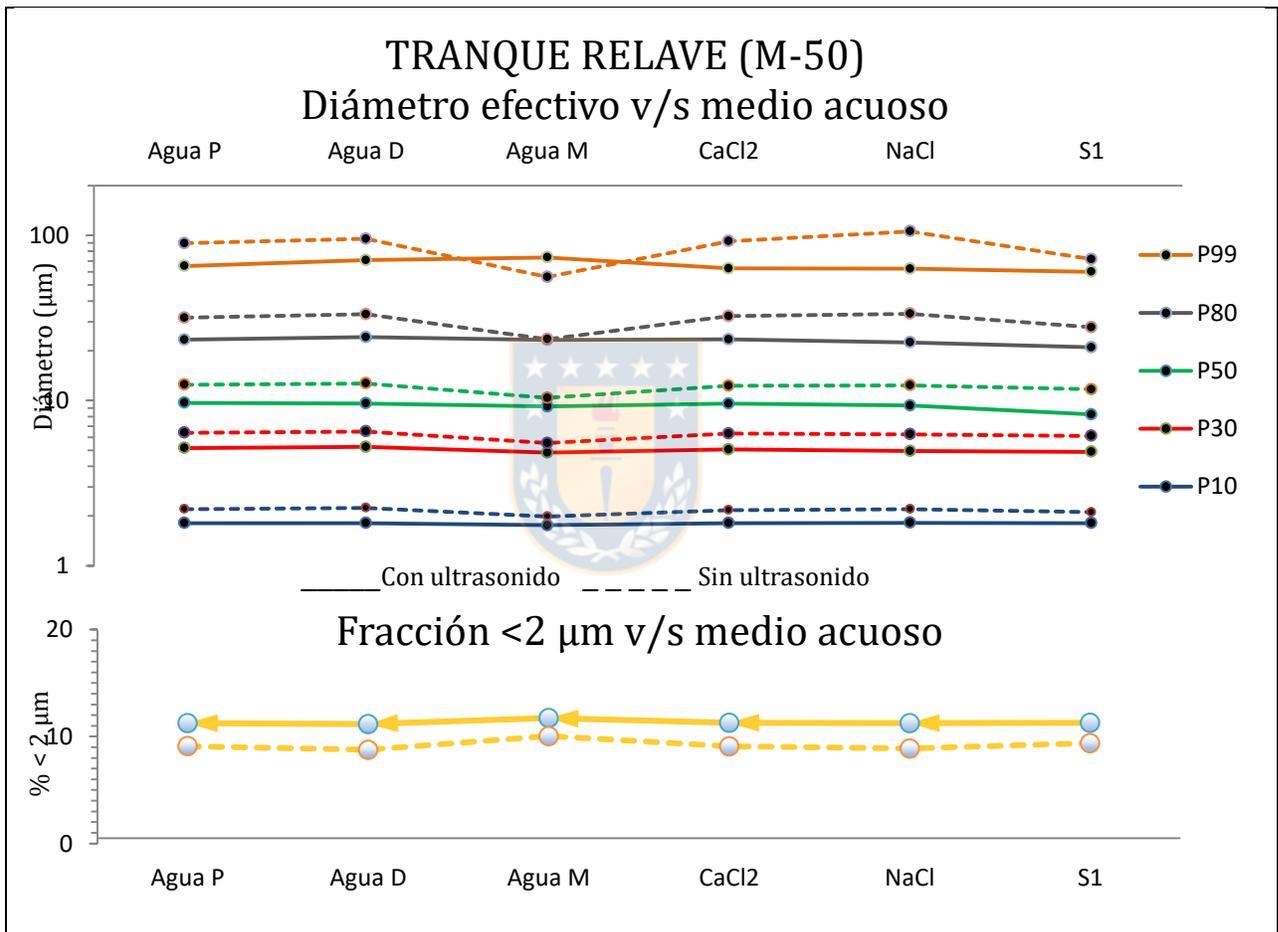


Gráfico 5.22 Diámetro efectivo vs medio acuoso para M-50 en T1 y % < 2 μm . Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.52 a la A-7.56 del apartado 7.- Anexos.

5.10.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)

Luego de 24 horas de reposo no se advierten cambios notorios en los resultados. La disminución del pH induce una dispersión mayor y a la vez un aumento del rango, esto indicaría procesos combinados de dispersión y posible floculación.

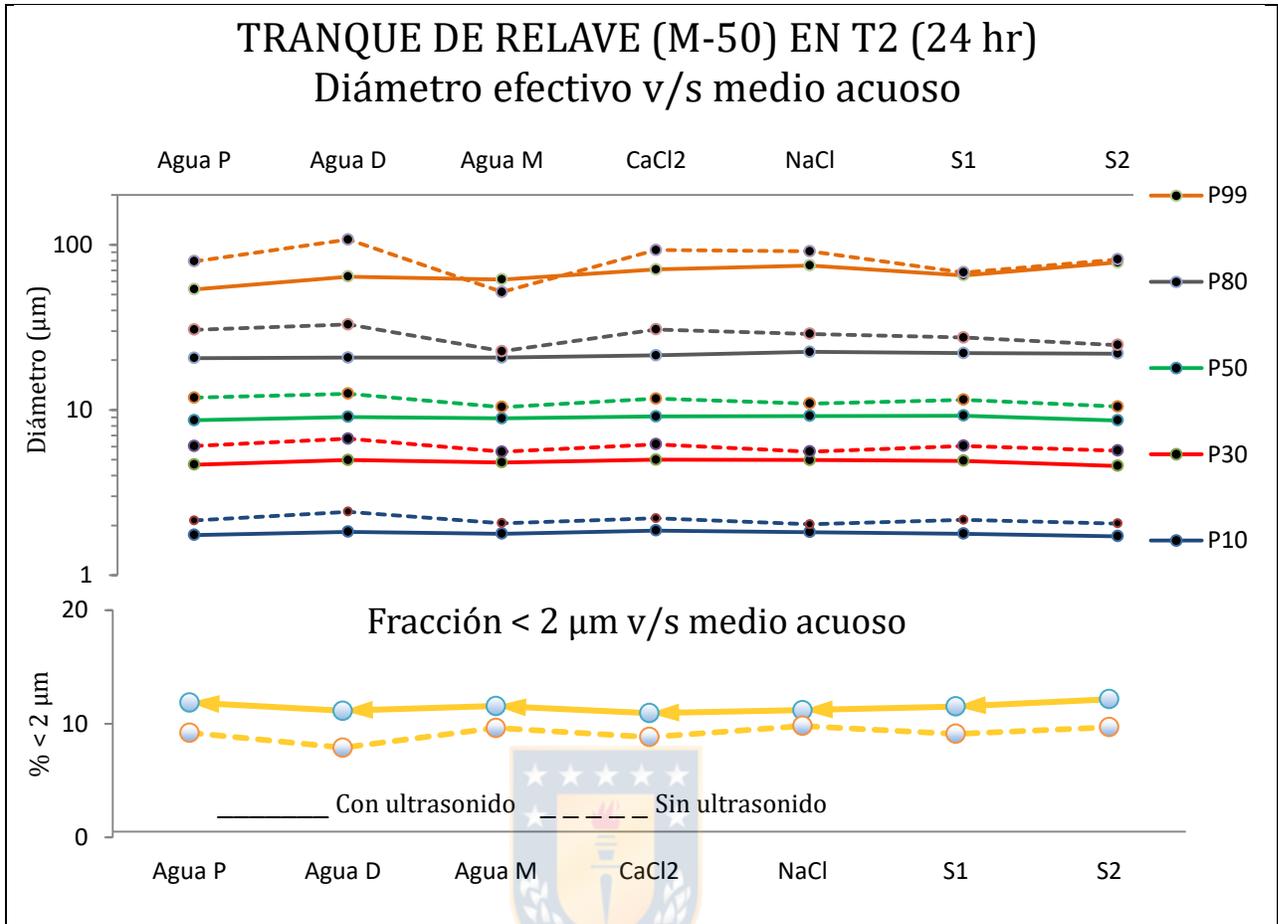


Gráfico 5.23 Diámetro efectivo vs medio acuoso para M-50 en T1 y % < 2 μm . Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.52 a la A-7.56 del apartado 7.- Anexos.

5.11.- Tranque de Relave (M-11)

Esta muestra de granulometría más gruesa que las anteriores presenta una distribución bimodal con dos *peaks* muy asentados

5.11.1.- Evaluación Ultrasonido vs Fluido en T1

En medición directa, disminuye los valores de diámetros efectivos y aumenta la fracción menor a 2 μm . Este efecto es muy leve y en general en todos los fluidos tiende a presentar las mismas magnitudes para los estadísticos considerados. En agua de mar se produce un aumento de los diámetros efectivos, en ella el rango disminuye de 366,19 a 324,36 μm (Tabla A-7.61) con el ultrasonido

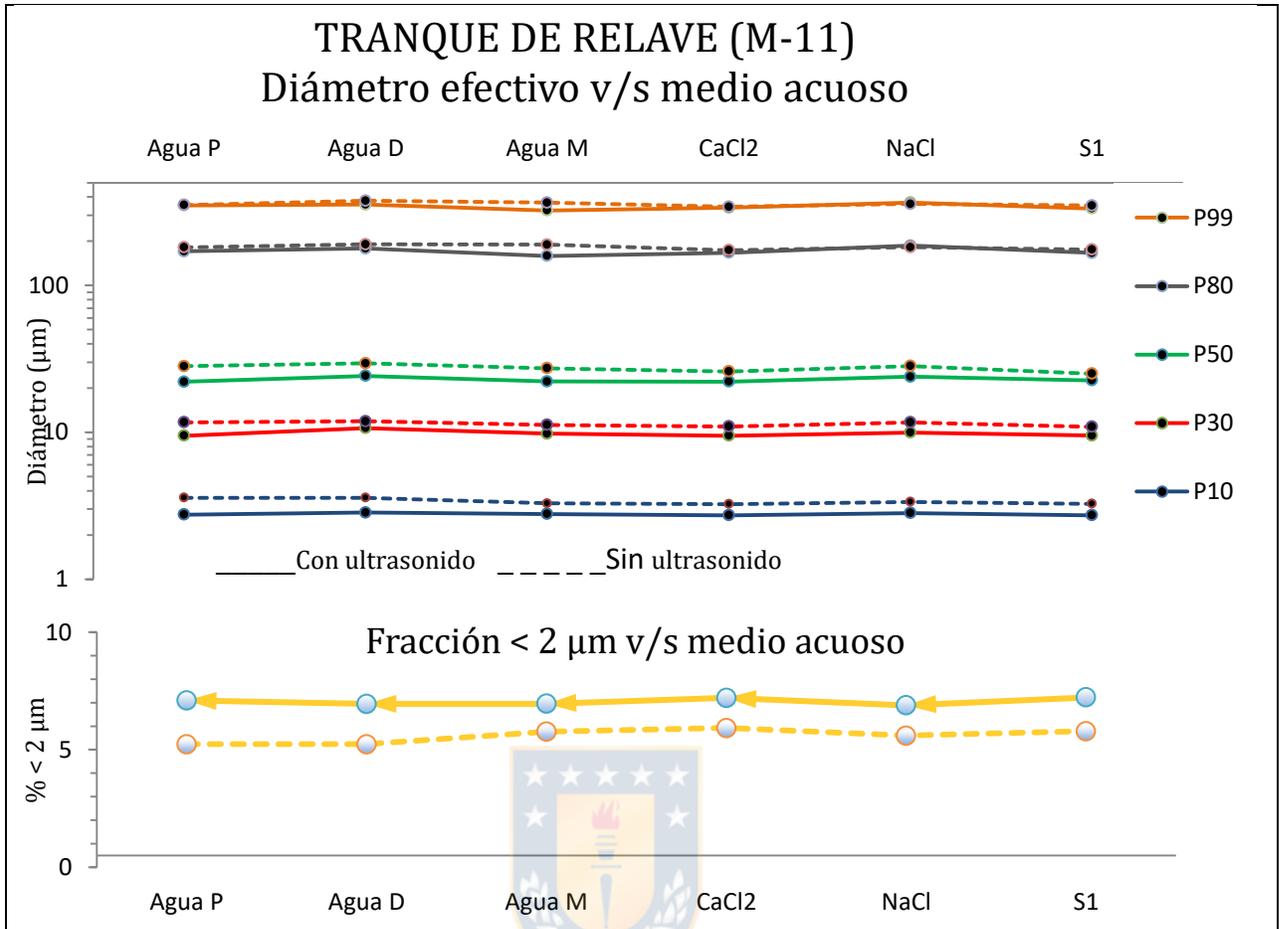


Gráfico 5.24 Diámetro efectivo vs medio acuoso para M-11 en T1 y % < 2µm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.58 a la A-7.62 del apartado 7.- Anexos.

5.11.2.- Evaluación Tiempo de Permanencia en Fluido (T2)

En agua de mar ocurre un resultado anómalo luego de 24 horas de permanencia en este fluido: se anula una fracción de tamaño, y el rango aumenta en más de 100 µm lo que podría indicar un proceso de floculación (Gráfico A-7.183), la medición con ultrasonido contrarresta estos resultados igualando la curva a la obtenida en agua potable (Gráfico 5.25)

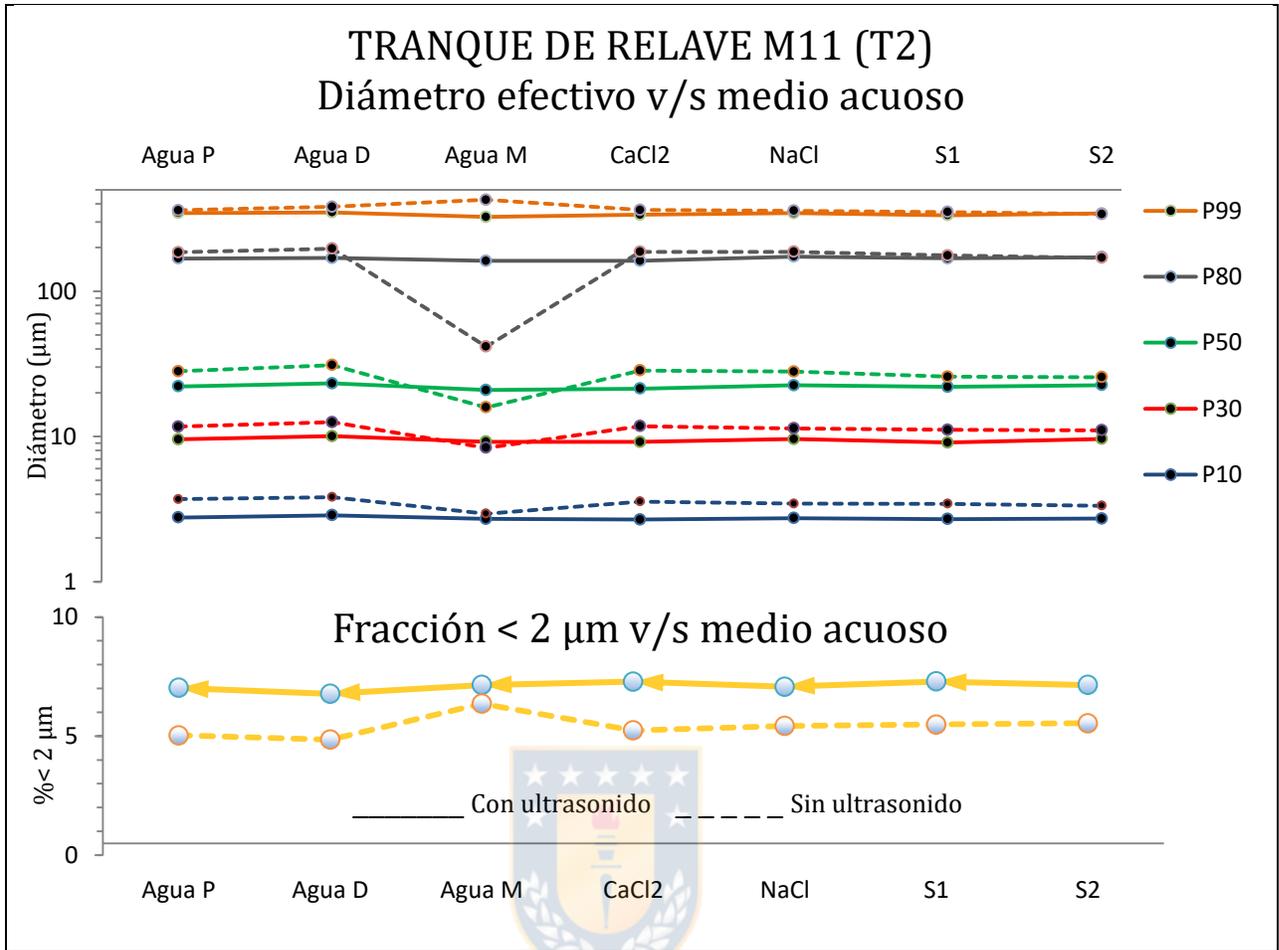


Gráfico 5.25 Diámetro efectivo vs medio acuoso para M-11 en T1 y % < 2µm. Representación del eje vertical a escala logarítmica. Construido con datos de la A-7.58 a la A-7.63 del apartado 7.- Anexos.

6.- DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

El análisis sistemático por difracción láser vía húmeda de estándares minerales y muestras de residuos mineros ha permitido determinar que el resultado final de este, dependerá del desarrollo de procesos de dispersión y/o floculación, entre otros, que pueden llevarse a cabo antes y durante la obtención de datos.

Como se detalló en capítulos anteriores, el estado de floculación de una suspensión de partículas de arcilla, ocurre al haber asociaciones o atracciones de tipo borde-cara o borde-borde entre las partículas, dando lugar a estructuras tridimensionales porosas de mayor volumen. Por el contrario, se habla de dispersión cuando no hay asociaciones de tipo atractivas entre las partículas. El desarrollo de estos fenómenos, depende de procesos tales como disolución, expansión, delaminación, etc., que ocurren dentro de la estructura y alrededor de los mismos minerales.

Durante el análisis granulométrico por difracción láser vía húmeda, el desarrollo de estos procesos se ve influenciado directamente por los siguientes factores, donde los primeros dos corresponden a condiciones de medición y parámetros instrumentales, cuya función es generar dispersión en las partículas individuales y las últimas, a características intrínsecas de la muestra a analizar:

- Ultrasonido
- Medio acuoso
- Especie mineral
- Estado de la muestra (fracción arcillosa, tratamientos previos)

Si bien, la técnica de difracción láser no permite la observación directa de los fenómenos mencionados, los que ocurren a escala micro y nanométrica, es posible deducirlos mediante la comparación de las gráficas obtenidas para cada muestra en los diferentes contextos de medición que ya han sido expuestos.

Los procesos de floculación se infieren de la aparición de *peaks* de mayor tamaño en la curva de frecuencia relativa, en desmedro de la fracciones menores (principalmente la fracción $<2 \mu\text{m}$), los

que de ser importantes generan un cambio en los valores de diámetros específicos. Gráficamente, esto último se observa en una curva de frecuencia acumulada desplazada hacia la derecha.

Estos cambios en la gráfica resultante, pueden ser complementados con la observación de la muestra, donde en algunos casos es posible observar partículas de menor tamaño al que informa el medidor de partículas.

6.1.- Ultrasonido y Medio Acuoso

Ambos parámetros pueden ser modificados experimentalmente durante la medición, tomando en cuenta que de forma estándar el medidor de partículas utilizado posee una conexión al sistema de agua potable y éstas se realizan con ultrasonido.

El ultrasonido corresponde a un parámetro de diseño, el rango de intensidad y tiempo con que puede ser aplicado está determinado de fábrica para cada equipo. Este, resulta una herramienta necesaria para dispersar de manera efectiva las fracciones de tamaño $<2 \mu\text{m}$, donde las fuerzas electrostáticas dominan la interacción entre partículas, dando paso a sistemas coloidales. Así, la aplicación de ultrasonido modifica la distribución de tamaño de partículas de todas las muestras y estándares analizados, disminuyendo los diámetros efectivos y aumentando la fracción de partículas bajo los $2 \mu\text{m}$.

El alcance de esta disminución en el tamaño de partículas detectado por el medidor, que responde a la influencia y predominancia de procesos dispersivos, se ve afectada por la carga iónica y pH del medio acuoso circundante que es el encargado de hacer recircular la pulpa dentro del medidor, y es distintiva para cada especie mineral ensayada. Dado lo anterior, si en un medio acuoso las diferencias entre una medición con y sin ultrasonido para una muestra determinada son mínimas o son menores en comparación con los demás medios, se deduce que en dicho medio se ven favorecidos los procesos dispersivos, ya sea por efecto de delaminación y/o por efecto de fuerzas repulsivas entre partículas.

Los medios acuosos utilizados se diferencian en la carga iónica. Aquellos considerados de alta carga iónica corresponden al agua de mar y soluciones sulfatadas, mientras que los de baja carga iónica corresponden a las soluciones de NaCl y CaCl_2 las que presentan un rango similar de

Tabla 6.2 Mayores (en tonos rojos) y menores (verdes) distribuciones de tamaño de partículas. En tonos pálidos las tendencias más suavizadas.

	Mediciones sin ultrasonido														
	Agua P		Agua D		Agua M		NaCl		CaCl		S1		S2		
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	
Caolín alta cristalinidad															
Caolín baja cristalinidad															
Illita (SW1)															
Montmorillonita sódica															
Montmorillonita cálcica															
Nontronita verde															
Nontronita marrón															
Hectorita															

6.2.1.- Caolín

Consideradas dentro del grupo de arcillas no expansivas, ambas variedades de caolín responden a la aplicación de ultrasonido suavizando los *peaks* de frecuencia y disminuyendo los tamaños detectados en comparación a aquellas mediciones sin ultrasonido (Gráficos A-7.1 y A-7.10), permitiendo establecer que se favorece la dispersión de la muestra mediante la aplicación de este parámetro instrumental.

Al considerar el tipo de fluido, llama la atención que la mayor distribución de tamaño para ambas variedades se obtenga en agua destilada (Gráficos A-7.11 y A-7.2), aumento que es contrarrestado mediante la aplicación de ultrasonido (Gráficos A-7.3 y A7.12). En este escenario, el ultrasonido permite aumentar de 19 a 42% la fracción menor a 2 μm en el caso de la variedad de baja cristalinidad (Gráfico 5.2) y de 18 a 36% en la variedad de alta cristalinidad (Gráfico 5.1). Mientras que el mayor porcentaje de partículas menores a 2 μm y las menores diferencias entre las mediciones con y sin ultrasonido ocurren en fluidos con mayor carga iónica, como el agua de mar y las soluciones sulfatadas.

Este comportamiento podría explicarse de diferentes maneras, las que no son excluyentes entre sí:

- a) Considerando que el acople entre capas TO de la estructura interna del caolín, se da por puentes de Hidrógeno, enlace de carácter débil susceptible de separar por entrada de moléculas de alta polaridad como H_2O , y que un aumento en la carga iónica del medio,

podría permitir una mayor entrada de agua molecular en este espacio interlaminar acrecentando la cantidad de procesos de separación de las láminas TO (delaminación), en los medios acuosos con mayor carga iónica, vale decir, agua de mar y soluciones sulfatadas, sería esperable una distribución de menor tamaño por efecto de una mayor cantidad de procesos de delaminación, mientras que, en agua destilada, fluido con nulo contenido de iones y sin aplicar ultrasonido se esperaría una mayor distribución de tamaño debido a que habría una menor cantidad de procesos de delaminación, al igual que en las soluciones de NaCl y CaCl₂ que presentan baja carga iónica. Asimismo, la aplicación de ultrasonido, entregaría valores menores en ambos casos, debido a que también induciría procesos de delaminación y separación entre láminas TO, esta vez, por un efecto mecánico, considerando que esta superficie de enlace es además, una superficie de exfoliación en el mineral.

En ambos casos, tanto por efecto de la carga iónica o por la aplicación del ultrasonido, la delaminación contribuiría a aumentar la superficie específica del mineral, favoreciendo con ello, la generación de microflóculos. Este fenómeno debería ocurrir a valores de pH <7, que es el caso de los análisis realizados, donde los bordes de las partículas de caolín tienen carga positiva y éstas se acercan lo suficiente para mantener dichas asociaciones. La aplicación del ultrasonido, además de generar delaminación, puede estar contribuyendo a la dispersión de microflóculos.

- b) Finalmente, podría deberse el estado de agregación de la muestra previo al análisis. El que es contrarrestado por efecto de la carga iónica del medio y más eficazmente por el ultrasonido.

Si se considera ahora el grado de cristalinidad del caolín, determinada por la superficie específica y la CIC de la especie, se observa que a pesar de que gráficamente las curvas de frecuencia acumulada y relativa de ambos estándares sufren variaciones similares frente al efecto dispersivo del ultrasonido en los distintos fluidos, éstas diferencias son más pronunciadas en el caolín de baja cristalinidad en soluciones de baja carga iónica, es decir, una mayor superficie específica y mayor CIC de las partículas, es menos susceptible de dispersar sin la acción del ultrasonido, permitiendo un mayor desarrollo de interacciones entre superficies vecinas. Esto puede afectar tanto al “estado de agregación” de la muestra previo al análisis, el que depende directamente de la

cantidad de superficie de contacto entre partículas como a la formación de estructuras (asociaciones cara-borde o borde-cara) durante la medición, la que también se ve favorecida.

6.2.2.- Illitas

Estos estándares responden de forma importante al ultrasonido, por lo que, para su disgregación se hace necesario el uso de este parámetro instrumental en especial en las fracciones mayores (Gráficos A-117 a A-134).

En los tres estándares se reconoce una menor distribución en S1 (Gráfico A-7.130). Mientras que, en agua de mar, se registra un comportamiento anómalo (Gráfico A-7.127), al medir sin ultrasonido se anula por completo la fracción de mayor tamaño de esta distribución, debido a lo anterior el rango obtenido corresponde a la tercera parte de lo que se observa en agua potable en las mismas condiciones y los diámetros efectivos son menores en comparación a las medidas realizadas con ultrasonido (Gráfico 5.5 y 5.6). En cambio, al medir con ultrasonido, no se observa ninguna variación con respecto a los resultados en agua potable. Estos resultados, requieren de mayor estudio y atención, si bien, como se verá a continuación, el efecto dispersivo del agua de mar y S1 en otras especies minerales puede explicarse debido a la acción de fuerzas no consideradas dentro de la teoría de DLVO, estas disminuciones no deberían ser menores a los diámetros detectados en mediciones con ultrasonido en el mismo fluido. Dado lo anterior no se descarta un sesgo en el muestreo durante la obtención de datos.

Los resultados no permiten establecer una respuesta determinada por el grado de cristalinidad, ni por el pH en estas muestras.

6.2.3.- Esmectitas

Se ha determinado que la especie mineral que tiende a ser más susceptible ante los cambios en las condiciones de medición son las esmectitas o arcillas expansivas, las que presentan a escala, una mayor capacidad de intercambio catiónico y cargas superficiales de carácter permanente, junto a mayores magnitudes de superficie específica, factores claves que favorecerían el dominio de fuerzas atractivas que desencadenan procesos de floculación. Todas responden al ultrasonido disminuyendo notoriamente sus diámetros específicos y en algunos casos modificando el comportamiento de las curvas de distribución.

6.2.3.1.- Montmorillonitas

La Montmorillonita cálcica mantiene su carácter unimodal con simetría negativa en todas las mediciones (Gráficos A-7.27 al A-7.45) y es en sus diámetros efectivos de mayor tamaño donde se observan las disminuciones más importantes con la aplicación del ultrasonido. Estas disminuciones son semejantes en los distintos medios fluidos, excepto en agua de mar, donde al igual que el caolín, se observan diferencias mínimas entre las mediciones con y sin ultrasonido, permitiendo establecer que este medio favorece la dispersión de montmorillonitas cálcicas, ya sea por efecto de procesos de delaminación o dispersión de microfloculos (Gráfico 5.7).

No obstante, según el balance de fuerzas establecida en la teoría de DLVO, una mayor carga iónica en el medio induciría una compresión de la doble capa electrónica, permitiendo que las partículas se acerquen lo suficiente para generar interacciones borde-borde y cara-borde entre las superficies, sumado al alto CIC y superficie específica de las esmectitas, lo esperable es que ocurran procesos de floculación que se observarían en una gráfica con diámetros específicos mucho mayores. Este hecho podría indicar la presencia de otras fuerzas en juego, no consideradas dentro de la teoría de DLVO. Estudios como Pashley (1981a y 1981b), reconocen la influencia de las denominadas fuerzas de hidratación o solvatación entre partículas de micas por efecto de la hidratación de cationes en suspensiones acuosas, estas fuerzas son de carácter repulsivo y son específicas para cada catión, surgiendo a un rango de concentración crítico determinado experimentalmente para cada uno de ellos. Por lo tanto, depende tanto del medio (tipos de electrolitos presentes y concentración relativa) como de la superficie mineral (CIC).

En la Montmorillonita sódica, al contrario de las especies minerales vistas hasta ahora, donde el efecto dispersivo del ultrasonido predomina por sobre los demás factores, se observan aumentos considerables de tamaño en medios con alta carga iónica como agua de mar (Gráficos A-7.58) y en solución sulfatada (A-7.61). En estos fluidos, el ultrasonido contrarresta de manera significativa el aumento de la distribución de tamaño, pero no logra disminuirlos al nivel de los obtenidos en los demás medios acuosos (Gráficos A-7.59 y A-7.62). Ejemplo de ello, es que en agua de mar y S1, el P80 alcanza los 19 y 9 μm respectivamente, mientras que en agua destilada llega a los 3 μm . Si se consideran estos mismos parámetros sin la aplicación de ultrasonido; el P80 en agua de mar llega a los 60 μm , mientras que en agua destilada apenas alcanza los 6 μm (Gráfico 5.9). Algo similar ocurre con la fracción menor a 2 μm , donde en agua de mar se

reconoce un aumento de 5 a 14 % al aplicar ultrasonido, muy por debajo de lo que ocurre en agua destilada, donde el aumento va desde 25 a 38% (Gráfico 5.9). Gráficamente esto se observa en la curva de frecuencia relativa con un desplazamiento hacia la derecha y una acentuada asimetría negativa. El ultrasonido contrarresta el aumento de la distribución desplazándola hacia la izquierda, manteniendo la asimetría negativa y modificando la curva de tal manera que es posible reconocer en ella un carácter bimodal (Gráfico A-7.57), que difiere de la tendencia simétrica unimodal reconocida en los demás fluidos tanto en mediciones con y sin ultrasonido.

Lo anterior puede explicarse según el balance de fuerzas establecida en la teoría de DLVO. Este tipo de Montmorillonita presenta Na^+ como principal catión de cambio, el que debido a su valencia, permite una mayor entrada de agua molecular en el espacio interlaminaar (expansión) que desencadenan una separación completa o disociación de las láminas TOT, las que pasan a comportarse como partículas individuales. Este proceso de delaminación, como ya se ha señalado, aumenta la superficie específica del mineral, factor crítico a la hora de caracterizar las interacciones partícula-partícula, es decir, habrá mayor cantidad de superficies activas interaccionando entre sí. La alta carga iónica en el medio, en este caso agua de mar, genera una disminución o compresión de la doble capa electrónica que las rodea, y con ello hay una disminución de las fuerzas repulsivas, predominando así, las fuerzas atractivas de Van der Waals entre caras cristalinas, lo que permite que las partículas se acerquen lo suficiente como para favorecer las interacciones borde-cara y borde-borde que dan lugar a la floculación, vale decir, estructuras tridimensionales de mayor volumen. Este proceso también ocurre, aunque en menor escala, en S1 y S2 respectivamente.

Otro parámetro que tiene influencia en este tipo de arcilla, es el tiempo de permanencia en el fluido. Luego de 24 horas, al medir sin ultrasonido en agua de mar, la diferencia entre las medidas es mucho menor (Gráfico A-7.58 y Tabla A-7.22): el P80 alcanza los 23 μm , casi un tercio del valor obtenido en medición directa (Gráfico 5.10). Así, el efecto floculante del agua de mar disminuye con el tiempo de permanencia en ella, no obstante, la disminución máxima de tamaño se logra necesariamente con la aplicación del ultrasonido. En NaCl y CaCl_2 también se producen disminuciones aunque menos notorias.

Finalmente, luego de 24 horas la disminución de pH de la solución sulfatada (S2) genera un aumento de las distribuciones de tamaño (Gráfico A-7.63), la que es contrarrestada con el

ultrasonido (Gráfico A-7.64). Lo último, es probable que se deba a un aumento de las cargas positivas de los bordes de las partículas, favoreciendo así la generación de procesos de floculación en relación a las mediciones con pH más alto.

6.2.3.2.- Nontronitas

La Nontronita verde, igual que las demás esmectitas, resulta sensible al ultrasonido. Gráficamente la aplicación de este parámetro instrumental genera un cambio en el comportamiento de la curva de frecuencia relativa, que pasa de una asimetría negativa a una positiva (Gráfico A-7.65). Este cambio en la concentración de los datos, genera que los diámetros efectivos disminuyan sus valores (Gráfico 5.11).

Se reconoce una distribución de menor tamaño en la solución de NaCl, lo que es esperable debido a la baja valencia del catión Na^+ que contribuiría a que las partículas permanezcan en estado disperso, en este medio el P80 disminuye de 37 a 14 μm (Gráfico 5.11).

Caso contrario, es lo que ocurre en solución de CaCl_2 , donde esta disminución es desde 59 a 20 μm . Un aumento de tamaño que es esperable si se considera la mayor valencia del catión Ca^{2+} , el que generaría una compresión de la doble capa electrónica, permitiendo que las partículas se acerquen lo suficiente para generar microflóculos (Gráfico 5.11). A escala similar se encuentran los parámetros medidos en agua potable donde la disminución es de 56 a 17 μm y en S1 donde la baja es de 50 a 20 μm .

En agua de mar se observa una disminución en las fracciones de mayor tamaño. El P99 alcanza los 113 μm al ser medido sin ultrasonido y luego de 24 horas disminuye aún más, llegando a 63 μm . Este efecto dispersivo provocado por un medio de alta carga iónica nuevamente puede ser explicado por la influencia de fuerzas repulsivas de hidratación no consideradas dentro de la teoría de DLVO, la que en este caso estarían siendo importantes en las fracciones de mayor tamaño.

El tiempo de permanencia también favorece las disminuciones de tamaño de la solución de NaCl luego de 24 horas (Gráfico 5.12). Mientras que los valores en S1 y S2 no permiten establecer la influencia del pH, al menos en el rango en que éste es estudiado.

En tanto, la Nontronita marrón también presenta cambios gráficos de importancia al aplicar ultrasonido, respondiendo al igual que los demás estándares, con una disminución de los diámetros específicos (Gráfico A-7.).

Se reconoce en agua de mar un leve aumento en la distribución de tamaño (Gráfico A-7.93). En este fluido el P80 se modifica desde 37 a 20 μm con la aplicación de ultrasonido, mientras que en agua destilada lo hace de 30 a 18 μm (Gráfico 5.13). Por lo que, de haber formación de microflóculos por efecto de la carga iónica del agua de mar, estos son contrarrestados por el ultrasonido. Estas diferencias hasta ahora muy menores en comparación con las demás especies minerales.

Sin embargo al realizar las mediciones luego de 24 horas de reposo en las respectivas soluciones, se observan cambios en las curvas de frecuencia relativa. Resalta dentro de ellos, el aumento de tamaño en la solución de NaCl y S2 (Gráficos A-7.90 y A-7.98), esta última explicada por un aumento de las cargas positivas de los bordes de las partículas lo que favorecería las interacciones de tipo borde-borde y borde-cara. Asimismo, la fracción $< 2\mu\text{m}$ aumenta con la aplicación de ultrasonido en toda la serie de mediciones con excepción de ambas soluciones nombradas (Gráfico 5.13).

6.2.3.3.- Hectorita

Esta especie mineral presenta aumentos de tamaño en CaCl_2 y S1 (Gráfico A-7.104 y A-7.113), que pueden ser explicados por efecto de la valencia del catión Ca^{2+} el que contribuye a que las partículas se acerquen y generen microflóculos. Sin embargo, este aumento es contrarrestado por el ultrasonido (Gráficos A-7.105 y A-7.114). Al usar este parámetro instrumental los diámetros efectivos se mantienen altos en agua de mar (Gráfico A-7.109 y A-7.111), aumento que no resulta extraño considerando la alta carga iónica de este fluido. En tanto, en agua potable se obtienen los menores valores de la serie de medición, en ella la fracción $< 2\mu\text{m}$ llega a 14% mientras que en agua de mar y CaCl_2 estos llegan a 6 y 8% respectivamente (Gráfico 5.13 y 5.14).

Los resultados no permiten establecer modificaciones por efecto del tiempo de permanencia en los fluidos ni por pH, al menos en los rangos estudiados.

6.3.- Estado de la Muestra

Finalmente el estado de la muestra particulada influye en la obtención de datos. Una muestra en solución, por ejemplo aquellas muestras provenientes de un canal de relave, con una molienda reciente serán más reticentes a presentar variaciones frente a cambios en las condiciones de medición, en comparación con una muestra asentada en un tranque de relave. Los fluidos y la suspensión continua, combinada con procesos de molienda, favorecen la dispersión independiente de las variaciones en las condiciones de medición en el caso de las muestras ensayadas. Asimismo, granulometrías más gruesas son más factibles de dispersar y menos susceptibles a presentar variaciones frente a las modificaciones experimentadas.

Al combinar estos parámetros en el análisis de muestras de residuos mineros se observa que:

- L-1, muestra con un *peak* bien desarrollado de esmectitas en DRX de arcillas (Tabla 6.3), tiende a presentar muchas variaciones a cambios en las condiciones de medición, el ultrasonido genera una notoria dispersión (Gráficos A-7.135 al A-7.152 y 5.17). Mientras que M-5 (Gráficos A-7.190 al A-7.207 y 5.20) presenta trazas de esmectitas, pero no presenta tanta variabilidad, lo que se explica por el estado de suspensión en que se encuentra la muestra, es decir, prima el efecto dispersante del medio acuoso en que se encuentra suspendida y la molienda.

- Granulometrías finas tienden a presentar mayores variaciones a escala, al modificar condiciones instrumentales, así es como M-50 (Gráfico 5.22) por ejemplo, es más susceptible al efecto dispersante del ultrasonido que M-11 (Gráfico 5.24), que posee una granulometría más gruesa, pese a presentar una composición mineral similar (Tabla 6.3).

Tabla 6.3 Contenido de arcilla mineral de muestras.

DRX arcilla	M-11	M-50	M-5	L-1
Caolín				
Esmectita				
Micas/Illita				
Clorita				

- Comparativamente las curvas de distribución de tamaño de partículas obtenidas por tamizado húmedo entregan mayores tamaños de partículas versus la curva entregada por

difracción láser. Las mediciones de difracción láser sin ultrasonido son las que más se acercan a los valores obtenidos por separación mecánica (Gráficos 5.19 y 5.20).

Esto puede deberse a que la difracción láser vía húmeda genera una dispersión más eficiente al aplicar el ultrasonido a la vez que la muestra circula en un flujo de agua. O bien, el resultado puede estar siendo afectado por imprecisiones derivadas de las diferencias en la obtención de datos. El tamizado húmedo entrega una distribución basada en la masa de las partículas, mientras que la difracción láser lo hace en base al volumen de la esfera equivalente de las partículas individuales. Ambas distribuciones podrían ser comparables si la densidad de las partículas fuera uniforme, sin embargo esto no ocurre en una muestra multimineral con componentes metálicos y no metálicos, cuyas densidades difieren entre sí, como es el caso de L-1 con contenidos variables de cuarzo ($2,65 \text{ g/cm}^3$) y hematita ($5,26 \text{ g/cm}^3$). De tal manera que, dada una muestra multimineral, el hecho de considerar una densidad uniforme para constituyentes metálicos y no metálicos puede derivar en imprecisiones al comparar los resultados de ambos métodos.

6.4.- Conclusiones

El análisis sistemático por difracción láser vía húmeda de estándares minerales y muestras de residuos mineros, ha permitido concluir que la distribución de tamaño de partículas de un agregado cualquiera es una respuesta supeditada a un contexto específico, donde el resultado final, dependerá del desarrollo de procesos de dispersión y/o floculación, entre otros, que pueden llevarse a cabo antes y durante la obtención de datos.

Se ha reconocido la influencia de cuatro factores en los resultados, los primeros dos corresponden a las condiciones analíticas escogidas por el usuario, en este caso, el tipo de fluido y la opción de aplicar ultrasonido, mientras que los restantes, corresponden a características intrínsecas de la muestra analizada: especies minerales presentes y el estado de la muestra particulada. Estos últimos factores no son modificables, pero sí deseables de caracterizar previo al análisis.

La aplicación de ultrasonido, conlleva en todo escenario una disminución de la distribución de tamaño en relación a las mediciones sin ultrasonido. El alcance de esta disminución, depende del fluido utilizado como agente dispersante, del estado de la muestra y las especies minerales presentes en ella.

En los minerales del grupo de las arcillas, se ha determinado que los procesos de floculación y dispersión durante un análisis por difracción láser vía húmeda, están controlados por la superficie específica y la CIC de la misma especie, donde a medida que estos aumentan, aumentan también las posibilidades de interacción entre partículas, siendo con ello, mayor el efecto dispersivo del ultrasonido.

Los cambios más sustanciales se observan en los minerales del grupo de las esmectitas, arcillas expansivas con alta CIC y superficie específica, donde además, el tipo de catión interlaminar se impone como variable: la presencia de Na^+ como catión de cambio en arcillas expansivas, indica la posibilidad de que se generen procesos de floculación en fluidos con alta carga iónica y pH ácido, comportamiento que cumple con el balance de fuerzas establecido en la teoría de DLVO. Por el contrario, si el porcentaje de Na^+ intercambiable de las arcillas expansivas se encuentra por debajo de 15%, en soluciones con alta carga iónica, es posible que entren en juego otras fuerzas que controlen la interacción entre partículas y que restrinjan los procesos de floculación.

En tanto, las arcillas no expansivas como el caolín y la illita, minerales con una baja CIC y superficie específica, resultan ser menos sensibles al variar las condiciones analíticas en comparación con el grupo antes mencionado, no obstante, presentan igualmente disminuciones al aplicar ultrasonido.

En los materiales derivados de procesos mineros, que corresponden a muestras de granulometría variable, compuestas por diversas especies minerales, tanto metálicas como no metálicas, resulta determinante el estado de la muestra. Muestras en suspensión, resultan ser menos sensibles al variar las condiciones analíticas, permitiendo establecer que tanto el fluido en que se encuentran y la molienda reciente, favorecen la dispersión en los diferentes contextos de medición. En tanto, aquellas muestras secas, se ven influenciadas por su granulometría y especies minerales presentes; aquellas más finas y con contenidos de esmectitas, resultan ser más sensibles a la aplicación del ultrasonido, mientras que aquellas más gruesas tienden a presentar distribuciones de tamaño similares en los distintos contextos analíticos.

Finalmente, como toda respuesta supeditada a un contexto, en la medida que el contexto cambie, una determinada distribución de tamaño presentará variaciones. En ningún caso alguno de estos resultados es menos válido que otro. Lo que sí puede resultar erróneo, es la conclusión que se

obtenga a partir de ellos, en la medida que no se considere la influencia de factores como los discutidos anteriormente. Así, en primera instancia se recomienda definir el objetivo del estudio granulométrico:

- a) Si es meramente comparativo y se requiere realizar análisis de manera sistemática por un período determinado de tiempo, por ejemplo, monitorear la granulometría a distintas distancias de un canal de relave, convendría mantener las mismas condiciones de medición para todas las muestras: mismo laboratorio y equipo, misma solución, mismo protocolo de muestreo y tiempo transcurrido desde éste hasta el análisis, etc.
- b) Si lo que se requiere es caracterizar una granulometría problema, de manera individual, se recomienda acercar en lo posible el contexto experimental, al contexto metalúrgico en que circula o asienta la muestra particulada, desde igualar concentraciones iónicas del medio circundante, a solicitar al laboratorio resultados de una medición sin la aplicación de ultrasonido.



7.- REFERENCIAS

- AROSA, Y. & DE LA FUENTE, R. 2015. Emisión espontánea y emisión estimulada. *Óptica Pura y Aplicada*. **48 (2)**: p. 109-113.
- ASTM C 117-17 Standard test method for materials finer than 75 um Sieve in mineral aggregates by washing.
- ASTM C 136M-14 Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.
- ASTM D 2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- ASTM E 11-17 Standard specification for woven wire test sieve cloth and test sieves.
- BARRETO, F.L., CARVALLO, H. O. & GHEYIII H. R. 2003 Conductividad hidráulica en un suelo aluvial en respuesta al porcentaje de sodio intercambiable. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. **2 (3)** p .403-407.
- BESOAIN, E. 1985. Mineralogía de las arcillas del suelo, 1ra edición. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura: 1216 pp. Costa Rica.
- BUTALOVIC , S. 2007. Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice. 1ra Edición. *Elsevier*: 458 pp. Amsterdam.
- CARRETERO, M.I. & POZO, M. 2007. Mineralogía aplicada: salud y medio ambiente, 1ra edición. Editorial Paraninfo: 424 pp. Madrid.
- CHAPMAN, D.L. 1913 LI. A contribution to the theory of electrocapillarity. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. **25 (148)**: p. 475-481.
- DERJAGUIN, B. AND LANDAU, L. D. 1941. Theory of the stability of strongly charged lyophobic sols and of the adhesion of strongly charged particles in solutions of electrolytes *Acta Physico-Chimica*. **14**: p. 633-662.
- DUC, M., GABORIAUD, F. & THOMAS, F. 2005. Sensitivity of the acid–base properties of clays to the methods of preparation and measurement. *Journal of Colloid and Interface Science*. **289**. p. 139–147.
- FRIAS, M.; DE LUXAN, M. P. & SANCHEZ DE ROJAS, M.I. 1988. Espectrometría de difracción por rayos laser. *Materiales de Construcción*. **38 (212)**: p. 37-52.
- GRIM, R.E. 1968. Clay Mineralogy. McGraw-Hill: 596 pp. New York.

GOUY, M. 1910. Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte. *Journal de Physique Théorique et Appliquée*. **9 (1)**: p.457-468.

HART, R.J.; ZHU, Y. & PIRARD, E. 2011. Particle size and shape characterization: current technology and practice. *European Mineralogical Union (EMU) Notes in Mineralogy*. **9 (4)**: p. 77-127.

HIGUSHI, T. & YOSHIDA, H. 2012. The effect of initial parameters on particle size distribution inverted using the laser diffraction technique and a non-linear iterative method. *Advanced Powder Technology*. **23 (5)**: p. 682–692.

ISO 3310-01 Technical requirements and testing. Part 1: Test sieves of metal wire cloth.

KEELING, J.L., RAVEN, M.D. & GATES, W.P. 2000. Geology and Characterization of Two Hydrothermal Nontronites from Weathered Metamorphic Rocks at the Uley Graphite Mine, South Australia. *Clays and Clay Minerals*. **48 (5)**: p. 537-548.

KLEIN, C. & HURLBUT, C.S. (1996). Manual de Mineralogía. Reverté: 679 pp. Barcelona.

MITCHELL, J.K. & SOGA, K. 2005. Fundamentals of Soil Behavior, 3ra Edición. John Wiley & Sons: 592 pp., Hoboken, EEUU.

ORMANECHEA, O. 2007. Diseño y construcción de un láser sólido pulsado del tipo yag: Nd. *Revista Boliviana de Física*. **13 (13)**: p. 54-57.

PIERI, L.; BITTELLI, M. & ROSSI, P. 2006. Laser diffraction, transmission electron microscopy and image analysis to evaluate a bimodal Gaussian model for particle size distribution in soils. *Geoderma*. **135**: p. 118-132.

PASHLEY, R. M. 1981a. DLVO and hydration forces between mica surfaces in Li⁺, Na⁺, K⁺, and Cs⁺ electrolyte solutions: A correlation of double-layer and hydration forces with surface cation exchange properties. *Journal of Colloid and Interface Science*. **83(2)**: p. 531–546

PASHLEY, R. M. 1981b. DLVO and hydration forces between mica surfaces in Li⁺, Na⁺, K⁺, and Cs⁺ electrolyte solutions: A correlation of double-layer and hydration forces with surface cation exchange properties. *Journal of Colloid and Interface Science*. **83(2)**: p. 531–546.

PORTA, J., LOPEZ-ACEVEDO, M. & POCH, M. 2014. Edafología: uso y protección de suelos, 3ra edición. Paraninfo: 607 pp. Madrid.

RAWLE, A. 2002. The importance of particle sizing to the coatings industry. Part 1: Particle size measurement. *Advances in Color. Science and Technology*. **5 (1)**: p. 1-12.

SOWERS, G. B. & SOWERS, G. F. 1972. Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones. Limusa-Wiley: 677 pp. Mexico.

STERN, H. O. 1924. Zur theorie der elektrolytischen doppelschicht. *Zeitschrift für Elektrochemie*. **30**: 508 pp.

UNE 933-1 Tests for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution. Sieving method.

UNE 933-2 Test for geometrical properties of aggregates. Part 2: Determination of particle size distribution- Test sieves, nominal size of apertures.

VILLALOBOS, F. 2015. Mecánica de Suelos. Concepción, Chile. Universidad Católica de La Santísima Concepción: 428 pp., Concepción, Chile.

VERWEY, E. J. W. AND OVERBEEK, J. T. G. 1948. Theory of Stability of Lyophobic Colloids. *Elsevier*: 205 pp., Amsterdam.

WARR, L. N. & FERREIRO-MÄHLMANN, R. 2015. Recommendations for Kübler Index standardization. *Clay Minerals*. **50 (3)**: p. 283-286.

WARR, L. N. & RICE, A. 1994. Interlaboratory standardization and calibration of day mineral crystallinity and crystallite size data. *Journal Metamorphic Geology*. **12**, p. 141-152.

WENTWORTH, K. 1922. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *Journal of Geology*. **30 (5)**, p. 377-392.

ZETA-METER INC. 2003. Zeta Potencial: A complete course in 5 minutes, Stauton, USA.

Páginas Web:

(1) CAMPOS Y ONDAS (s.f.). Recuperado abril, 2018, de <http://fisicavirtual.byethost33.com/Once/Fisica11.htm?i=1#>

(2) MIE THEORY (s.f.). Recuperado abril, 2018, de http://www.particle-size.com/cilas_fraunhofer_mie

(3) ¿QUÉ SON LA EMISIÓN ESPONTANEA, LA EMISIÓN ESTIMULADA Y LA INVERSIÓN DE POBLACIÓN? (s.f.). Recuperado junio, 2018, de <https://www.clpu.es/es/divulgacion/bits/que-son-la-emision-espontanea-la-emision-estimulada-y-la-inversion-de-poblacion>

(4) LA TEORÍA DE FRAUNHOFER (s.f.). Recuperado junio, 2018, de <https://www.fritsch.es/medicion-de-particulas/conocimientos-de-fritsch/teoria-di-fraunhofer>

(5) LA TEORIA DE MIE (s.f.). Recuperado junio, 2018, de <https://www.fritsch.es/medicion-de-particulas/conocimientos-de-fritsch/la-teoria-de-mie/>

(6) ¿TAMICES CON NORMA ISO O ASTM? (s.f.). Recuperado abril, 2018, de <http://www.tamices.es/tamices-con-norma-iso-o-astm/>

ANEXOS

7.1.- Resultados Difracción Láser Filosilicatos

7.1.1.- Caolín de Alta Cristalinidad

7.1.1.1.- Agua Potable

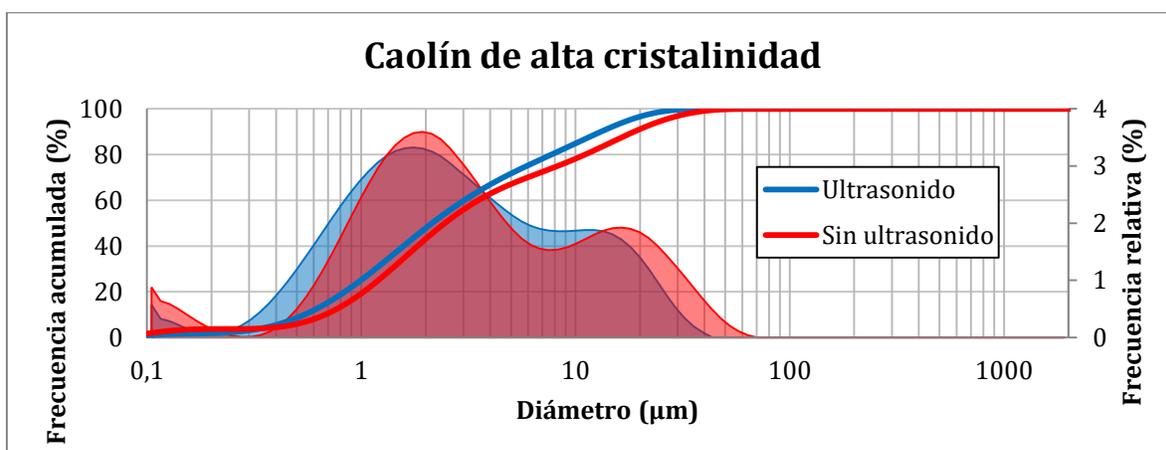


Gráfico 7.1 Caolín de alta cristalinidad en agua potable. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

7.1.1.2.- Agua Destilada

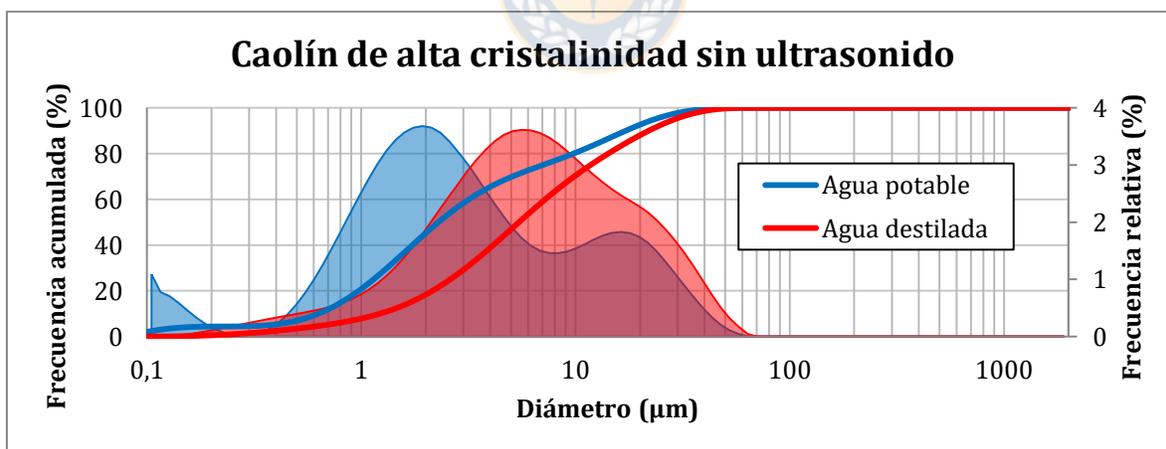


Gráfico 7.2 Caolín de alta cristalinidad Mediciones directas (T1) sin ultrasonido, en agua destilada y agua potable.

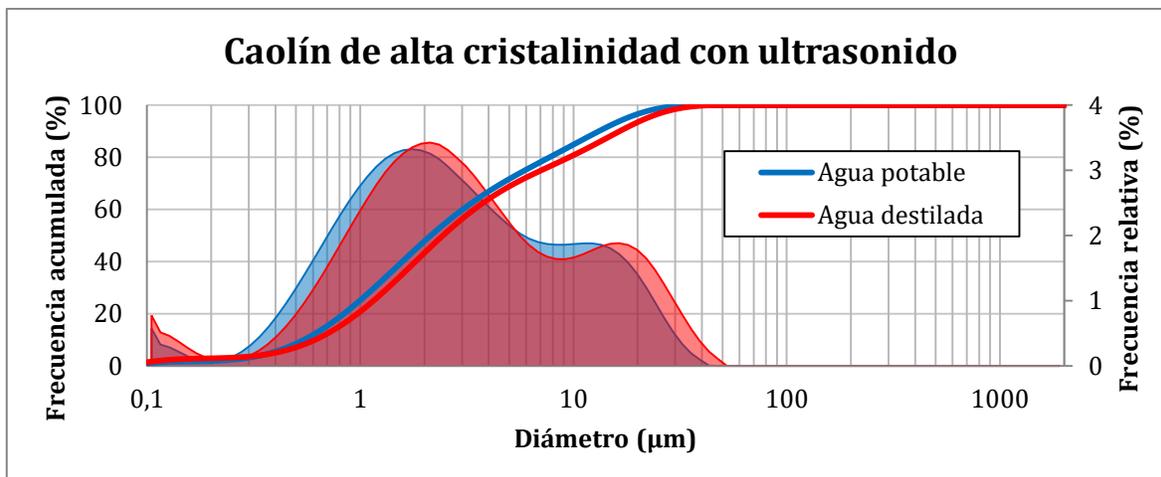


Gráfico 7.3 Caolín de alta cristalinidad. Mediciones directas (T1) con ultrasonido, en agua destilada y agua potable.

Tabla 7.1 Tabla con parámetros estadísticos para Caolín de alta cristalinidad en agua potable y agua destilada. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Caolín de alta cristalinidad-Agua potable				Caolín de alta cristalinidad-Agua destilada			
	T1		T2 [24 h]		T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,11	0,09	0,09	0,11	0,09	0,26	0,09	0,27
P5 (µm)	0,39	0,44	0,37	0,40	0,42	0,67	0,37	0,67
P10 (µm)	0,55	0,68	0,63	0,57	0,61	1,20	0,59	1,17
P20 (µm)	0,85	1,03	0,97	0,88	0,96	2,08	0,93	1,97
P30 (µm)	1,18	1,39	1,32	1,24	1,35	2,96	1,29	2,74
P40 (µm)	1,60	1,83	1,73	1,71	1,87	3,99	1,74	3,61
P50 (µm)	2,18	2,46	2,29	2,39	2,62	5,32	2,35	4,70
P60 (µm)	3,11	3,52	3,18	3,49	3,85	7,21	3,32	6,24
P70 (µm)	4,85	5,99	5,08	5,60	6,03	10,18	5,23	8,74
P80 (µm)	8,56	11,08	9,77	9,45	9,69	15,08	9,60	13,28
P90 (µm)	14,88	18,77	17,14	15,49	15,26	23,66	16,89	21,27
P95 (µm)	20,07	25,62	23,38	20,57	19,96	31,60	22,89	28,25
P99 (µm)	29,71	39,42	35,79	30,26	29,03	46,76	34,21	41,22
%< 147(µm)	100	100	100	100	100	100	100	100
%<2 µm	47,23	43,07	44,79	45,19	42,04	19,04	44,74	20,42

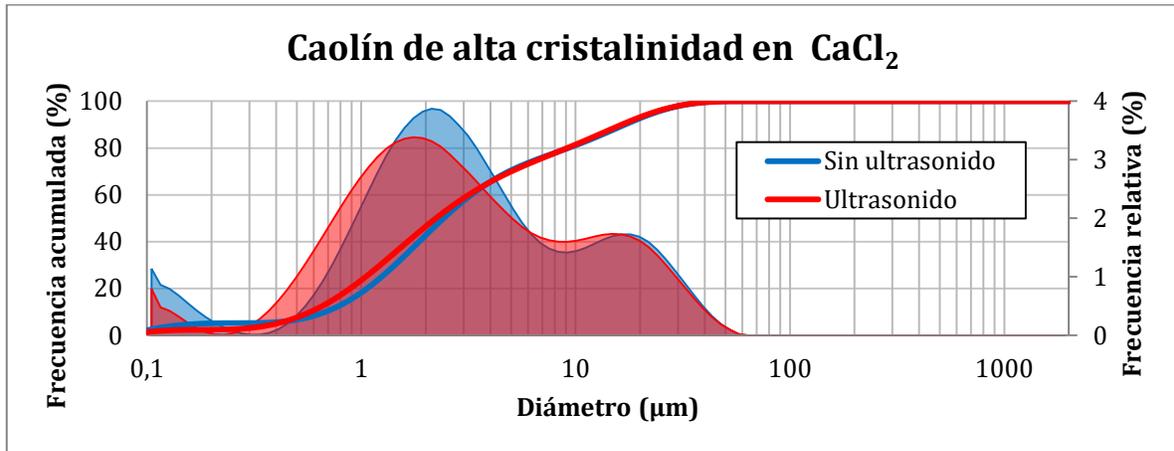
7.1.1.3.- Solución CaCl_2 

Gráfico 7.4 Caolín de alta cristalinidad en solución de CaCl_2 . Mediciones directas (T1), con y sin ultrasonido.

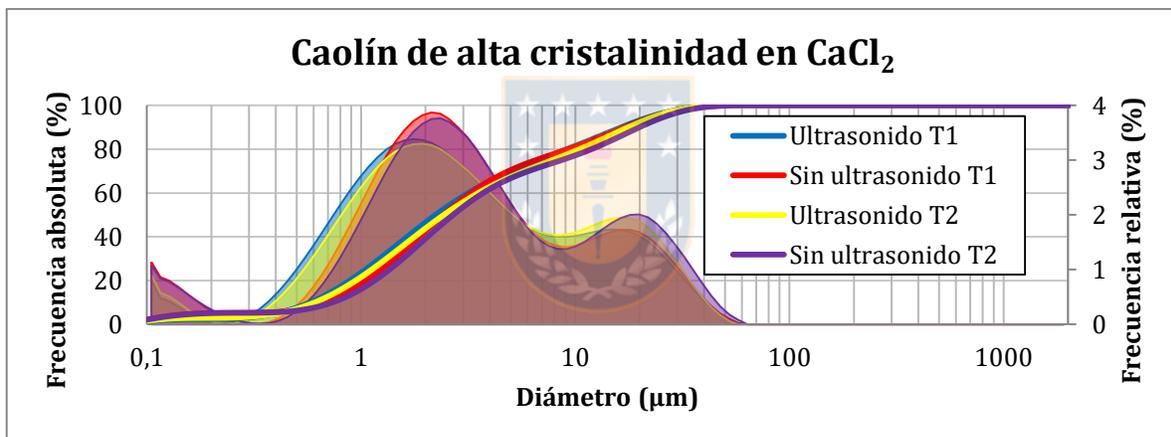


Gráfico 7.5 Caolín de alta cristalinidad en solución CaCl_2 . Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

Tabla 7.2 Tabla con parámetros estadísticos para Caolín de alta cristalinidad en solución de CaCl_2 . Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Caolín de alta cristalinidad-Solución CaCl_2			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,09	0,09	0,09	0,09
P5 (μm)	0,40	0,18	0,40	0,19
P10 (μm)	0,58	0,68	0,61	0,73
P20 (μm)	0,89	1,06	0,94	1,16
P30 (μm)	1,22	1,43	1,31	1,56
P40 (μm)	1,65	1,86	1,78	2,05
P50 (μm)	2,23	2,42	2,44	2,69
P60 (μm)	3,17	3,26	3,52	3,72
P70 (μm)	5,02	4,88	5,77	6,07
P80 (μm)	9,13	9,24	10,46	11,89
P90 (μm)	16,40	16,99	17,65	19,93
P95 (μm)	22,68	23,29	23,58	26,49
P99 (μm)	35,05	35,39	34,67	38,76
%< 147(μm)	100	100	100	100
%<2 μm	46,52	42,76	43,84	39,13

7.1.1.7.- Solución NaCl

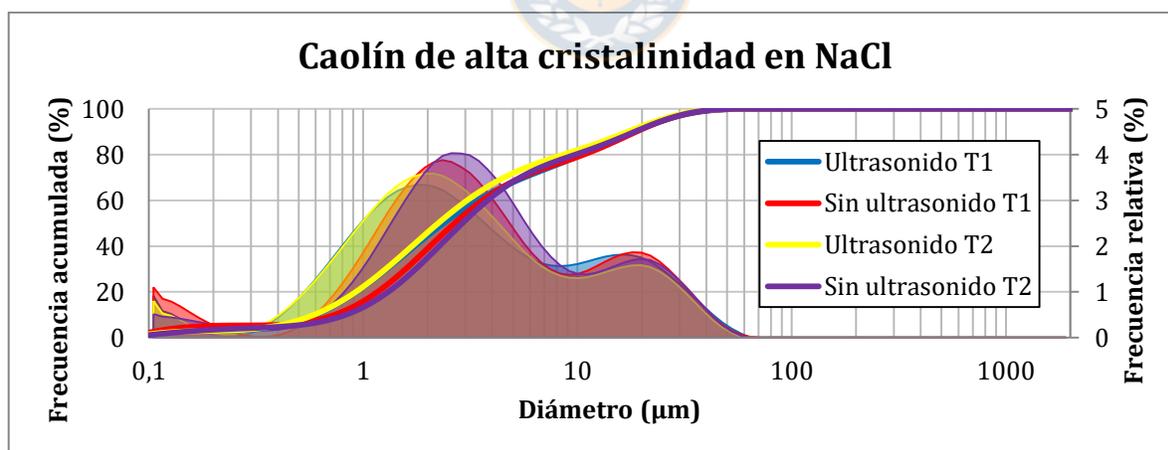


Gráfico 7.6: Caolín de alta cristalinidad con y sin ultrasonido en solución NaCl. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Tabla 7.3 Tabla con parámetros estadísticos para Caolín de alta cristalinidad en solución de NaCl. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Caolín de alta cristalinidad-Solución NaCl			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,09	0,09	0,09	0,10
P5 (µm)	0,40	0,18	0,39	0,45
P10 (µm)	0,60	0,74	0,60	0,83
P20 (µm)	0,93	1,17	0,95	1,31
P30 (µm)	1,29	1,58	1,31	1,76
P40 (µm)	1,74	2,05	1,74	2,27
P50 (µm)	2,37	2,67	2,31	2,90
P60 (µm)	3,43	3,60	3,19	3,81
P70 (µm)	5,65	5,48	4,87	5,42
P80 (µm)	10,49	10,68	9,49	9,76
P90 (µm)	18,35	18,78	18,37	18,47
P95 (µm)	25,26	25,33	25,38	25,17
P99 (µm)	38,76	37,84	38,17	37,35
%< 147(µm)	100	100	100	100
%<2 µm	44,57	38,96	44,93	34,95

7.1.1.5.- Agua de Mar

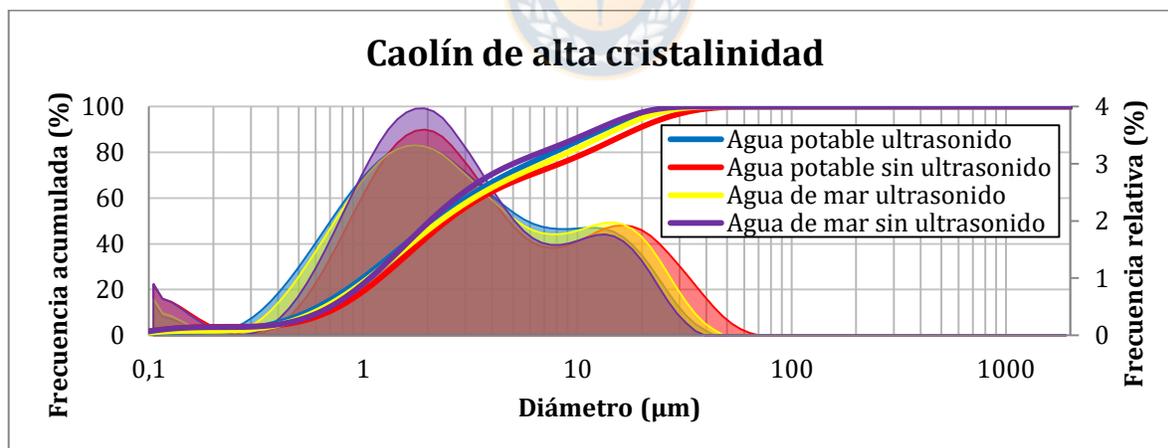


Gráfico 7.7 Caolín de alta cristalinidad en agua de mar y agua potable. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

Tabla 7.4 Tabla con parámetros estadísticos para Caolín de alta cristalinidad en agua de mar. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Caolín de alta cristalinidad- Agua de mar			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,09	0,09	0,09	0,09
P5 (µm)	0,40	0,44	0,41	0,44
P10 (µm)	0,58	0,64	0,58	0,66
P20 (µm)	0,89	0,95	0,90	0,98
P30 (µm)	1,22	1,27	1,24	1,32
P40 (µm)	1,62	1,64	1,68	1,72
P50 (µm)	2,18	2,13	2,29	2,27
P60 (µm)	3,07	2,88	3,30	3,13
P70 (µm)	4,90	4,27	5,40	4,96
P80 (µm)	9,64	7,83	10,01	9,73
P90 (µm)	17,01	14,04	16,83	16,72
P95 (µm)	22,65	18,64	22,24	22,14
P99 (µm)	32,99	26,78	32,33	32,11
%< 147(µm)	100	100	100	100
%<2 µm	47,17	47,56	45,80	45,56

7.1.1.6.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)

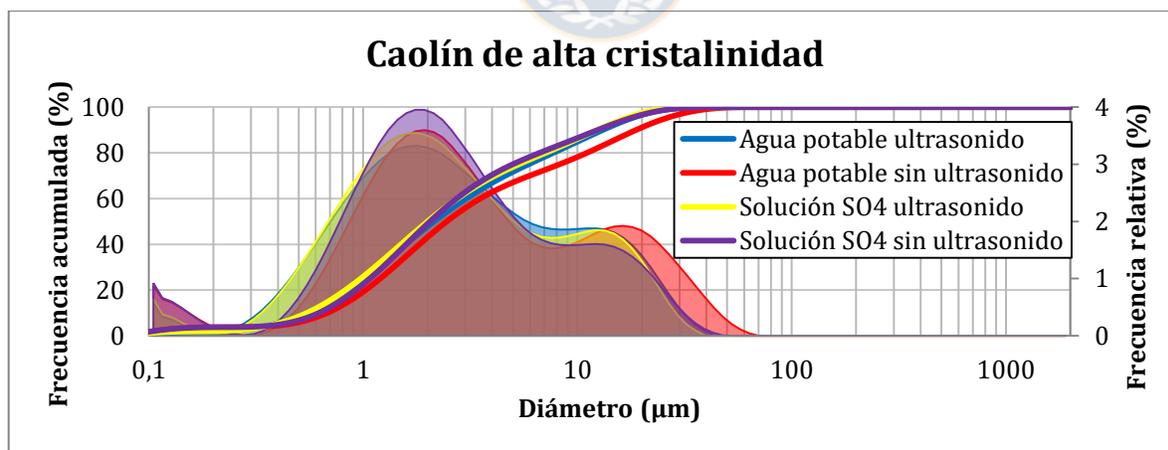


Gráfico 7.8 Caolín de alta cristalinidad en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y agua potable. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

Tabla 7.5 Tabla con parámetros estadísticos para Caolín de alta cristalinidad en solución SO_4^{2-} -(Ca, Na). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Caolín de alta cristalinidad- Solución SO_4^{2-}			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,10	0,09	0,09	0,09
P5 (μm)	0,38	0,41	0,40	0,24
P10 (μm)	0,55	0,62	0,59	0,65
P20 (μm)	0,83	0,93	0,91	1,03
P30 (μm)	1,13	1,23	1,25	1,39
P40 (μm)	1,51	1,59	1,69	1,81
P50 (μm)	2,00	2,05	2,29	2,35
P60 (μm)	2,76	2,74	3,29	3,16
P70 (μm)	4,13	3,94	5,44	4,70
P80 (μm)	7,10	6,67	10,28	8,80
P90 (μm)	12,37	12,43	17,21	16,15
P95 (μm)	16,57	17,40	22,67	22,01
P99 (μm)	24,10	26,83	32,87	33,18
%< 147(μm)	100	100	100	100
%<2 μm	49,95	48,98	45,62	43,84

7.1.1.7.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)+ HCl; pH= 2,26

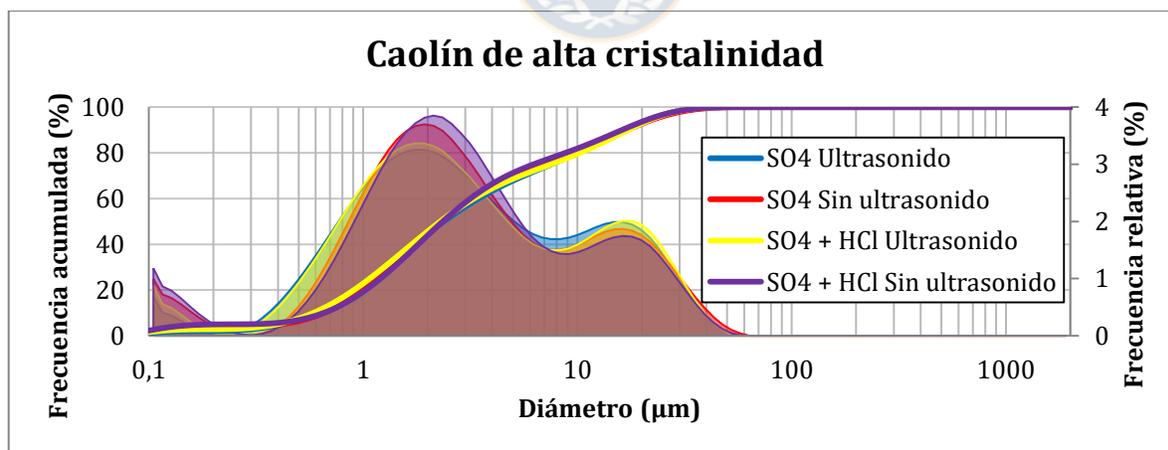


Gráfico 7.9 Caolín de alta cristalinidad en solución SO_4^{2-} -(Ca, Na) y SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

Tabla 7.6 Tabla con parámetros estadísticos para Caolín de alta cristalinidad en agua potable y en solución SO_4^{2-} -(Ca, Na) y SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Parámetro	Caolín de alta cristalinidad					
	T2 Agua Potable		T2 Solución SO_4^{2-}		T2 SO_4^{2-} +HCl	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,11	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09
P5 (μm)	0,40	0,37	0,40	0,24	0,41	0,40
P10 (μm)	0,57	0,63	0,59	0,65	0,59	0,66
P20 (μm)	0,88	0,97	0,91	1,03	0,91	1,00
P30 (μm)	1,24	1,32	1,25	1,39	1,27	1,35
P40 (μm)	1,71	1,73	1,69	1,81	1,73	1,77
P50 (μm)	2,39	2,29	2,29	2,35	2,38	2,34
P60 (μm)	3,49	3,18	3,29	3,16	3,46	3,26
P70 (μm)	5,60	5,08	5,44	4,70	5,64	5,21
P80 (μm)	9,45	9,77	10,28	8,80	10,03	9,87
P90 (μm)	15,49	17,14	17,21	16,15	16,70	17,07
P95 (μm)	20,57	23,38	22,67	22,01	22,23	23,17
P99 (μm)	30,26	35,79	32,87	33,18	32,77	35,46
%< 147(μm)	100	100	100	100	100	100
%<2 μm	44,79	45,19	45,62	43,84	44,62	44,46

7.1.2.- Caolín de Baja Cristalinidad

7.1.2.1.- Agua Potable

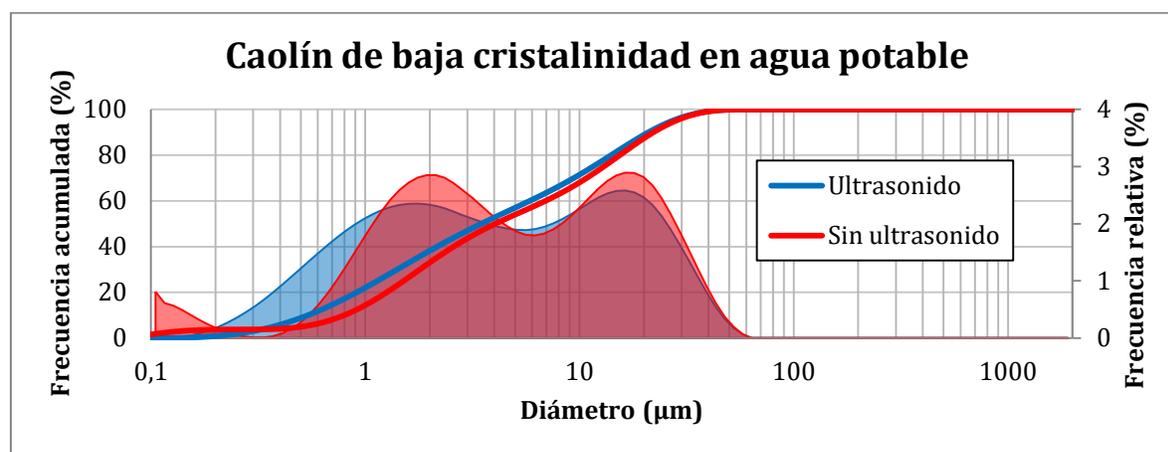


Gráfico 7.10 Caolín de cristalinidad en agua potable. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

7.1.2.2.- Agua Destilada

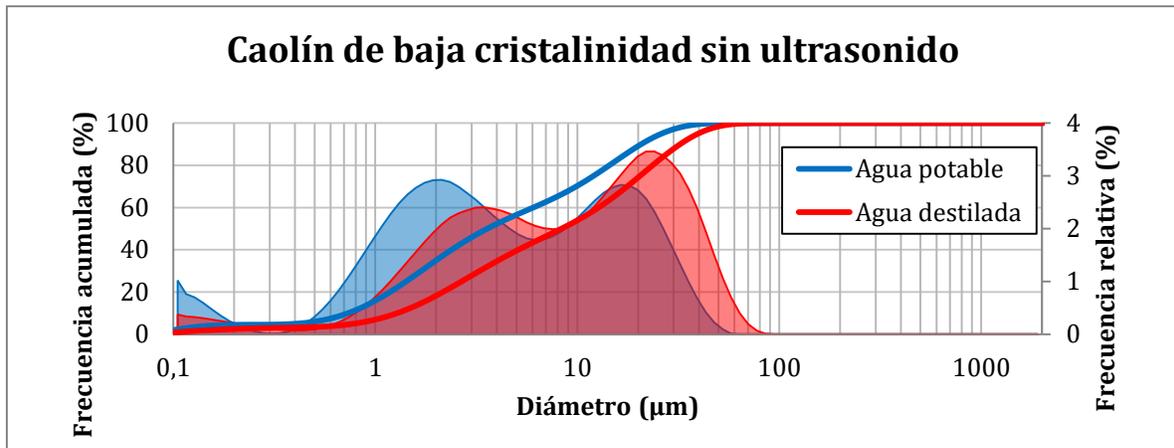


Gráfico 7.11 Caolín de baja cristalinidad. Mediciones directas (T1) sin ultrasonido, en agua destilada y agua potable.

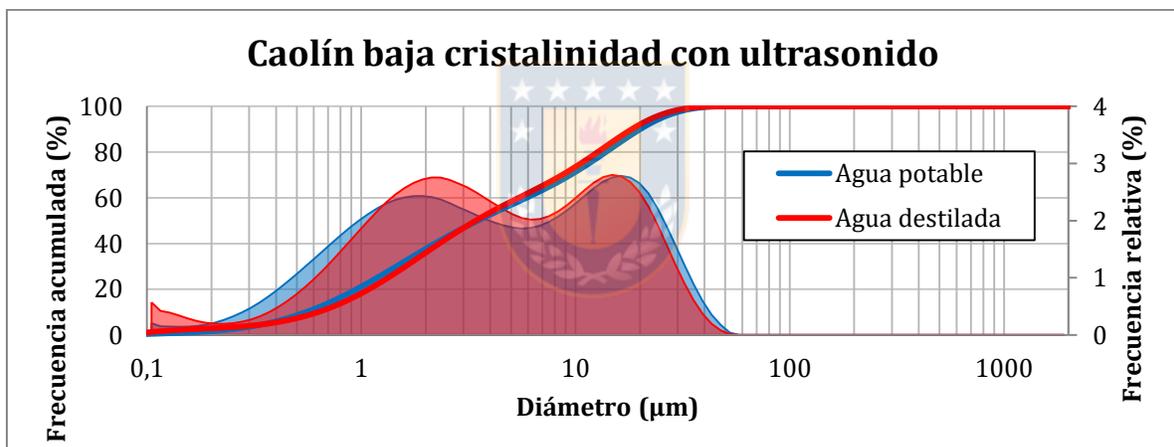


Gráfico 7.12 Caolín de baja cristalinidad. Mediciones directas (T1) con ultrasonido, en agua destilada y agua potable.

Tabla 7.7 Tabla con parámetros estadísticos para Caolín de baja cristalinidad en agua potable y agua destilada. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Caolín de baja cristalinidad- Agua potable				Caolín de baja cristalinidad- Agua destilada			
	T1		T2 [24 h]		T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,21	0,09	0,15	0,09	0,10	0,11	0,09	0,14
P5 (µm)	0,37	0,51	0,36	0,40	0,37	0,78	0,36	0,91
P10 (µm)	0,54	0,80	0,55	0,73	0,63	1,28	0,68	1,40
P20 (µm)	0,91	1,26	0,95	1,18	1,09	2,16	1,15	2,25
P30 (µm)	1,41	1,80	1,46	1,69	1,61	3,29	1,66	3,31
P40 (µm)	2,17	2,59	2,21	2,39	2,31	5,10	2,30	4,98
P50 (µm)	3,48	4,05	3,50	3,59	3,42	8,34	3,26	8,21
P60 (µm)	5,86	6,93	5,91	6,05	5,43	12,74	5,00	13,00
P70 (µm)	9,40	10,80	9,48	9,88	8,65	17,67	8,49	18,34
P80 (µm)	14,04	15,42	13,87	14,41	12,67	23,60	13,42	24,85
P90 (µm)	20,96	22,17	20,08	20,70	18,32	32,34	20,17	34,55
P95 (µm)	27,14	28,06	25,29	26,16	23,05	39,77	25,84	42,97
P99 (µm)	38,85	39,55	35,35	36,62	32,54	54,01	36,69	59,00
%< 147(µm)	100	100	100	100	100	100	100	100
%<2 µm	38,18	32,99	37,66	34,98	35,98	18,26	35,75	17,11

7.1.2.3.- Solución CaCl₂

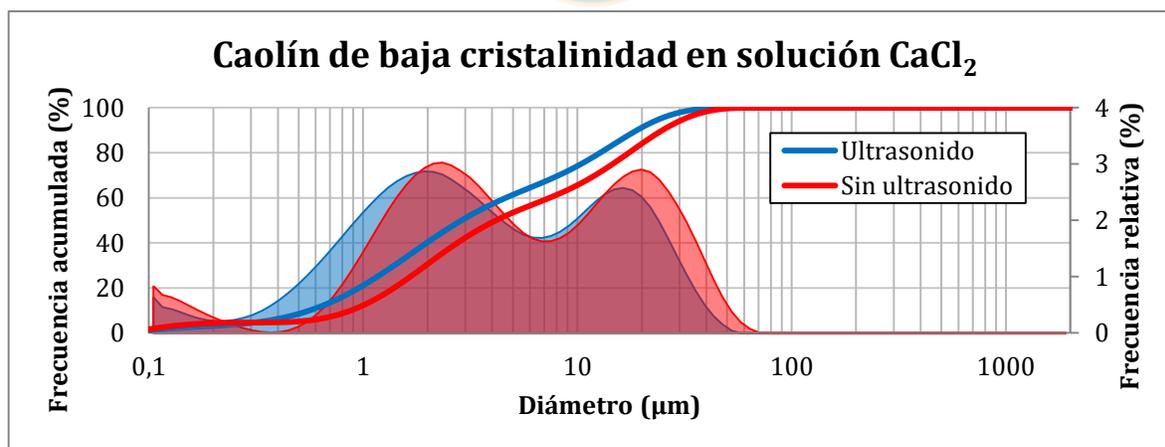


Gráfico 7.13 Caolín de baja cristalinidad en solución CaCl₂. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

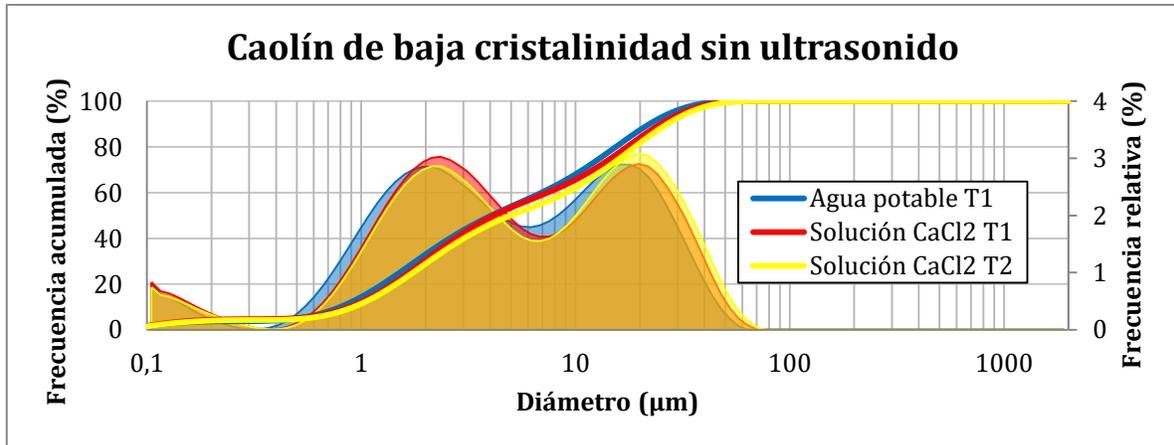


Gráfico 7.14 Caolín de baja cristalinidad. Mediciones con ultrasonido en agua potable y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

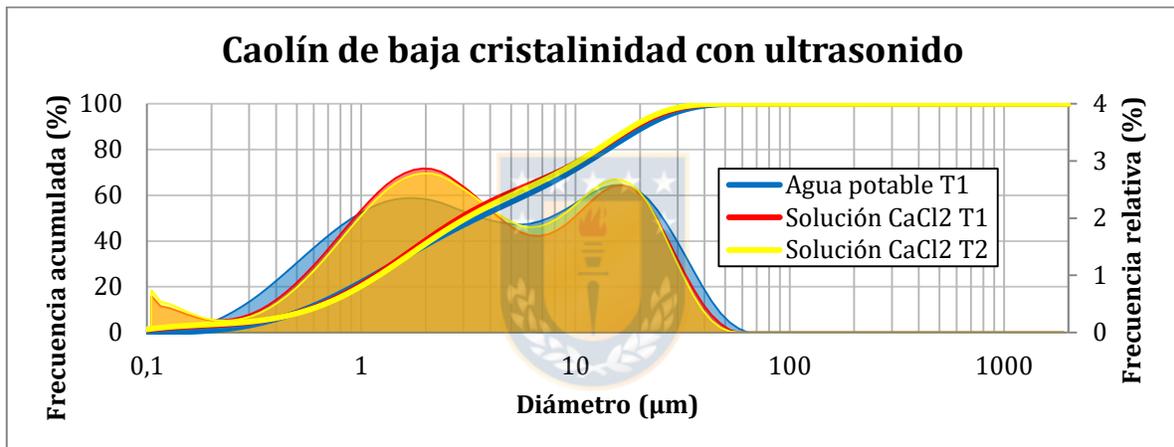


Gráfico 7.15 Caolín de baja cristalinidad. Mediciones sin ultrasonido en agua potable y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.8 Tabla con parámetros estadísticos para Caolín de baja cristalinidad en solución CaCl_2 . Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Caolín de baja cristalinidad- Solución CaCl_2			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,10	0,09	0,09	0,09
P5 (μm)	0,33	0,47	0,32	0,55
P10 (μm)	0,56	0,88	0,57	0,92
P20 (μm)	0,95	1,39	0,99	1,46
P30 (μm)	1,40	1,96	1,46	2,08
P40 (μm)	1,98	2,76	2,09	3,02
P50 (μm)	2,88	4,18	3,09	5,00
P60 (μm)	4,64	7,42	5,01	9,04
P70 (μm)	8,19	12,09	8,38	13,60
P80 (μm)	12,78	17,40	12,63	18,91
P90 (μm)	18,95	24,96	18,49	26,89
P95 (μm)	24,27	31,49	23,38	33,84
P99 (μm)	34,35	43,95	32,94	47,03
%< 147(μm)	100	100	100	100
%<2 μm	40,27	30,55	38,83	28,90

7.1.2.7.- Solución NaCl

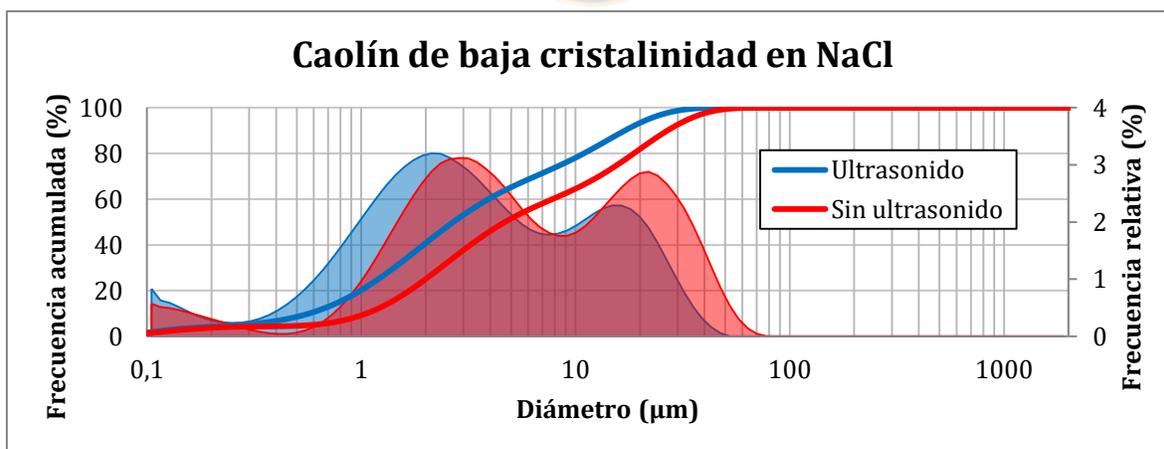


Gráfico 7.16 Caolín de baja cristalinidad en solución de NaCl. Medición directa (T1), con y sin ultrasonido.

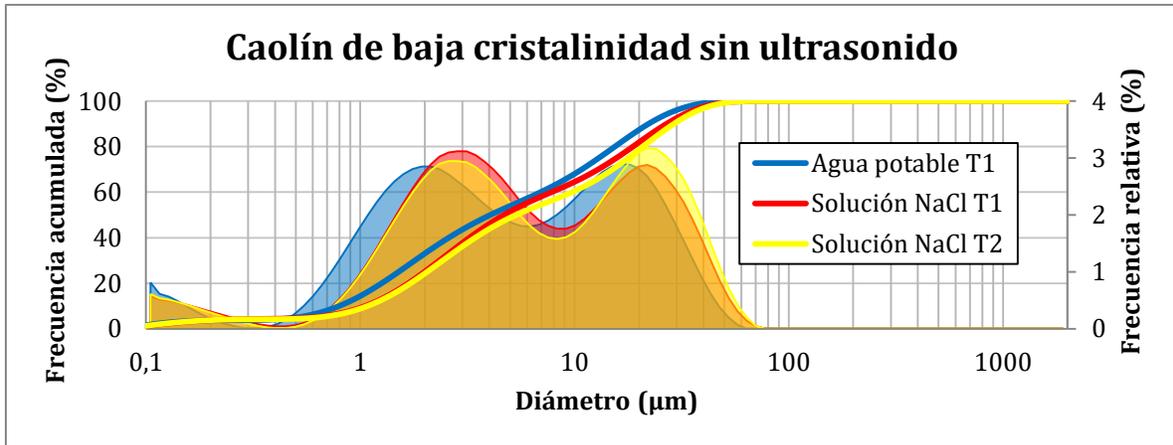


Gráfico 7.17 Caolín de baja cristalinidad. Mediciones sin ultrasonido en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

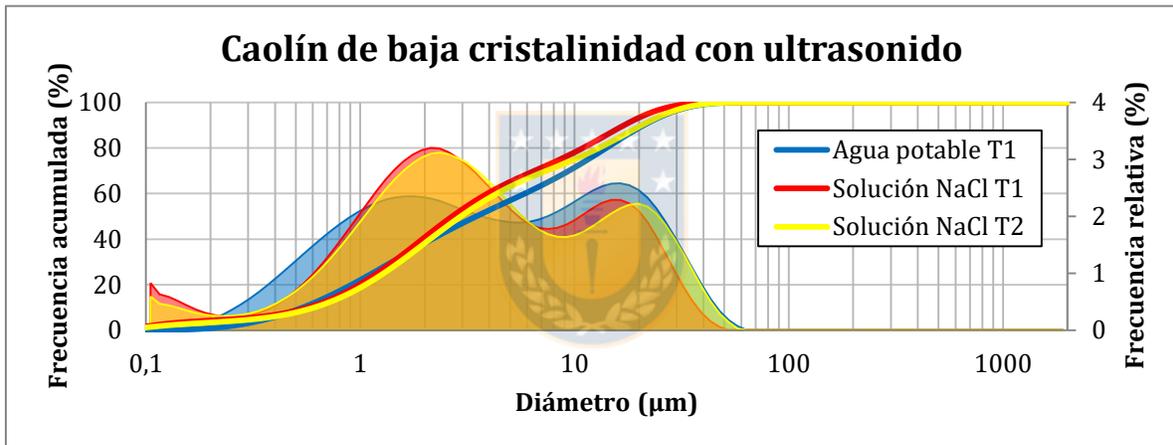


Gráfico 7.18 Caolín de baja cristalinidad. Mediciones con ultrasonido en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.9 Tabla con parámetros estadísticos para Caolín de baja cristalinidad en y solución NaCl. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Caolín de baja cristalinidad- Solución NaCl			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,09	0,10	0,10	0,10
P5 (µm)	0,27	0,59	0,33	0,64
P10 (µm)	0,57	1,06	0,61	1,08
P20 (µm)	0,99	1,68	1,06	1,72
P30 (µm)	1,42	2,34	1,53	2,43
P40 (µm)	1,95	3,24	2,12	3,44
P50 (µm)	2,69	4,69	2,95	5,35
P60 (µm)	3,93	7,80	4,35	9,72
P70 (µm)	6,50	12,88	7,39	15,04
P80 (µm)	10,93	18,72	12,98	20,85
P90 (µm)	16,99	26,90	20,55	29,11
P95 (µm)	21,97	33,82	26,69	36,02
P99 (µm)	31,22	46,86	37,74	48,81
%< 147(µm)	100	100	100	100
%<2 µm	40,76	25,05	38,18	24,23

7.1.2.5.- Agua de Mar

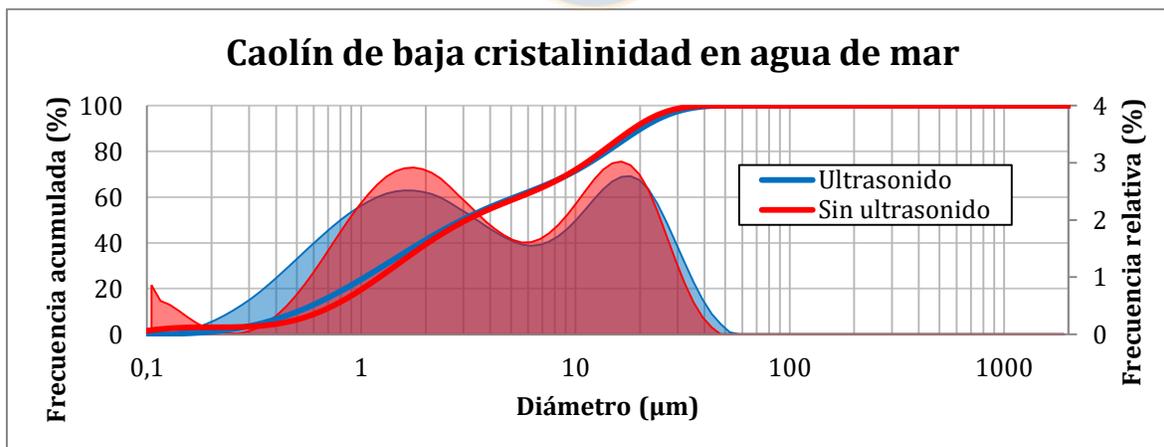


Gráfico 7.19 Caolín de baja cristalinidad en agua de mar. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

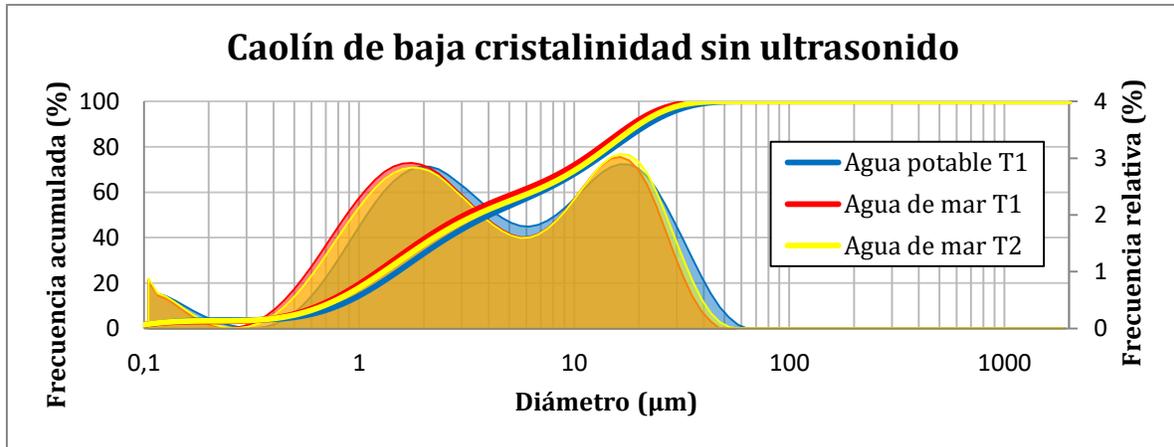


Gráfico 7.20 Caolín de baja cristalinidad sin ultrasonido. Mediciones en agua potable y agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

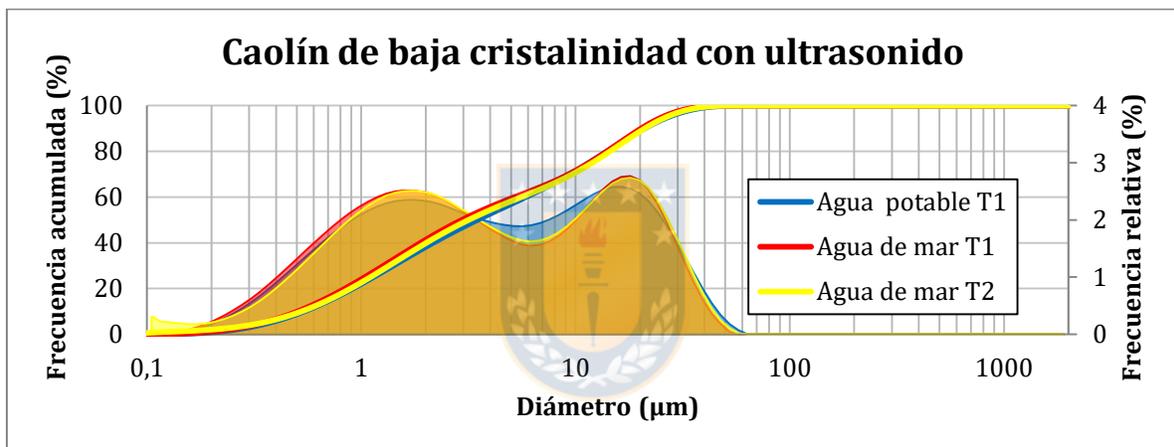


Gráfico 7.21 Caolín de baja cristalinidad con ultrasonido. Mediciones en agua potable y agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.10 Tabla con parámetros estadísticos para Caolín de baja cristalinidad en agua de mar. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Caolín de baja cristalinidad- Agua de mar			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,19	0,09	0,12	0,09
P5 (μm)	0,35	0,43	0,34	0,44
P10 (μm)	0,51	0,65	0,53	0,68
P20 (μm)	0,84	1,02	0,89	1,08
P30 (μm)	1,27	1,45	1,35	1,56
P40 (μm)	1,90	2,05	2,02	2,24
P50 (μm)	2,95	3,11	3,17	3,50
P60 (μm)	5,21	5,46	5,59	6,34
P70 (μm)	9,32	9,22	9,68	10,21
P80 (μm)	14,03	13,31	14,50	14,44
P90 (μm)	20,29	18,65	21,02	20,19
P95 (μm)	25,45	22,98	26,60	25,00
P99 (μm)	35,42	31,02	37,02	34,08
%< 147(μm)	100	100	100	100
%<2 μm	41,28	39,29	39,79	37,03

7.1.2.6.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)

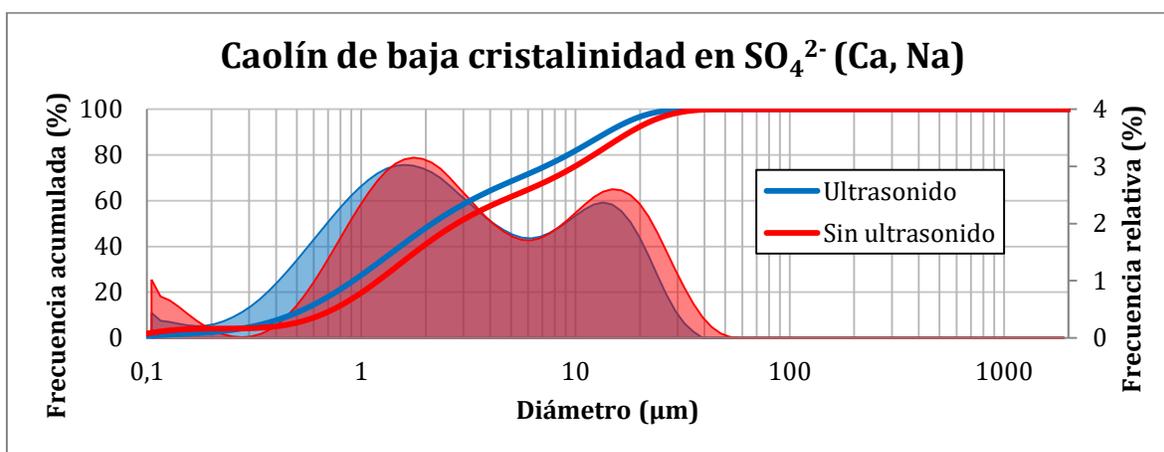


Gráfico 7.22 Caolín de baja cristalinidad en solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Medición directa (T1), con y sin ultrasonido.

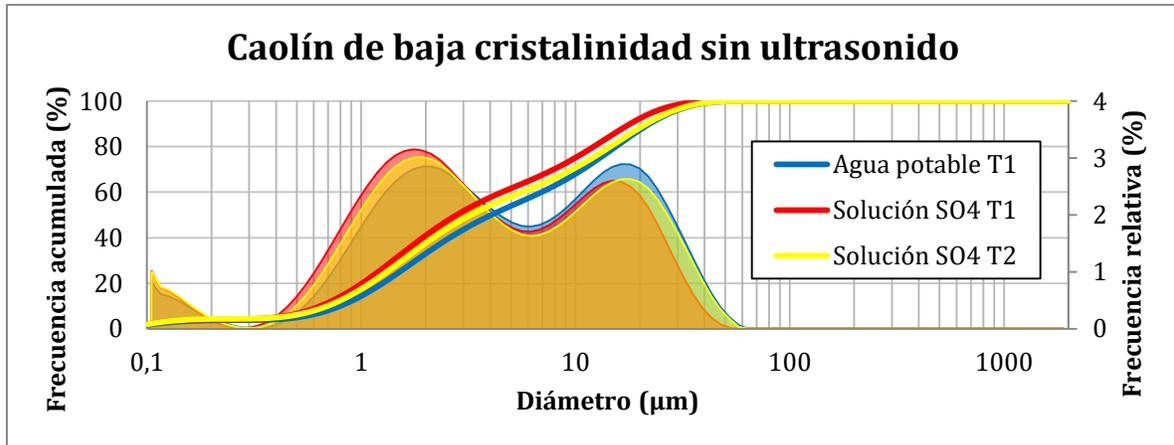


Gráfico 7.23 Caolín de baja cristalinidad sin ultrasonido. Mediciones en agua potable en medición directa (T1) y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

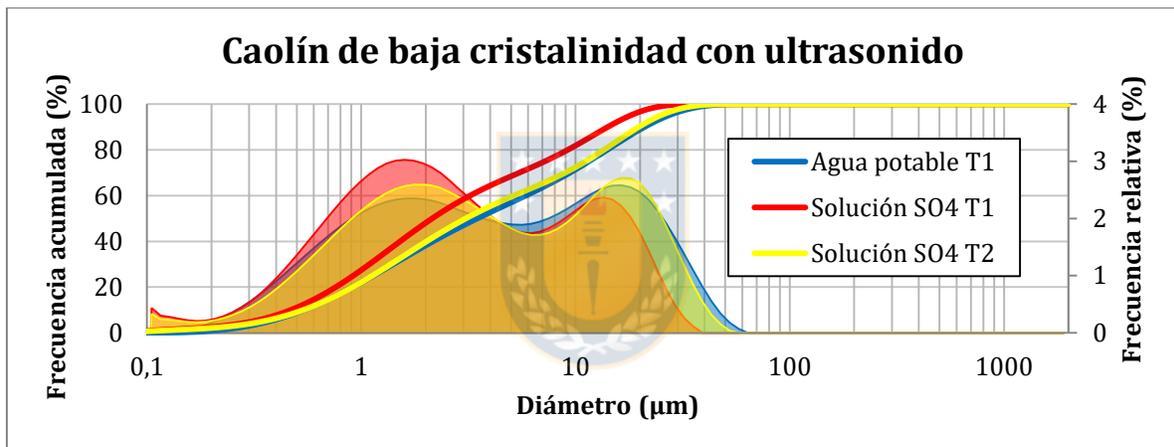


Gráfico 7.24 Caolín de baja cristalinidad con ultrasonido. Mediciones en agua potable en medición directa (T1) y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Tabla 7.11 Tabla con parámetros estadísticos para Caolín de baja cristalinidad en solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Caolín de baja cristalinidad- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,11	0,09	0,12	0,09
P5 (μm)	0,31	0,40	0,35	0,41
P10 (μm)	0,47	0,65	0,54	0,70
P20 (μm)	0,76	1,01	0,91	1,10
P30 (μm)	1,09	1,41	1,38	1,55
P40 (μm)	1,52	1,94	2,02	2,18
P50 (μm)	2,14	2,79	3,08	3,25
P60 (μm)	3,22	4,54	5,16	5,63
P70 (μm)	5,47	7,91	8,94	9,66
P80 (μm)	9,19	12,16	13,56	14,54
P90 (μm)	14,13	17,99	19,74	21,45
P95 (μm)	18,02	22,86	24,88	27,44
P99 (μm)	24,93	32,43	34,56	38,65
%< 147(μm)	100	100	100	100
%<2 μm	48,06	40,91	39,72	37,56

7.1.2.7.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)+ HCl; pH=2,26

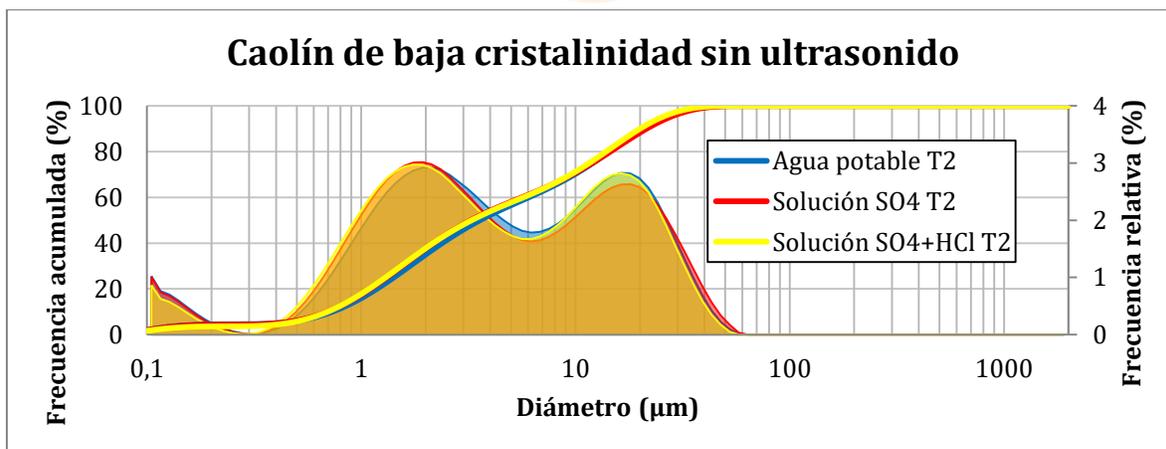


Gráfico 7.25 Caolín de baja cristalinidad sin ultrasonido. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26).

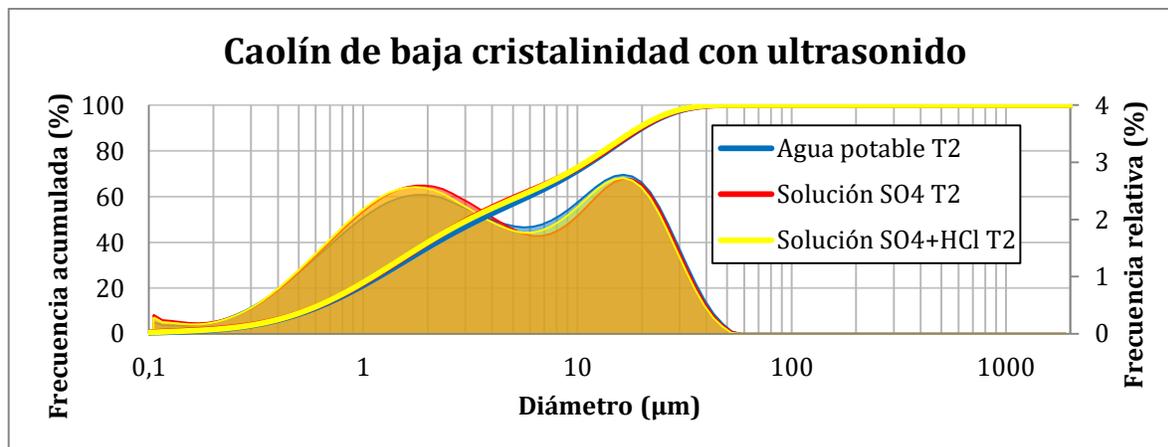


Gráfico 7.26 Caolín de baja cristalinidad con ultrasonido. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26).

Tabla 7.12 Tabla con parámetros estadísticos para Caolín de baja cristalinidad en agua potable y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Parámetro	★ Caolín de baja cristalinidad					
	T2 Agua potable		T2 Solución SO_4^{2-}		T2 SO_4^{2-} +HCl	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,21	0,09	0,12	0,09	0,13	0,09
P5 (µm)	0,37	0,51	0,35	0,41	0,35	0,45
P10 (µm)	0,54	0,80	0,54	0,70	0,54	0,70
P20 (µm)	0,91	1,26	0,91	1,10	0,90	1,09
P30 (µm)	1,41	1,80	1,38	1,55	1,36	1,54
P40 (µm)	2,17	2,59	2,02	2,18	2,01	2,17
P50 (µm)	3,48	4,05	3,08	3,25	3,11	3,28
P60 (µm)	5,86	6,93	5,16	5,63	5,30	5,71
P70 (µm)	9,40	10,80	8,94	9,66	8,87	9,50
P80 (µm)	14,04	15,42	13,56	14,54	13,24	13,88
P90 (µm)	20,96	22,17	19,74	21,45	19,25	20,01
P95 (µm)	27,14	28,06	24,88	27,44	24,35	25,20
P99 (µm)	38,85	39,55	34,56	38,65	33,92	35,26
%< 147(µm)	100	100	100	100	100	100
%<2 µm	38,18	32,99	39,72	37,56	39,90	37,74

7.1.3.- Montmorillonita cálcica

7.1.3.1.- Agua Potable

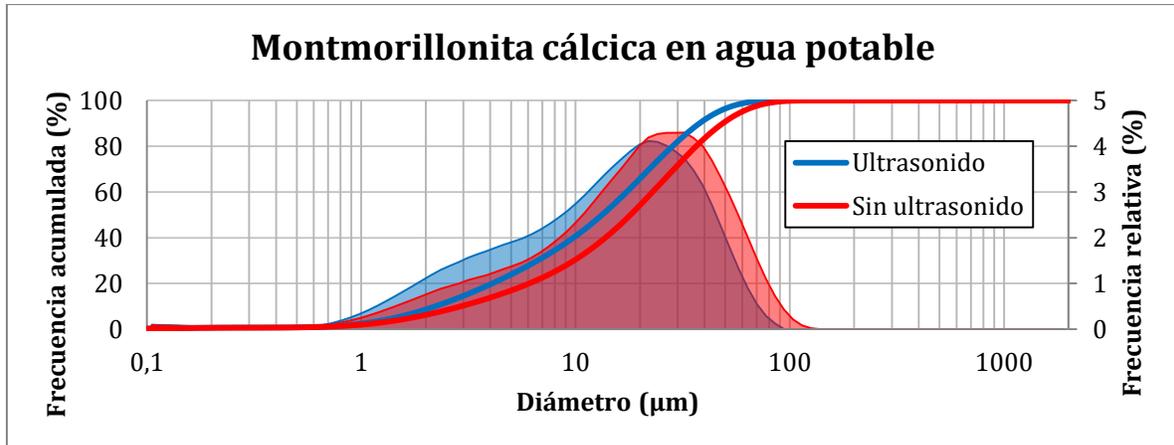


Gráfico 7.27 Montmorillonita cálcica en agua potable. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

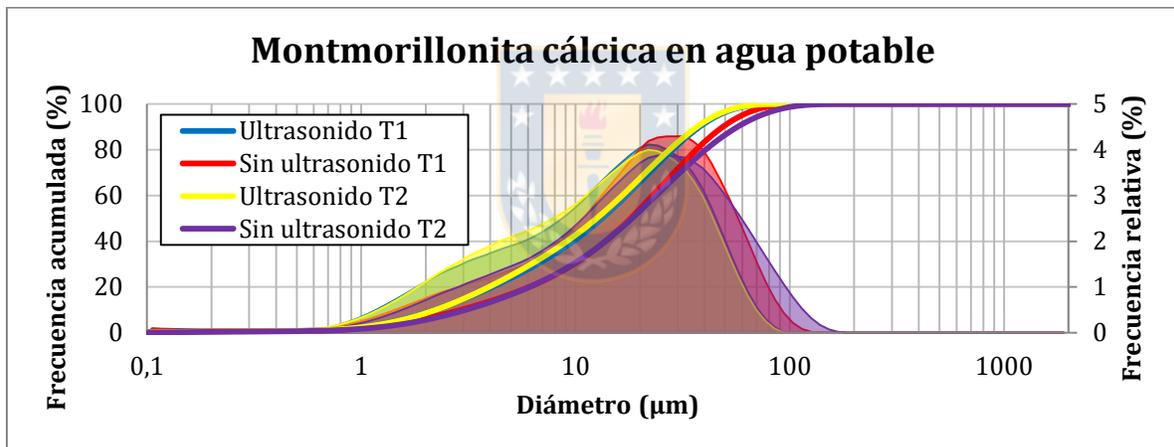


Gráfico 7.28 Montmorillonita cálcica en agua potable. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1) con y sin ultrasonido.

7.1.3.2.- Agua Destilada

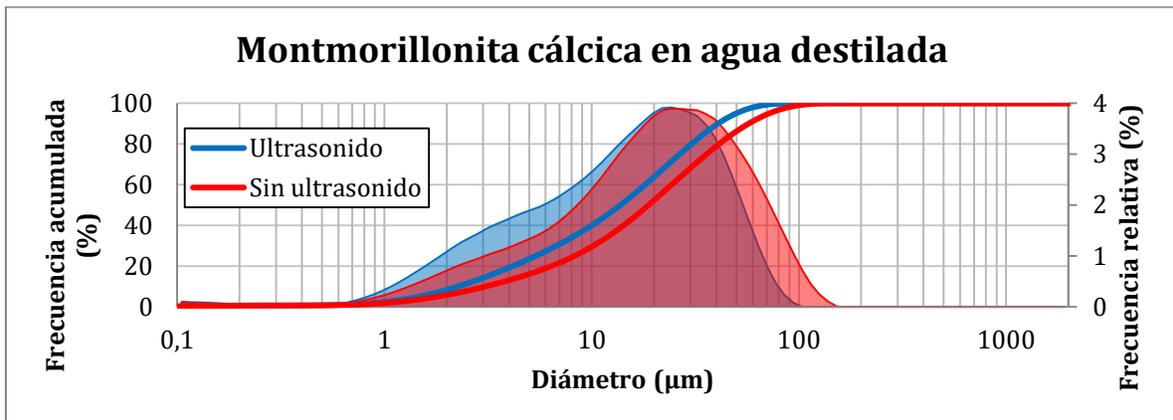


Gráfico 7.29 Montmorillonita cálcica en agua destilad. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

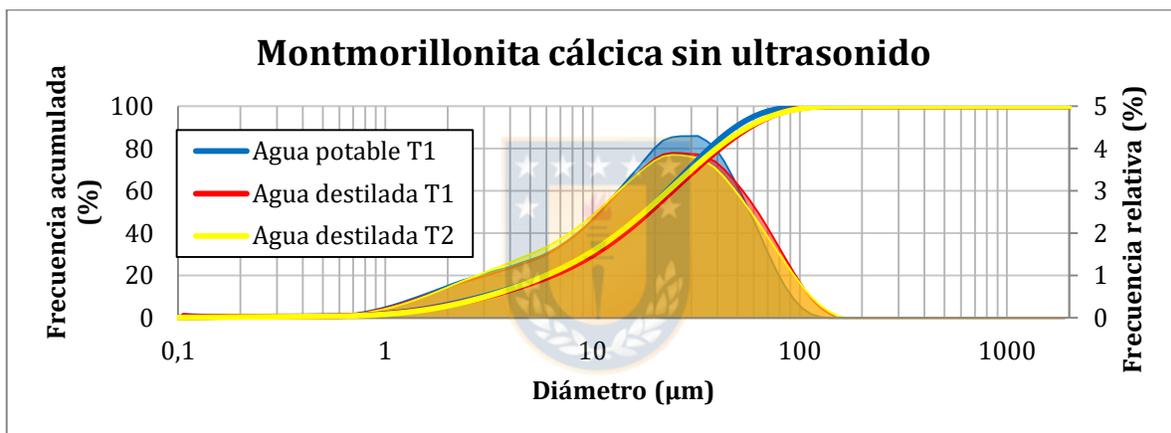


Gráfico 7.30 Montmorillonita cálcica sin ultrasonido. En agua potable en medición directa (T1) y agua destilada con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

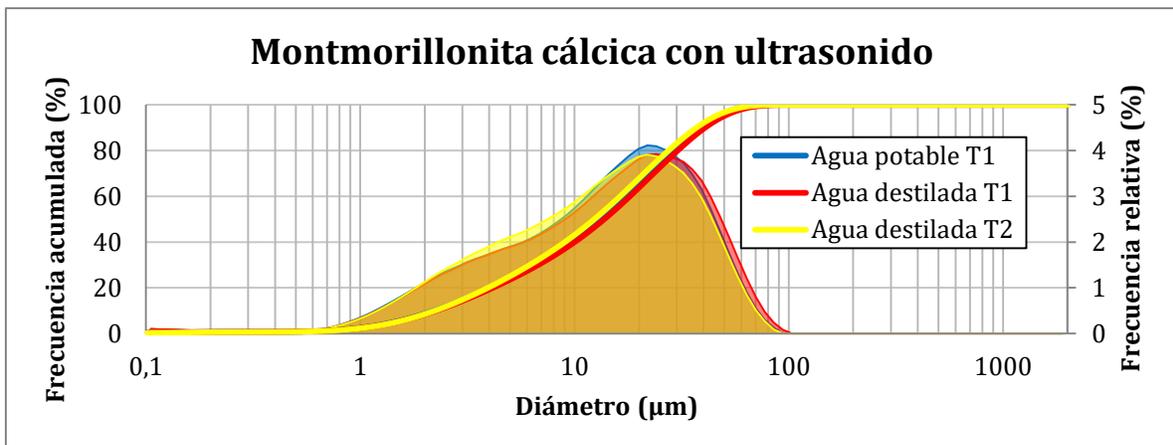


Gráfico 7.31 Montmorillonita cálcica con ultrasonido. En agua potable con medición directa (T1) y agua destilada con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.13 Tabla con parámetros estadísticos para Montmorillonita cálcica en agua potable y agua destilada. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Mont. cálcica- Agua potable				Mont. cálcica- Agua destilada			
	T1		T2 [24 h]		T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,63	0,66	0,62	0,72	0,63	0,68	0,65	0,73
P5 (µm)	1,44	1,73	1,46	1,85	1,47	1,80	1,47	1,85
P10 (µm)	2,22	2,92	2,23	3,08	2,26	3,09	2,23	3,06
P20 (µm)	4,09	6,09	3,95	6,10	4,17	6,40	3,95	5,96
P30 (µm)	6,65	9,83	6,22	9,76	6,78	10,21	6,20	9,47
P40 (µm)	9,78	13,78	9,12	13,79	10,02	14,27	9,02	13,39
P50 (µm)	13,31	18,06	12,55	18,35	13,78	18,83	12,38	17,85
P60 (µm)	17,33	22,89	16,52	23,77	18,15	24,35	16,35	23,16
P70 (µm)	22,12	28,86	21,25	30,75	23,41	31,46	21,13	30,07
P80 (µm)	28,39	36,63	27,47	40,52	30,36	41,25	27,49	39,69
P90 (µm)	37,87	48,79	36,91	57,02	40,75	57,27	37,13	55,90
P95 (µm)	46,19	59,77	45,17	73,06	49,84	71,99	45,51	71,60
P99 (µm)	62,15	81,26	61,00	104,96	67,09	99,86	61,40	102,22
%< 147(µm)	100	100	100	99,94	100	100	100	99,98
%<2 µm	8,61	6,22	8,52	5,62	8,37	5,82	8,46	5,63

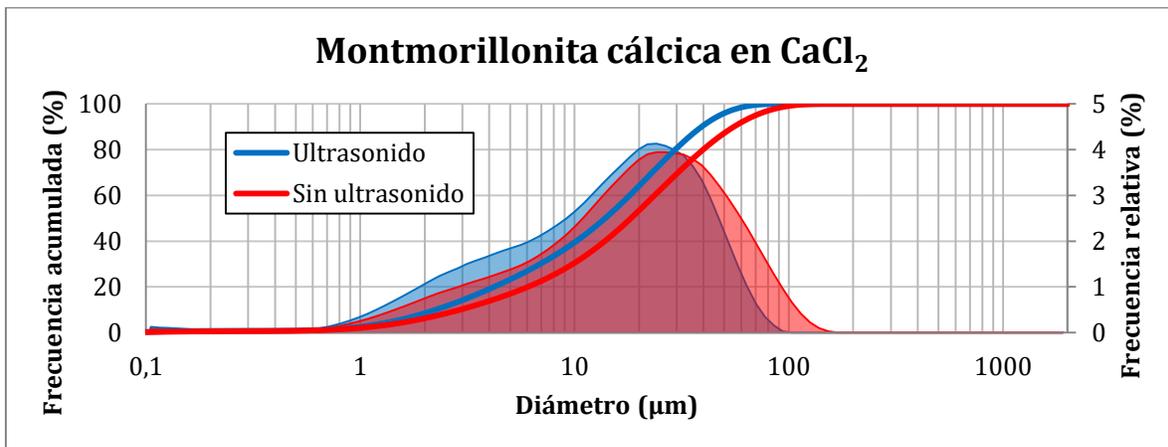
7.1.3.3.- Solución CaCl_2 

Gráfico 7.32 Montmorillonita cálcica en solución de CaCl_2 . Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

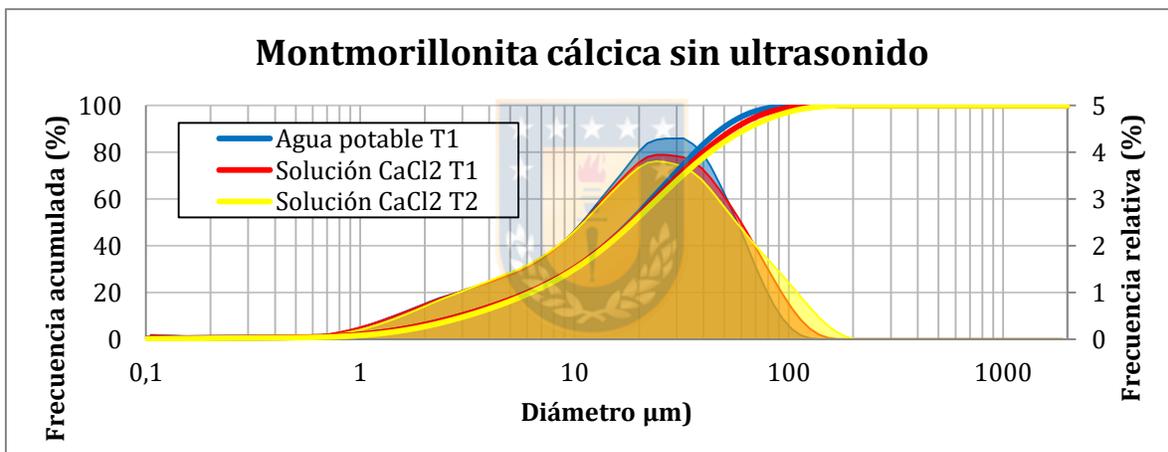


Gráfico 7.33 Montmorillonita cálcica sin ultrasonido. En agua potable con medición directa (T1) y en solución CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

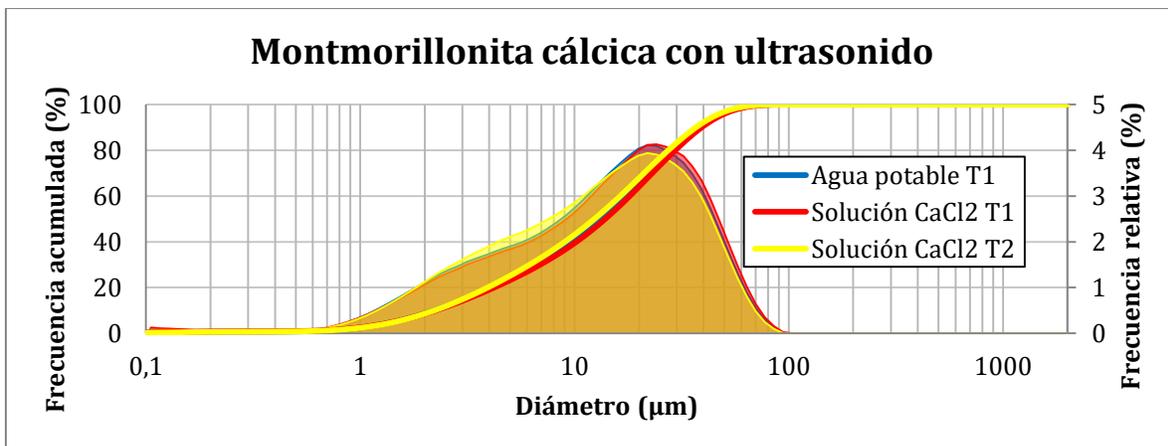


Gráfico 7.34 Montmorillonita cálcica con ultrasonido. En agua potable con medición directa (T1) y en solución CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.14 Tabla con parámetros estadísticos para Montmorillonita cálcica en solución con CaCl₂. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Montmorillonita cálcica- Solución CaCl ₂			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,58	0,636	0,63	0,75
P5 (µm)	1,44	1,718	1,46	1,89
P10 (µm)	2,25	2,926	2,22	3,15
P20 (µm)	4,22	6,069	3,94	6,27
P30 (µm)	6,92	9,823	6,18	10,02
P40 (µm)	10,21	13,852	9,02	14,13
P50 (µm)	13,90	18,340	12,39	18,77
P60 (µm)	18,10	23,649	16,36	24,43
P70 (µm)	23,04	30,468	21,11	31,90
P80 (µm)	29,55	39,895	27,39	42,93
P90 (µm)	39,26	55,485	36,89	63,47
P95 (µm)	47,77	70,060	45,16	84,05
P99 (µm)	64,02	99,021	61,03	124,07
%< 147(µm)	100	99,98	100	99,69
%<2 µm	8,47	6,23	8,54	5,44

7.1.3.7.- Solución NaCl

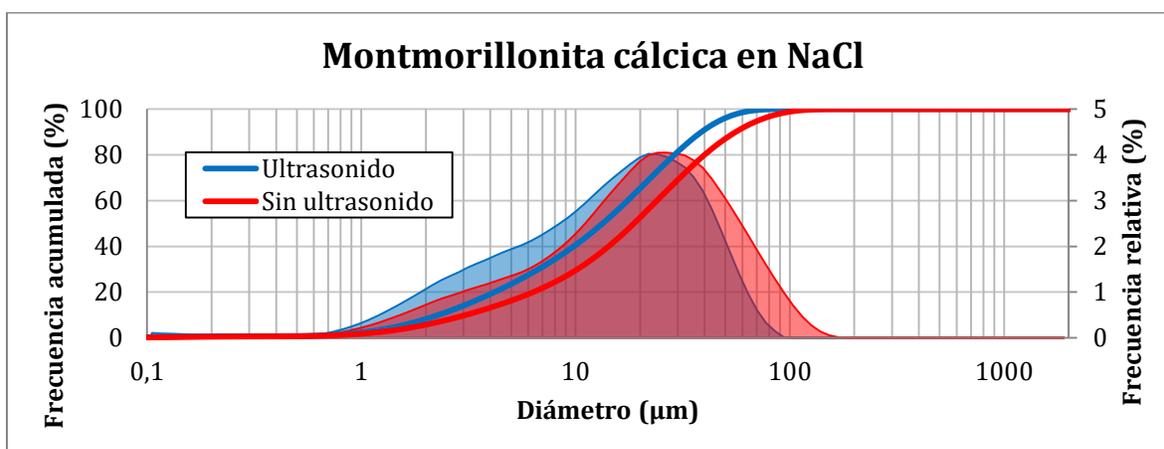


Gráfico 7.35 Montmorillonita cálcica en NaCl. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

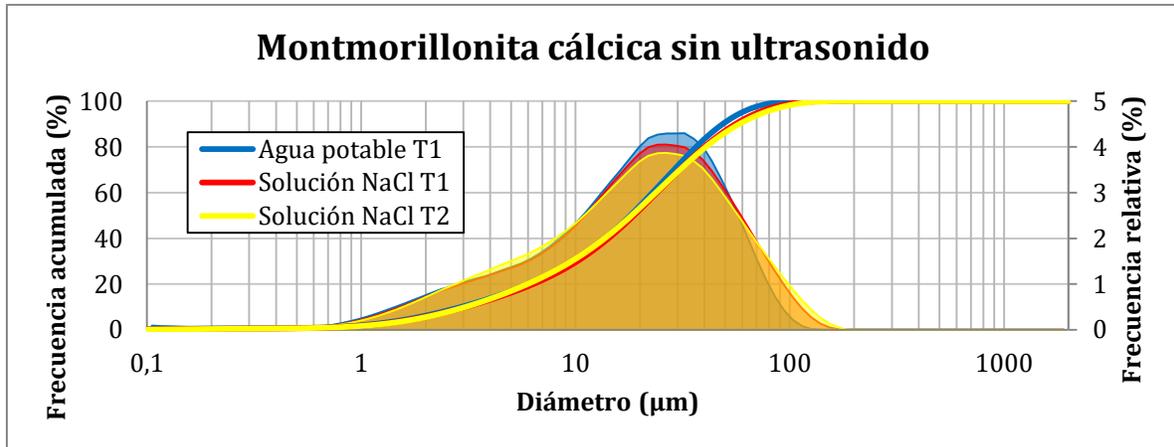


Gráfico 7.36 Montmorillonita cálcica sin ultrasonido. En agua potable en medición directa (T1) y solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

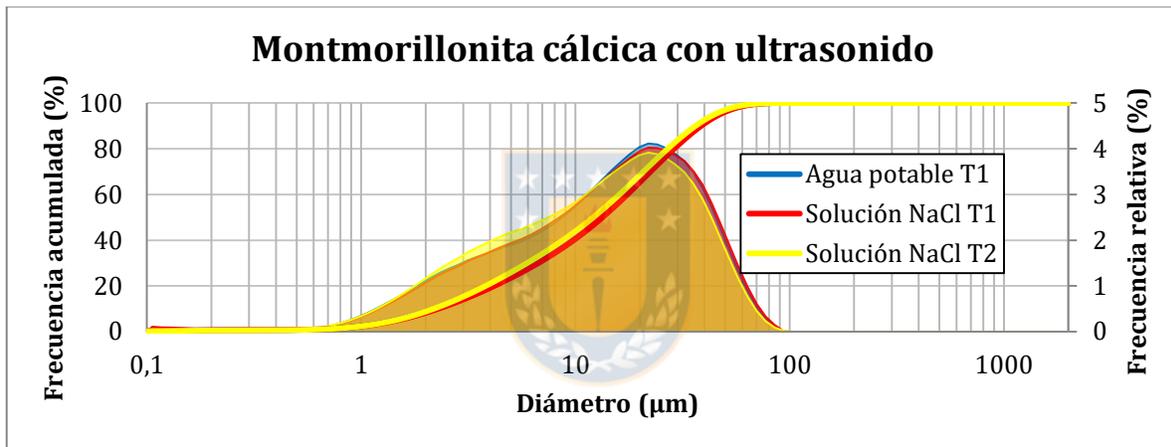


Gráfico 7.37 Montmorillonita cálcica con ultrasonido. En agua potable en medición directa (T1) y solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.15 Tabla con parámetros estadísticos para Montmorillonita cálcica en agua potable y solución con NaCl. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Montmorillonita cálcica- Solución NaCl			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,63	0,72	0,64	0,73
P5 (µm)	1,48	1,83	1,44	1,87
P10 (µm)	2,29	3,08	2,18	3,07
P20 (µm)	4,19	6,35	3,81	5,99
P30 (µm)	6,72	10,20	5,96	9,61
P40 (µm)	9,81	14,26	8,74	13,70
P50 (µm)	13,37	18,72	12,11	18,29
P60 (µm)	17,49	23,99	16,06	23,73
P70 (µm)	22,43	30,70	20,77	30,72
P80 (µm)	28,94	40,05	27,01	40,68
P90 (µm)	38,69	55,85	36,47	58,31
P95 (µm)	47,19	71,27	44,73	75,79
P99 (µm)	63,31	101,91	60,75	111,59
%< 147(µm)	100	99,95	99,99	99,98
%<2 µm	8,24	5,73	8,76	5,55

7.1.3.5.- Agua de Mar

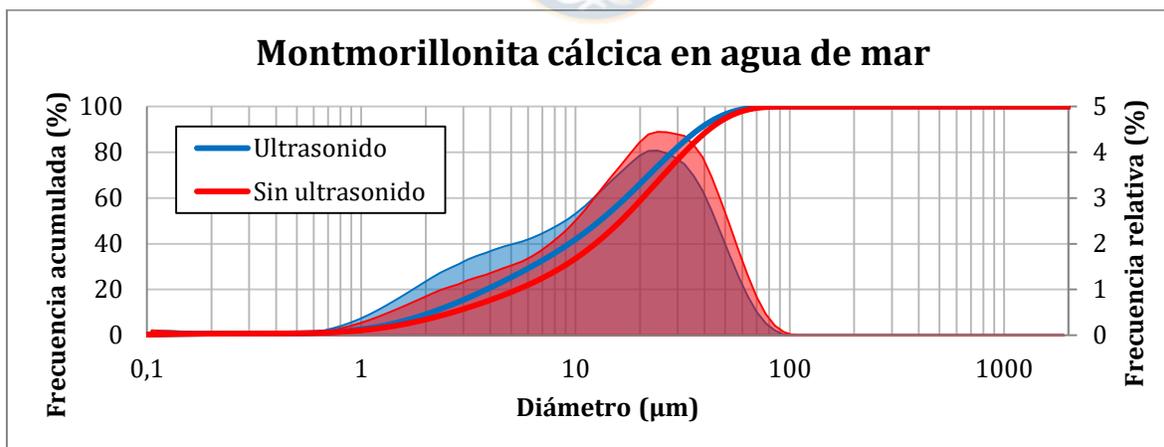


Gráfico 7.38 Montmorillonita cálcica en agua de mar. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

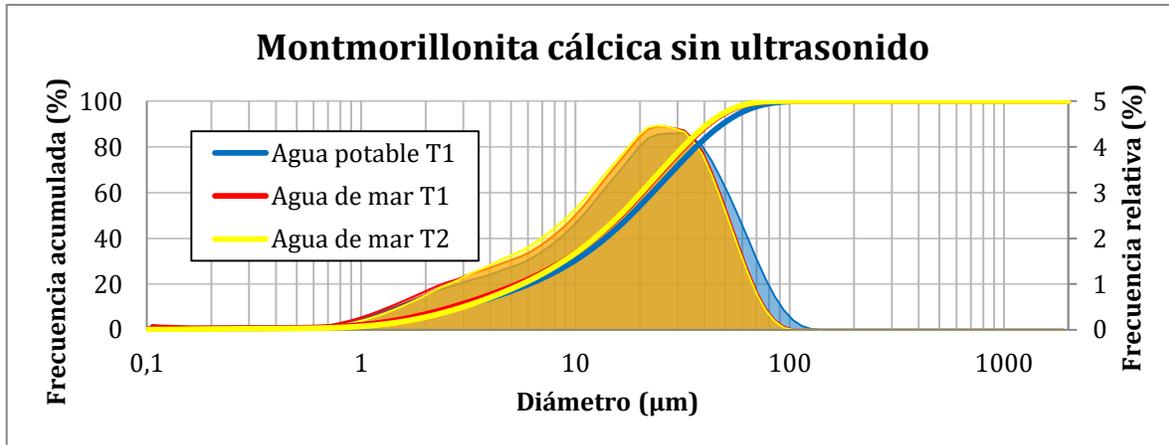


Gráfico 7.39 Montmorillonita cálcica sin ultrasonido. Medición en agua potable con medición directa (T1) y agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

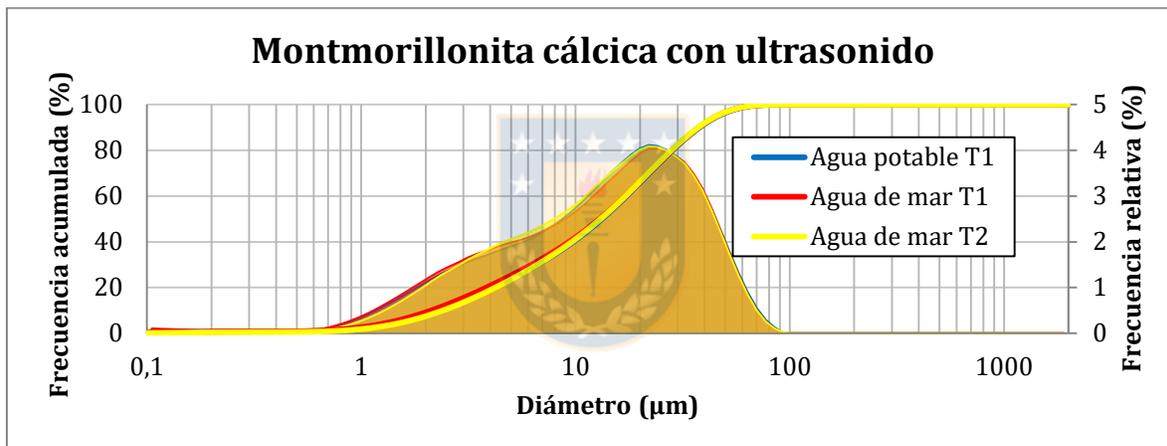


Gráfico 7.40 Montmorillonita cálcica con ultrasonido. Medición en agua potable con medición directa (T1) y agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.16 Tabla con parámetros estadísticos para Montmorillonita cálcica en agua de mar. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Montmorillonita cálcica- Agua de mar			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,60	0,62	0,76	0,81
P5 (μm)	1,39	1,62	1,60	1,88
P10 (μm)	2,13	2,67	2,41	3,00
P20 (μm)	3,84	5,37	4,23	5,64
P30 (μm)	6,24	8,74	6,63	8,81
P40 (μm)	9,34	12,36	9,62	12,28
P50 (μm)	12,97	16,26	13,10	16,06
P60 (μm)	17,10	20,56	17,09	20,29
P70 (μm)	21,97	25,71	21,86	25,34
P80 (μm)	28,22	32,34	28,06	31,89
P90 (μm)	37,59	42,02	37,44	41,50
P95 (μm)	45,76	50,55	45,63	49,97
P99 (μm)	61,47	66,83	61,42	65,97
%< 147(μm)	100	100	99,98	100
%<2 μm	9,14	6,87	7,46	5,55

7.1.3.6.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)

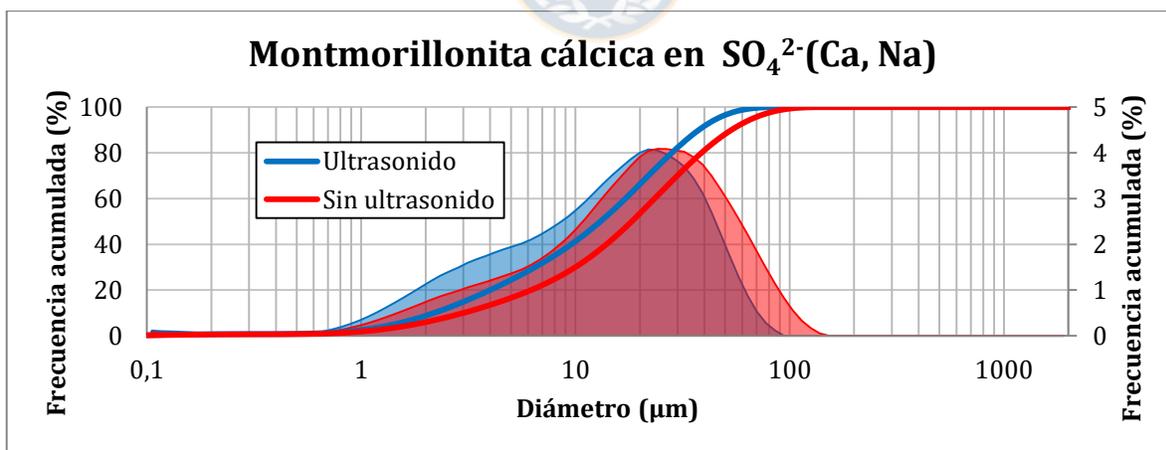


Gráfico 7.41 Montmorillonita cálcica en solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

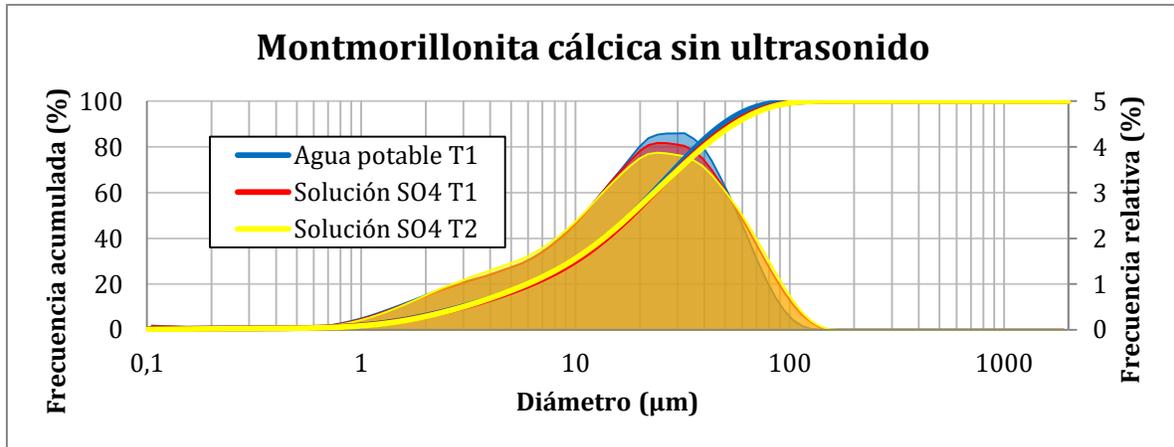


Gráfico 7.42 Montmorillonita cálcica sin ultrasonido. Medición en agua potable con medición directa (T1) y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

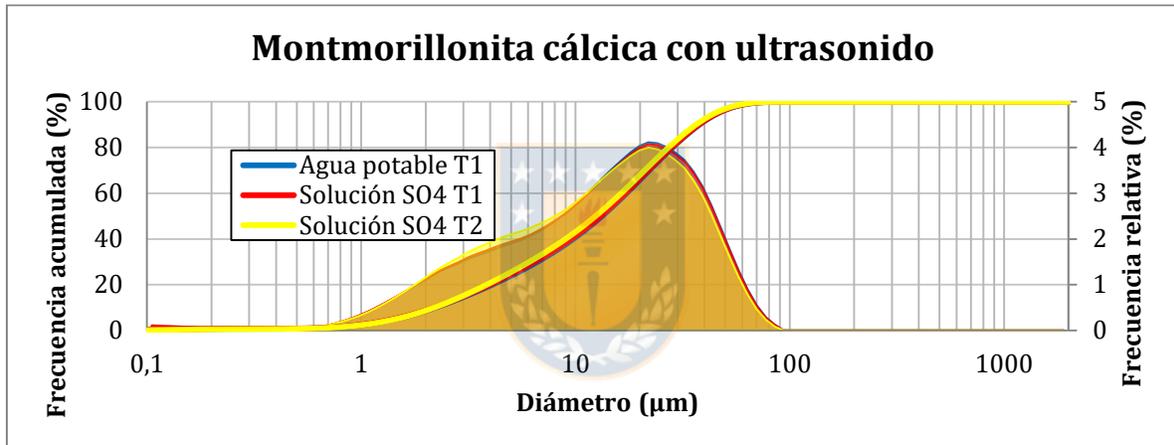


Gráfico 7.43 Montmorillonita cálcica con ultrasonido. Medición en agua potable con medición directa (T1) y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.17 Tabla con parámetros estadísticos para Montmorillonita cálcica en solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Montmorillonita cálcica- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,60	0,69	0,64	0,72
P5 (μm)	1,42	1,78	1,45	1,81
P10 (μm)	2,19	3,01	2,19	2,98
P20 (μm)	4,00	6,22	3,85	5,94
P30 (μm)	6,48	9,99	6,09	9,57
P40 (μm)	9,57	13,96	8,99	13,52
P50 (μm)	13,10	18,33	12,40	17,97
P60 (μm)	17,12	23,42	16,35	23,26
P70 (μm)	21,92	29,94	21,02	30,17
P80 (μm)	28,17	38,80	27,21	39,70
P90 (μm)	37,66	53,56	36,60	55,33
P95 (μm)	45,95	67,31	44,82	69,59
P99 (μm)	61,88	94,42	60,66	97,43
%< 147(μm)	100	100	100	100
%<2 μm	8,77	5,95	8,72	5,83

7.1.3.7.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)+ HCl; pH=2,26

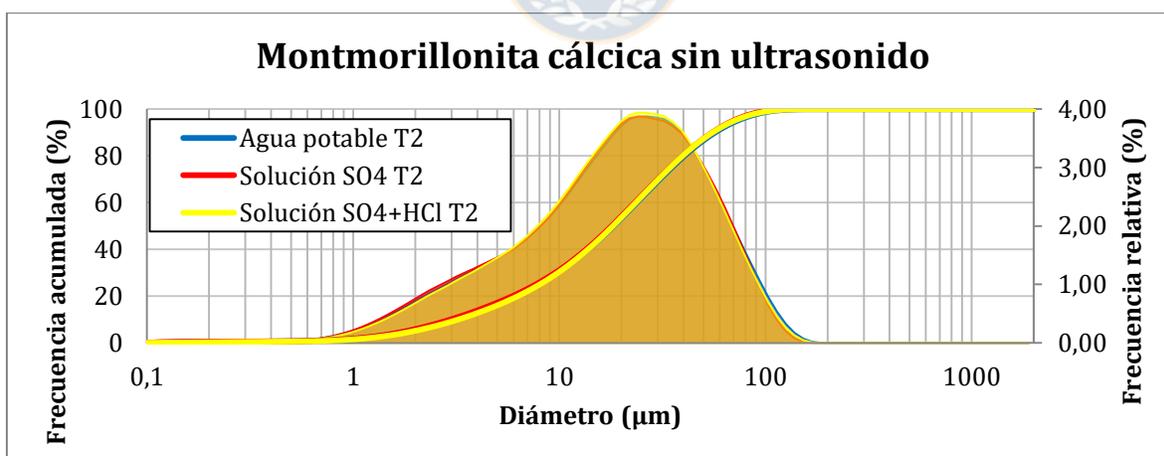


Gráfico 7.44 Montmorillonita cálcica sin ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26).

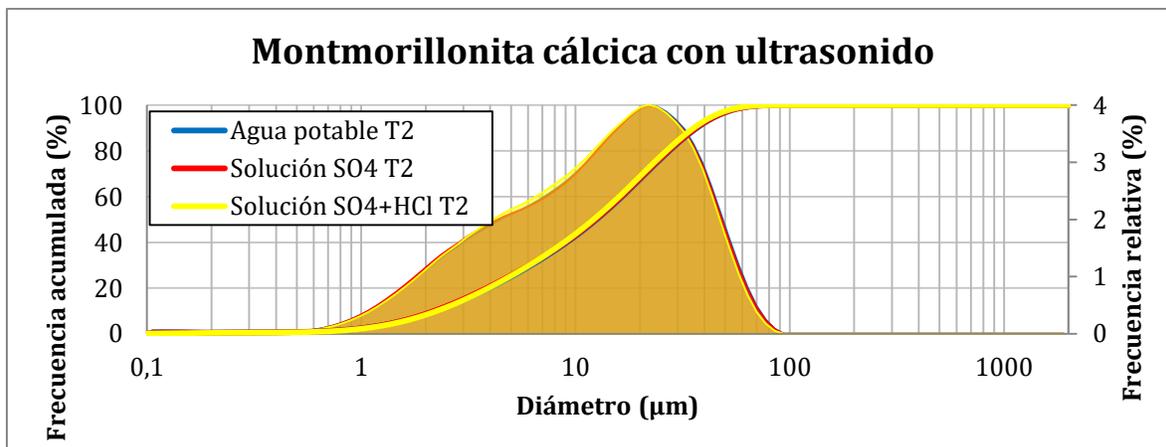


Gráfico 7.45 Montmorillonita cálcica con ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26).

Tabla 7.18 Tabla con parámetros estadísticos para Montmorillonita cálcica con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, solución SO_4^{2-} -(Ca, Na) y solución SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26).

Parámetro	Montmorillonita cálcica					
	T2 Agua potable		T2 Solución SO_4^{2-}		T2 SO_4^{2-} +HCl	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,62	0,72	0,64	0,72	0,68	0,81
P5 (µm)	1,46	1,85	1,45	1,81	1,50	1,97
P10 (µm)	2,23	3,08	2,19	2,98	2,26	3,24
P20 (µm)	3,95	6,10	3,85	5,94	3,93	6,30
P30 (µm)	6,22	9,76	6,09	9,57	6,09	9,87
P40 (µm)	9,12	13,79	8,99	13,52	8,85	13,79
P50 (µm)	12,55	18,35	12,40	17,97	12,16	18,22
P60 (µm)	16,52	23,77	16,35	23,26	16,01	23,50
P70 (µm)	21,25	30,75	21,02	30,17	20,59	30,30
P80 (µm)	27,47	40,52	27,21	39,70	26,61	39,71
P90 (µm)	36,91	57,02	36,60	55,33	35,69	55,47
P95 (µm)	45,17	73,06	44,82	69,59	43,59	70,59
P99 (µm)	61,00	104,96	60,66	97,43	58,84	100,91
%< 147(µm)	100	100	100	100	100	100
%<2 µm	8,52	5,62	8,72	5,83	8,30	5,13

7.1.7.- Montmorillonita sódica

7.1.7.1.- Agua potable

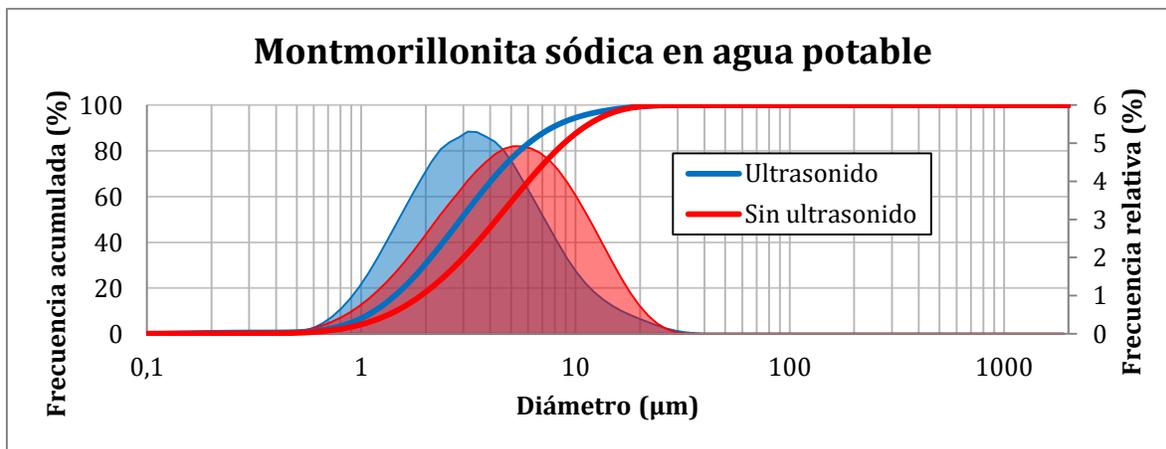


Gráfico 7.46 Montmorillonita sódica en agua potable. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

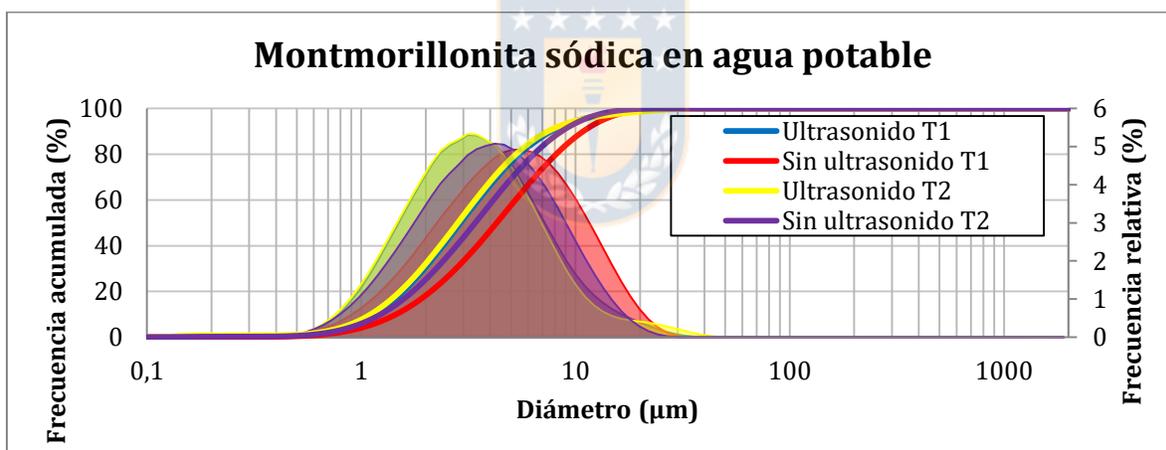


Gráfico 7.47 Montmorillonita sódica en agua potable. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

7.1.7.2.- Agua destilada

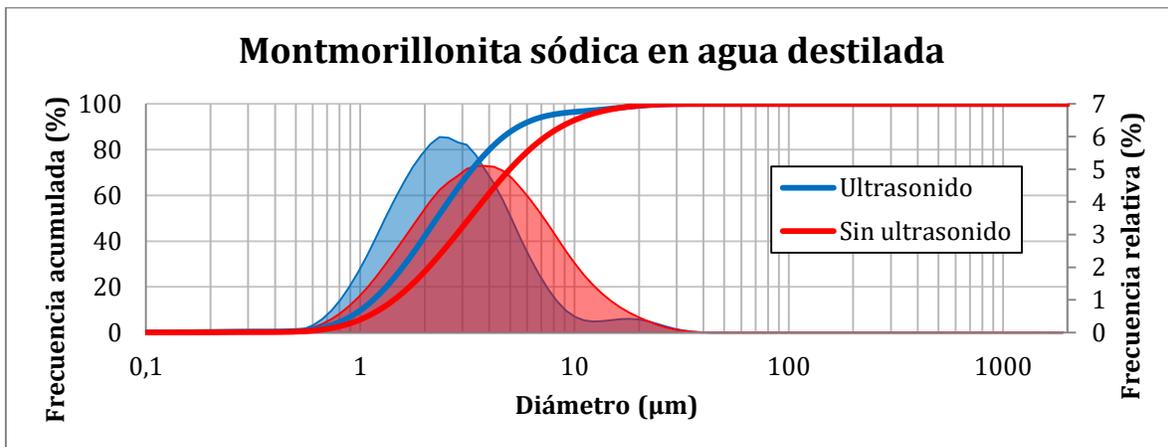


Gráfico 7.48 Montmorillonita sódica en agua destilada. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

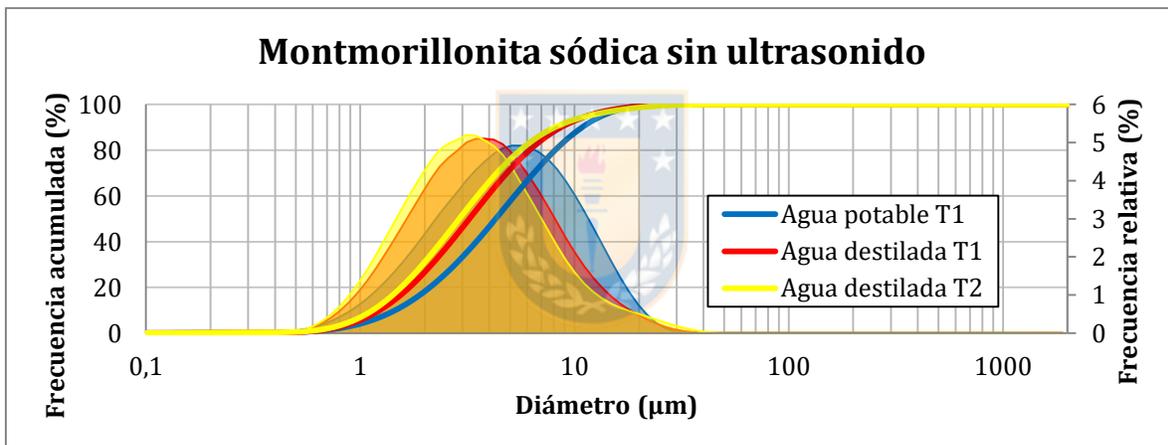


Gráfico 7.49 Montmorillonita sódica sin ultrasonido en agua potable con medición directa (T1) y en agua destilada con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

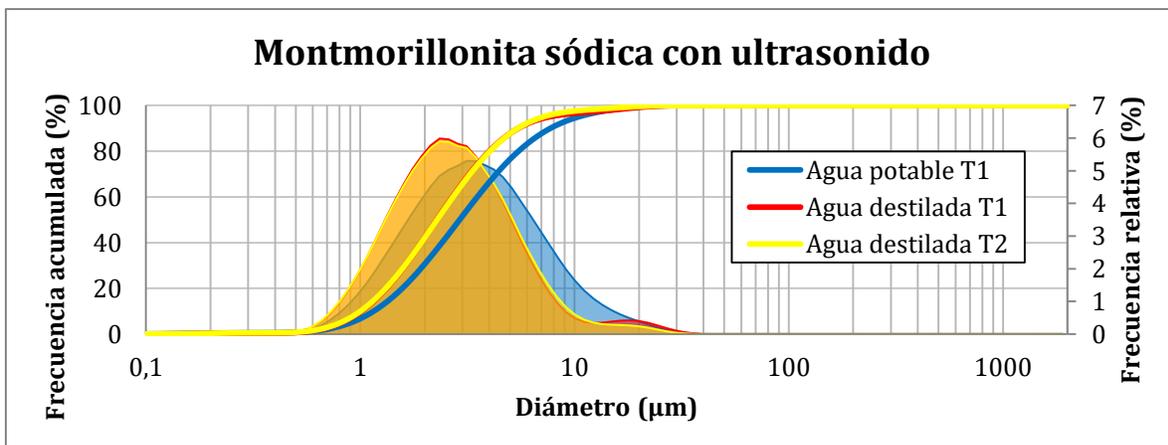


Gráfico 7.50 Montmorillonita sódica con ultrasonido en agua potable con medición directa (T1) y en agua destilada con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.19 Tabla con parámetros estadísticos para Montmorillonita sódica en agua potable y agua destilada. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Montmorillonita sódica- Agua potable				Montmorillonita sódica- Agua destilada			
	T1		T2 [24 h]		T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,56	0,64	0,46	0,57	0,57	0,66	0,54	0,60
P5 (µm)	0,90	1,08	0,86	0,94	0,85	1,00	0,81	0,90
P10 (µm)	1,15	1,46	1,11	1,23	1,06	1,28	1,00	1,14
P20 (µm)	1,57	2,11	1,52	1,74	1,40	1,76	1,32	1,55
P30 (µm)	1,97	2,77	1,91	2,24	1,73	2,23	1,61	1,95
P40 (µm)	2,41	3,48	2,34	2,79	2,08	2,74	1,93	2,39
P50 (µm)	2,91	4,29	2,82	3,41	2,47	3,33	2,29	2,90
P60 (µm)	3,52	5,25	3,41	4,14	2,95	4,03	2,72	3,52
P70 (µm)	4,31	6,46	4,17	5,08	3,56	4,94	3,26	4,34
P80 (µm)	5,49	8,13	5,27	6,39	4,45	6,24	4,04	5,59
P90 (µm)	7,72	10,88	7,44	8,61	6,20	8,57	5,46	8,11
P95 (µm)	10,42	13,47	10,41	10,83	9,16	11,07	7,17	11,53
P99 (µm)	17,97	18,71	22,33	15,57	27,32	16,67	15,76	21,81
%< 147(µm)	100	100	100	100	100	100	100	100
%<2 µm	30,66	18,26	32,13	25,27	37,84	25,15	42,08	31,11

7.1.7.3.- Solución CaCl₂

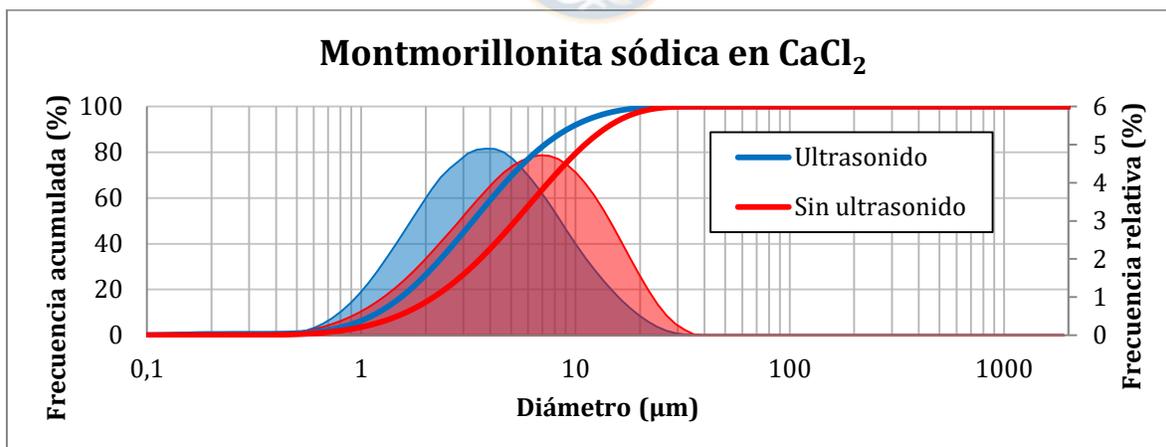


Gráfico 7.51 Montmorillonita sódica en solución NaCl. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

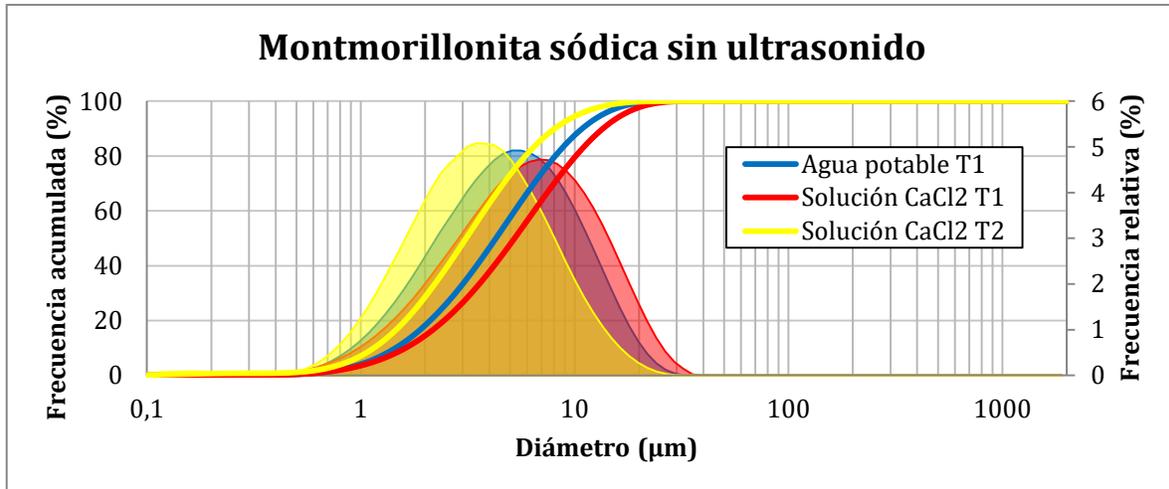


Gráfico 7.52 Montmorillonita sódica sin ultrasonido. Medición en agua potable T1 y solución de CaCl_2 en T1 y T2.

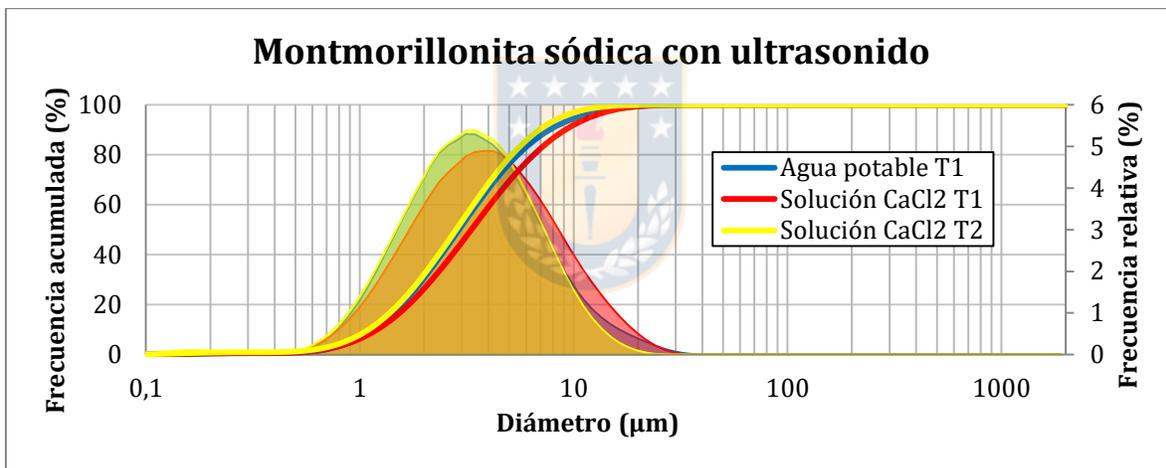


Gráfico 7.53 Montmorillonita sódica con ultrasonido. Medición directa (T1) en agua potable y en solución de CaCl_2 con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Tabla 7.20 Tabla con parámetros estadísticos para Montmorillonita sódica en solución con CaCl_2 . Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Montmorillonita sódica- Solución CaCl_2			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,53	0,64	0,41	0,47
P5 (μm)	0,92	1,16	0,84	0,88
P10 (μm)	1,20	1,62	1,10	1,15
P20 (μm)	1,69	2,45	1,51	1,62
P30 (μm)	2,18	3,29	1,91	2,08
P40 (μm)	2,71	4,20	2,34	2,57
P50 (μm)	3,33	5,24	2,82	3,14
P60 (μm)	4,08	6,47	3,40	3,83
P70 (μm)	5,07	8,03	4,13	4,70
P80 (μm)	6,52	10,15	5,15	5,98
P90 (μm)	9,16	13,60	6,91	8,23
P95 (μm)	11,94	16,78	8,71	10,59
P99 (μm)	18,07	23,03	12,94	16,30
%< 147(μm)	100	100	100	100
%<2 μm	26,42	14,51	32,14	28,31

7.1.7.7.- Solución NaCl

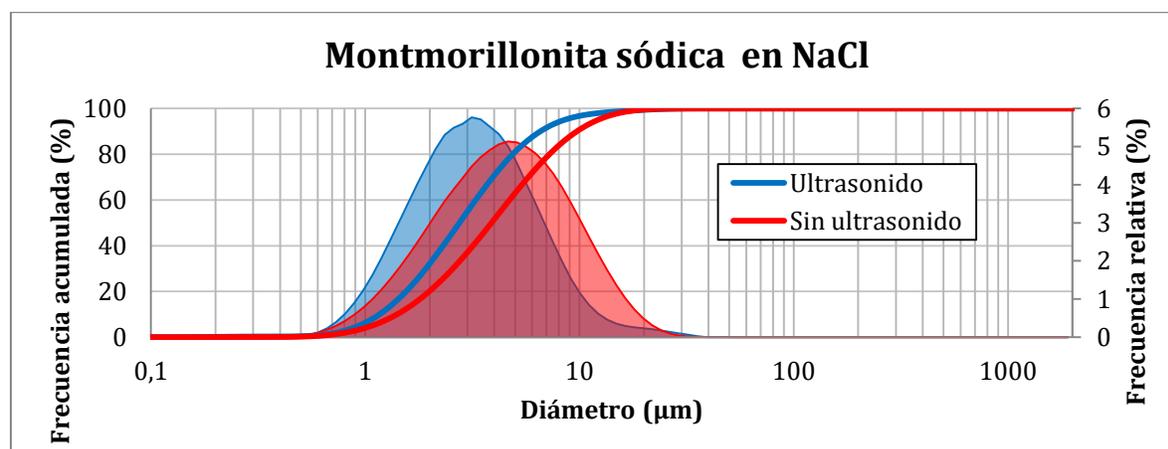


Gráfico 7.54 Montmorillonita sódica en solución NaCl en medición directa (T1). Medición con y sin ultrasonido.

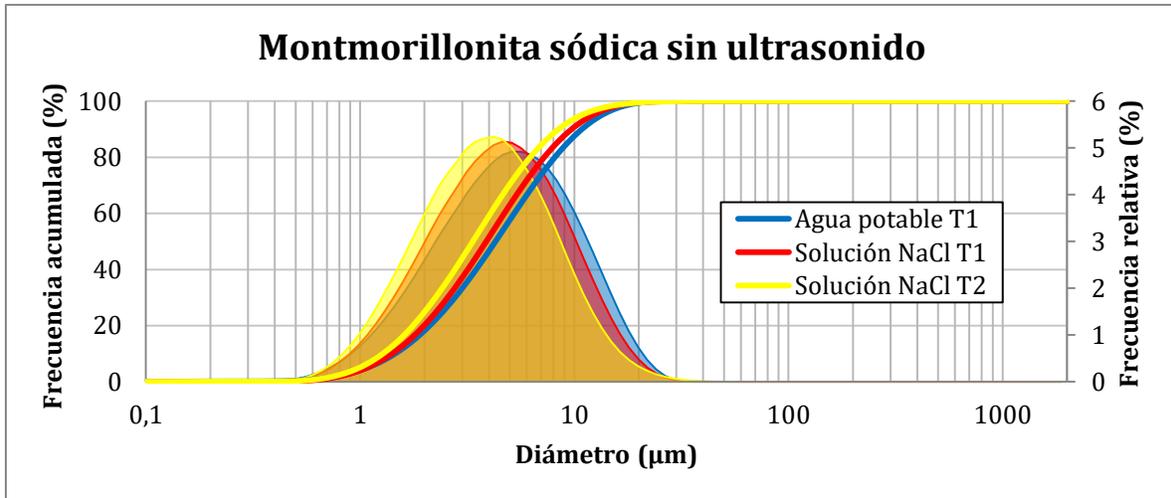


Gráfico 7.55 Montmorillonita sódica sin ultrasonido. Medición directa (T1) en agua potable, y en solución NaCl con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

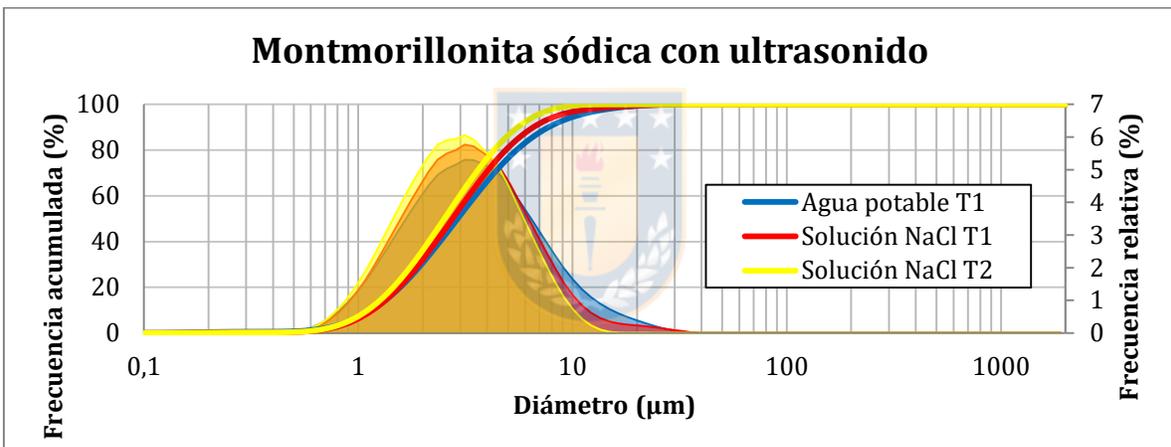


Gráfico 7.56 Montmorillonita sódica con ultrasonido. Medición directa (T1) en agua potable, y en solución NaCl con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Tabla 7.21 Tabla con parámetros estadísticos para Montmorillonita sódica en agua potable y solución de NaCl. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Montmorillonita sódica- Solución NaCl			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,63	0,68	0,61	0,65
P5 (µm)	0,93	1,07	0,89	0,99
P10 (µm)	1,17	1,41	1,11	1,28
P20 (µm)	1,55	1,99	1,46	1,77
P30 (µm)	1,92	2,56	1,79	2,25
P40 (µm)	2,31	3,18	2,13	2,77
P50 (µm)	2,75	3,88	2,52	3,36
P60 (µm)	3,28	4,71	2,98	4,07
P70 (µm)	3,95	5,77	3,54	4,97
P80 (µm)	4,89	7,25	4,30	6,24
P90 (µm)	6,58	9,74	5,56	8,46
P95 (µm)	8,49	12,21	6,75	10,85
P99 (µm)	16,70	17,64	9,22	17,08
%< 147(µm)	100	100	100	100
%<2 µm	32,16	20,21	36,22	24,89

7.1.7.5.- Agua de Mar

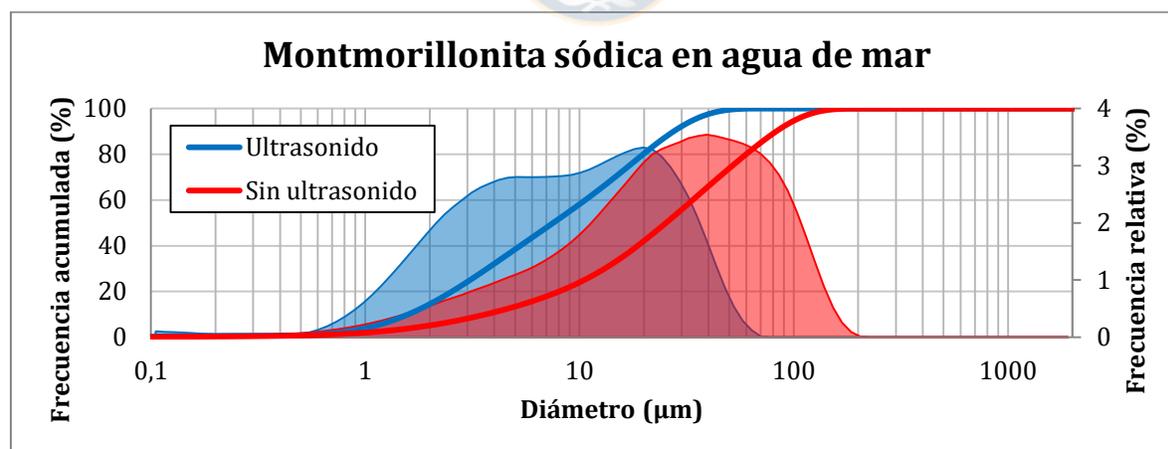


Gráfico 7.57 Montmorillonita sódica en agua de mar. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

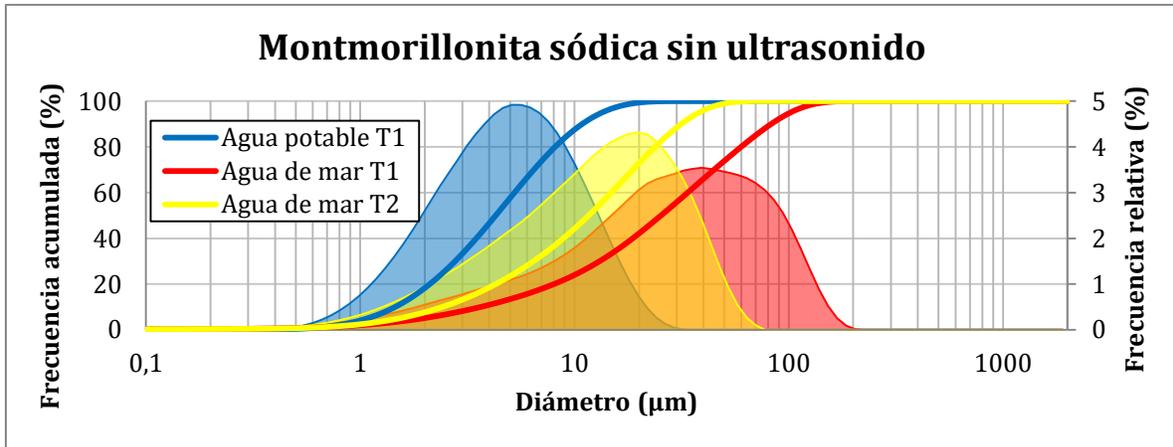


Gráfico 7.58 Montmorillonita sódica sin ultrasonido. Medición en agua potable directas (T1) y agua de mar con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

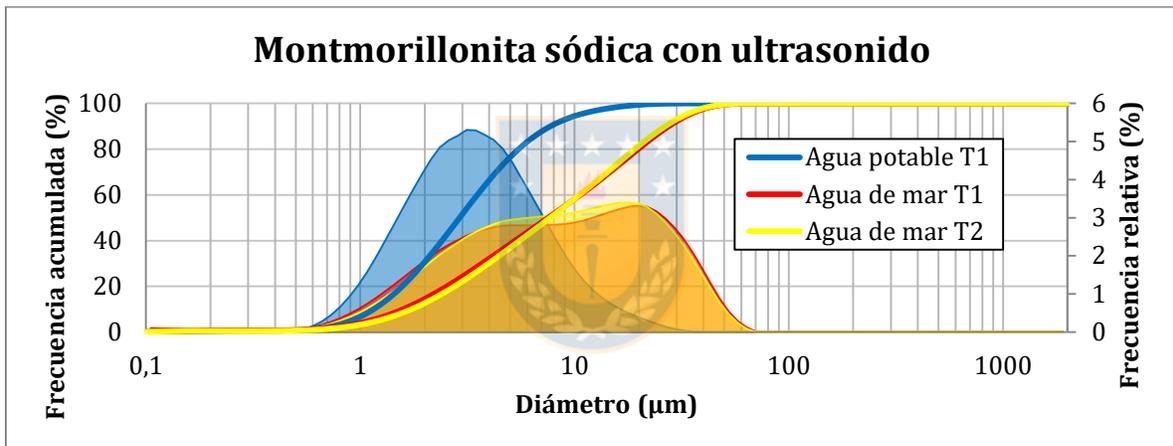


Gráfico 7.59 Montmorillonita sódica con ultrasonido. Medición en agua potable directas (T1) y agua de mar con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Tabla 7.22 Tabla con parámetros estadísticos para Montmorillonita sódica en agua de mar. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Montmorillonita Sódica- Agua de mar			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,54	0,61	0,61	0,62
P5 (µm)	1,11	1,96	1,21	1,52
P10 (µm)	1,59	3,66	1,74	2,42
P20 (µm)	2,54	8,03	2,76	4,29
P30 (µm)	3,71	13,10	3,97	6,44
P40 (µm)	5,29	18,70	5,56	8,87
P50 (µm)	7,54	25,34	7,70	11,64
P60 (µm)	10,64	33,76	10,56	14,86
P70 (µm)	14,66	44,80	14,25	18,72
P80 (µm)	19,83	60,01	19,11	23,78
P90 (µm)	27,52	82,83	26,57	31,49
P95 (µm)	34,04	101,75	33,07	38,09
P99 (µm)	46,07	136,21	45,11	50,58
%< 147(µm)	100	99,45	100	100
%<2 µm	14,48	5,13	12,67	7,65

7.1.7.6.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)

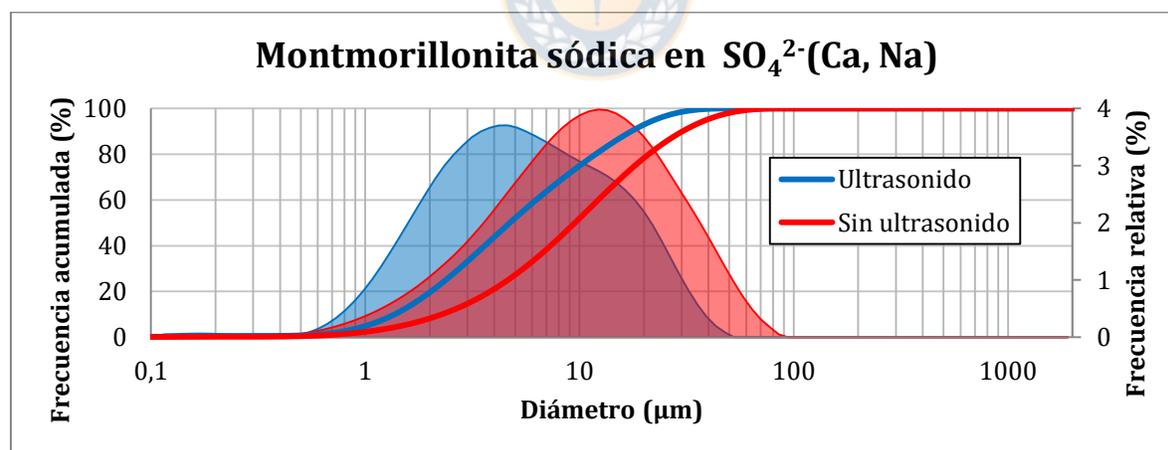


Gráfico 7.60 Montmorillonita sódica en solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Medición directa (T1) con y sin ultrasonido

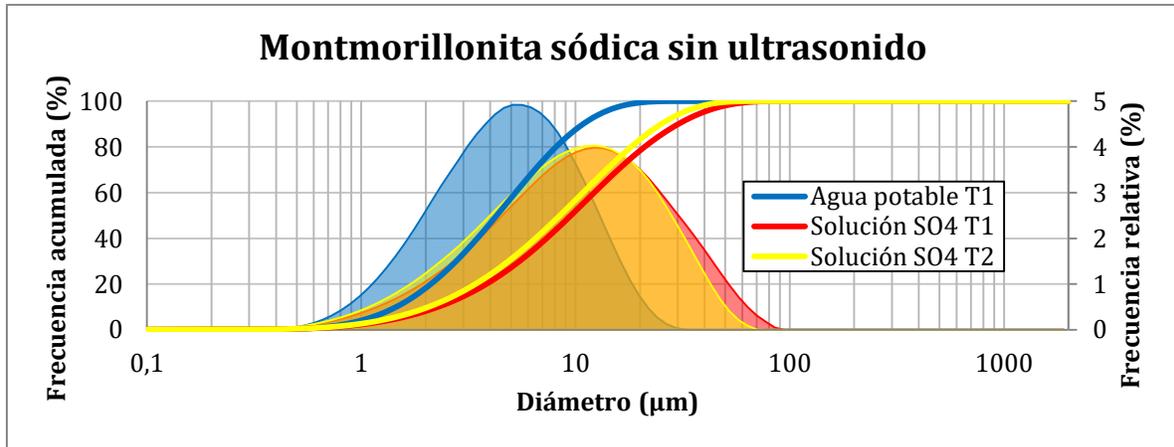


Gráfico 7.61 Montmorillonita sódica sin ultrasonido. Medición en agua potable con medición directa (T1) y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

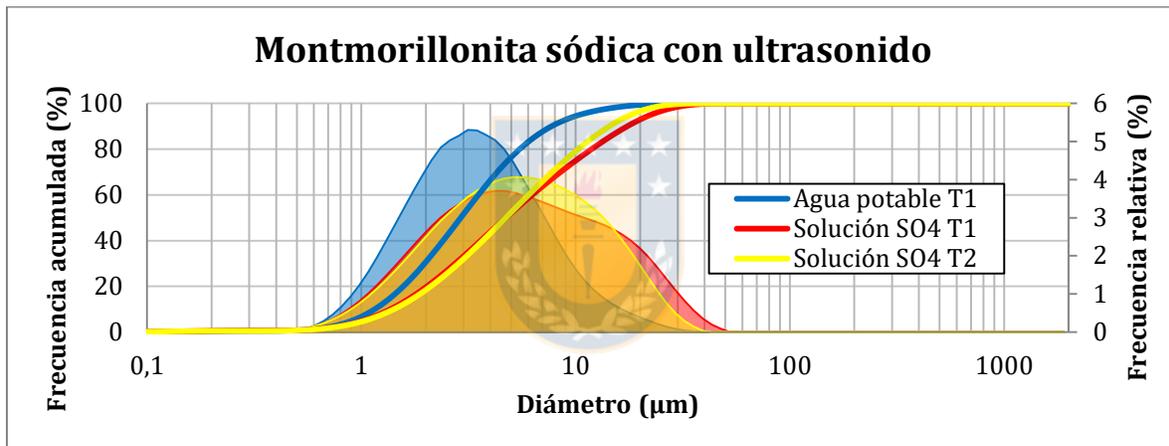


Gráfico 7.62 Montmorillonita sódica con ultrasonido. Medición en agua potable con medición directa (T1) y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.23 Tabla con parámetros estadísticos para Montmorillonita cálcica en agua potable y solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Montmorillonita sódica- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,56	0,69	0,57	0,66
P5 (μm)	1,01	1,48	1,04	1,37
P10 (μm)	1,37	2,28	1,42	2,06
P20 (μm)	2,03	3,83	2,11	3,41
P30 (μm)	2,75	5,48	2,84	4,86
P40 (μm)	3,62	7,34	3,69	6,51
P50 (μm)	4,73	9,52	4,72	8,46
P60 (μm)	6,27	12,24	6,04	10,85
P70 (μm)	8,51	15,81	7,79	13,92
P80 (μm)	11,89	21,02	10,28	18,21
P90 (μm)	17,44	30,27	14,37	25,17
P95 (μm)	22,45	39,15	18,13	31,64
P99 (μm)	32,29	56,76	25,37	44,27
%< 147(μm)	100	100	100	100
%<2 μm	19,57	8,20	18,44	9,55

7.1.7.7.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)+ HCl; pH=2,26

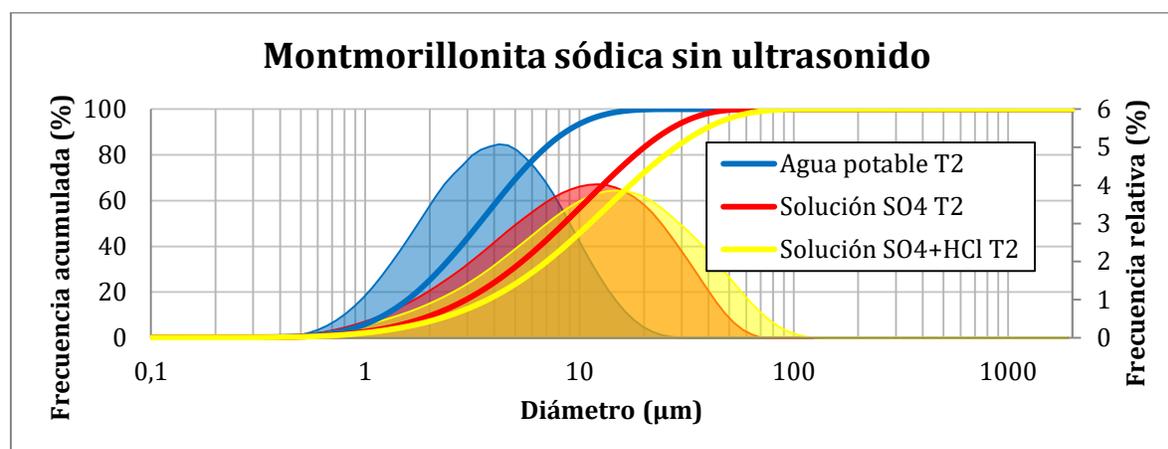


Gráfico 7.63 Montmorillonita sódica sin ultrasonido. En agua potable, en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2).

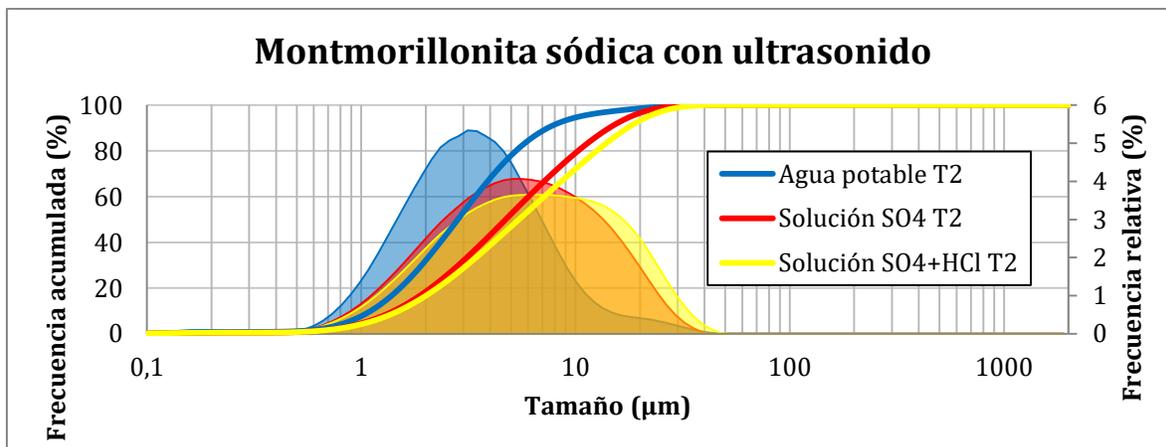


Gráfico 7.64 Montmorillonita sódica con ultrasonido. En agua potable, en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.24 Tabla con parámetros estadísticos para Montmorillonita sódica en agua potable y solución con sulfatos y sulfatos con HCl. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Montmorillonita sódica					
	T2 Agua Potable		T2 Solución SO_4^{2-}		T2 SO_4^{2-} +HCl	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,46	0,57	0,57	0,66	0,57	0,71
P5 (µm)	0,86	0,94	1,04	1,37	1,08	1,58
P10 (µm)	1,11	1,23	1,42	2,06	1,49	2,51
P20 (µm)	1,52	1,74	2,11	3,41	2,26	4,34
P30 (µm)	1,91	2,24	2,84	4,86	3,12	6,31
P40 (µm)	2,34	2,79	3,69	6,51	4,14	8,53
P50 (µm)	2,82	3,41	4,72	8,46	5,45	11,18
P60 (µm)	3,41	4,14	6,04	10,85	7,15	14,47
P70 (µm)	4,17	5,08	7,79	13,92	9,42	18,82
P80 (µm)	5,27	6,39	10,28	18,21	12,57	25,19
P90 (µm)	7,44	8,61	14,37	25,17	17,49	36,30
P95 (µm)	10,41	10,83	18,13	31,64	21,89	46,92
P99 (µm)	22,33	15,57	25,37	44,27	30,46	69,28
% < 147(µm)	100	100	100	100	100	100
% < 2 (µm)	32,13	25,27	18,44	9,55	16,62	7,22

7.1.5.- Nontronita Verde

7.1.5.1.- Agua Potable

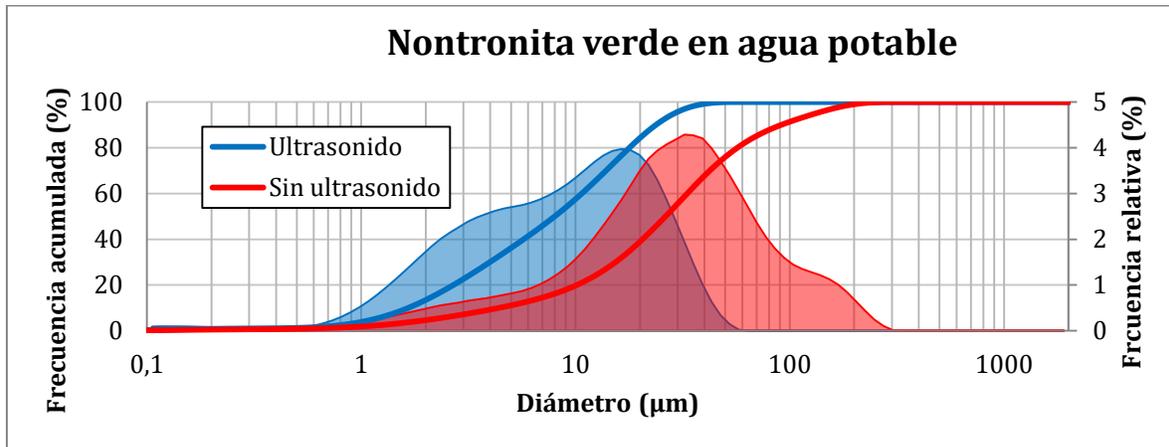


Gráfico 7.65 Nontronita verde en agua potable. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

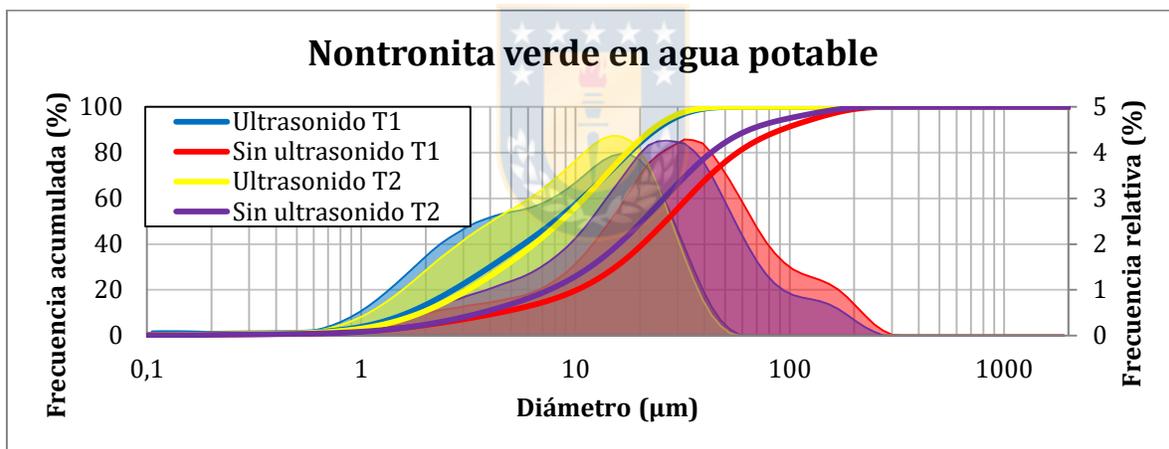


Gráfico 7.66 Nontronita verde en agua potable. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

7.1.5.2.- Agua Destilada

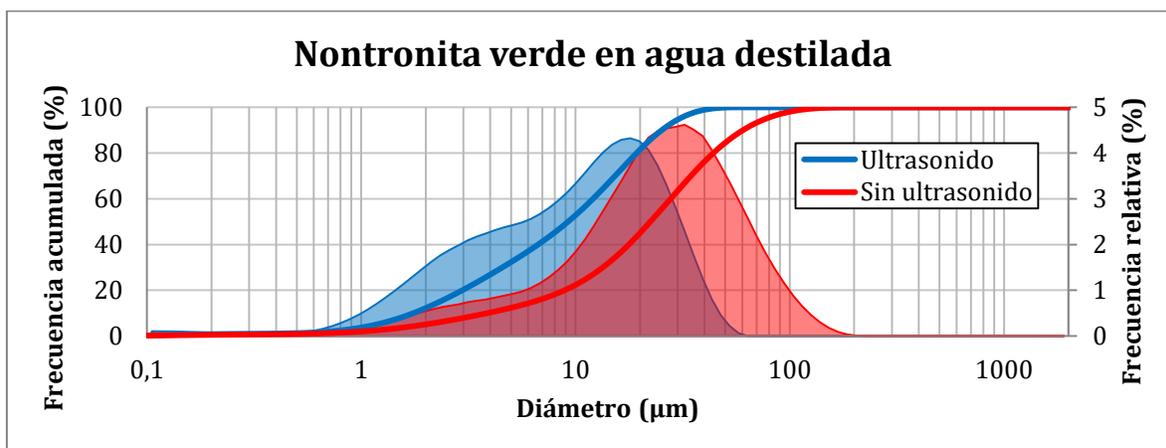


Gráfico 7.67 Nontronita verde en agua destilada. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

Tabla 7.25 Tabla con parámetros estadísticos para Nontronita verde en agua potable y agua destilada. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Nontronita verde- Agua potable				Nontronita verde- Agua potable			
	T1		T2 [24 h] ★		T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,34	0,61	0,48	0,68	0,33	0,57	0,49	0,57
P5 (µm)	1,14	2,14	1,29	2,06	1,17	1,98	1,23	1,98
P10 (µm)	1,66	4,41	1,90	3,264	1,75	3,88	1,78	3,88
P20 (µm)	2,70	10,15	3,14	7,54	2,96	8,89	2,83	8,89
P30 (µm)	3,99	15,38	4,62	11,69	4,56	13,40	4,01	13,40
P40 (µm)	5,73	20,55	6,42	15,91	6,69	17,75	5,42	17,75
P50 (µm)	8,00	26,34	8,52	20,47	9,24	22,37	7,12	22,37
P60 (µm)	10,71	33,27	10,96	25,86	12,07	27,82	9,18	27,82
P70 (µm)	13,88	42,36	13,80	32,82	15,29	34,58	11,70	34,58
P80 (µm)	17,87	56,96	17,38	42,99	19,30	44,06	15,01	44,06
P90 (µm)	23,76	91,21	22,72	64,91	25,26	60,54	20,06	60,54
P95 (µm)	28,96	131,78	27,47	98,83	30,55	77,33	24,58	77,33
P99 (µm)	38,75	199,35	36,61	169,38	40,60	114,78	33,47	114,78
%< 147(µm)	100	96,28	100	98,13	100	99,80	100	99,80
%<2 µm	13,44	4,61	10,81	4,80	12,21	5,07	12,13	5,07

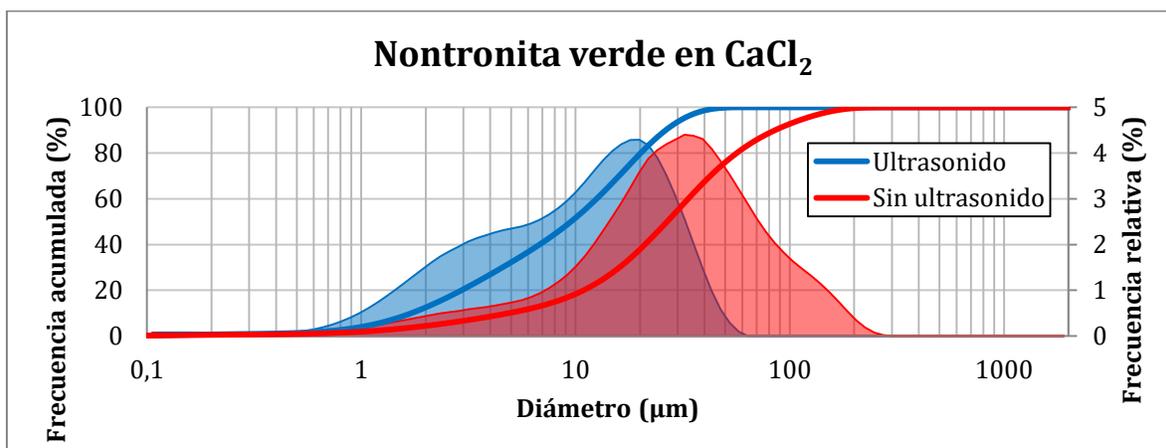
7.1.5.3.- Solución CaCl_2 

Gráfico 7.68 Nontronita verde en solución de CaCl_2 . Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

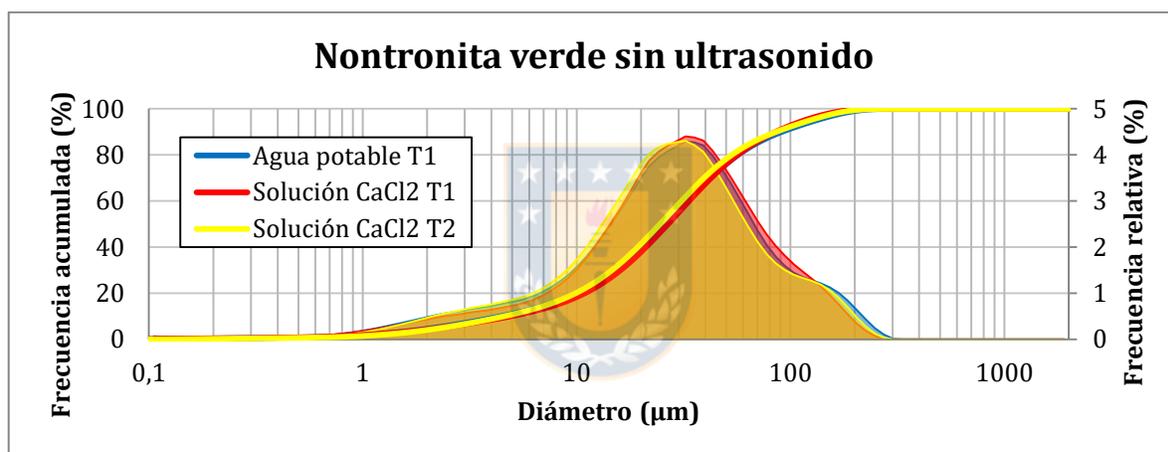


Gráfico 7.69 Nontronita verde. Mediciones sin ultrasonido en agua potable y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

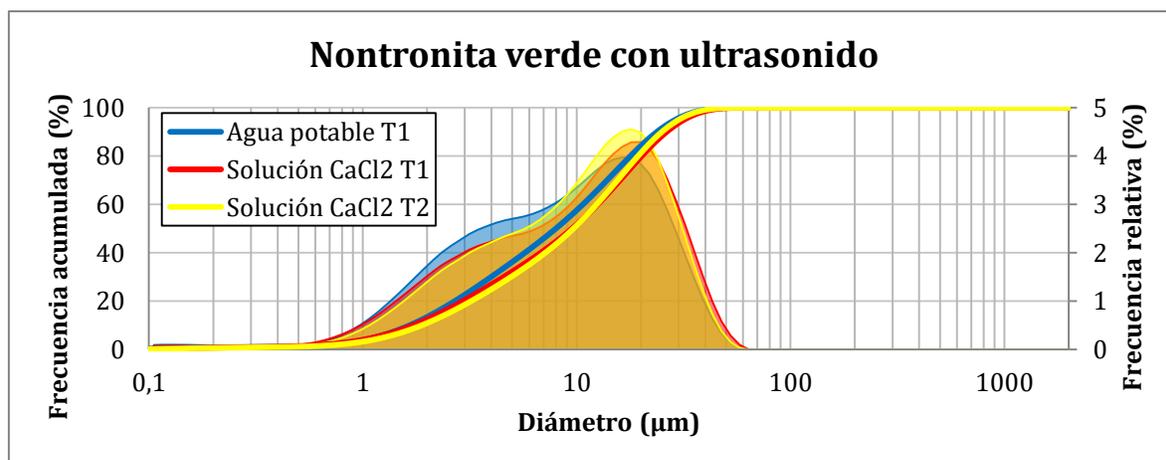


Gráfico 7.70 Nontronita verde. Mediciones con ultrasonido en agua potable y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.26 Tabla con parámetros estadísticos para Nontronita verde en solución de CaCl_2 . Mediciones con

tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Nontronita verde- Solución CaCl ₂			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,35	0,58	0,44	0,73
P5 (µm)	1,13	2,25	1,26	2,33
P10 (µm)	1,72	4,89	1,89	4,57
P20 (µm)	2,94	10,91	3,22	9,88
P30 (µm)	4,57	16,04	4,94	14,60
P40 (µm)	6,80	21,08	7,14	19,30
P50 (µm)	9,52	26,78	9,67	24,55
P60 (µm)	12,54	33,61	12,42	30,93
P70 (µm)	15,97	42,59	15,54	39,49
P80 (µm)	20,17	56,56	19,40	53,29
P90 (µm)	26,42	85,40	25,07	85,81
P95 (µm)	31,81	116,46	30,09	123,07
P99 (µm)	41,74	173,92	39,48	184,49
%< 147(µm)	100	97,70	100	97,05
%<2 µm	12,50	4,41	10,90	4,10

7.1.5.7.- Solución NaCl

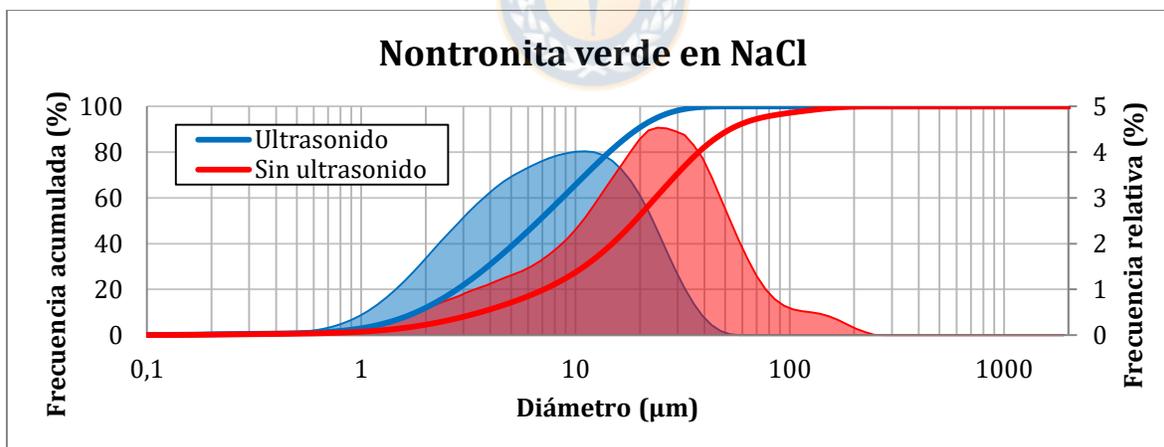


Gráfico 7.71 Nontronita verde en solución de NaCl, medición con y sin ultrasonido.

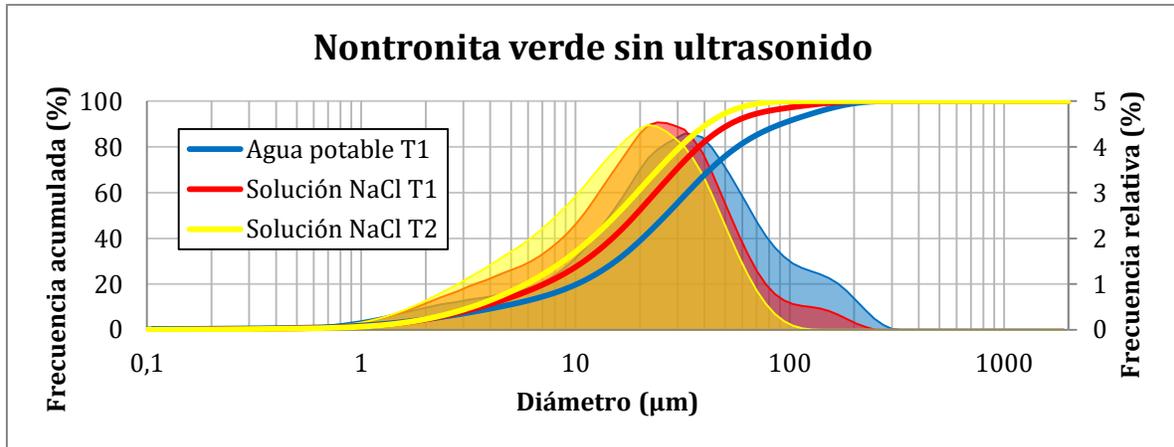


Gráfico 7.72 Nontronita verde. Mediciones sin ultrasonido en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

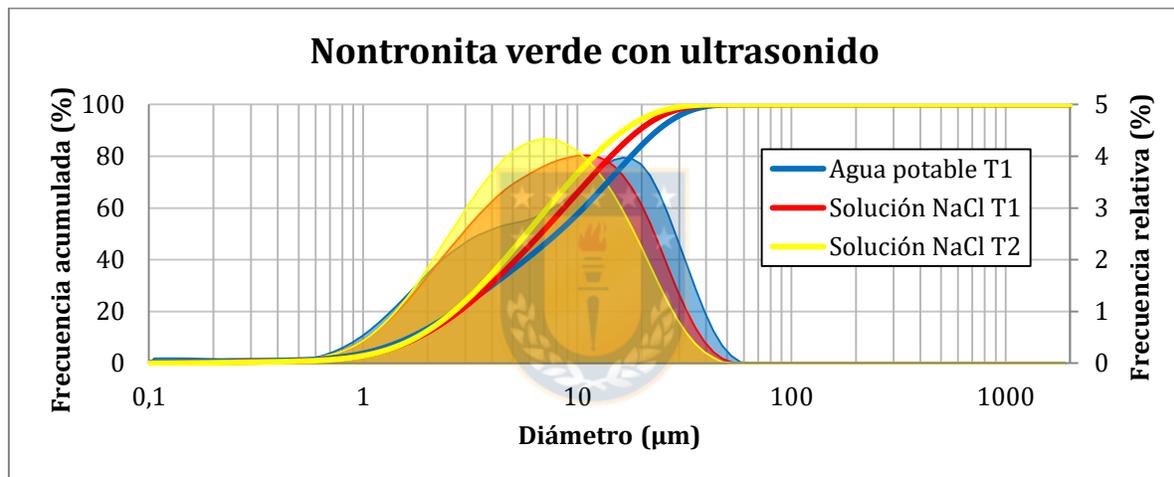


Gráfico 7.73 Nontronita verde. Mediciones con ultrasonido en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.27 Tabla con parámetros estadísticos para Nontronita verde en solución de NaCl. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Nontronita verde- Solución NaCl			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,57	0,77	0,60	0,83
P5 (μm)	1,27	2,13	1,27	2,08
P10 (μm)	1,81	3,60	1,77	3,29
P20 (μm)	2,80	7,14	2,65	5,87
P30 (μm)	3,89	10,97	3,56	8,76
P40 (μm)	5,18	14,84	4,57	11,91
P50 (μm)	6,75	18,93	5,78	15,38
P60 (μm)	8,67	23,62	7,28	19,37
P70 (μm)	11,12	29,53	9,22	24,24
P80 (μm)	14,37	37,60	11,97	30,78
P90 (μm)	19,45	52,82	16,52	41,20
P95 (μm)	24,03	73,53	20,75	50,91
P99 (μm)	33,17	144,33	29,73	71,95
%< 147(μm)	100	99,07	100	100
%<2 μm	11,95	4,53	12,54	4,70

7.1.5.5.- Agua de Mar

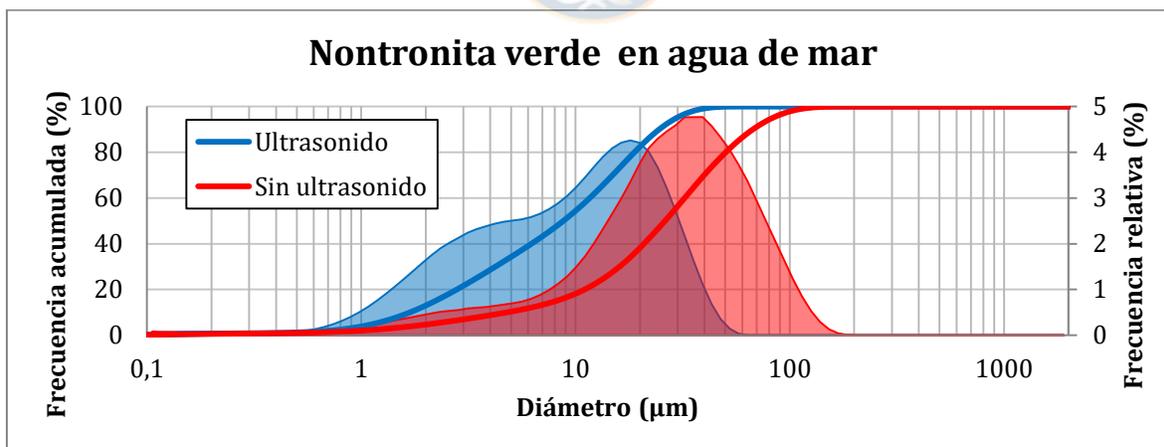


Gráfico 7.74 Nontronita verde en agua de mar. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

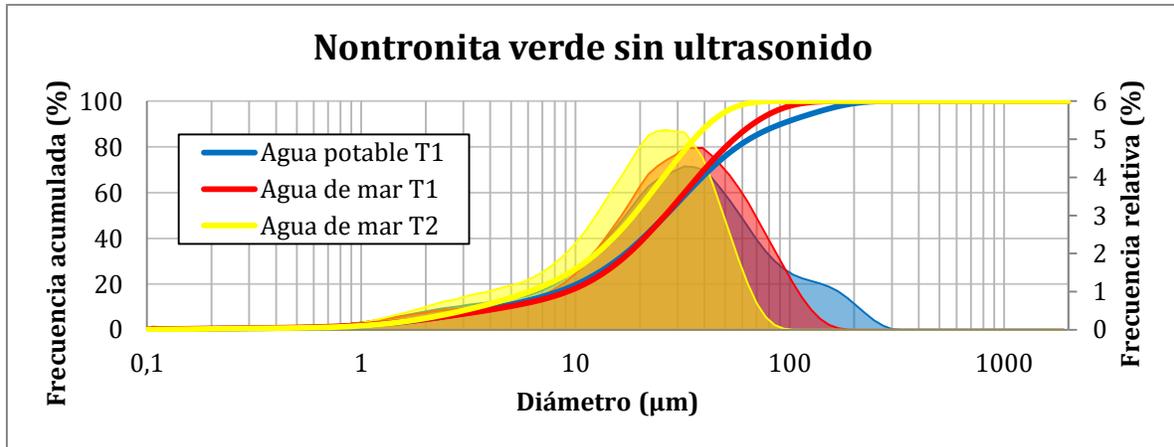


Gráfico 7.75 Nontronita verde sin ultrasonido. Mediciones en agua potable y en agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

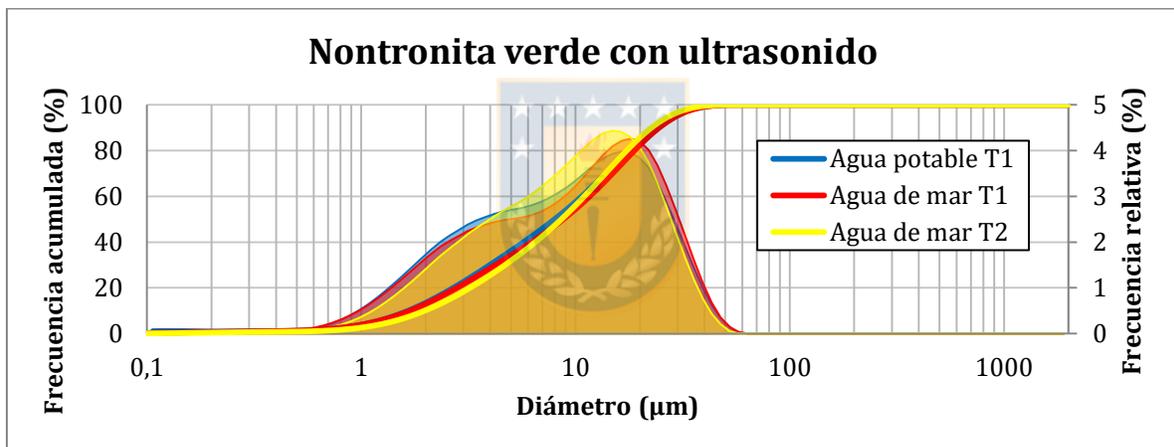


Gráfico 7.76 Nontronita verde con ultrasonido. Mediciones en agua potable y en agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.28 Tabla con parámetros estadísticos para Nontronita verde en agua mar. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Nontronita verde- Agua de mar			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,40	0,51	0,59	0,65
P5 (µm)	1,15	2,14	1,37	1,98
P10 (µm)	1,69	4,80	1,98	3,52
P20 (µm)	2,80	11,02	3,22	7,42
P30 (µm)	4,23	16,05	4,69	11,29
P40 (µm)	6,23	20,86	6,50	14,93
P50 (µm)	8,78	26,18	8,60	18,63
P60 (µm)	11,65	32,34	11,00	22,62
P70 (µm)	14,90	39,91	13,80	27,36
P80 (µm)	18,83	50,31	17,34	33,28
P90 (µm)	24,63	67,34	22,65	41,87
P95 (µm)	29,68	83,01	27,38	49,60
P99 (µm)	39,13	113,38	36,49	63,96
%< 147(µm)	99,99	99,89	100	100
%<2 µm	12,98	4,66	10,15	5,06

7.1.5.6.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)

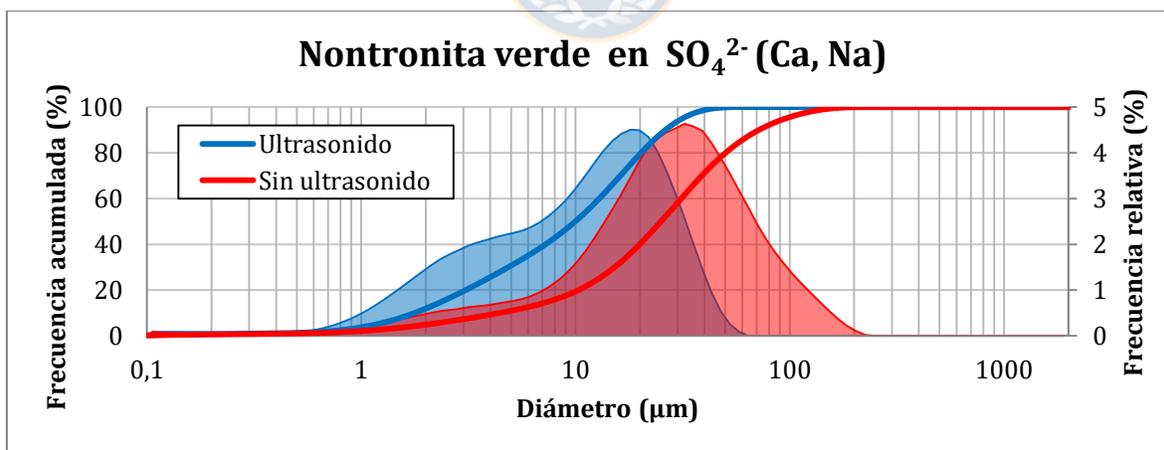


Gráfico 7.77 Nontronita verde solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Medición directa (T1), con y sin ultrasonido.

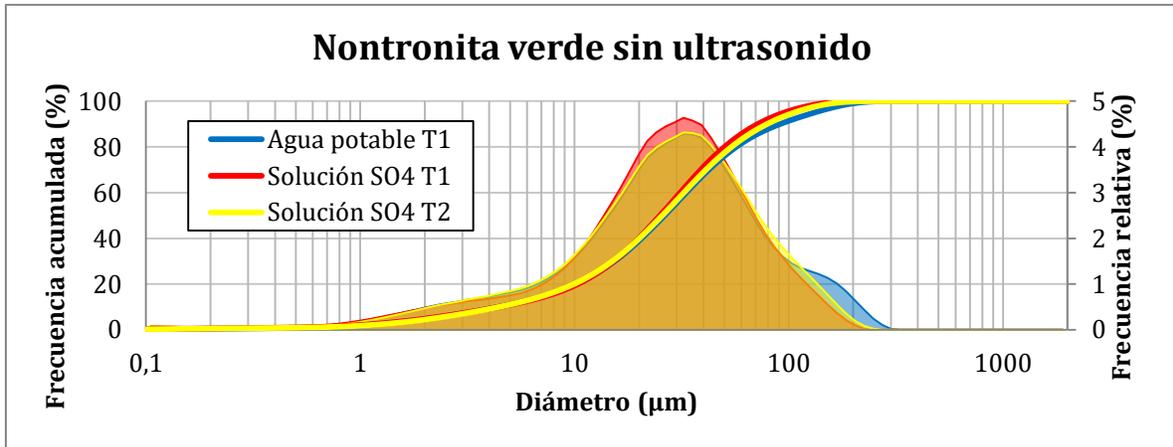


Gráfico 7.78 Nontronita verde sin ultrasonido. Medición en agua potable con medición directa (T1) y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

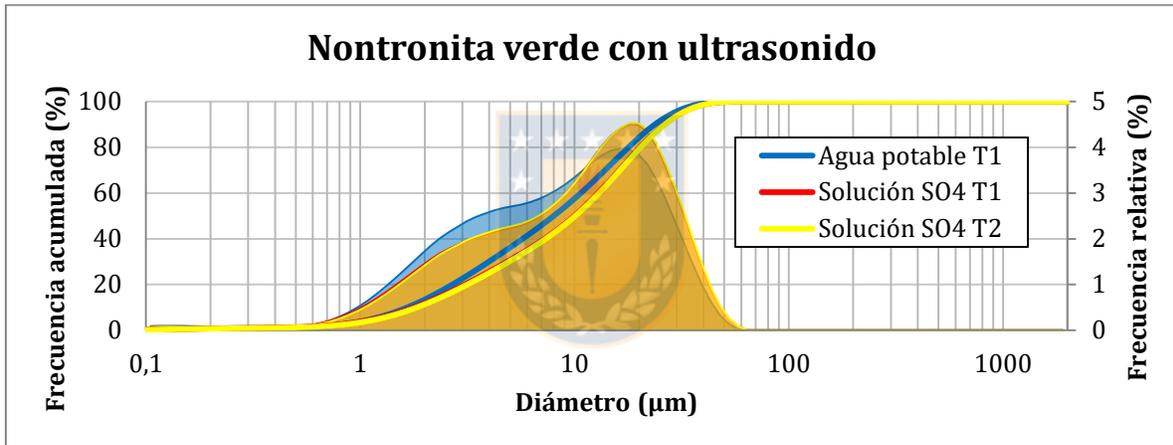


Gráfico 7.79 Nontronita verde con ultrasonido. Medición en agua potable con medición directa (T1) y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.29 Tabla con parámetros estadísticos para Nontronita verde en solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Nontronita verde- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,34	0,49	0,37	0,59
P5 (μm)	1,18	2,05	1,22	2,21
P10 (μm)	1,78	4,44	1,84	4,45
P20 (μm)	3,08	10,34	3,16	9,95
P30 (μm)	4,86	15,23	4,96	15,02
P40 (μm)	7,25	19,95	7,35	20,08
P50 (μm)	9,98	25,08	10,08	25,69
P60 (μm)	12,90	31,15	13,02	32,44
P70 (μm)	16,21	38,89	16,34	41,10
P80 (μm)	20,26	50,25	20,39	54,20
P90 (μm)	26,31	71,90	26,45	79,43
P95 (μm)	31,54	95,47	31,70	106,17
P99 (μm)	41,44	144,41	41,54	158,72
%< 147(μm)	100	99,09	100	98,49
%<2 μm	11,88	4,86	11,33	4,45

7.1.5.7.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)+ HCl; pH=2,26

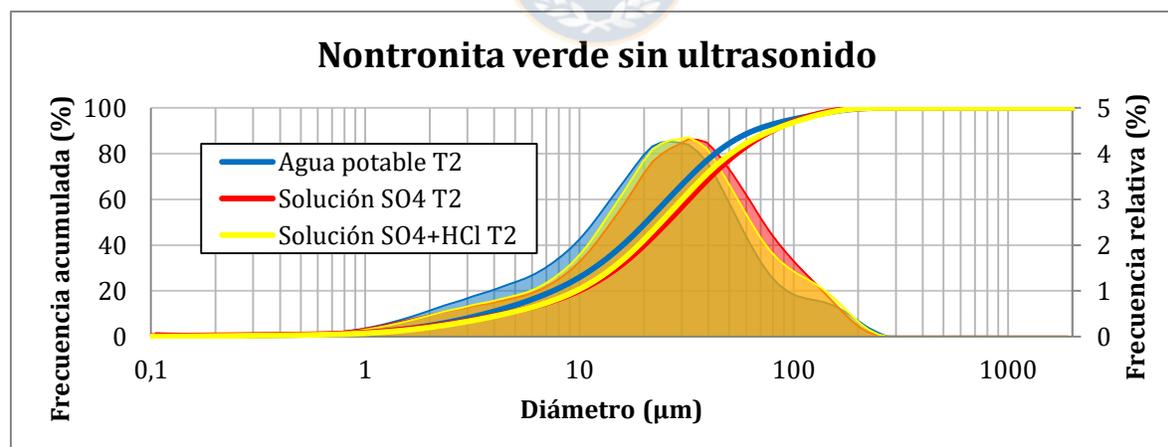


Gráfico 7.80 Nontronita verde sin ultrasonido. Mediciones en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26).

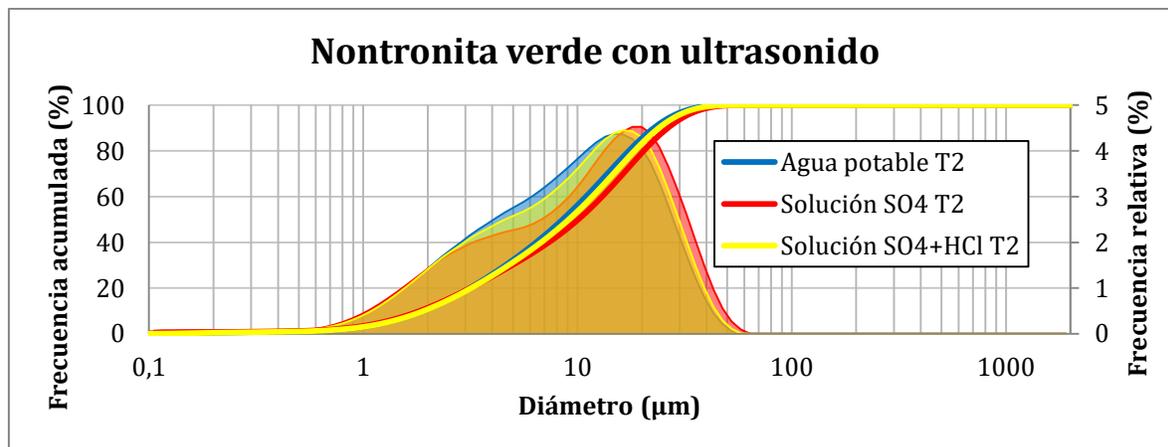


Gráfico 7.81 Nontronita verde con ultrasonido. Mediciones en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$ (pH=2,26).

Tabla 7.29 Tabla con parámetros estadísticos para Nontronita verde con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$ (pH=2,26).

Parámetro	Nontronita verde					
	T2 Agua potable		T2 Solución SO_4^{2-}		T2 $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,48	0,68	0,37	0,59	0,49	0,75
P5 (µm)	1,29	2,06	1,22	2,21	1,29	2,36
P10 (µm)	1,90	3,64	1,84	4,45	1,91	4,54
P20 (µm)	3,14	7,54	3,16	9,95	3,19	9,65
P30 (µm)	4,62	11,69	4,96	15,02	4,77	14,29
P40 (µm)	6,42	15,91	7,35	20,08	6,77	18,90
P50 (µm)	8,52	20,47	10,08	25,69	9,10	24,00
P60 (µm)	10,96	25,86	13,02	32,44	11,72	30,19
P70 (µm)	13,80	32,82	16,34	41,10	14,73	38,23
P80 (µm)	17,38	42,99	20,39	54,20	18,46	50,81
P90 (µm)	22,72	64,91	26,45	79,43	24,01	78,42
P95 (µm)	27,47	98,83	31,70	106,17	28,86	110,35
P99 (µm)	36,61	169,38	41,54	158,72	37,90	167,34
%< 147(µm)	100	98,13	100	98,49	100	98,04
%<2 µm	10,81	4,80	11,33	4,45	10,73	4,03

7.1.6.- Nontronita marrón

7.1.6.1.- Agua potable

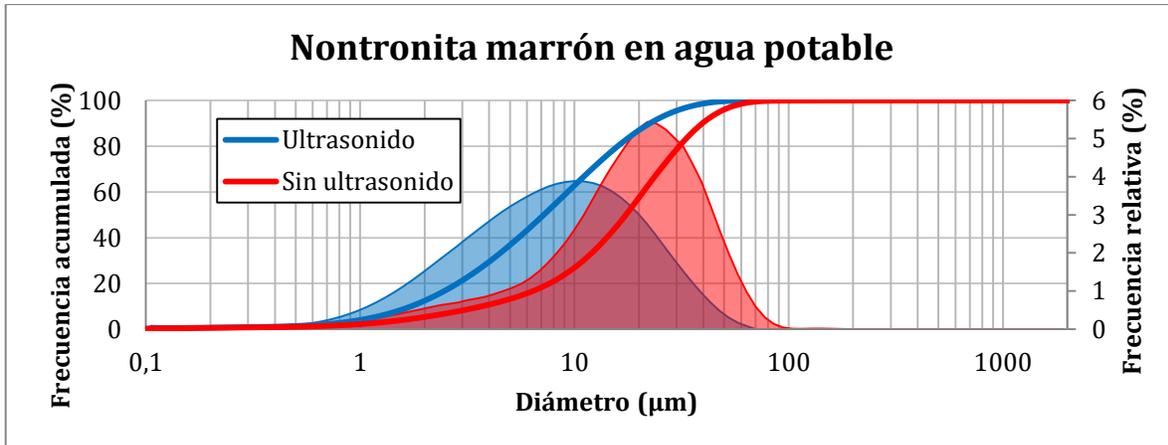


Gráfico 7.82 Nontronita marrón en agua potable. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

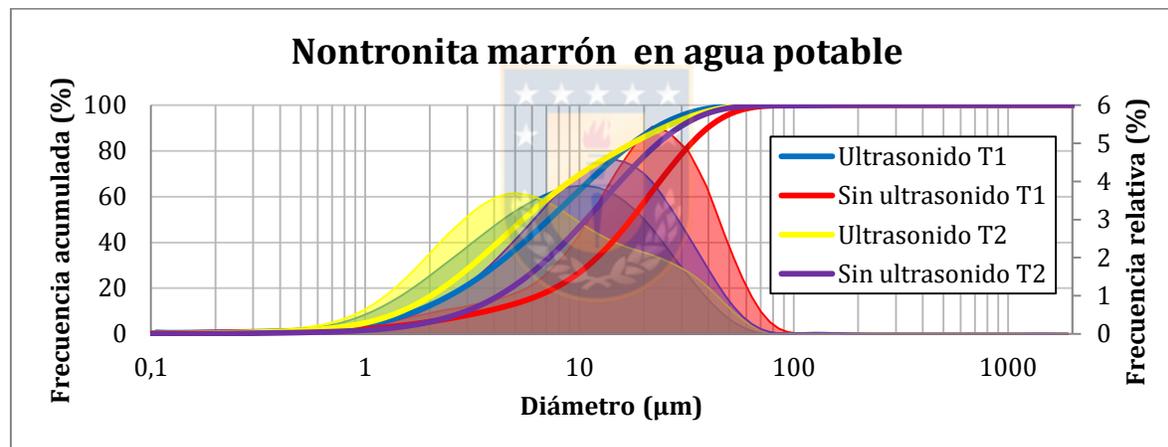


Gráfico 7.83 Nontronita marrón en agua potable. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1) con y sin ultrasonido.

7.1.6.2.- Agua destilada

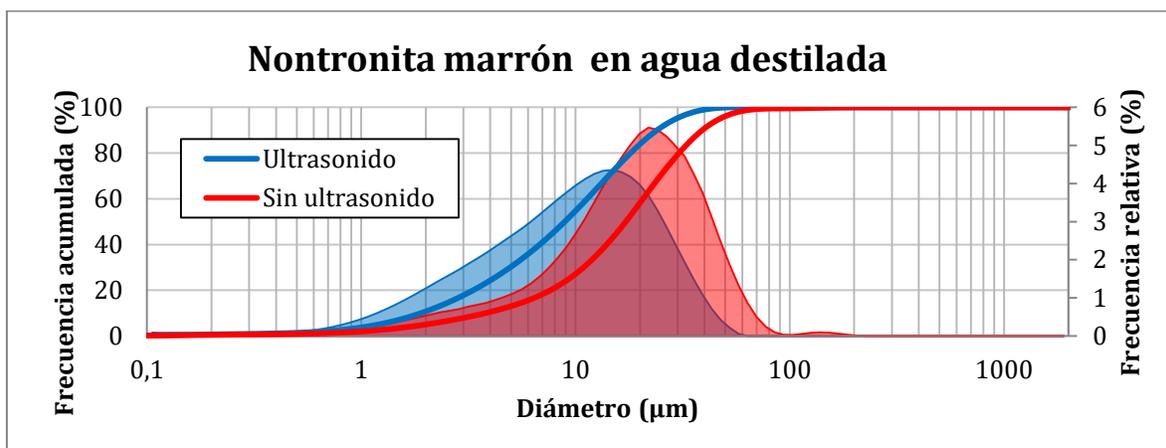


Gráfico 7.84 Nontronita marrón en agua destilada. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

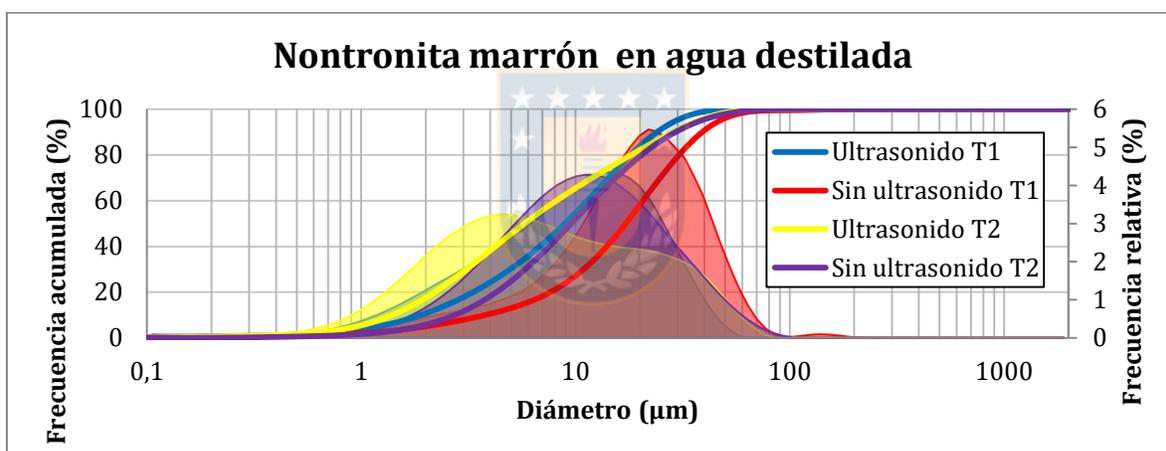


Gráfico 7.85 Nontronita marrón en agua destilada. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1) con y sin ultrasonido.

Tabla 7.30 Tabla con parámetros estadísticos para Nontronita marrón en agua potable y agua destilada. Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	Nontronita marrón- Agua potable				Nontronita marrón- Agua destilada			
	T1		T2 [24 h]		T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,36	0,48	0,39	0,73	0,34	0,55	0,32	0,72
P5 (µm)	1,14	1,90	1,02	1,95	1,20	1,99	0,96	1,85
P10 (µm)	1,73	3,70	1,49	2,97	1,90	3,80	1,40	2,74
P20 (µm)	2,85	7,65	2,29	4,78	3,33	7,63	2,20	4,27
P30 (µm)	4,07	11,00	3,15	6,58	4,96	10,90	3,10	5,83
P40 (µm)	5,49	14,14	4,16	8,52	6,81	13,98	4,23	7,55
P50 (µm)	7,19	17,39	5,46	10,74	8,91	17,16	5,78	9,57
P60 (µm)	9,31	20,93	7,28	13,37	11,34	20,65	8,15	12,09
P70 (µm)	12,06	25,23	10,15	16,68	14,25	24,88	11,97	15,41
P80 (µm)	15,94	30,86	15,16	21,24	18,09	30,45	18,16	20,36
P90 (µm)	22,52	39,65	24,45	28,92	24,07	39,14	28,52	29,39
P95 (µm)	28,98	47,65	32,92	36,26	29,54	47,21	37,42	38,49
P99 (µm)	42,26	64,05	48,53	51,83	40,17	66,63	53,67	58,50
%< 147(µm)	100	99,98	100	99,95	100	99,84	100	100
%<2 µm	12,4	5,3	16,32	5,24	10,73	5,02	17,52	5,77

7.1.6.3.- Solución CaCl₂

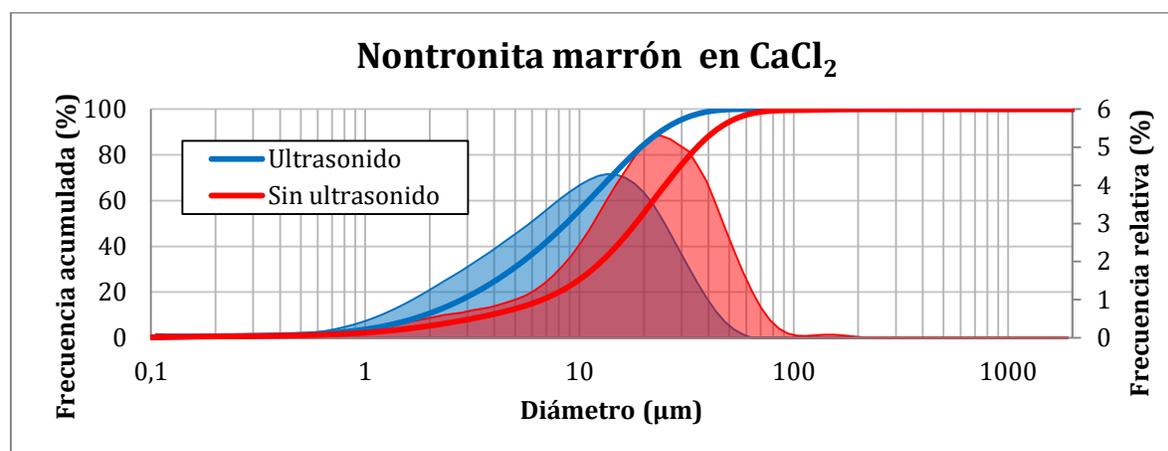


Gráfico 7.86 Nontronita marrón en solución de CaCl₂. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

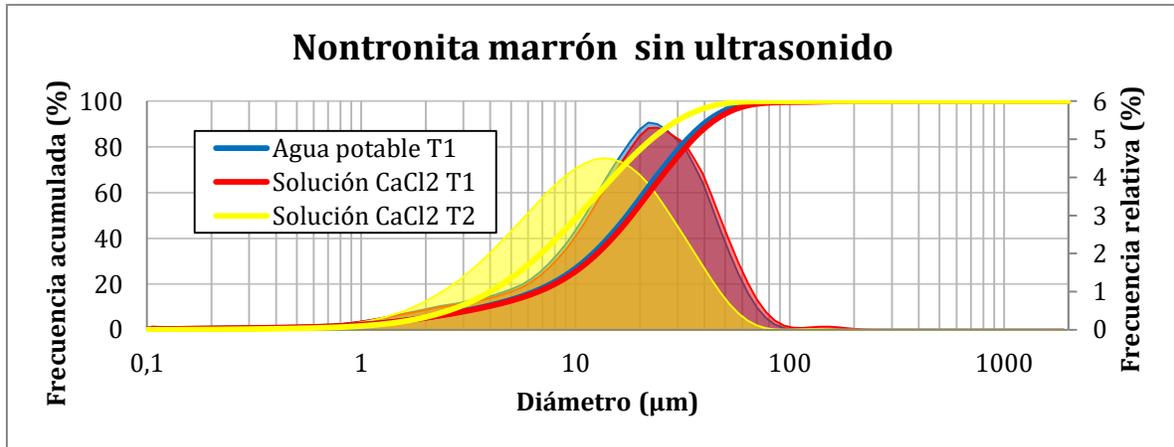


Gráfico 7.87 Nontronita marrón. Mediciones sin ultrasonido en agua potable y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

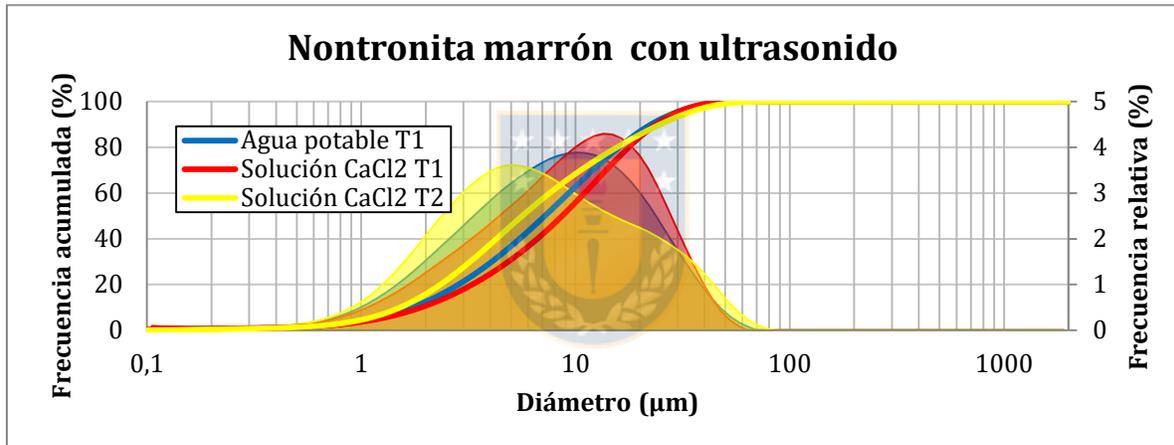


Gráfico 7.88 Nontronita marrón. Mediciones con ultrasonido en agua potable y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.31 Tabla con parámetros estadísticos para Nontronita marrón en agua potable y solución CaCl₂. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Nontronita marrón- Solución CaCl ₂			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,35	0,47	0,40	0,73
P5 (μm)	1,21	1,92	1,05	1,92
P10 (μm)	1,90	3,84	1,52	2,94
P20 (μm)	3,30	8,01	2,34	4,77
P30 (μm)	4,86	11,53	3,23	6,60
P40 (μm)	6,64	14,84	4,28	8,57
P50 (μm)	8,66	18,28	5,65	10,80
P60 (μm)	11,03	22,09	7,58	13,44
P70 (μm)	13,90	26,75	10,58	16,76
P80 (μm)	17,74	32,84	15,61	21,39
P90 (μm)	23,78	42,32	24,80	29,40
P95 (μm)	29,39	51,30	33,30	37,40
P99 (μm)	40,44	73,34	49,38	67,36
%< 147(μm)	100	99,82	99,99	99,08
%<2 μm	10,71	5,24	15,80	5,35

7.1.6.4.- Solución NaCl

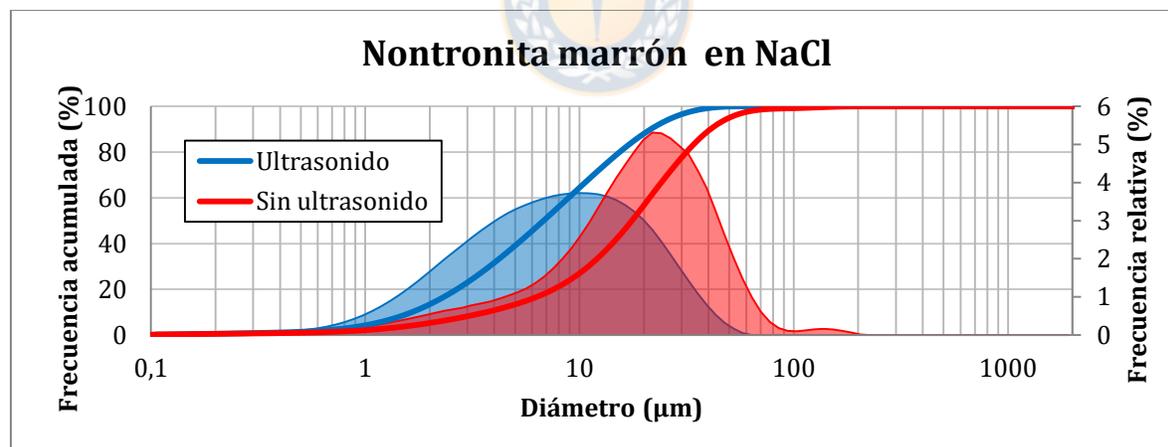


Gráfico 7.89 Nontronita marrón en NaCl. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

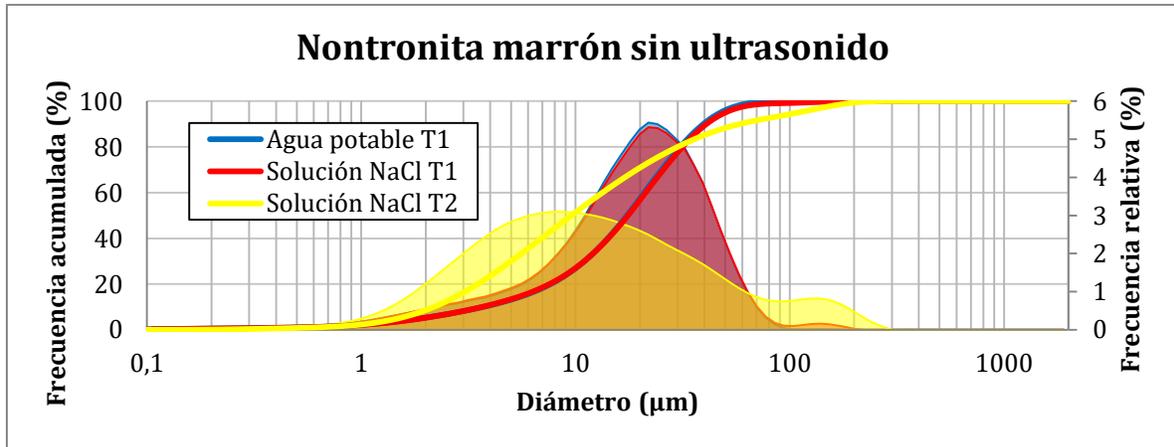


Gráfico 7.90 Nontronita marrón. Mediciones sin ultrasonido en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

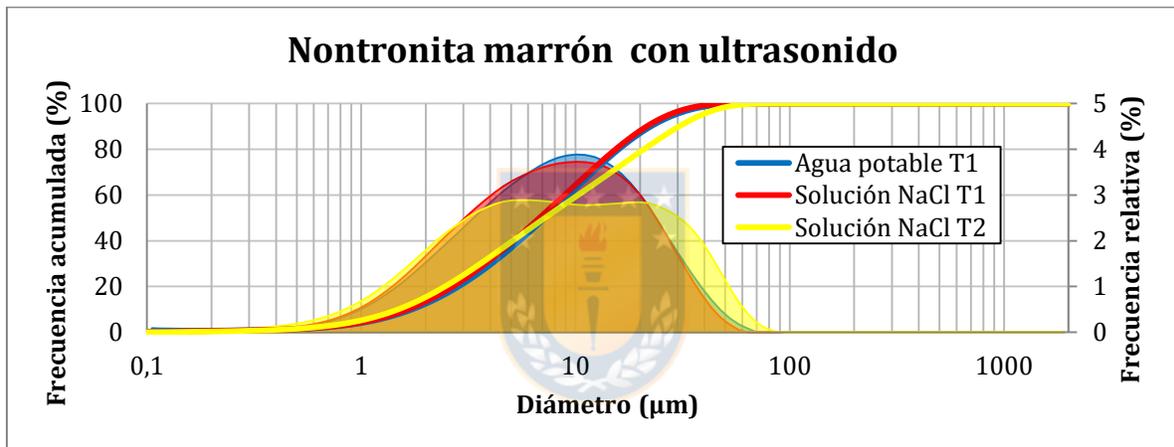


Gráfico 7.91 Nontronita marrón. Mediciones sin ultrasonido en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.32 Tabla con parámetros estadísticos para Nontronita marrón en agua potable y solución NaCl. Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	Nontronita marrón- Solución NaCl			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,36	0,51	0,39	0,60
P5 (µm)	1,10	1,92	0,98	1,49
P10 (µm)	1,65	3,67	1,49	2,18
P20 (µm)	2,67	7,57	2,46	3,49
P30 (µm)	3,80	10,99	3,61	5,01
P40 (µm)	5,14	14,22	5,10	6,94
P50 (µm)	6,80	17,56	7,21	9,57
P60 (µm)	8,89	21,23	10,28	13,38
P70 (µm)	11,61	25,68	14,68	19,30
P80 (µm)	15,39	31,58	20,82	30,03
P90 (µm)	21,52	40,93	30,46	58,64
P95 (µm)	27,22	50,09	38,68	109,14
P99 (µm)	38,42	82,97	54,16	185,58
%< 147(µm)	100	100	100	97,42
%<2 µm	13,43	5,26	15,37	8,62

7.1.6.5.- Agua de Mar

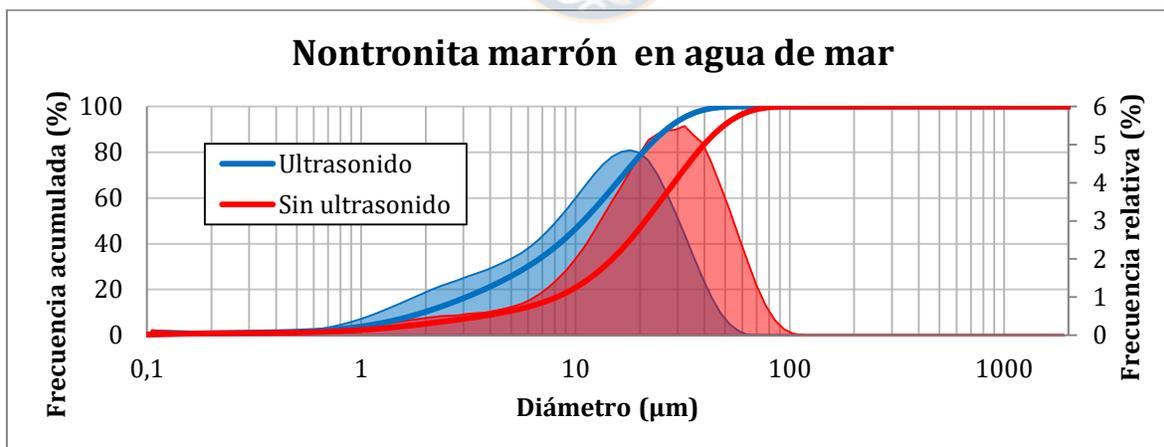


Gráfico 7.92 Nontronita marrón en agua de mar. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

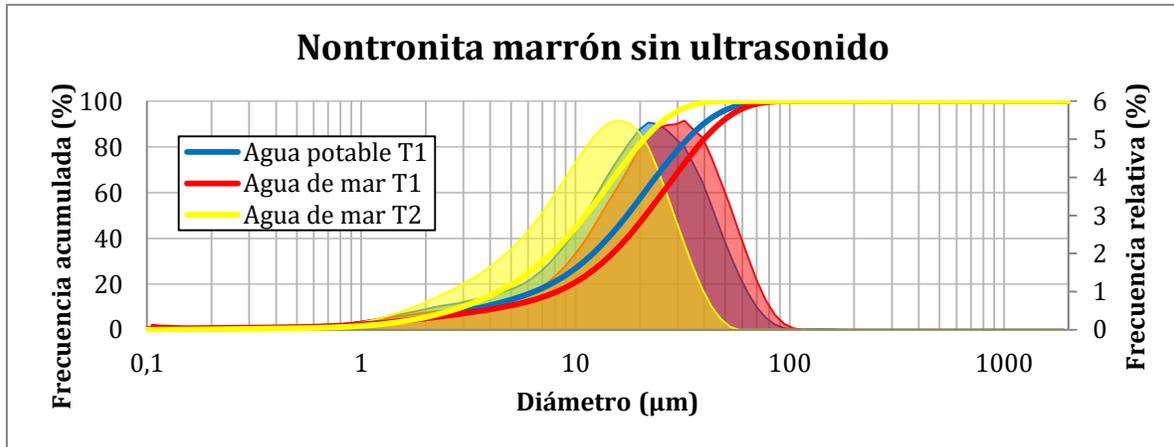


Gráfico 7.93 Nontronita marrón. Mediciones sin ultrasonido en agua potable y en agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

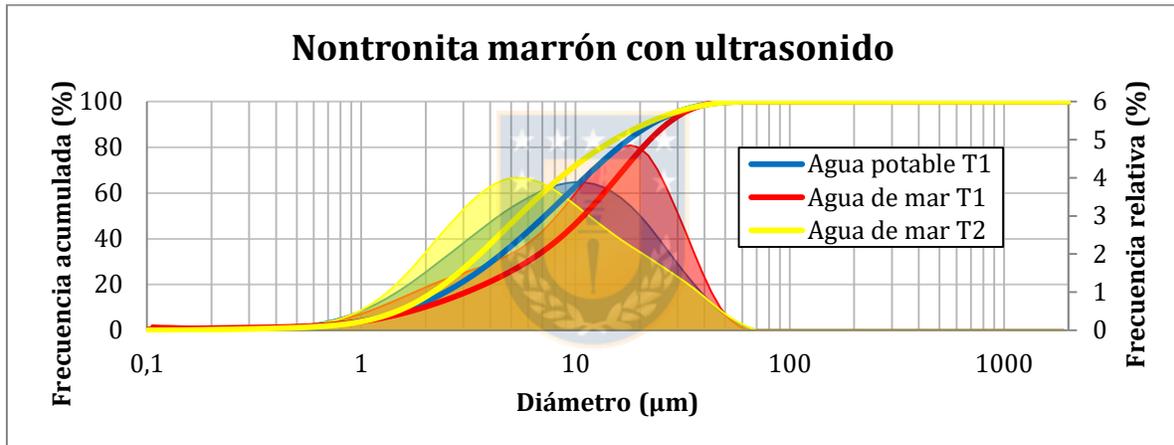


Gráfico 7.94 Nontronita marrón. Mediciones con ultrasonido en agua potable y en agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.33 Tabla con parámetros estadísticos para Nontronita marrón en agua de mar. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Nontronita marrón- Agua de mar			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,24	0,38	0,46	0,71
P5 (µm)	1,20	2,01	1,14	1,88
P10 (µm)	1,96	4,62	1,62	2,96
P20 (µm)	3,74	9,65	2,43	5,04
P30 (µm)	5,98	13,58	3,27	7,05
P40 (µm)	8,38	17,34	4,23	9,05
P50 (µm)	10,88	21,18	5,43	11,14
P60 (µm)	13,58	25,51	7,02	13,43
P70 (µm)	16,70	30,65	9,37	16,11
P80 (µm)	20,61	37,13	13,27	19,51
P90 (µm)	26,64	46,94	20,86	24,69
P95 (µm)	31,93	55,60	28,56	29,32
P99 (µm)	41,81	72,34	43,28	37,87
%< 147(µm)	100	99,99	100	100
%<2 µm	10,26	4,99	14,65	5,54

7.1.6.6.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)

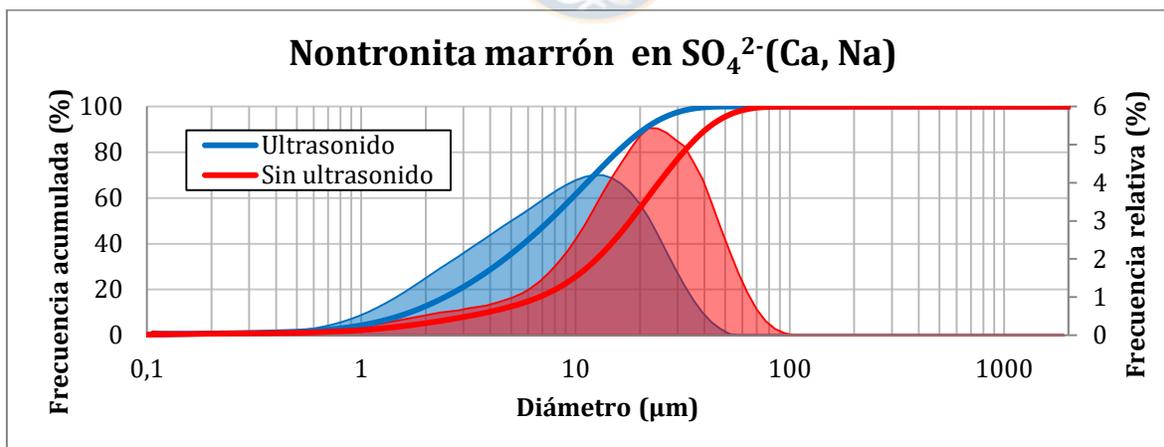


Gráfico 7.95 Nontronita marrón en solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

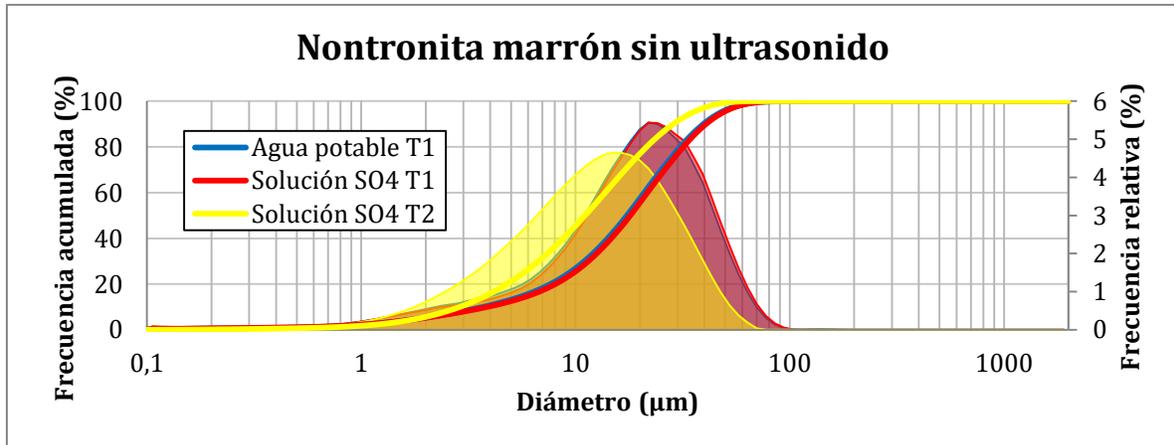


Gráfico 7.96 Nontronita marrón sin ultrasonido. Medición en agua potable con medición directa (T1) y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

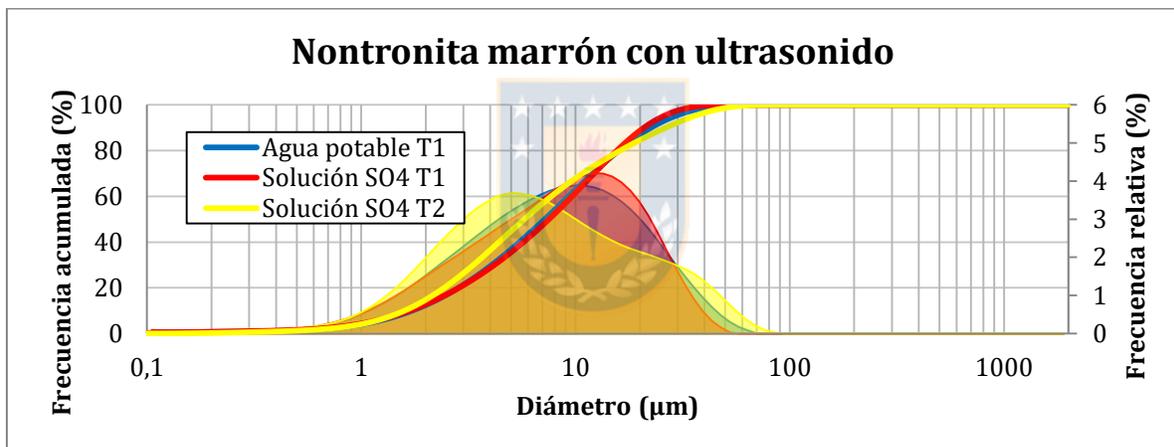
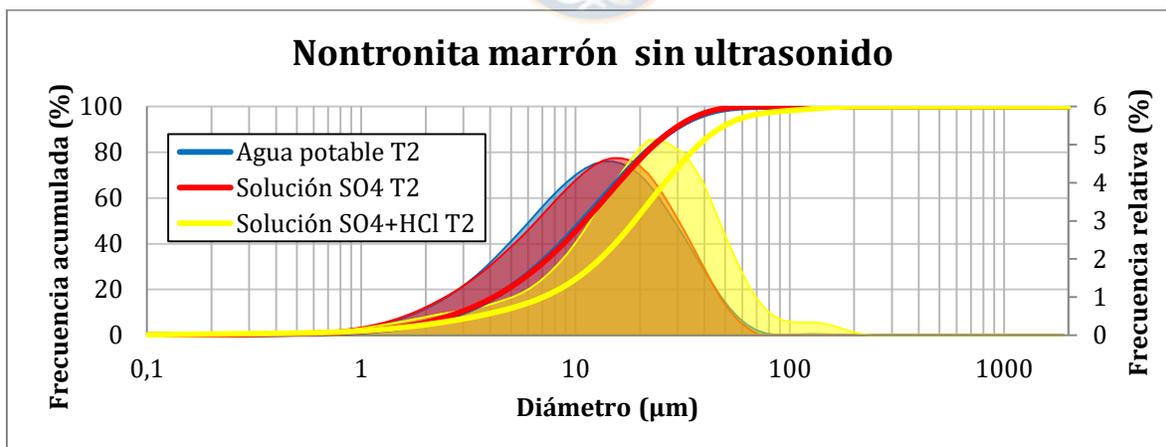


Gráfico 7.97 Nontronita marrón con ultrasonido. Medición en agua potable con medición directa (T1) y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

7.1.6.7.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)+ HCl; pH=2,26**Tabla 7.34** Tabla con parámetros estadísticos para Nontronita marrón en solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Nontronita marrón- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,30	0,45	0,43	0,68
P5 (μm)	1,09	1,91	1,11	1,86
P10 (μm)	1,69	3,87	1,59	2,89
P20 (μm)	2,86	8,05	2,44	4,78
P30 (μm)	4,18	11,47	3,34	6,71
P40 (μm)	5,72	14,68	4,40	8,78
P50 (μm)	7,52	18,01	5,77	11,08
P60 (μm)	9,64	21,67	7,71	13,76
P70 (μm)	12,23	26,10	10,79	17,05
P80 (μm)	15,60	31,88	16,17	21,50
P90 (μm)	20,84	40,74	26,36	28,66
P95 (μm)	25,59	48,85	35,64	35,23
P99 (μm)	35,07	64,91	52,68	48,06
%< 147(μm)	100	100	100	100
%<2 μm	12,73	5,27	14,78	5,65

**Gráfico 7.98** Nontronita marrón sin ultrasonido, Mediciones en T2 en agua potable, en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na)+ HCl.

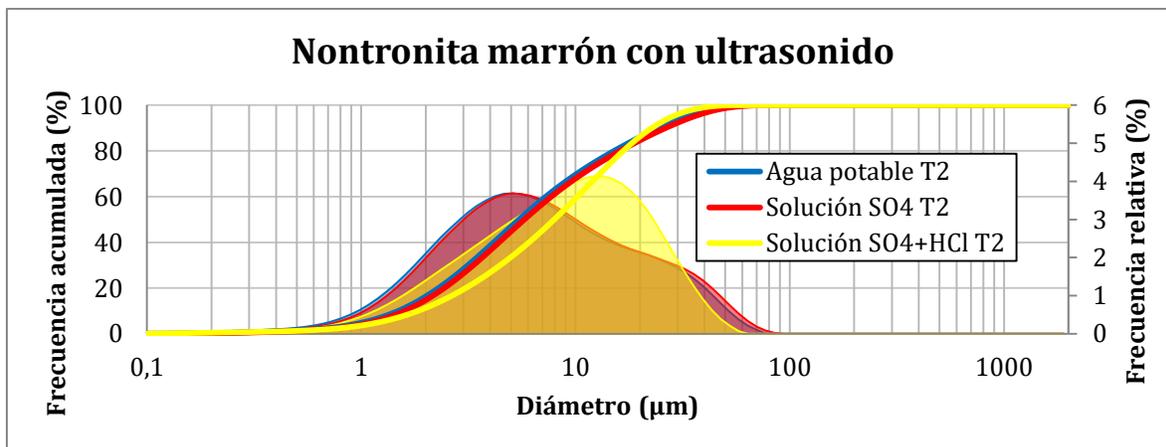


Gráfico 7.99 Nontronita marrón sin ultrasonido, Mediciones en T2 en agua potable, en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na)+ HCl.

Tabla 7.35 Tabla con parámetros estadísticos para Nontronita verde. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26).

Parámetro	Nontronita marrón					
	T2 Agua potable		T2 Solución SO_4^{2-}		T2 SO_4^{2-} +HCl	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,39	0,73	0,43	0,68	0,40	0,56
P5 (µm)	1,02	1,95	1,11	1,86	1,20	2,14
P10 (µm)	1,49	2,97	1,59	2,89	1,84	4,21
P20 (µm)	2,29	4,78	2,44	4,78	3,07	8,35
P30 (µm)	3,15	6,58	3,34	6,71	4,46	11,88
P40 (µm)	4,16	8,52	4,40	8,78	6,07	15,29
P50 (µm)	5,46	10,74	5,77	11,08	7,96	18,87
P60 (µm)	7,28	13,37	7,71	13,76	10,21	22,91
P70 (µm)	10,15	16,68	10,79	17,05	12,99	27,96
P80 (µm)	15,16	21,24	16,17	21,50	16,73	34,76
P90 (µm)	24,45	28,92	26,36	28,66	22,72	46,35
P95 (µm)	32,92	36,26	35,64	35,23	28,34	60,21
P99 (µm)	48,53	51,83	52,68	48,06	39,81	125,08
%< 147(µm)	100	99,95	100	100	100	99,60
%<2 µm	16,32	5,24	14,78	5,65	11,38	5,31

7.1.7.- Hectorita

7.1.7.1.- Agua Potable

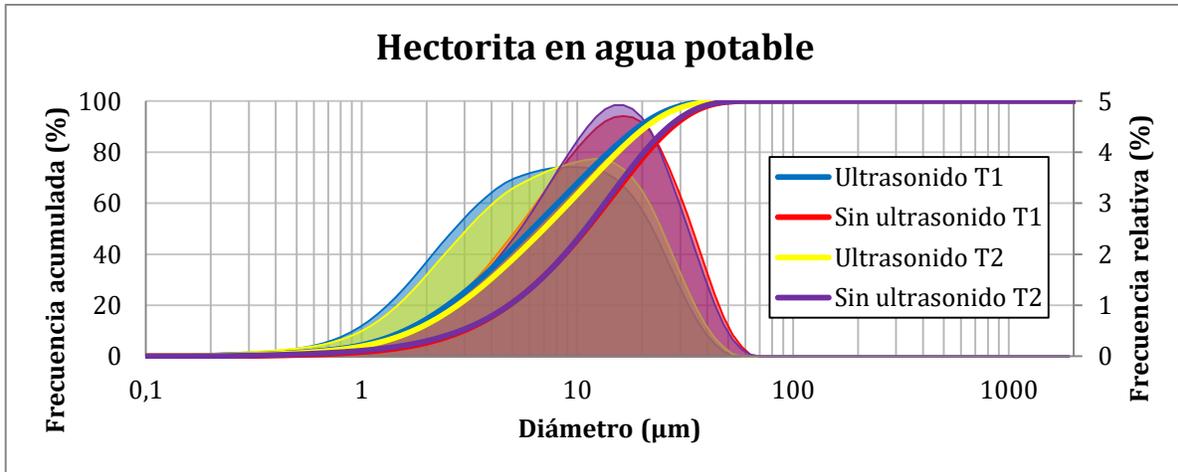


Gráfico 7.100 Hecctorita en agua potable. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

7.1.7.2.- Agua Destilada

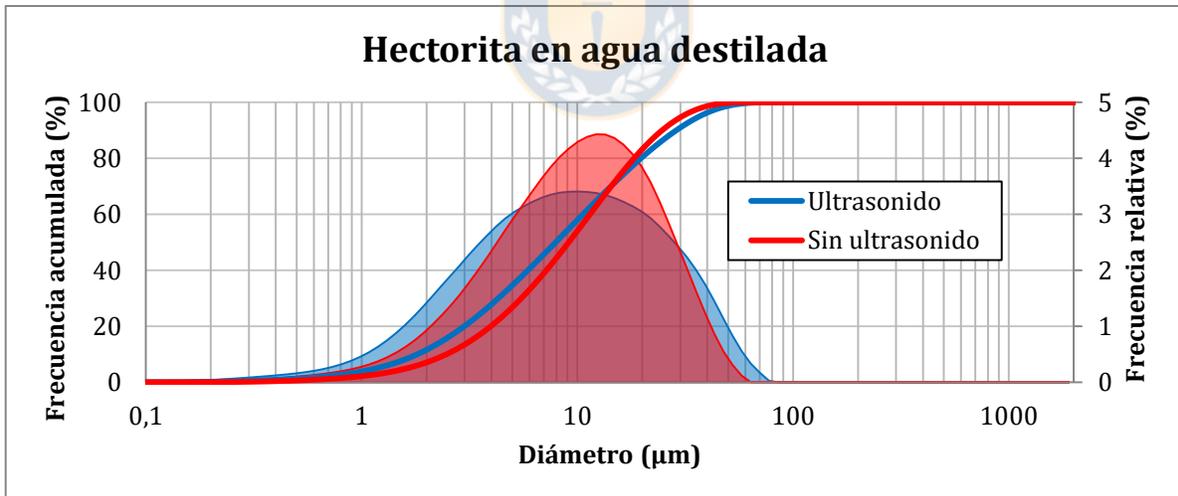


Gráfico 7.101 Hecctorita en agua destilada. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

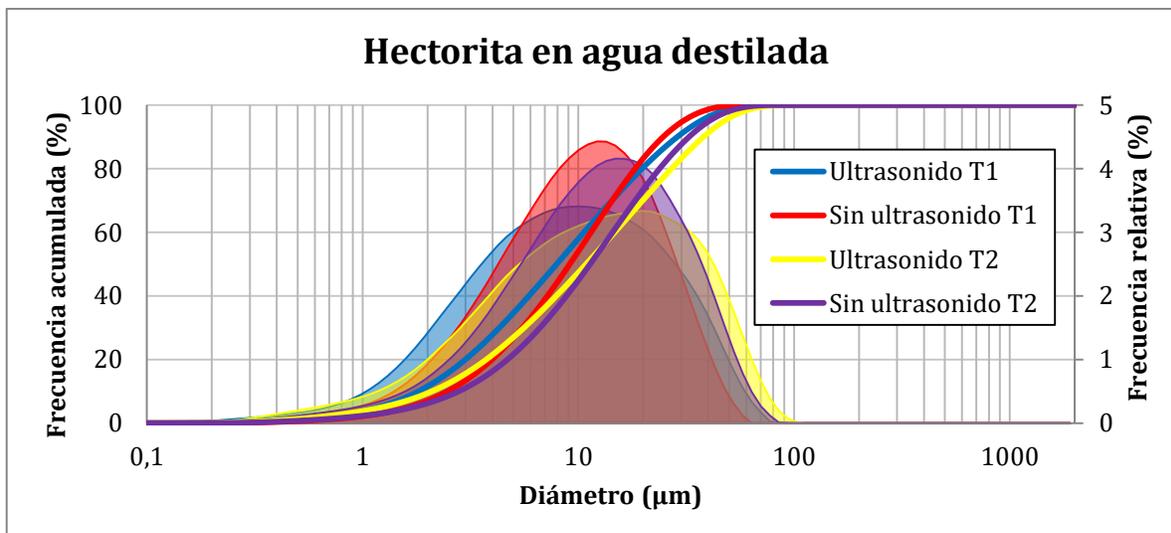


Gráfico 7.102 Hecitorita en agua destilada. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

Tabla 7.36 Tabla con parámetros estadísticos para Hecitorita en agua potable y agua destilada. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Hecitorita- Agua potable				Hecitorita- Agua destilada			
	T1		T2 [24 h]		T1		T2 [24 hr]	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,43	0,74	0,44	0,59	0,43	0,64	0,43	0,58
P5 (µm)	1,07	1,94	1,15	1,77	1,17	1,63	1,23	1,71
P10 (µm)	1,58	2,97	1,73	2,87	1,81	2,47	2,09	2,78
P20 (µm)	2,50	4,83	2,79	4,82	2,99	3,97	3,74	4,69
P30 (µm)	3,51	6,72	3,94	6,73	4,30	5,50	5,60	6,64
P40 (µm)	4,70	8,76	5,31	8,74	5,90	7,19	7,90	8,81
P50 (µm)	6,20	11,06	7,00	10,93	7,93	9,13	10,87	11,33
P60 (µm)	8,12	13,72	9,13	13,43	10,62	11,44	14,74	14,41
P70 (µm)	10,62	16,95	11,81	16,45	14,32	14,36	19,88	18,35
P80 (µm)	14,01	21,16	15,38	20,39	19,72	18,33	27,03	23,80
P90 (µm)	19,36	27,70	20,87	26,61	28,75	24,74	37,97	32,64
P95 (µm)	24,15	33,45	25,84	32,17	36,86	30,62	47,52	40,51
P99 (µm)	33,40	44,20	35,57	42,71	51,86	41,76	65,49	55,61
%< 147(µm)	100	100	100	100	100	100	100	100
%<2 µm	14,56	5,29	12,53	5,97	11,60	7,08	9,43	6,26

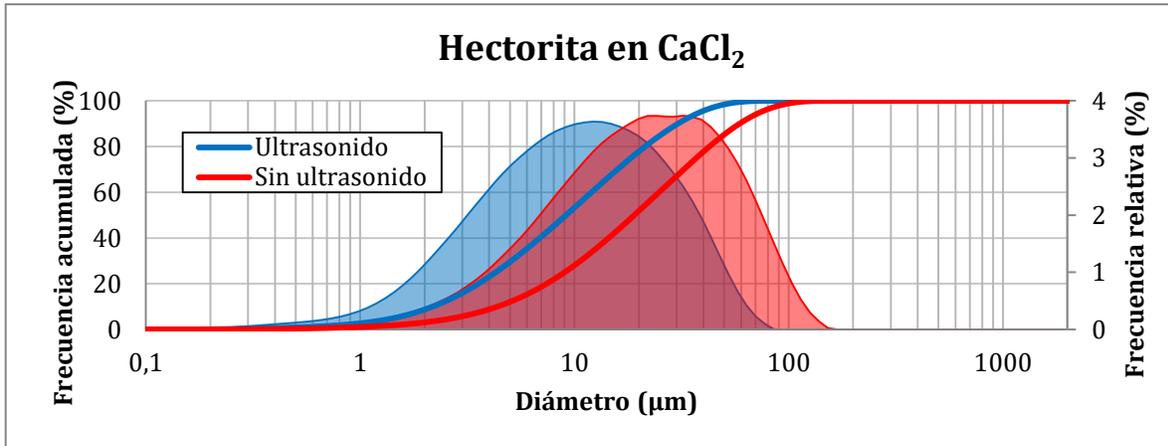
7.1.7.3.- Solución CaCl_2 

Gráfico 7.103 Hecorita en solución de CaCl_2 . Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

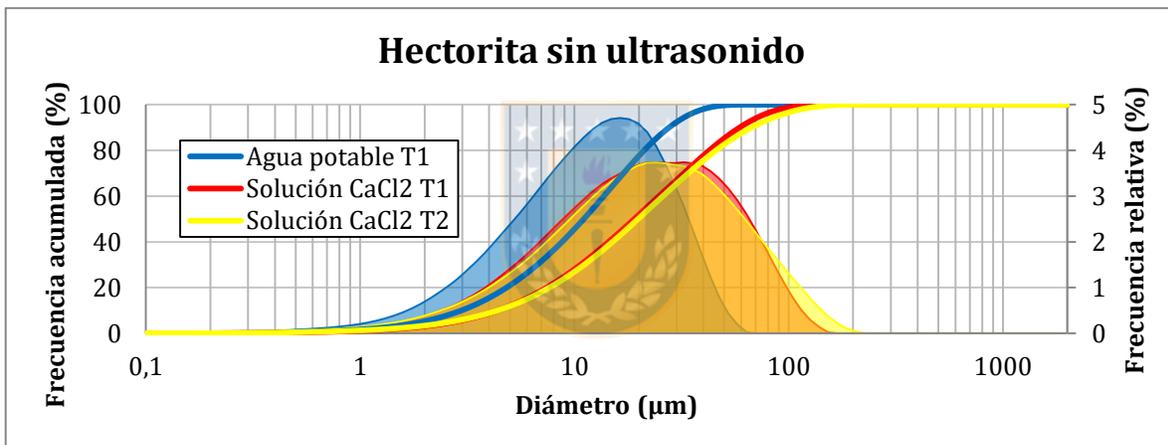


Gráfico 7.104 Hecorita medida sin ultrasonido. En agua con medición directa (T1) y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

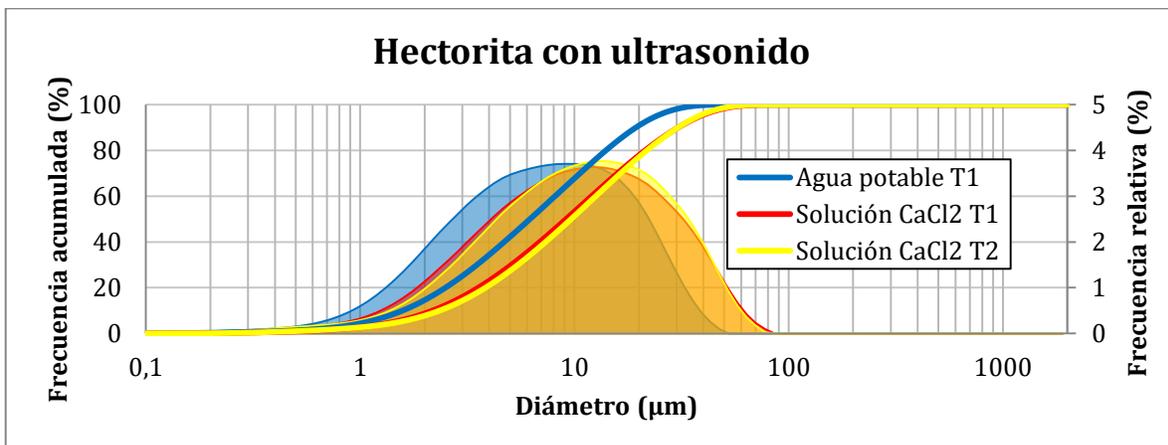


Gráfico 7.105 Hecorita medida con ultrasonido. En agua con medición directa (T1) y en solución de CaCl_2

con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.36 Tabla con parámetros estadísticos para Hectorita en agua potable y solución CaCl₂. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Hectorita- Solución CaCl ₂			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,54	0,95	0,51	0,86
P5 (µm)	1,44	2,74	1,52	2,65
P10 (µm)	2,18	4,38	2,35	4,38
P20 (µm)	3,56	7,43	3,85	7,65
P30 (µm)	5,09	10,69	5,46	11,13
P40 (µm)	6,90	14,46	7,35	15,09
P50 (µm)	9,15	19,04	9,66	19,86
P60 (µm)	12,04	24,86	12,58	25,91
P70 (µm)	15,89	32,46	16,44	34,03
P80 (µm)	21,39	42,71	21,81	45,85
P90 (µm)	30,48	59,16	30,43	67,17
P95 (µm)	38,63	73,98	37,93	88,62
P99 (µm)	54,38	102,26	52,34	132,27
%< 147(µm)	100	99,99	100	99,47
%<2 µm	8,70	3,09	7,76	3,34

7.1.7.7.- Solución NaCl

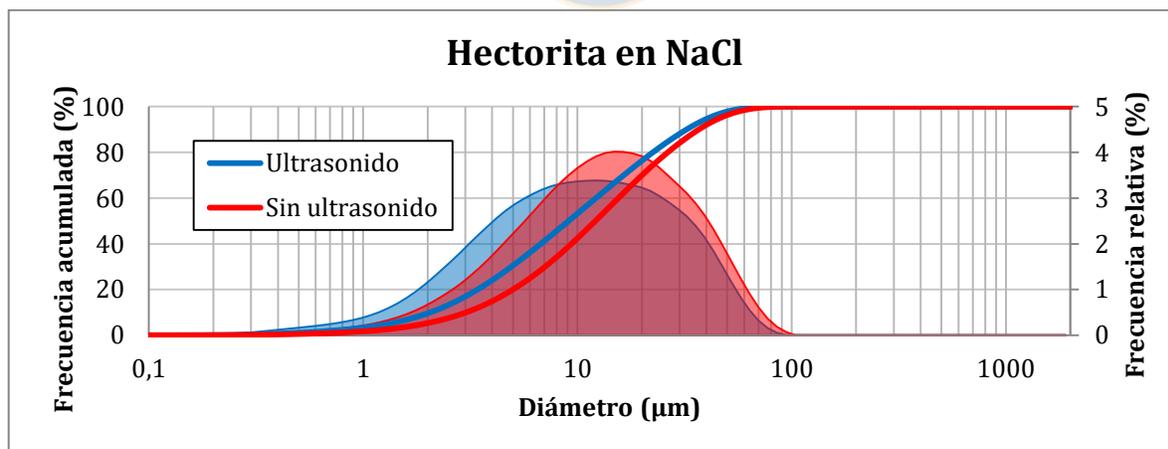


Gráfico 7.106 Hecorita en solución de NaCl. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

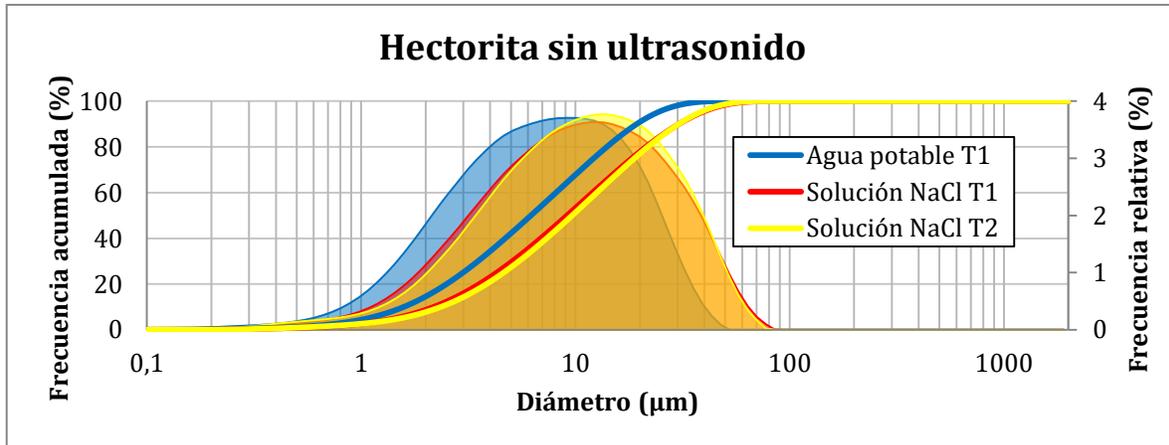


Gráfico 7.107 Hectorita sin ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

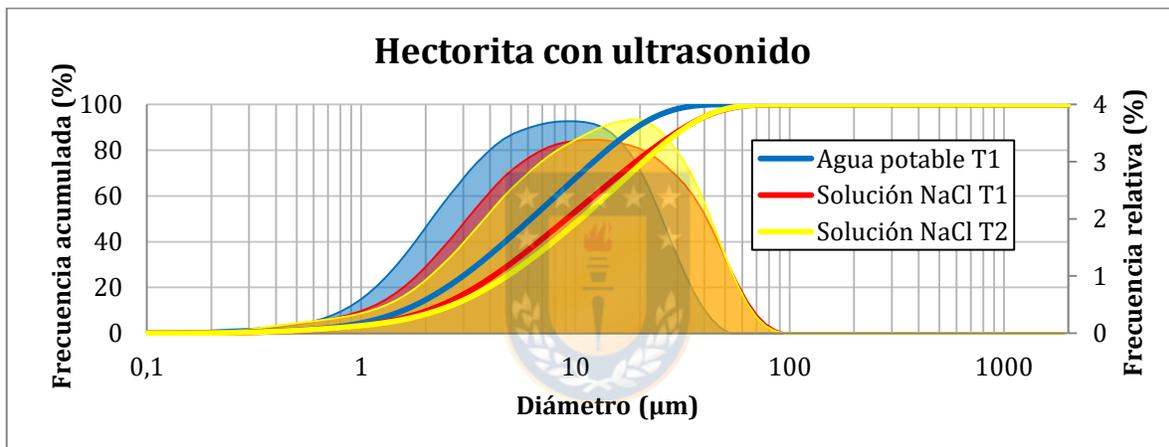


Gráfico 7.108 Hectorita con ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.37 Tabla con parámetros estadísticos para Hectorita en agua potable y solución NaCl. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Hectorita- Solución NaCl			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,48	0,72	0,46	0,69
P5 (µm)	1,31	1,93	1,38	2,18
P10 (µm)	2,06	3,02	2,29	3,56
P20 (µm)	3,42	5,00	3,93	6,07
P30 (µm)	4,92	7,07	5,73	8,69
P40 (µm)	6,76	9,38	7,89	11,63
P50 (µm)	9,11	12,14	10,57	15,08
P60 (µm)	12,22	15,53	13,91	19,24
P70 (µm)	16,47	20,04	18,17	24,53
P80 (µm)	22,52	26,45	23,90	31,67
P90 (µm)	32,36	36,92	32,92	42,60
P95 (µm)	40,94	46,23	40,85	52,35
P99 (µm)	57,24	64,83	56,16	71,16
%< 147(µm)	100	100	100	100
%<2 µm	9,60	5,30	8,31	4,42

7.1.7.5.- Agua de Mar

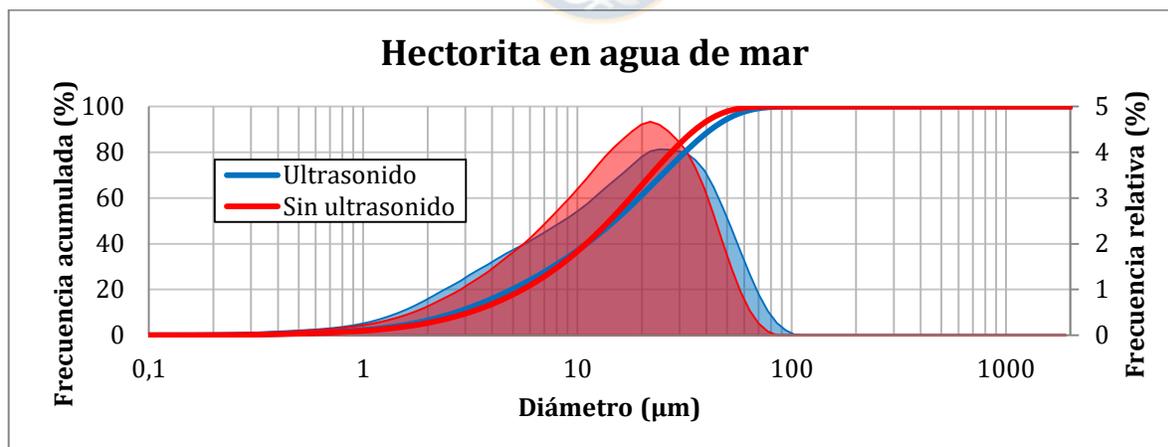


Gráfico 7.109 Hecorita en agua de mar. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

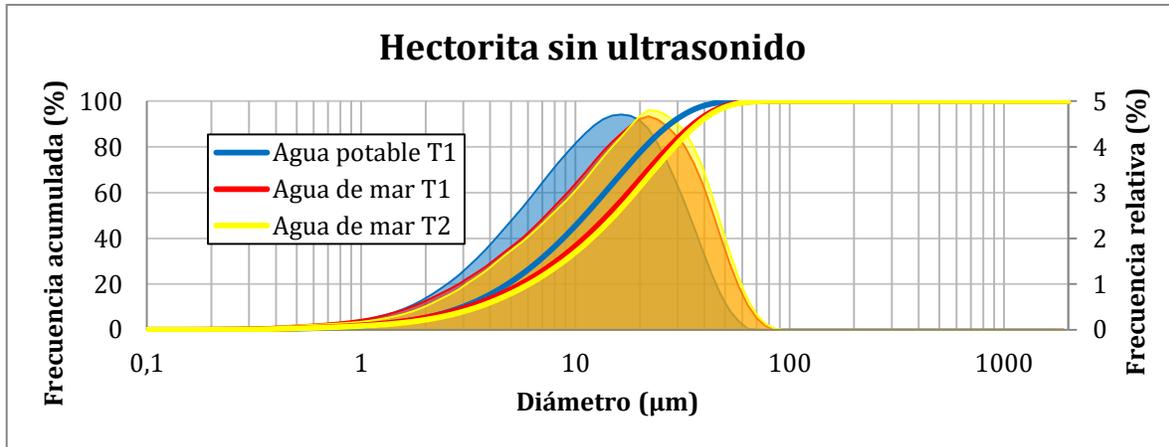


Gráfico 7.110 Hecitorita sin ultrasonido en agua potable y en solución de agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

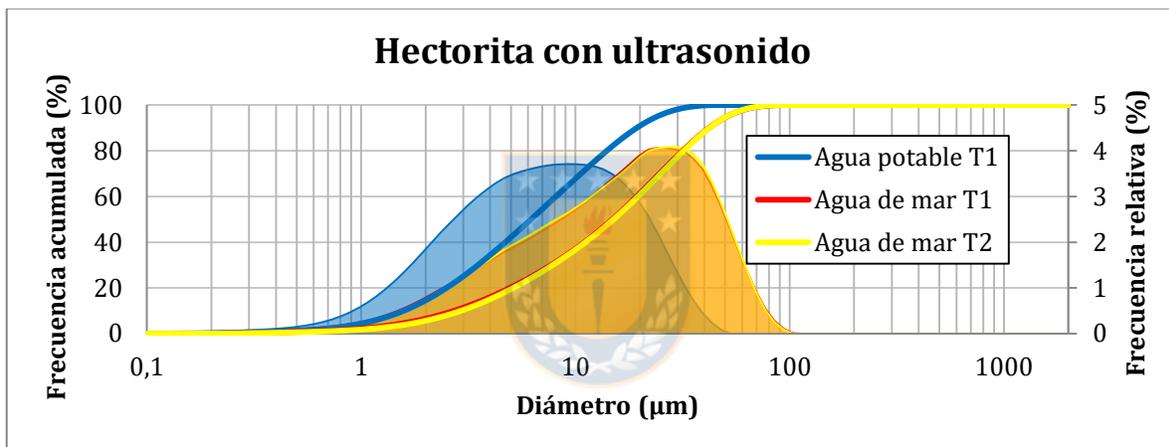


Gráfico 7.111 Hecitorita con ultrasonido en agua potable y en solución de agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.38 Tabla con parámetros estadísticos para Hectorita en agua potable y agua de mar. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	Hectorita- Agua de mar			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,58	0,65	0,68	0,70
P5 (µm)	1,68	1,91	1,85	2,18
P10 (µm)	2,72	3,14	2,92	3,51
P20 (µm)	4,95	5,56	5,13	6,07
P30 (µm)	7,70	8,15	7,84	8,85
P40 (µm)	11,04	10,98	11,16	11,88
P50 (µm)	14,90	14,11	15,08	15,22
P60 (µm)	19,37	17,69	19,63	18,94
P70 (µm)	24,76	21,93	25,08	23,32
P80 (µm)	31,74	27,43	32,06	28,98
P90 (µm)	42,04	35,64	42,17	37,22
P95 (µm)	51,04	42,57	50,95	44,37
P99 (µm)	68,24	55,74	67,70	57,77
%< 147(µm)	100	100	100	100
%<2 µm	6,52	5,35	5,67	4,39

7.1.7.6.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)

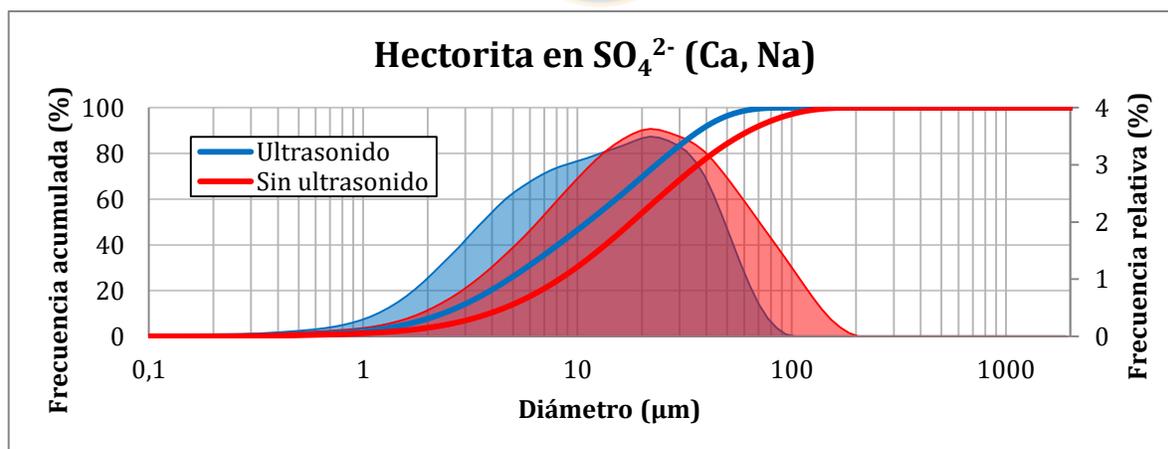


Gráfico 7.112 Hecorita en solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

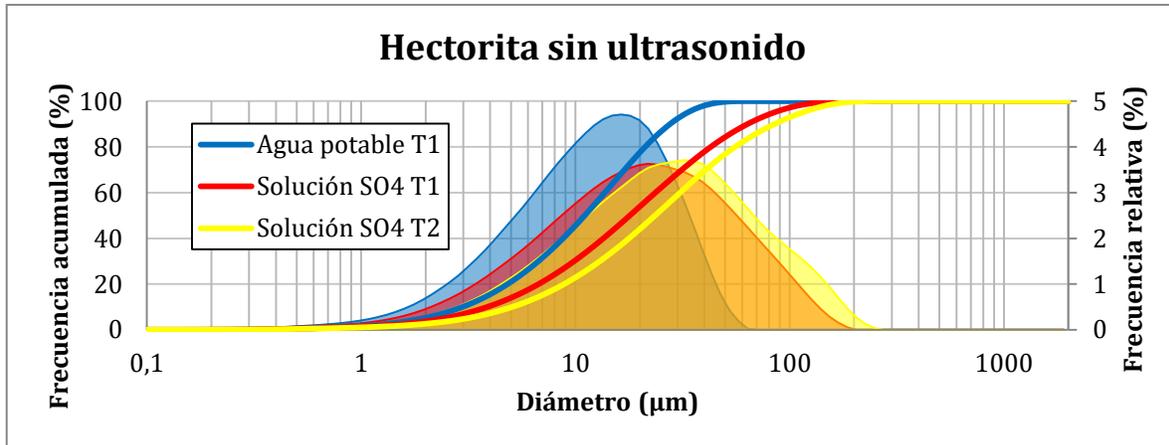


Gráfico 7.113 Hectorita sin ultrasonido, Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable y en solución de SO_4^{2-} (Ca, Na).

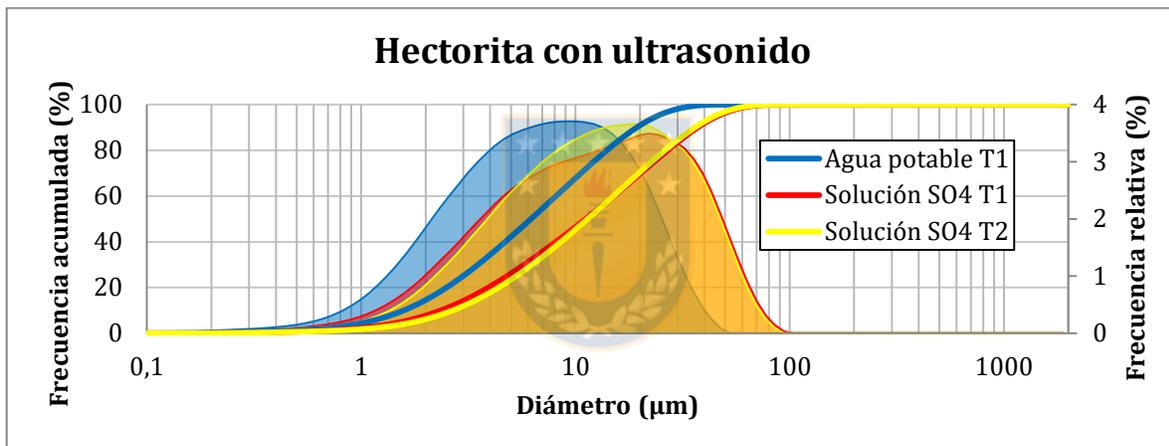


Gráfico 7.114 Hectorita con ultrasonido, Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable y en solución de SO_4^{2-} (Ca, Na).

Tabla 7.39 Tabla con parámetros estadísticos para Hectorita en agua potable y solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	Hectorita- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,62	0,82	0,68	0,97
P5 (μm)	1,55	2,42	1,78	3,11
P10 (μm)	2,36	3,88	2,68	5,07
P20 (μm)	3,93	6,74	4,38	8,86
P30 (μm)	5,76	9,87	6,29	13,00
P40 (μm)	8,11	13,52	8,57	17,81
P50 (μm)	11,18	17,97	11,42	23,55
P60 (μm)	15,14	23,65	15,04	30,84
P70 (μm)	20,22	31,40	19,75	40,61
P80 (μm)	27,01	42,90	26,20	55,68
P90 (μm)	37,24	63,73	36,19	85,20
P95 (μm)	46,06	84,27	44,78	114,27
P99 (μm)	63,04	124,68	60,96	166,82
%< 147(μm)	100	99,67	100	98,00
%<2 μm	7,72	3,73	6,15	2,64

7.1.7.7.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)+ HCl; pH=2,26

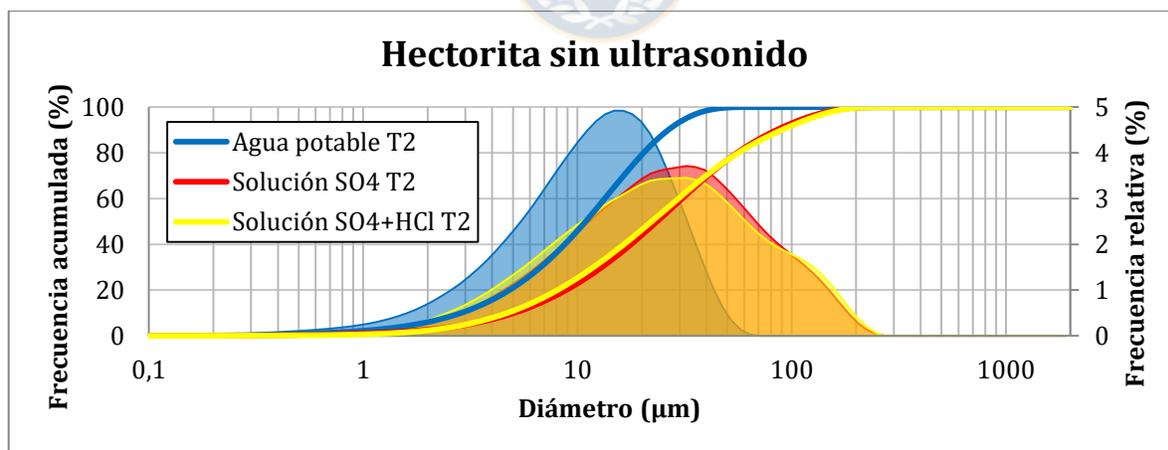


Gráfico 7.115 Hectorita sin ultrasonido en agua potable y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y SO_4^{2-} (Ca, Na) +HCl (pH=2,26). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2).

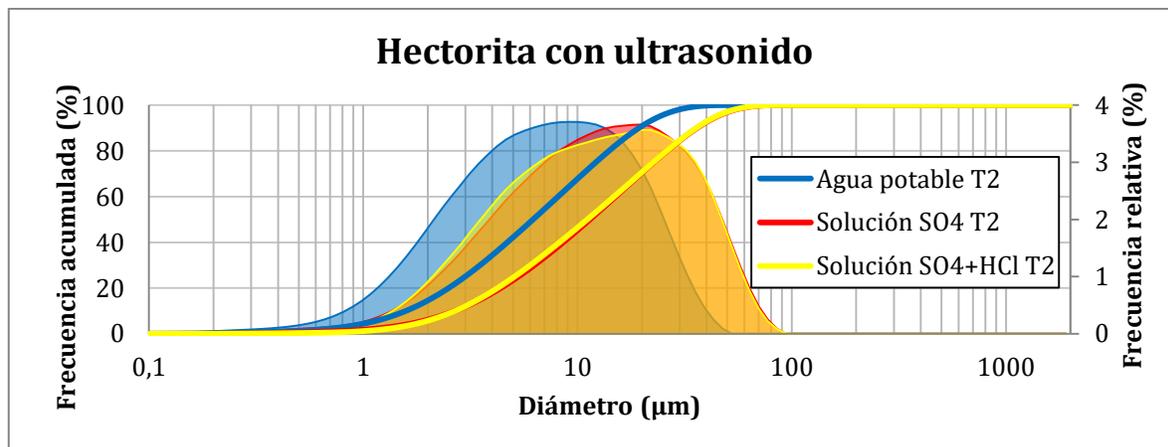


Gráfico 7.116 Hecitorita con ultrasonido en agua potable y en solución $\text{SO}_4^{2-}(\text{Ca}, \text{Na})$ y $\text{SO}_4^{2-}(\text{Ca}, \text{Na}) + \text{HCl}$ (pH=2,26). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.40 Tabla con parámetros estadísticos para Hecitorita con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, solución $\text{SO}_4^{2-}(\text{Ca}, \text{Na})$ y solución $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCl}$ (pH=2,26).

Parámetro	Hecitorita					
	T2 Agua Potable		T2 Solución SO_4^{2-}		T2 $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCl}$	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,44	0,59	0,68	0,97	0,93	1,30
P5 (µm)	1,15	1,77	1,78	3,11	1,87	3,03
P10 (µm)	1,73	2,87	2,68	5,07	2,68	4,72
P20 (µm)	2,79	4,82	4,38	8,86	4,23	8,08
P30 (µm)	3,94	6,73	6,29	13,00	6,02	11,90
P40 (µm)	5,31	8,74	8,57	17,81	8,25	16,51
P50 (µm)	7,00	10,93	11,42	23,55	11,11	22,22
P60 (µm)	9,13	13,43	15,04	30,84	14,82	29,66
P70 (µm)	11,81	16,45	19,75	40,61	19,62	39,88
P80 (µm)	15,38	20,39	26,20	55,68	26,09	56,31
P90 (µm)	20,87	26,61	36,19	85,20	35,92	90,04
P95 (µm)	25,84	32,17	44,78	114,27	44,34	121,36
P99 (µm)	35,57	42,71	60,96	166,82	60,33	174,84
%< 147(µm)	100	100	100	98,00	100	97,48
%<2 µm	12,53	5,97	6,15	2,64	5,74	2,35

7.1.8.- Illita (SW1)

Los estándares de Illita (SW1, SW4, SW6) responden de manera similar a los parámetros instrumentales y a las variaciones en las condiciones de medición. Se presentan a continuación los resultados del estándar SW1.

7.1.8.1.- Agua Potable

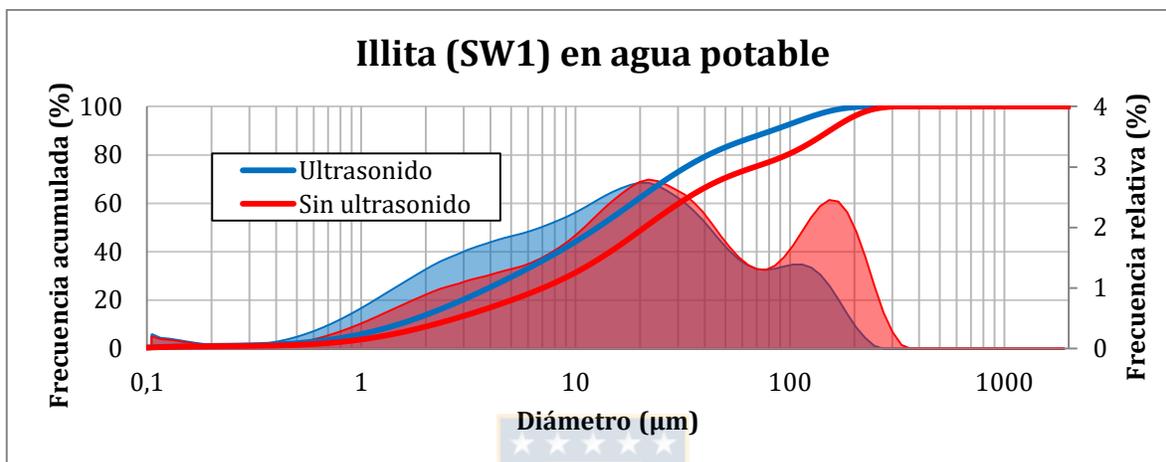


Gráfico 7.117 Illita (SW1) en agua potable con medición directa (T1), con y sin ultrasonido.

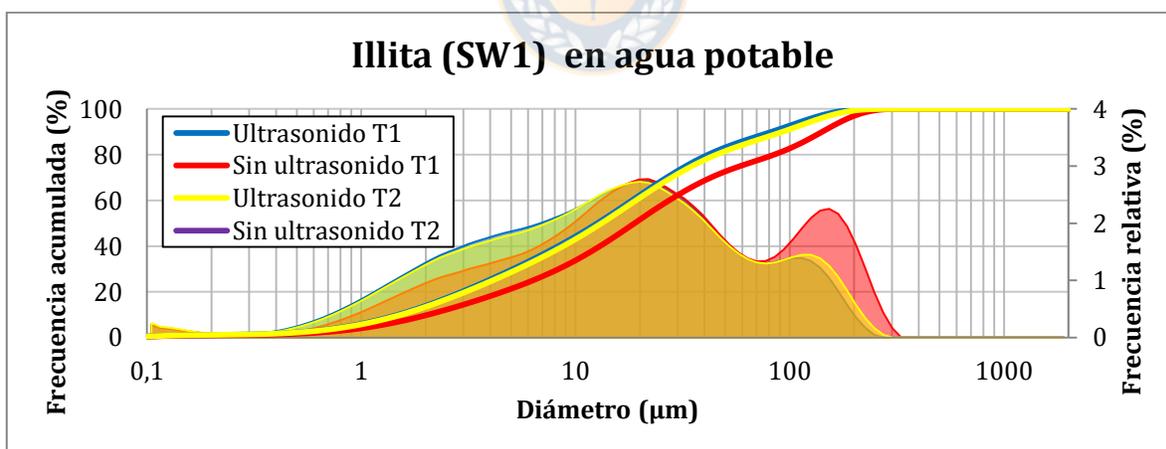


Gráfico 7.118 Illita (SW1) en agua potable. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

7.1.8.2.- Agua Destilada

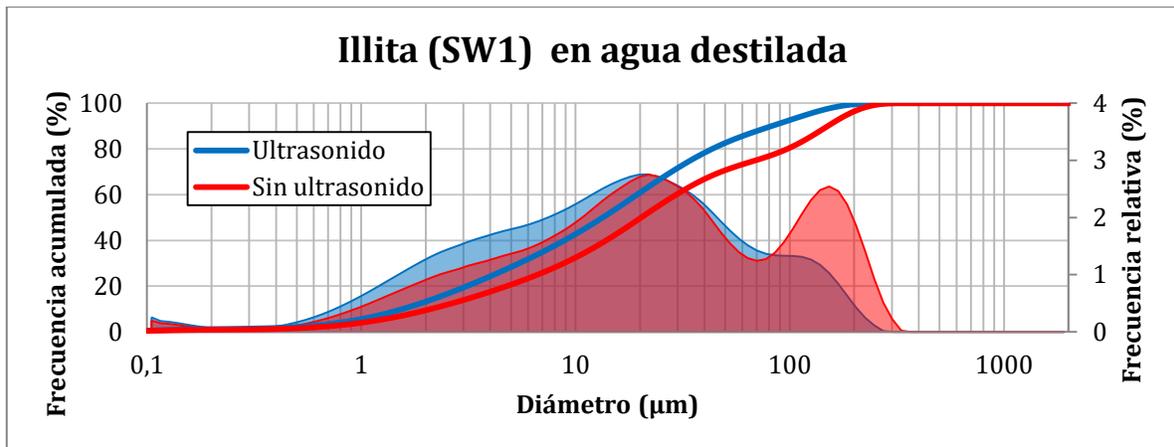


Gráfico 7.119 Illita (SW1) en agua destilada. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

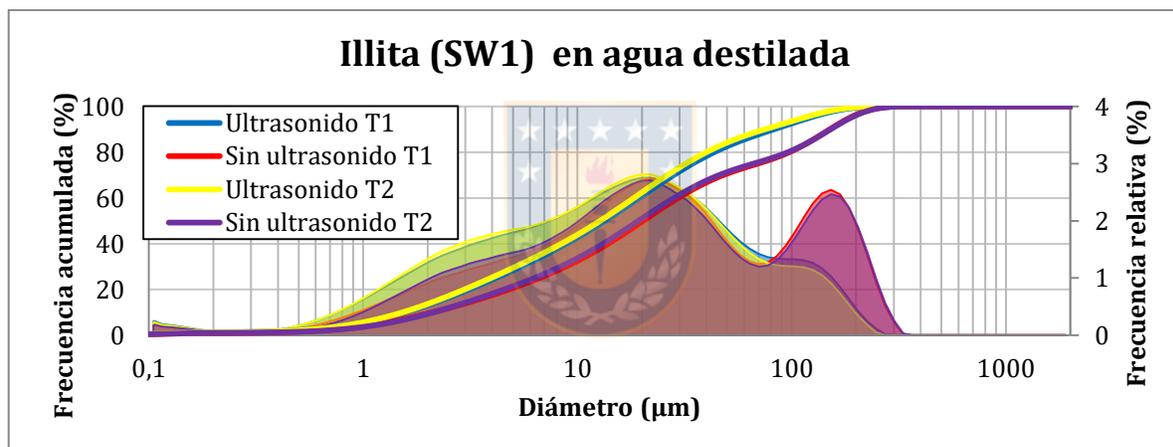


Gráfico 7.120 Illita (SW1) en agua destilada. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

Tabla 7.40 Tabla con parámetros estadísticos para Illita (SW1) en agua potable y agua destilada. Mediciones directas (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Parámetro	Illita (SW1)- Agua potable				Illita (SW1)- Agua destilada			
	T1		T2 [24 h]		T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,16	0,22	0,15	0,22	U	S/U	0,16	0,21
P5 (µm)	0,88	1,23	0,90	1,23	0,15	0,25	0,92	1,25
P10 (µm)	1,49	2,19	1,53	2,19	0,92	1,18	1,53	2,13
P20 (µm)	2,95	5,01	3,07	5,01	1,56	2,12	2,97	4,56
P30 (µm)	5,12	9,30	5,40	9,30	3,11	4,78	5,15	8,35
P40 (µm)	8,32	14,50	8,77	14,50	5,47	8,83	8,42	13,17
P50 (µm)	12,65	20,91	13,23	20,91	8,88	13,91	12,75	19,26
P60 (µm)	18,38	30,37	19,15	30,37	13,41	20,28	18,35	28,22
P70 (µm)	26,69	48,50	28,10	48,50	19,37	29,58	26,34	45,83
P80 (µm)	41,60	96,81	45,45	96,81	28,08	47,95	40,01	95,70
P90 (µm)	82,14	153,05	92,48	153,05	43,47	97,27	74,65	151,56
P95 (µm)	118,07	190,10	131,10	190,10	82,28	150,43	112,57	187,95
P99 (µm)	172,56	249,04	190,20	249,04	120,09	185,57	171,71	246,93
%< 147(µm)	96,51	88,97	97,65	88,97	180,35	244,33	97,82	89,21
%<2 µm	13,44	9,09	13,90	9,09	97,33	89,39	13,64	9,31

7.1.8.3.- Solución CaCl₂

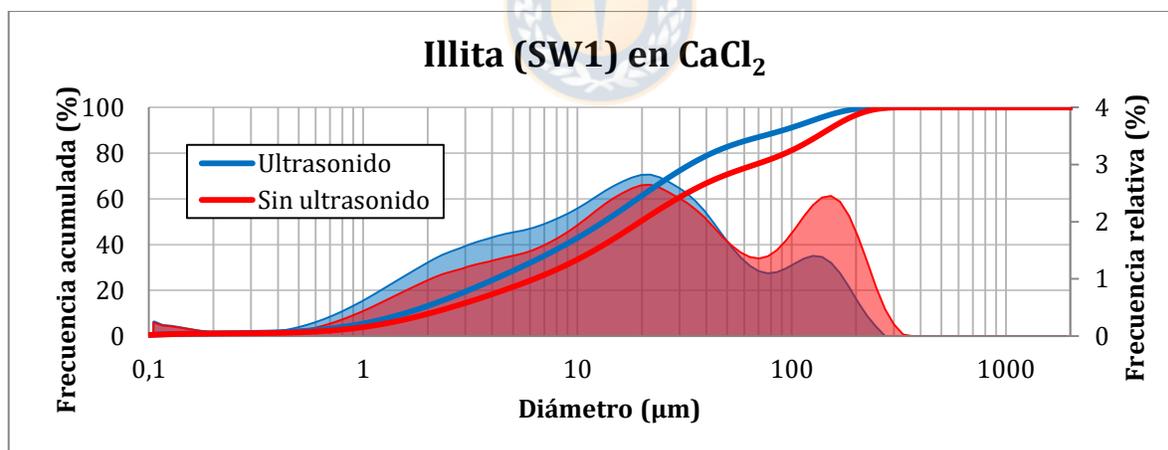


Gráfico 7.121 Illita (SW1) en solución de CaCl₂, Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

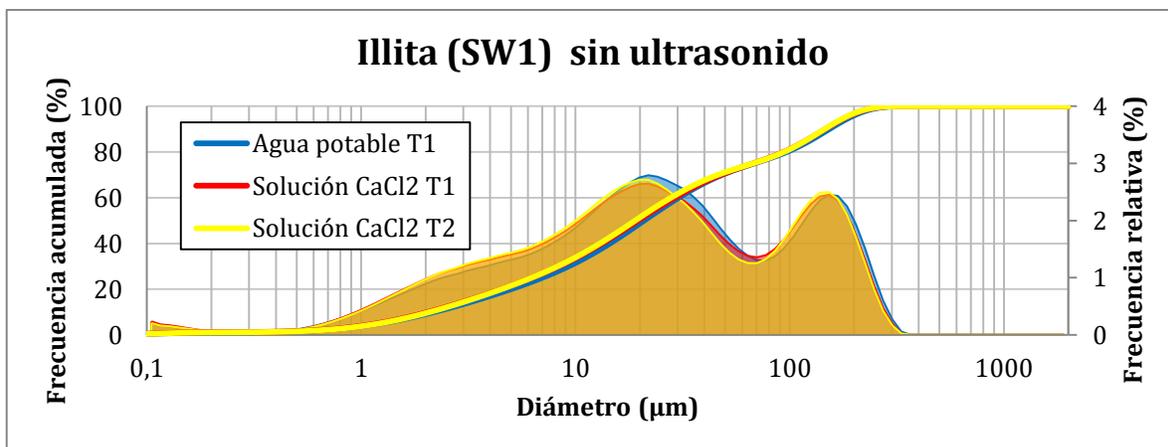


Gráfico 7.122 Illita (SW1) sin ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

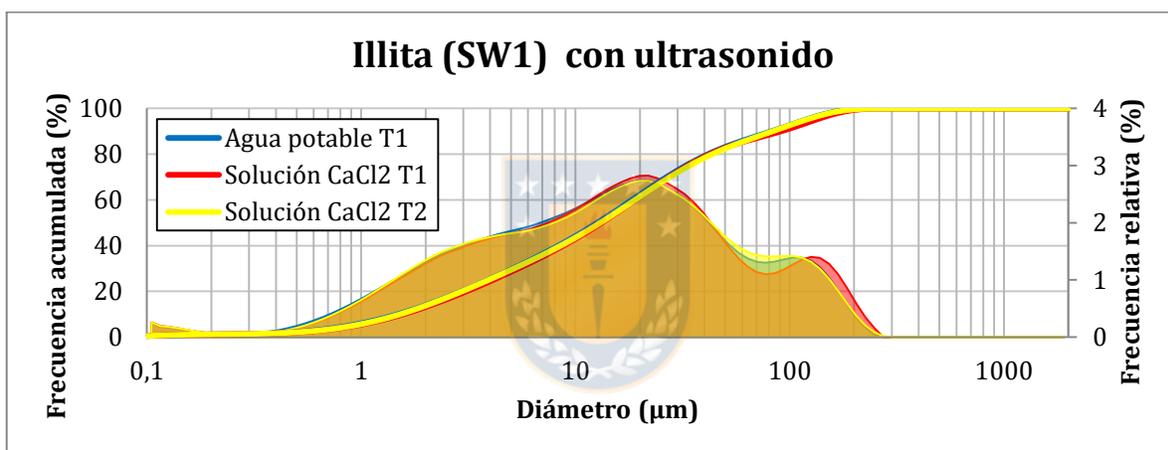


Gráfico 7.123 Illita (SW1) con ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.41 Tabla con parámetros estadísticos para Illita (SW1) en solución de CaCl₂. Mediciones directas (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Parámetro	Illita (SW1)- Solución CaCl ₂			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,14	0,16	0,14	0,19
P5 (μm)	0,94	1,19	0,92	1,22
P10 (μm)	1,57	2,06	1,52	2,09
P20 (μm)	3,10	4,52	2,96	4,53
P30 (μm)	5,41	8,40	5,17	8,29
P40 (μm)	8,81	13,34	8,55	13,04
P50 (μm)	13,28	19,66	13,09	19,01
P60 (μm)	19,04	29,15	18,99	27,93
P70 (μm)	27,40	47,86	27,67	46,22
P80 (μm)	42,44	93,65	43,55	94,05
P90 (μm)	90,98	146,80	83,16	145,82
P95 (μm)	131,90	182,50	118,78	180,75
P99 (μm)	189,50	241,96	176,66	239,20
%< 147(μm)	96,45	90,03	97,52	90,20
%<2 μm	13,17	9,70	13,71	9,49

7.1.8.7.- Solución NaCl

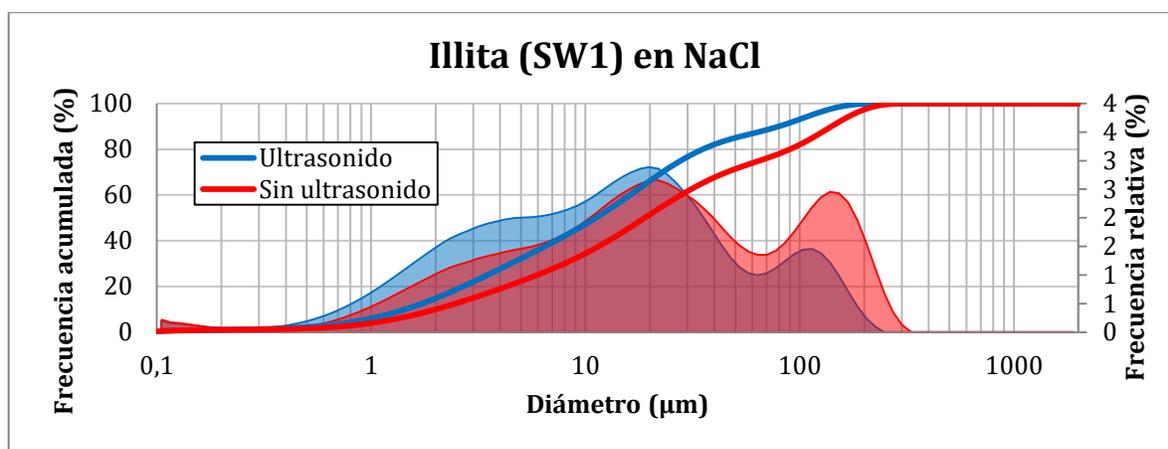


Gráfico 7.124 Illita (SW1) medida en solución de NaCl. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

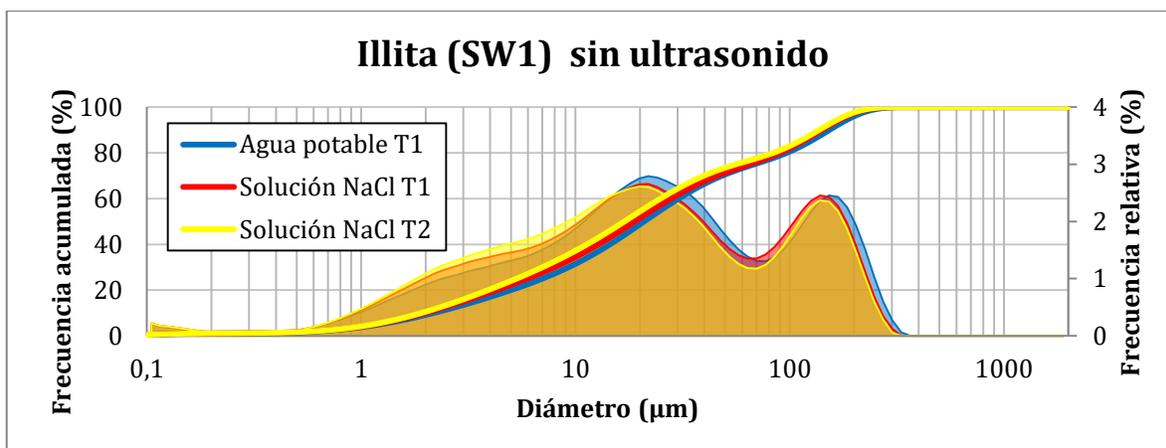


Gráfico 7.125 Illita (SW1) sin ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

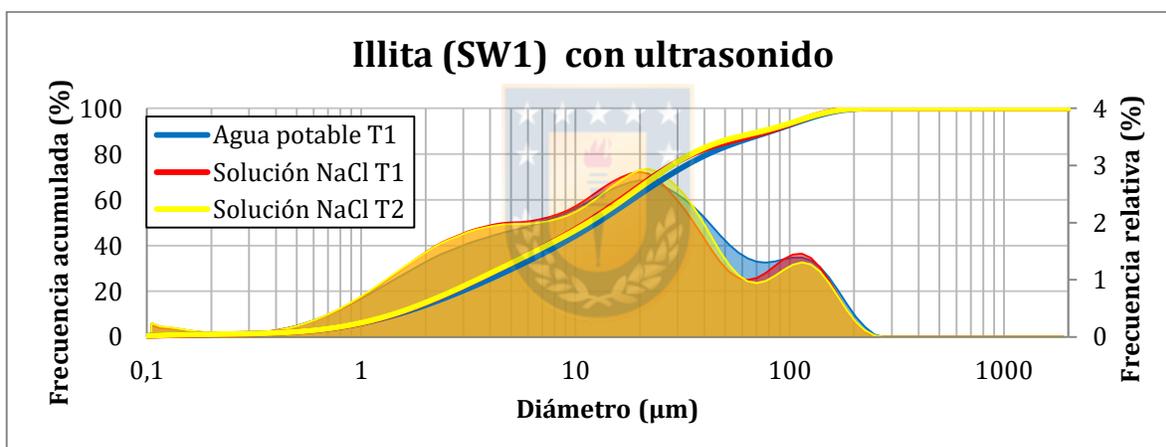


Gráfico 7.126 Illita (SW1) con ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.42 Tabla con parámetros estadísticos para Illita (SW1) en solución de NaCl. Medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Parámetro	Illita (SW1)- Solución NaCl			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,17	0,17	0,14	0,17
P5 (µm)	0,92	1,17	0,88	1,14
P10 (µm)	1,52	2,01	1,45	1,91
P20 (µm)	2,90	4,29	2,75	3,92
P30 (µm)	4,96	7,99	4,65	7,03
P40 (µm)	8,16	12,83	7,60	11,32
P50 (µm)	12,47	18,93	11,77	16,92
P60 (µm)	17,93	27,97	17,22	24,95
P70 (µm)	25,68	45,87	25,06	39,86
P80 (µm)	41,82	90,19	40,14	83,61
P90 (µm)	96,54	141,17	90,82	137,07
P95 (µm)	130,04	175,76	126,50	171,15
P99 (µm)	180,67	232,36	179,73	225,61
%< 147(µm)	96,84	90,98	97,06	91,63
%<2 µm	13,86	9,97	14,59	10,53

7.1.8.5.- Agua de Mar

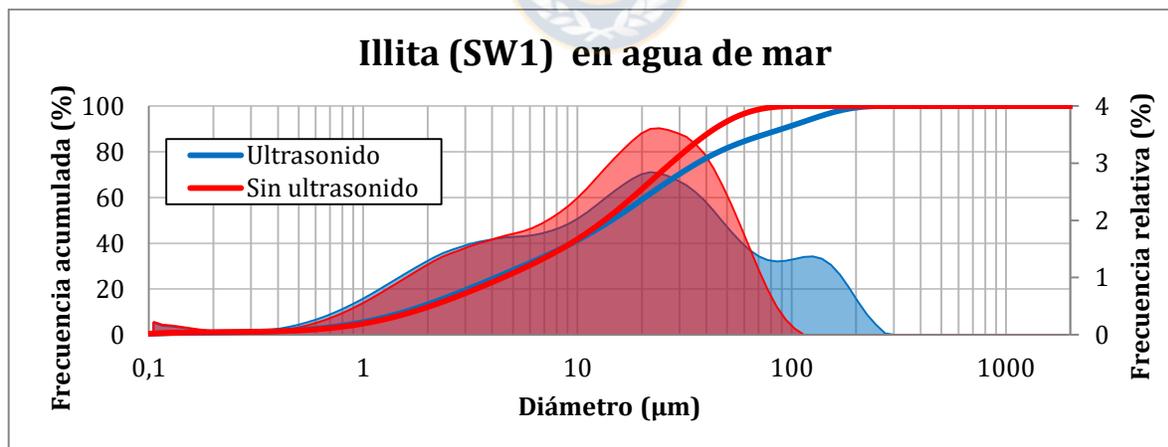


Gráfico 7.127 Illita (SW1) en agua de mar. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

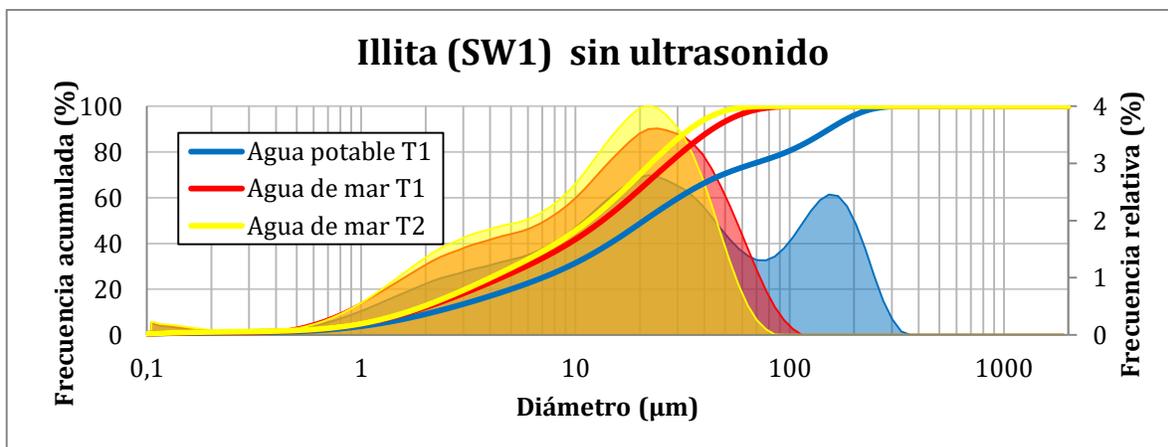


Gráfico 7.128 Illita (SW1) sin ultrasonido, en agua potable y en agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

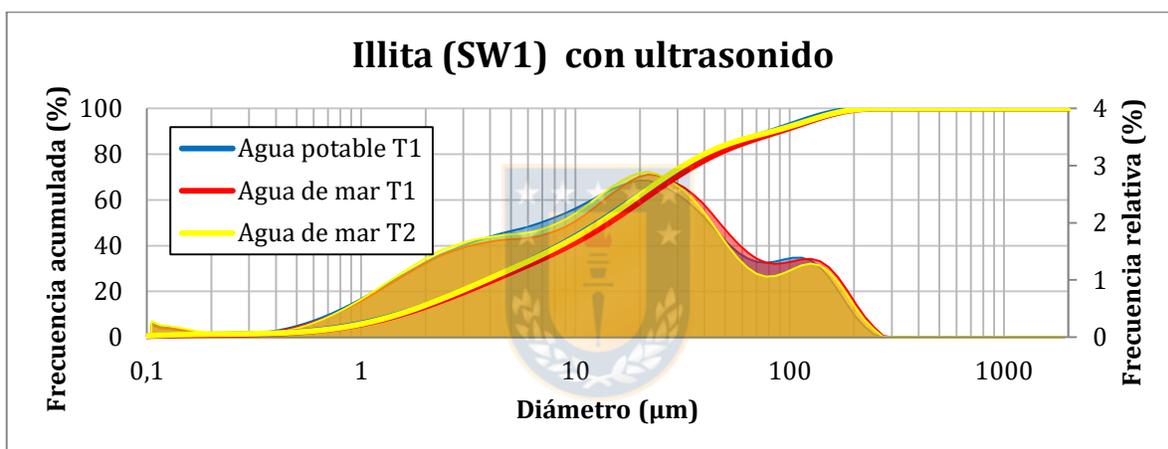


Gráfico 7.129 Illita (SW1) con ultrasonido, en agua potable y en agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.43 Tabla con parámetros estadísticos para Illita (SW1) en agua de mar. Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	Illita (SW1)- Agua de Mar			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,19	0,16	0,13	0,15
P5 (µm)	0,93	1,02	0,91	1,01
P10 (µm)	1,56	1,70	1,50	1,64
P20 (µm)	3,09	3,37	2,89	3,08
P30 (µm)	5,55	5,89	5,08	5,18
P40 (µm)	9,41	9,33	8,48	8,13
P50 (µm)	14,41	13,36	12,95	11,57
P60 (µm)	20,66	18,04	18,55	15,40
P70 (µm)	29,68	23,79	26,38	19,87
P80 (µm)	45,72	31,56	39,98	25,56
P90 (µm)	90,04	43,68	83,17	34,19
P95 (µm)	130,33	54,45	125,39	41,61
P99 (µm)	190,05	74,72	184,29	55,75
%< 147(µm)	96,54	100	96,92	100
%<2 µm	13,28	12,08	14,00	12,78

7.1.8.6.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)

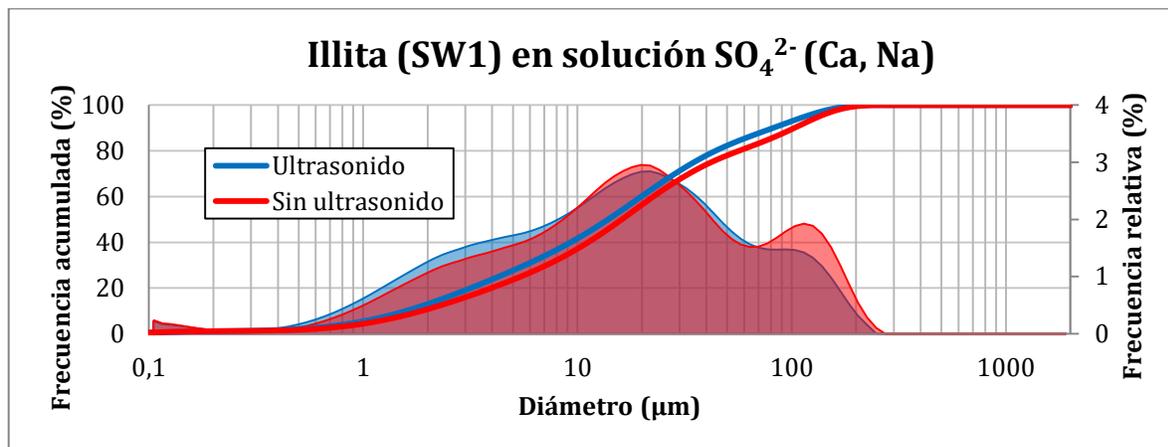


Gráfico 7.130 Illita (SW1) en solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

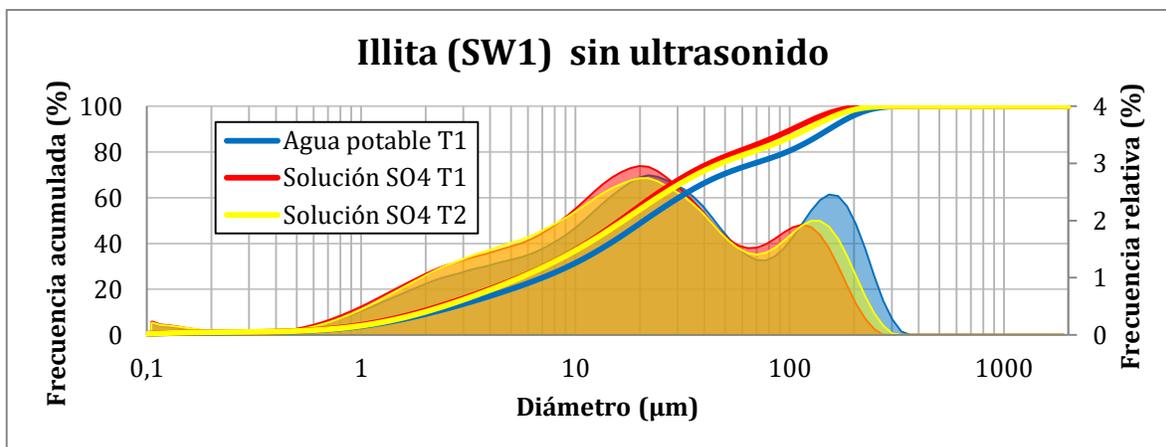


Gráfico 7.131 Illita (SW1) Medición sin ultrasonido en agua potable y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directa (T1).

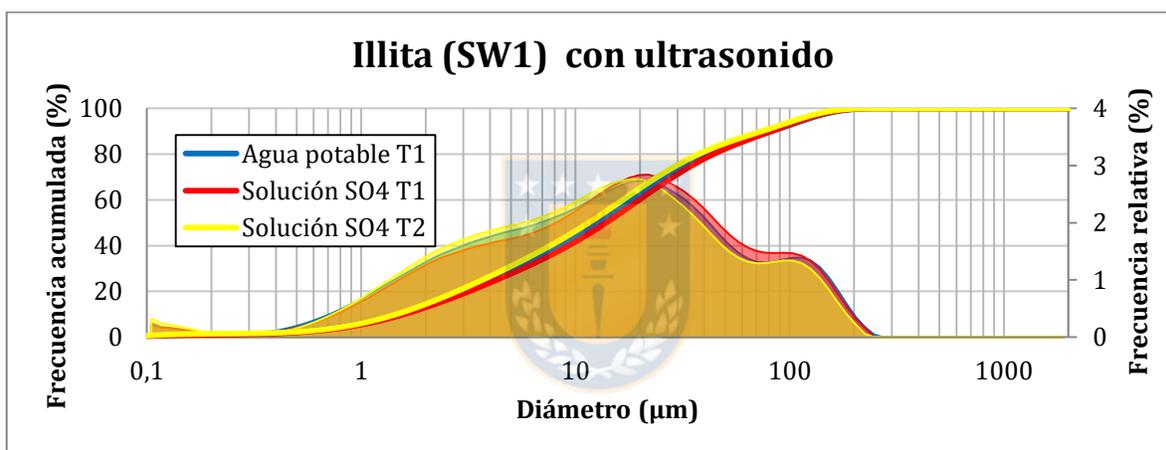


Gráfico 7.132 Illita (SW1) Medición con ultrasonido en agua potable y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directa (T1).

Tabla 7.44 Tabla con parámetros estadísticos para Illita (SW1) en agua potable y solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Mediciones directas (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Parámetro	Illita (SW1)- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,17	0,16	0,12	0,16
P5 (μm)	0,94	1,10	0,88	1,17
P10 (μm)	1,59	1,88	1,46	1,98
P20 (μm)	3,18	3,97	2,80	4,09
P30 (μm)	5,68	7,18	4,76	7,23
P40 (μm)	9,30	11,23	7,64	11,41
P50 (μm)	13,91	16,13	11,53	16,76
P60 (μm)	19,88	22,64	16,68	24,20
P70 (μm)	28,58	33,25	24,12	36,68
P80 (μm)	44,19	56,69	37,57	66,63
P90 (μm)	81,86	102,90	73,80	120,42
P95 (μm)	115,31	134,43	107,43	155,68
P99 (μm)	168,19	184,53	159,29	213,12
%< 147(μm)	97,88	96,42	98,42	93,94
%<2 μm	12,99	10,73	14,40	10,10

7.1.8.7.- Solucion SO_4^{2-} (Ca, Na)+ HCl; pH=2,26

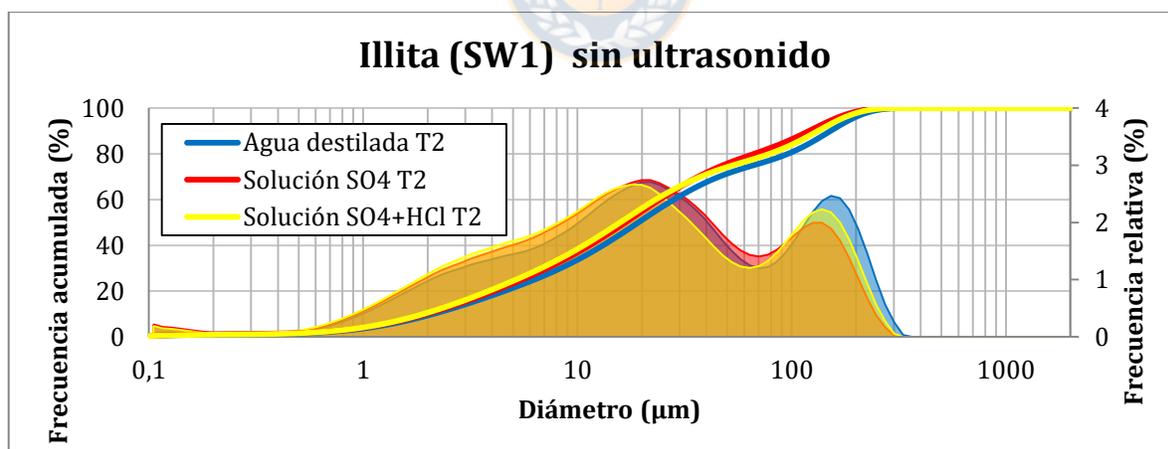


Gráfico 7.133 Illita (SW1) sin ultrasonido con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26).

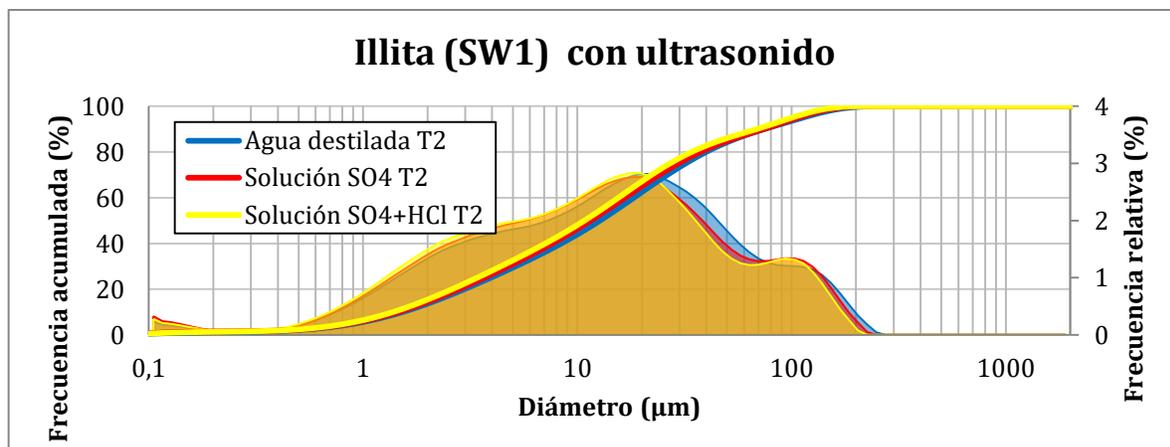


Gráfico 7.134 Illita (SW1) con ultrasonido con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$ (pH=2,26).

Tabla 7.45 Tabla con parámetros estadísticos para Illita (SW1) en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$ (pH=2,26). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Parámetro	Illita (SW1)					
	T2 Agua destilada		T2 Solución SO_4^{2-}		T2 $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCl}$	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,16	0,21	0,12	0,16	0,13	0,23
P5 (µm)	0,92	1,25	0,88	1,17	0,84	1,14
P10 (µm)	1,53	2,13	1,46	1,98	1,38	1,91
P20 (µm)	2,97	4,56	2,80	4,09	2,61	3,85
P30 (µm)	5,15	8,35	4,76	7,23	4,40	6,77
P40 (µm)	8,42	13,17	7,64	11,41	7,11	10,74
P50 (µm)	12,75	19,26	11,53	16,76	10,80	15,84
P60 (µm)	18,35	28,22	16,68	24,20	15,55	23,19
P70 (µm)	26,34	45,83	24,12	36,68	22,23	37,48
P80 (µm)	40,01	95,70	37,57	66,63	34,17	78,58
P90 (µm)	74,65	151,56	73,80	120,42	68,58	132,46
P95 (µm)	112,57	187,95	107,43	155,68	100,41	167,34
P99 (µm)	171,71	246,93	159,29	213,12	148,03	224,33
% < 147(µm)	97,82	89,21	98,42	93,94	98,95	92,30
% < 2 µm	13,64	9,31	14,40	10,10	12,91	9,96

7.2.- Muestra Pilas de Lixiviación (L-1)

7.2.1.- Difracción Láser

7.2.1.1.- Agua Potable

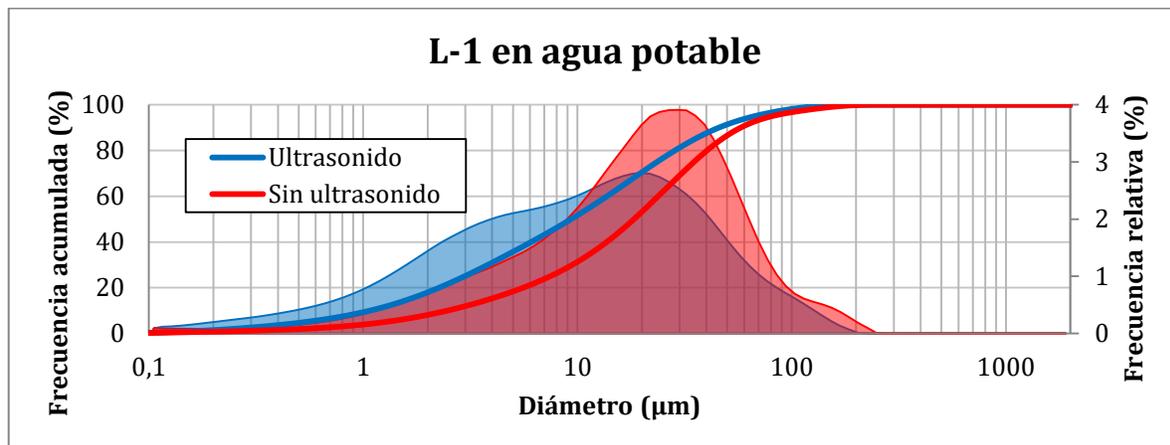


Gráfico 7.135 Muestra L-1 en agua potable. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

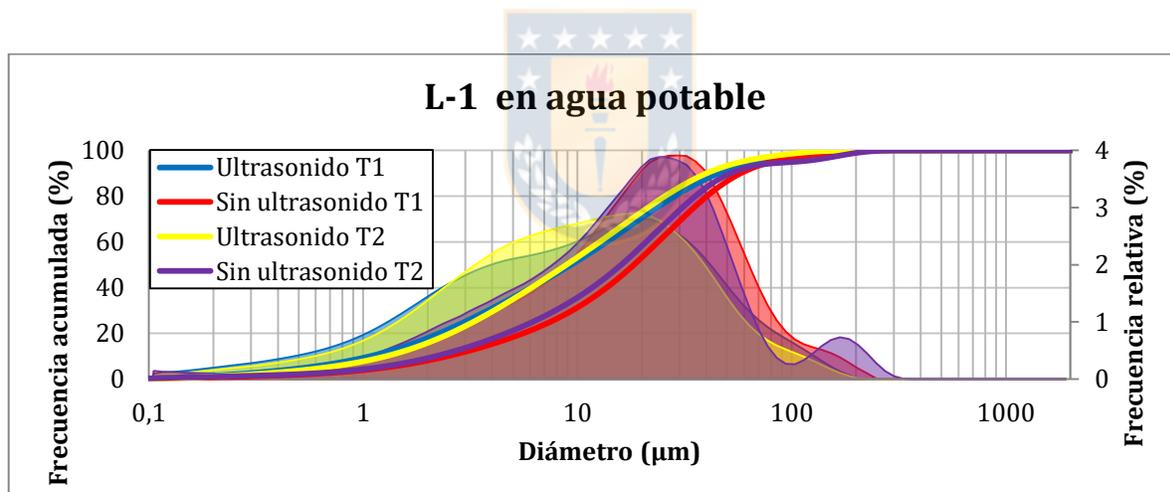


Gráfico 7.136 Muestra L-1 en agua potable. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

7.2.1.2.- Agua Destilada

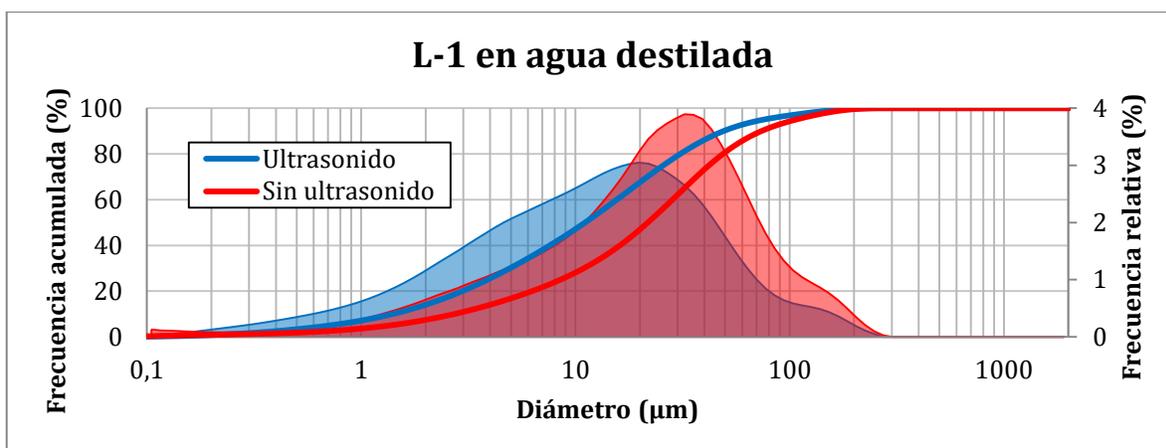


Gráfico 7.137 Muestra L-1 en agua destilada. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

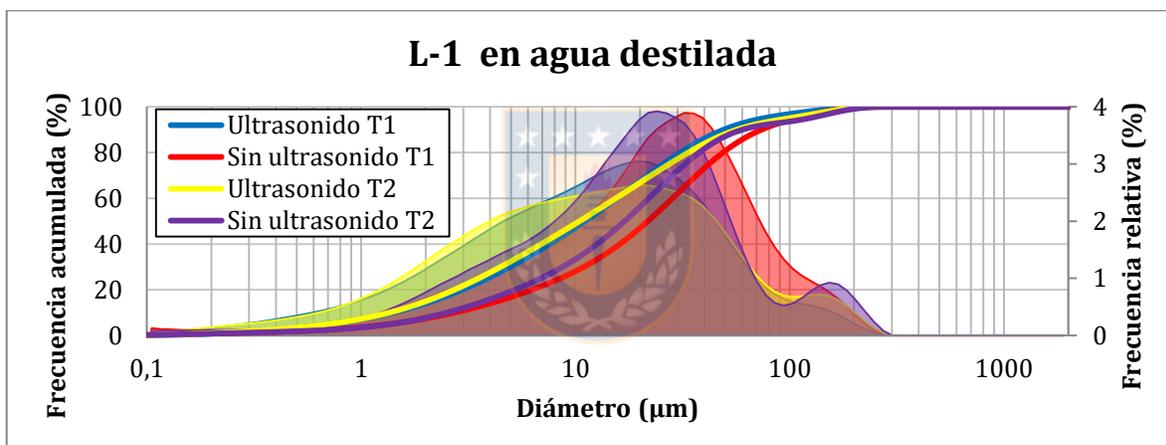


Gráfico 7.138 Muestra L-1 en agua destilada. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

Tabla 7.46 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de pilas de lixiviación L-1 en agua potable y agua destilada. Mediciones directas (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Parámetro	L-1 Agua potable				L-1 Agua destilada			
	T1		T2 [24 h]		T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,16	0,26	0,19	0,19	0,23	0,23	0,20	0,24
P5 (μm)	0,54	1,26	0,66	1,15	0,71	1,36	0,71	1,37
P10 (μm)	1,08	2,48	1,28	2,18	1,41	2,73	1,35	2,52
P20 (μm)	2,26	5,59	2,55	4,65	2,97	6,28	2,73	5,23
P30 (μm)	3,82	9,46	4,09	7,89	4,95	10,95	4,48	8,72
P40 (μm)	6,09	13,70	6,12	11,72	7,60	16,15	6,94	12,64
P50 (μm)	9,35	18,38	8,90	16,02	11,10	21,78	10,45	16,97
P60 (μm)	13,74	23,83	12,70	20,91	15,61	28,39	15,44	22,00
P70 (μm)	19,65	30,72	17,95	27,07	21,69	36,73	22,60	28,44
P80 (μm)	28,52	40,31	25,63	35,56	30,87	48,95	33,66	37,81
P90 (μm)	45,74	57,92	40,15	51,83	49,23	73,99	56,67	60,32
P95 (μm)	66,97	80,97	58,06	102,44	75,40	106,96	98,73	122,41
P99 (μm)	117,69	151,15	110,81	203,05	151,95	174,49	179,47	197,11
%< 147(μm)	99,71	98,87	99,76	96,78	98,85	97,89	97,79	96,61
%<2 μm	17,96	8,10	15,82	9,15	14,03	7,42	14,93	7,74

7.2.1.3.- Solución CaCl_2

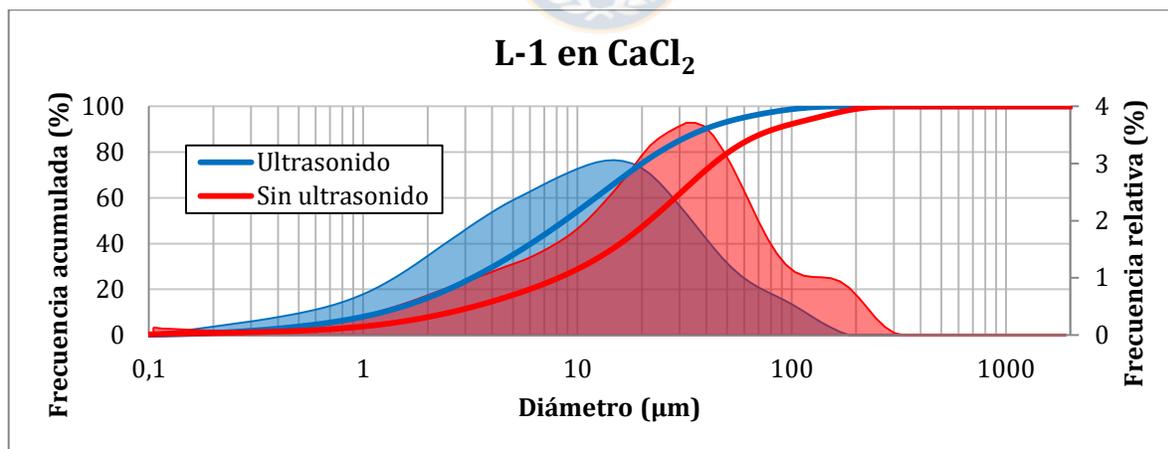


Gráfico 7.139 Muestra L-1 en solución de CaCl_2 . Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

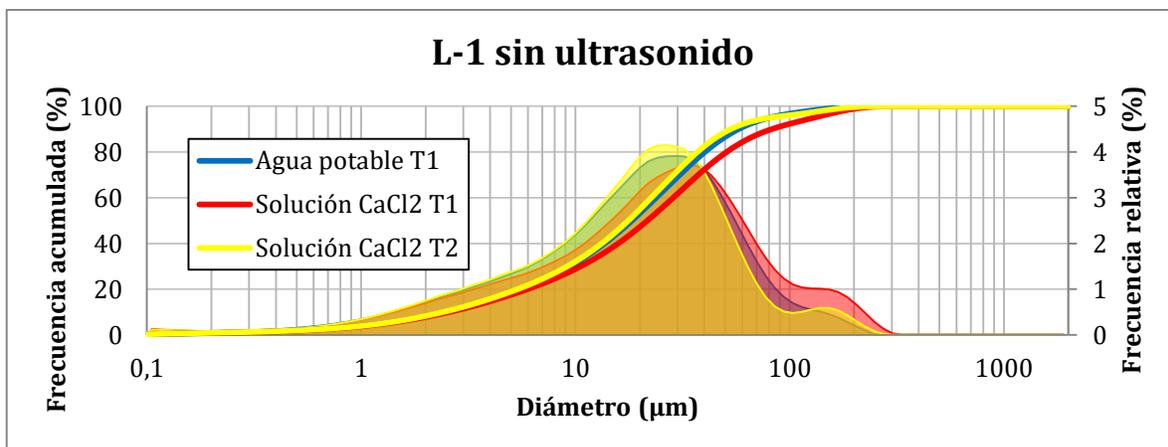


Gráfico 7.140 Muestra L-1 sin ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

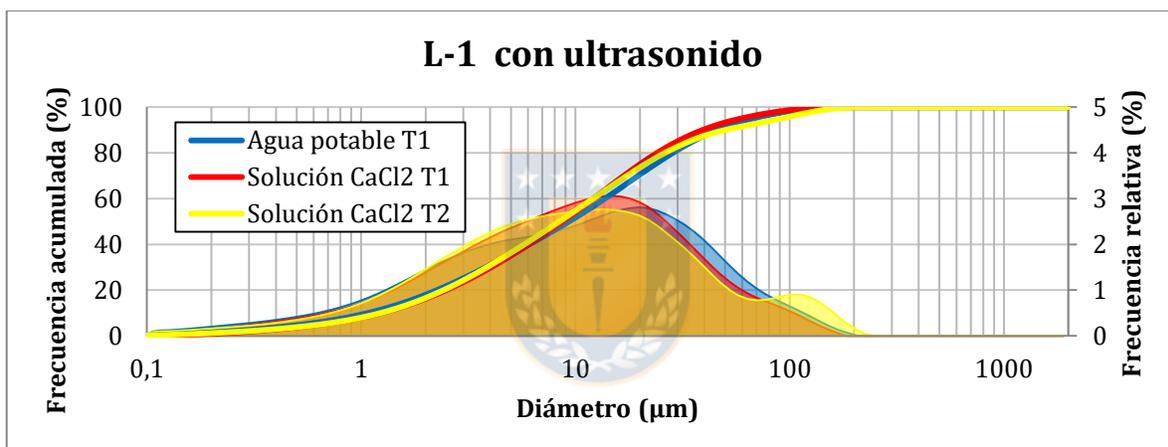


Gráfico 7.141 Muestra L-1 con ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.47 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de pilas de lixiviación L-1 en agua potable y solución con CaCl₂. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	L-1 Solución CaCl ₂			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,21	0,24	0,18	0,23
P5 (μm)	0,65	1,31	0,65	1,26
P10 (μm)	1,23	2,58	1,23	2,42
P20 (μm)	2,50	5,99	2,43	5,39
P30 (μm)	4,05	10,59	3,87	9,17
P40 (μm)	6,08	15,84	5,78	13,27
P50 (μm)	8,70	21,68	8,41	17,66
P60 (μm)	12,15	28,63	12,10	22,59
P70 (μm)	16,84	37,46	17,40	28,74
P80 (μm)	24,10	50,82	26,22	37,17
P90 (μm)	39,22	82,69	49,96	53,24
P95 (μm)	59,04	129,88	90,91	81,26
P99 (μm)	105,63	203,71	149,31	169,58
%< 147(μm)	99,89	96,24	98,90	98,21
%<2 μm	16,25	7,82	16,56	8,26

7. 2.1.7.- Solución NaCl

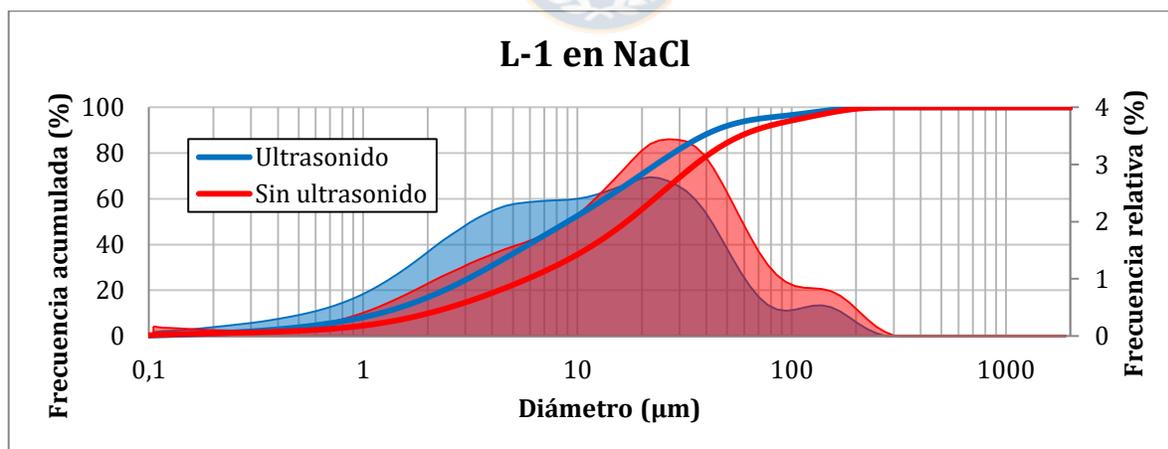


Gráfico 7.142 Muestra L-1 en solución de NaCl. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

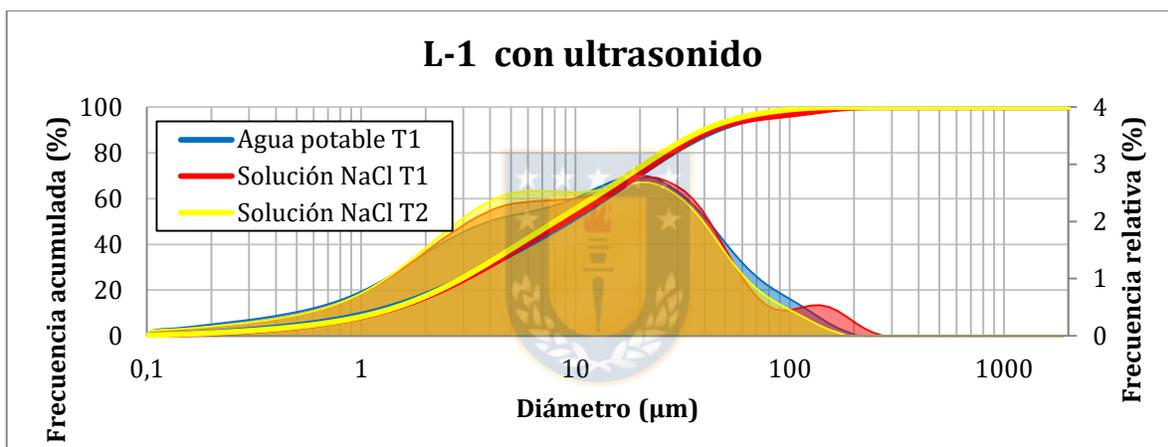
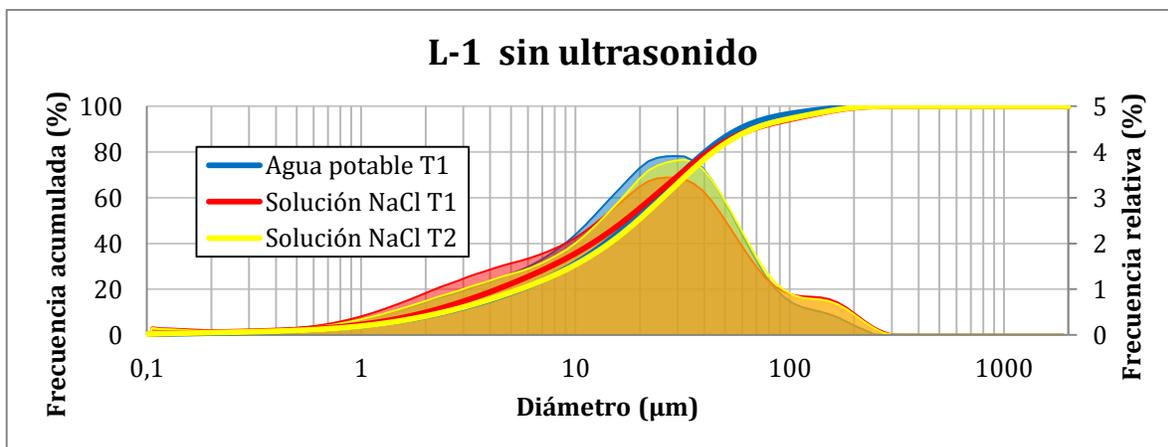


Tabla 7.48 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de pilas de lixiviación L-1 en agua potable y solución NaCl. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	L-1 Solución de NaCl			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,19	0,17	0,18	0,21
P5 (µm)	0,64	1,09	0,62	1,27
P10 (µm)	1,21	2,03	1,18	2,44
P20 (µm)	2,39	4,32	2,31	5,52
P30 (µm)	3,86	7,67	3,65	9,69
P40 (µm)	5,93	11,97	5,44	14,39
P50 (µm)	9,01	16,97	8,06	19,54
P60 (µm)	13,45	22,87	11,95	25,53
P70 (µm)	19,47	30,57	17,45	33,17
P80 (µm)	28,04	41,88	25,39	44,17
P90 (µm)	44,11	67,48	39,79	67,40
P95 (µm)	70,41	109,52	56,33	105,25
P99 (µm)	157,92	185,28	101,18	182,20
%< 147(µm)	98,66	97,43	99,90	97,61
%<2 µm	16,86	9,84	17,37	8,18

7.2.1.5.- Agua de Mar

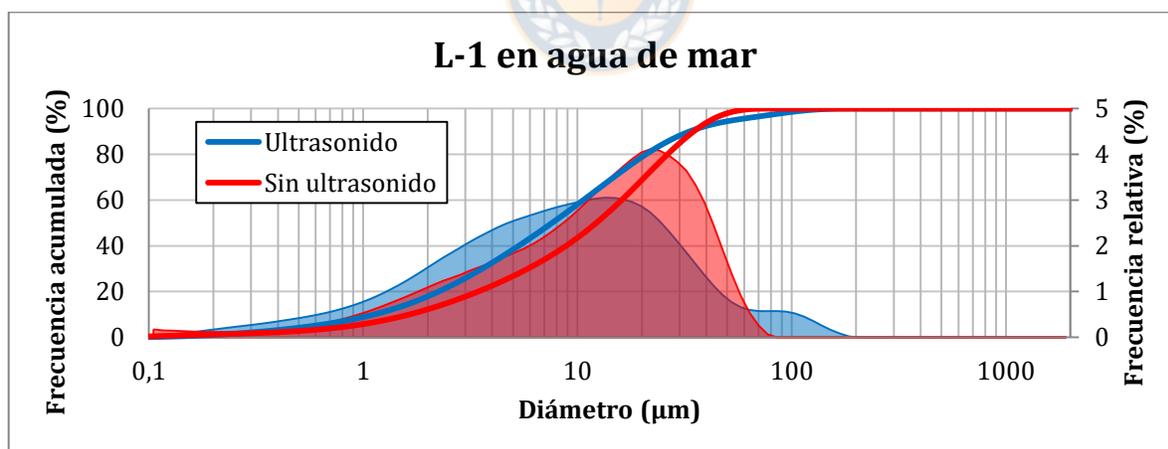


Gráfico 7.145 Muestra L-1 en agua de mar. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

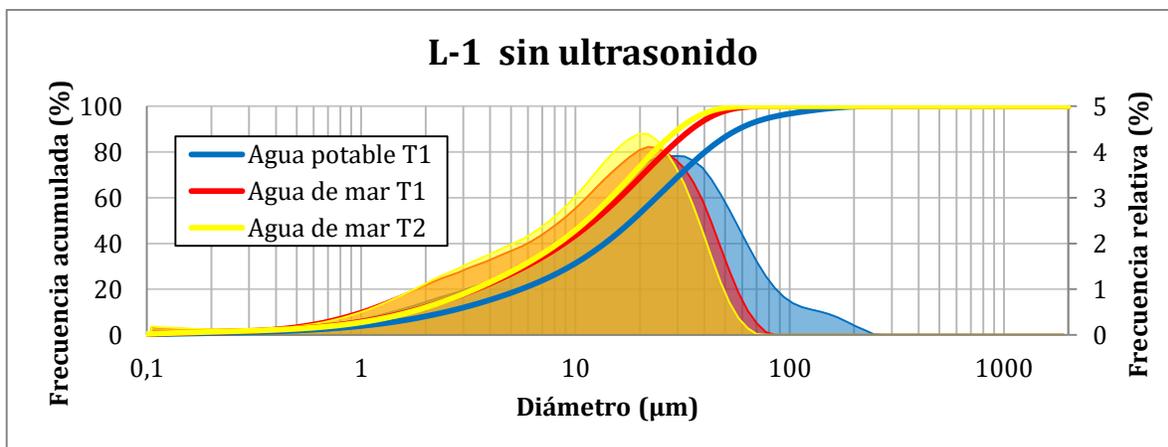


Gráfico 7.146 Muestra L-1 sin ultrasonido, en agua potable y en agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

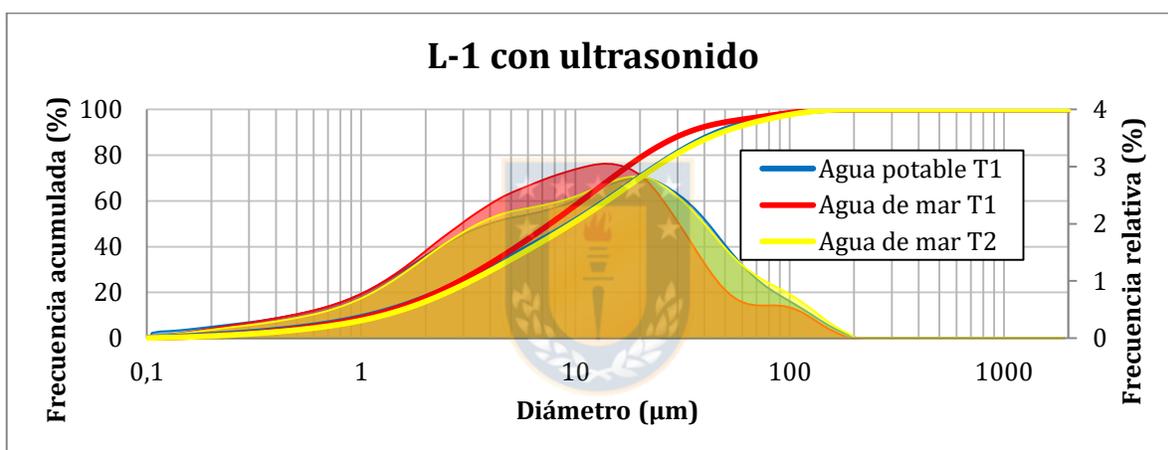


Gráfico 7.147 Muestra L-1 con ultrasonido, en agua potable y en agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.49 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de pilas de lixiviación L-1 en agua de mar. Mediciones directas (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Parámetro	L-1 Agua de mar			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,20	0,17	0,21	0,15
P5 (µm)	0,59	0,88	0,67	0,92
P10 (µm)	1,13	1,65	1,27	1,69
P20 (µm)	2,25	3,45	2,52	3,39
P30 (µm)	3,60	5,88	4,11	5,61
P40 (µm)	5,33	8,86	6,38	8,30
P50 (µm)	7,62	12,25	9,63	11,31
P60 (µm)	10,66	16,09	14,00	14,62
P70 (µm)	14,79	20,58	19,95	18,43
P80 (µm)	20,87	26,37	29,12	23,17
P90 (µm)	33,42	34,91	48,37	30,35
P95 (µm)	54,10	42,04	72,79	36,48
P99 (µm)	110,01	55,54	123,51	47,84
%< 147(µm)	99,84	100	99,62	100
%<2 µm	17,85	12,21	16,03	11,99

7.2.1.6.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)

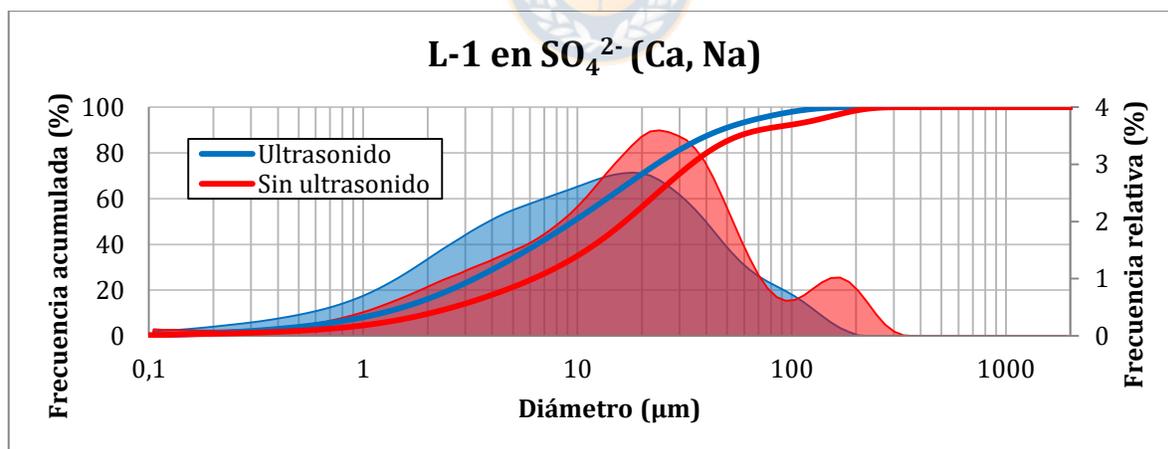


Gráfico 7.148 Muestra L-1 en solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

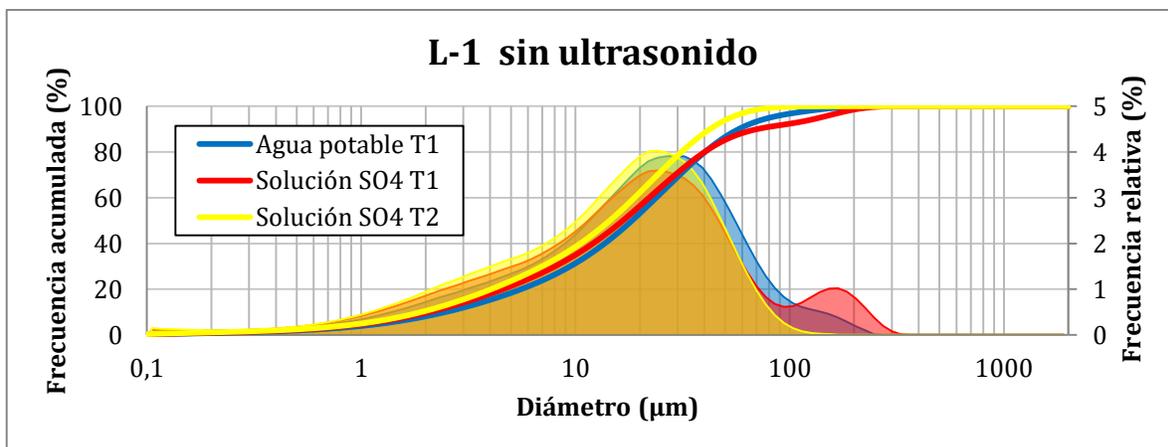


Gráfico 7.149 Muestra L-1 sin ultrasonido. Medición sin ultrasonido en agua potable y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directa (T1).

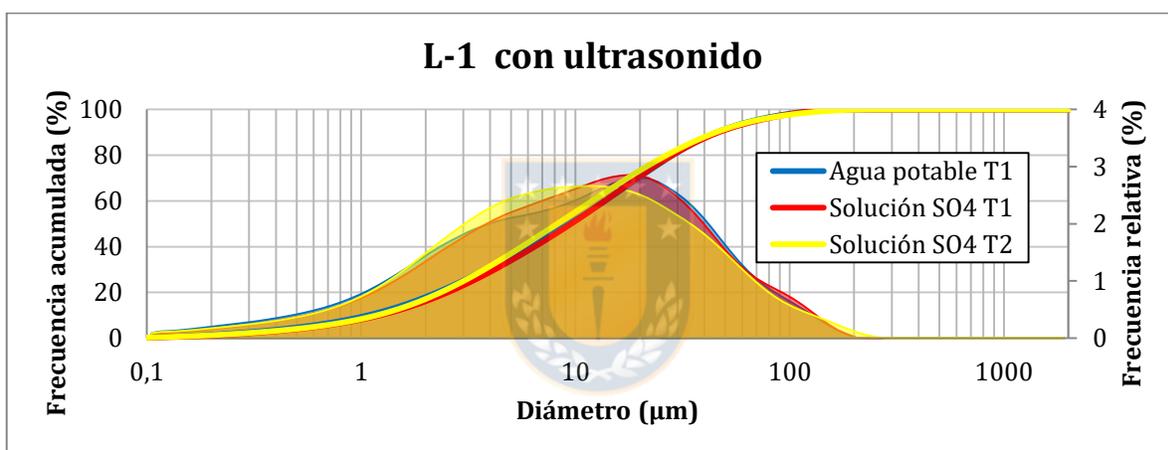


Gráfico 7.150 Muestra L-1. Medición con ultrasonido en agua potable y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directa (T1).

Tabla 7.50 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de pilas de lixiviación L-1 en solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	L-1 Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,18	0,22	0,17	0,19
P5 (μm)	0,63	1,08	0,61	1,01
P10 (μm)	1,23	2,08	1,19	1,91
P20 (μm)	2,53	4,59	2,35	4,05
P30 (μm)	4,20	8,04	3,76	7,00
P40 (μm)	6,47	12,09	5,63	10,55
P50 (μm)	9,56	16,66	8,24	14,47
P60 (μm)	13,73	22,10	11,98	18,87
P70 (μm)	19,48	29,28	17,53	24,20
P80 (μm)	28,34	40,17	26,68	31,25
P90 (μm)	46,54	70,76	45,26	42,46
P95 (μm)	69,89	138,20	67,97	53,19
P99 (μm)	119,87	214,35	133,62	76,20
%< 147(μm)	99,69	95,61	99,30	99,99
%<2 μm	16,13	9,63	17,10	10,48

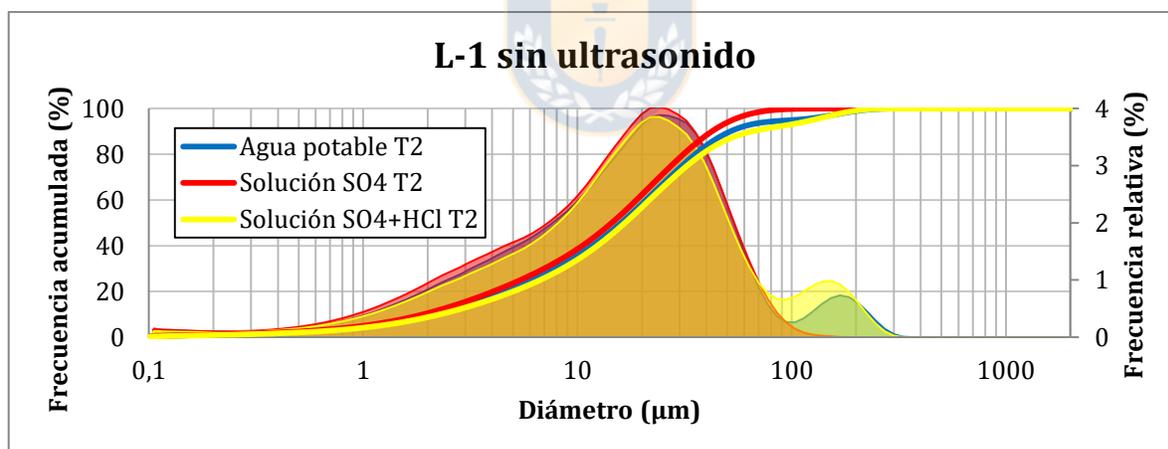


Gráfico 7.151 Muestra L-1 sin ultrasonido con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$ (pH=2,26).

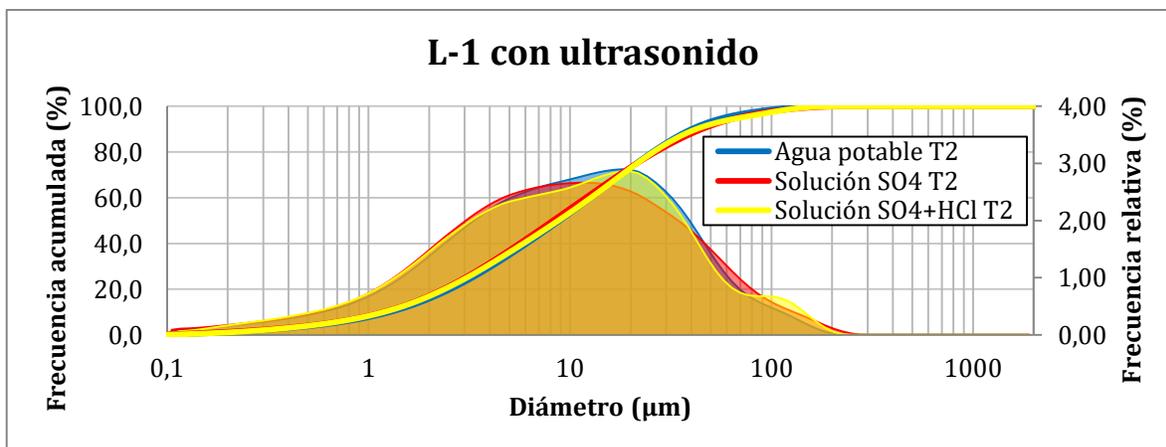


Gráfico 7.152 Muestra L-1 con ultrasonido con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$ (pH=2,26).

Tabla 7.51 Tabla con parámetros estadísticos para muestra L-1 en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$ (pH=2,26). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Parámetro	Muestra Pilas de lixiviación (L-1)					
	T2 Agua Potable		T2 Solución SO_4^{2-}		T2 $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,19	0,19	0,17	0,19	0,19	0,23
P5 (µm)	0,66	1,15	0,61	1,01	0,62	1,19
P10 (µm)	1,28	2,18	1,19	1,91	1,19	2,29
P20 (µm)	2,55	4,65	2,35	4,05	2,39	5,02
P30 (µm)	4,09	7,89	3,76	7,00	3,86	8,52
P40 (µm)	6,12	11,72	5,63	10,55	5,88	12,40
P50 (µm)	8,90	16,02	8,24	14,47	8,76	16,69
P60 (µm)	12,70	20,91	11,98	18,87	12,70	21,69
P70 (µm)	17,95	27,07	17,53	24,20	18,06	28,22
P80 (µm)	25,63	35,56	26,68	31,25	25,98	38,15
P90 (µm)	40,15	51,83	45,26	42,46	42,37	65,68
P95 (µm)	58,06	102,44	67,97	53,19	70,27	125,48
P99 (µm)	110,81	203,05	133,62	76,20	131,63	197,89
%< 147(µm)	99,76	96,78	99,30	99,99	99,43	96,54
%<2 µm	15,82	9,15	17,10	10,48	16,91	8,73

7.2.2.- Tamizado Húmedo

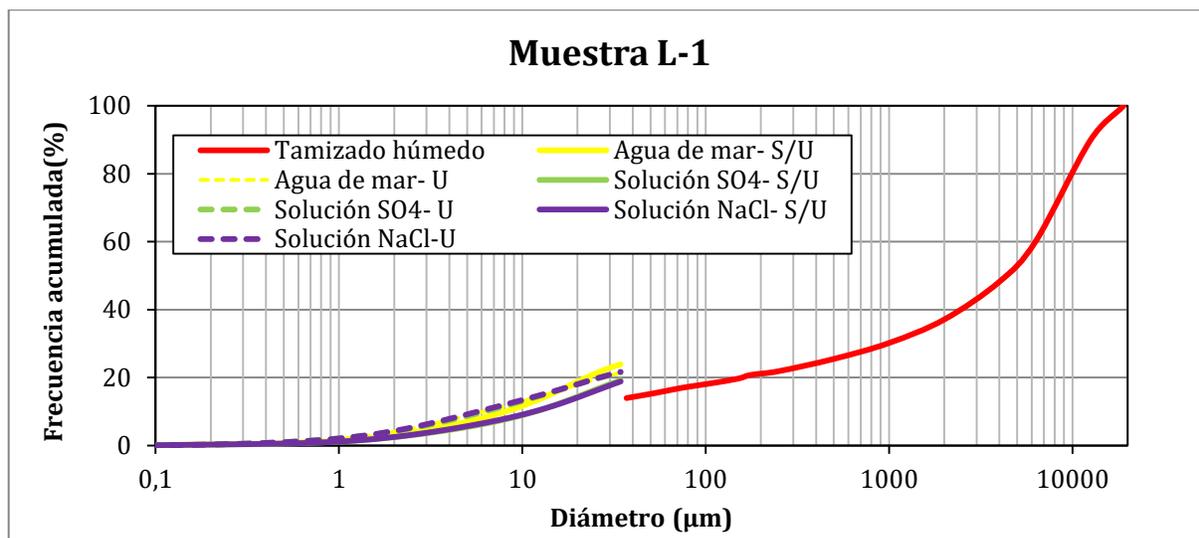


Gráfico 7.153 (a) Muestra L-1. Curva granulométrica de la totalidad de la muestra (finos y gruesos). Considerando tamizado húmedo para la fracción gruesa y difracción láser para la fracción fina en los distintos medios fluidos (NaCl, SO₄²⁻ (Ca. Na) y agua de mar) con y sin ultrasonido.

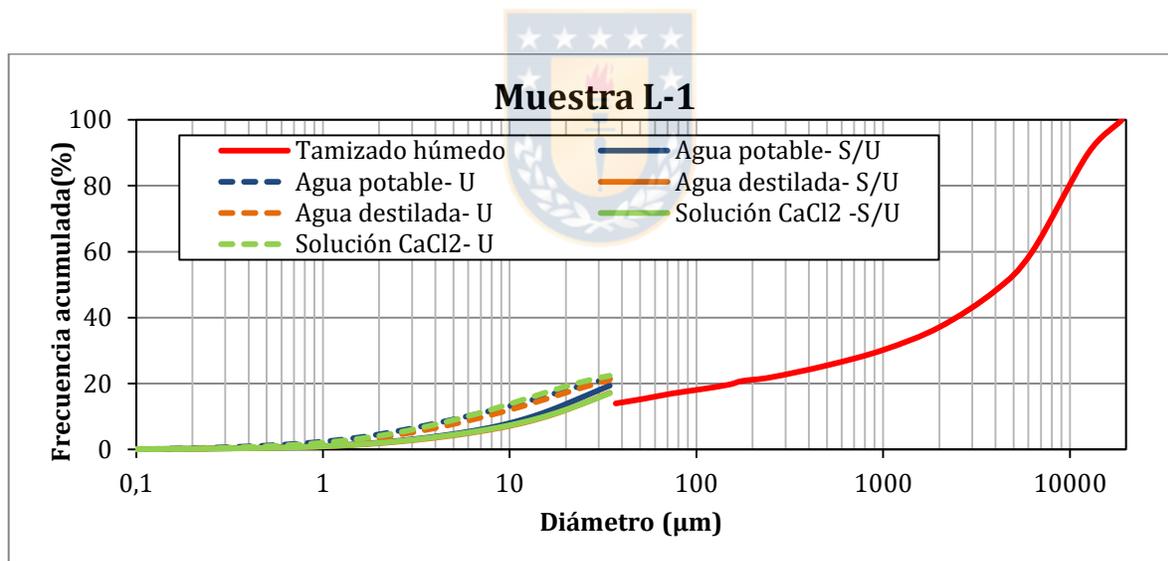


Gráfico 7.153 (b) Muestra L-1. Curva granulométrica de la totalidad de la muestra (finos y gruesos). Considerando tamizado húmedo para la fracción gruesa y difracción láser para la fracción fina en los distintos medios fluidos (CaCl₂, agua destilada, agua potable) con y sin ultrasonido.

7.3.- Muestras Tranque de Relave

7.3.1.- M-50

7.3.1.1.- Agua Potable

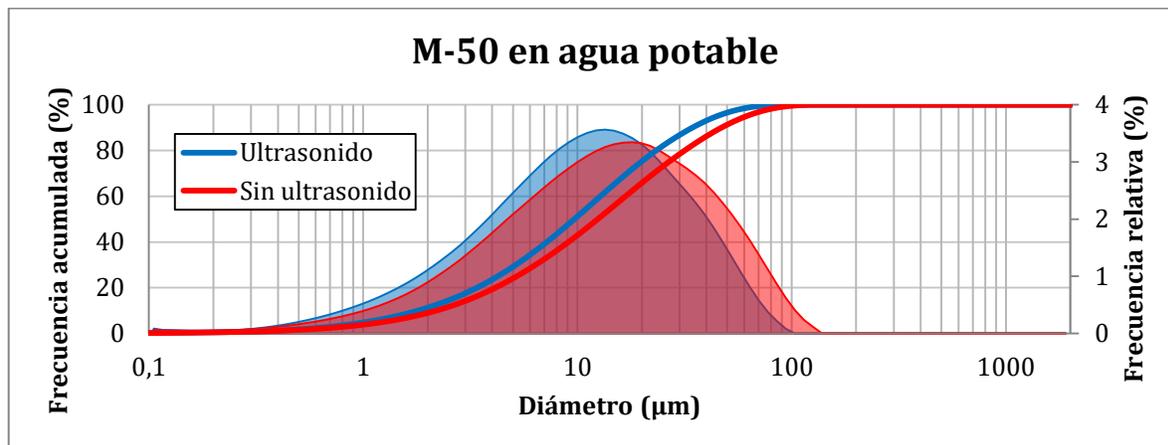


Gráfico 7.154 Muestra M-50 en agua potable con medición directa (T1), con y sin ultrasonido.

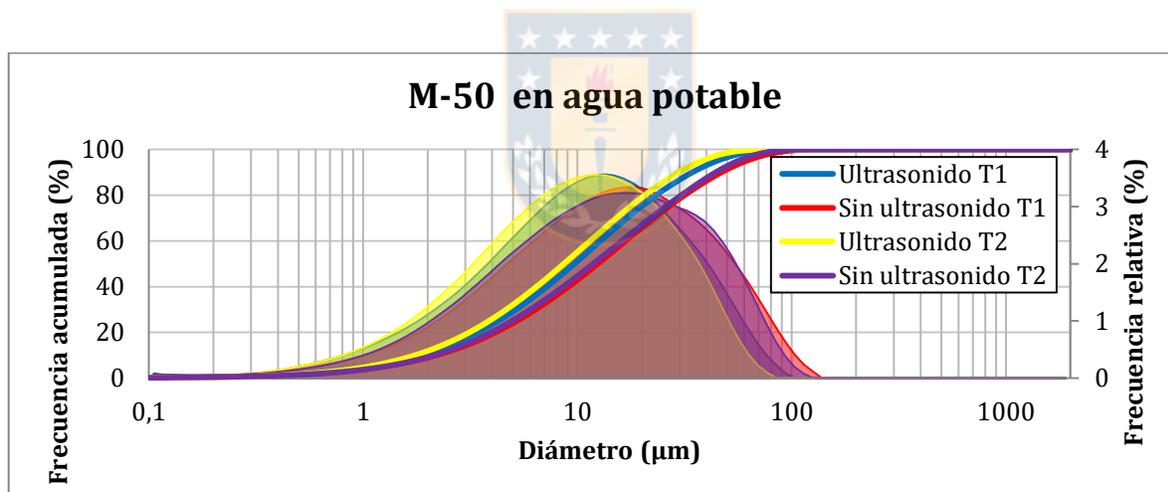


Gráfico 7.155 Muestra M-50 en agua potable. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

7.3.1.2.- Agua Destilada

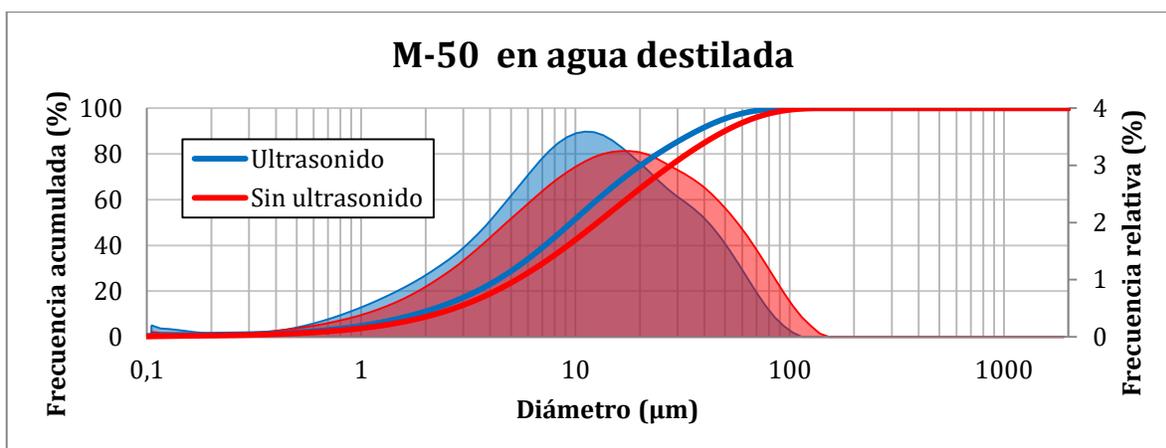


Gráfico 7.156 Muestra M-50 en agua destilada. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

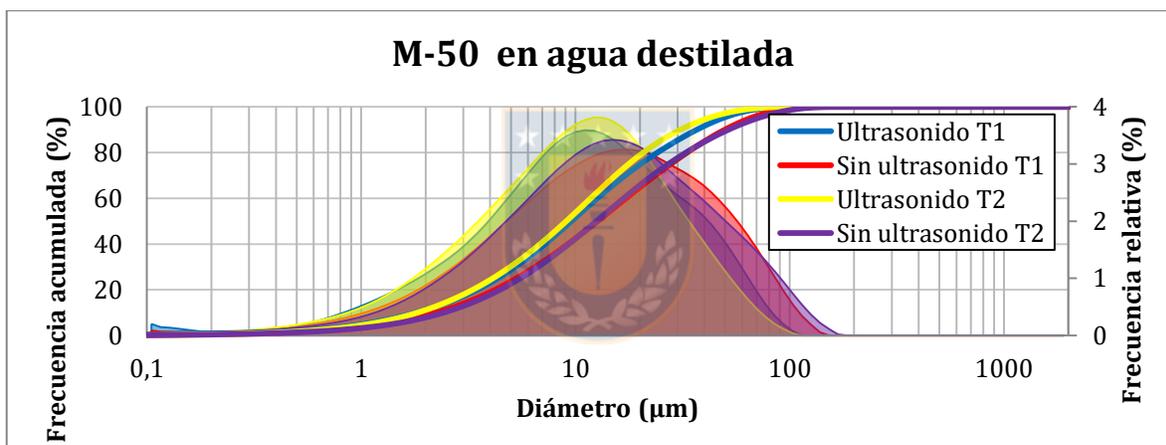


Gráfico 7.157 Muestra M-50 en agua destilada. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

Tabla 7.52 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-50 en agua y agua destilada. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	M-50 Agua potable				M-50 Agua destilada			
	T1		T2 [24 h]		T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,34	0,36	0,37	0,38	0,22	0,35	0,34	0,39
P10 (µm)	1,03	1,24	1,04	1,25	1,03	1,26	1,08	1,40
P10 (µm)	1,81	2,20	1,75	2,14	1,81	2,24	1,83	2,42
P20 (µm)	3,40	4,15	3,13	3,95	3,47	4,23	3,32	4,45
P30 (µm)	5,16	6,38	4,66	6,04	5,24	6,50	4,97	6,69
P40 (µm)	7,21	9,09	6,45	8,60	7,22	9,24	6,85	9,31
P50 (µm)	9,68	12,45	8,65	11,85	9,59	12,68	9,07	12,55
P60 (µm)	12,81	16,79	11,45	16,13	12,66	17,23	11,80	16,81
P70 (µm)	17,03	22,73	15,21	22,00	17,08	23,60	15,39	22,90
P80 (µm)	23,32	31,68	20,63	30,57	24,18	33,26	20,74	32,87
P90 (µm)	34,38	47,05	29,76	44,27	36,90	49,85	30,89	51,81
P95 (µm)	44,86	61,45	37,87	56,20	48,56	65,41	41,48	70,76
P99 (µm)	65,20	89,43	53,72	79,34	70,75	95,11	64,22	107,60
%< 147(µm)	100	100	100	100	100	100	100	99,94
%<2 µm	11,26	9,10	11,86	9,20	11,17	8,75	11,14	7,88

7. 3.1.3.- Solución CaCl₂

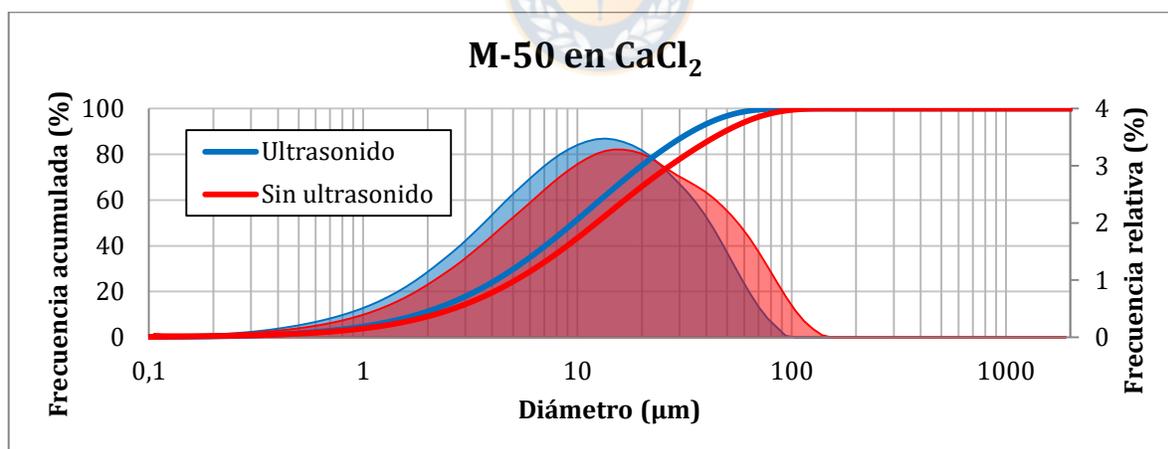


Gráfico 7.158 Muestra M-50 en solución de CaCl₂. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

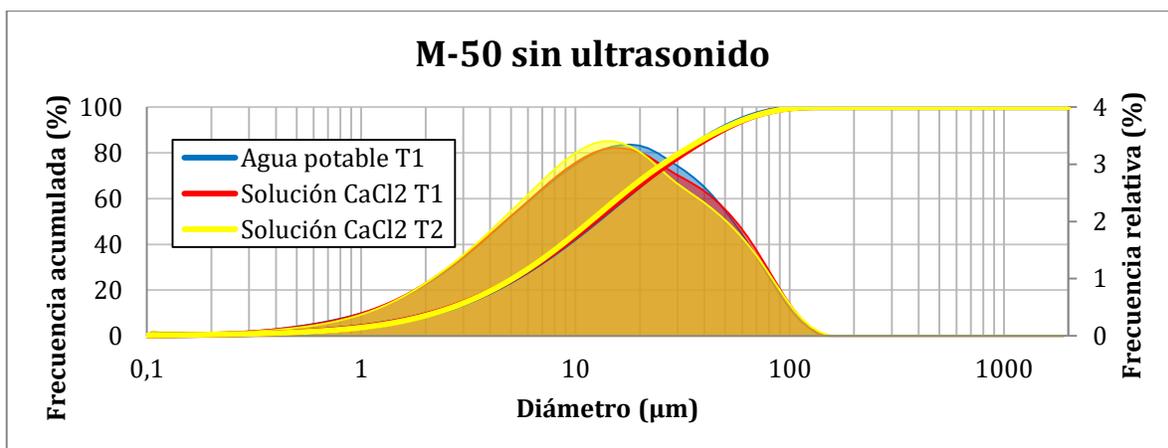


Gráfico 7.159 Muestra M-50 sin ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

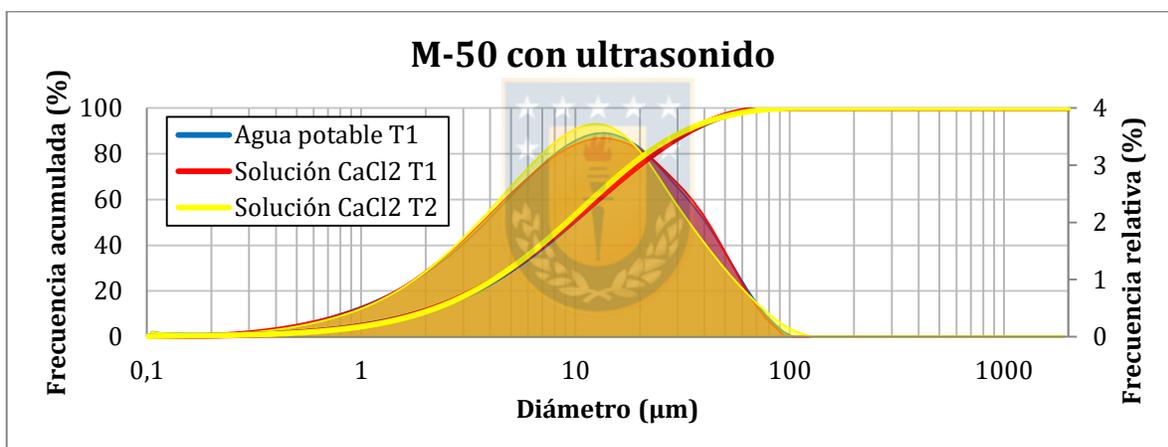


Gráfico 7.160 Muestra M-50 con ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.53 comparativa con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-50 en agua y solución CaCl_2 . Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	M-50 Solución CaCl_2			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,35	0,35	0,36	0,35
P5 (μm)	1,05	1,24	1,10	1,28
P10 (μm)	1,81	2,17	1,86	2,21
P20 (μm)	3,34	4,09	3,37	4,09
P30 (μm)	5,06	6,31	5,00	6,19
P40 (μm)	7,08	8,97	6,88	8,67
P50 (μm)	9,58	12,27	9,13	11,71
P60 (μm)	12,76	16,62	11,95	15,70
P70 (μm)	17,08	22,78	15,71	21,44
P80 (μm)	23,42	32,42	21,41	30,75
P90 (μm)	34,19	48,89	32,46	47,63
P95 (μm)	44,15	63,87	44,43	63,31
P99 (μm)	63,02	92,12	70,96	92,91
%< 147(μm)	100	100	100	99,99
%<2 μm	11,29	9,08	10,93	8,83

7.3.1.7.- Solución NaCl

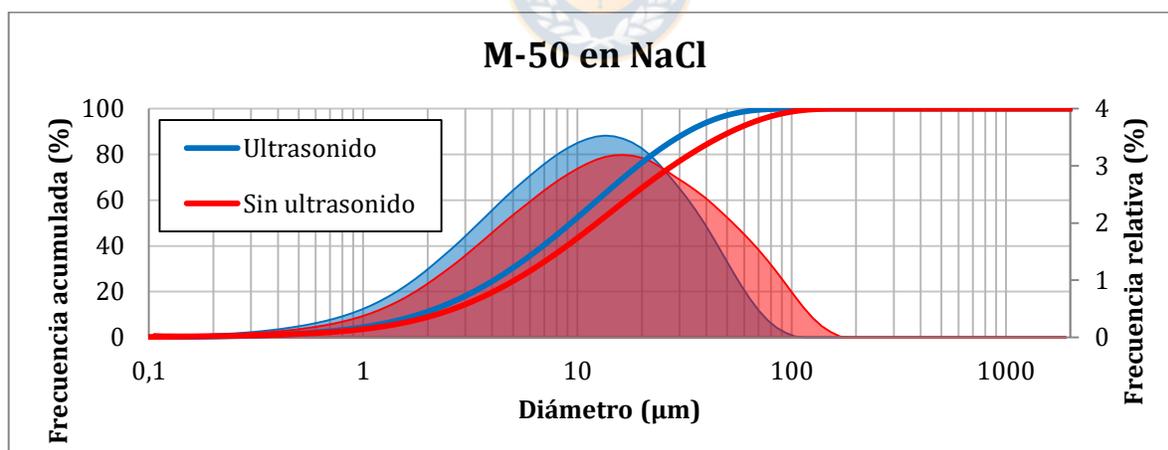


Gráfico 7.161 Muestra M-50 medida en solución de NaCl. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

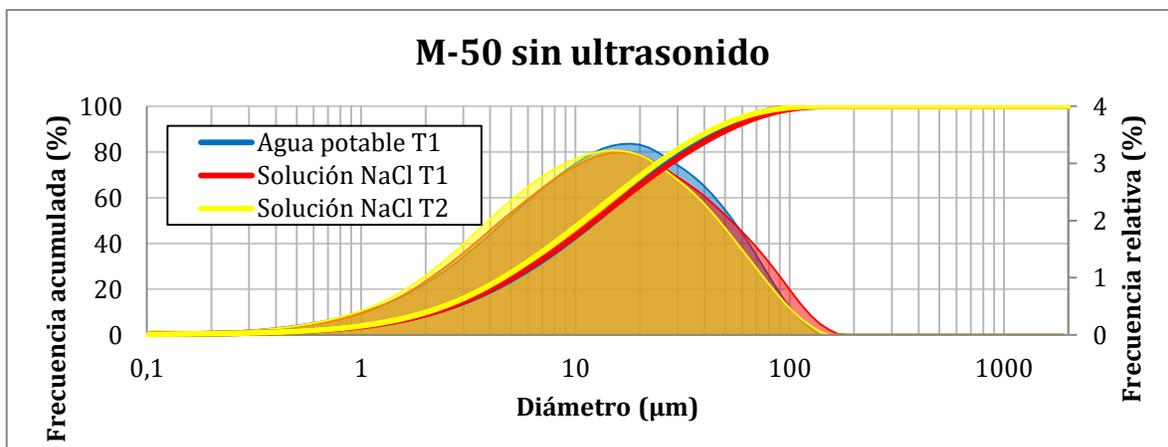


Gráfico 7.162 Muestra M-50 sin ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

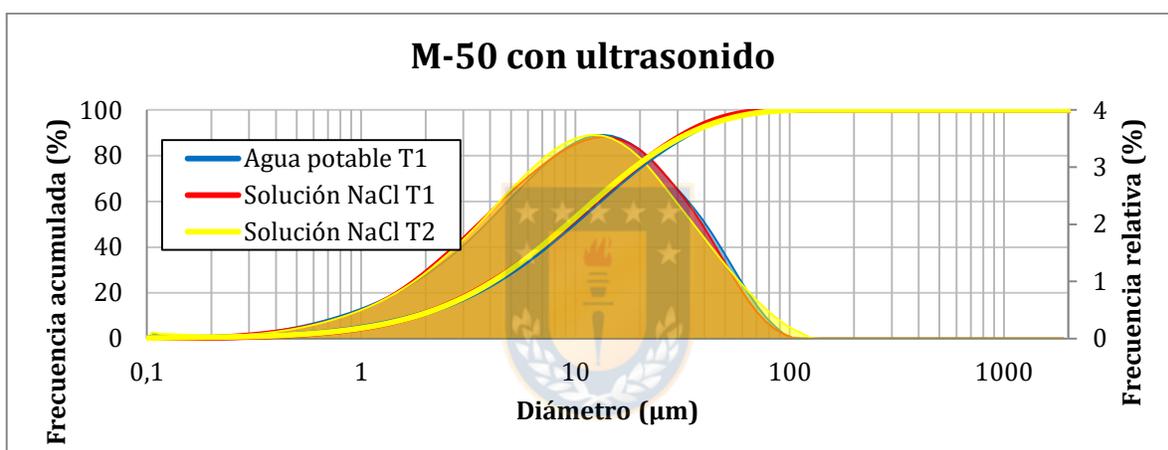


Gráfico 7.163 Muestra M-50 con ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.54 comparativa con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-50 en agua y en solución NaCl. Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	M-50 solución NaCl			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,37	0,37	0,32	0,36
P5 (μm)	1,08	1,29	1,07	1,20
P10 (μm)	1,82	2,20	1,82	2,03
P20 (μm)	3,29	4,06	3,32	3,69
P30 (μm)	4,94	6,24	4,97	5,59
P40 (μm)	6,91	8,94	6,88	7,93
P50 (μm)	9,33	12,35	9,20	10,93
P60 (μm)	12,40	16,87	12,18	14,88
P70 (μm)	16,51	23,30	16,25	20,38
P80 (μm)	22,47	33,51	22,46	28,84
P90 (μm)	32,87	52,18	34,27	44,20
P95 (μm)	42,70	70,35	46,93	59,60
P99 (μm)	62,70	105,55	74,91	91,25
%< 147(μm)	100	99,95	100	100
%<2 μm	11,25	8,88	11,19	9,80

7.3.1.5.- Agua de Mar

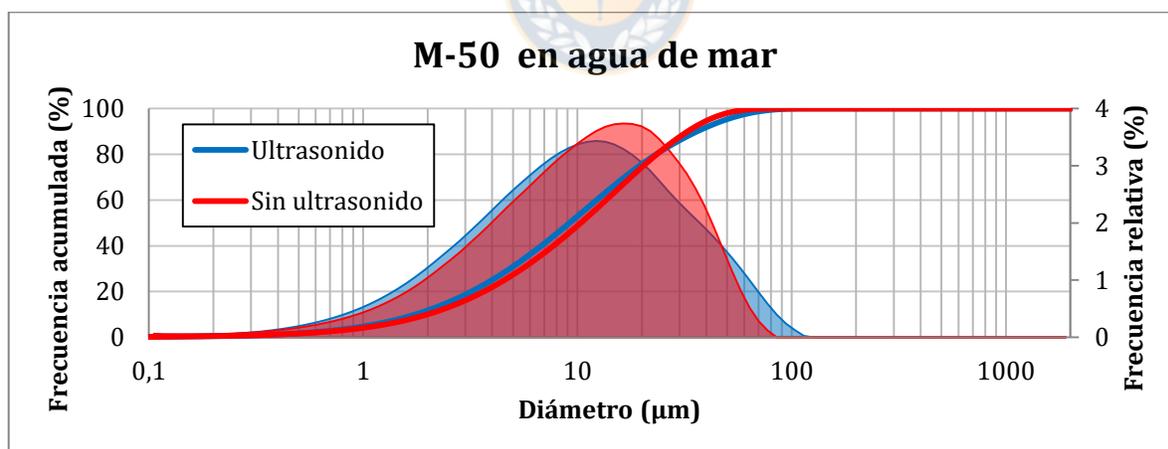


Gráfico 7.164 Muestra M-50 en agua de mar. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

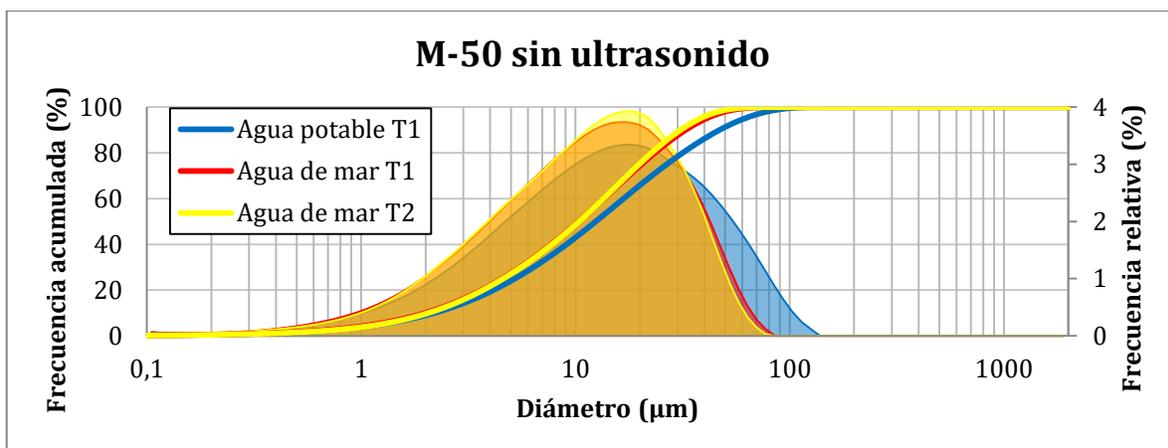


Gráfico 7.165 Muestra M-50 sin ultrasonido, en agua potable y en agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

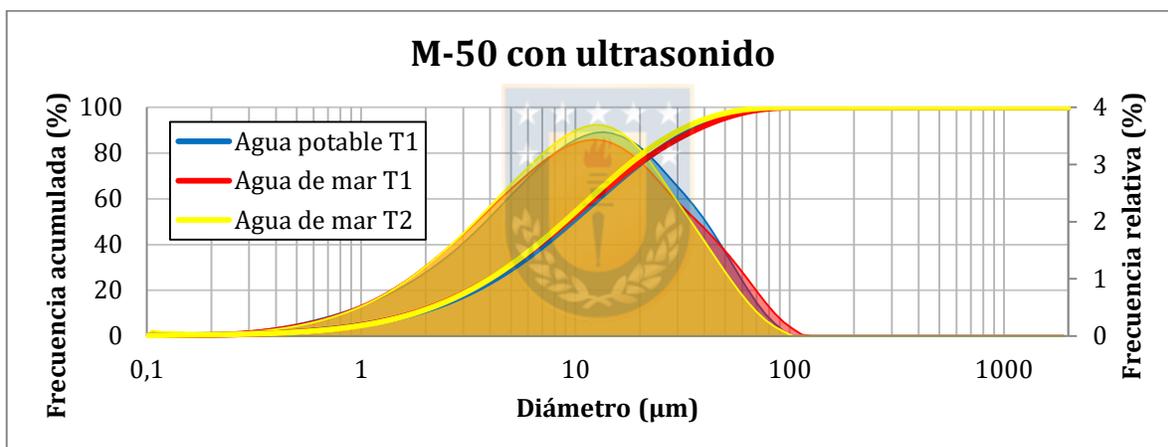


Gráfico 7.166 Muestra M-50 con ultrasonido, en agua potable y en agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.55 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-50 en agua de Mar. Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	M-50 Agua de mar			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,35	0,34	0,34	0,37
P5 (µm)	1,04	1,16	1,06	1,23
P10 (µm)	1,76	1,99	1,78	2,06
P20 (µm)	3,20	3,66	3,22	3,70
P30 (µm)	4,84	5,53	4,81	5,58
P40 (µm)	6,79	7,73	6,67	7,78
P50 (µm)	9,19	10,37	8,89	10,40
P60 (µm)	12,29	13,61	11,66	13,55
P70 (µm)	16,59	17,77	15,33	17,46
P80 (µm)	23,30	23,48	20,75	22,68
P90 (µm)	36,21	32,72	30,69	30,92
P95 (µm)	48,84	40,79	40,76	38,11
P99 (µm)	73,38	55,86	61,71	51,79
%< 147(µm)	100	100	100	100
%<2 µm	11,73	10,03	11,55	9,63

7.3.1.6.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)

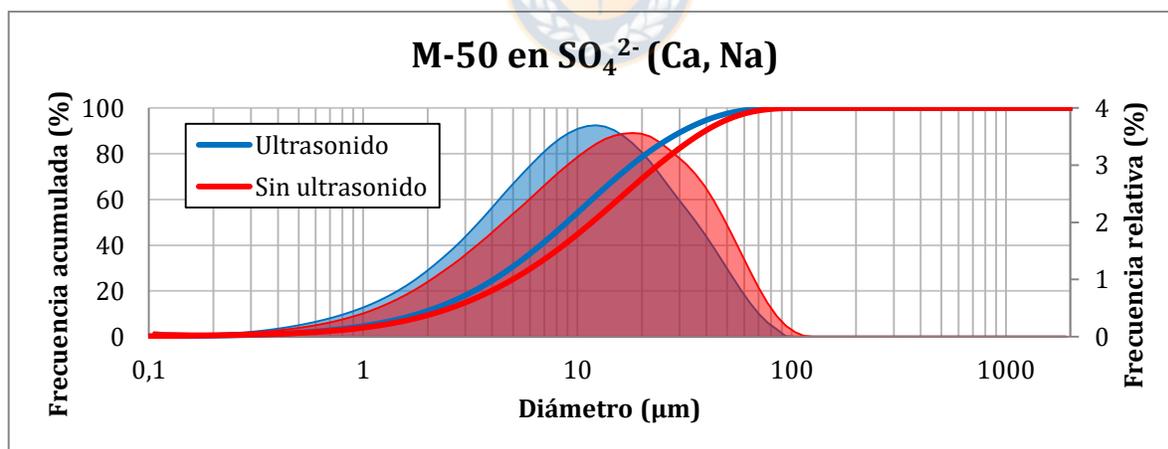


Gráfico 7.167 Muestra M-50 en solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

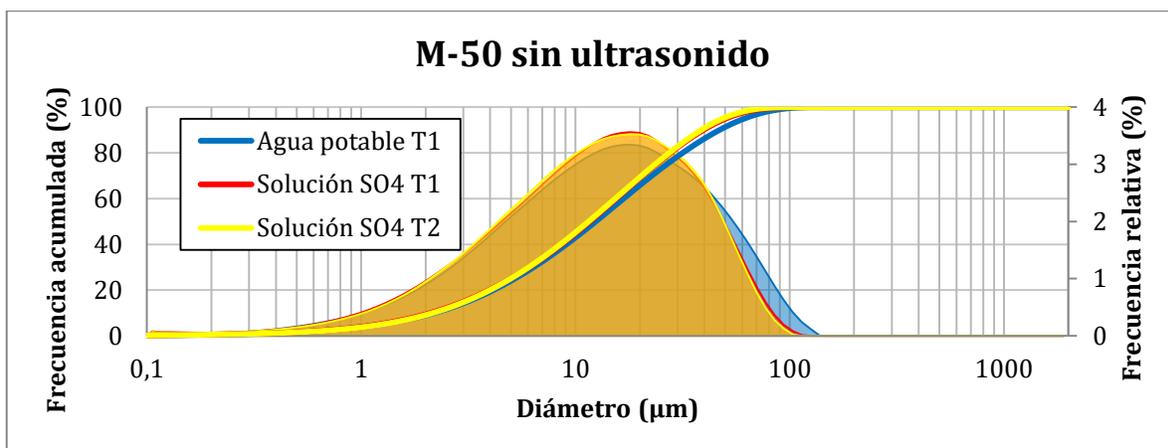


Gráfico 7.168 Muestra M-50. Medición sin ultrasonido en agua potable y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directa (T1).

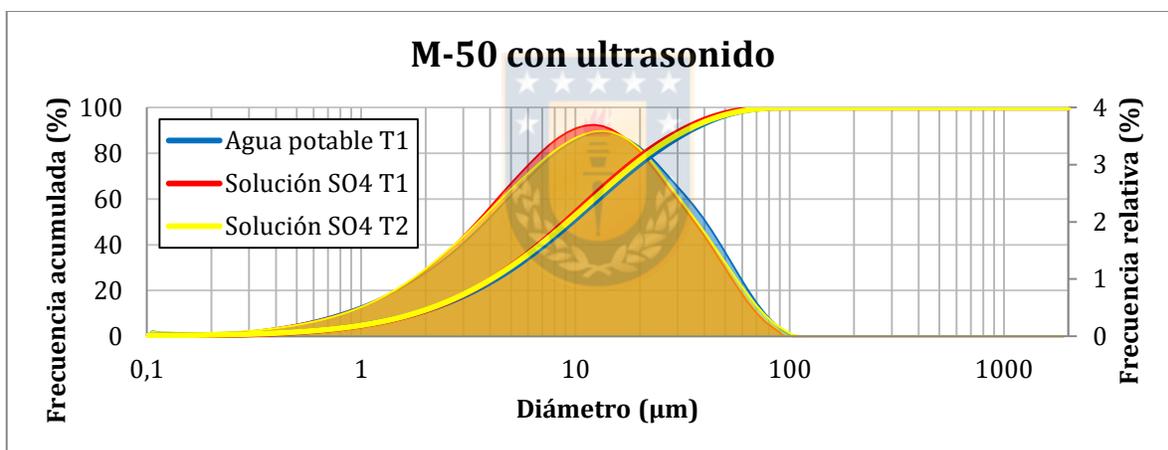


Gráfico 7.169 Muestra M-50. Medición con ultrasonido en agua potable y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directa (T1).

Tabla 7.56 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-50 en solución de SO_4^{2-} (Ca, Na). Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	M-50 Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,35	0,34	0,32	0,35
P5 (μm)	1,06	1,21	1,04	1,25
P10 (μm)	1,81	2,11	1,78	2,16
P20 (μm)	3,29	3,96	3,26	3,99
P30 (μm)	4,89	6,10	4,92	6,06
P40 (μm)	6,73	8,62	6,86	8,52
P50 (μm)	8,94	11,68	9,23	11,53
P60 (μm)	11,70	15,49	12,20	15,35
P70 (μm)	15,42	20,53	16,17	20,37
P80 (μm)	20,97	27,74	22,06	27,46
P90 (μm)	31,04	39,60	32,82	38,72
P95 (μm)	40,82	50,35	43,48	48,82
P99 (μm)	60,16	71,66	65,32	68,01
%< 147(μm)	100	100	100	100
%<2 μm	11,29	9,38	11,51	9,10

7.3.1.7.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)+ HCl; pH=2,26

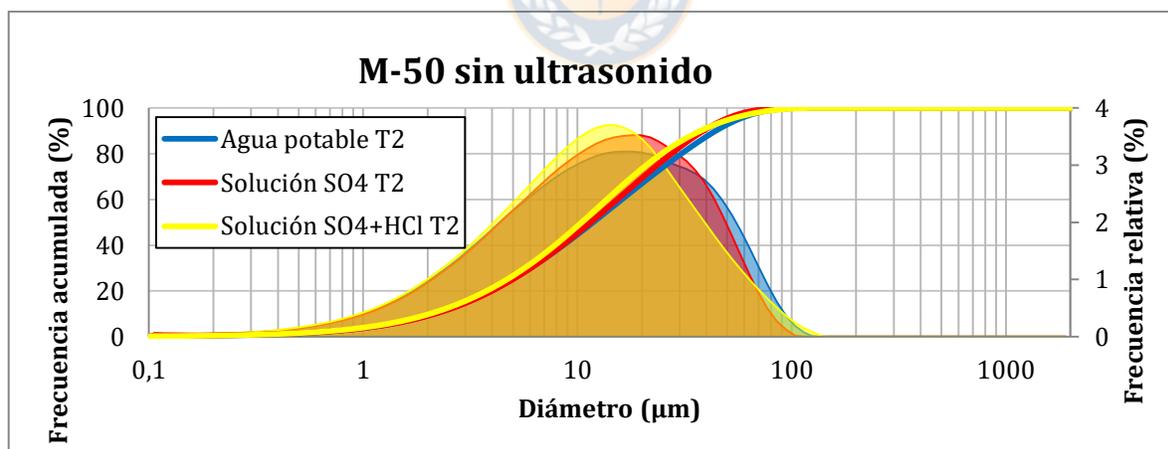


Gráfico 7.170 Muestra M-50 sin ultrasonido con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26).

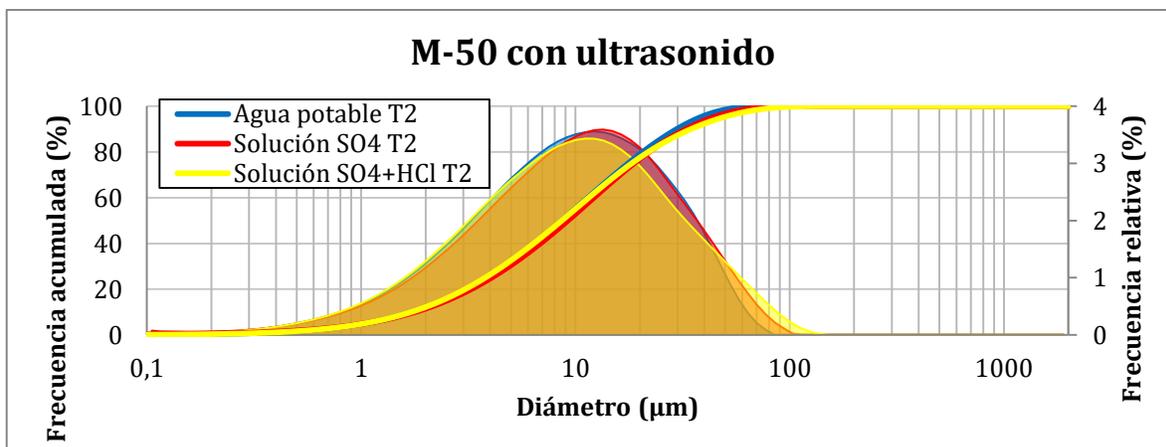


Gráfico 7.171 Muestra M-50 con ultrasonido con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$ (pH=2,26).

Tabla 7.57 Tabla con parámetros estadísticos para muestra M-50 en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$ (pH=2,26). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Parámetro	Muestra tranque de relave M-50					
	T2 Agua Potable		T2 Solución SO_4^{2-}		T2 $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,37	0,38	0,32	0,35	0,38	0,36
P5 (µm)	1,04	1,25	1,04	1,25	1,04	1,19
P10 (µm)	1,75	2,14	1,78	2,16	1,72	2,05
P20 (µm)	3,13	3,95	3,26	3,99	3,06	3,77
P30 (µm)	4,66	6,04	4,92	6,06	4,58	5,67
P40 (µm)	6,45	8,60	6,86	8,52	6,39	7,87
P50 (µm)	8,65	11,85	9,23	11,53	8,64	10,47
P60 (µm)	11,45	16,13	12,20	15,35	11,54	13,72
P70 (µm)	15,21	22,00	16,17	20,37	15,56	18,09
P80 (µm)	20,63	30,57	22,06	27,46	21,93	24,72
P90 (µm)	29,76	44,27	32,82	38,72	34,64	37,46
P95 (µm)	37,87	56,20	43,48	48,82	48,49	51,15
P99 (µm)	53,72	79,34	65,32	68,01	78,22	81,60
%< 147(µm)	100	100	100	100	99,98	100
%<2 µm	11,86	9,20	11,51	9,10	12,16	9,70

7.3.2.- M-11

7.3.2.1.- Agua Potable

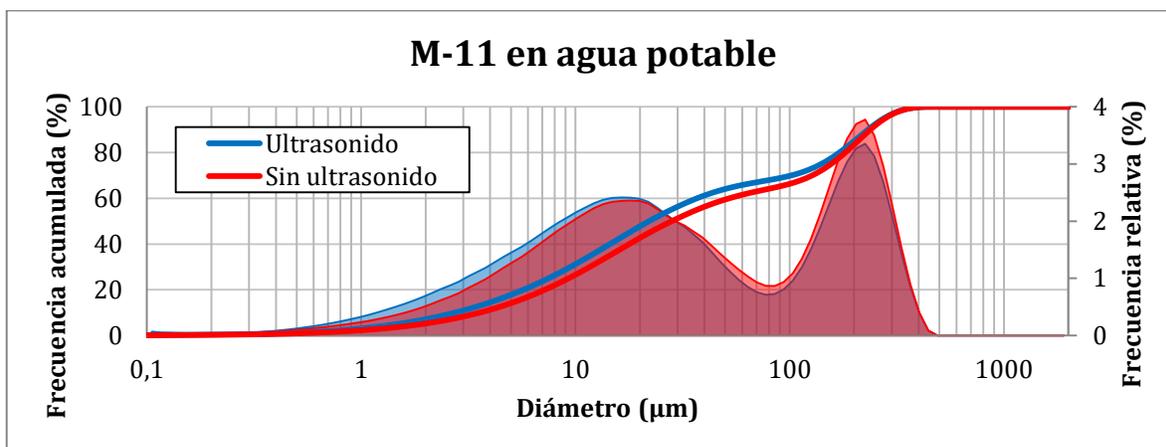


Gráfico 7.172 Muestra M-11 en agua potable con medición directa (T1), con y sin ultrasonido.

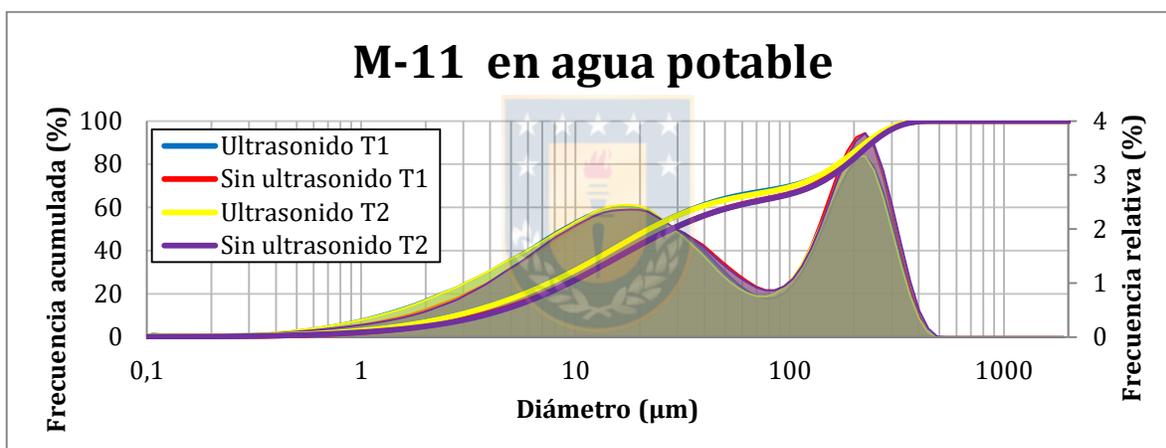


Gráfico 7.173 Muestra M-11 en agua potable. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

7.3.2.2.- Agua Destilada

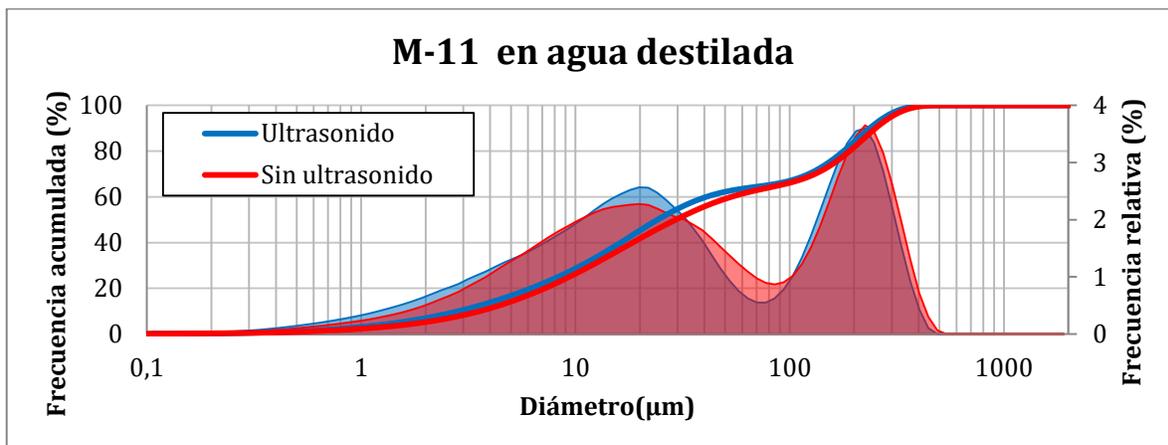


Gráfico 7.174 Muestra M-11 en agua destilada. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

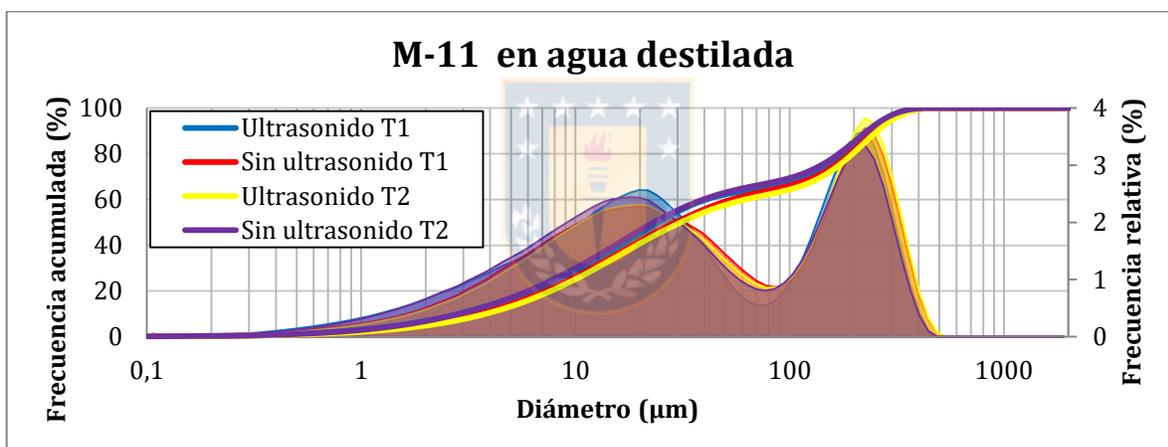


Gráfico 7.175 Muestra M-11 en agua destilada. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

Tabla 7.58 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-11 en agua potable y en agua destilada. Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	M-11 Agua potable				M-11 Agua destilada			
	T1		T2 [24 h]		T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,45	0,53	0,44	0,53	0,46	0,52	0,46	0,55
P5 (µm)	1,48	1,92	1,49	1,99	1,49	1,92	1,54	2,05
P10 (µm)	2,75	3,58	2,77	3,70	2,84	3,58	2,87	3,82
P20 (µm)	5,72	7,21	5,75	7,27	6,22	7,20	6,03	7,68
P30 (µm)	9,48	11,68	9,56	11,70	10,67	11,89	10,04	12,54
P40 (µm)	14,51	17,87	14,61	17,89	16,30	18,53	15,31	19,37
P50 (µm)	22,09	28,17	22,11	28,14	24,22	29,45	23,23	31,02
P60 (µm)	36,99	52,35	37,63	53,06	40,94	53,66	39,57	62,13
P70 (µm)	101,58	127,24	104,67	129,35	122,49	131,03	104,90	141,41
P80 (µm)	170,49	181,76	168,01	185,47	178,43	190,43	169,45	196,89
P90 (µm)	232,16	238,36	227,78	243,50	236,90	251,71	230,42	257,31
P95 (µm)	275,49	279,57	271,25	286,82	279,56	298,51	273,94	302,75
P99 (µm)	351,29	352,87	345,76	361,35	355,04	376,93	349,86	381,99
% < 147 (µm)	76,08	73,35	76,31	72,88	74,11	72,43	76,14	70,92
% < 2 µm	7,10	5,23	7,03	5,03	6,95	5,23	6,78	4,85

7.3.2.3.- Solución CaCl₂

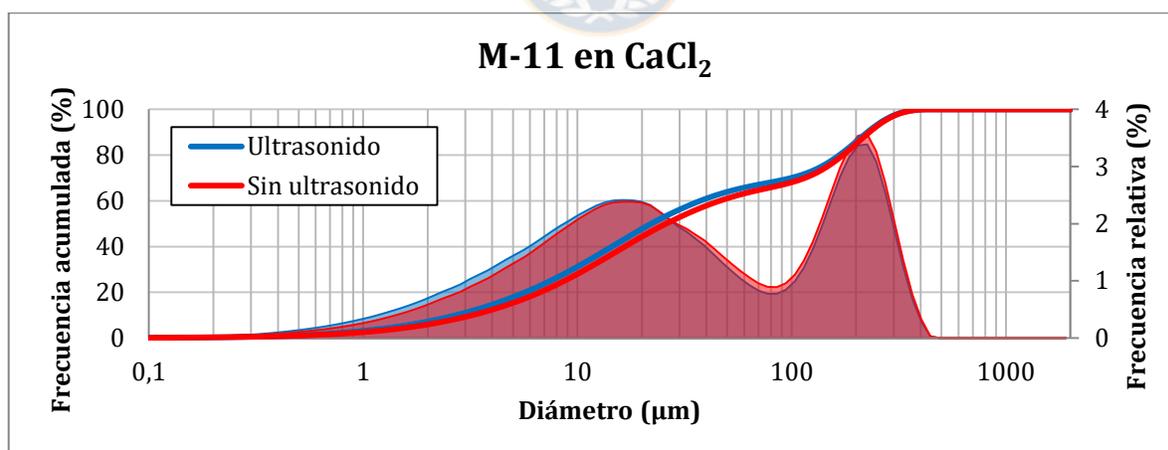


Gráfico 7.176 Muestra M-11 en solución de CaCl₂. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

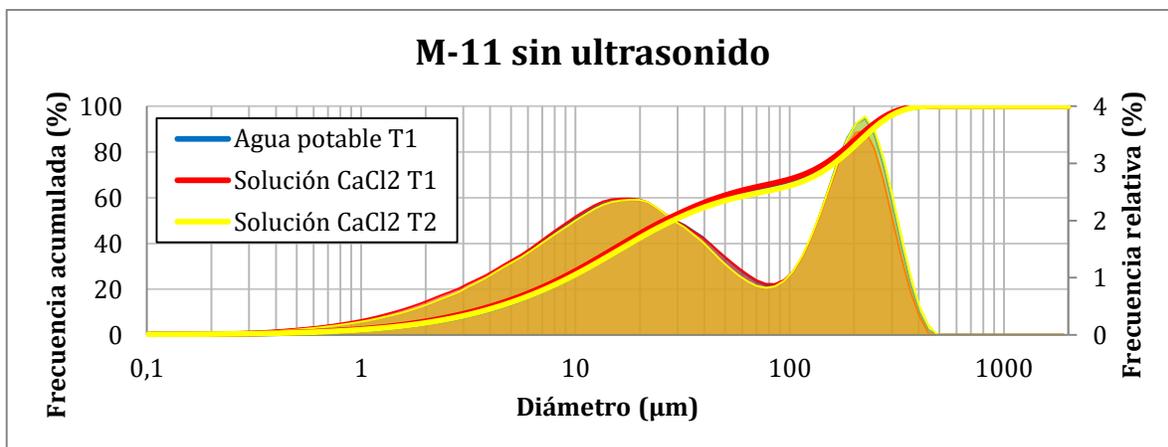


Gráfico 7.177 Muestra M-11 sin ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de CaCl₂ con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

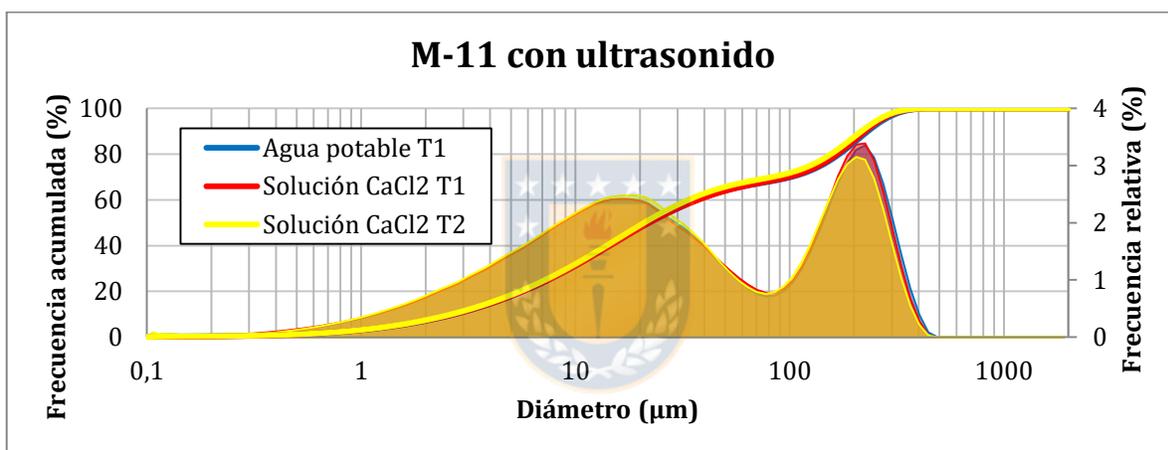


Gráfico 7.178 Muestra M-11 con ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de CaCl₂ con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.59 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-11 en solución de CaCl_2 . Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	M-11 Solución CaCl_2			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,45	0,48	0,44	0,53
P5 (μm)	1,46	1,73	1,45	1,92
P10 (μm)	2,72	3,24	2,68	3,56
P20 (μm)	5,70	6,70	5,54	7,22
P30 (μm)	9,48	10,95	9,17	11,79
P40 (μm)	14,52	16,70	14,01	18,04
P50 (μm)	22,13	25,98	21,34	28,50
P60 (μm)	37,44	46,10	36,10	56,26
P70 (μm)	99,15	115,00	95,36	133,38
P80 (μm)	166,75	173,49	161,80	187,09
P90 (μm)	225,57	230,70	222,21	244,54
P95 (μm)	268,02	272,30	265,44	288,05
P99 (μm)	337,66	343,41	336,92	362,58
%< 147(μm)	76,56	75,09	77,43	72,35
%<2 μm	7,21	5,92	7,29	5,24

7.3.2.7.- Solución NaCl

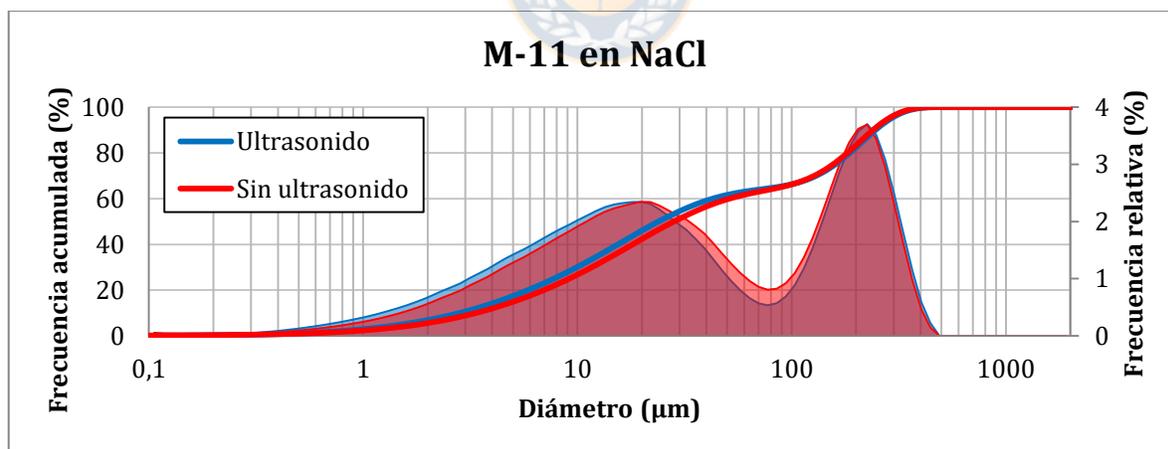


Gráfico 7.179 Muestra M-11 medida en solución de NaCl. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

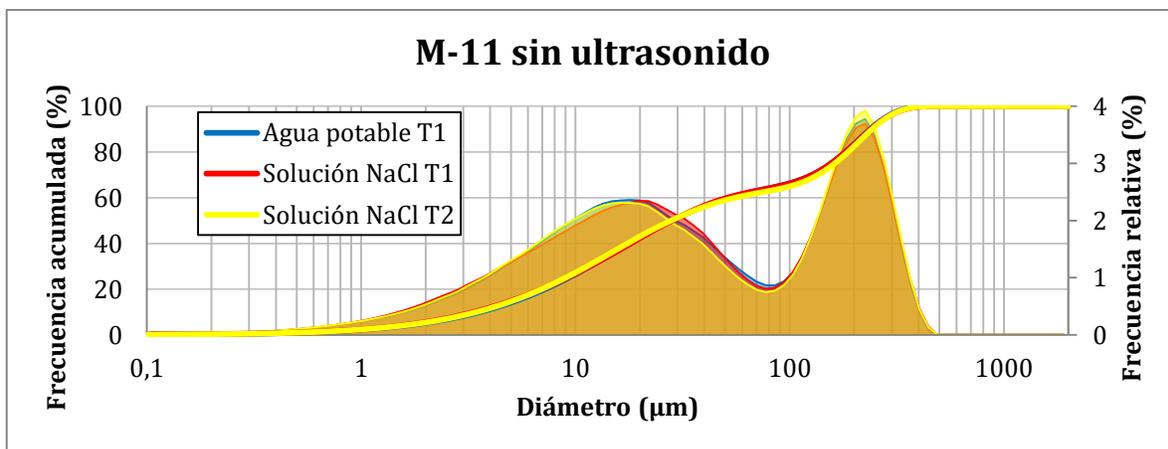


Gráfico 7.180 Muestra M-11 sin ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

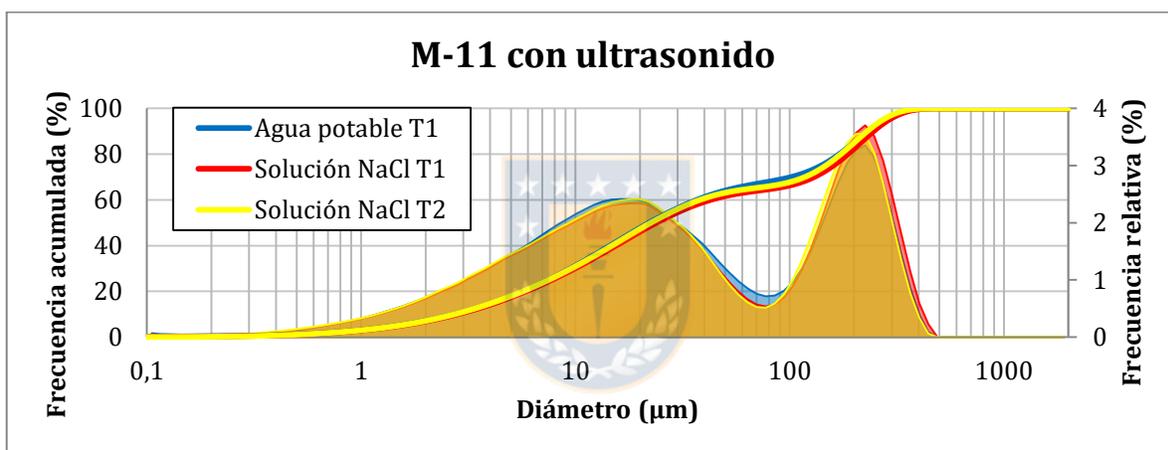


Gráfico 7.181 Muestra M-11 con ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.60 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-11 en solución de NaCl. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	M-11 Solución NaCl			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,47	0,51	0,48	0,52
P5 (μm)	1,52	1,82	1,49	1,86
P10 (μm)	2,82	3,36	2,74	3,45
P20 (μm)	5,88	6,97	5,68	6,96
P30 (μm)	9,95	11,69	9,60	11,36
P40 (μm)	15,46	18,15	14,84	17,53
P50 (μm)	23,91	28,24	22,53	27,96
P60 (μm)	42,84	51,24	38,12	55,70
P70 (μm)	129,83	127,24	117,52	135,30
P80 (μm)	186,70	181,99	173,33	187,09
P90 (μm)	246,10	240,05	230,19	242,88
P95 (μm)	291,37	283,22	272,26	284,87
P99 (μm)	367,30	358,92	345,27	358,19
%< 147(μm)	72,75	73,37	74,96	72,10
%<2 μm	6,89	5,60	7,08	5,43

7.3.2.5.- Agua de Mar

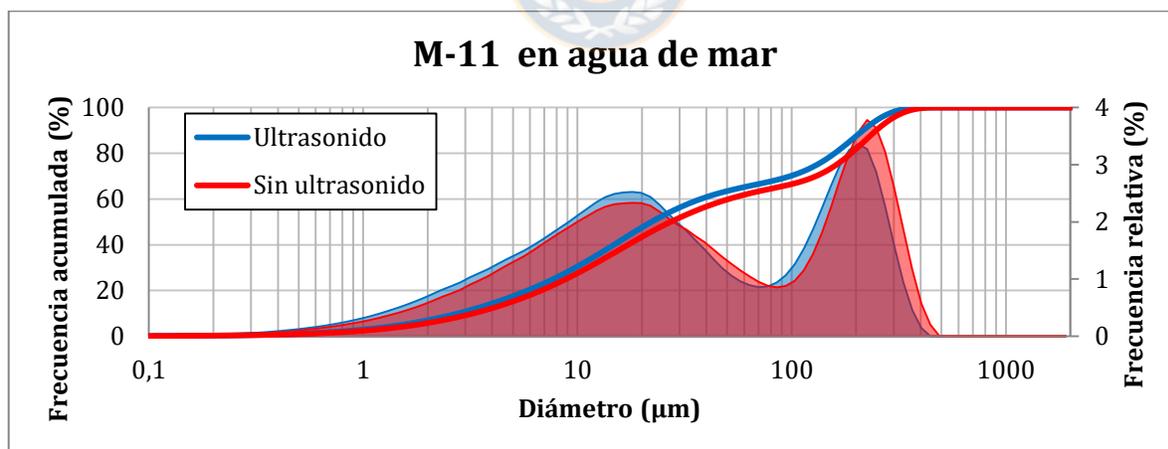


Gráfico 7.182 Muestra M-11 en agua de mar. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

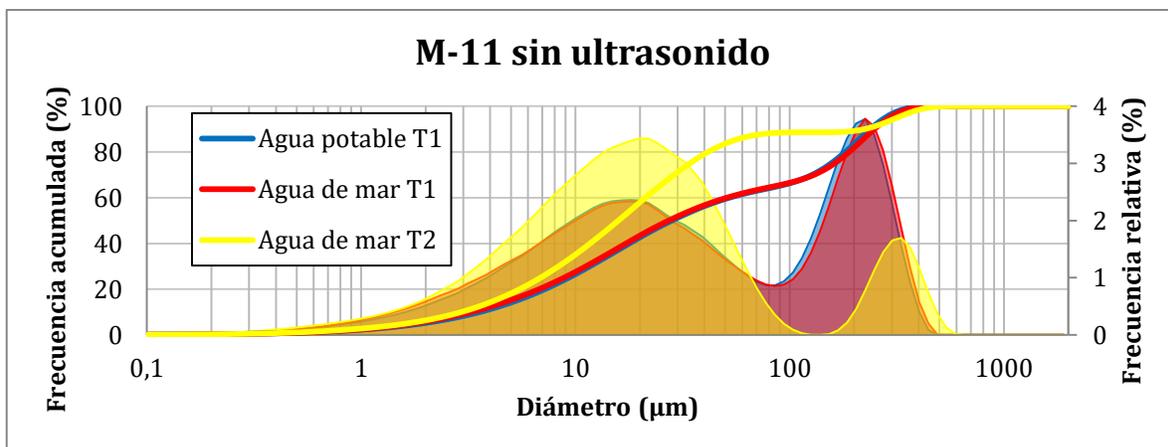


Gráfico 7.183 Muestra M-11 sin ultrasonido, en agua potable y en agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

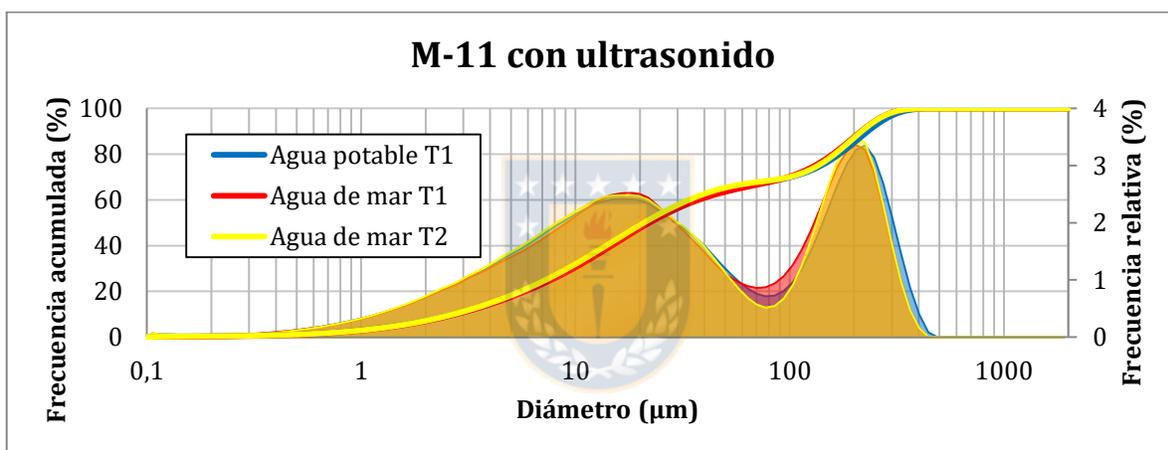


Gráfico 7.184 Muestra M-11 con ultrasonido, en agua potable y en agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.61 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-11 agua de mar. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

Parámetro	M-11 Agua de mar			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,48	0,53	0,46	0,47
P5 (µm)	1,52	1,78	1,49	1,64
P10 (µm)	2,78	3,28	2,71	2,94
P20 (µm)	5,86	6,78	5,57	5,50
P30 (µm)	9,80	11,22	9,19	8,35
P40 (µm)	14,82	17,27	13,93	11,72
P50 (µm)	22,17	27,30	20,86	15,87
P60 (µm)	37,63	50,92	33,91	21,22
P70 (µm)	98,14	129,57	99,27	28,89
P80 (µm)	158,67	189,43	162,07	41,62
P90 (µm)	215,60	248,23	217,11	223,12
P95 (µm)	255,22	292,50	256,15	317,67
P99 (µm)	324,16	366,19	324,84	426,60
%< 147(µm)	77,83	72,57	77,10	88,60
%<2 µm	6,96	5,77	7,15	6,36

7.3.2.6.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)

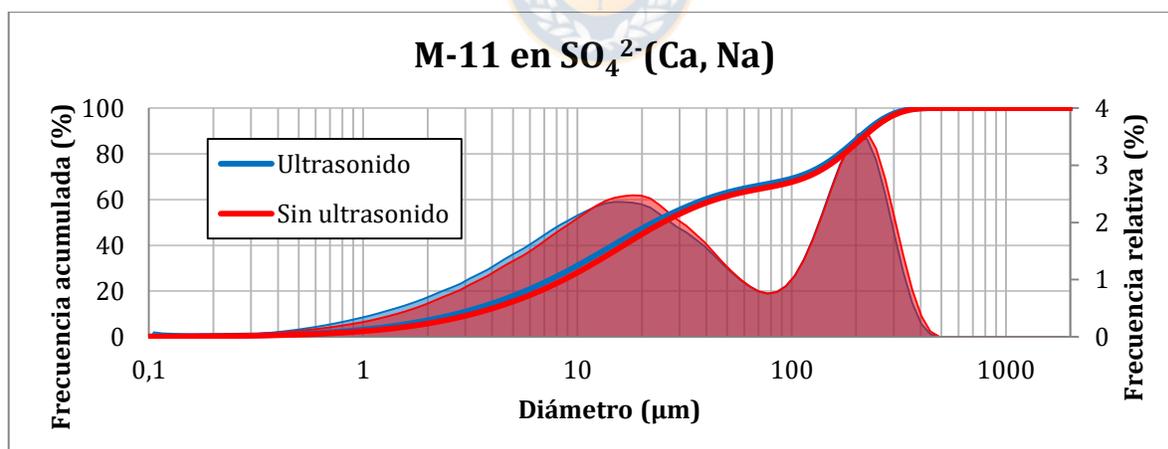


Gráfico 7.185 Muestra M-11 en solución SO_4^{2-} (Ca,Na). Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

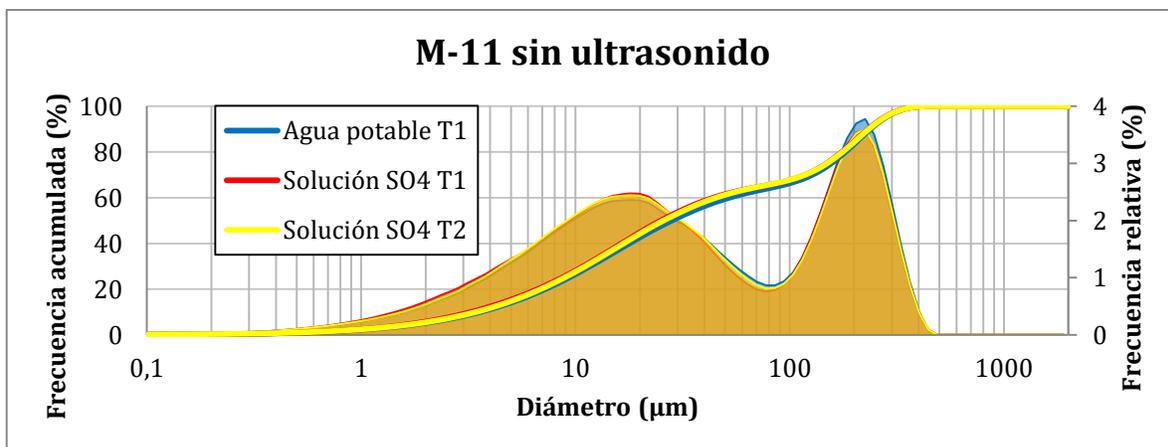


Gráfico 7.186 Muestra M-11. Medición sin ultrasonido en agua potable y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directa (T1).

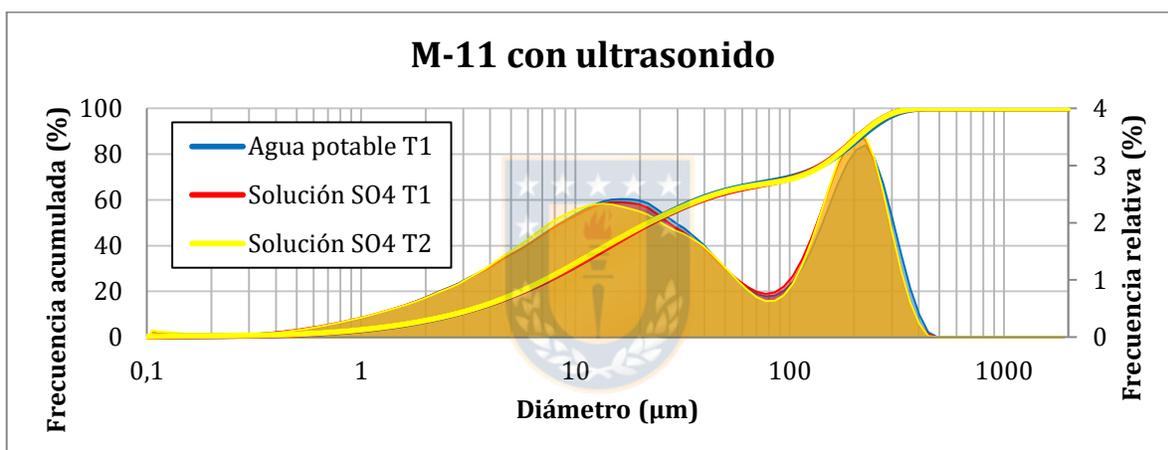


Gráfico 7.187 Muestra M-11. Medición con ultrasonido en agua potable y en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directa (T1).

Tabla 7.62 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-11 en solución SO_4^{2-} (Ca, Na) con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1).

Parámetro	M-11 Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,44	0,52	0,40	0,50
P5 (μm)	1,45	1,77	1,43	1,84
P10 (μm)	2,72	3,26	2,70	3,44
P20 (μm)	5,70	6,67	5,57	6,89
P30 (μm)	9,50	10,90	9,09	11,12
P40 (μm)	14,64	16,46	13,97	16,80
P50 (μm)	22,60	25,04	21,97	25,78
P60 (μm)	39,21	44,14	38,03	45,33
P70 (μm)	106,24	118,02	108,65	117,75
P80 (μm)	166,60	175,36	168,40	176,40
P90 (μm)	223,02	233,13	223,85	234,59
P95 (μm)	264,08	274,98	264,68	276,28
P99 (μm)	333,73	349,67	333,63	351,21
%< 147(μm)	76,34	74,71	75,93	74,61
%<2 μm	7,23	5,79	7,30	5,49

7.3.2.7.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na) + HCl; pH=2,26

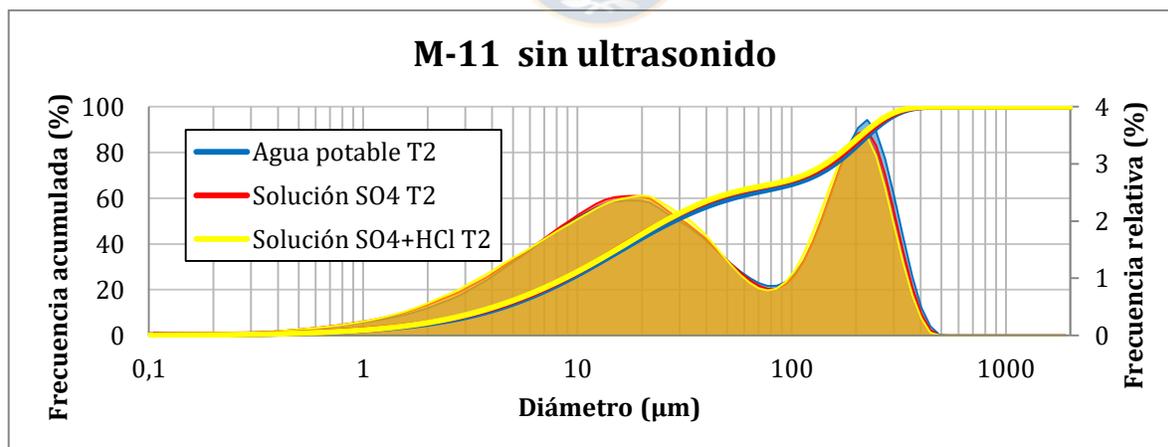


Gráfico 7.188 Muestra M-11 sin ultrasonido con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución SO_4^{2-} +HCl (pH=2,26).

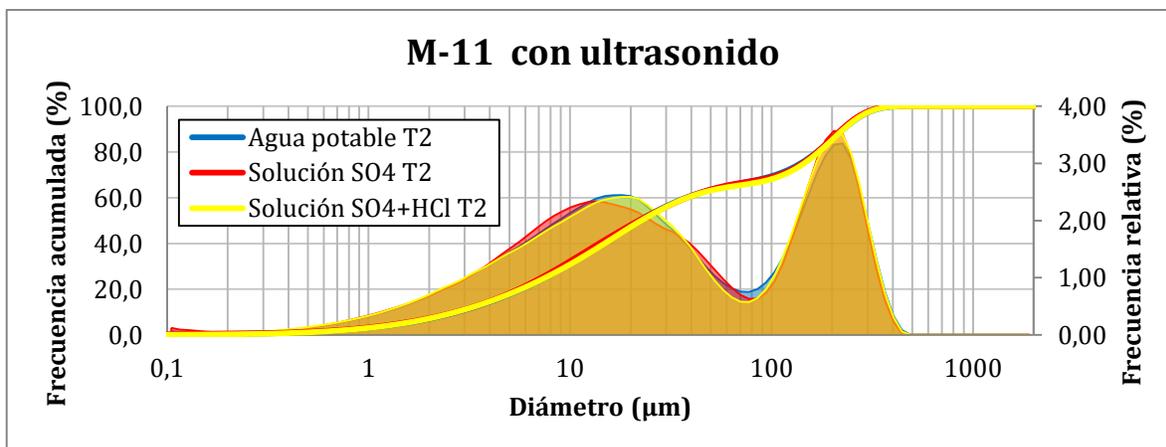


Gráfico 7.189 Muestra M-11 con ultrasonid. Medición con tiempo de permanencia en fluido (T2), en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$ (pH=2,26).

Tabla 7.63 Tabla con parámetros estadísticos para muestra M-11 en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$ (pH=2,26). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Parámetro	Muestra tranque de relave M-11					
	T2 Agua potable		T2 Solución SO_4^{2-}		T2 $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,44	0,53	0,40	0,50	0,47	0,53
P5 (µm)	1,49	1,99	1,43	1,84	1,48	1,84
P10 (µm)	2,77	3,70	2,70	3,44	2,72	3,34
P20 (µm)	5,75	7,27	5,57	6,89	5,71	6,71
P30 (µm)	9,56	11,70	9,09	11,12	9,63	11,04
P40 (µm)	14,61	17,89	13,97	16,80	14,87	16,84
P50 (µm)	22,11	28,14	21,97	25,78	22,56	25,60
P60 (µm)	37,63	53,06	38,03	45,33	38,16	43,65
P70 (µm)	104,67	129,35	108,65	117,75	114,61	113,30
P80 (µm)	168,01	185,47	168,40	176,40	171,52	169,83
P90 (µm)	227,78	243,50	223,85	234,59	228,50	226,52
P95 (µm)	271,25	286,82	264,68	276,28	270,77	268,89
P99 (µm)	345,76	361,35	333,63	351,21	343,06	340,05
%< 147(µm)	76,31	72,88	75,93	74,61	75,36	75,66
%<2 µm	7,03	5,03	7,30	5,49	7,15	5,54

7.7.- Muestra Canal de Relave

7.7.1.- M-5

7.7.1.1.- Agua Potable

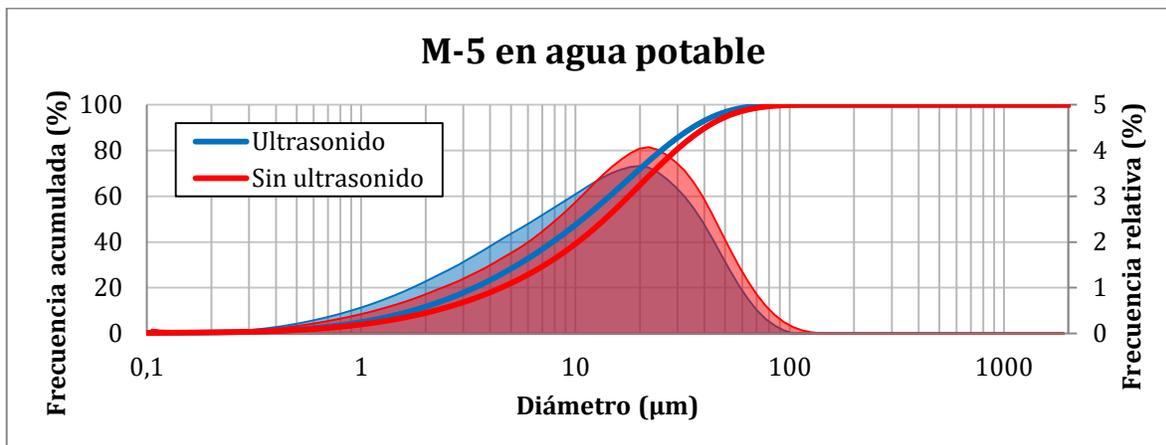


Gráfico 7.190 M-5 en agua potable con medición directa (T1), con y sin ultrasonido.

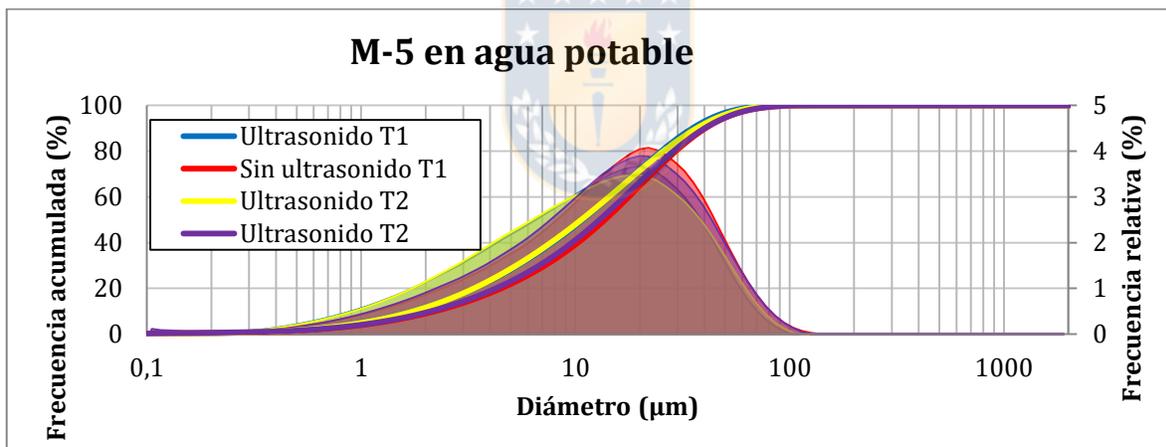


Gráfico 7.191 M-5 en agua potable. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

7.7.1.2.- Agua Destilada

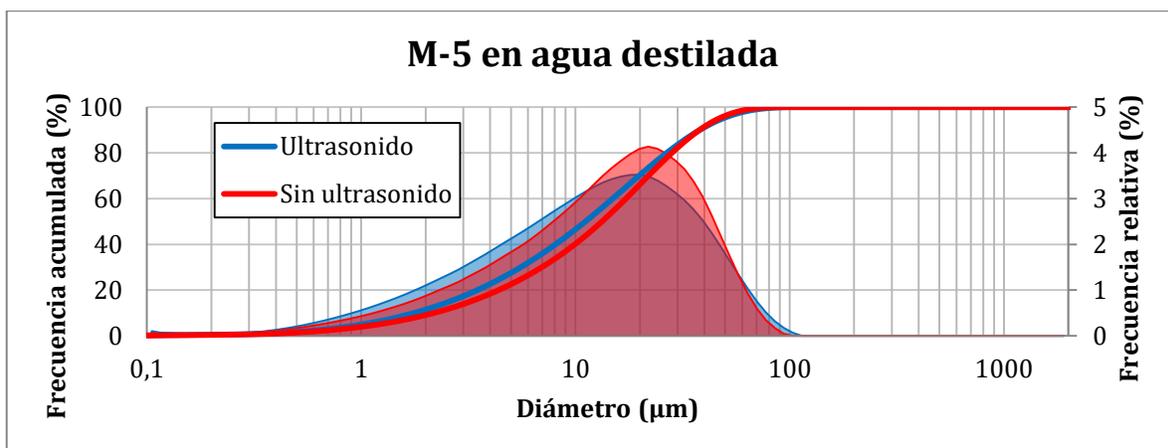


Gráfico 7.192 M-5 en agua destilada. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

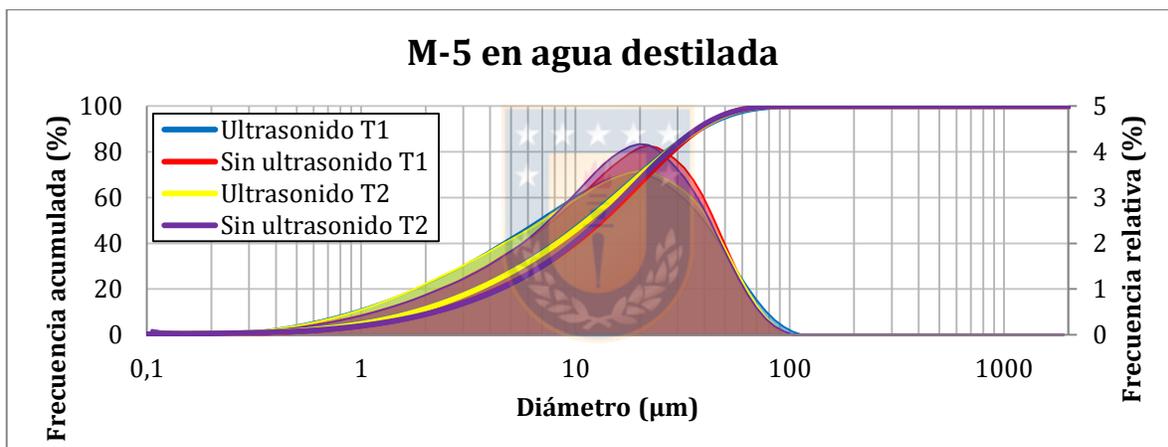


Gráfico 7.193 M-5 en agua destilada. Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2) y directas (T1), con y sin ultrasonido.

Tabla 7.67 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-5 en agua potable y agua destilada. Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	M-5 Agua potable				M-5 Agua destilada			
	T1		T2 [24 h]		T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,37	0,38	0,36	0,35	0,36	0,40	0,36	0,37
P5 (µm)	1,01	1,21	1,02	1,17	1,01	1,21	1,03	1,22
P10 (µm)	1,74	2,21	1,75	2,11	1,77	2,19	1,79	2,20
P20 (µm)	3,38	4,51	3,36	4,26	3,48	4,38	3,49	4,42
P30 (µm)	5,38	7,21	5,30	6,78	5,56	6,97	5,62	6,97
P40 (µm)	7,83	10,28	7,69	9,66	8,08	9,95	8,23	9,79
P50 (µm)	10,81	13,73	10,67	12,97	11,14	13,32	11,38	12,93
P60 (µm)	14,43	17,75	14,36	16,90	14,93	17,21	15,26	16,58
P70 (µm)	18,95	22,68	19,11	21,86	19,82	21,94	20,18	21,05
P80 (µm)	25,15	29,47	25,78	28,74	26,71	28,20	26,96	27,21
P90 (µm)	35,18	40,52	36,82	40,13	38,01	37,91	37,56	37,06
P95 (µm)	44,45	51,07	46,94	50,89	48,73	46,68	46,94	46,04
P99 (µm)	63,14	74,82	67,35	74,14	69,89	64,07	65,05	64,46
%< 147(µm)	100	100	100	100	100	100	100	100
%<2 µm	11,05	9,45	11,63	9,41	11,45	9,07	11,38	8,99

7.7.1.3.- Solución CaCl₂

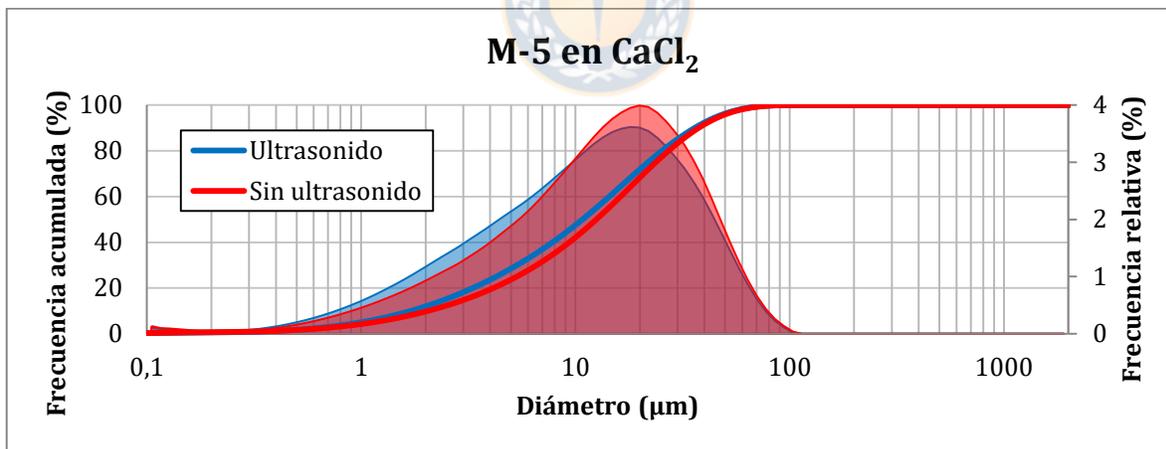


Gráfico 7.194 M-5 en solución de CaCl₂, Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

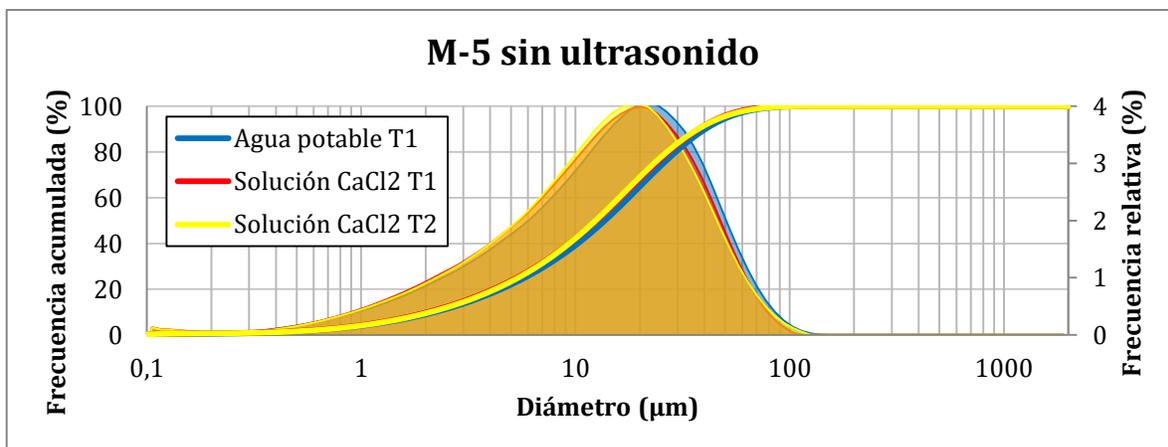


Gráfico 7.195 M-5 sin ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

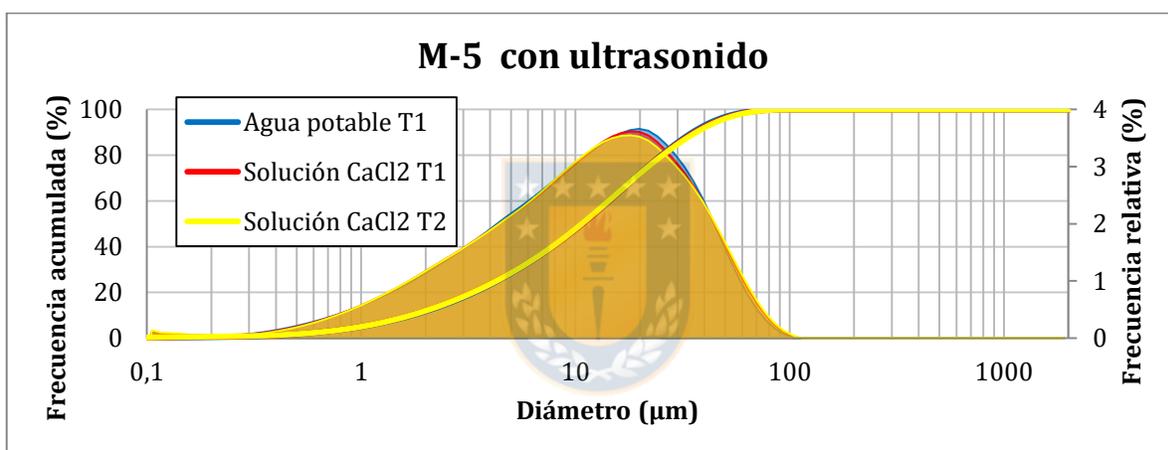


Gráfico 7.196 M-5 con ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de CaCl_2 con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.68 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-5 en solución CaCl₂. Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	M-5 Solución CaCl ₂			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,34	0,33	0,33	0,36
P5 (μm)	1,00	1,14	1,00	1,17
P10 (μm)	1,71	2,05	1,71	2,11
P20 (μm)	3,32	4,14	3,32	4,23
P30 (μm)	5,34	6,60	5,34	6,66
P40 (μm)	7,82	9,37	7,78	9,37
P50 (μm)	10,80	12,53	10,71	12,42
P60 (μm)	14,39	16,25	14,30	16,01
P70 (μm)	18,94	20,84	18,93	20,48
P80 (μm)	25,34	27,24	25,53	26,78
P90 (μm)	36,06	37,57	36,66	37,42
P95 (μm)	45,91	47,36	46,90	48,08
P99 (μm)	66,19	67,61	67,59	71,98
%< 147(μm)	100	100	100	100
%<2 μm	11,98	9,73	11,98	9,43

7.7.1.7.- Solución NaCl

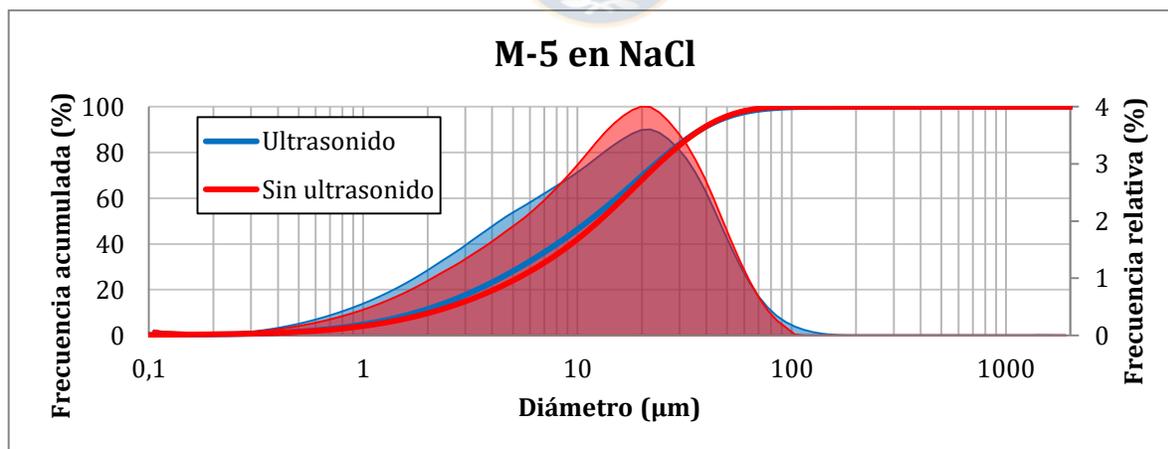


Gráfico 7.197 M-5 medida en solución de NaCl. Mediciones directas (T1) con y sin ultrasonido.

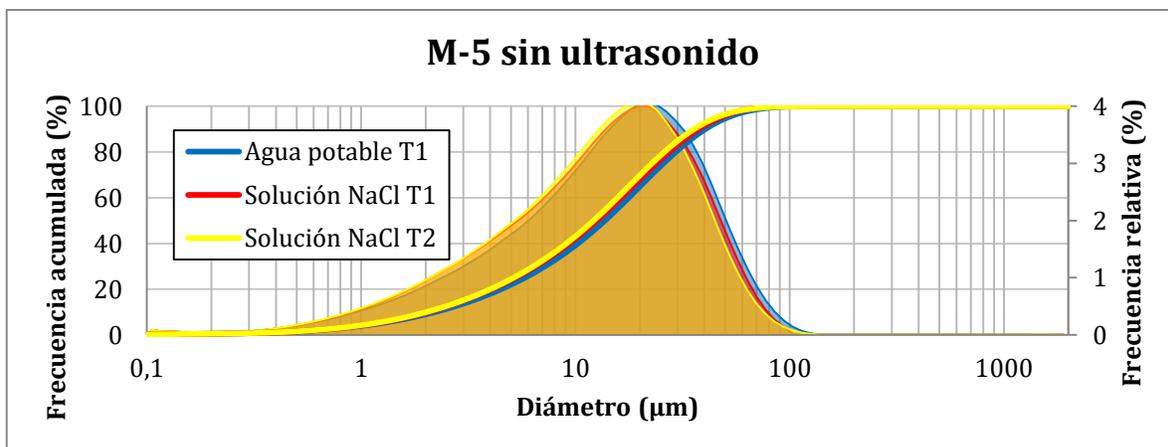


Gráfico 7.198 M-5 sin ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

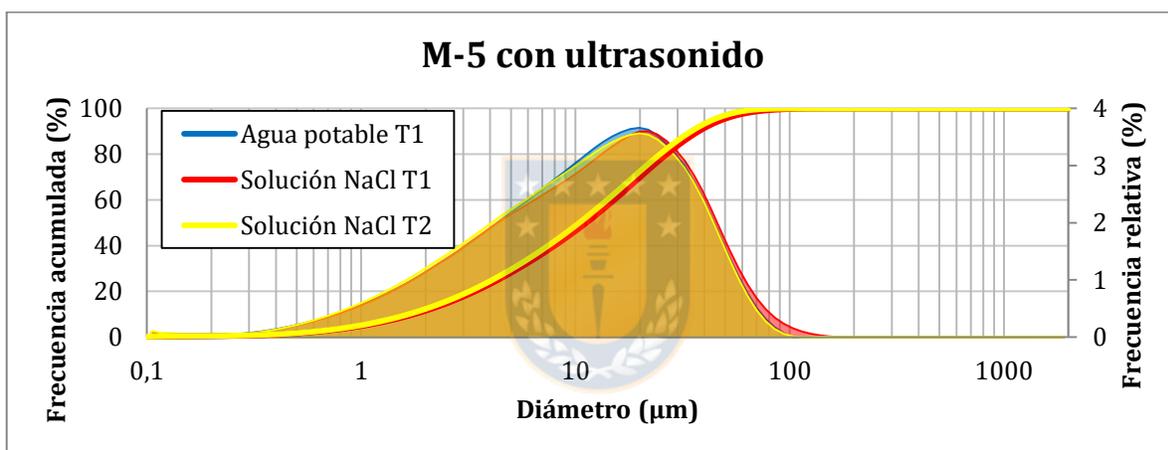


Gráfico 7.199 M-5 con ultrasonido. Mediciones en agua potable y en solución de NaCl con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.69 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-5 en solución NaCl. Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	M-5 Solución NaCl			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (µm)	0,38	0,37	0,35	0,37
P5 (µm)	1,03	1,17	0,98	1,14
P10 (µm)	1,77	2,06	1,67	2,02
P20 (µm)	3,40	4,09	3,21	4,01
P30 (µm)	5,43	6,53	5,10	6,38
P40 (µm)	8,03	9,37	7,47	9,09
P50 (µm)	11,27	12,60	10,42	12,16
P60 (µm)	15,22	16,38	14,06	15,72
P70 (µm)	20,12	21,00	18,64	20,09
P80 (µm)	26,80	27,39	24,85	26,03
P90 (µm)	37,69	37,66	34,76	35,89
P95 (µm)	48,63	47,39	43,88	45,38
P99 (µm)	75,12	67,43	62,11	67,46
%< 147(µm)	100	100	100	100
%<2 µm	11,54	9,66	12,33	9,88

7.7.1.5.- Agua de Mar

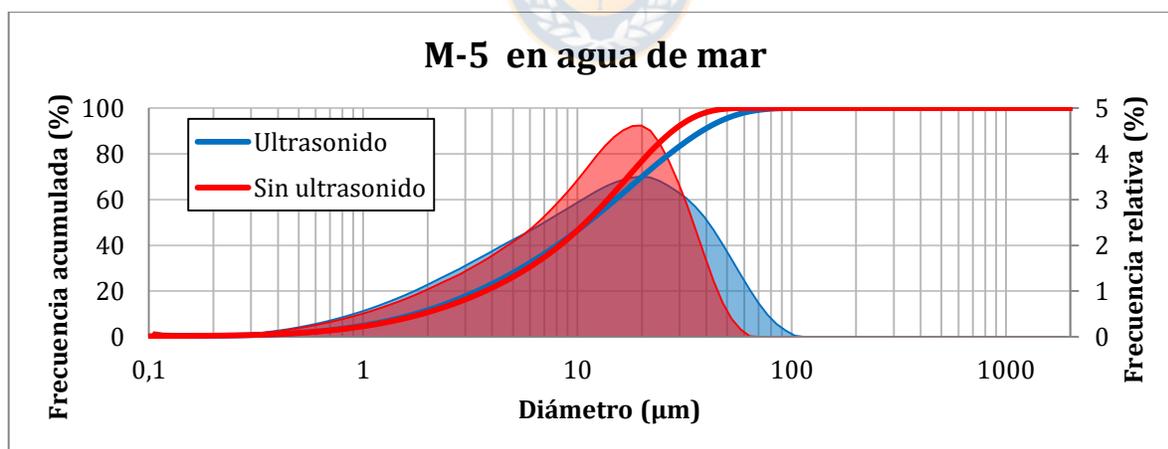


Gráfico 7.200 M-5 en agua de mar. Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

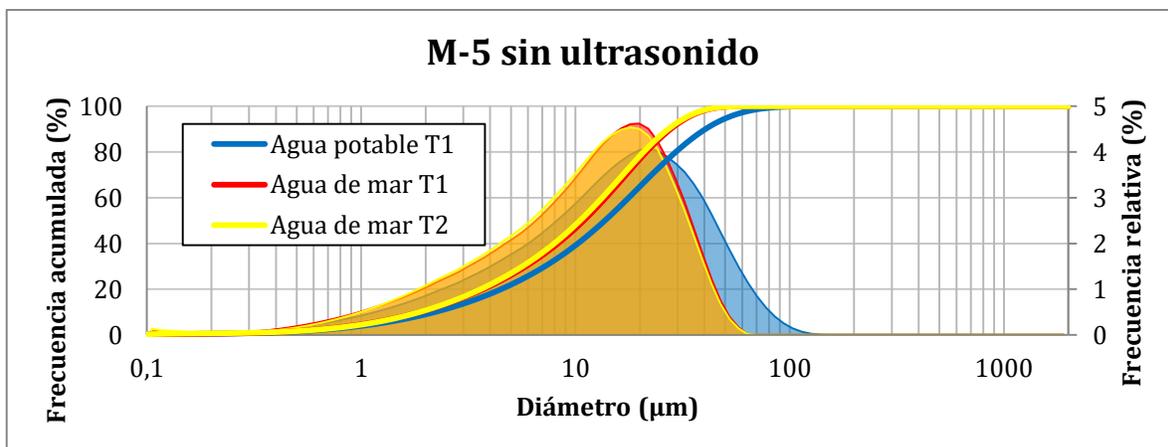


Gráfico 7.201 M-5 sin ultrasonido, en agua potable y en agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

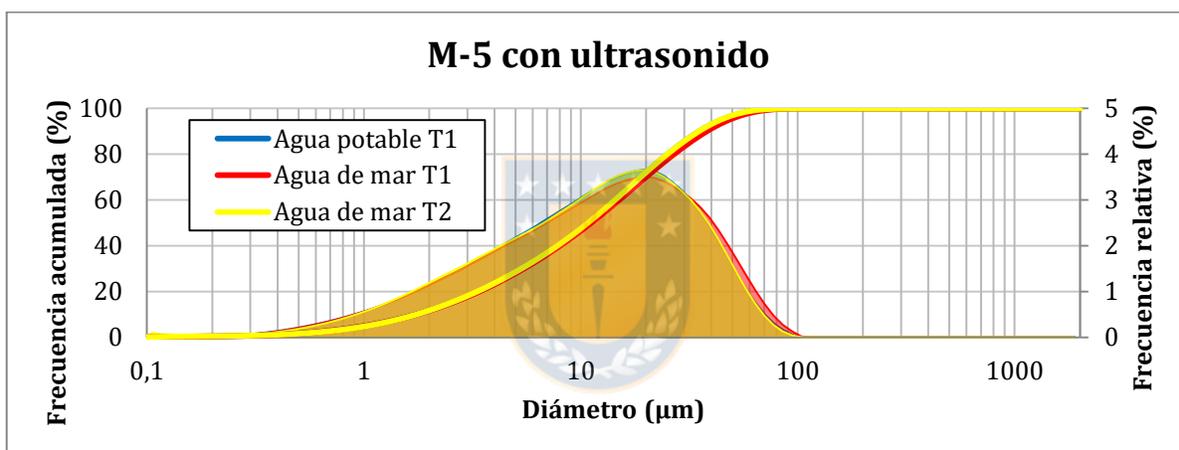


Gráfico 7.202 M-5 con ultrasonido, en agua potable y en agua de mar con medición directa (T1) y con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Tabla 7.70 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-5 en agua de mar. Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	M-5 Agua de mar			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,37	0,36	0,37	0,34
P5 (μm)	1,01	1,07	1,04	1,09
P10 (μm)	1,75	1,88	1,75	1,88
P20 (μm)	3,40	3,71	3,33	3,62
P30 (μm)	5,46	5,87	5,32	5,67
P40 (μm)	8,03	8,29	7,79	7,97
P50 (μm)	11,18	10,94	10,78	10,51
P60 (μm)	15,05	13,85	14,37	13,34
P70 (μm)	20,02	17,23	18,88	16,66
P80 (μm)	26,96	21,47	25,08	20,81
P90 (μm)	38,08	27,83	35,06	27,19
P95 (μm)	48,35	33,39	44,10	32,75
P99 (μm)	68,05	43,72	61,74	43,05
%< 147(μm)	100	100	100	100
%<2 μm	11,65	10,70	11,74	10,77

7.7.1.6.- Solución SO_4^{2-} -(Ca, Na)

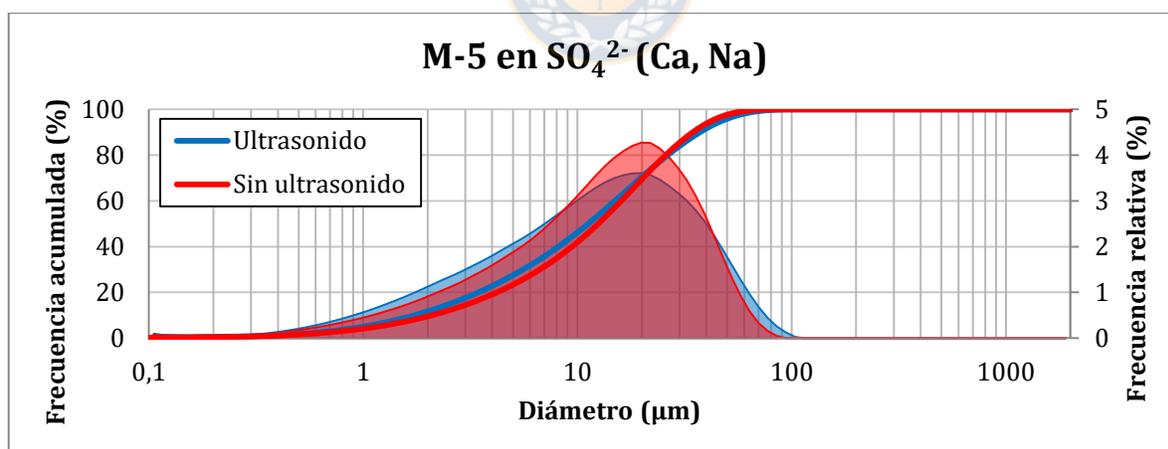


Gráfico 7.203 M-5 en solución SO_4^{2-} (Ca,Na). Medición directa (T1) con y sin ultrasonido.

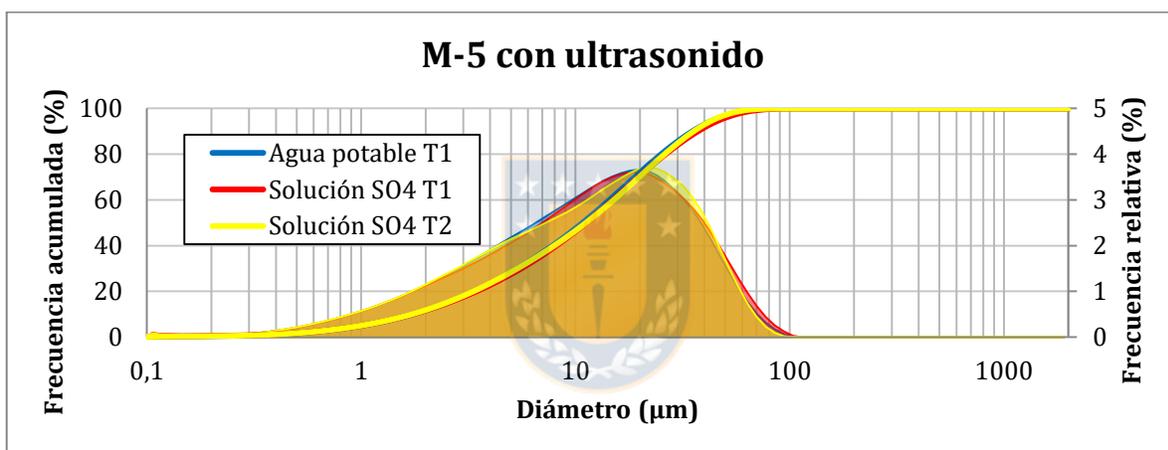
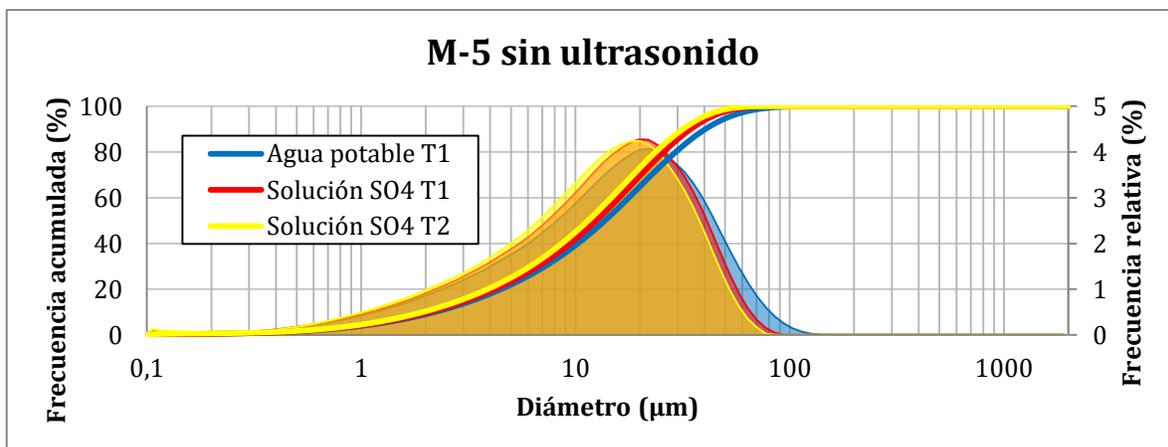


Tabla 7.71 Tabla con parámetros estadísticos para muestra de tranque de relave M-5 en Solución SO_4^{2-} (Ca, Na). Mediciones con y sin tiempo de permanencia en fluido.

Parámetro	M-5 Solución SO_4^{2-} (Ca, Na)			
	T1		T2 [24 h]	
	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,35	0,38	0,36	0,33
P5 (μm)	1,00	1,14	1,00	1,09
P10 (μm)	1,74	2,05	1,73	1,94
P20 (μm)	3,45	4,08	3,36	3,90
P30 (μm)	5,59	6,42	5,37	6,15
P40 (μm)	8,17	9,07	7,94	8,66
P50 (μm)	11,24	12,07	11,14	11,46
P60 (μm)	14,98	15,51	15,02	14,69
P70 (μm)	19,75	19,69	19,78	18,58
P80 (μm)	26,43	25,16	26,08	23,73
P90 (μm)	37,33	33,68	35,88	31,78
P95 (μm)	47,38	41,13	44,55	38,90
P99 (μm)	67,40	55,50	61,38	52,61
%< 147(μm)	100	100	100	100
%<2 μm	11,68	9,72	11,77	10,31

7.7.1.7.- Solución SO_4^{2-} (Ca, Na) + HCl; pH=2,26

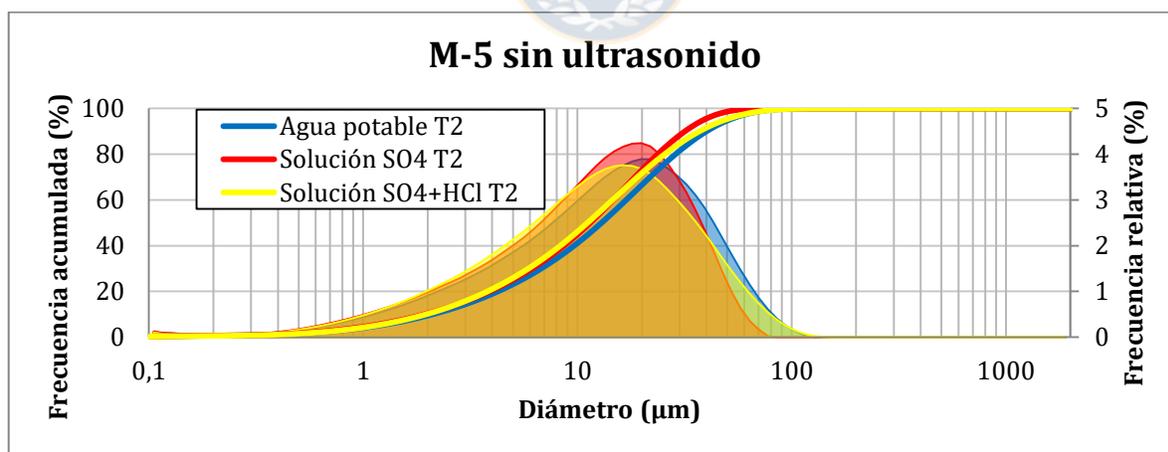


Gráfico 7.206 Muestra M-5 sin ultrasonido con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCl}$ (pH=2,26).

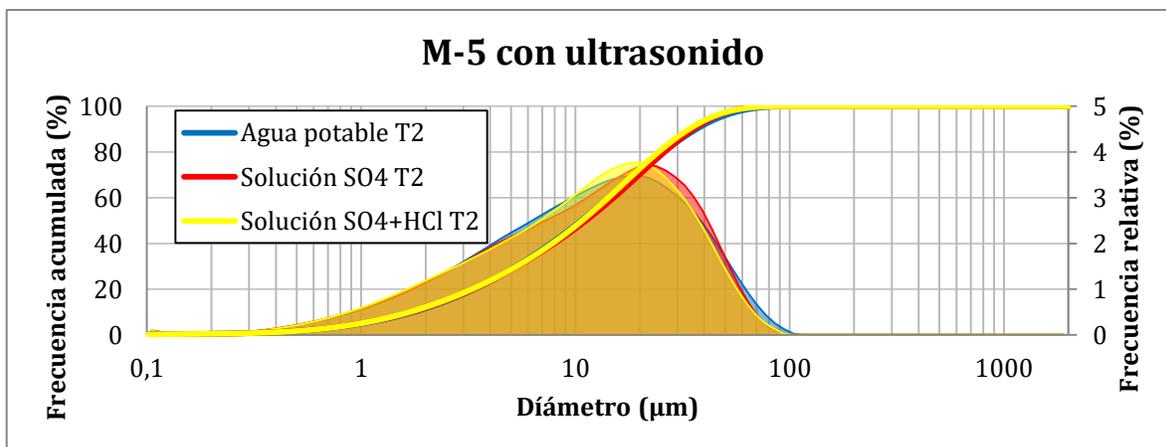


Gráfico 7.207 Muestra M-5 con ultrasonido con tiempo de permanencia en fluido (T2) en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCl}$ (pH=2,26).

Tabla 7.72 Tabla con parámetros estadísticos para muestra M-5 en agua potable, solución SO_4^{2-} (Ca, Na) y solución $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCl}$ (pH=2,26). Mediciones con tiempo de permanencia en fluido (T2).

Parámetro	Muestra tranque de relave M-5					
	T2 Agua Potable		T2 Solución SO_4^{2-}		T2 $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCl}$	
	U	S/U	U	S/U	U	S/U
P1 (μm)	0,36	0,35	0,36	0,33	0,37	0,37
P5 (μm)	1,02	1,17	1,00	1,09	0,99	1,13
P10 (μm)	1,75	2,11	1,73	1,94	1,69	1,97
P20 (μm)	3,36	4,26	3,36	3,90	3,30	3,80
P30 (μm)	5,30	6,78	5,37	6,15	5,33	5,91
P40 (μm)	7,69	9,66	7,94	8,66	7,81	8,33
P50 (μm)	10,67	12,97	11,14	11,46	10,76	11,16
P60 (μm)	14,36	16,90	15,02	14,69	14,25	14,60
P70 (μm)	19,11	21,86	19,78	18,58	18,58	19,06
P80 (μm)	25,78	28,74	26,08	23,73	24,46	25,54
P90 (μm)	36,82	40,13	35,88	31,78	33,94	37,12
P95 (μm)	46,94	50,89	44,55	38,90	42,73	48,84
P99 (μm)	67,35	74,14	61,38	52,61	60,71	74,71
% < 147 (μm)	100	100	100	100	100	100
% < 2 μm	11,63	9,41	11,77	10,31	12,11	10,17