



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

# METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE RESIDUOS MINEROS APLICABLE EN FAENA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

DANIEL ENRIQUE VILLANUEVA ESCOBAR

PROFESOR GUIA  
JACQUES WIERTZ

PROFESOR CO-GUIA  
MANUEL ANTONIO CARABALLO MONGE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
GONZALO MONTES ATENAS

SANTIAGO DE CHILE  
2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas  
**POR:** Daniel Enrique Villanueva Escobar  
**FECHA:** 21/03/2019  
**PROFESOR GUÍA:** Jacques Wiertz

## **METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE RESIDUOS MINEROS APLICABLE EN FAENA**

Uno de los grandes desafíos en Chile y en el mundo es la gestión de desechos generados en la industria minera (relave y material estéril). Problema que se espera que aumente con los años debido a la baja de la ley y al aumento en la profundidad de los yacimientos. De allí nace la necesidad de proveer nuevos métodos para caracterizar y así poder gestionar de manera más sustentable estos residuos.

En este contexto, la presente investigación posee como objetivo principal generar una nueva metodología de bajo costo y rápida respuesta para caracterizar y gestionar los desechos en la industria cuprífera. La propuesta se desarrolla mediante la adaptación de pruebas simples, como son: el Sobek para la determinación del Potencial de Neutralización (PN), la Generación Neta de Ácido (NAG) y la Curva Característica de Tamponamiento Ácido (ABCC). El estudio se apoya en un análisis geológico de la química y mineralogía. Además, está basado en la utilización de muestras de diferentes países: Chile, España y Sudáfrica, lo que entrega un carácter internacional a este reporte.

El procedimiento consiste en una caracterización de muestras basado en dos pruebas: el ABCC y el NAG, y adicionalmente el método SOBEK y el análisis por fluorescencia de rayos X (XRF) portátil en algunos casos. Los resultados de esta metodología podrían considerarse como de corto alcance limitados a un rango de predictibilidad rápida. En resumen, esta predice el potencial neto de generación ácido de la muestra.

Se concluye, que esta metodología permite la reducción de los tiempos de espera de los resultados a un día y posibilita la correcta gestión de los residuos mineros. Además, se logra una reducción considerable de los costos, aproximadamente 98%, en comparación con la realización de las pruebas en laboratorio, así como la posibilidad de reducir costos futuros de la empresa minera por una mala gestión de estos desechos.

**THESIS WORK ABSTRACT TO APPLY TO:** The  
Civil Engineer in Mines Degree  
**By:** Daniel Enrique Villanueva Escobar  
**DATE:** 21/03/2019  
**THESIS SUPERVISOR:** Jacques Wiertz

## **METHODOLOGY OF GEOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF MINING WASTE APPLICABLE IN MINE**

One of the many issues in Chile and in the World are the wastes generated by the mining industry (tailings and sterile materials). This problem will increase over the years, because of the ore grade decrease and the deepening of mines. Thence the necessity of providing news methods for characterizing and managing these wastes becomes of paramount importance.

In this context, the present investigation possesses as its main objective to generate a new methodology of low cost and fast response in order to characterize and manage wastes in the copper industry. The proposal is developed through the adaptation of simple tests such as Sobek to determine the Neutralization Potential (NP), the Net Acid Generation (NAG) and the Acid Buffering Characteristic Curve ABCC. This study is supported by a geological analysis of chemistry and minerology. In addition, it is based on the utilization of samples from different countries: Chile Spain and South Africa, which provide an international character to this report.

The procedure consists of a characterization of samples based on two tests: the ABCC and the NAG, additionally, the SOBEK method and X Ray Fluorescence (XRF) sometimes. The results of this methodology might be considered as short-term outcomes bounded to a range of fast predictability. In summary, it predicts net potential of acid generation potential of the sample.

In conclusion, this methodology allows the reduction in response time to a day and it enables the correct management of mining wastes. In addition, it achieves a considerable reduction of costs, approximately 98%, in comparison laboratory test, as well as the possibility of reducing future costs for the mining company due to a poor management of these wastes.

## Tabla de Contenido

1. Introducción .....	1
1.1. Objetivo general .....	2
1.2. Objetivos específicos .....	2
1.3. Alcances.....	2
2. Antecedentes.....	3
2.1. Contexto de la problemática.....	3
2.1.1. Residuos mineros .....	3
2.1.2. Drenaje minero .....	5
2.1.3. Reacciones de generación de acidez .....	6
2.1.4. Reacción de neutralización.....	8
2.2. Origen de los relaves analizados .....	8
2.2.1. División El Teniente, Chile .....	8
2.2.2. Complejo minero Almagrera, España .....	9
2.2.3. Cueva de la Mora, España .....	10
2.2.4. Palabora, Sudáfrica .....	11
2.2.5. Foskor, Sudáfrica.....	12
2.2.6. Cobre Las Cruces, España.....	13
2.3. Necesidad de caracterización .....	15
2.3.1. Normativa legal.....	15
2.3.2. Programa de Estabilidad Química y Física .....	18
2.4. Métodos de caracterización geoquímica .....	18
2.4.1. Análisis químicos .....	19
2.4.2. Análisis mineralógicos .....	20
2.4.3. Test estáticos.....	20
2.4.4. Test cinéticos.....	26
2.5. Minas reconocidas por su gestión en la estabilidad química.....	28
2.5.1. Compañía minera Antamina, Perú.....	28
2.5.2. Rajo Lichtenberg, Alemania.....	29
2.5.3. Mina Alumbra, Argentina .....	30
2.5.4. Mina Huckleberry, British Columbia, Canadá .....	31

3.	Material y métodos .....	33
3.1.	Equipos y reactivos .....	33
3.2.	Protocolos de los métodos .....	35
3.2.1.	Muestreo.....	35
3.2.2.	Tamizaje .....	36
3.2.3.	Test ABA .....	36
3.2.4.	Test NAG simple.....	38
3.2.5.	Test NAG secuencial .....	40
3.2.6.	Test NAG cinético.....	41
3.2.7.	Test NAP .....	41
3.2.8.	Test ABCC.....	41
3.3.	Fases de la metodología experimental.....	43
3.3.1.	Etapa de pruebas iniciales.....	43
3.3.2.	Etapa de pruebas finales .....	45
4.	Resultados.....	49
4.1.	XRF e ICP-MS .....	49
4.2.	Difracción de rayos X .....	50
4.3.	Resultados ABA .....	51
4.4.	Etapa de pruebas iniciales .....	53
4.4.1.	NAG Cauquenes.....	53
4.4.2.	ABBC Cauquenes.....	56
4.5.	Etapa de pruebas finales.....	58
4.5.1.	NAG.....	58
4.5.2.	ABCC.....	60
4.6.	Costos y tiempos.....	63
5.	Análisis de los resultados .....	64
5.1.	XRF e ICP-MS .....	64
5.2.	Difracción de rayos X .....	64
5.3.	ABA .....	66
5.4.	Etapa de pruebas iniciales .....	67
5.4.1.	NAG Cauquenes.....	67

5.4.2.	ABCC Cauquenes .....	68
5.5.	Etapa de pruebas finales.....	68
5.5.1.	NAG.....	68
5.5.2.	ABCC.....	73
5.6.	Comparación de costos y tiempos .....	76
5.7.	Resumen de los resultados y metodología .....	78
6.	Conclusión.....	80
7.	Bibliografía.....	82
8.	Anexo.....	86
8.1.	Resultados .....	86
8.1.1.	Etapa de pruebas iniciales.....	86
8.1.2.	Etapa de pruebas finales .....	88
8.2.	Cotización test y reactivos.....	102
8.3.	Calculo de costos.....	103
8.4.	Titulación del agua desionizada .....	106

## Índice Gráficos

Gráfico 2.1:	Predicción para el cobre 2017-2028 [1]. .....	4
Gráfico 2.2:	Distribución de los relaves a lo largo del país [3].....	4
Gráfico 2.3:	Estado de los relaves [3].....	5
Gráfico 2.4:	Reacciones involucradas en las etapas, al considerar pH y tiempo [5]. .....	7
Gráfico 4.1:	Resultados ABA.....	52
Gráfico 4.2:	NAG y NAP de las pruebas iniciales.....	54
Gráfico 4.3:	NAG cinético de la muestra de Cauquenes.....	55
Gráfico 4.4:	ABCC de Cauquenes.....	57
Gráfico 4.5:	NAG y NAP de las pruebas finales. ....	59
Gráfico 4.6:	Gráfico ABCC de ACL-49. ....	61
Gráfico 4.7:	Gráfico ABCC de AEL-33. ....	61
Gráfico 4.8:	Gráfico ABCC de Palabora. ....	62
Gráfico 4.9:	Gráfico ABCC de Foskor .....	62
Gráfico 5.1:	Resultados ABA con el ABCC .....	67
Gráfico 5.2:	Correlación del pH NAG versus ABA (ICP-MS).....	69
Gráfico 5.3:	Correlación del pH NAG versus ABA (XRF). ....	70
Gráfico 5.4:	Correlación del NAP versus  PNN  (ICP-MS).....	71
Gráfico 5.5:	Correlación del NAP versus  PNN  (XRF). ....	71

Gráfico 5.6: Titulación de minerales a un ANC=13 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t. ....	73
Gráfico 5.7: Titulación de minerales a un ANC=50 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t. ....	74
Gráfico 5.8: Titulación de minerales a un ANC=200 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t. ....	75
Gráfico 8.1: Variación de la temperatura de la muestra ACL-49. ....	88
Gráfico 8.2: Variación de la temperatura de la muestra AEL-33 ....	90
Gráfico 8.3: Variación de la temperatura de la muestra CM. ....	91
Gráfico 8.4: Variación de la temperatura de la muestra de Palabora. ....	92
Gráfico 8.5: Variación de la temperatura de la muestra Fosfork. ....	93
Gráfico 8.6: Variación de la temperatura de la muestra Cola 25. ....	94
Gráfico 8.7: Variación de la temperatura de la muestra Relave 1. ....	95
Gráfico 8.8: Variación de la temperatura de la muestra AEL-33 (~1 gr). ....	96
Gráfico 8.9: Variación de la temperatura de la muestra CM (~1 gr). ....	97
Gráfico 8.10: Variación de la temperatura de la muestra Cola 25 (~1 gr). ....	98
Gráfico 8.11: Variación de la temperatura de la muestra Relave 1 (~1 gr). ....	99
Gráfico 8.12: Titulación del agua. ....	107

## Índice Tablas

Tabla 2.1: Fuentes generadoras de drenaje minero [5]. ....	6
Tabla 2.2: Características de las muestras de estudio. ....	14
Tabla 2.3: Potencial generador y su rango [24]. ....	22
Tabla 2.4: Clasificación resultados NAG ....	23
Tabla 2.5: Rango promedio de amortiguamiento. ....	24
Tabla 2.6: Interpretación de los resultados del test columna. ....	27
Tabla 3.1: Reactivo de acuerdo al pH NAG. ....	39
Tabla 3.2: Recomendaciones para la titulación del ABCC. ....	42
Tabla 3.3: Peso bajo y sobre tamaño de la muestra de Cauquenes. ....	44
Tabla 3.4: Variaciones de la prueba convencional del NAG. ....	44
Tabla 3.5: NAG secuenciales realizado. ....	44
Tabla 3.6: Variación de la prueba ABCC convencional. ....	45
Tabla 3.7: Peso bajo y sobre tamaño de las muestras. ....	45
Tabla 4.1: Datos de algunos elementos obtenidos por ICP-MS en % en peso. ....	49
Tabla 4.2: Datos de algunos elementos obtenidos por XRF en % en peso. ....	49
Tabla 4.3: Resultados 1 de DRX de las muestras. ....	50
Tabla 4.4: Resultados 2 de DRX de las muestras. ....	51
Tabla 4.5 Resultados PN. ....	51
Tabla 4.6 Resultados finales del ABA en Kg CaCO <sub>3</sub> /t. ....	52
Tabla 4.7: Resultados NAG de las muestras de estudio. ....	53
Tabla 4.8: Resultados del NAG cinético de Cauquenes. ....	54
Tabla 4.9: Resultados del NAG secuencial de Cauquenes. ....	55

Tabla 4.10: Resultados ABCC de Cauquenes. ....	56
Tabla 4.11: Resultados de las Muestras sometidas al NAG.....	58
Tabla 4.12: Resultados NAG de las pruebas con menos muestra.....	58
Tabla 4.13: Resultados de las Muestras sometidas al ABCC. ....	60
Tabla 4.14: Costo asociado a la realización de las pruebas.....	63
Tabla 4.15: Tiempo asociado a la realización de las pruebas.....	63
Tabla 5.1: % de carbonato de Palabora y AEL-33. ....	65
Tabla 5.2: PN y ANC en base al porcentaje de carbonato. ....	65
Tabla 5.3: Resultados PN del ABCC y ABA.....	66
Tabla 5.4: Correlación NAP/ IPNNI al ocupar XRF y ICP.....	72
Tabla 5.5: Comparación cálculos del PN. ....	76
Tabla 5.6: Costo por año de la realización del test NAG.....	76
Tabla 5.7: Costo por año de la realización del test ABCC.....	77
Tabla 5.8: VAC del NAG y ABCC.....	77
Tabla 8.1: Costos laboratorio AGQ. ....	102
Tabla 8.2: Costos laboratorio ALS.....	102
Tabla 8.3: Costos laboratorio SGS.....	103
Tabla 8.4: Costos laboratorio CESMEC. ....	103
Tabla 8.5: Costos reactivos Merck. ....	103
Tabla 8.6: Costo de los reactivos por ml del H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y por gr del NaOH.....	104
Tabla 8.7: Costos asociados al peróxido de hidrógeno.....	104
Tabla 8.8: Costos asociados al hidróxido de sodio. ....	105
Tabla 8.9: Costo total asociado al NAG. ....	105
Tabla 8.10 Costo reactivo por ml del HCL.....	106
Tabla 8.11: Costo de cada ABCC de las pruebas realizadas.....	106

## Índice Figuras

Figura 2.1: División El Teniente [6].....	8
Figura 2.2: Tranque de relave Cauquenes [7]. ....	9
Figura 2.3: Pueblo de Calañas, provincia de Huelva [8].....	9
Figura 2.4: Planta de concentración de MATSA en la actualidad [9].....	10
Figura 2.5: Pueblo Cueva de la Mora (2012) [10].....	10
Figura 2.6: Imágenes de la mina Cueva de la Mora [10].....	11
Figura 2.7: Mina Palabora [11]. ....	11
Figura 2.8: Tranque de relave Palabora [11]. ....	12
Figura 2.9: Mina Foskor [12].....	12
Figura 2.10: Tranque de relave Selati [13]. ....	13
Figura 2.11: Localización Complejo Cobre Las Cruces [14].....	13
Figura 2.12: Planta hidrometalurgia y mina Corta Minera [14]. ....	14



Figura 2.13: Compañía minera Antamina [24].	29
Figura 2.14: Rajo Lichtenberg de Wismut [22].	30
Figura 2.15: Minera Alumbreira [27].	30
Figura 2.16: Mina Huckleberry [28].	31
Figura 3.1: HANNA HI 5521	33
Figura 3.2 Pesa analítica.	33
Figura 3.3: Plancha y agitador magnético.	34
Figura 3.4: Peróxido de hidrógeno al 30%.	34
Figura 3.5: Hidróxido de sodio (pellet).	34
Figura 3.6: Ácido clorhídrico al 37%.	35
Figura 3.7: Roleo y cuarteo.	35
Figura 3.8: Tamiz malla 64 $\mu\text{m}$ .	36
Figura 3.9: Protocolo del ABA modificado [37].	37
Figura 3.10: Protocolo del NAG.	40
Figura 3.11: Protocolo del ABCC.	43
Figura 3.12: Antes y después de tamizarse y muestrearse la muestra de Cauquenes.	44
Figura 3.13: Antes y después de muestrear las muestras.	47
Figura 8.1: Muestra de Cauquenes después de ser sometido al test.	87
Figura 8.2: ABCC de Cauquenes	88
Figura 8.3: Antes y después de la muestra ACL-49 de ser sometida al NAG.	89
Figura 8.4: Antes y después de la muestra AEL-33 de ser sometida al NAG.	90
Figura 8.5: Antes y después de la muestra CM de ser sometida al NAG.	91
Figura 8.6: Antes y después de la muestra Palobora de ser sometida al NAG.	92
Figura 8.7: Antes y después de la muestra Fosfork de ser sometida al NAG.	93
Figura 8.8: Antes y después de la muestra Cola 25 de ser sometida al NAG.	94
Figura 8.9: Antes y después de la muestra Relave 1 de ser sometida al NAG.	95
Figura 8.10: Antes y después de la muestra AEL-33 de ser sometida al NAG (~1 gr).	96
Figura 8.11: Antes y después de la muestra CM de ser sometida al NAG (~1 gr).	97
Figura 8.12: Antes y después de la muestra Cola 25 de ser sometida al NAG (~1 gr).	98
Figura 8.13: Antes y después de la muestra Relave 1 de ser sometida al NAG (~1 gr).	99
Figura 8.14: Test ABCC de la muestra ACL-49.	100
Figura 8.15: Test ABCC de la muestra AEL-33.	100
Figura 8.16: Test ABCC de la muestra CM.	100
Figura 8.17: Test ABCC de la muestra Palabora.	101
Figura 8.18: Test ABCC de la muestra Foskor.	101
Figura 8.19: Test ABCC de la muestra Cola 25.	101
Figura 8.20: Test ABCC de la muestra Relave 1.	102

## 1. Introducción

Es conocido por el país la gran participación que tiene Chile en la minería. Desde el siglo XIX e incluso antes se encuentran indicios del potencial minero del país, por ejemplo, en el salitre y en el carbón. Actualmente, la minería del país se encuentra potenciada por el cobre. Esto se evidencia en que Chile es el primer productor a nivel mundial [1].

Dentro de los principales desafíos que abarca la industria minera está el tema de la sustentabilidad. Es por eso que se requiere que la industria minera lleve a cabo prácticas que sean más sustentables con el medio ambiente y la comunidad. Esto le permitirá obtener “La Licencia Social para Operar” y, consecuentemente generar menor impacto al medio ambiente. Esto llevará que futuras generaciones tengan las mismas oportunidades que la sociedad de hoy en día.

Una de las vías para conseguir prácticas más sustentables parte con la caracterización rápida y de bajo costo de residuos mineros. Los residuos mineros, principalmente, engloban los relaves y material estéril, esto por su gran cantidad. Estos desechos en un tiempo no muy lejano pueden convertirse en pasivos ambientales, lo que generaría un impacto negativo para el entorno.

Para lograr estas prácticas sustentables se requiere de una innovación de las tecnologías existente o mejor dicho la creación de una metodología de caracterización simple, económica y de rápida respuesta. Procedimiento que asimismo sea capaz de proveer el cumplimiento de la normativa legal actual con la que se rige la minería.

Por lo anterior señalado es que en la presente investigación se propone diseñar y elaborar una metodología que caracterice de manera rápida y de bajo costo el potencial de generación de drenaje ácido de los relaves. Todo esto con una mirada hacia la gestión de residuos y plan de cierre sustentable, en coherencia con el mercado y normativa chilena. Esto se pretende lograr a través de una metodología experimental que consisten en una etapa de pruebas iniciales y una etapa de pruebas finales. La etapa inicial consiste en determinar el mejor test NAG y ABCC. Tests que en la etapa de pruebas finales se aplicará en las muestras restantes para confeccionar la metodología.

Este documento se organiza de la siguiente forma: en primer lugar, un estado del arte, donde se trata principalmente la problemática del país en tema de desechos mineros. También, se establece la normativa legal de la minería en temas de desechos mineros. Además, de un estudio de mercado de faenas reconocidas por su buena gestión ambiental. En segundo lugar, el capítulo de materiales y métodos, donde se indican los equipos y reactivos utilizados en la fase experimental junto con los protocolos de los tests de caracterización. Luego, en este capítulo se habla de la fase experimental llevada a

cabo en el laboratorio. En cuarto lugar, los resultados obtenidos de la etapa anterior y de laboratorios. Finalmente, se presentan las principales conclusiones del estudio, así como las recomendaciones.

### **1.1. Objetivo general**

- Diseñar y elaborar una metodología para la caracterización rápida y de bajo costo del potencial de generación de drenaje ácido de relaves. Con una visión hacia la gestión de residuos y plan de cierre sustentable, aplicado al mercado y normativa chilena.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Analizar un estudio de mercado internacional en materia de caracterización y manejo de materiales estériles y relaves.
- Adaptar las metodologías existentes en estudio del comportamiento geoquímico de materiales para el análisis y caracterización de residuos mineros.
- Comparar costos y tiempos de realizar tests en escala piloto versus mandar muestras a analizar a laboratorios.
- Evaluar la metodología para que cumpla con la normativa legal actual con la que se rige la minería en Chile.

### **1.3. Alcances**

- Los alcances de este estudio están relacionados con relaves de diferentes tipos de yacimientos, que provienen de distintos países: Chile, España y Sudáfrica. Además, esta investigación se basa en la normativa legal actual con la que se rige el país, en materia de desechos mineros.

## 2. Antecedentes

Este capítulo establece el estado del arte de esta investigación. Esta comienza por establecer la problemática en tema de desechos mineros. En segundo lugar, se habla de los relaves analizados en esta investigación. En tercer lugar, se establece la necesidad de caracterizar entregada por el marco legal de Chile. En cuarto lugar, los métodos de caracterización existentes. Finalmente, una revisión de buenas prácticas que incluye mineras reconocidas por su buena gestión ambiental.

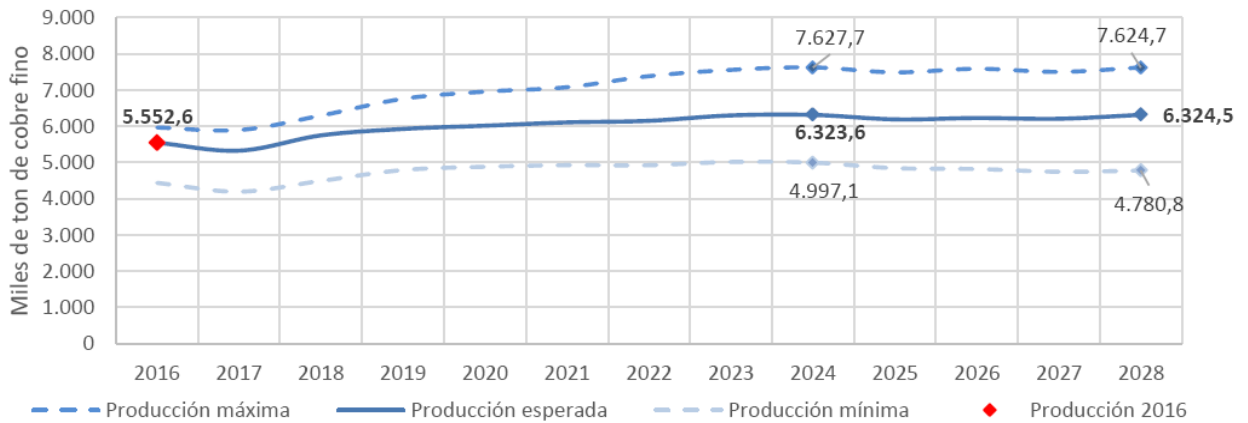
### 2.1. Contexto de la problemática

En este subcapítulo se establece la problemática de este tema de investigación, es decir, los residuos mineros. Para esto se presenta la realidad del país en materia de desechos mineros y las proyecciones de estos. Por último, se indaga sobre los relaves: su formación, las principales fuentes y las reacciones químicas involucradas.

#### 2.1.1. Residuos mineros

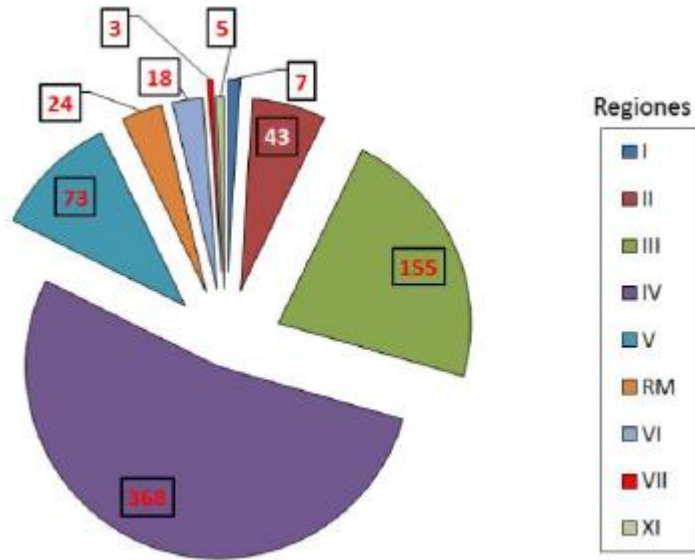
La industria minera de Chile está enfocada principalmente en el cobre en total 5.552,6 miles de toneladas finas reportadas en el 2016. Esto es solo una cara de la moneda, ya que paralelamente se genera una gran cantidad de material sin valor o con poco valor económico, denominado residuo minero [1]. Dentro de estos residuos se encuentran: las **escorias** (provenientes del proceso de pirometalurgia), los **ripios** (residuos de la lixiviación del proceso de hidrometalurgia), el material sin o con poco valor económico denominado **estéril** (almacenado en botaderos) y los **relaves** (originados principalmente de la etapa de flotación). Estos dos últimos constituyen el mayor problema debido a su cantidad y volumen [1].

De lo anterior, según las predicciones hechas por COCHILCO (Comisión Chilena del Cobre) [1], se esperan que los problemas ligados a la gestión de residuos mineros se agudicen en el futuro. En efecto, se pronostica para el 2028 una producción de 6.324,5 miles de toneladas de cobre fino, lo que permite deducir que la cantidad de residuos mineros aumentará drásticamente no solo por el aumento de producción del mineral, sino por el hecho que se espera que las leyes del cobre en el futuro disminuyan. Esto implicaría que para mantener o aumentar la producción se requiera extraer y procesar más material del que gran parte es estéril [1]. Lo anterior se puede apreciar en el Gráfico 2.1, donde se muestra la producción esperada a lo largo del tiempo.



**Gráfico 2.1: Predicción para el cobre 2017-2028 [1].**

De acuerdo al SERNAGEOMIN [1], los relaves son una mezcla de agua con sólidos finos que provienen de la etapa de flotación de minerales. Los principales elementos son: hierro, bario, manganeso, magnesio, cobre y zinc. Los relaves no son catalogados como tóxicos y tampoco son considerados residuos sólidos peligrosos (RSP) [2]. Datos recientes (2016), indican que los principales depósitos de relaves a lo largo del país se encuentran en la II, IV y V región [3] como se puede observar en el Gráfico 2.2.



**Gráfico 2.2: Distribución de los relaves a lo largo del país [3].**

Además, como se puede apreciar en el Gráfico 2.3, la mayoría de los depósitos de relaves se encuentran como no activos, es decir, que no son utilizados para depositar desechos. En segundo lugar, se tienen los depósitos de relaves abandonados que se caracterizan por ser pasivos ambientales sin propietarios y que fueron abandonados antes de las normas de control.

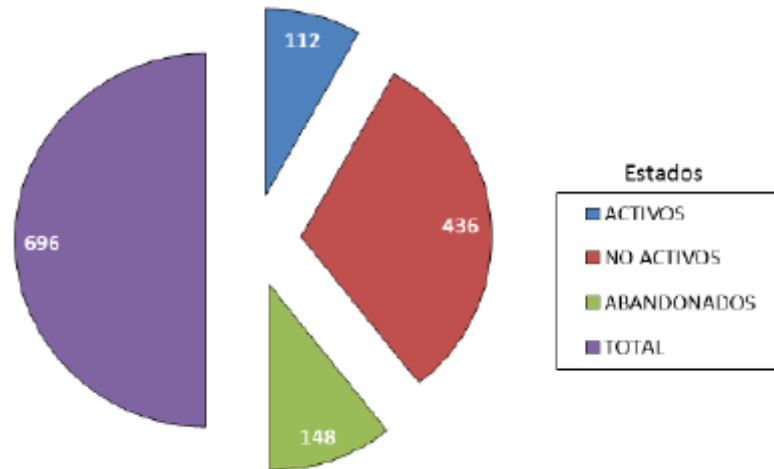


Gráfico 2.3: Estado de los relaves [3].

La mayoría de los depósitos de relaves corresponden a tranques de relaves o embalses de relave. El **tranque de relave** se caracteriza porque el muro se construye de la fracción gruesa del relave separado previamente por hidrociclones. En el **embalse de relave**, el muro es construido por material de empréstito o el relave es depositado en una cuenca donde no se requiere construir un muro. Como lo menciona SERNAGEOMIN, los relaves no son considerados peligrosos ni tóxicos, pero si se advierte que pueden contener materiales tóxicos que pueden ser dañinos para las personas como para el medio ambiente. Esos casos son aplicados cuando se encuentran elementos dañinos como: arsénico, cianuro, cobre, cinc, cromo, plomo, y en una concentración peligrosa no aceptada por la norma [2].

Por el otro lado, el material estéril o ganga que proviene, principalmente, de la minería de rajo abierto es depositado en los botaderos. Estos botaderos se encuentran en las proximidades de la mina, para lo que se requiere en la mayoría de los casos una quebrada donde disponer el material. No se recomienda construir el botadero cerca de una zona fluvial, es decir, donde circule un río. Las proximidades de los botaderos deben contar con ciertas características como que el nivel del borde de los botaderos sea lo más parejo posible. Además, el terreno donde se instala el botadero debe ser impermeable o se debe generar la impermeabilidad de manera artificial para asegurar que no fluya líquido peligroso a las napas subterráneas [4].

### 2.1.2. Drenaje minero

Uno de los principales problemas de la mala gestión de los residuos mineros es la generación de drenajes mineros (DM). Estos son efluentes producto de la interacción entre minerales (sulfuros) y medio ambiente (clima, bacterias, agua, etc.). Los drenajes mineros se generan, principalmente, por la oxidación de sulfuros como la pirita. Este proceso puede ocurrir de manera natural, pero se ve favorecido por la actividad minera,

ya que esta expone a los minerales a esta condición. De esto resultan efluentes, que poseen diferentes características relacionadas con el pH y la cantidad de elementos disueltos [5]. Se encuentran diferentes tipos de drenajes:

**Drenaje Minero Ácido (DMA):** se caracteriza por poseer un pH menor a 6 con altas concentraciones de sulfatos y metales [5].

**Drenaje Minero Neutro (DMN) y Drenaje Minero Alcalino (DMAL):** caracterizados por un pH mayor a 6. Pueden presentar altas concentraciones de metales. Además, los drenajes alcalinos presentan altas concentración de carbonatos ( $\text{CO}_3^{-2}$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^{-}$ ) e hidróxidos ( $\text{OH}^{-}$ ) [5].

**Drenajes Mineros Salinos (DMS):** constituidos por sulfato de magnesio y calcio, además, de poseer un pH relativamente neutro y bajas concentraciones de metales [5].

El tipo de drenaje va a depender sobre todo por la condición mineralógica y en parte de las condiciones físicas, biológicas y químicas que finalmente determinen su clasificación. Existen diferentes fuentes generadoras de DM como se aprecia en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Fuentes generadoras de drenaje minero [5].

Residuos Mineros Masivos			
Botaderos	Depósitos de Relaves	Depósitos de Lixiviación	Mina
Estériles Baja Ley Marinas y desmontes Escorias	Embalses de relaves Tranques de relaves Relaves filtrados Relaves en pasta Relaves espesados	Ripios de lixiviación Pilas permanentes Pilas dinámicas Pilas ROM	Rajo Abierto Subterránea

El origen del drenaje ácido de rocas es la oxidación de sulfuros, principalmente, la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pero también pirrotita o pirrotina ( $\text{FeS}$ ). Sin embargo, pueden existir otros elementos generadores de drenaje ácido como son: la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), la arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), la esfalerita o blenda ( $\text{ZnS}$ ) y la galena ( $\text{PbS}$ ). Estos pueden generar acidez por hidrólisis de los metales, pero son sobre todo una fuente de metales disueltos [5].

### 2.1.3. Reacciones de generación de acidez

Cabe mencionar que el proceso de generación de drenaje ácido puede llevar desde días hasta años. Como se mencionó anteriormente el origen principal de la formación de drenaje ácido es la oxidación de la pirita, la que es alterada en todo el proceso. La reacción se puede resumir en tres etapas, que son fuertemente dependiente del pH [5]. Esto se puede apreciar en el Gráfico 2.4.



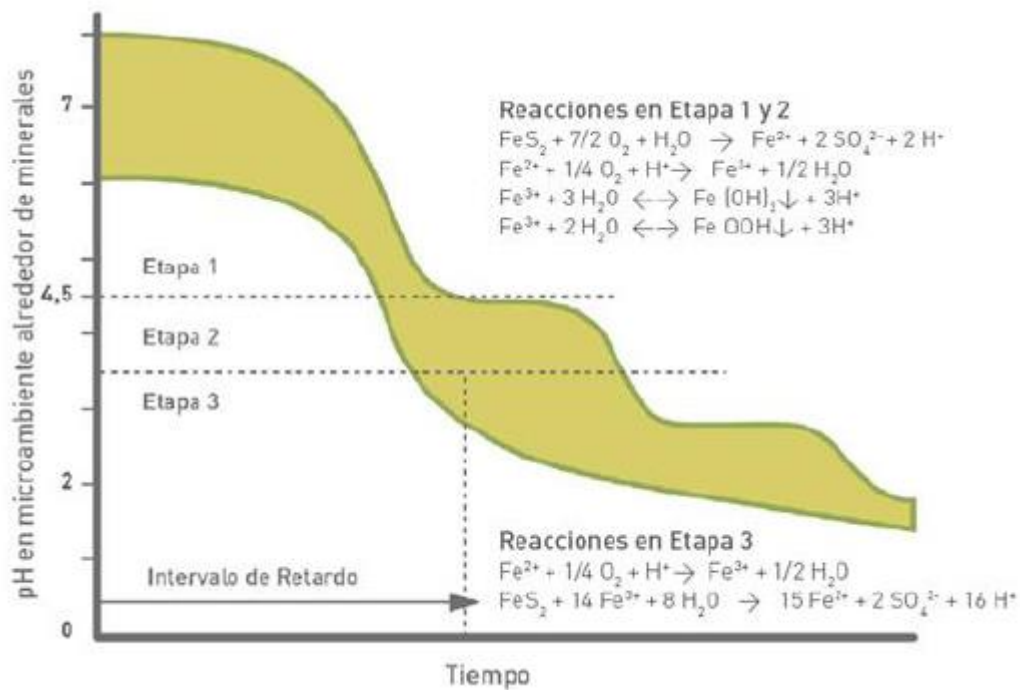


Gráfico 2.4: Reacciones involucradas en las etapas, al considerar pH y tiempo [5].

A continuación, se detallan las etapas involucradas en el proceso de generación de drenaje ácido de mina.

**Etapa 1:** se oxida la pirita con el oxígeno, se liberan protones y sulfatos; los niveles del pH del drenaje son mayores a 4,5. Importante mencionar que existen elementos en esta etapa que neutralizaran el pH del drenaje ácido como los carbonatos [5].

**Etapa 2:** acá se oxida el ferroso  $Fe^{2+}$  y el férrico  $Fe^{3+}$ , este pasa a su forma de hidróxido, se liberan  $H^+$  y el rango del pH es de 3,5 a 4,5 [5].

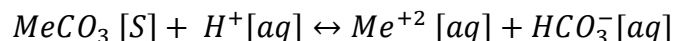
**Etapa 3:** la última etapa es donde participan las bacterias y el ferroso es transformado a férrico, el que alcanza un pH menor a 1,5. Las etapas son presentadas en el Gráfico 2.4 [5].

Otro problema que trae la generación de drenaje ácido es la generación de ácido sulfúrico. Este puede disolver metales que son estables en condiciones neutras, lo que provoca un problema de contaminación mayor. Un ejemplo de esto puede ser la liberación de: arsénico, zinc y plomo, entre otros elementos asociados al sulfuro [5].



#### 2.1.4. Reacción de neutralización

El proceso contrario a la generación de un drenaje ácido es la neutralización, la que se basa en el consumo de protones [5], la Reacción 2.1 expresa el caso genérico:



**Reacción 2.1: Neutralización de protones.**

Donde Me puede ser un  $Ca^{+2}$  o un  $Mg^{+2}$ . Los principales minerales neutralizadores que se encuentran son: arcillas, silicatos, dolomita y carbonatos.

## 2.2. Origen de los relaves analizados

En base a la problemática de los relaves mencionados en el punto 2.1, en el siguiente apartado se indagará sobre las faenas de las que provienen algunos desechos mineros analizados. Desechos que en la mayoría de los casos son relaves.

### 2.2.1. División El Teniente, Chile

La muestra de relaves de Cauquenes proviene del tranque de relave del mismo nombre que pertenece a la división El Teniente de Codelco. El relave como es sabido tiene su origen en la flotación. Es importante destacar que esta mina es la más grande del tipo subterránea a nivel mundial. Esta faena se ubica en la comuna de Machalí en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, donde la explotación de mineral data de 1905. Las operaciones principales son el concentrador (Colon) y la Fundición (Caletones). En la Figura 2.1, se aprecia una imagen de la mina [6].



**Figura 2.1: División El Teniente [6].**

El tranque de relave de esta faena se caracteriza por poseer uno de los relaves más antiguos producidos por la mina de modo que contiene grandes cantidades de elementos valiosos como el cobre y el molibdeno, elementos de interés que son recuperados por la Minera Valle Central, empresa dedicada recuperar estos valiosos de los relaves antiguos del Teniente, así como de los relaves nuevos [7].



Figura 2.2: Tranque de relave Cauquenes [7].

### 2.2.2. Complejo minero Almagrera, España

Son unas minas antiguas conocidas como las minas de Calañas, poseen vestigios de explotación de pueblos antiguos como los romanos e incluso más antiguos como los tartésicos. Este complejo minero está ubicado en el término municipal de Calañas, en la provincia de Huelva. En la Figura 2.3, es posible apreciar la ubicación del pueblo de Calañas en la provincia de Huelva que debe su desarrollo a la minera [8].



Figura 2.3: Pueblo de Calañas, provincia de Huelva [8].

Las minas fueron explotadas por diferentes entidades, poseen una gran historia y permitió el desarrollo de pueblos que se deben a la actividad minera. Sin embargo, fue en 1976 cuando se abre la planta de flotación de Minas de Almagrera, además, entre ese año y 1981 se lleva a cabo el proyecto Sotiel de la Empresa Nacional de Minas Almagrera S.A [8]. Posteriormente, la concesión de la explotación pasó a la empresa MATSA que se dedicaba a la explotación de cobre, oro, plata, zinc y plomo junto con otros compuestos como ácido sulfúrico y sulfato de cobre, esto desde un yacimiento polimetálico. Lo anterior era llevado a cabo por el proceso convencional con los que son tratados los sulfuros: chancado, molienda y flotación, para obtener concentrados de cobre, plomo y zinc. En la actualidad la faena permanece cerrada por problemas laborales, pero espera su apertura

algún día. En la Figura 2.4, se presenta una imagen de la planta actual de MATSA, donde se concentraba el material que provenía de la mina [9]

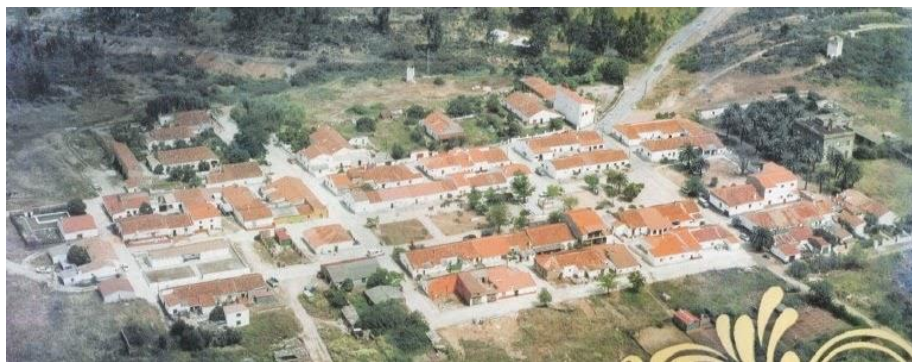


**Figura 2.4:** Planta de concentración de MATSA en la actualidad [9].

Las muestras AEL-33 y ACL-49 de este estudio provienen de estas minas y corresponde a los relaves de flotación y de flotación con tostación, respectivamente.

### **2.2.3. Cueva de la Mora, España**

Son unas minas denominadas Cueva de la Mora cuya explotación proviene de antaño (II milenio de a.C). Vestigios de explotación de pueblos como los tartesios, los romanos, los portugueses, los ingleses y los franceses. También empresas españolas que trataron de obtener beneficios de estas tierras hasta los años 70. Luego, del cual se cesó la actividad minera y quedó solamente el pueblo Cueva de la Mora (Huelva, España), que debe su existencia a la actividad minera [10].



**Figura 2.5:** Pueblo Cueva de la Mora (2012) [10].

La actividad minera era efectuada a rajo abierto desde donde se extraía el mineral de cobre junto con cantidades significativas de plata. En la Figura 2.6, se pueden observar dos imágenes. La de la derecha corresponde a la mina, donde se extraía el material de interés a través de rajo abierto (“la corta”). La imagen de la izquierda presenta el Pueblo Nuevo actualmente conocido como el pueblo de Cueva de la Mora [10].





Figura 2.6: Imágenes de la mina Cueva de la Mora [10].

Por último, la muestra denominada Tailing CM (Cueva de la Mora) que se analiza en este informe proviene de estas minas.

#### 2.2.4. Palabora, Sudáfrica

La mina Palabora ubicada cerca del pueblo Palabora en la provincia Limpopo de Sudáfrica, opera desde 1956 en la producción de cobre refinado. El depósito debe su formación al Complejo Ígneo Palabora. El cobre está presente en la carbonatita y alberga otros minerales importantes como flogopita, magnetita, níquel, oro, plata e incluso paladio. En la Figura 2.7, se presenta una imagen de la mina. Otro punto importante es el compromiso ambiental que posee Palabora en el consumo responsable de los recursos naturales. Además, de la prevención y restauración de la contaminación efectuada. La compañía incluye un Plan de Cierre para la gestión de los impactos sociales y ambientales [11].



Figura 2.7: Mina Palabora [11].

Para la recuperación de cobre, se sigue con el proceso convencional de chancado, molienda con posterior flotación. Cabe mencionar que esta planta posee dos sistemas de molienda autógena y convencional. El relave de ambos, que es producido en la etapa de flotación, es conducido a tambores giratorios con imanes para la extracción de magnetita, que es utilizada para la producción de hierro y acero. El relave restante del proceso anterior es conducido a 3 espesadores en paralelo de donde se recupera el agua y se reutiliza. Finalmente, los relaves remanentes son conducidos a los perímetros de un gran

tranque de relave como se aprecia en la Figura 2.8 [11]. La muestra Palabora que se analiza en este informe proviene de este tranque.



Figura 2.8: Tranque de relave Palabora [11].

### 2.2.5. Foskor, Sudáfrica

Foskor es una mina ubicada en Sudáfrica que se dedica a la producción de fosfatos y ácido fosfórico, así también, de ácido sulfúrico y fertilizantes. Estos productos son exportados a lugares como: Dubái, México, Países Bajos. El complejo minero incluye dos rajos que extraen apatito del Complejo Ígneo de Palabora. Este es un mineral que contiene grandes cantidades de fósforo. En la Figura 2.9, se presenta una imagen del complejo minero [12].



Figura 2.9: Mina Foskor [12].

El proceso de obtención del fosfato involucra el minado en el yacimiento para obtener el apatito. Luego, el mineral es transportado a la etapa de chancado, molienda y después al proceso de flotación, donde se separa el fosfato de otros minerales. El relave es conducido a el tranque de relave Selati, el que está ubicado en las cercanías de la faena minera como se aprecia en la Figura 2.10 [13]. En la figura también se observa la ubicación de la mina Palabora [12]. La muestra Foskor, que es ocupada en los experimentos, es oriunda de este lugar.



Figura 2.10: Tranque de relave Selati [13].

### 2.2.6. Cobre Las Cruces, España

El complejo minero de Cobre Las Cruces, S.A.U, es un complejo dedicado a la extracción de cobre como material primario. Esto se logra a través de la modalidad rajo abierto y la vía hidrometalurgia. Es un proyecto reciente que comenzó su producción en el año 2006. El complejo minero está ubicado al noreste de la ciudad de Sevilla, a 20 kilómetros; en la Figura 2.11, se puede observar la ubicación del complejo minero [14].

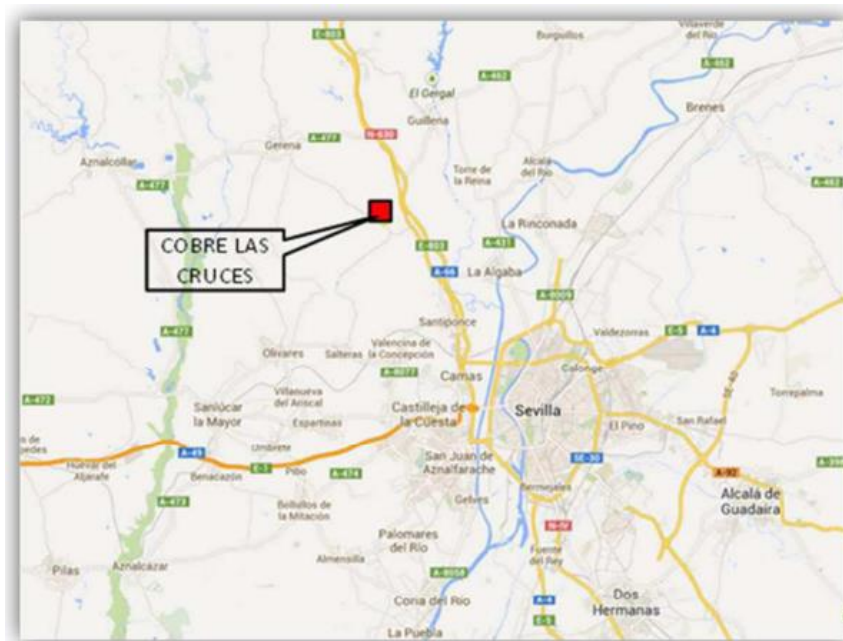


Figura 2.11: Localización Complejo Cobre Las Cruces [14].

Como se mencionó el principal elemento de interés de la mina es el cobre el que es vendido como cátodos. El mineral es obtenido de la Calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ). Sin embargo, la faena posee elementos de baja ley de cobre y poco lixiviable como son los sulfuros primarios (ej. Calcopirita). Otro punto interesante a mencionar de este distrito es su fuerte compromiso con la sustentabilidad y medio ambiente a través del departamento de Medio Ambiente. Este se encarga de velar por las regulaciones ambientales y que se realicen las prácticas lo más sustentable y sostenible posible. En la Figura 2.12, se puede observar la planta hidrometalurgia con la mina denominada Corta Minera [14].



**Figura 2.12: Planta hidrometalurgia y mina Corta Minera [14].**

Finalmente, las muestras de Cola 25 y Relave 1 de este informe provienen de los relaves de este complejo minero, de la lixiviación (ripió) y la flotación, respectivamente. De acuerdo a lo indicado en este apartado, la siguiente Tabla 2.2, resume las características que se analizarán en esta investigación.

**Tabla 2.2: Características de las muestras de estudio.**

Minera	País de origen	Depósito de procedencia	Tipo de proceso	Producto primario	Nombre de la Muestra
<b>El Teniente</b>	Chile	Pórfido Cuprífero	Flotación	Cobre	Tailing Cau
<b>Almagrera</b>	España	Sulfuro masivo volcanogénico	Flotación - Tostación	Cobre	ACL-49
<b>Almagrera</b>	España	Sulfuro masivo volcanogénico	Flotación	Cobre	AEL-33
<b>Cueva de la Mora</b>	España	Sulfuro masivo volcanogénico	Flotación	Cobre	Tailing CM
<b>Palabora</b>	Sudáfrica	Carbonatita	Flotación	Cobre	Tailing PAL
<b>Foskor</b>	Sudáfrica	Carbonatita/ Fosforita	Flotación	Fosfato	Tailing FOS
<b>Cobre las cruces</b>	España	Sulfuro masivo volcanogénico	Lixiviación	Cobre	Cola 25
<b>Cobre las cruces</b>	España	Sulfuro masivo volcanogénico	Flotación	Cobre	Relave 1



## 2.3. Necesidad de caracterización

De la problemática presentada en el primer subcapítulo junto con los desechos mineros analizados en el subcapítulo anterior, es que se presenta a continuación la normativa legal con la que actualmente se rige la minería chilena. Marco legal relacionado, principalmente, con los desechos mineros. Dicha normativa es la que implanta la necesidad en las faenas mineras de caracterizar los residuos mineros.

### 2.3.1. Normativa legal

De acuerdo con el marco legal vigente, que regula la actividad minera, se encuentran las siguientes leyes y decretos relacionados con los desechos mineros:

- ❖ **Ley Sobre las Bases Generales del Medio Ambiente, Ley 19.300** (año de vigencia 1994): incorpora instituciones enfocadas y relacionadas con el tema ambiental. Establece un marco de regulación y de sanción de carácter general. Marco que se relaciona con la preservación y protección del medio ambiente y el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación. También crea instrumentos como el SEIA (Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental). Además, durante esta ley se creó la CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente), que era un instrumento de gestión y cumplimiento de derechos relacionados con el medio ambiente. Además, esta norma establece que cualquier persona puede acceder a la información ambiental como los residuos mineros que son emitidos. Cabe mencionar que esta ley fue modificada por la nueva ley de las bases generales [15].
- ❖ **La Nueva ley de las Bases Generales, ley 20.417** (año de vigencia 2010): establece, principalmente, una serie de regulación y modificación a la ley 19.300. Esta ley crea una Superintendencia del Medio Ambiente encargada específicamente de la fiscalización. Se instaura el cargo de Ministerio del Medio Ambiente, también funda los Tribunales Ambientales. Además, crea el SEA (Servicio de Evaluación Ambiental). Servicio encargado de recibir los proyectos y evaluarlos mediante instrumentos como el SEIA (Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental). Este instrumento somete a evaluación de impacto ambiental a proyectos o actividades como disposición o emisión de residuos mineros. Lo anterior a través del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental [16].
- ❖ **El Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental** (año de vigencia 2013): este reglamento establece los proyectos o actividades que deben



ser sometidos al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Los proyectos o actividades deberán ingresar como Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o Estudio de Impacto Ambiental (EIA) según corresponda. Luego, el Servicio de Evaluación Ambiental junto con la participación de la comunidad y en base a la Ley N° 19.300 emite o no la Resolución de Calificación Ambiental (RCA). En caso de ser aprobado el proyecto puede continuar, en caso contrario lo resuelve un comité de ministros [17].

En este reglamento se establecen que los proyectos de desarrollo minero serán sometidos a la Evaluación de Impacto Ambiental. Proyectos de disposición de residuos y estériles como relaves y botaderos deberán ser sometidos a esta evaluación. Estos ingresarán como EIA en caso de ser un riesgo para la salud de la población, generar un efecto negativo sobre los recursos naturales renovables, alteración del patrimonio cultural, afectar el valor del paisaje, entre otras cosas. [17].

En el reglamento también se establecen los permisos y pronunciamientos ambientales sectoriales, en particular en esta investigación se informan los relacionados con los desechos mineros y residuos peligrosos [17].

Artículo 121° y 122°, establecen las condiciones para ejecutar labores mineras en parques nacionales, monumentos naturales, reservas nacionales y con intereses históricos y científicos. En particular, se habla de que se debe cuantificar y describir para el manejo y disposición de residuos mineros [17].

Artículo 139°, permiso relacionado con la construcción, reparación, modificación y ampliación de cualquier obra destinada a la disposición y tratamiento de residuos mineros e industriales [17].

Artículo 135°, autorización para la construcción y operación de depósitos de relaves, en particular, a lo establecido en el decreto supremo N° 248. Todo esto para asegurar la estabilidad química y física de los depósitos de relaves [17].

Artículo 142°, 143°, 144°, 145°, permisos relacionados con el almacenamiento, transporte, instalaciones, eliminación y reciclaje de residuos peligrosos. En particular conlleva a lo determinado en el Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos [17].

- ❖ **En el Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos** (año de vigencia 2004): se establecen los residuos que son considerados dañinos. Impone los deberes que poseen los que generan, los que transportan y los que reciben los desechos peligrosos. También se establecen las pautas necesarias para la clasificación y manejo residuos peligroso. Por último, establece las concentraciones máximas permitidas para depositar estos residuos en el suelo [18].

En cuanto a los residuos mineros masivos no serán considerados peligrosos si son: estériles, minerales con baja ley, escorias, ripios y relaves. Sin embargo, la

autoridad sanitaria puede requerir una caracterización de estos residuos o generar un análisis. En caso que el análisis de los residuos mineros sea dañino su tratamiento será como la de los residuos peligrosos [18].

- ❖ **El decreto supremo N° 248** (año de vigencia 2007): es el reglamento que se rige para la construcción, el diseño, la operación y el cierre de los depósitos de relave. Otro objetivo es la aprobación de proyecto de depósitos de relaves. Es un reglamento que estable las pautas para depósitos de relaves con la que debe someterse cada faena minera. El SERNAGEOMIN es el encargado de su fiscalización [4].

En caso de los relaves deben estar conformados por dos partes. La primera, el muro de contención (que está construido con el material grueso del relave). La segunda, la cubeta, que tiene dos partes, los sólidos y los finos que se depositan en el fondo. En la superficie quedan las aguas claras las que serán recuperadas y recirculadas a la planta (a través de bombas). El muro es construido primero con una muralla de contención inicial hecha de material empréstito. Luego, el resto del muro se levanta con el material grueso del relave. Lo anterior se logra al ocupar hidrociclones que permitirán separar el material [4].

- ❖ **La ley que regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras, Ley 20.551:** (año de vigencia 2011): surge por la falta de una normativa encargada de regular los aspectos negativos de la faena minera. Impactos perjudiciales como la contaminación que pueda generar, impedir el abandono de faenas mineras, ausencia de una garantía que resguarde las medidas del plan de cierre. Dentro de los objetivos de esta ley se observan: regulaciones de la estabilidad química y física, obligación por parte de las faenas de presentar un plan de cierre, establecer sanciones más fuertes, controlar el no abandono de la faena minera y establecer una garantía que permita velar por el cumplimiento del plan de cierre [19].

El objetivo de la ley es velar por el plan de cierre para mitigar los efectos en el medio ambiente y que se asegure la estabilidad química y física de los lugares donde opere la minería. Se entiende por estabilidad química el control en el agua, aire y suelo de los depósitos generados por la faena para que no puedan causar acidez en el medio. Además, tratar de evitar que los residuos mineros (relaves y botaderos), que puedan ser generadores de ácidos entren en contacto con el agua [19].

De las leyes y/o normativas presentadas, se concluye que el país aún carece de regulaciones claras y específicas que estén relacionadas con la caracterización de material de relave y estéril.

### 2.3.2. Programa de Estabilidad Química y Física

De la normativa legal presente, en particular, la Ley de Cierre Minero y de la preocupación del tema ambiental, junto con la comunidad, es que surge un Programa de Estabilidad Química (PEQ) (año 2015) como apoyo a la normativa anterior. El programa establece una secuencia de pasos que van desde la exploración hasta más allá del cierre de la mina. Este contará y dependerá de diferentes factores, principalmente, el entorno donde se desarrolla la mina, normativa vigente, sociedad, etc. [5].

En la guía se establece como estabilidad química, cuando la faena minera en interacción con factores ambientales no genera impactos tanto para el medio ambiente como para las personas [5]. La gestión de estabilidad química debe ser desarrollada a lo largo de toda la vida de la minera. Lo anterior, para llegar a la condición de equilibrio al momento de su cierre. El programa puede ser dividido en tres grandes etapas que son: evaluar, monitorear y asegurar. Todo lo anterior con el objetivo de establecer la estabilidad química en el cierre de la mina o faena. Cabe recalcar que las etapas no son consecutivas [5].

**La etapa de evaluación:** está relacionada con la caracterización de materiales u otras fuentes emisoras capaz de generar drenaje minero. Además, toma en cuenta las consecuencias de los drenajes mineros en el corto, mediano y largo plazo [5].

**La etapa de monitoreo** es una fase holística que actúa durante todo el programa de estabilidad química. Para controlar que la etapa de evaluación y la etapa de asegurar, sean cumplidas a cabalidad. [5].

**La etapa de asegurar:** cuya finalidad está enfocada en prevenir, mitigar, controlar, tratar los drenajes mineros generados. [5].

Como se pudo observar en el punto 2.1, la generación de un drenaje minero en si es un proceso complejo. Este debe ser gestionado desde las etapas iniciales de formación hasta la etapa posterior al cierre de la mina. El programa no solo está enfocado en lograr la estabilidad química de los desechos de la mina, sino un control total del ciclo de la faena. Esto no solo como apoyo a la normativa vigente en este ámbito, sino para lograr que la operación sea más sustentable. Sin embargo, es solo una guía para las faenas, las que como se observó en la normativa legal no están obligadas a llevarla a cabo.

## 2.4. Métodos de caracterización geoquímica

Entre los diferentes métodos que existen para la caracterización de las muestras, se debe empezar por los más simples relacionados con obtener información de los elementos, compuestos presentes, cantidades y concentraciones. Luego, se procede a tests estáticos para predecir la capacidad de generar ácido de un material. Finalmente, se

aplican los tests cinéticos destinados a corroborar los test anteriores y proveer información más fehaciente [5] [20]. A continuación se detallan las pruebas más conocidas.

### **2.4.1. Análisis químicos**

Estas técnicas son la primera aproximación para obtener información de diferentes materiales. Permiten conocer principalmente la cantidad de elementos químicos y sus concentraciones [5] [20].

#### **2.4.1.1. Fluorescencia de Rayos X (XRF)**

Es uno de los métodos más simple y rápidos. Este proporciona información cuantitativa como cualitativa de elementos químicos. Las concentraciones mínimas deben ser superior a 0,0001% o 1 ppm. Permite analizar muestras como sedimentos, relaves y rocas. [5] [20].

La técnica consiste en irradiar una muestra con un haz de rayos x (haz incidente). Lo anterior provoca la excitación de los electrones, los que luego cesan su excitación y emiten energía. Esta energía es emitida como rayos x y es característica de cada elemento químico [5] [20].

#### **2.4.1.2. Espectrometría de Masas (ICP-MS)**

La espectrometría de masas con plasma acoplamiento inductivo es una técnica de análisis inorgánico que permite la cuantificación de la mayor cantidad de elementos de la tabla periódica. Admite cuantificar más de 73 elementos químicos por minuto, esto tanto en concentraciones ultratraza y traza. Además, esta técnica permite una identificación de elementos en ppm, ppb y ppt, de ahí que se usa en trazas y ultratrazas [5] [20].

Para realizar esta prueba, se requiere que la muestra sea preparada, lo que involucra un proceso de digestión de esta. Luego de eso, el ICP provoca iones cargados desde los elementos hacia el espectrómetro de masa (MS), donde los iones se procesan y analizan [5] [20].

#### **2.4.1.3. Espectrometría de Absorción Atómica (AAS)**

Técnica que posee un alcance rápido y de precisión. Esta prueba se usa principalmente para la determinación individual de elementos, esto de manera cuantitativa. Su fundamento está en la absorción de energía de parte de los átomos. La absorción se relaciona de manera lineal con la concentración de los elementos. Puede ser aplicada tanto en elementos con concentraciones mayores como en trazas. Se aplica a muestras que se encuentran como líquidas o sólidas [5] [20].

Para este estudio se necesita que la sustancia sea filtrada. Luego, el espécimen se lleva a átomos individuales en estado fundamental (atomizar). Esto se logra, principalmente,

al calentarla. Después, cada elemento de la muestra atomizada es iluminado por un haz de luz de longitudes de ondas específicas. Finalmente, se aísla esta longitud de onda para determinar mediante un detector la concentración de cada elemento [5] [20].

## **2.4.2. Análisis mineralógicos**

El análisis mineralógico es una técnica más sofisticada, que permite la determinación de minerales de una muestra de forma cuantitativa como cualitativa. Los minerales juegan un papel crucial en la generación de drenaje ácido de mina, así como de la neutralización de este drenaje [5] [20].

### **2.4.2.1. Difracción de Rayos X (XRD)**

Es el resultado de la interacción de un haz monocromático de rayos X con una sustancia cristalina; proporciona la información tridimensional de un sólido. Además, permite identificar compuestos químicos cristalizados; es aplicable solo a sustancias no amorfas y las concentraciones deben ser superiores a 3%. Se puede usar tanto en minerales como en metales [5] [20].

Primero, la muestra debe estar molida y tamizada. Luego, de inducir el haz se obtiene el espectro de rayos X difractado característico. La disposición de las líneas emitidas puede usarse para una finalidad analítica y cuantitativa de los minerales en un detector [5] [20].

### **2.4.2.2. Evaluación Cuantitativa de Materiales (QEMSCAN)**

La Evaluación Cuantitativa de Materiales mediante Microscopio Electrónico de Barrido es utilizada para analizar cuantitativamente los materiales, pero también genera imágenes y mapas de alta resolución, lo que permite observar el tamaño de cada mineral en la muestra. En la superficie se observa información como tamaño de grano, forma y las asociaciones de los minerales [5] [20].

El método se basa en la emisión de un haz de rayos de electrones en la muestra. Lo anterior genera un espectro de emisión, que se emplea para la calificación de la muestra. Dentro de la información cuantitativa que es posible obtener, se adquiere: porosidad del material, textura, así también, composición, angularidad y distribución de los minerales [5] [20].

## **2.4.3. Test estáticos**

Son la primera fuente para poder determinar el potencial generador de ácido o potencial neutralizador de un material; un conjunto de análisis y pruebas que proveen una información rápida de las características geoquímicas y de la reactividad de los materiales. Estos procedimientos, generalmente, deben ser usados con otros para poder determinar una evaluación definitiva. Además, es importante informar que estos métodos son aplicables, principalmente, a material estéril, pero de igual manera se pueden aplicar

a materiales de relave. Cabe mencionar algunas sutiles diferencias en esto: el material estéril debe ser secado, luego chancado y pulverizado para ser analizado; el material de relave debe ser secado y posteriormente pulverizado, lo que depende sí el material se encuentra con la granulometría solicitada. [5] [20] [21] [22] [23].

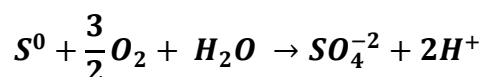
### 2.4.3.1. Contabilidad Ácido-Base (ABA)

Este método consiste en la determinación de la cantidad de carbonato equivalente y azufre lixiviable de una sustancia sólida. Lo anterior se traduce en la determinación de potencial ácido (PA) o máximo potencial ácido (MPA) de una muestra y el potencial neutralizador (PN) o la capacidad neta de neutralización (ANC) de la muestra. Estos dos parámetros posteriormente se relacionan en el potencial neto neutralizador (PNN) o potencial neto de producción de ácido (NAPP) [20], tal como lo expresa la Ecuación 2.1.

$$PNN = PN - PA$$

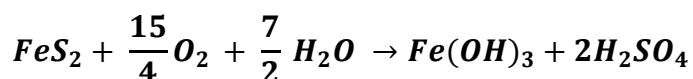
**Ecuación 2.1: Potencial neto de neutralización.**

La Reacción 2.2 es el caso genérico, que representa la oxidación de un mol de azufre elemental, el que produce dos moles de  $H^+$

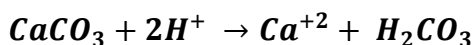


**Reacción 2.2: Producción de protones a partir del azufre elemental.**

Para determinar el potencial ácido de la muestra, se debe multiplicar por un factor de conversión que proviene de la Reacción 2.3. Se sabe que un mol de S produce dos moles de  $H^+$ , los que pueden ser neutralizados con un mol de  $CaCO_3$  [20] como se observa en la Reacción 2.2 y Reacción 2.4.



**Reacción 2.3: Oxidación de la pirita.**



**Reacción 2.4: Neutralización de los potrones.**

Después, se consideran los pesos moleculares, se dice que 1gr de S es neutralizado por 3,125 gr de  $CaCO_3$ . Esto a la vez se puede expresar como que 1% de sulfuro requiere 3,125 kg de  $CaCO_3$  por 100 Kg o su equivalente en tonelada, como se puede apreciar en la Ecuación 2.2.

$$PA = \frac{31,25 \text{ Kg} * CaCO_3 * \%S}{\text{Tonelada de material}}$$

**Ecuación 2.2: Potencial ácido de la muestra.**

Un punto importante de la ecuación anterior es el hecho que al porcentaje de azufre total se le debe restar el azufre presente como sulfato y el que está presente asociado a otros sulfuros. Esto permitirá calcular el verdadero PA de una muestra. El ANC queda determinado al multiplicar la Ecuación 2.2 por 0,98, esto por los pesos equivalentes ( $\text{CaCO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ ). El potencial de neutralización queda determinado por la cantidad de ácido con la que se puede neutralizar la muestra [20]. La cantidad de ácido que se consume se puede expresar con la Identidad 2.1.

$$PN = \frac{\text{Kg CaCO}_3}{t} - \frac{\text{Kg H}_2\text{SO}_4}{t}$$

**Identidad 2.1: Potencial de neutralización.**

Finalmente, los resultados para este test se pueden resumir en la Tabla 2.3, que permite entregar las características de generación [24], es decir, si genera ácido o no:

**Tabla 2.3: Potencial generador y su rango [24].**

Características de generación	Rangos		
	% de S	PNN	PN/PA
<b>No genera ácido (NGA)</b>	< 0,3 %	> +20 Kg $\text{CaCO}_3$ /ton	> 3
<b>Generación de ácido incierto (ID)</b>	0,3 - 1,0 %	> -20 y < +20 Kg $\text{CaCO}_3$ /ton	1- 2
<b>Potencial de generador ácido (PAG)</b>	> 1,0 %	< - 20 Kg $\text{CaCO}_3$ /ton	1>

Como se puede observar en este test uno de los supuestos que se realizan es que la pirita reacciona en su totalidad. Además, es llevado a condiciones de pH muy ácido, cosa que en la realidad no es siempre verdad, ya que el pH no baja tanto. Otro punto es que como fue desarrollado el método en la industria del carbón funciona bien en la presencia de carbonato, pero el problema es que los pórfidos cupríferos poseen silicatos. Los silicatos cuando se llevan a una condición de pH límite reaccionan y contribuyen a la neutralización, situación que en la naturaleza no sucede [5].

Pese a sus inconvenientes todavía es uno de los métodos más usados, ya que es relativamente rápido y de bajo costo. Otra desventaja es que este método no distingue entre los elementos de la muestra que generan ácido y los que no. También este test tiende a sobreestimar el potencial neutralizador de la muestra cuando no existen carbonatos en esta. Además, el ABA es incapaz de correlacionarse con la cinética de meteorización, por lo que requiere el uso de tests cinéticos [5].

#### **2.4.3.2. Generación Neta de Ácido (NAG)**

Este test entrega inmediatamente el resultado neto o total de la generación de ácido. Se basa en la adición de peróxido de hidrógeno  $\text{H}_2\text{O}_2$  a la muestra. La finalidad es oxidar los sulfuros con el peróxido de hidrógeno. El ácido sulfúrico generado es totalmente o parcialmente neutralizado por los componentes de la misma muestra [5].



La prueba consiste en agregar 250 ml de peróxido de hidrógeno al 15% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 2,5 gr de muestra, esto se deja hasta que la efervescencia cese (en caso que exista) para obtener el residuo ácido. A la solución remanente se le toma el pH y se le titula hasta pH 4,5 y 7,0 [5] [20]. Los resultados se resumen en la Tabla 2.4 y el NAG es expresado por la Identidad 2.2.

**Tabla 2.4: Clasificación resultados NAG**

pH NAG	Observación
> 4,5	No es potencial generador ácido (NPAG)
< 4,5	Es potencial generador ácido (PAG)

$$NAG = \frac{Kg H_2SO_4}{T}$$

**Identidad 2.2: Generación Neta de Ácido.**

Las ventajas son: determina el potencial total de generación de ácido, es económico, rápido y utiliza equipos que son de fácil acceso.

Desventajas: este método no es capaz de diferenciar entre el potencial generador de ácido de una muestra y su potencial neutralizador. En presencia de alta pirita se requiere una secuencia de adición de peróxido (NAG secuencial), lo que puede llegar a sobreestimar el potencial generador de ácido [5]. Generalmente, este método es complementado con el ABA lo que permite eliminar el error de la clasificación de la muestra. Además, en tales casos se recomienda complementarlo con el ABCC para esclarecer el resultado [5].

### 2.4.3.3. Curva Característica de Tamponamiento Ácido (ABCC)

Este test consiste en la titulación lenta de una muestra con ácido mientras se mide y controla el pH. Esto permite observar la porción dentro de esta, que se encuentra en condiciones para ser neutralizada, en condiciones de NAG = 4,5 y NAPP < 0 [5] [21] [25]. Primero, se titula la muestra hasta un pH inferior a 3, a través de la adición de volúmenes de HCL cada 15 minutos para cada rango de ANC. A continuación, se grafica el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t versus pH, para obtener la curva de tamponamiento. Finalmente, se escala esta curva obtenida para generar la correlación con las curvas de tamponamiento de la bibliografía [5] [21].

Las ventajas de este test son: provee la reactividad relativa del ANC, se pueden realizar duplicados por la poca cantidad de muestra que ocupa, fácil aplicación y generación de los datos. Todo esto hace que el ABCC proporcione más confianza porque se observa la manera que se consume el ácido a medida que disminuye el pH. Lo anterior no se puede observar en los test que se utilizan para determinar el ANC [5].



Inconvenientes son: requiere conocer el NP, puede demandar mucho tiempo, requiere que la muestra este bien pulverizada, situación que hace que se liberen materiales que en la realidad no sucede [5]. A continuación, en la Tabla 2.5 se presentan algunos rangos promedios de amortiguamiento para ciertos minerales y roca.

Tabla 2.5: Rango promedio de amortiguamiento.

Sustancias	Rango de pH
Calcita	8,2-7,7
Caliza	8,0-7,7
Dolomita	7,5-6
Dolomita ferrosa	6,8-5,8
Rodocrosita I (calcítica)	6,8-6
Rodocrosita II (ferrosa)	No se observa
Magnesita	3,0-2,6
Siderita	3,2-2,8

#### 2.4.3.4. Carbono Total Inorgánico (TIC)

El análisis del carbonato mide la cantidad de dióxido de carbono que es expulsado de una muestra fragmentada cuando reacciona con ácido clorhídrico; los principales minerales carbonatos son: la calcita, la dolomita y la siderita. Este método es aplicado para apreciar la capacidad neutralizadora asociada al carbonato y compararlo con el del test ABA. El principal método utilizado es el horno Leco para el análisis de carbón. En él la sustancia a ser analizada es quemada en un analizador de carbón o sulfuro, lo que permite que se expulse el CO<sub>2</sub> o SO<sub>2</sub>. Luego, estos elementos son medidos por un infrarrojo para observar el contenido directo de carbón o sulfuro. Un pedazo de la muestra se le agrega ácido clorhídrico al 15% para remover el carbón inorgánico en forma de CO<sub>2</sub>. Finalmente, el analizador determina el contenido de CO<sub>2</sub>. La diferencia del contenido de carbón es clasificado como el % de CO<sub>2</sub> o TIC. La detección limite es 0,1 % CO<sub>2</sub> [5].

Su principal ventaja es que suele ser más económico que el NP. El principal problema de este método es que solo mide la capacidad neutralizadora del carbonato (NP). Este procedimiento puede conducir a un error en presencia de siderita, lo que ocasiona un alto PN. En esos casos se requiere información adicional, por ejemplo, a través del XRD para determinar la presencia de siderita. Este método solo se usa para comparar con otros tests, vale decir, es solo para complementar. También se requiere que el contenido de carbón orgánico sea bajo, es decir, no es aplicable en presencia de carbón [5].

#### **2.4.3.5. pH en pasta y conductividad**

Al principio se forma una pasta entre la muestra (se requiere que sea muy fina) y el agua, que debe ser destilada, en proporción de peso 1:1 o 1:2. Esto con la finalidad de que los elementos, principalmente, los minerales se muevan a la fase acuosa para alcanzar el equilibrio. Al final, se debe medir la conductividad y el pH. El medir la conductividad y pH, indicaría la salinidad inherente al material y su acidez al depositarse en una fuente potencialmente generadora de drenaje minero [5].

Los beneficios de este método son: su bajo costo y fácil uso. Entre los obstáculos que se encuentran son: no medir la velocidad de formación de ácido, puesto que requiere de una muestra muy fina puede liberar el material que la realidad no se encuentra liberado. El tiempo de aplicar esta muestra varía de 10 minutos a toda la noche [5].

#### **2.4.3.6. B.C. Research initial test**

Este test busca determinar la capacidad neta neutralizadora de una muestra fina, que es mezclada con agua y ácido sulfúrico. Primero, se titula la muestra a un pH de 3,5. En segundo lugar, el potencial generador de ácido se calcula similar al método del ABA al analizar el azufre total. Por último, se comparan estos dos resultados lo que determina potencial neto de la muestra de ser un drenaje ácido de mina [5].

Las ventajas son: su simplicidad y que permite analizar un gran número de muestras. La desventaja es que el grado en que se neutraliza o se genera ácido no es posible determinarlo, además, puede sobreestimar valores al calcular el potencial de generación de ácido. Por el otro lado, el costo suele ser un poco mayor al ABA y suele demorar un poco más que el ABA [5].

#### **2.4.3.7. Tests SPLP y TCLP**

Estos tests tratan de simular el proceso de la lixiviación de los elementos de interés a nivel de laboratorio. Lo anterior mediante dos test SPLP (Procedimiento de Lixiviación por Precipitación Sintética) y TCLP (Procedimiento de Lixiviación Característica de Toxicidad). Los test se diferencian en el tipo de extractantes. El método consiste primero, a la muestra se le aplica una solución extractante. Luego, de aplicar el extractante, se recupera el líquido al cual se le mide el pH y se identifican los elementos de interés. Finalmente, el test entrega la concentración de los elementos de interés en la solución acuosa, que se puede comparar con los de la muestra. Esto también sirve para realizar un símil con los elementos peligrosos que puede contener un efluente. Los tests pueden evaluar elementos nocivos como: As, Hg, Ba, etc. Elementos que son establecidos en el reglamento sanitario sobre el manejo de residuos mineros [5].

La principal ventaja es que permite evaluar sustancias tóxicas como metales pesados. Los inconvenientes de este procedimiento es que el test TCLP está destinado solo a muestras que tienen ciertos elementos tóxicos, no funciona bien para muestras con

muchos volátiles, además, solo proporciona una mirada puntual de la lixiviación. Otra desventaja es que puede demandar mucho tiempo por espera de los resultados de análisis de elementos químicos en las soluciones de lixiviación [5].

#### **2.4.4. Test cinéticos**

Los test cinéticos como el nombre lo expresa permiten obtener información de la velocidad con la que se meteoriza un material, principalmente, estéril. Además, se puede apreciar la rapidez con la cual los elementos contaminantes son expulsados. Estos test pueden ser aplicados en faena, es decir, en la mina misma, pero generalmente se realizan en el laboratorio. Las pruebas que pueden ser extraídas de estos test incluyen: generación de ácido en tiempo retardado, oxidación de sulfuros, lixiviación de metales y agotamiento de carbonato. Estos test serán aplicados en una etapa posterior de la realización de los test estáticos. Su uso es más caro y demanda mayor tiempo [5] [22].

##### **2.4.4.1. Celdas de Humedad**

Este test consiste en introducir el material en una cámara que le permite una continua aeración, primero con aire húmedo y luego aire seco. Cada ciclo tiene una duración de 7 días, lo que se intenta es simular condiciones de lluvia y humedad. Al término del experimento se genera una lixiviación completa de la muestra por una hora. Con todo lo anterior se pueden determinar los elementos generados de la oxidación de sulfuros y lixiviación con ácido. Este test permite correlacionarse con otros como el ABA, cuando se observan características de una muestra de generar ácido [5].

Al comienzo del ciclo la muestra se humedece. Durante el ciclo de aeración se mantiene la humedad del mineral, durante esto solo ocurre la oxidación de los sulfuros, no de los productos ni tampoco existe transporte de estos. A través del ciclo de secado toda el agua se evapora, esto permite la precipitación de partículas en la superficie. Luego, en la etapa de lixiviación, se disuelven algunas sustancias y se concentra el agua. Además, los óxidos producidos son transportados fuera del mineral y son neutralizados por ciertos minerales [5].

Las ventajas de este test son: comparación con otros test, permite la calibración de algunos tests, prueba de manejo parcialmente fácil, se puede apreciar la tasa de generación ácido y oxidación de sulfuros, así también, evaluar el efecto de las bacterias. Lo anterior permite adoptar medidas de control de un posible drenaje minero.

Algunos inconvenientes son: en primer lugar, las tasas de consumo y generación de ácido son relativas, al igual que la duración del test, las velocidades de reacción en celdas son bajas, a  $\text{pH} < 7$ . En segundo lugar, el consumo de ácido también es lento, lo que da como resultado largos tiempos de retardo del ácido expulsado. Además, este método no puede ser aplicado directamente a escala industrial, ya que existen variaciones de los parámetros de entrada al ser aplicado en laboratorio versus en terreno. Por último, el

material requiere en un comienzo ser caracterizado por tests como ABA, TIC, análisis mineralógico, etc. Como en la mayoría de los experimentos los costos dependen del laboratorio y el tipo de material a utilizar el costo varía entre 1.150 US\$ – 2.000 US\$ y la duración mínima es de 7 días [5] [20].

#### 2.4.4.2. Test en columnas

El test en columna trata de solucionar el problema de las celdas de humedad, es decir, reflejar la lixiviación en condiciones anoxias o con poco oxígeno. Este test se implementa en columnas o lisímetros. Estos últimos son similares a las columnas pero permiten medir el agua. Los lisímetros tiene ambos extremos cerrados, pero el fondo permite el drenaje, el tamaño varia en un amplio rango. El test consiste en llenar las columnas o lisímetros con un material de sustrato y lixiviarlo. En segundo lugar, pasar agua destilada una sola vez, de modo que el lixiviado que es generado pueda ser analizado. Entre los objetivos que busca este test se encuentran: determinar la calidad del lixiviado, apreciar la velocidad y la variación temporal de la generación de ácido. Los resultados del análisis del lixiviado se interpretan como lo indica la Tabla 2.6 [5].

Tabla 2.6: Interpretación de los resultados del test columna.

Cambios parámetros:	Valores	Interpretación
<b>Disminución del pH</b>	pH > 5,5-5	La muestra no genera ácido.
	pH < 5,5-5	El rol de las bacterias es importante
	pH = 3-5	La muestra genera ácido y existe toxicidad por esto.
	pH < 3,5	Las bacterias influyen mucho en la generación de ácido.
<b>Aumento del Eh</b>	Eh > 450 mV	Indica ambiente influenciado por bacterias y altamente oxidante.
	Eh > 500 mV	Influencia de la oxidación del hierro es significativa.
	Eh < 450 mV	El DMA puede estar en etapas tempranas.

Sus primordiales ventajas son: primero, permite observar la calidad de la lixiviación y determinar la concentración de metales disueltos, segundo, admite evaluar las opciones de control y gestión del DMA. Tercero, permite evaluar la relación con otros materiales para apreciar sí se puede retrasar o prevenir la generación de ácido. Otra ventaja es que se evalúan las velocidades de oxidación en un amplio rango. El costo para un total de 20 semanas de evaluación puede variar desde 1.600 US\$ hasta 4.000 US\$, el tiempo del test es de algunas semanas [5] [20].

Desventajas: es un método caro y demanda mucho tiempo, la velocidad de alcalinización y generación de ácido no se pueden comparar. Además, los resultados de este test no son fácilmente aplicable en campo o en faena; esto se debe a que los resultados se influyen por factores de escalamiento como la consideración de oxígeno, temperatura, condiciones de aire, etc. [5].

#### **2.4.4.3. B.C. Research Confirmation Test**

El objetivo de este test es analizar la influencia de las bacterias en la generación de ácido. En primer lugar, el test toma una muestra de tamaño fino, a la que se le agrega una pulpa ácida y se le agregan bacterias (*Acidithiobacillus ferrooxidans*). En segundo lugar, se evalúa el pH y se mide hasta que la oxidación termina, esto sucede cuando el pH se neutraliza. En tercer lugar, se agregan dos muestras del mismo peso que la original, la primera a las 24 horas y la segunda, 24 horas después. Luego, de 24 horas se registra el pH de cada muestra. Finalmente, si la muestra presenta un pH menor a 3,5, el material es posible de generar ácido y en caso contrario no [5].

Las ventajas son: entrega el potencial de oxidación bioquímico de una muestra, es barato y fácil de usar. Los inconvenientes son: requiere de amplios conocimientos, puesto que se trabaja con bacterias, por lo que se requiere una inoculación. Además, existe un sesgo inherente del método por el hecho que no considera o no resta la adición de ácido al inicio. Por último, existen complicaciones al trabajar con muestras con gran contenido de azufre. Cabe destacar que la duración de realizar el test es de algunos días [5].

### **2.5. Minas reconocidas por su gestión en la estabilidad química**

Finalmente, en el último subcapítulo se presenta un estudio de mercado de diferentes mineras que implementan una metodología de caracterización en línea y son reconocidas por esto. Estas faenas buscan con la metodología resguardar el medio ambiente y disponer de manera sustentable los residuos mineros.

#### **2.5.1. Compañía minera Antamina, Perú**

Yacimiento ubicado en la zona oriental de la cordillera de los Andes a una altitud de 4.200 m s.n.m. Es un yacimiento polimetálico del tipo Skarn y sulfuro masivo. Los minerales que se extraen son: cobre, zinc, molibdeno, bismuto y como subproducto concentrados de oro y plata [24] [26].

La faena realiza una preclasificación del material para su posterior manejo y segregación. Esto lleva a la clasificación de las rocas en tipo A (reactiva), tipo B (ligeramente reactiva) y tipo C (no reactiva). Lo anterior conduce a la formación de tres botaderos: el Este, el Tucush y el Sur. El Este recibe roca reactiva o ligeramente reactiva y los dos últimos reciben roca no reactiva. Para la caracterización se hace uso de pruebas elementales como el ICP y mineralógicas como DRX. También pruebas estática como el ABA (en laboratorio canadiense), la lixiviación de los metales (con peróxido de hidrógeno), la lixiviación con agua desionizada. Estas determinaran: pH, alcalinidad, conductividad, acidez, sulfatos y metales disueltos. También realizan pruebas cinéticas (método de columna o celda de humedad) en laboratorio como en terreno [24] [26].



Figura 2.13: Compañía minera Antamina [24].

### 2.5.2. Rajo Lichtenberg, Alemania

El rajo abierto de uranio en Lichtenberg, el que se encuentra ubicado en Alemania oriental, posee un problema asociado con drenaje ácido. Esto sucede por rocas como lutitas, calizas y diabasas, con una alta tendencia a la formación de drenaje ácido y metalífero. Lo anterior condujo a la clasificación del material estéril para impedir la afectación de las aguas subterráneas [22] [26].

La metodología fue una clasificación y posterior segregación del material estéril de la mina en tres tipos: A (generador de ácido), B (mezcla de A y C) y C (material que impide la acidificación por neutralización, principalmente, por caliza). Luego, se llenó el rajo de Lichtenberg con estos materiales, para que no se produzca drenaje ácido que afecte la calidad de las aguas subterráneas. Para lograrlo se mezcla el material A con cal y se coloca en la zona más profunda del rajo, para que este se convierta en material inerte. Además, este se encuentra ya saturado por estar bajo del nivel freático, lo que previene el ingreso de oxígeno y la formación de drenaje ácido. El material B se coloca en el medio o sobre el nivel freático, esto evita el ingreso de oxígeno y agua. Finalmente, en la superficie se coloca el material C cuya función es impedir la acidificación por el alto contenido de cal que posee. La prueba principal fue ABA la cual fue aplicada en muestras de perforación. Esta se usó para determinar el comportamiento ácido del material, además, esta información fue complementada con pruebas pH en pasta, conductividad y NAP [22] [26]. En la Figura 2.14, se puede apreciar el rajo antes y después de ser remediado.





Figura 2.14: Rajo Lichtenberg de Wismut [22].

### 2.5.3. Mina Alumbreira, Argentina

El yacimiento denominado bajo La Alumbreira es una anomalía geológica superficial que se dedica a la extracción de minerales de cobre, oro y molibdeno. Este se encuentra al noreste de Catamarca en Argentina a unos 2.600 m s.n.m. Destaca de esta mina la implementación desde los inicios un Programa de Estabilidad Química y Física. Esta faena tiene una fase de cierre que abarca un botadero y un tranque de relave con alta capacidad de generar drenaje ácido de mina [26] [27].

Mina Alumbreira hace uso de los siguientes procedimientos: descripción, predicción y prevención o control. En la fase de descripción es donde se identifica el terreno y los materiales. En la etapa de predicción se realiza la caracterización propiamente tal de los materiales para apreciar la capacidad de producir drenaje ácido de mina. Por lo tanto, en esta etapa se efectúan tests a nivel de laboratorio como en terreno, esta información se compara con la obtenida de la etapa de descripción. Finalmente, con esta información se crean modelos geoquímicos para observar la interacción de los elementos con los alrededores [26] [27].



Figura 2.15: Minera Alumbreira [27].

#### 2.5.4. Mina Huckleberry, British Columbia, Canadá

Es un rajo abierto donde se produce oro, cobre y plata es reconocido a nivel mundial por los buenos planes de gestión y manejo ambiental. Esta faena hace un uso exhaustivo del Programa de Estabilidad Química y Física en las instalaciones mineras. Se empieza con el tema sustentable desde los albores (exploración) hasta el plan de cierre, con políticas relacionadas con la caracterización de material y manejo sustentable. Esto le permite disponer de botaderos estratégicamente ubicados u ocupados y relaves eficientemente o sustentablemente construidos. El método de explotación de esta mina se relaciona con la caracterización. Realiza pruebas como el ABA, porcentaje de sulfuro, TIC, entre otras [26] [28].

Sin lugar a duda, en esta faena se evidencia la importancia de implementar un método de caracterización y gestión temprana de los materiales en faena. Además, destaca todo el tema ambiental que implementa la mina para evitar poseer costos altos por una mala gestión [26] [28].



Figura 2.16: Mina Huckleberry [28].

Como se puede apreciar en los capítulos anteriores y del estudio de mercado en materia de caracterización de material “Más vale prevenir que curar”. La caracterización temprana del material, el registro de este en bitácoras o informes, permite una gestión planificada y eficiente de estos elementos. Ejemplos de estos se encuentran en Antamina con los botaderos eficientemente gestionados, en la mina Ronneburg de Alemania con su medida de remediación, la faena Alumbarrera de Argentina o la mina Huckleberry de Canadá con sus exhaustivos planes de gestión de residuos mineros. Todo esto permite reducir los costos a la faena minera en tema de manejo de material pero sobre todo, reducir los impactos ambientales que se podrían generar al no tomar las medidas pertinentes.

En la actualidad no existen muchas maneras de realizar una caracterización en línea con gestión sustentable de los residuos mineros, por el hecho de que existen muchos parámetros que se desconocen de un drenaje minero. El drenaje en cierta medida puede ser considerado una caja negra, donde existen una gran cantidad de elementos que



interactúan en tiempo real y producen miles de efectos. Por ejemplo, el lugar por donde viaje un drenaje minero o el medio por donde interactúa generará miles de reacciones, que en la mayoría de las veces son difíciles de caracterizar. Además, las reacciones del drenaje minero pueden llevar desde horas, hasta incluso años en efectuarse, tiempos que escapan del alcance de análisis de los métodos simples de caracterización de materiales [29].

Finalmente, para que se pueda lograr un método de caracterización en línea, se requiere un conocimiento holístico y detallado de los fenómenos que intervienen en los residuos mineros. Lo anterior, se traduce en poseer la mayor cantidad de información posible y de la mejor calidad. Finalidad que se logra solamente al realizar métodos de caracterización del material.

## 3. Material y métodos

### 3.1. Equipos y reactivos

Los principales instrumentos y reactivos utilizados en esta investigación son los indicados a continuación.

**HANNA HI5221:** Instrumento altamente calificado para la medición de pH, conductividad, temperatura y potencial electroquímico, además, de otros parámetros de medición. Los rangos de medición son: de -2,000 a 20,000 pH; voltaje  $\pm 2000$  mV; conductividad de 0 a 1000,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; 1,000 a 1000,0 mS/cm; y temperatura de -20,0 a 120,0°C. La precisión del equipo es de 0,1, 0,01, 0,001 pH; voltaje 0,1 mV; y conductividad de 0,001  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; 0,01  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; 0.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; 0,001 mS/cm; 0,01 mS/cm; 0,1 mS/cm [30].



Figura 3.1: HANNA HI 5221

**Balanza Analítica Modelo (BOECO BAS PLUS):** Equipo utilizado para la medición de la masa de los elementos. Posee gran precisión, gran número de dígitos, fácil utilización, además, dispone de una cabina para la medición sin la perturbación del aire. Carga máxima y mínima admisible, 220 gr y 0,01 gr respectivamente. Precisión de 0,0001 gr. [31].



Figura 3.2 Pesa analítica.

**Plancha calefactora y agitador magnético:** Equipo utilizado para aumentar la temperatura de soluciones, además, posee un agitador magnético práctico para la titulación o preparación de soluciones. Rango de temperatura hasta 280 °C y rango de agitación de 100 hasta 1.500 revoluciones por minuto [32].



Figura 3.3: Plancha y agitador magnético.

**Peróxido de hidrógeno al 30%:** Reactivo utilizado para la preparación de soluciones. Sin embargo, existen unas series de medidas que se debe tomar en cuenta para la manipulación de este reactivo [33].



Figura 3.4: Peróxido de hidrógeno al 30%.

**Hidróxido de sodio:** Compuesto básico utilizado para preparar soluciones de NaOH a diferentes concentraciones como 0,1 M o 0,5M. Este producto puede ser comprado en pellet, escamas y en solución. Igual que otros reactivos requiere de una serie de medidas para su utilización [34].



Figura 3.5: Hidróxido de sodio (pellet)

**Ácido clorhídrico al 37%:** Reactivo ácido que es ampliamente empleado en los laboratorios para la fabricación de soluciones. También requiere un gran número medidas para su utilización [35].



Figura 3.6: Ácido clorhídrico al 37%.

## 3.2. Protocolos de los métodos

Se especifica en este subcapítulo dónde se usaron los equipos, además, de la cantidad, cómo y dónde se utilizaron los reactivos en los test. Los protocolos o procedimientos utilizados en este estudio son los que se detallan a continuación.

### 3.2.1. Muestreo

La técnica de muestreo que se emplea en esta investigación corresponde al roleo y cuarteo. Este método consiste en disponer de una muestra en una superficie y aplanarla ligeramente con una espátula. En segundo lugar, se divide la muestra en cuatro, para eliminar dos partes de estas y conservar dos. Finalmente, estas dos partes reservadas vuelven al proceso de roleo y cuarteo, es decir, dividir la muestra para retirar 2 partes y conservar 2, tal como se aprecia en la Figura 3.7. Esto se hace hasta que el peso de la muestra tenga un valor similar al que se va ocupar, además, se debe considerar lo que se separará en el tamizaje [36].

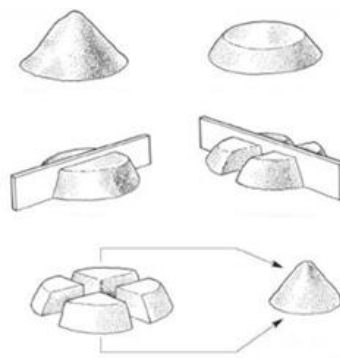


Figura 3.7: Roleo y cuarteo.

### 3.2.2. Tamizaje

El tamizaje consiste en pasar la muestra por un tamiz o cedazo, que posee diferente malla (hendidura). Para este estudio, se utiliza un tamiz de laboratorio con una malla de abertura de 63  $\mu\text{m}$ . Esto permite separar el peso bajo tamaño del sobre tamaño, vale decir, el material que está sobre la abertura de malla del que está bajo la hendidura de la malla, respectivamente.



Figura 3.8: Tamiz malla 64  $\mu\text{m}$

### 3.2.3. Test ABA

Cabe destacar que los resultados del test ABA de esta investigación corresponden al ABA modificado de Lawrence y Scheske de 1997. Este protocolo fue ocupado por la geóloga Martínez [37]. Los materiales y reactivos que se utilizan en el test ABA son los que se detallan a continuación:

#### 3.2.3.1. Materiales y reactivos del ABA modificado

- Muestra pulverizada bajo 80% malla 200.
- Hidróxido de sodio.
- Ácido Clorhídrico.

#### 3.2.3.2. Método del ABA modificado

A) Se separan 1 o 2 gramos de una muestra pulverizada 80% baja malla 200 astm, la que se coloca en un papel de aluminio. Luego, se le agregan algunas gotas de HCL al 25% sobre la muestra y se observa el grado de efervescencia. Después, se califica la muestra según su reacción, es decir, nula, ligera, moderada o fuerte.

B) Se apartan 2 gramos de una muestra, se colocan en un vaso precipitado y se vierten 90 ml de agua destilada para formar una pulpa.

C) [t=0 horas] Al inicio de la prueba se añade un volumen de HCl 1N, según la tasa de efervescencia.

D) Se coloca la solución del recipiente en un agitador magnético por un total de 22 horas.

E) [t=22 horas]. Se mide el pH de la solución. Si el pH de la solución es mayor a 2,5 se debe agregar nuevamente HCL 0,1N esto hasta que el pH alcance un rango de 2,0 –2,5. Si el pH es menor a 2,0 se debe repetir el punto C) con menor cantidad de ácido.

F) [t=24 horas]. Se le debe agregar a la solución agua destilada hasta completar un volumen total de 125 ml. Se registra el pH para verificar que este se encuentre en un rango de 2,0 –2,5. Si no se encuentra en ese rango se le debe agregar otra cantidad de HCL al 1N.

G) Luego, se titula la solución con NaOH al 0,1N hasta alcanzar el pH de 8,3.

H) Finalmente, se calcula el potencial neutralizador (PN) con la Ecuación 3.1.

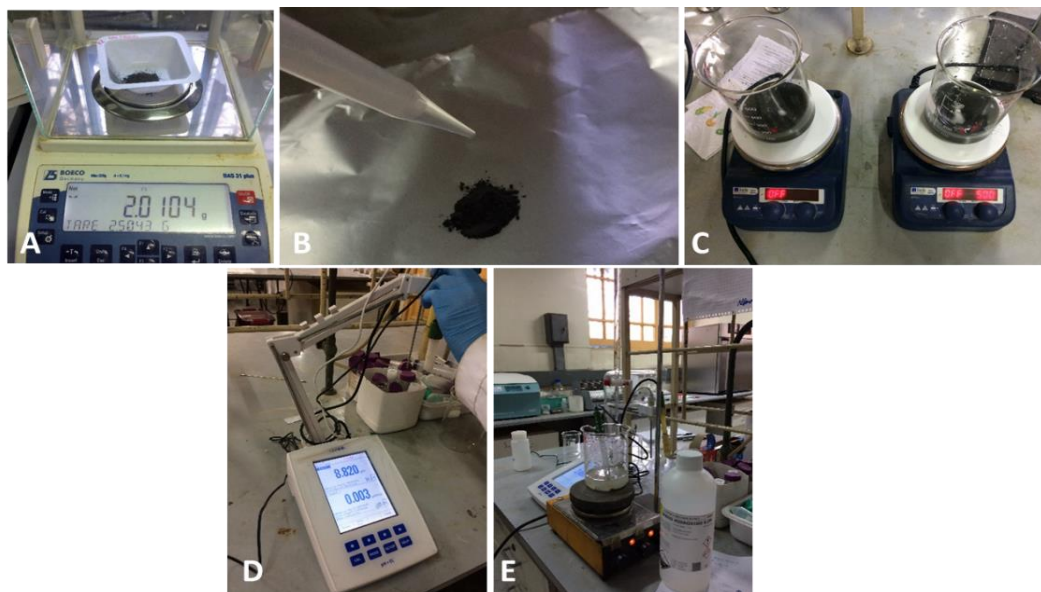
$$NP = \frac{50 * (N_{HCL} * V_{HCL} - N_{NaOH} * V_{NaOH})}{W_m}$$

**Ecuación 3.1: Cálculo del PN**

Donde:

- PN: Potencial de neutralización (Kg CaCO<sub>3</sub>/t).
- N<sub>HCL</sub>: Normalidad del HCL (números de moles/litro)
- V<sub>HCL</sub>: Volumen de HCL utilizado para titular (ml)
- N<sub>NaOH</sub>: Normalidad del NaOH (números de moles/litro)
- V<sub>NaOH</sub>: Volumen de NaOH utilizado para titular (ml)
- W<sub>m</sub>: Peso de la muestra (g)

En la Figura 3.9, se presenta el protocolo del ABA modificado en imágenes.



**Figura 3.9: Protocolo del ABA modificado [37].**

### 3.2.4. Test NAG simple

Los materiales y reactivos necesarios para la aplicación del test NAG son los que se detallan a continuación:

#### 3.2.4.1. Materiales y reactivos del NAG

- Muestra pulverizada bajo 75  $\mu\text{m}$  (malla 200).
- Hidróxido de sodio estandarizado 0,1M o 0,5M.
- Peróxido de Hidrógeno al 15%.

Nota: el Peróxido de Hidrógeno debe estar a temperatura ambiente antes de empezar el test (alrededor de 20°C). El pH del peróxido (15%) debe estar alrededor de 4,5, más específicamente menor a 6,0 y mayor a 4,0. Si el pH es menor a 4,0 se recomienda aumentarlo con una solución 0,25M de NaOH. Esto asegurará la estabilidad del ácido fosfórico utilizado por algunas empresas para estabilizar el  $\text{H}_2\text{O}_2$  [25].

#### 3.2.4.2. Método del NAG

El método utilizado para el test NAG en esta investigación se detalla a continuación:

A) Se pesan 2,5 gramos de una muestra pulverizada < 75  $\mu\text{m}$  en una balanza analítica. Luego, se coloca la muestra en un vaso Erlenmeyer o precipitado.

B) Se miden 250 ml del peróxido de hidrógeno (15%), preferiblemente en un matraz aforado.

C) Se coloca la preparación debajo de una campana extractora de gases y se tapa el frasco con un vidrio de reloj o papel de aluminio.

D) Posteriormente, se permite que la solución reaccione hasta que termine la efervescencia o que el hervor cese. Esto podría requerir mucho tiempo o unos minutos, lo que depende de la muestra.

E) Se coloca la solución en una plancha calefactora a una temperatura media para que hierva suavemente. Esto en un mínimo de 2 horas hasta que la ebullición termine e idealmente tapado el frasco, para que no exista pérdida de la solución.

F) Se ambienta la solución, es decir, se permite que se enfríe a temperatura ambiente.

G) Después, se completa el volumen perdido hasta el volumen inicial (250 ml) con agua desionizada. Esto en caso de que la pérdida de solución sea muy alta, lo que no es recomendado porque se diluye la solución.

H) Posteriormente, se mide y registra el pH de la solución, el que será conocido como el pH NAG.



I) Luego, de eso se titula la solución con NaOH como lo indica la siguiente Tabla 3.1. Esto hasta alcanzar un pH 4,5 y pH 7,0. Posteriormente, se registra el volumen añadido.

**Tabla 3.1: Reactivo de acuerdo al pH NAG.**

pH NAG	Reactivo
pH ≥ 2	Titular con NaOH 0,1 M
pH < 2	Titular con NaOH 0,5 M

J) Finalmente, se realizan los cálculos necesarios y se interpretan de acuerdo con la Ecuación 3.2.

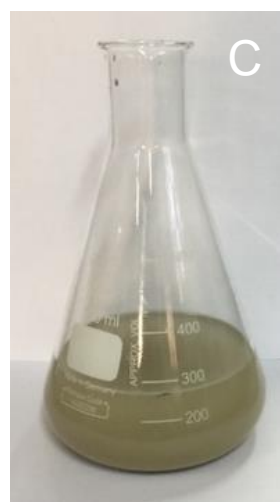
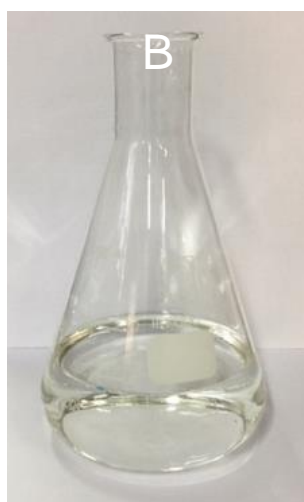
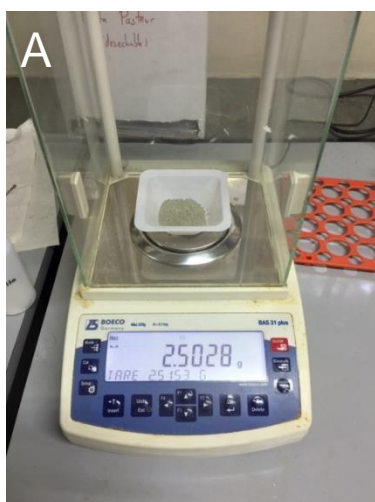
$$NAG = \frac{49 * V * M}{W}$$

**Ecuación 3.2: Cálculo del NAG.**

Donde:

- NAG: Generación neta de ácido (Kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t).
- V: Volumen de NaOH utilizado para titular hasta pH 4,5 (ml)
- M: Concentración molar del NaOH utilizado para titular (moles/litro)
- W: Peso de la muestra (g)

Si los resultados exceden los 25 kg de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> por tonelada se debe repetir la prueba con menor cantidad de muestra (1 gramo). En la Figura 3.10, se muestra el protocolo en imágenes [25].



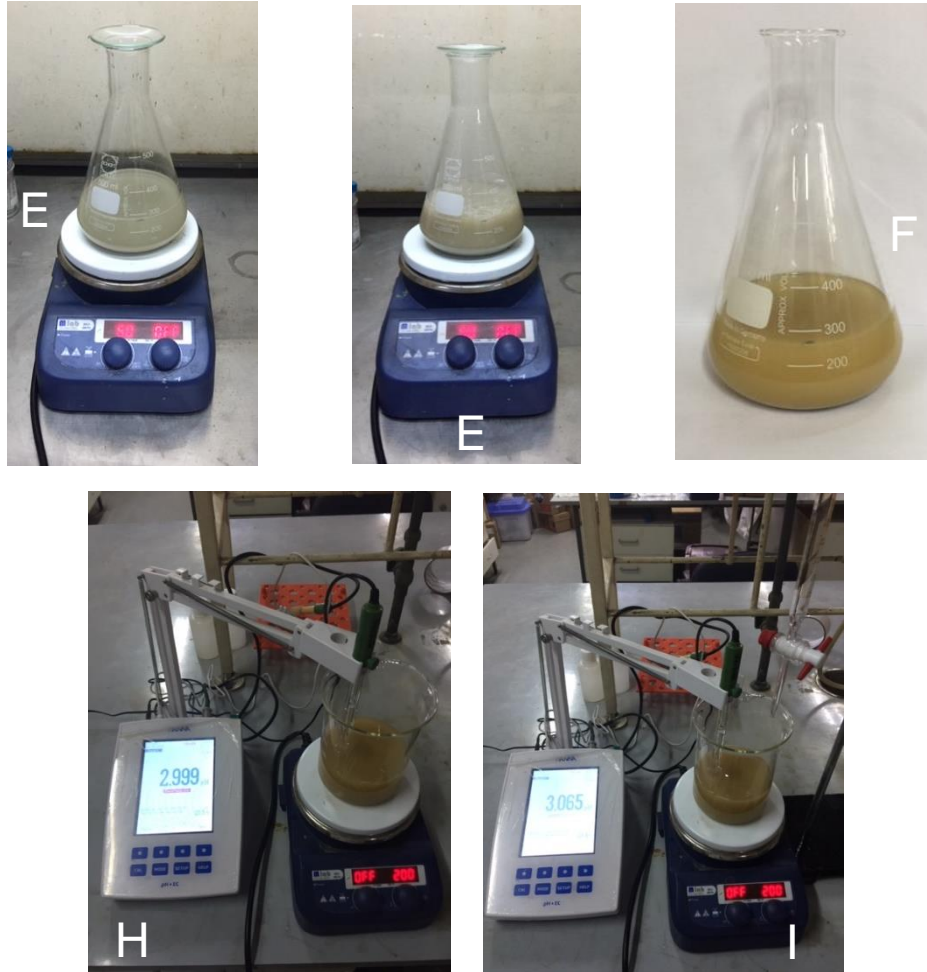


Figura 3.10: Protocolo del NAG.

### 3.2.5. Test NAG secuencial

Este test consiste en realizar varios NAG simples para obtener el potencial ácido máximo de la muestra. Generalmente, esto es utilizado para muestras cuyo ratio NAG/NAPP es bajo  $< 0,5$  y el porcentaje de S es alto  $> 1\%$ ; esto se debe a que puede existir la posibilidad de que el azufre de la muestra no reaccionó [21] [25], el procedimiento se realiza de la siguiente manera:

Se repiten los pasos A) hasta D) del NAG simple. La etapa E) se realiza de manera similar solo que la temperatura es alrededor  $150-200^{\circ}\text{C}$  y se coloca en la plancha alrededor de 1,5 horas. Luego, se realizan los pasos F) y G) del NAG simple. El paso H) se realiza de la misma manera. Posteriormente, se realiza el paso I) y J). Finalmente, en el paso K) se filtra la solución obtenida y se reserva la muestra inicial para repetir los pasos B) hasta el punto H). Lo anterior hasta que el pH de la solución sea mayor a 4,5.

### 3.2.6. Test NAG cinético

Es un NAG simple, pero el pH y la temperatura son monitoreados durante el proceso del test. El procedimiento de este método todavía no está estandarizado todavía, pero entrega una primera aproximación de la cinética del proceso [25].

### 3.2.7. Test NAP

En este estudio, el test NAP se obtuvo inmediatamente del test NAG, al titular o valorar este hasta pH 7. Luego, se realiza la conversión con la Ecuación 3.3. Cabe mencionar que en el protocolo original del NAP, se incluye menos muestra, es decir, 1 o 2 gramos y la oxidación es con peróxido al 30% [38].

$$NAP = \frac{50 * V * M}{W}$$

**Ecuación 3.3: Cálculo del NAP**

Donde:

- NAP: Producción neta de ácido (Kg CaCO<sub>3</sub>/t)
- V: Volumen de NaOH utilizado para titular hasta pH 7,0 (ml).
- M: Concentración molar del NaOH utilizado para titular (moles/litro).
- W: Peso de la muestra (g).

### 3.2.8. Test ABCC

Los materiales y reactivos necesarios para la aplicación del test ABCC son los que se detallan a continuación:

#### 3.2.8.1. Materiales y reactivos del ABCC

- Muestra pulverizada bajo 75 µm (malla 200).
- Ácido Clorhídrico al 0,1M o 0,5M.
- Agua desionizada.

#### 3.2.8.2. Método del ABCC

El método utilizado para el test ABCC en esta investigación se detalla a continuación:

- A) Se pesan 2 o 1 gr de la muestra bajo 75 µm.
- B) Se mide 100 ml de agua desionizada.
- C) Luego, se agrega el agua y la muestra en un frasco cónico de 250 ml (Erlenmeyer) u otro.
- D) Se esperan 15 minutos y luego se registra el pH inicial.

E) Después, se tituló la solución con la concentración e incrementos de HCL y esto hasta alcanzar el pH indicado en la Tabla 3.2 [21], todo con agitación constante.

**Tabla 3.2: Recomendaciones para la titulación del ABCC.**

ANC Kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t	Peso de la muestra (gr)	Incrementos de HCL (ml)	Concentración molar del HCL (M)	pH final
700-1.000	1	0,5	0,5	2,5
300-700	2	0,5	0,5	2,5
150-300	2	0,2	0,5	2,5
75-150	2	0,4	0,1	2,5
35-75	2	0,3	0,1	2,5
17-35	2	0,2	0,1	2,7
<17	2	0,2 (*)	0,1	2,8

(\*) Se decidió ocupar 0,2 ml porque se demostró que al incrementar más el ácido, este no influye este en la titulación.

F) Después, de cada incremento de HCL añadido esperar, aproximadamente, 15 minutos y luego registrar el pH.

G) Finalmente, se convierte el HCL agregado a su equivalente de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> añadido, para lo que se emplea la Ecuación 3.4.

$$H_2SO_4 \left( \frac{Kg}{t} \right) = \frac{49 * HCL * M}{P}$$

**Ecuación 3.4: Cálculo del ABCC.**

Donde:

- HCL: Cantidad de volumen de ácido clorhídrico añadido (ml)
- M: Concentración molar del ácido clorhídrico añadido (M)
- P: Peso de la muestra (gr)

H) Finalmente, se gráfica el pH versus el ácido añadido (Kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t).

En la Figura 3.11, se puede apreciar el protocolo en imágenes.

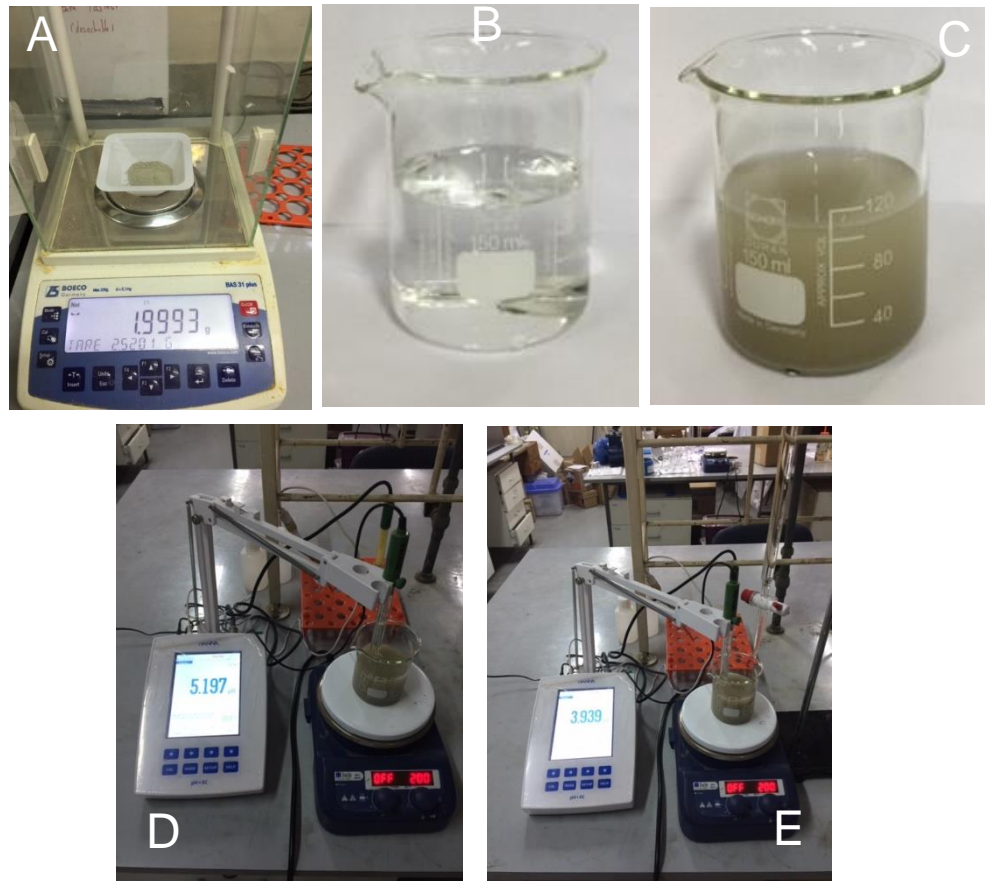


Figura 3.11: Protocolo del ABCC.

### 3.3. Fases de la metodología experimental

Las fases de la metodología experimental corresponden a la etapa de pruebas iniciales y la etapa de pruebas finales que se implementaron en el estudio. En este capítulo se detalla dónde, cuándo y en qué muestra se utilizaron los protocolos antes descritos. La primera etapa de la metodología corresponde a una etapa de prueba y optimización de los tests estándares NAG y ABCC. La segunda etapa, corresponde a aplicar el NAG y ABCC óptimo, seleccionado previamente, a las muestras restantes.

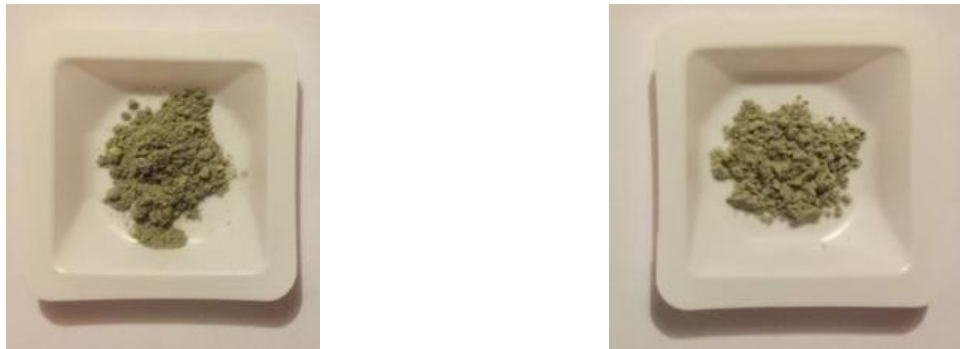
#### 3.3.1. Etapa de pruebas iniciales

Esta etapa consiste en realizar diferentes tests NAG con la misma muestra. Esto busca generar un NAG lo más económico y rápido, estudiar la sensibilidad del test y adquirir experiencia porque el protocolo del NAG no era claro. La muestra corresponde a los relaves de Cauquenes de la división de El Teniente. Del total de la muestra de Cauquenes se extrae la cantidad que se aprecia en la Tabla 3.3, a través del método de roleo y cuarteo.

**Tabla 3.3: Peso bajo y sobre tamaño de la muestra de Cauquenes.**

Muestra teniendo	[gr]
<b>Peso muestra a tamizar a 63 <math>\mu\text{m}</math></b>	81,46
<b>Peso sobre tamaño</b>	50,31
<b>Peso bajo tamaño</b>	31,05

En la Figura 3.12 se puede apreciar la muestra, antes y después de tamizarse y muestrearse.



**Figura 3.12: Antes y después de tamizarse y muestrearse la muestra de Cauquenes.**

Luego, se procede a realizar los test NAG de acuerdo al protocolo y variaciones de este. La Tabla 3.4 resume las variaciones de los tests que se realizarán.

**Tabla 3.4: Variaciones de la prueba convencional del NAG.**

NAG	Prueba
<b>Estándar</b>	1
<b>1 gr de muestra</b>	2
<b>Peróxido al 7,5%</b>	3
<b>Temperatura a 80° C</b>	4
<b>Efervescer toda la noche</b>	5
<b>Cinético</b>	6
<b>Temperatura a 180 °C</b>	7

También se realiza el NAG secuencial con la prueba 1. En la Tabla 3.5, se presenta el NAG secuencial y el número asignado de la prueba.

**Tabla 3.5: NAG secuenciales realizados.**

NAG	Prueba
<b>Estándar o Secuencial 1</b>	1
<b>Secuencial 2</b>	8
<b>Secuencial 3</b>	9

En la Tabla 3.5, el secuencial 2 corresponde al siguiente NAG, que se realiza con la muestra inicial (prueba 1). De manera similar el secuencial 3 es el NAG que se realiza

con la muestra remanente del secuencial 2. Para lo anterior se utiliza el protocolo del NAG secuencial. Finalmente, se realizan pruebas ABCC, la Tabla 3.6, resume las pruebas que se efectuaron. La finalidad de esta variación es la misma que la del NAG.

**Tabla 3.6: Variación de la prueba ABCC convencional.**

ABCC	Prueba
Estándar	10
Mitad tiempo espera	11
50% más ácido	12

### 3.3.2. Etapa de pruebas finales

Se decidió realizar el NAG estándar para todas las muestras restantes. Para todas se procede de la siguiente manera: en primer lugar, se hace un roleo y cuarteo de las muestras, para obtener una muestra representativa. Finalmente, se hace un tamizaje de las muestras lo que permite separar el sobre tamaño (material sobre la malla) del bajo tamaño (material bajo la malla). Los resultados son presentados en la Tabla 3.7 y en la Figura 3.13.

**Tabla 3.7: Peso bajo y sobre tamaño de las muestras.**

<b>Muestra AEL-33</b>	<b>[gr]</b>
Peso muestra a tamizar a 63 $\mu\text{m}$	37,16
Peso sobre tamaño	7,66
Peso bajo tamaño	29,40
<b>Muestra ACL-49</b>	<b>[gr]</b>
Peso muestra a tamizar a 63 $\mu\text{m}$	12,44
Peso sobre tamaño	5,98
Peso bajo tamaño	6,05
<b>Muestra Cola 25 las cruces</b>	<b>[gr]</b>
Peso muestra a tamizar a 63 $\mu\text{m}$	15,54
Peso sobre tamaño	5,68
Peso bajo tamaño	9,33
<b>Muestra CM</b>	<b>[gr]</b>
Peso muestra a tamizar a 63 $\mu\text{m}$	11,66
Peso sobre tamaño	5,54
Peso bajo tamaño	6,06
<b>Muestra Palabora</b>	<b>[gr]</b>
Peso muestra a tamizar a 63 $\mu\text{m}$	20,63
Peso sobre tamaño	15,53
Peso bajo tamaño	4,61



<b>Muestra Foskor</b>	[gr]
<b>Peso muestra a tamizar a 63 <math>\mu\text{m}</math></b>	60,24
<b>Peso sobre tamaño</b>	55,60
<b>Peso bajo tamaño</b>	4,63
<b>Muestra Relave 1</b>	[gr]
<b>Peso muestra a tamizar a 63 <math>\mu\text{m}</math></b>	19,43
<b>Peso sobre tamaño</b>	9,90
<b>Peso bajo tamaño</b>	8,91



Antes y después de muestrear la muestra de AEL-33.



Antes y después de muestrear la muestra de ACL-49.



Antes y después de muestrear la muestra de Cola 25.



Antes y después de muestrear la muestra de CM.



Antes y después de muestrear la muestra de Palabora.



Antes y después de muestrear la muestra de Foskor.



Antes y después de muestrear la muestra de Relave 1.

**Figura 3.13: Antes y después de muestrear las muestras.**

Esta metodología experimental permite adaptar los métodos existentes en el estudio del comportamiento geoquímico de materiales. Esto, para luego poder analizar y caracterizar con estos métodos los residuos mineros.

## 4. Resultados

### 4.1. XRF e ICP-MS

A continuación, se presentan los datos del análisis por ICP-MS obtenidos de manera externa en el laboratorio AcmeLabs a través de la mediación de Bureau Veritas Chile como se aprecia en la Tabla 4.1. En la Tabla 4.1, están las concentraciones de elementos importantes (en % en peso) como el S y el Fe que participan en la formación de drenaje ácido. También están las concentraciones de elementos muy peligrosos como son el As y el Sb. Por el otro lado, se encuentra el Cu como elemento de interés, este último en muy bajas cantidades.

Tabla 4.1: Datos de algunos elementos obtenidos por ICP-MS en % en peso.

Muestra	As	Cu	Fe	Pb	S	Sb
T-PAL	$4,3 \cdot 10^{-4}$	0,09	13,16	$2,87 \cdot 10^{-3}$	0,08	$4,5 \cdot 10^{-5}$
T-FOS	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,02	4,66	$5,7 \cdot 10^{-4}$	<0,04	$<2 \cdot 10^{-6}$
T-RELAVE1	0,24	0,24	38,69	0,26	>10	0,02
T-COLA25	0,27	0,46	33,60	0,77	>10	0,03
T-CM	0,12	0,29	25,86	0,31	>10	0,03
T-ACL49	>1	0,39	38,49	>1	2,02	0,05
T-AEL33	0,70	0,95	40,68	0,84	>10	0,05
Cauquenes	$7,0 \cdot 10^{-3}$	0,20	2,94	$8,37 \cdot 10^{-3}$	0,82	$6,9 \cdot 10^{-5}$

Por el otro lado, se tiene los datos del XRF, que fueron conseguidos por el equipo Niton XL3t Thermo Scientific™ del departamento de ciencias experimentales de la UHU (Universidad de Huelva). Estos fueron obtenidos por la geóloga Martínez [37], excepto la muestra de Teniente que fue obtenida por la empresa Fugro.

Tabla 4.2: Datos de algunos elementos obtenidos por XRF en % en peso.

Muestra	As	Cu	Fe	Pb	S	Sb
Tailing PAL	-	0,08	14,62	$1,52 \cdot 10^{-3}$	-	-
Tailing FOS	-	0,02	4,72	$4,15 \cdot 10^{-4}$	-	-
Relave 1	0,20	0,23	64,10	0,28	12,18	0,01
Cola 25	0,30	0,52	47,17	0,81	10,76	0,02
Tailing CM	0,12	0,34	36,97	0,84	8,56	0,03
ACL-49	1,35	0,35	108,79	1,12	1,69	0,03
AEL-33	0,62	0,97	71,27	0,82	12,02	0,04
Cauquenes	$3,79 \cdot 10^{-3}$	0,23	4,28	-	0,59	-

Del estado del arte se apreció que el S era uno de los principales ocasionante del DAM de la muestra. Este dato es utilizado para calcular el PA de las muestras que permitirá luego calcular el potencial ácido neto de la muestra. Luego, en base a estos resultados se puede predecir que todas las muestras excepto Palabora y Foskor poseen alto potencial de ser generadoras de ácido. En especial Relave 1, Cola 25 y AEL-33, que como se observa en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 poseen un % en peso de S mayor a 10%. Un dato importante a destacar de la Tabla 4.2, es el valor del porcentaje en peso del Fe, de la muestra ACL-49, el que posee un valor mayor al 100%, lo que es un error del laboratorio. Posiblemente, por una inexacta preparación o por una medición incorrecta de la muestra.

## 4.2. Difracción de rayos X

A continuación, se presentan los resultados de la DRX, que se pueden observar en la Tabla 4.3 y Tabla 4.4. Estos datos pueden ser útiles para la predicción del potencial de generación de ácido de una muestra o su potencial de neutralizar. De igual manera son obtenidos por geóloga Martínez [37], en la UHU. Excepto, la muestra de Cauquenes que fue obtenida en el departamento de física de la universidad de Chile.

Tabla 4.3: Resultados 1 de DRX de las muestras.

Muestra\Compuesto	Pirita	Cuarzo	Hematita	Magnetita	Calcita	Dolomita	Biotita
Cola 25	81	19	-	-	-	-	-
Relave 1	88	12	-	-	-	-	-
AEL-33	74	25	-	-	-	1	-
ACL-49	-	18	82	-	-	-	-
Tailling CM	63	37	-	-	-	-	-
Tailling PAL	-	-	-	2	41	26,2	-
Tailling FOS	-	13,8	-	-	-	-	-
Cauquenes	-	77,3	-	5,1	-	-	17,5

La Tabla 4.3 presenta los principales minerales causantes de la generación de drenaje ácido de mina, como la pirita. Además, minerales como la dolomita y calcita con propiedades neutralizadoras. La Tabla 4.4 presenta otro mineral que posee propiedades de tamponamiento como el apatito, y el relave de Foskor es el único que lo posee. Además, de los silicatos como la augita, el diópsido, la flogopita, la hedenbergita y la periclasa. De estos silicatos los del grupo del piroxeno (augita, diópsido y hedenbergita) son insolubles en ácido, por lo tanto, no actúan como sustancia tampón.

Tabla 4.4: Resultados 2 de DRX de las muestras.

Muestra\Compuesto	Augita	Diópsido	Flogopita	Hedenbergita	Apatito	Periclasa
Cola 25	-	-	-	-	-	-
Relave 1	-	-	-	-	-	-
AEL-33	-	-	-	-	-	-
ACL-49	-	-	-	-	-	-
Tailing CM	-	-	-	-	-	-
Tailing PAL	27	-	3,8	-	-	-
Tailing FOS	-	48	16,2	21	1	-
Cauquenes	-	-	-	-	-	0,1

En base a estos resultados y a la literatura se puede predecir que AEL-33 y en especial Palabora, puede ser muestra neutralizadora por los altos contenidos de dolomita y calcita como se aprecia en la Tabla 4.4. En el otro extremo, Cola 25, Relave 1, AEL-33 y Tailing CM pueden ser potenciales generadoras de ácido por la presencia de pirita como se observa en la Tabla 4.4. De ACL-49 no se puede predecir su comportamiento. Cauquenes y Foskor poseen filosilicatos (biotita y flogopita) que actúan como sustancias buffer al liberar OH<sup>-</sup> y K<sup>+</sup> al medio y consumir protones, por lo tanto, pueden poseer propiedades de tampón.

### 4.3. Resultados ABA

Como se comentó en la literatura, el test ABA se divide en dos partes: el cálculo del PN y PA. El PA se calcula de manera externa mediante la determinación del %S a través de dos maneras, con el ICP-MS y con el XRF. Después, se calcula el PA con la Ecuación 2.2. Los datos del PN fueron realizados por la geóloga Martínez [37], los resultados están en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Resultados PN.

Muestra	PN [CaCO <sub>3</sub> /t]
ACL-49	48,5
AEL-33	8,64
Tailing CM	4,92
Tailing PAL	294,7
Tailing FOS	40,08
Cola 25	0
Relave 1	7,48
Tailing CAU	43,43

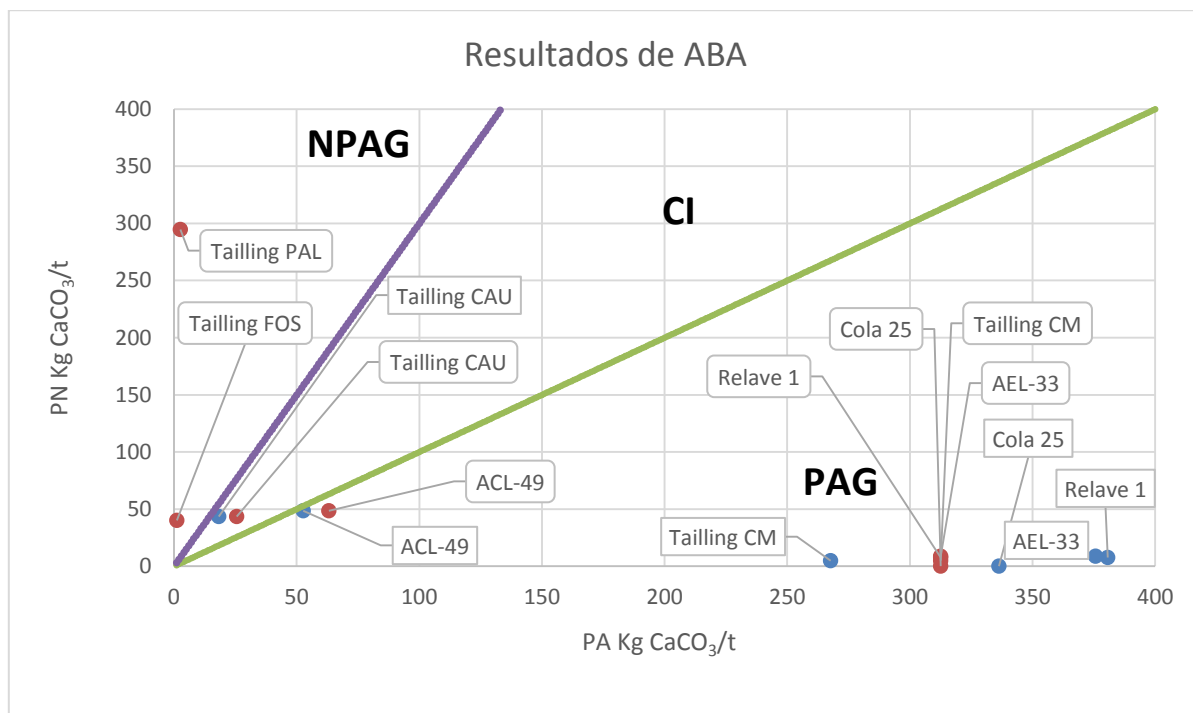
En la Tabla 4.5, se aprecia como lo predijo la DRX que Palabora y Foskor tienen alto poder de neutralización. Luego, con los resultados del PA se calcula el PNN con la Ecuación 2.1, en Kg CaCO<sub>3</sub>/t. Estos resultados son presentados en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6 Resultados finales del ABA en Kg CaCO<sub>3</sub>/t.**

Muestra	PA (XRF)	PNN	Resultado	PA (ICP)	PNN	Resultado
ACL-49	52,75	-4,25	PAG	63,09	-14,59	PAG
AEL-33	375,69	-367,05	PAG	312,5	-303,86	PAG
Tailling CM	267,63	-262,71	PAG	312,5	-307,58	PAG
Tailling PAL	n.d(*)	n.d	n.d	2,57	292,13	NPAG
Tailling FOS	n.d	n.d	n.d	1,25	38,83	NPAG
Cola 25	336,28	-336,28	PAG	312,5	-312,50	PAG
Relave 1	380,7	-373,22	PAG	312,5	-305,02	PAG
Tailling CAU	18,32	25,11	CI	25,63	17,80	CI

(\*) n.d = no determinado.

Finalmente, se presentan los resultados en un gráfico, donde se puede atisbar, como se comentó en los antecedentes, que muestras con PN/PA < 1 son catalogadas como potenciales generadoras de ácido (PAG) y muestras con PN/PA > 3 son catalogadas como muestras no potenciales generadoras de ácido (NPAG). Las demás caen en una condición de incertidumbre (CI) como Cauquenes. Todo esto se aprecia en el Gráfico 4.1, los resultados en rojo corresponden al azufre elemental medido con XRF y en azul con ICP.



**Gráfico 4.1: Resultados ABA.**



## 4.4. Etapa de pruebas iniciales

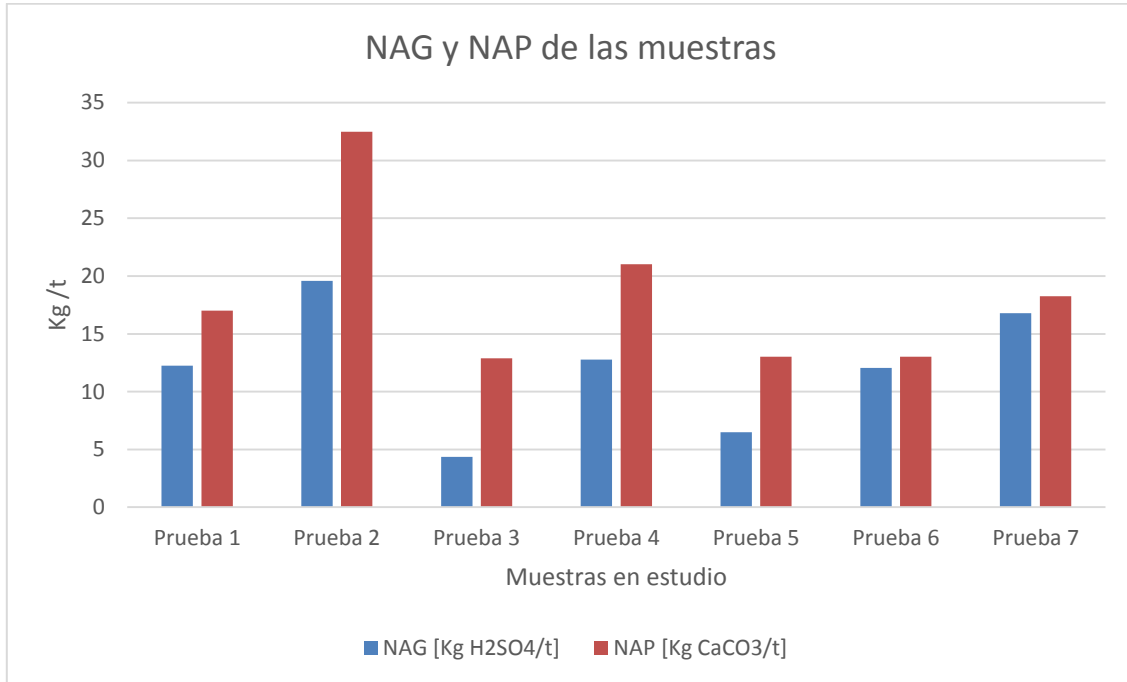
### 4.4.1. NAG Cauquenes

En la Tabla 4.7, se pueden apreciar los datos de entrada como el número de prueba, el peso de la muestra y la temperatura del test. Además, están los resultados obtenidos de la etapa de pruebas iniciales. Los detalles de los tests son presentados en el anexo 8.1.1.1 (NAG Cauquenes). En la Tabla 4.7, se aprecia que independiente de la variación del test original, el resultado es siempre que la muestra de Cauquenes es potencial generadora de ácido (PAG).

Tabla 4.7: Resultados NAG de las muestras de estudio.

Prueba							
NAG	1	2	3	4	5	6	7
Peso [gr]	2,50	1,0	2,52	2,50	2,49	2,52	2,50
Temperatura [°C]	40-50	45	45	80	50	50	180
Resultados							
pH	2,71	2,82	3,39	2,96	3,17	2,83	3,04
NaOH a pH 4,5 [ml]	6,25	4	2,25	6,5	3,3	6,2	6
NaOH a pH 7,0 [ml]	2,25	2,5	4,25	4	3,2	3	2,4
Cálculos NAG [Kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t]	12,25	19,58	4,37	13,76	6,48	12,06	11,76
Cálculos NAP [Kg CaCO <sub>3</sub> /t]	17	32,47	12,88	21,03	13,03	18,25	16,8
Resultado	PAG	PAG	PAG	PAG	PAG	PAG	PAG

En el Gráfico 4.2, se resumen los resultados del NAG y el NAP de las pruebas anteriores. Es importante recordar que el NAG se calcula al titular hasta 4,5 y el NAP al titular hasta 7,0.



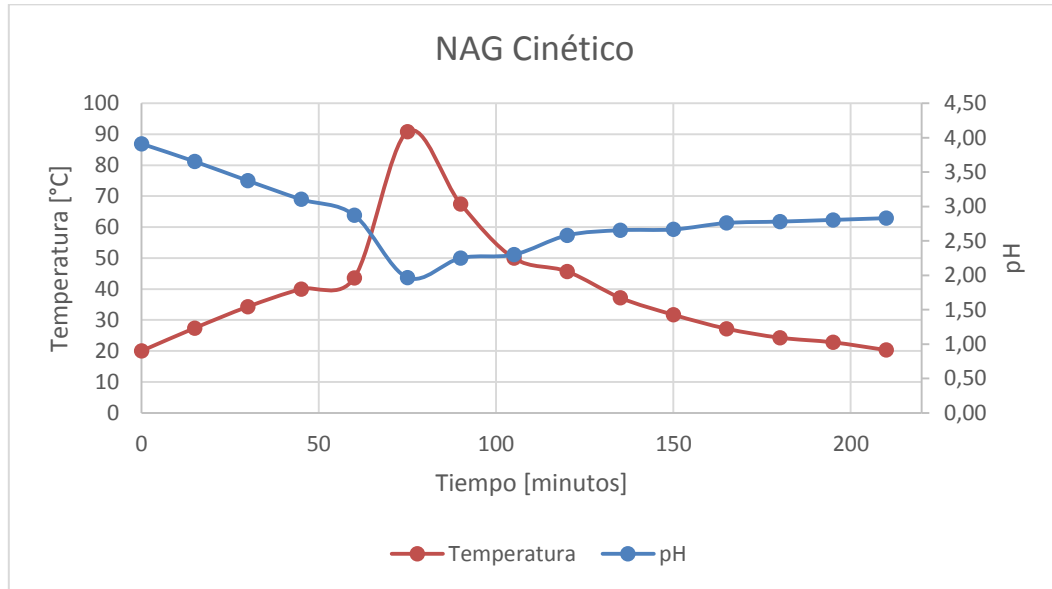
**Gráfico 4.2: NAG y NAP de las pruebas iniciales.**

Del NAG cinético se pudo extraer los siguientes resultados que son: el pH y la temperatura en función del tiempo (tomado cada 15 minutos), como se observa en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.8: Resultados del NAG cinético de Cauquenes.**

Tiempo (minutos)	pH	Temperatura (°C)
0	3,91	20
15	3,65	27,4
30	3,37	34,3
45	3,10	40
60	2,88	43,6
75	1,97	90,8
90	2,25	67,5
105	2,3	50
120	2,58	45,7
135	2,66	37,2
150	2,67	31,7
165	2,76	27,2
180	2,78	24,3
195	2,81	22,8
210	2,83	20,3

También, en el Gráfico 4.3, se observa las variaciones del pH y temperatura en función del tiempo. Esto es importante porque permite predecir la cinética de la reacción de la muestra, es decir, que tan rápido se generará el drenaje ácido.



**Gráfico 4.3: NAG cinético de la muestra de Cauquenes.**

Los resultados de los tests secuenciales son resumidos en la Tabla 4.9. El detalle de estas pruebas es presentado en el anexo 8.1.1.1 ( NAG Cauquenes).

**Tabla 4.9: Resultados del NAG secuencial de Cauquenes.**

Prueba			
<b>NAG</b>	1	8	9
<b>Peso [gr]</b>	2,5	2,35	2,10
<b>Temperatura [°C]</b>	40-50	50	50-175
<b>Resultados</b>			
<b>pH</b>	2,71	3,43	4,71
<b>NaOH a pH 4,5 [ml]</b>	6,25	2,5	0
<b>NaOH a pH 7,0 [ml]</b>	2,25	3,75	1,8
<b>Cálculos NAG [Kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t]</b>	12,25	5,22	0
<b>Cálculos NAP [Kg CaCO<sub>3</sub>/t]</b>	17	13,31	4,28
<b>Resultado</b>	PAG	PAG	NPAG

Finalmente, se decide realizar la prueba NAG estándar con una temperatura de 50°C y no mayor para permitir que la muestra alcance el hervor lentamente. También porque siempre conviene trabajar a menor temperatura por temas económicos y para no evaporar solución innecesariamente como la prueba 7. Además, se decide ocupar una solución al 15% de peróxido para evitar un gasto mayor de este reactivo. Por el otro lado,

el NAG cinético no es realizado en las otras pruebas por la escasez de estudios que existen de este y porque la alta temperatura daña más rápido el electrodo del pH metro.

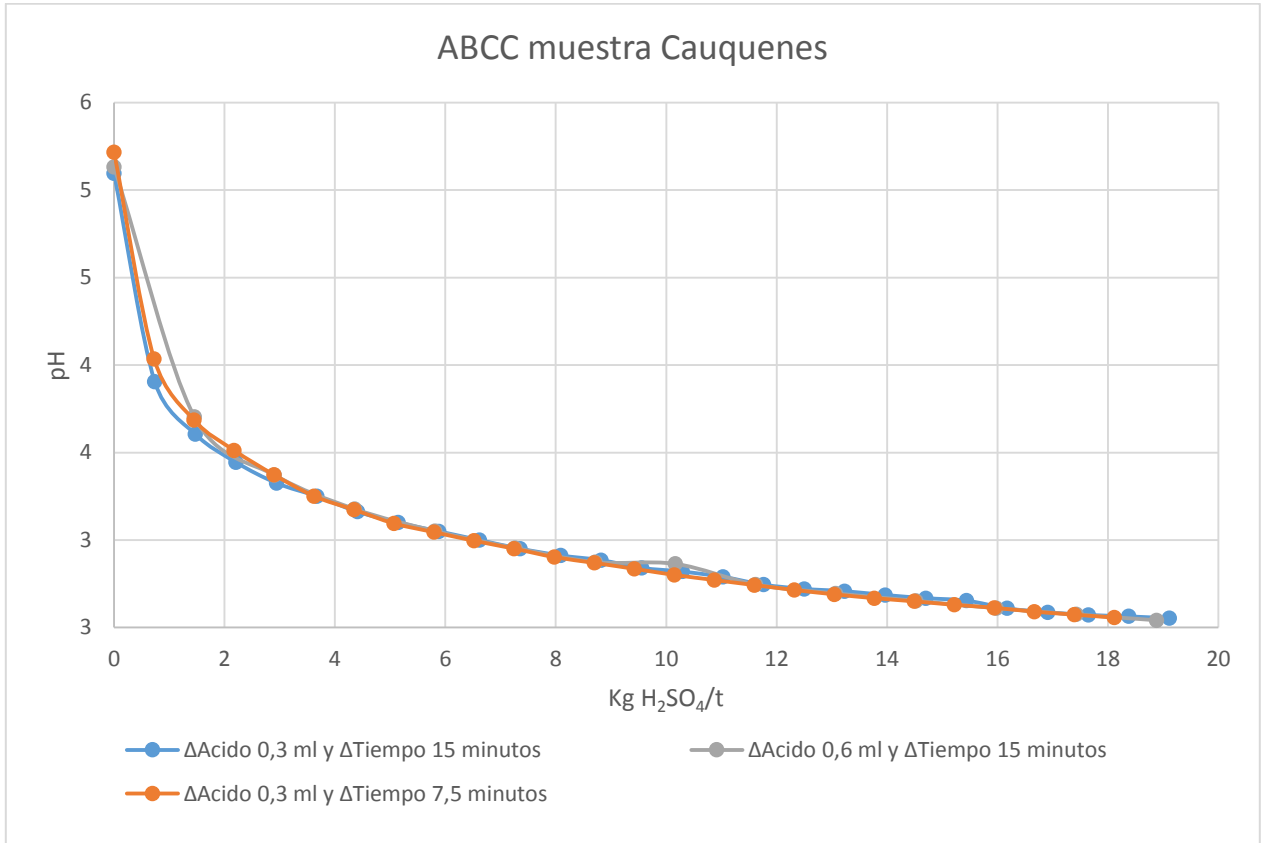
#### 4.4.2. ABBC Cauquenes

Por último, se presentan los resultados del ABCC de Cauquenes y de las variaciones de este en la Tabla 4.10 y Gráfico 4.4. Además, está el pH<sub>o</sub> (pH inicial) con el que empezó la titulación y el pH final al cual termina esta.

**Tabla 4.10: Resultados ABCC de Cauquenes.**

<b>Prueba</b>			
<b>ABCC</b>	10	11	12
<b>Peso [gr]</b>	2,00	2,02	2,03
<b>ANC [CaCO<sub>3</sub>/t]</b>	42,56	42,56	42,56
<b>Resultados</b>			
<b>pH<sub>o</sub></b>	5,10	5,13	5,22
<b>pH final</b>	2,55	2,54	2,60
<b>HCL a pH final [ml]</b>	7,8	7,8	7,5
<b>Cálculos ABCC [Kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t]</b>	19,12	18,88	18,12
<b>Resultado</b>	Muy bajo ANC	Muy bajo ANC	Muy bajo ANC

En la Tabla 4.10 también se puede observar que todas las pruebas de Cauquenes son potenciales generadoras de ácido con muy baja capacidad neta de neutralización (ANC).



**Gráfico 4.4: ABCC de Cauquenes.**

Como se puede apreciar en el Gráfico 4.4, la muestra con menor tiempo de espera presenta una caída mayor de la curva por la adición de ácido clorhídrico, lo cual es lógico, ya que no se alcanza el equilibrio esperado de la prueba (el que ocurre a los 10 minutos). Por otro lado, la prueba con más ácido presenta una curva muy similar a la prueba original, excepto que existe pérdida de información.

De esto se concluye que el tiempo de espera es el que más afecta los resultados y no tanto la cantidad de ácido añadido. Pero en general se puede apreciar que las curvas son similares, ya que tienen el mismo comportamiento, caídas y presentan una meseta similar entre 3,0 y 2,5 de pH. La figura de esta prueba se presenta en el anexo 8.1.1.2 (ABCC Cauquenes).

Finalmente, se decide realizar el ABCC normal para todas las pruebas. Lo anterior porque ocupar un menor tiempo de espera subestima los resultados; y usar más ácido no influye de manera significativa en los resultados, pero se pierde información.

## 4.5. Etapa de pruebas finales

### 4.5.1. NAG

Al tomar en consideración los resultados analizados de la etapa inicial, en la Tabla 4.11 se pueden apreciar los resultados obtenidos de la etapa de pruebas finales para las diferentes muestras. Los detalles de las pruebas son presentados en el anexo 8.1.2.1 (NAG).

Tabla 4.11: Resultados de las Muestras sometidas al NAG.

Prueba							
NAG	ACL-49	AEL-33	CM	Palabora	Foskor	Cola 25	Relave 1
Peso [gr]	2,51	2,50	2,48	2,50	2,53	2,50	2,49
Temperatura [°C]	50	50	50	50	50	50	50
Resultados							
pH	3,5	2,40	2,13	7,62	7,02	2,03	1,71
NaOH a pH 4,5 [ml]	1,1	34	91	0	0	111	35,7
NaOH a pH 7,0 [ml]	1,4	18	9	0	0	24	4,7
Cálculos NAG [Kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t]	2,15	66,55	180,10	0	0	217,23	351,97
Cálculos NAP [Kg CaCO <sub>3</sub> /t]	4,98	96,28	201,95	0	0	269,59	406,44
Resultado	PAG	PAG	PAG	NPAG	NPAG	PAG	PAG

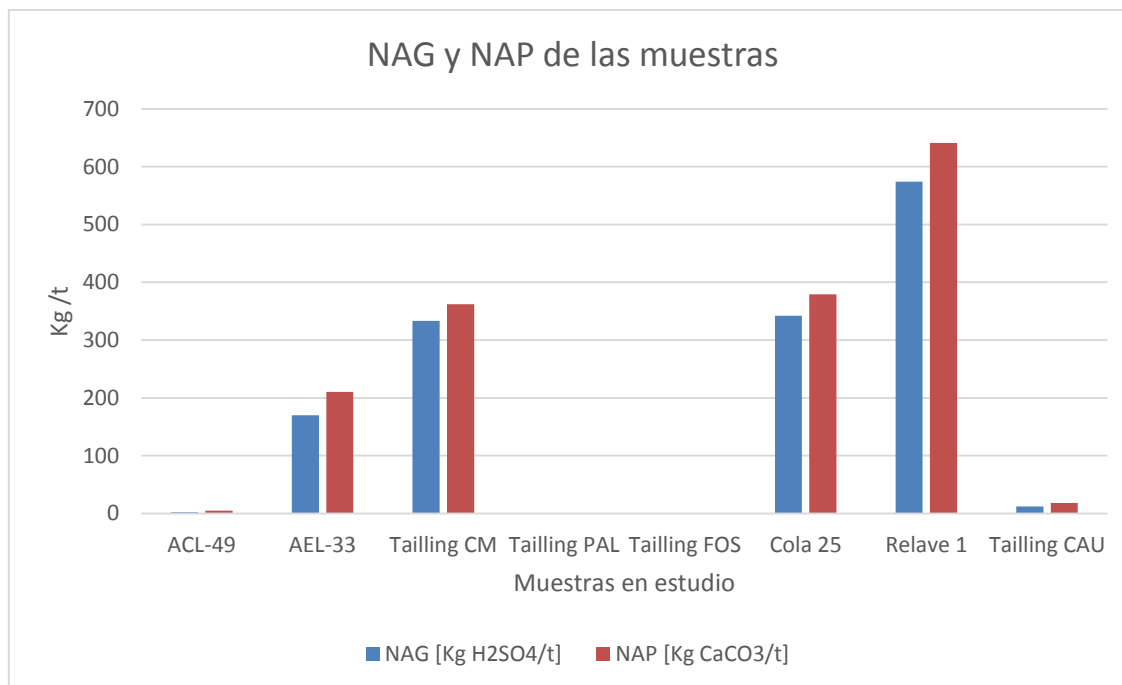
Como se puede observar en la Tabla 4.11, la cantidad de ácido producido de las muestras AEL-33, *tailing* CM, Cola 25 y Relave 1 excede los 25 kg de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t. Debido a lo anterior y según el protocolo se procede a realizar el test NAG, pero con una cantidad menor de muestra. Los datos de entrada y salida son los presentados en la Tabla 4.12. Los detalles de las pruebas son presentados en el anexo 8.1.2.1 (NAG).

Tabla 4.12: Resultados NAG de las pruebas con menos muestra.

Pruebas				
NAG	AEL-33	CM	Cola 25	Relave 1
Peso [gr]	1,02	1,00	1,04	1,00
Temperatura [°C]	50	50	50	50
Resultados				
pH	2,25	2,11	2,14	1,93
NaOH a pH 4,5 [ml]	35,5	67,8	72,5	23,5
NaOH a pH 7,0 [ml]	7,5	4,3	6,25	2,2
Cálculos NAG [Kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t]	170,17	333,42	341,92	574,26
Cálculos NAP [Kg CaCO <sub>3</sub> /t]	210,33	361,8	378,97	640,83
Resultado	PAG	PAG	PAG	PAG



Como se puede apreciar en la Tabla 4.12, los resultados de los pH son parecidos a los obtenidos de las mismas pruebas con 2,5 gr de muestra. También como se obtuvo en la etapa de prueba iniciales, los cálculos del NAG y NAP se observan aumentados al usar menos muestras. Después, los resultados del NAG y NAP de las pruebas se resumen en Gráfico 4.5.



**Gráfico 4.5: NAG y NAP de las pruebas finales.**

De los resultados anteriores se concluye que solo Palabora y Foskor son clasificadas como NPAG y todas las demás incluso Cauquenes son catalogadas como PAG. De estos resultados se aprecia que el NAG puede determinar mejor el potencial de generación ácido de una muestra que el ABA. Determinación que a la vez es más rápida y económica que con el ABA, lo que es el objetivo de esta investigación.

Finalmente, se puede resumir que al disminuir la cantidad de muestra en la prueba solo se aumenta el potencial ácido de esta. Explicado de otra manera, se presenta la cantidad de ácido que no es capaz de generar todo el peróxido con una muestra de mayor cantidad. El comportamiento de la temperatura es el mismo, se presentan los mismos máximos o similares. El comportamiento al mezclar la muestra con el peróxido también es similar. La única variación es la cantidad de NaOH que se debe añadir para titular, la cual da otro NAG y NAP. Finalmente, el tono verdoso de las muestras se debe principalmente a la presencia de ácido sulfúrico con la presencia de hierro.

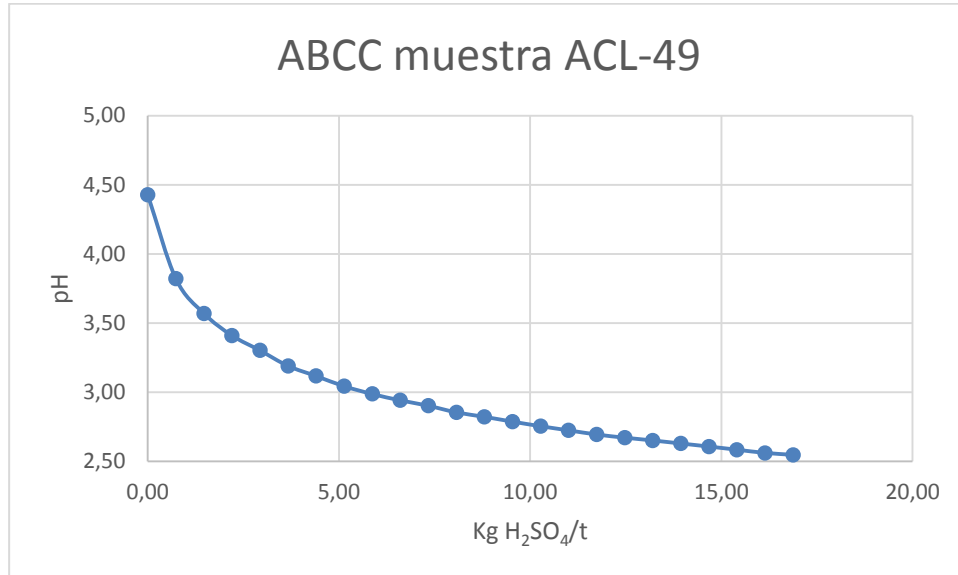
#### 4.5.2. ABCC

A continuación, se presentan en la Tabla 4.13, los resultados de las pruebas ABCC. Se puede apreciar que las únicas pruebas que presentan un cierto comportamiento de tamponamiento buffer de carácter básico-neutro son las de Palabora y Foskor. En el otro extremo se observa que las muestras de CM, Relave 1, presentan un comportamiento muy ácido. En particular, la sola acción de mezclar el agua desionizada con la muestra hace que el pH caiga bajo el límite inferior de titulación. Por lo que no existe una titulación lenta para estas muestras. Por último, la muestra de Cola 25 pese a presentar un ANC de 0 Kg CaCO<sub>3</sub>/t, su pH es más alto que Relave 1 y tailing CM, pero tampoco se titula.

Tabla 4.13: Resultados de las Muestras sometidas al ABCC.

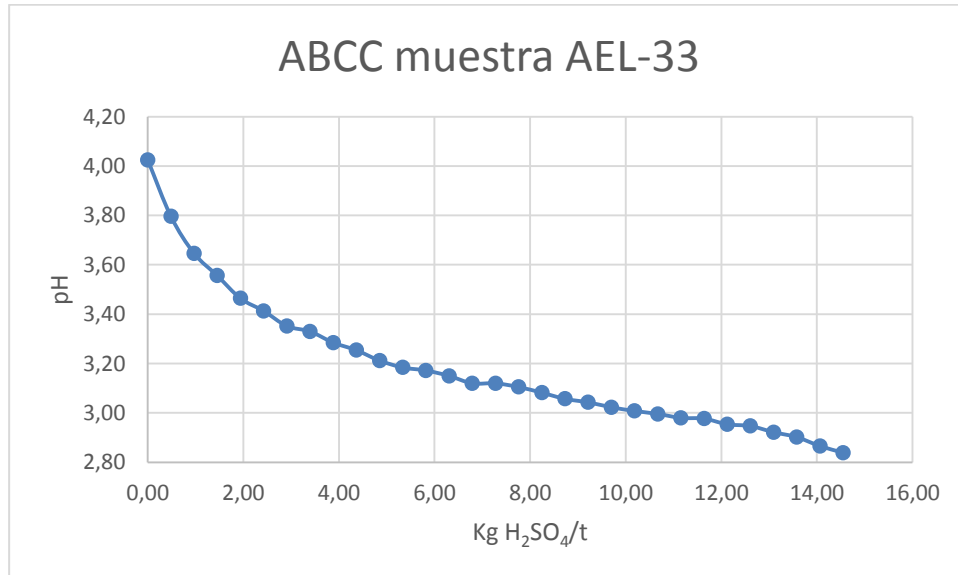
Prueba							
ABCC	ACL-49	AEL-33	CM	Palabora	Foskor	Cola 25	Relave 1
Peso [gr]	2,00	2,02	2,04	2,01	2,02	2,02	2,04
ANC [CaCO <sub>3</sub> /t]	47,53	8,47	4,92	294,7	39,28	0	7,48
Resultados							
pH <sub>o</sub>	4,43	4,03	2,51	9,78	10,93	2,76	2,31
pH final	2,57	2,84	2,51	2,53	2,58	2,76	2,31
HCL a pH final [ml]	6,9	6	0	34,6	29,4	0	0
Cálculos ABCC [Kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t]	16,87	14,55	0	421,7	71,19	0	0
Resultado	Muy bajo ANC	Muy bajo ANC	Nulo ANC	Medio ANC	Bajo ANC	Nulo ANC	Nulo ANC

La muestra ACL-49 como indica la Tabla 4.13 marca un pH<sub>o</sub> de 4,43 (ácido), por lo que esta muestra no presenta un tamponamiento básico pese a ser una de las muestra con el mayor ANC según el ABA. Además, como lo indica el Gráfico 4.6, esta muestra presenta un tamponamiento ácido entre un pH de 3,5-2,5, que es el rango donde se estabiliza el pH.



**Gráfico 4.6: Gráfico ABCC de ACL-49.**

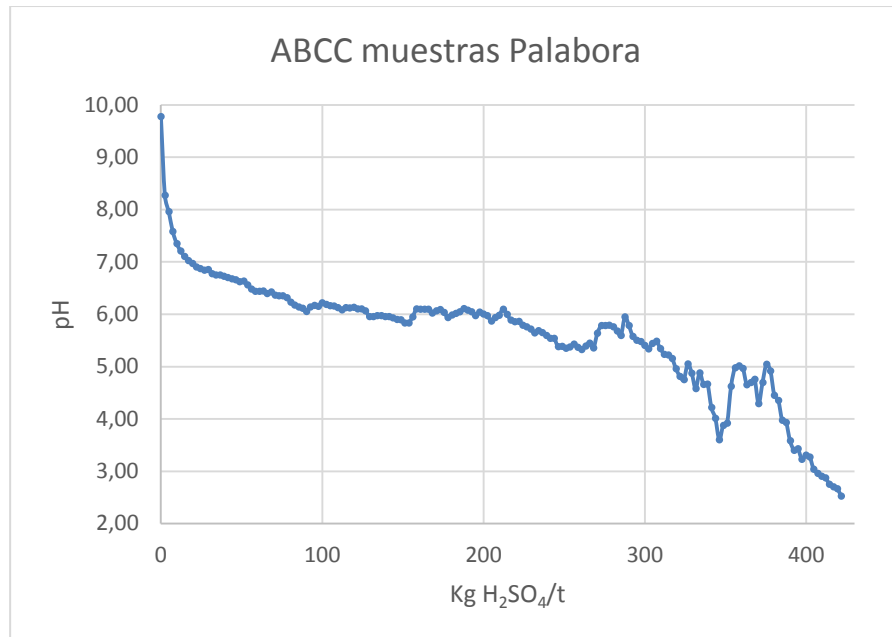
La muestra AEL-33 al igual que la anterior presente un pH<sub>0</sub> ácido de 4,03. Además, presenta un rápido descenso del pH hasta 3,5 por la adición de ácido clorhídrico. Luego, se observa una especie de tamponamiento buffer de carácter ácido hasta un pH 2,5, como lo indica el Gráfico 4.7.



**Gráfico 4.7: Gráfico ABCC de AEL-33.**

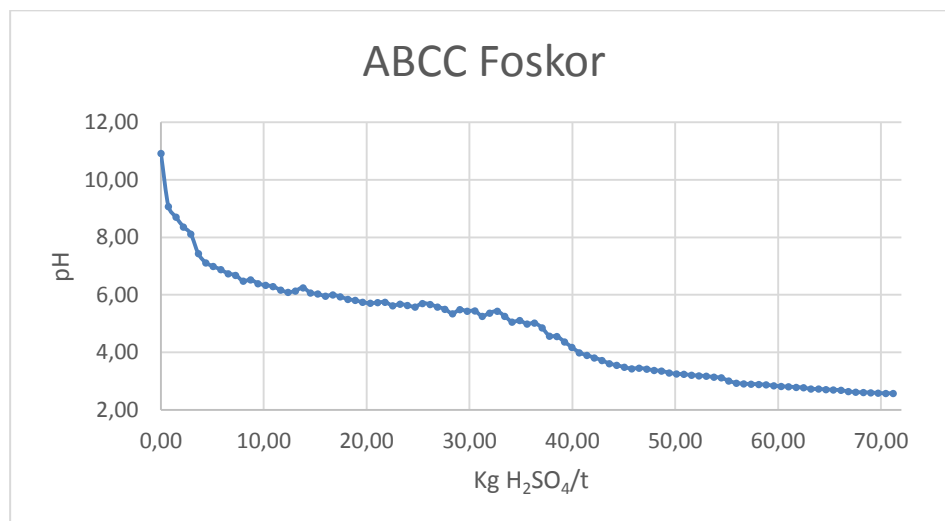
Palabra junto con la de Foskor son las únicas que presentan un pH<sub>0</sub> arriba de 7 como se observa en la Tabla 4.13. Además, esta muestra como se observa en el Gráfico 4.8 presenta un comportamiento de tamponamiento tipo neutro, de rango de pH 6,0. Cabe destacar que esta muestra es la única que fue titulada con una concentración de ácido clorhídrico 0,5 M. Se observa en el Gráfico 4.8, que la muestra posee una capacidad de

neutralización hasta 300 Kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t del tipo neutra, luego de eso, la muestra se acidifica rápidamente. Sin embargo, se concluye que el efecto del ANC de esta muestra es medio.



**Gráfico 4.8: Gráfico ABCC de Palabora.**

Foskor como se mencionó, junto con Palabora son las únicas que exhiben un pH<sub>0</sub> mayor a 7,0. En el Gráfico 4.9, se puede observar el comportamiento de tamponamiento de Foskor. El cual presenta una gran meseta en el pH 6,0-5,0 del tipo neutro-ácido. El efecto del ANC de esta muestra es bajo. Las figuras de las pruebas son presentadas en el anexo 8.1.2.2 (ABCC).



**Gráfico 4.9: Gráfico ABCC de Foskor**

De los resultados se concluye que el ABA sobreestima los valores del ANC en todas las muestras, excepto Palabora y Foskor. Además, el ABCC permite conocer el verdadero ANC y la manera como se consume el ácido en la muestra, fenómeno que no es posible observar con el ABA.

Finalmente, en el anexo 8.4 (Titulación del agua) es posible observar el comportamiento del agua desionizada al añadir el ácido en la cantidades y concentraciones de los tests ABCC realizados en esta investigación.

## 4.6. Costos y tiempos

El costo promedio asociado a la realización del test NAG es de \$3.311,10 pesos, en comparación al realizar el test en ALS que es de \$20.800 pesos. Además, el costo promedio de un ABCC es de \$1,73 pesos y en el laboratorio AGQ es de \$100.000 pesos. La Tabla 4.14 resume los resultados y los detalles están en el anexo 8.3 (Calculo de costos).

Tabla 4.14: Costo asociado a la realización de las pruebas

Prueba	Costo en pesos
<b>NAG</b>	3.311,1
<b>ABCC</b>	1,73

Por otro lado, en cuanto a los tiempos se nota claramente que el realizar un NAG en faena gasta 2 a 3 horas. Del mismo modo, el ABCC puede durar de minutos a un día. La Tabla 4.15 resume los resultados.

Tabla 4.15: Tiempo asociado a la realización de las pruebas.

Prueba	Tiempo
<b>NAG</b>	2 a 3 horas
<b>ABCC</b>	Minutos a un día

Estos resultados corroboran el hecho que realizar el NAG y el ABCC en faena es más económico y demanda menos tiempo.

## 5. Análisis de los resultados

### 5.1. XRF e ICP-MS

Como se observó de estos resultados Relave 1, Cola 25, Tailing CM, AEL-33, ACL-49 y Tailing Cauquenes, poseen grandes cantidades de S uno de los principales elementos del PAG. Los resultados de las pruebas posteriores confirmaron esta predicción, además, determinaron su calificación.

Por el otro lado, la Muestra de Palabora y Foskor, que no poseen cantidades significativas de S, son no potenciales generadoras de drenaje ácido como lo determinaron los test.

### 5.2. Difracción de rayos X

Las muestras de mayor a menor cantidad de pirita corresponden a las muestras de Relave 1, Cola 25, Tailing CM y AEL-33, que son también las muestras que presentan un mayor potencial de drenaje ácido. En particular, el Relave 1, que es la muestra con el menor pH NAG y presenta el  $pH_0$  más bajo en el ABCC, coincide con la que tiene más pirita. Inmediatamente, la Cola 25 y Tailing CM son las muestras que poseen menor pH NAG y nulo ANC como se observa en el ABCC. Estas coinciden con las que tienen gran cantidad de pirita, puesto que se puede concluir que la pirita es una de los principales ocasionante del drenaje ácido de mina, como lo establece la literatura.

Por el otro lado, pese que AEL-33 es otra de las muestras con grandes cantidades de pirita, su pH NAG no fue tan bajo como las otras 3 muestras y el ABCC exhibió cierto tamponamiento ácido. Esto se debe, principalmente, a la dolomita un mineral con altos contenidos de  $CO_3^{2-}$  (tampón asociado al bicarbonato). Este actúa en la neutralización de protones, es decir, aumenta el pH. Se puede apreciar en el Gráfico 4.8, que Palabora es la única muestra con tamponamiento neutro en el ABCC. Palabora posee grandes cantidades de dolomita, además, de grandes cantidades de Calcita otro compuesto con poder de tamponamiento.

La muestra ACL-49 posee grandes cantidades de hematita junto con pocas cantidades de cuarzo. El cuarzo es muy estable y poco soluble en agua a pH ácido. Luego, el mineral más influyente en la generación de drenaje ácido de mina es la hematita, que actúa y genera hidróxidos de hierro, lo que ocasiona la acidificación del medio como se informó en la literatura. De manera similar se puede apreciar que la muestra de Cauquenes posee grandes cantidades de magnetita, otro mineral con grandes cantidades de hierro. Por lo tanto, se puede concluir que el hierro es un importante detonador del drenaje ácido de mina. Esto debido a la formación de hidróxidos de hierro y acidificación del medio por la liberación protones en el proceso que se comentó en la literatura. Además, como se pudo



observar de los resultados el XRF y ICP-MS estas muestras poseen cantidades significativas de azufre que participa en la primera etapa de la generación de acidez.

Además, se tiene la muestra de Foskor donde el apatito actúa como un buffer del tipo fosfato, pero por su poca cantidad no es indicativo de la capacidad de tampón de la muestra. Lo que provoca el leve tamponamiento que se observa en el Gráfico 4.9, se debe a los silicatos, principalmente, la flogopita, la que debe actuar al liberar  $K^+$  y  $OH^-$  al medio.

En otro punto, el porcentaje de  $CO_3^{2-}$  en  $MeCO_3$  es del 60%, donde Me puede ser Ca, Mg, NA, etc. Luego, en la Reacción 2.4, se tiene que 1 mol de  $MeCO_3$  produce 1 mol de  $CO_3^{2-}$ . Después, se consideran los pesos moleculares, se dice que 1gr de  $CO_3^{2-}$  produce 1,667 gr de  $CaCO_3$ . Esto a la vez se puede expresar como que 1% de  $CO_3^{2-}$  produce 16,67 kg de  $CaCO_3$  por 100 Kg o su equivalente en tonelada. También se considera el hecho que 1 mol de  $CaCO_3$  neutraliza dos moles de  $H_2SO_4$ , luego se puede estimar el PN en base al carbonato como lo indica Ecuación 5.1.

$$PN = \frac{16,67 \text{ Kg} * CaCO_3 * \%CO_3^{2-}}{\text{Tonelada de material}}$$

**Ecuación 5.1: PN en base al carbonato.**

Posteriormente, se procede a calcular el % de carbonato de Palabora y AEL-33. Esto se logra al multiplicar el porcentaje de carbonato en la dolomita y en la calcita (60%) por la cantidad de estos minerales en las muestras del análisis del DRX. En la Tabla 5.1, se presentan los resultados.

**Tabla 5.1: % de carbonato de Palabora y AEL-33.**

Muestra	% de carbonato
Palabora	40,32
AEL-33	0,6

Después, se calcula el PN y el ANC con la Ecuación 5.1. El ANC se calcula al multiplicar el PN por 0,98, esto por los pesos equivalentes ( $H_2SO_4/CaCO_3$ ).

**Tabla 5.2: PN y ANC en base al porcentaje de carbonato.**

Muestra	PN [Kg $CaCO_3$ /t]	ANC [Kg $H_2SO_4$ /t]	PN (ABA)
Palabora	672	658,56	294,7
AEL-33	10	9,80	8,64

De la Tabla 5.2 se precia que el ABA tiende a subestimar el potencial máximo neutralizador de las muestras.

Finalmente, de los resultados del análisis elemental y mineralógico se concluye que estos datos son importantes para la interpretación de los tests realizados, así como, entender sus resultados. Esto debido que los elementos y la mineralogía ayudaron a predecir y entender el comportamiento potencial o no potencial generador de ácido de las muestras. Comportamiento que luego fue esclarecido y determinado en forma definitiva por las pruebas, principalmente, el NAG y el ABCC.

### 5.3. ABA

Como se pudo apreciar de los resultados del test ABA estos varían considerablemente. Variabilidad que depende del laboratorio en que se realice el ICP-MS o si se ocupa el ICP-MS o el XRF. Además, sin contar con las limitaciones de las mediciones del ICP-MS y XRF. Por otro lado, se tiene que no se puede calificar de manera correcta todas las pruebas; por ejemplo, Cauquenes es calificada como indeterminada, lo que requiere otras pruebas para determinar su correcta calificación.

Otro análisis de los resultados del ABA es que este entrega solo un valor del ANC o PN de las muestras, pero no permite evaluar el consumo verdadero de la muestra ante el ácido. Además, el test Sobek tiende a sobreestimar los resultados de algunas muestras como se apreció en las de Cauquenes, ACL-49, CM, Cola 25 y Relave 1. Cabe mencionar que la muestra Cauquenes posee silicatos y como se comentó en la literatura estos cuando se llevan a una condición de pH límite reaccionan y contribuyen a la neutralización. Por último, el tiempo de espera de los resultados del %S, puede tardar demasiado tiempo lo que se aleja de poder generar una respuesta rápida de caracterización lo que es el objetivo de esta investigación.

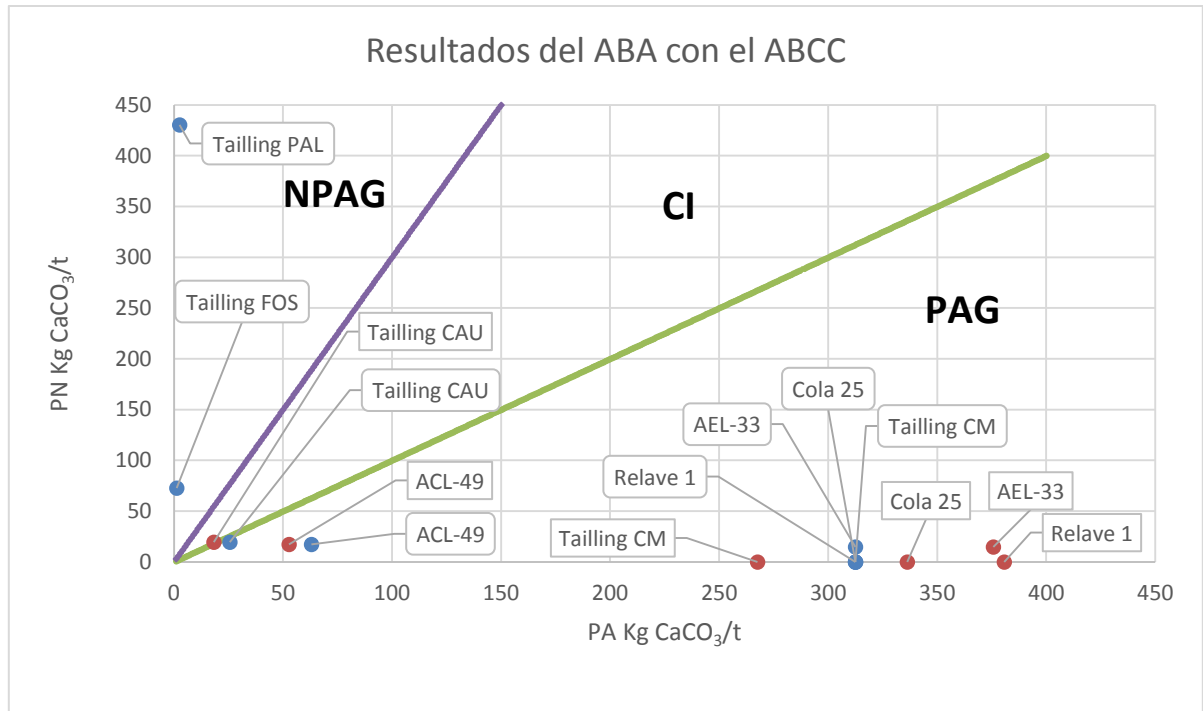
Por otro lado, se calcula el PN con el ABCC lo que se aprecia en la Tabla 5.3.

**Tabla 5.3: Resultados PN del ABCC y ABA**

Muestra	PN (ABCC) [Kg CaCO <sub>3</sub> /t]	PN (ABA) [Kg CaCO <sub>3</sub> /t]
<b>ACL-49</b>	17,22	48,5
<b>AEL-33</b>	14,84	8,64
<b>Tailing CM</b>	0,00	4,92
<b>Tailing PAL</b>	430,31	294,7
<b>Tailing FOS</b>	72,64	40,08
<b>Cola 25</b>	0,00	0,00
<b>Relave 1</b>	0,00	7,48
<b>Tailing CAU</b>	19,51	43,43

De los resultados anteriores se aprecia que el ABA sobreestima los resultados cuando no existe carbonato y/o están presentes los silicatos, como se observa en todas las

muestras excepto Palabora y AEL-33. En estas dos últimas el ABA ocasiona una subestimación de los resultados. Foskor también está subestimada, esto se debe que posee silicatos con carácter tampón como la flogopita, además, el apatito con tampón debido al fosfato. En el Gráfico 5.1, se presentan los resultados del ABA al utilizar el PN determinado por el ABCC.



**Gráfico 5.1: Resultados ABA con el ABCC**

En azul están los resultados del ABA con el XRF y en rojo los resultados del ABA al ocupar el ICP-MS. Pese a ocupar el ABCC la muestra de Cauquenes sigue en estado de indeterminada con el (ICP-MS). Sin embargo, los resultados son más cercano a la realidad con el ABCC que con el Sobek. Lo anterior debido a que Cauquenes está más cerca del PAG y ACL-49 está totalmente clasificada como PAG. Se observa que el ABA, demanda mucho tiempo y no permite una clasificación clara de todas las muestras. Se concluye que el ABA no es un buen determinador del potencial de drenaje ácido de las muestras y no cumple con los objetivos de esta investigación.

## 5.4. Etapa de pruebas iniciales

### 5.4.1. NAG Cauquenes

Un análisis importante de los resultados obtenidos en la etapa de la prueba inicial, es que variaciones en el porcentaje del peróxido añadido, tiempo de espera, cantidad de muestra, puede entregar variaciones significativas del pH NAG, del cálculo del NAG y NAP. Además, los protocolos no son claros ni específicos en la realización y varían en la

literatura. Se pueden obtener distintos resultados de acuerdo a la manera de realizar el test, lo que demuestra y explica porque cada laboratorio posee su manera de realizar los estudios, forma de entregar los resultados y porque a veces entregan resultados distintos.

Pero lo importante a destacar en esta parte es que todos los resultados entregaron que la muestra de Cauquenes era potencial generadora de ácido, por poseer un pH menor a 4.5. Además, otorgaron el resultado en corto tiempo lo que permite cumplir el objetivo de la investigación. Con esto se puede mantener un registro de los resultados y la manera de efectuar el test, lo que permite una gestión sustentable y con eso asegurar la estabilidad química de los desechos; lo que permite el cumplimiento de la Ley 20.551.

#### **5.4.2. ABCC Cauquenes**

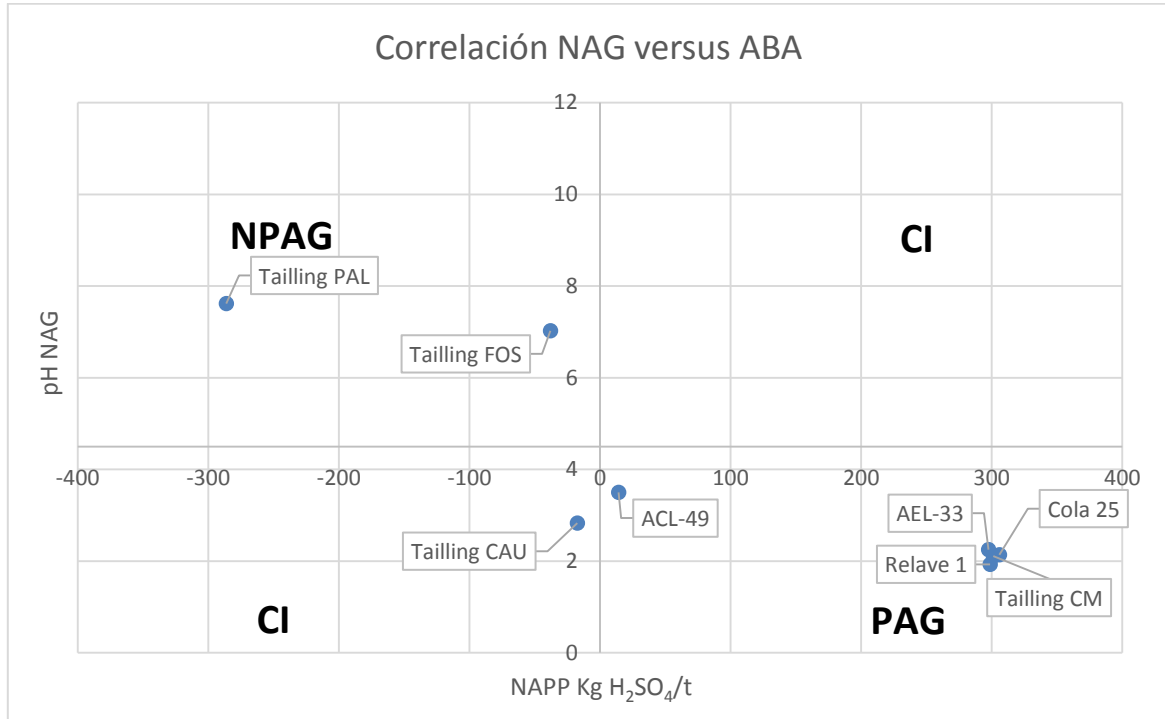
Por otro lado el ABCC sigue un comportamiento similar en cuanto al protocolo [25]. Este entrega ciertos valores de concentración de HCL e incrementos de estos, pero otro paper entrega otros valores optimizados [21]. Lo mismo sucede en la cantidad de muestra y pH final al cual titular, de hecho algunos autores especulan que hasta pH 3 es suficiente [21]. Pero lo importante del test, es que permite apreciar la verdadera capacidad neta de neutralización (ANC), es decir, que porcentaje de material neutralizador de la muestra es capaz de reaccionar con el ácido.

El verdadero ANC con el ABA no es posible apreciarlo, además, este sobreestima el resultado cuando no existe carbonato y/o están presentes los silicatos. Otro punto importante de esta etapa es que el tiempo de espera en la estabilización del pH es el que influye en los resultados. En conclusión, este test permite predecir el verdadero ANC de las muestras y en corto tiempo, cosa que no es posible determinar de forma exacta con el ABA o solo con un análisis mineralógico.

### **5.5. Etapa de pruebas finales**

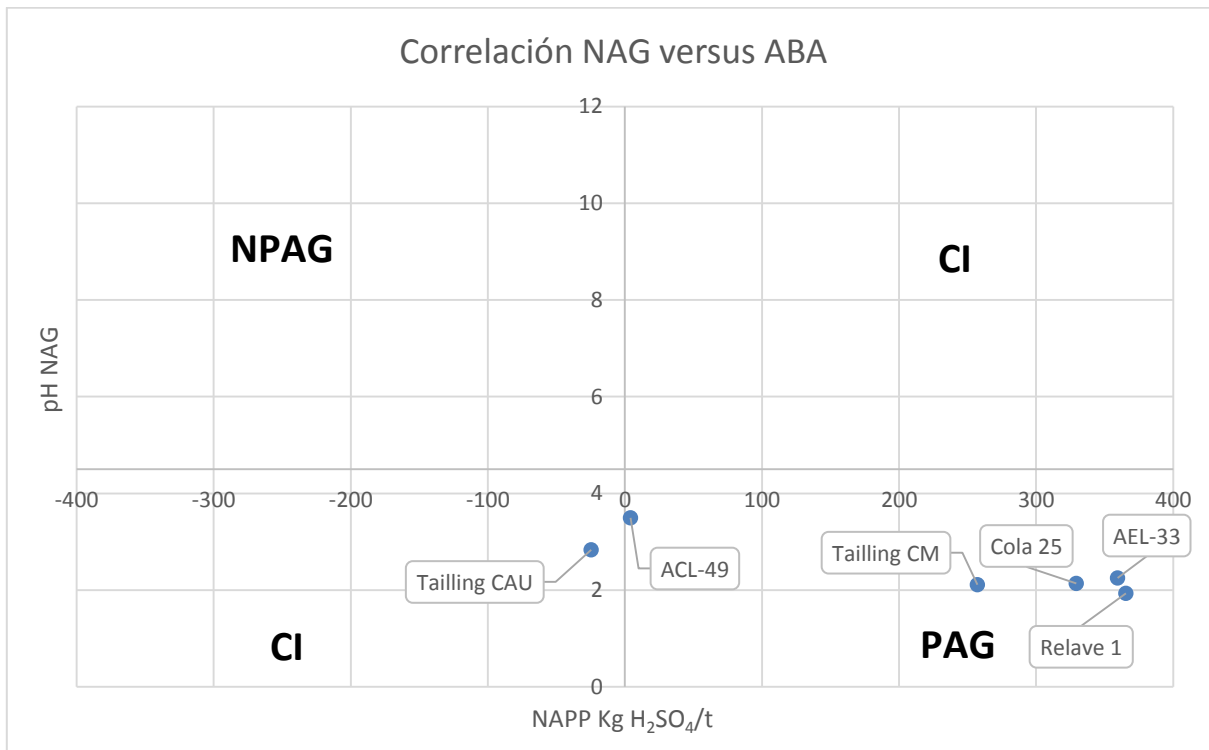
#### **5.5.1. NAG**

A continuación, se presenta la correlación entre el pH NAG y el ABA al utilizar el ICP-MS de las muestras. Como se puede apreciar en el Gráfico 5.2, la mayoría de las muestras presentan la correlación correspondiente entre sí, es decir, son potenciales generadoras de ácido o no lo son. Sin embargo, es importante notar que existe un límite en la estimación de los datos, es decir, el ICP no es capaz de estimar más allá de 10% de S, lo cual puede entregar datos subestimados.



**Gráfico 5.2: Correlación del pH NAG versus ABA (ICP-MS)**

Por el otro lado, se presenta la misma correlación pero al utilizar datos del XRF, esto en el Gráfico 5.3. A primera vista se puede apreciar que no existe correlación de los datos de Palabora y Foskor porque el equipo es incapaz de medir datos bajos < 3% de S, lo que es una desventaja. Además, se puede apreciar diferencias entre el ICP-MS y XRF, como que la muestra AEL-33 en el XRF está sobreestimada. Sin embargo, los resultados finales siguen el mismo comportamiento que con el ICP.

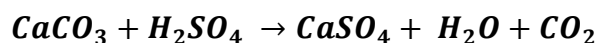


**Gráfico 5.3: Correlación del pH NAG versus ABA (XRF).**

Como se puede apreciar en el Gráfico 5.2 y en el Gráfico 5.3, las muestras presentan un comportamiento muy extremo entre ellas, lo que facilita su calificación. Solo dos muestras presentan un comportamiento poco determinado (Cauquenes y ACL-49) y solo una muestra cae en el casillero de indeterminada que es la de Cauquenes. A esta, según la literatura, se le debe realizar otras pruebas para discrepar esta ambigüedad [21]. La prueba de ABCC permite determinar la capacidad verdadera de neutralización mediante una titulación lenta con ácido clorhídrico. El resultado del ABCC confirmó que la muestra de Cauquenes no presentaba capacidad de neutralizar ácido, por lo que la muestra es calificada como potencial generadora de drenaje ácido. Además, el NAG secuencial que se efectuó también, confirmó la capacidad de generar ácido de esta muestra.

De aquí se deduce que muestras con comportamiento poco extremo deben ser analizadas con más cuidado, a través de otros test como el ABCC; para determinar si en verdad existe capacidad de neutralizar ácido o un NAG secuencial; para permitir corroborar si en verdad la muestra tiene capacidad de generar ácido.

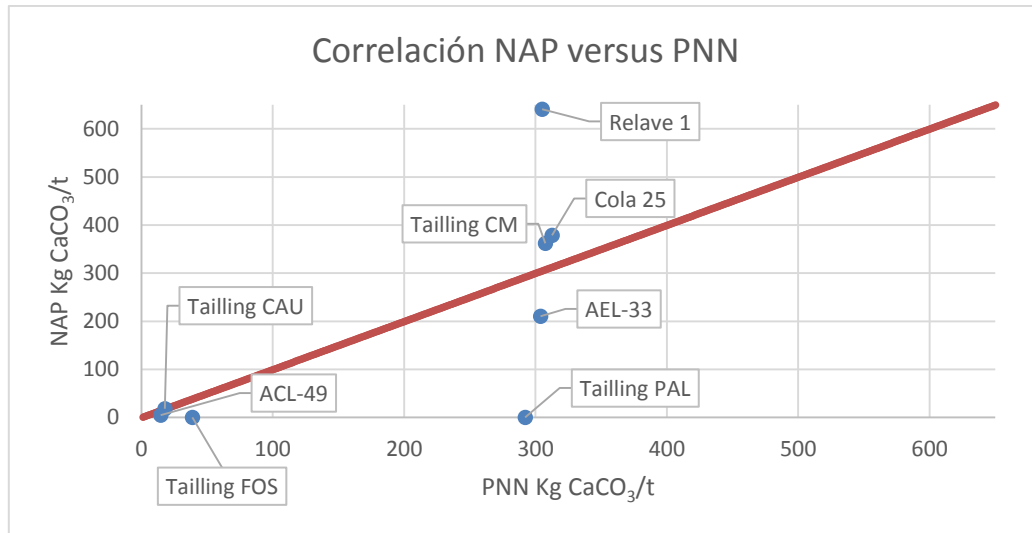
En el Gráfico 5.4, se presenta la correlación entre el NAP y el modulo del PNN al usar el ICP-MS. Esta correlación se obtiene debido a la siguiente Reacción 5.1. Donde el ácido  $H_2SO_4$  producido o generado en la reacción es neutralizado por el  $CaCO_3$ .



**Reacción 5.1: Neutralización ácido sulfúrico con carbonato de calcio.**

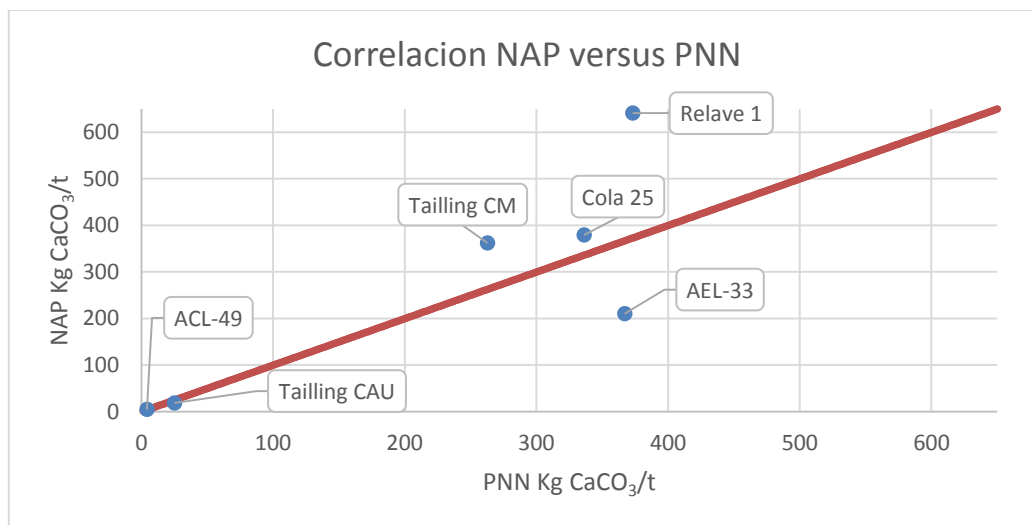


Como se comentó, el NAP establece el ácido neto producido expresado en la cantidad de carbonato de calcio necesario para llegar a pH 7, esto por la reacción anterior. El PNN de manera similar busca la cantidad de carbonato de calcio para restablecer el pH 7, después, que la muestra fue acidificada con ácido clorhídrico, como lo establece el método Sobek o método modificado del Sobek. Con todo lo anterior se puede realizar la correlación entre el NAP y el modulo del PNN. Finalmente, se deja fuera Foskor y Palabora por poseer un pH mayor a 7,0, se aprecia en el Gráfico 5.4, que el Relave 1, ACL-49 y AEL 33 presentan una correlación alejada de uno.



**Gráfico 5.4: Correlación del NAP versus |PNN| (ICP-MS).**

Por otro lado, en el Gráfico 5.5 se presenta la correlación al usar XRF. Como se puede apreciar el Relave 1, Tailing CM y AEL-33, poseen una correlación bastante alejada de 1.



**Gráfico 5.5: Correlación del NAP versus |PNN| (XRF).**

Luego, en la Tabla 5.4, se resumen los resultados de las correlaciones. Como se puede atisbar Relave 1, en ambos casos esta fuera de 1, pero en el ICP-MS está más alejado. Esto debido a que los datos están subestimados por la incapacidad del ICP-MS para poder medir ppm más allá de cierto rango. Por el otro lado, puede ser que el NAG sobreestime el poder acidificante de la muestra, sin embargo, como se pudo observar en el ABCC esta muestra tiene gran poder de acidificar, por lo que los datos de XRF deben estar de igual manera subestimados.

Además, en la Tabla 5.4, se puede apreciar como en algunos casos la correlación es más exacta que en otros. También se observa como la muestra AEL-33 tiene un correlación baja en ambos casos, sin embargo, como se observó en el ABCC pese a poseer un ANC muy bajo no se acidificaba inmediatamente como otras muestras. Además, junto con Palabora la muestra AEL-33 es la única que posee Dolomita una de las causante de aumentar el ANC, por lo que se puede concluir que los datos del XRF y el ICP-MS están sobreestimados en estos casos. Finalmente, se puede concluir que el XRF y ICP-MS entregan datos variables entre sí, pero que al juntar ambos se puede demostrar la correlación evidente entre el NAP y el modulo del NPP del ABA, correlación que es igual a 1.

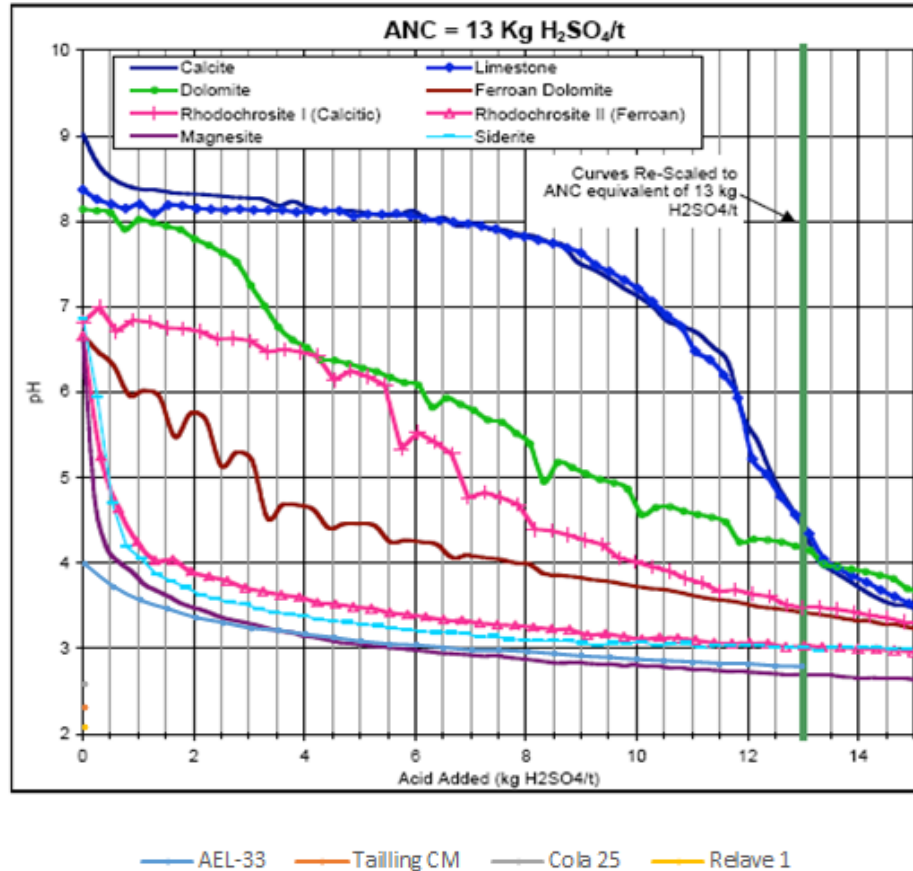
**Tabla 5.4: Correlación NAP/ IPNNI al ocupar XRF y ICP**

Muestra	XRF	ICP
	NAP/PNN	NAP/PNN
<b>ACL-49</b>	1,17	0,34
<b>AEL-33</b>	0,57	0,69
<b>Tailling CM</b>	1,38	1,18
<b>Tailling PAL</b>	n.d	0
<b>Tailling FOS</b>	n.d	0
<b>Cola 25</b>	1,13	1,21
<b>Relave 1</b>	1,72	2,10
<b>Tailling CAU</b>	0,73	1,03

Finalmente, el NAG pudo clasificar todas las muestras en PAG o NPAG y de manera fehaciente. Además, se concluye que este análisis permite establecer la correlación igual a 1 entre el NAP y el modulo del NPP. Esta correlación permite obtener el PN o el PA en caso de conocer solo uno de estos datos y el NAP.

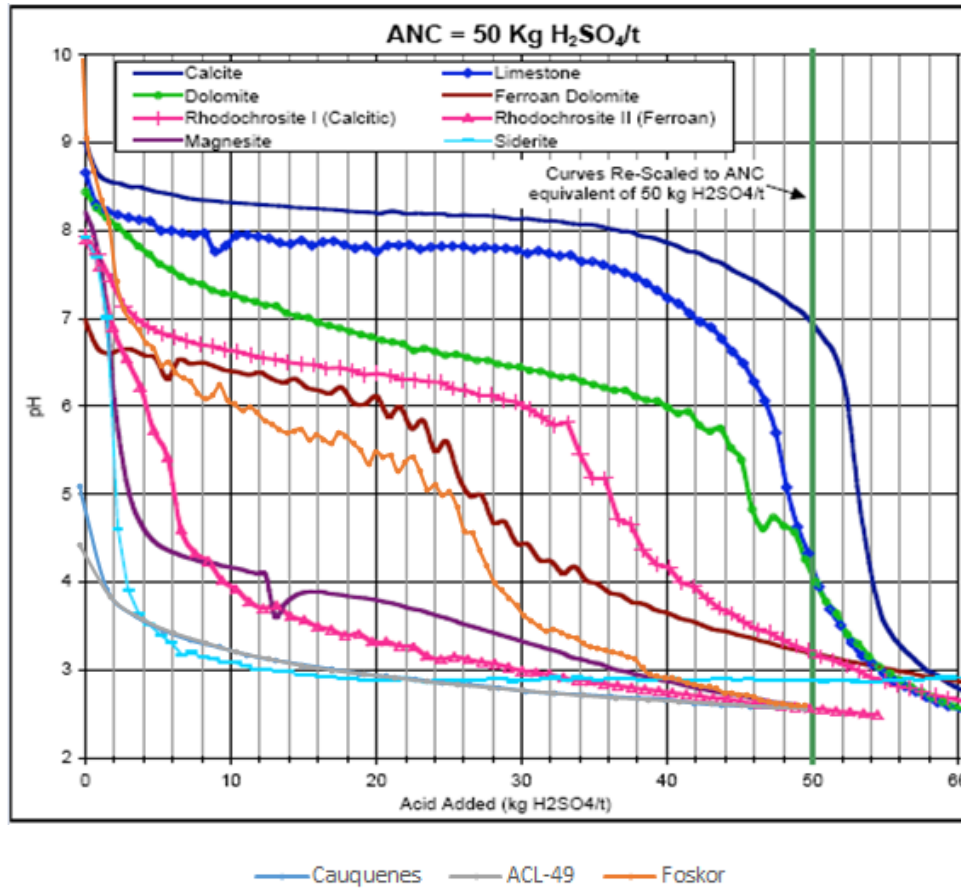
### 5.5.2. ABCC

A continuación, se presenta la relación de los gráficos de la literatura de los diferentes minerales, con el gráfico obtenido de los experimentos (escalado al ANC de la literatura).



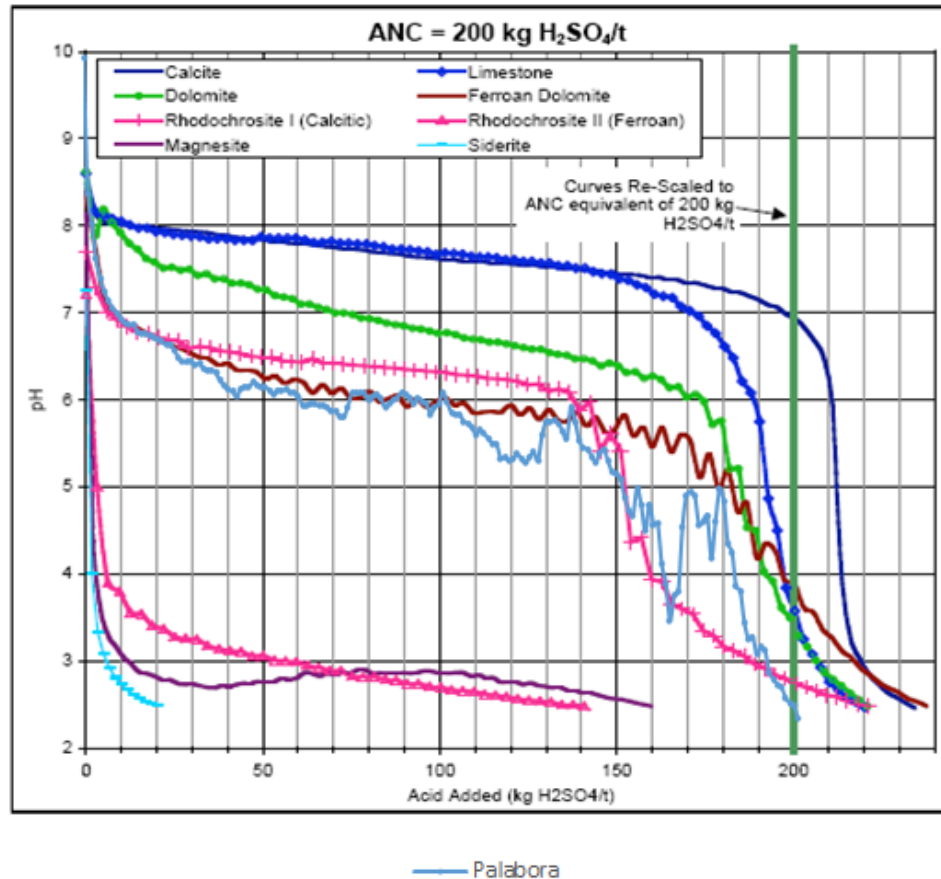
**Gráfico 5.6: Titulación de minerales a un ANC=13 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t.**

El Gráfico 5.6 presenta las muestras más ácidas, algunas son presentadas con un punto como Relave 1, Cola 25 y tailing CM. Por el otro lado, la muestra AEL-33 que posee dolomita es presentada con una línea azul. Según el gráfico presenta un comportamiento parecido a la magnesita (MgCO<sub>3</sub>) la cual tiene elementos parecidos a la dolomita, además, de hierro.



**Gráfico 5.7: Titulación de minerales a un ANC=50 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t.**

En el Gráfico 5.7, se observan las muestras Cauquenes (azul) y ACL-49 (gris) (superpuestas). Estas muestras presentan un comportamiento parecido a la siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), sin embargo, no existe la presencia de  $\text{CO}_3^{2-}$ , pero sí la presencia de hierro. Por último, la muestra de Foskor presenta un comportamiento más cercano a la *ferroan dolomite*, pero a diferencia de esta no existe la presencia de carbonato en Foskor.



**Gráfico 5.8: Titulación de minerales a un ANC=200 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t.**

Por último, el Gráfico 5.8 presenta la curva de Palabora (escalado a un ANC de 200) con las de la literatura. Como se puede apreciar pese a que la muestra posee dolomita y calcita su comportamiento es parecido a la *ferroan dolomite*. Mineral que posee los mismos elementos que la dolomita, además, de hierro. Este comportamiento similar se debe principalmente por la presencia magnetita de Palabora.

Además, estos gráficos permiten conocer el comportamiento de la muestra y relacionarlo con minerales, en especial muestras que tiene carbonato como AEL-33 y Palabora. Esto en el caso de no conocer la mineralogía ni el análisis elemental de las muestras por no poseer un análisis de difracción de rayos x o un análisis de XRF y/o ICP-MS.

Después, se establece en la Tabla 5.5 el PN calculado por el ABCC, el ABA y el DRX. Como se aprecia el ABA subestima este dato, por el otro lado, la DRX tiende, generalmente, a sobreestimar el valor del PN esto porque no considera el efecto de los otros minerales como se aprecia en Palabora.

**Tabla 5.5: Comparación cálculos del PN.**

Muestra	PN (ABCC)	PN (ABA)	PN (DRX)
<b>ACL-49</b>	17,22	48,5	-
<b>AEL-33</b>	14,84	8,64	10
<b>Tailling CM</b>	0,00	4,92	-
<b>Tailling PAL</b>	430,31	294,7	672
<b>Tailling FOS</b>	72,64	40,08	
<b>Cola 25</b>	0,00	0,00	-
<b>Relave 1</b>	0,00	7,48	-
<b>Tailling CAU</b>	19,51	43,43	-

En conclusión, el ABCC permite determinar el verdadero ANC o PN de las muestras, cosa que con el método Sobek no es posible lograr como se comprobó. Esto es fundamental, ya que permite apreciar la verdadera capacidad de neutralizar ácido de la muestra. Lo que permite generar una clasificación más fehaciente del PAG o NPAG de las muestras.

## 5.6. Comparación de costos y tiempos

En este subcapítulo se calcula el VAC (Valor Actual de Costo) de este proyecto, este es excelente para determinar la realización de un proyecto cuando se desconocen los beneficios de este.

Se considera de manera conservadora que una persona puede realizar 2 NAG diarios y trabajar 20 días al mes son aproximadamente unos 40 NAG al mes. Por último, se consideran diferentes periodos 1, 2, 3, 4, 5 y 10 años (t). Se calculan los costos en esos periodos con una operación simple de multiplicar la cantidad de test por año, multiplicado por el precio de realizar el test. Se toma en cuenta el precio del test por laboratorio informado en el anexo 8.2 (Cotización) y el costo promedio del NAG calculado. Los resultados son presentados en la Tabla 5.6.

**Tabla 5.6: Costo por año de la realización del test NAG.**

Costos por año de la realización de los test en millones de pesos (C <sub>t</sub> )						
Año	1	2	3	4	5	10
<b>En faena</b>	1,59	3,18	4,77	6,36	7,95	15,89
<b>ALS</b>	9,98	19,97	29,95	39,94	49,92	99,84
<b>SGS</b>	62,70	125,39	188,09	250,78	313,48	626,95

Por otro lado, una persona puede realizar un ABCC diario de manera conservadora, lo que entrega 20 ABCC al mes. Después, se procede de la misma manera anterior que para el NAG y se calcula el costo en esos periodos. Los resultados están en la Tabla 5.7.



Tabla 5.7: Costo por año de la realización del test ABCC.

Costos por año de la realización de los test (C <sub>t</sub> )						
Año	1	2	3	4	5	10
En faena (miles de pesos)	0,41	0,83	1,24	1,66	2,07	4,15
AGQ (millones de pesos)	24	48	72	96	120	240

Después, se considera una tasa de descuento del 10% (r) para calcular el VAC en esos periodos t (años), además, se considera el salario de una persona en \$500.000 pesos por mes. El C<sub>t</sub> es el costo de realizar los test NAG, ABCC y el salario de la persona en ese periodo t, lo anterior en la faena. En el laboratorio el C<sub>t</sub> es el costo de realizar las mismas pruebas en ALS y AGQ. El resultado final del VAC se calcula con la Ecuación 5.2 y se presenta en la Tabla 5.8.

$$VAC = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

Ecuación 5.2: Calculo del VAC.

Tabla 5.8: VAC del NAG y ABCC.

VAC en millones de pesos	
En faena	110,11
ALS y SGS	493,04

Como se pudo apreciar en el VAC en faena es mucho más rentable que su realización en laboratorios. Por el otro lado, no se considera la inversión por el hecho que algunas faenas cuentan con ciertos equipos; además, en el VAC se aprecia que hay un margen importante para costear la eventual inversión.

Por el otro lado, en cuanto a los tiempos se nota claramente que la realización de un NAG en faena es de 2 a 3 horas, en comparación de realizar el mismo test en un laboratorio, que en promedio entrega el resultado después de 15 días. Del mismo modo, el ABCC demora de unos minutos a un día, pero no se compara con realizarlo en laboratorio cuya respuesta es después de 15 días aproximadamente. Además, son poco los laboratorios que realizan el ABCC.

Finalmente, la realización de los test en faena sería más económica y sobre todo demandaría menos tiempo que su realización en los laboratorios. Además, se puede considerar el hecho que se pueden realizar varios tests en un día, lo que depende de la variable mineralógica de la muestra. Esto cumple el objetivo de esta investigación de poseer una respuesta rápida y económica del potencial de generación de ácido de las muestras.

## 5.7. Resumen de los resultados y metodología

En la investigación se apreció la importancia del análisis elemental, pero particularmente el valor del análisis mineralógico, ya que este sirvió para predecir el comportamiento de las muestras y entender mejor sus resultados.

Sin embargo, no fue con las pruebas que se pudo corroborar el verdadero potencial generador de ácido de las muestras; en particular, se demostró que el NAG es mejor que el ABA para comprobar este resultado. Además, el ABCC permitió determinar el verdadero ANC y como esta característica de las muestras se comporta con la adición de ácido, fenómeno que no es capaz de observarse con el ABA.

Después de la adaptación de los tests ABA y NAG para material de relave, se calcularon los costos de la realización de estas pruebas en faena, lo cual resultaría más económico que realizarlos en laboratorio. Además, el resultado de los análisis en faena es solo en 1 o 2 día.

En resumen, la metodología comienza con un previo análisis geológico para poder identificar y cuantificar minerales, como la pirita, la dolomita, la calcita, que participan en los drenajes mineros. Esto se puede realizar con un análisis macroscópico de la geología o con un análisis microscópico petrográfico. Este último permitiría determinar minerales opacos como la pirita (generador del drenaje ácido de mina), además, de minerales neutralizadores como la dolomita y calcita. También puede ayudar a identificar minerales transparentes como los silicatos. Por último, este método es fácil, rápido y económico de aplicar [5].

En segundo lugar, se efectúa la caracterización, esto con 2 simples tests: el NAG y el ABCC, además, del Sobek y XRF portátil en algunos casos. El primero, se utiliza para determinar el ANC necesario para efectuar el ABCC. El XRF portátil se aplica para determinar el PA de las muestras y luego con la correlación igual a 1 determinar el PN de algunas muestras.

La aplicación de las pruebas clasifica las muestras de relaves en tres grandes grupos:

Muestras con un pH NAG  $>$  4,5 serán calificadas como no potenciales generadoras de ácido (NPAG) y se realizará el ABCC, luego del Sobek, solo para confirmar la verdadera capacidad de neutralización de la muestra. Esto clasificará a la muestra en NPAG con baja, media o alta capacidad de neutralización.

Muestras con un pH NAG  $<$  4,5 y un NAG  $>$  25 Kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t serán calificadas como muy potenciales generadoras de ácido (MPAG) y se realizará el ABCC, sin necesidad de conocer el ANC. En lo anterior, se asume poco ANC por lo que se puede titular en el ABCC con 0,2 ml de HCL al 0,1M. Luego, de eso se confirma la muy baja o nula capacidad de neutralización.

Muestras con un pH NAG < 4,5 y un NAG < 25 Kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t (ACL-49 y Cauquenes) serán calificadas como potenciales generadoras de ácido (PAG). Se utilizará el XRF portátil para calcular el %S. Si %S es  $\geq 1$  se debe realizar el NAG secuencial para analizar si la muestra no está dando todo el poder de acidificación que posee. Además, se calcula el PN al ocupar la correlación igual a 1 entre el NAP y PNN, con eso se puede realizar el ABCC que determinará la verdadera capacidad de neutralización de la muestra como se hizo con Cauquenes. Si no se cuenta con XRF portátil se puede seguir el proceso a la inversa al determinar el PN con el método Sobek.

Finalmente, esta metodología tiene como visión la gestión sustentable de los desechos mineros, esto a través de la caracterización y la disposición de estos, de manera ordenada y consciente con sus características. La caracterización permite separar los relaves y depositarlos de acuerdo a sus características, esto permite luego tratarlos para que no sean un problema para el medio ambiente.

Las alternativas de tratamientos son: mezclar el relave que es capaz de generar drenaje ácido de mina con relaves o material con capacidad de neutralización, la pasivación de sulfuros como la pirita, control microbiológico, desulfuración de relaves, etc. Por último, se puede elaborar un modelamiento del relave durante el tiempo para analizar la influencia del lugar y clima en los desechos.

La finalidad de todo esto es el plan de cierre sustentable, es decir, que asegure la estabilidad química de los desechos lo que permitirá cumplir con la ley de cierre (La Ley 20.551).

## 6. Conclusión

La presente investigación cuyo objetivo fue el diseño y la elaboración de una metodología para la caracterización rápida y de bajo costo del potencial de generación de drenaje ácido de relaves. Lo anterior con una visión hacia la gestión ambiental y el desarrollo de un plan de cierre sustentable, aplicado en el contexto del mercado y de las regulaciones chilenas.

El objetivo se logró con el diseño de una metodología de caracterización simple de 2 pruebas: el NAG (con sus variantes) y el ABCC. Además, del método Sobek (en algunos casos) para la determinación de la capacidad neta de neutralización (ANC) o XRF portátil para determinar el PA y luego el ANC.

El método diseñado califica los relaves en tres grandes grupos de acuerdo a su potencial de generar ácido y capacidad de neutralización. Estos son: primero, los que son **no potenciales de ácido generador (NPAG)**, con muestras con baja, media y alta capacidad de neutralización; segundo, aquellos que son **muy potenciales de ácido generador (MPAG)**, con una muy baja o nula capacidad de neutralizar y tercero, los relaves que son **potenciales de ácido generador (PAG)**, con baja o muy baja capacidad de neutralización.

La propuesta de metodología de este estudio consiste: primero en un análisis geológico previo y simple, sea este macroscópico y/o microscópico. Lo anterior para poder determinar minerales importantes como pirita, magnetita y hematita que participan en la formación de drenaje ácido. Luego, minerales como dolomita y calcita que contribuyen a la neutralización del drenaje ácido. En segundo lugar, consiste en la aplicación de las pruebas NAG, Sobek o XRF y ABCC en ese orden para poder efectuar un análisis y clasificación definitiva de las muestras en función de su potencial de generación de drenaje ácido: MPAG, PAG y NPAG. Finalmente, luego del análisis seguiría la gestión de estos desechos de manera sustentable, es decir, disponer las muestras MPAG y PAG de acuerdo sus características. Lo anterior para que no se genere ácido en el medio ambiente. Esto se puede lograr al mezclar el relave potencial generador con otro relave (NPAG) o tratar el relave generador de drenaje ácido para asegurar la estabilidad química.

Este nuevo método consume un tiempo de 2 o 3 horas para el NAG, hasta un día para el ABCC, minutos para el XRF y un día para el SOBEK. En cuanto a los recursos económicos el NAG y el ABCC cuestan, aproximadamente, \$3.500 y \$2 pesos respectivamente para los reactivos. En comparación, el enviar las muestras para análisis externo, esto demora como mínimo 15 días, además, cuesta como mínimo para el NAG y el ABCC \$28.000 y \$100.000 pesos, respectivamente.

Se destaca que la metodología implementada posee las siguientes ventajas: es de bajo costo en término de recursos económicos y de personal, puesto que no requiere demasiados trabajadores. En segundo lugar, es de respuesta rápida, puesto que en solo 1 o 2 días se puede obtener una respuesta confiable. En tercer lugar, la metodología permite conocer si la muestra es potencial generadora de ácido o no, lo que permitiría la gestión de los residuos mineros de una manera sustentable.

Esta metodología propone una caracterización de residuos que son potenciales en convertirse en un problema ambiental que afecte todos, por lo tanto, ella permite en forma temprana prevenir esto. Además, logra el cumplimiento de la normativa legal presente, en particular la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras (La Ley 20.551), que establece que la minera debe asegurar la estabilidad química de los desechos que esta produzca desde la puesta en marcha del proyecto hasta el cierre de la faena y más allá.

En la actualidad la minería toma importancia al marco legal que regula la gestión de relaves, pero aún falta perfeccionar estas normativas y políticas públicas relacionadas con el medio ambiente para poder gestionar estos residuos de manera sustentable. Esta propuesta llena este vacío presente e intenta facilitar que la faena puede gestionar de manera sustentable, rápida y económica estos recursos.

De acuerdo a lo investigado se destacan las mineras con una buena gestión como Antamina con los botaderos eficientemente gestionados, el rajo Lichtenberg de Alemania con su medida de remediación, la faena Alumbreira de Argentina o la mina Huckleberry en Canadá con sus políticas tempranas de gestión. Todas estas faenas implementaron una metodología en distintas etapas de la vida de la mina lo que posibilitó su reconocimiento. En base a eso es que se espera que las mineras en Chile lleguen a esta condición para que cumplan con la ley para la gestión eficiente de los recursos y lo más importante resguardar el medio ambiente.

Las limitaciones de este estudio están relacionadas por la poca cantidad de material de las muestras de relave, que restringió la realización de otros tests en la fase experimental y la generación de duplicados de estos. Otra limitación de esta investigación es la escasa literatura relacionada con la aplicación de las pruebas en minería y la poca claridad de la información relacionada con los protocolos de los tests NAG y ABCC.

Finalmente, las recomendaciones de esta investigación son: en primer lugar, la aplicación de la metodología diseñada en materiales estériles que conforman los botaderos, vale decir, aplicar las pruebas en muestras de botaderos. En segundo lugar, la aplicación del método en la mina propiamente tal, es decir, aplicarlo en alguna faena para poder caracterizar y gestionar de manera sustentable los desechos mineros. En tercer lugar, la capacitación de personal para la realización de la metodología en faena, esto resultará sencillo, ya que son pruebas de fácil aplicación.

## 7. Bibliografía

- [1] COCHILCO, «Proyección de la producción de cobre en Chile 2017 – 2028,» Santiago, 2017.
- [2] SERNAGEOMIN, «[sernageomin.cl](http://www.sernageomin.cl),» [En línea]. Disponible en: <http://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>. [Último acceso: 06 Noviembre 2018].
- [3] SERNAGEOMIN, «Resultados Catastro de Depósito de Relaves 2016,» Santiago, 2016.
- [4] Ministerio de Minería, «Decreto Supremo N° 248 Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves,» Santiago, 2007.
- [5] SERNAGEOMIN, «Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras.,» Santiago, 2015.
- [6] CODELCO, «[codelco.com](http://www.codelco.com),» [En línea]. Disponible en: <https://www.codelco.com/elteniente>. [Último acceso: 06 Noviembre 2018].
- [7] Minera Valle Central, «[mineravallecentral.cl](http://www.mineravallecentral.cl),» [En línea]. Disponible en: <http://www.mineravallecentral.cl/>. [Último acceso: 06 Noviembre 2018].
- [8] C. Llanes, «<http://guiacalanas.blogspot.com>,» 13 Junio 2013. [En línea]. Disponible en: <http://guiacalanas.blogspot.com/2013/06/las-minas-de-calanas-y-su-termino.html>. [Último acceso: 01 Enero 2019].
- [9] Mubadala Investment Company y Trafigura Group Pte Ltd., «[matsamining.com/](https://www.matsamining.com/),» [En línea]. Disponible en: <https://www.matsamining.com/>. [Último acceso: 01 Enero 2019].
- [10] F. Carnero, «<http://elaticodejepane.blogspot.com>,» 14 Junio 2014. [En línea]. Disponible en: [http://elaticodejepane.blogspot.com/2014/06/el-pasado-minero-de-cueva-de-la-mora-y\\_14.html](http://elaticodejepane.blogspot.com/2014/06/el-pasado-minero-de-cueva-de-la-mora-y_14.html). [Último acceso: 06 Noviembre 2018].

- [11] PALABORA COPPER (PTY) LIMITED, «palabora.com,» [En línea]. Disponible en: <http://www.palabora.com/>. [Último acceso: 06 Noviembre 2018].
- [12] Foskor (Pty) Ltd., «foskor.co.za,» [En línea]. Disponible en: <http://www.foskor.co.za/SitePages/Home.aspx>. [Último acceso: 06 Noviembre 2018].
- [13] A. Strauss<sup>1</sup>, «Selati tailings dam decant failure and remedial actions,» Phalaborwa, 2015.
- [14] Cobre Las Cruces, S.A.U., «Cobre Las Cruces, S.A.U. Informe de sustentabilidad,» Sevilla, 2016.
- [15] Ministerio Secretaría General de la Presidencia, «Ley Sobre las Bases Generales del Medio Ambiente,» Santiago, 1994.
- [16] Ministerio Secretaría General de la Presidencia, «Crea el ministerio, El Servicio de la Evaluación Ambiental y la Superintendencia del Medio Ambiente,» Santiago, 2010.
- [17] Ministerio del Medio Ambiente, «El Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental,» Santiago, 2013.
- [18] Ministerio de Salud, «El Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos,» Santiago, 2004.
- [19] Ministerio de Minería, «La ley que regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras,» Santiago, 2011.
- [20] G. Tremblay y C. Hogan, «MEND Manual,» 2000.
- [21] W. Stewart, S. Miller y R. Smart, «Advances in Acid Rock Drainage (ARD) characterization of mine wastes,» 2006.
- [22] P. Michael, G. Manfred y B. Delf, «Integrated water protection approaches under the WISMUT project: The Ronneburg case,» 2016.
- [23] A. Sobek, W. Schuller, J. Freeman y R. Smith, «Field and laboratory methods applicable to overburdens and mine solids,» 1978.
- [24] C. Aranda, «Caracterización geoquímica de rocas y su manejo ambiental en Antamina,» *Revista Ambiental*, pp. 6-14, 2006.



- [25] AMIRA, «Project P387A Prediction & Kinetic Control of Acid Mine Drainage,» 2002.
- [26] SERNAGEOMIN, «Buenas prácticas en la gestión de la estabilidad química en la industria minera,» Santiago, 2015.
- [27] GLENCORE, «Minera Alumbraera: Informe de Sostenibilidad 2016,» Buenos Aires, 2016.
- [28] K. Christensen, G. Connaughton y P. Ogryzlo, «Technical report on the main zone optimization Huckleberry Mine Omineca mining division British Columbia, Canada,» 2016.
- [29] M. Rocco, «Estudio y predicción del drenaje ácido,» 2013.
- [30] HANNA instruments, «Manuel de instrucciones,» 2015.
- [31] BOECO GERMANY, «Equipos P/Laboratorio,» 2016.
- [32] LAB BRANDS, «labbrands.com,» [En línea]. Disponible en: <http://www.labbrands.com/agitadores-magneticos-con-calentamiento/1170-agitador-magnetico-con-calentamiento-ms-h280-pro-lb-pro.html>. [Último acceso: 06 Noviembre 2018].
- [33] CISPROQUIM, «Hoja de dato de seguridad peróxido de hidrógeno,» Bogotá, 2005.
- [34] CISPROQUIM, «Hoja de dato de seguridad hidróxido de sodio,» Bogotá, 2005.
- [35] CISPROQUIM, «Hoja de dato de seguridad ácido clorhídrico,» Bogotá, 2005.
- [36] «procesaminerales.blogspot.com,» [En línea]. Disponible en: <https://procesaminerales.blogspot.com/2012/05/tecnicas-de-muestreo-de-minerales.html>. [Último acceso: 06 Noviembre 2018].
- [37] P. Martínez, «Protocolo de Caracterización para Predicción de Drenaje Ácido en Depósitos de Relaves Mineros,» Huelga-Santiago, 2018.
- [38] D. Yager,, A. McCafferty,, M. Stanton, S. Diehl, R. Driscoll, D. Fey y S. Sultey, «Net Acid Production, Acid Neutralizing Capacity, and Associated Geophysical, Mineralogical, and Geochemical Characteristics of Animas River Watershed Rocks Near Silverton, Colorado,» 2005.

- [39] AGQ Labs, «agq.com.es,» [En línea]. Disponible en: <http://www.agq.com.es/>. [Último acceso: 28 Noviembre 2018].
- [40] ALS, «alsglobal.cl,» 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.alsglobal.cl/>. [Último acceso: 28 Noviembre 2018].
- [41] SGA, «sgs.cl,» 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.sgs.cl/>. [Último acceso: 28 Noviembre 2018].
- [42] CESMEC, «cesmec.cl,» 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.cesmec.cl/link.cgi/esp/>. [Último acceso: 28 Noviembre 2018].
- [43] MERCK, «merckmillipore.com,» 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.merckmillipore.com/CL/es>. [Último acceso: 28 Noviembre 2018].

## **8. Anexo**

### **8.1. Resultados**

#### **8.1.1. Etapa de pruebas iniciales**

##### **8.1.1.1. NAG Cauquenes**

Es importante mencionar que la prueba 1, luego de ser añadida la muestra a la solución de peróxido (15%), empieza a efervescer muy levemente. Efervescencia que no aumenta drásticamente con el tiempo. Posteriormente, a la hora de ser sometida en la plancha calefactora la solución empieza a burbujear de manera significativa; a 1 hora y 45 minutos de ser colocada a la plancha. Finalmente, la solución empieza a burbujear de manera vigorosa (hervor) el cual dura, aproximadamente, 10 minutos, después la solución se calma.

El ensayo número 2 sigue un comportamiento similar al descrito anteriormente, pero el hervor en la solución se produce a la hora y 30 minutos después de ser sometida a la temperatura. Esto dura aproximadamente 10 minutos, de manera similar a la prueba anterior. Tiempo después la solución se calma.

El experimento 3 el comportamiento es distinto, pero se observa un burbujeo leve alrededor de una hora de ser colocada a la plancha. Luego, de dos horas de estar a temperatura se aumenta la temperatura a 60° y se deja por 1 hora más de tiempo. Posteriormente, se corta la temperatura y se observa que nunca se alcanza el hervor como en las pruebas anteriores. Esto se debe por la poca cantidad de peróxido en la solución, que es fundamental para oxidar el sulfuro y producir las reacciones exotérmicas.

La experiencia 4 sigue el comportamiento descrito de las pruebas 1 y 2, sin embargo, el burbujeo es más vigoroso (hervor) y ocurre cerca de media hora o 40 minutos. El hervor dura solo 7 minutos y se corta la temperatura, es decir, después de 1 hora de ser colocada la muestra a la plancha calefactora.

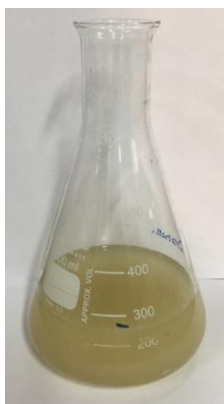
La prueba 5 se dejó que la efervescencia leve actuara toda la noche. Al otro día se calienta a una temperatura de 50°C. Se observa un burbujeo leve, pero nunca se alcanza el hervor como algunos de los experimentos anteriores. A las dos horas de ser colocada a la plancha la muestra se aumenta la temperatura a 60°, esto para apreciar si se alcanza el hervor. Luego de 3 horas de colocarse la solución a la plancha se corta la temperatura. Este comportamiento ocurrió debido a que el peróxido se transformó en agua durante la toda la noche. Además, no alcanzó a producirse la catálisis de la muestra al no ser colocada a temperatura de manera temprana, de modo que el resultado esta subestimado.

El ensayo 6 como se explicó en el protocolo se realiza de manera similar a un NAG simple. La temperatura y el pH son tomados durante el tiempo. Se observa el mismo comportamiento que la prueba 1.

El experimento 7 solo se efectúa para demostrar que no conviene realizar la prueba a una mayor temperatura, ya que solo se pierde solución por evaporación. La cual se repone con agua desionizada y entrega un resultado subestimados.

La muestra residual de la experiencia 1 es filtrada, y posteriormente conducida al NAG secuencial 2 (prueba 8). El experimento 8, actúa de la misma manera que la prueba, es decir, 1 a los 45 minutos de ser colocada a la plancha, empieza a burbujear. Posteriormente, a 1 hora y 15 minutos el burbujeo empieza fuerte hasta alcanzar el hervor. Esto dura solo 10 minutos, luego vuelve la solución al estado de calma.

El experimento 9 logró un comportamiento diferente se observa que nunca presenta efervescencia fuerte, solo existe un burbujeo suave. Después, de dos horas se aumenta la temperatura a 175°C por una hora (como recomienda el protocolo). En la Figura 8.1, se muestra el resultado del NAG normal luego de ser sometida a fuego.



**Figura 8.1: Muestra de Cauquenes después de ser sometido al test.**

Por último, a todas las pruebas se les registró el pH y se titularon hasta pH 4,5 y 7,0. Luego, se efectuaron los cálculos del NAG y NAP respectivamente.

### 8.1.1.2. ABCC Cauquenes



Figura 8.2: ABCC de Cauquenes

La Figura 8.2 presenta la solución que contiene la muestra de Cauquenes la cual será titulada.

## 8.1.2. Etapa de pruebas finales

### 8.1.2.1. NAG

El NAG de ACL-49 sigue el mismo comportamiento que las muestras de Cauquenes. La cual no presenta efervescencia al ser introducida al peróxido de hidrógeno. Luego de 45 minutos de ser sometida a la plancha, empieza el burbujeo suave. A la 1 hora y 25 minutos alcanza el hervor, el cual termina 20 minutos más tarde de conseguirse la temperatura máxima. Posteriormente, igual que los casos anteriores deja de burbujear y entra en un estado de calma. En el Gráfico 8.1, se presenta la variación de la temperatura de la solución. En el Gráfico 8.1, se puede apreciar que la temperatura aumenta menos que la muestra de Cauquenes, posiblemente, por poseer menor cantidad sulfuro o este estar en una forma menos exotérmica como la pirrotina (FeS).

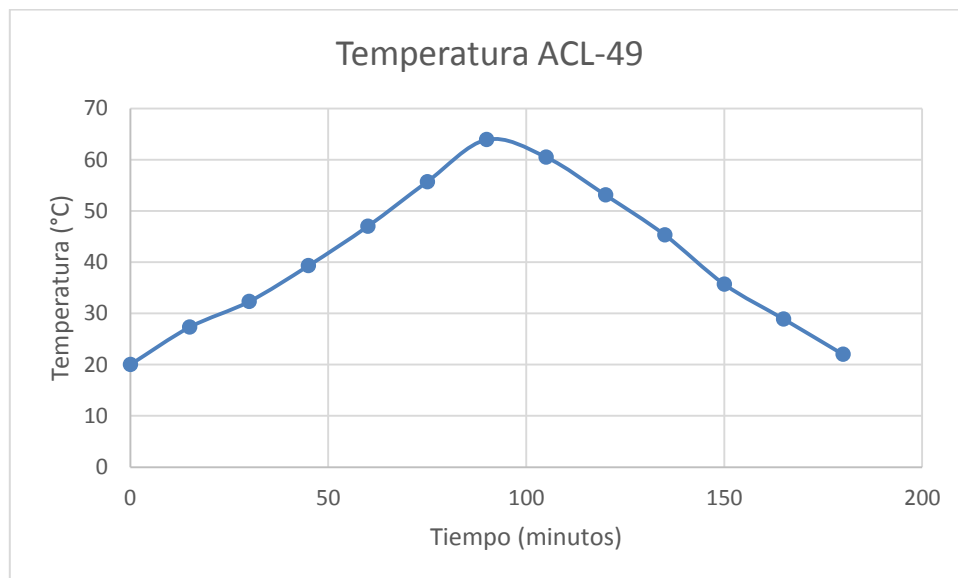


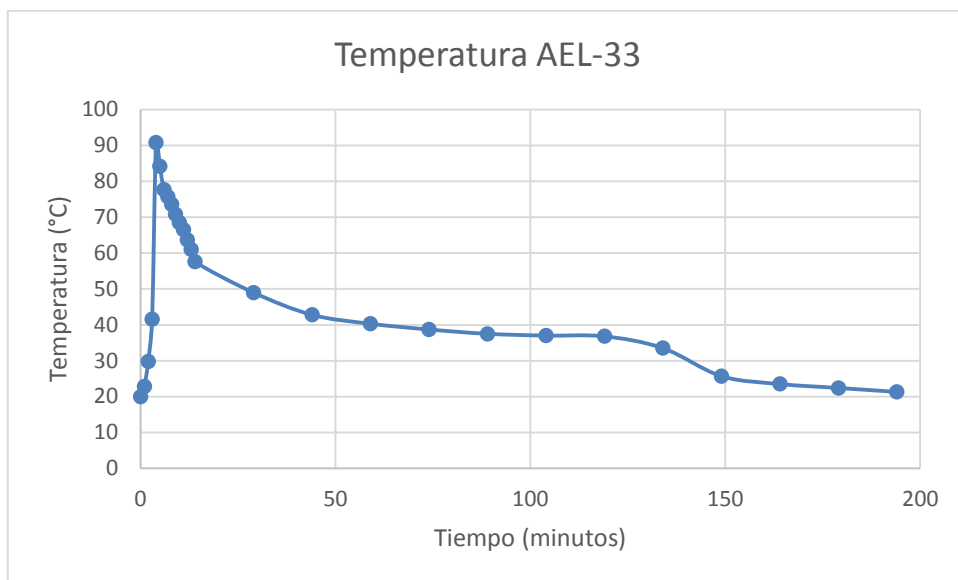
Gráfico 8.1: Variación de la temperatura de la muestra ACL-49.

A continuación, se presentan dos imágenes en la Figura 8.3, el antes y después de la muestra de ser sometida a la plancha. En la primera, se puede observar la suave o nula efervescencia de la solución. En la segunda, que la mayor parte de la solución está decantada en el fondo. En general, no se observan grandes cambios en el color y apariencia.



**Figura 8.3: Antes y después de la muestra ACL-49 de ser sometida al NAG.**

AEL-33 sigue un comportamiento totalmente distinto a las muestras anteriores realizadas. Esta al entrar en contacto con el peróxido de hidrógeno empieza a burbujear de manera suave y en pocos minutos aumenta este burbujeo de manera significativa. Lo anterior, hasta alcanzar una ebullición muy vigorosa acompañada con el drástico aumento de la temperatura. Se alcanza la temperatura máxima de  $90,8^{\circ}\text{C}$  a los 4 o 5 minutos de ser iniciado el proceso. En el Gráfico 8.2, se aprecia que el proceso entero dura solamente unos minutos. Posteriormente, se calma todo y disminuye la temperatura rápidamente. Después de esto es sometida la solución a la plancha por dos horas a la temperatura descrita anteriormente. Esto por si queda algún sulfuro sin reaccionar.



**Gráfico 8.2: Variación de la temperatura de la muestra AEL-33**

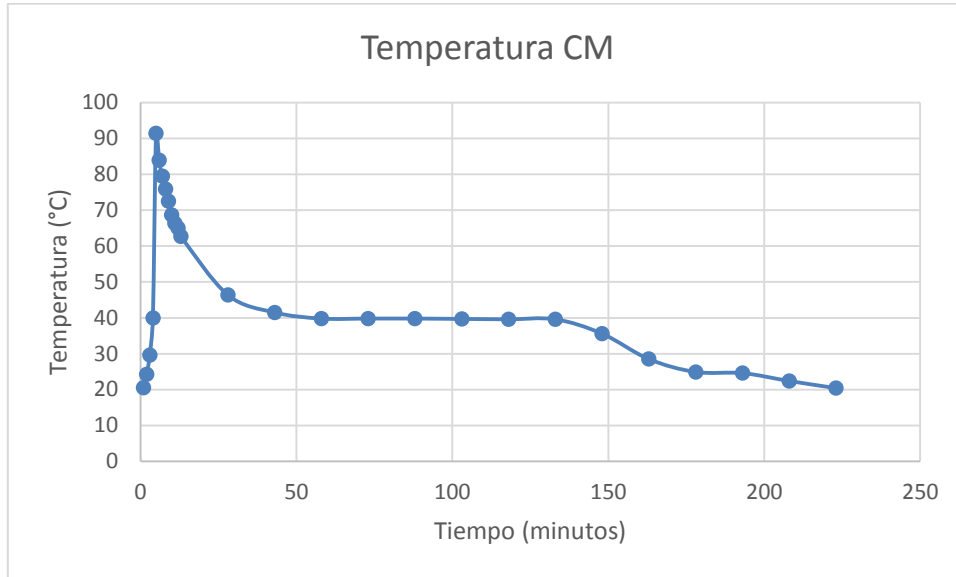
En la Figura 8.4, se observa la muestra antes y después de ser sometida a la plancha calefactora. El burbujeo inicial es muy leve para ser observado. Además, se observa un cambio del color de la solución luego del calentamiento a un tono medio verdoso (indicativo de la presencia del ácido sulfúrico con presencia de hierro).



**Figura 8.4: Antes y después de la muestra AEL-33 de ser sometida al NAG.**

Tailing CM sigue el patrón de la muestra anterior. La temperatura máxima se alcanza a los 4 minutos de ser puesta al fuego (91,4°C) junto con el hervor. Después, de eso la temperatura empieza a disminuir drásticamente con el tiempo. Finalmente, la solución se coloca a la plancha por dos horas y en el Gráfico 8.3, se presenta la variación de la temperatura con el tiempo.





**Gráfico 8.3: Variación de la temperatura de la muestra CM.**

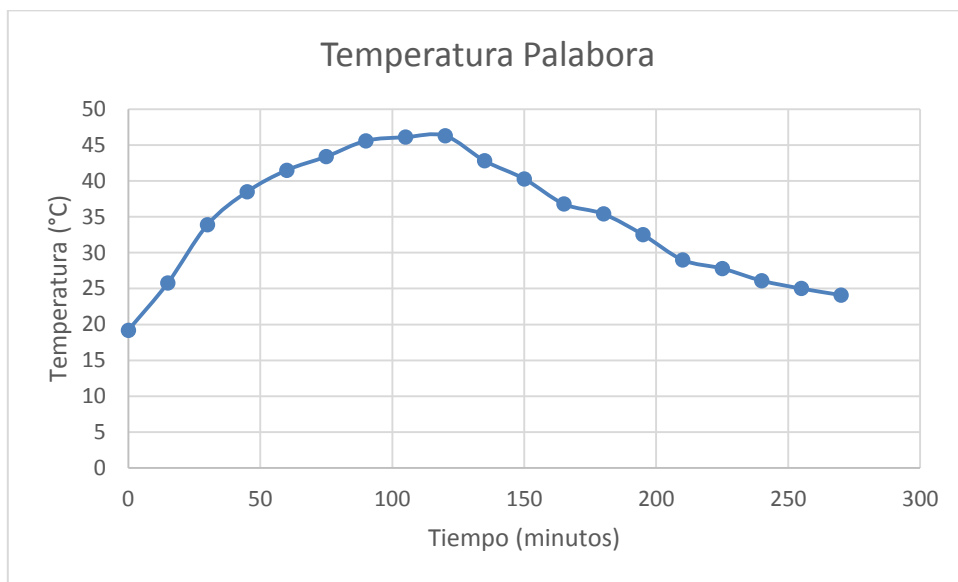
También en la Figura 8.5, se observa la solución antes de ser sometida al ataque, donde claramente se puede observar la efervescencia de esta. Efervescencia que aumenta considerablemente con el tiempo. En la imagen de la derecha se ve la solución luego de ser sometida al fuego. Además, en esta imagen se observa un tono verdoso y la mayor parte de la solución se observa decantada.



**Figura 8.5: Antes y después de la muestra CM de ser sometida al NAG.**

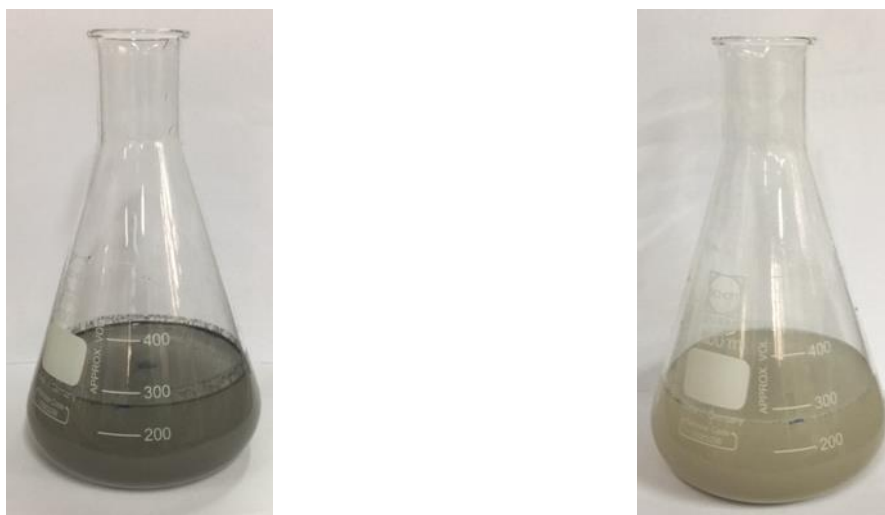
En el Gráfico 8.4, se presenta la variación de la temperatura de la muestra de Palabora. Se puede observar que la temperatura no aumenta de manera espontánea como es en los casos anteriores o las muestras que entregan un resultado más ácido. La temperatura aumenta de manera lenta al ser colocada a la plancha. Además, se observa una que otra burbuja después de ser colocada a la temperatura, esto a la media hora de ser colocada en la plancha. El burbujeo alcanza su máximo a 1 hora y 15 minutos de ser colocada la

solución a la plancha. De igual manera, como se ve en el Gráfico 8.4, la temperatura máxima se alcanza a las dos horas. La cual es de 46,3° C, luego de eso se corta la temperatura.



**Gráfico 8.4: Variación de la temperatura de la muestra de Palabora.**

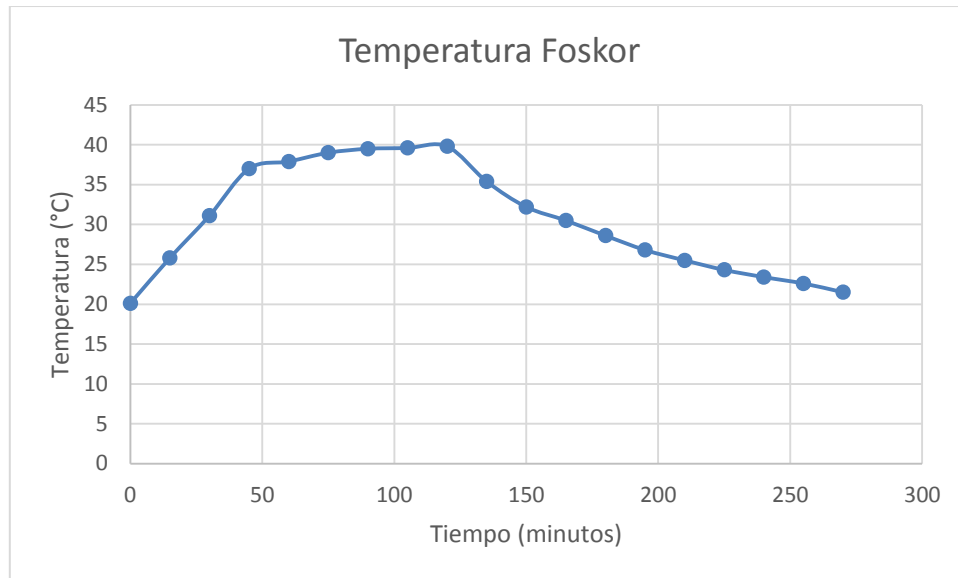
En la Figura 8.6, se observa la muestra de Palabora antes y después de ser sometida a la plancha. En la cual se puede observar un significativo cambio de color de un gris oscuro a uno gris más claro con tonos verdosos. Cabe mencionar que la solución no presentó efervescencia en su estado inicial.



**Figura 8.6: Antes y después de la muestra Palobora de ser sometida al NAG.**

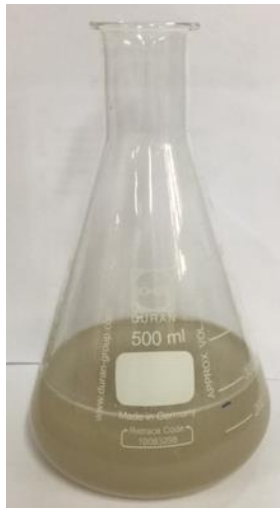
La muestra de Foskor sigue el mismo comportamiento que Palabora, el aumento de temperatura es leve como se ve en el Gráfico 8.5. La temperatura máxima se alcanza a las dos horas, la que es de 39,8 °C. Después, de eso se corta la temperatura. Además,

en esta solución se observaron muy pocas burbujas y la presencia de una espuma constante, que apareció a los minutos de ser colocada a temperatura.



**Gráfico 8.5: Variación de la temperatura de la muestra Fosfork.**

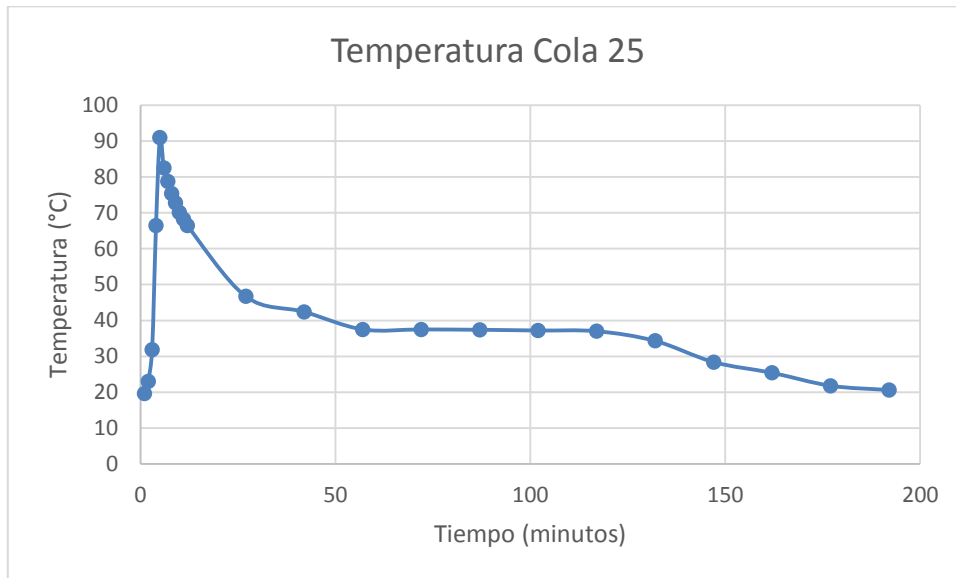
En la Figura 8.7, se aprecia la solución de Foskor antes y después de ser sometida a la plancha. Cabe mencionar que esta preparación presentó una efervescencia leve en un principio. La cual aumento con el tiempo, luego de ser puesta a temperatura. Al finalizar, se observa una espuma en la superficie como se aprecia en la imagen de la derecha.



**Figura 8.7: Antes y después de la muestra Fosfork de ser sometida al NAG.**

De manera similar a las muestras más ácidas, el burbujeo de la muestra Cola 25 empieza de manera inmediata como se aprecia en la Figura 8.8. Posteriormente, de ser más vigoroso el burbujeo se alcanza el hervor acompañado con el aumento de la temperatura como se aprecia en el Gráfico 8.6. Cabe mencionar que la temperatura máxima es alrededor de 91°C, esto a 6 o 7 minutos de iniciarse el proceso. También, es importante

mencionar que en las muestras que presentan este comportamiento, que pese a ser colocadas en la plancha luego de este hervor la temperatura de la solución no aumenta como en los otros casos.

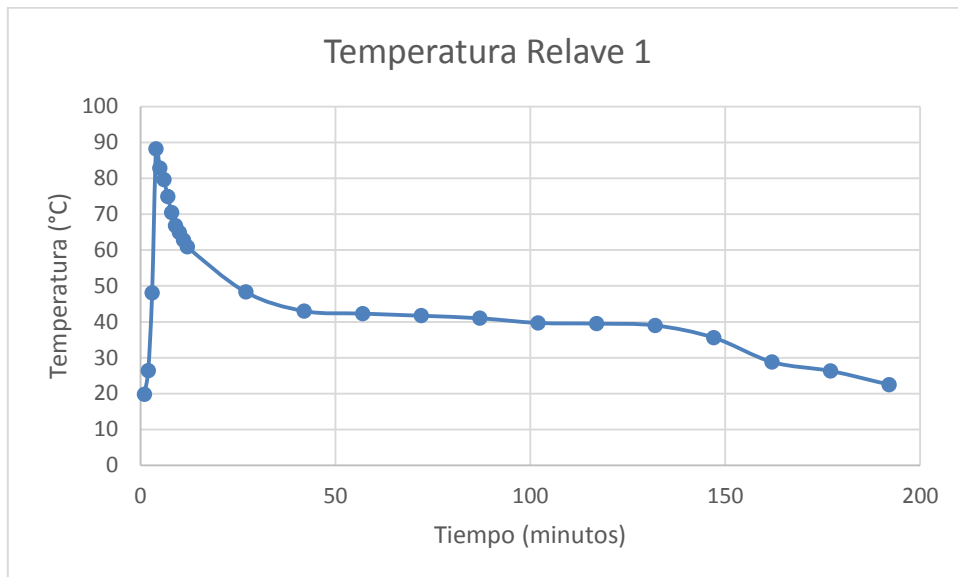


**Gráfico 8.6: Variación de la temperatura de la muestra Cola 25.**



**Figura 8.8: Antes y después de la muestra Cola 25 de ser sometida al NAG.**

En el Gráfico 8.7, se muestra la variación de la temperatura de la muestra de relave 1 durante el ataque. Se observa el mismo comportamiento que algunas pruebas anteriores con una temperatura máxima de 90,8°C a los 4 o 5 minutos de iniciarse el proceso.



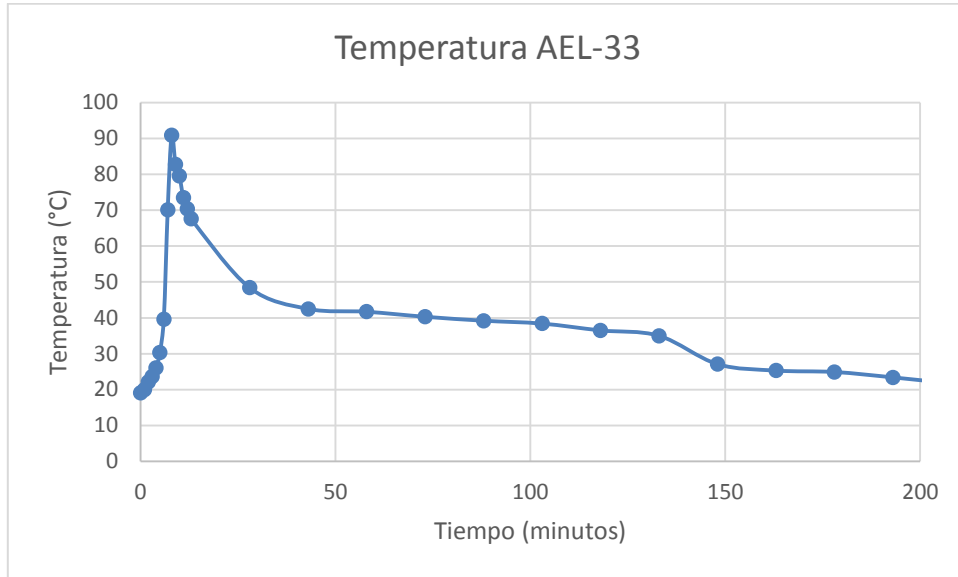
**Gráfico 8.7: Variación de la temperatura de la muestra Relave 1.**

En la Figura 8.9, se aprecia la efervescencia al inicio del proceso, la cual aumenta con el tiempo. En particular, en esta muestra la efervescencia es más pronunciada que las anteriores. Además, como se observa en la imagen de la derecha, luego que la solución es sometida a la plancha, esta sedimenta y se observa un tono verdoso como en algunos casos anteriores. Otro punto importante, de esta muestra es que fue titulada con hidróxido de sodio al 0,5 M a diferencia de las pruebas anteriores.



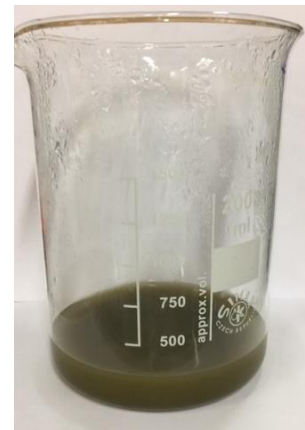
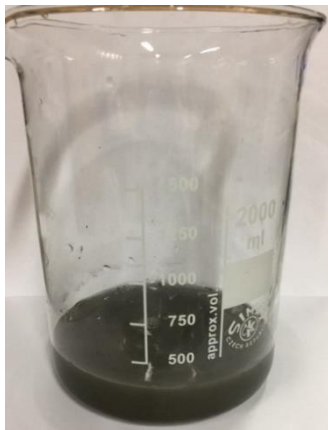
**Figura 8.9: Antes y después de la muestra Relave 1 de ser sometida al NAG.**

Como se puede observar en los resultados de AEL-33. Esta sigue el mismo patrón que la prueba inicial, con más cantidad de muestra en cuanto a la temperatura. Además, el máximo de la temperatura es similar, lo único que cambia es la cantidad de NaOH añadido para titular la solución.

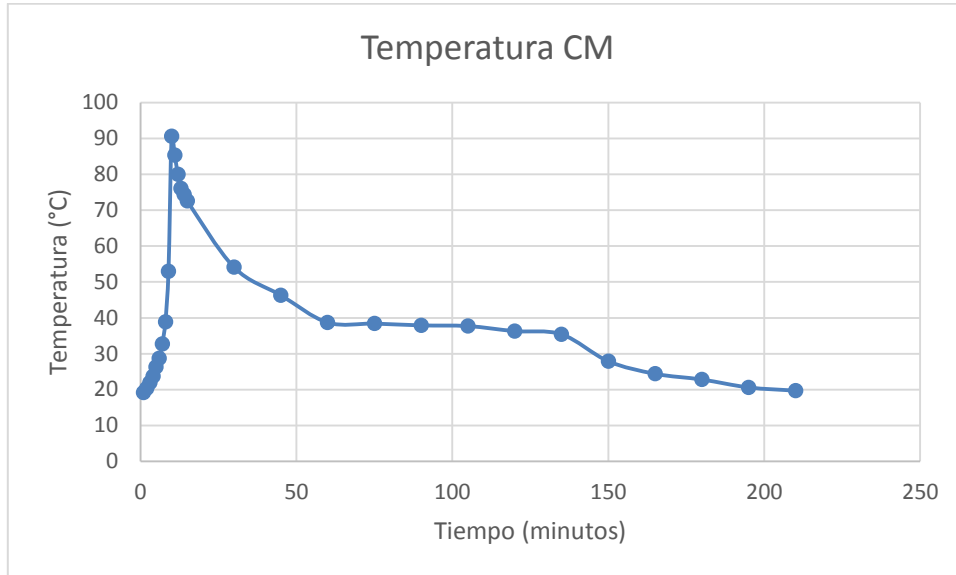


**Gráfico 8.8: Variación de la temperatura de la muestra AEL-33 (~1 gr).**

En la Figura 8.10, se observa la solución antes y después de ser sometida a temperatura. Se observa el mismo comportamiento que la prueba con más cantidad de muestra.



**Figura 8.10: Antes y después de la muestra AEL-33 de ser sometida al NAG (~1 gr).**



**Gráfico 8.9: Variación de la temperatura de la muestra CM (~1 gr).**

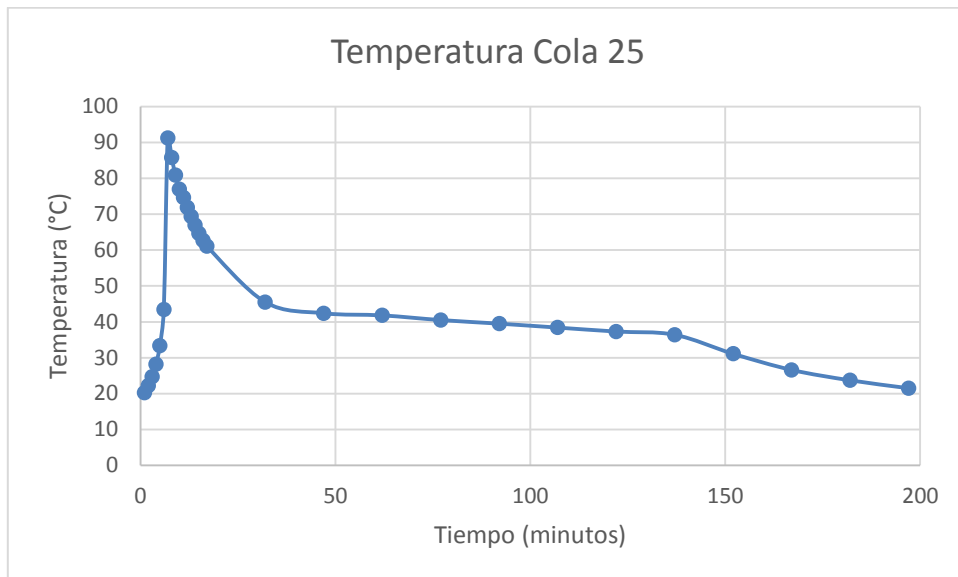
Como se aprecia en el Gráfico 8.9, el comportamiento de la temperatura es similar que la anterior y la original, con mayor muestra. Además, en la Figura 8.11, se presenta la solución CM antes y después de ser sometida a temperatura.



**Figura 8.11: Antes y después de la muestra CM de ser sometida al NAG (~1 gr).**

La prueba con menos cantidad de muestra de Cola 25 sigue el mismo comportamiento en cuanto a la temperatura, como se aprecia en el Gráfico 8.10. Se alcanza un máximo en temperatura similar que la prueba con mayor cantidad de muestra.



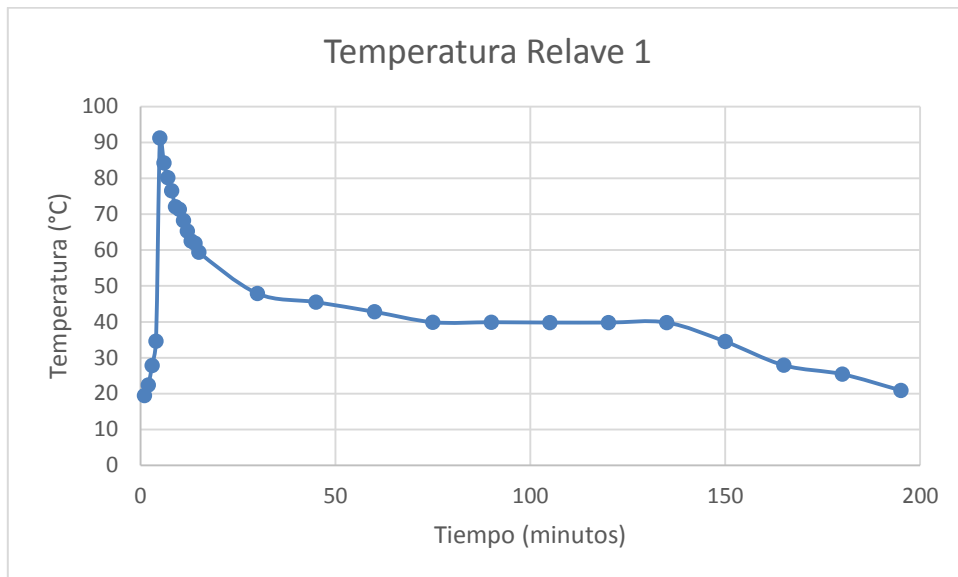


**Gráfico 8.10: Variación de la temperatura de la muestra Cola 25 (~1 gr).**

Como se puede observar en la Figura 8.12, la muestra antes de ser sometida a temperatura presenta ya una efervescencia. La cual aumenta rápidamente al aplicarle la temperatura. En cosa de minutos se alcanza el hervor. Luego del calentamiento de 2 horas, la solución presenta un tono verdoso y la mayor cantidad del material sedimentado.

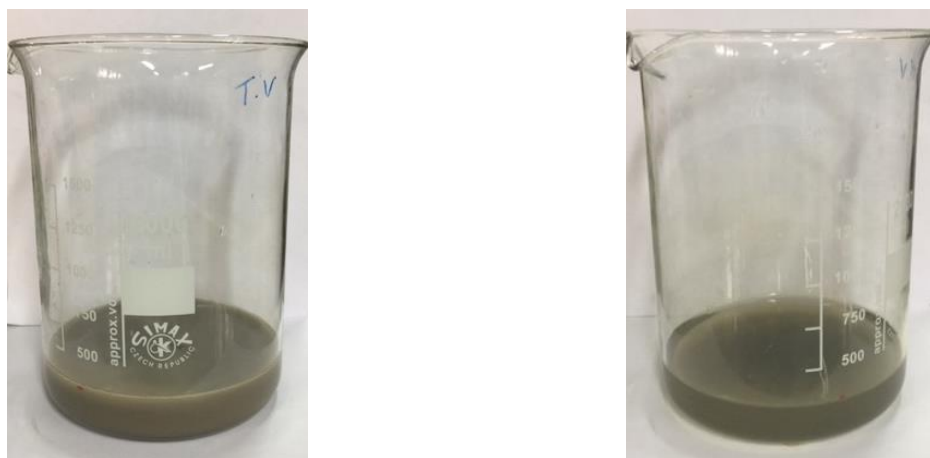


**Figura 8.12: Antes y después de la muestra Cola 25 de ser sometida al NAG (~1 gr).**



**Gráfico 8.11: Variación de la temperatura de la muestra Relave 1 (~1 gr).**

Por último la muestra de relave 1 sigue el mismo comportamiento que las pruebas anteriores en cuanto a la temperatura. La efervescencia aumenta junto con la temperatura. En el Gráfico 8.11, se observa la temperatura y en la Figura 8.13, la solución antes y después de ser sometida a la plancha. Además, igual que la prueba original, en esta muestra se puede observar la efervescencia en el estado inicial, la cual aumenta rápidamente. Por último, esta es la única titulada con NaOH 0,5 M.



**Figura 8.13: Antes y después de la muestra Relave 1 de ser sometida al NAG (~1 gr)**

### 8.1.2.2. ABCC

En la Figura 8.14, se presenta la muestra ACL-49 antes de ser titulada.



Figura 8.14: Test ABCC de la muestra ACL-49.

En la Figura 8.15, se presenta la muestra AEL-33.



Figura 8.15: Test ABCC de la muestra AEL-33.

En la Figura 8.16, se presenta CM, la cual no se tituló debido que su pH fue muy bajo, menos de 2,8 (2,51).



Figura 8.16: Test ABCC de la muestra CM.

A continuación, se exhibe en la Figura 8.17, la muestra de Palabora antes de ser titulada.



**Figura 8.17: Test ABCC de la muestra Palabora.**

En la Figura 8.18, se aprecia Foskor antes de ser titulada lentamente con ácido clorhídrico.



**Figura 8.18: Test ABCC de la muestra Foskor.**

En la Figura 8.19, se presenta la muestra de Cola 25. Esta obtuvo un ANC de 0 con el ABA y presenta un gran PA, pero el  $pH_0$  del ABCC no alcanza a ser tan ácido como las muestras de Relave 1 y tailing CM.



**Figura 8.19: Test ABCC de la muestra Cola 25.**

Finalmente, en la Figura 8.20, se presenta la muestra de Relave 1 la cual tampoco se titula como CM. Lo anterior debido que su  $pH$  fue el más bajo de todas las muestras de 2,31, a pesar de poseer un ANC de 7,48 Kg  $CaCO_3/t$  similar a AEL-33. Además, el  $pH$  NAG de esta, también es el más bajo de todas. De igual manera los NAG y NAP, en Kg  $H_2SO_4/t$  y Kg  $CaCO_3/t$  respectivamente, son los más altos de todas las pruebas.



Figura 8.20: Test ABCC de la muestra Relave 1.

## 8.2. Cotización test y reactivos

A continuación, se presentan los valores de los test NAG, ABA y ABCC de laboratorios reconocidos en Chile y los tiempos de demora para la obtención de los resultados. En la Tabla 8.1, se presenta la cotización de los distintos test en el laboratorio AGQ [39], este es el segundo más barato y el único que realiza todos los test.

Tabla 8.1: Costos laboratorio AGQ.

Laboratorio AGQ			
Test	Costos (Pesos)	Tiempo (días)	Características
NAG	\$ 55.000	15	pH NAG, NAG 4,5 ; NAG 7,0
ABA	\$ 64.000	15	Potencial de Neutralización, Potencial de Acidez, Potencial Máximo de Acidez, Fizz Rating, pH Pasta, Especiación de Azufre
Test ABCC	\$ 100.000	15	pH Vs. Potencial de Neutralización (KgCaCO <sub>3</sub> /T)

En la Tabla 8.2, se presentan los costos del laboratorio ALS [40], el que presenta los costos más baratos, sin embargo, no realiza el ABCC.

Tabla 8.2: Costos laboratorio ALS.

Laboratorio ALS			
Test	Costos (Pesos)	Tiempo (días)	Características
NAG	\$ 20.799,3	15	-
ABA	\$ 54.078,18	15	-
Test ABCC	-	-	No lo realizan

En la Tabla 8.3, se presentan los valores de los test realizados por el laboratorio SGS [41], el que es el más caro de todos, además, no realiza el ABCC ni tampoco informó los tiempos de obtención de los resultados.

Tabla 8.3: Costos laboratorio SGS.

Laboratorio SGS			
Test	Costos (Pesos)	Tiempo (días)	Características
NAG	\$ 130.614,69	-	-
ABA	\$ 163.268,36	-	-
Test ABCC	-	-	No lo realizan

La Tabla 8.4, presenta los costos del laboratorio CESMEC [42], los cuales son los segundos más costosos, además, igual que la mayoría de los laboratorios no realiza la prueba ABCC.

Tabla 8.4: Costos laboratorio CESMEC.

Laboratorio CESMEC			
Test	Costos (Pesos)	Tiempo (días)	Características
NAG	\$ 117.553,22	15	-
ABA	\$ 117.553,22	15	Test de ABA incluye determinaciones de S total, CO <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> , pH y reportes de potencial de Neutralización, Potencial de Máximo de acidez y Potencial Neutral Neto.
Test ABCC	-	-	No lo realizan

A continuación, se presentan los costos asociados a los reactivos del laboratorio Merck [43], esto en la Tabla 8.5.

Tabla 8.5: Costos reactivos Merck.

Reactivo	Costo	Cantidad
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 30%	\$ 26.448	1 L
NaOH (Pellet)	\$ 18.600	1 Kg
HCL 37%	\$ 18.711	2,5 L

### 8.3. Cálculo de costos

Para el cálculo del costo del test NAG se consideraron los costos de los reactivos cotizados en Merck [43]. De los que se procedió a calcular el costo por ml y por gr como se aprecia en la Tabla 8.6, es decir, se divide el costo por la cantidad y se obtiene el costo por ml o por gr.

Tabla 8.6: Costo de los reactivos por ml del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y por gr del NaOH

Reactivo	Costo	Cantidad	Cantidad	Costo/ml o costo/gr
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 30%	\$ 26.448	1 L	1.000 L	26,45
NaOH (Pellet)	\$ 18.600	1 Kg	1.000 gr	18,6
NaOH 0,5M	\$ 186	0,5	500 L	0,37
NaOH 0,1M	\$ 74,4	1 L	1.000 L	0,07

Cabe mencionar que el costo asociado al NaOH corresponde al costo de la solución al considerarse que está preparada en el laboratorio. Para lo cual se ocupan 4 gr y 10 gr del NaOH en pellet, para preparar dos soluciones de 0,1M y 0,5M, esto considera el peso molecular del NaOH de 40 gr/mol. En la Tabla 8.7, se aprecia el costo asociado al peróxido de hidrógeno usado en cada prueba al momento de titular.

Tabla 8.7: Costos asociados al peróxido de hidrógeno.

Muestra	Etapas de prueba	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 30% [ml]	Costo [\$]
Cauquenes	Normal	125,00	3.306,00
ACL-49	Normal	125,00	3.306,00
AEL-33	Normal	125,00	3.306,00
	Menos muestra	125,00	3.306,00
Tailling CM	Normal	125,00	3.306,00
	Menos muestra	125,00	3.306,00
Foskor	Normal	125,00	3.306,00
Palabora	Normal	125,00	3.306,00
Cola 25	Normal	125,00	3.306,00
	Menos muestra	125,00	3.306,00
Relave 1	Normal	125,00	3.306,00
	Menos muestra	125,00	3.306,00

De manera similar en la Tabla 8.8, se encuentran los costos asociados al hidróxido de sodio agregado a las pruebas para titular hasta pH 7,0. Este costo se obtiene al multiplicar el costo por ml del NaOH de la Tabla 8.6 con el volumen agregado de la Tabla 8.8.



**Tabla 8.8: Costos asociados al hidróxido de sodio.**

Muestra	Etapa de prueba	NaOH 0,5M [ml]	Costo [\$]	NaOH 0,1M [ml]	Costo [\$]
<b>Cauquenes</b>	<b>Normal</b>			8,50	0,63
<b>ACL-49</b>	<b>Normal</b>			2,50	0,19
<b>AEL-33</b>	<b>Normal</b>			52,00	3,87
	<b>Menos muestra</b>			43,00	3,2
<b>Tailling CM</b>	<b>Normal</b>			100,00	7,44
	<b>Menos muestra</b>			72,10	5,36
<b>Foskor</b>	<b>Normal</b>			0,00	0,00
<b>Palabora</b>	<b>Normal</b>			0,00	0,00
<b>Cola 25</b>	<b>Normal</b>			135,00	10,04
	<b>Menos muestra</b>			78,75	5,86
<b>Relave 1</b>	<b>Normal</b>	40,40	15,03		
	<b>Menos muestra</b>	25,70	9,56		

Finalmente, se suman los tres costos anteriores y se calcula el costo total por NAG, el que se presenta en la Tabla 8.9, junto con la suma total.

**Tabla 8.9: Costo total asociado al NAG.**

Muestra	Etapa de prueba	Costo suma [\$]
<b>Cauquenes</b>	Normal	3.306,63
<b>ACL-49</b>	Normal	3.306,19
<b>AEL-33</b>	Normal	3.309,87
	Menos muestra	3.309,20
<b>Tailling CM</b>	Normal	3.313,44
	Menos muestra	3.311,36
<b>Foskor</b>	Normal	3.306,00
<b>Palabora</b>	Normal	3.306,00
<b>Cola 25</b>	Normal	3.316,04
	Menos muestra	3.311,86
<b>Relave 1</b>	Normal	3.321,03
	Menos muestra	3.315,56
	<b>Suma NAG</b>	39.733,18

Después, se calcula la media, con un promedio simple de los costos anteriores, el que entrega un valor de \$3.311,10 pesos. Cabe mencionar que el costo de la etapa inicial no fue apreciado por ser considerado una inversión, lo mismo que el costo de adquisición de los equipos.

Para el cálculo del gasto asociado al ABCC se procede de la misma manera, primero, se calcula el costo asociado al ácido clorhídrico por ml. Luego, este valor se multiplica por la cantidad de ml utilizado (4,14 ml) para preparar las soluciones de 0,1 M, 0,5 M. Finalmente, se saca el costo por ml de estas soluciones como se aprecia en la Tabla 8.10

Tabla 8.10 Costo reactivo por ml del HCL.

Reactivo	Costo	Cantidad L	Cantidad ml	Costo/ml
HCL 37%	\$18.711	2,5	2.500	7,48
HCL 0,1M	\$30,99	0,5	500	0,06
HCL 0,5M	\$30,99	0,1	100	0,31

Posteriormente, igual que en el NAG se procede a calcular el costo asociado a cada ABCC en base al ml utilizado para titular como se observa en la Tabla 8.11.

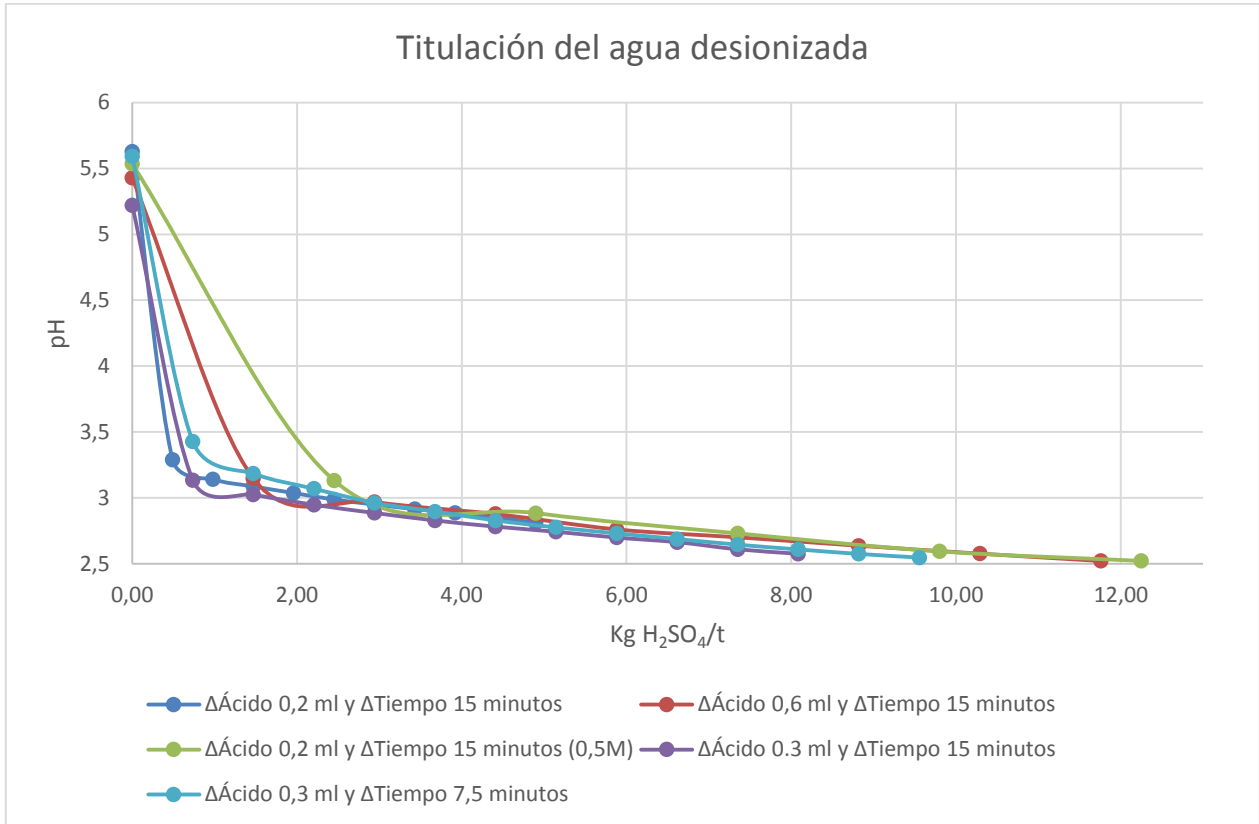
Tabla 8.11: Costo de cada ABCC de las pruebas realizadas.

Muestra	ABCC	HCL 0,5M [ml]	Costo [\$]	HCL 0,1M [ml]	Costo [\$]	Costo suma [\$]
Cauquenes	Normal			7,80	0,48	0,48
ACL-49	Normal			6,90	0,43	0,43
AEL-33	Normal			6,00	0,37	0,37
Tailling CM	Normal			0,00	0,00	0,00
Foskor	Normal			29,4	1,82	1,82
Palabora	Normal	34,60	10,72			10,72
Cola 25	Normal			0,00	0,00	0,00
Relave 1	Normal			0,00	0,00	0,00
					<b>Suma ABCC</b>	<b>13,83</b>

De manera similar se calcula el valor promedio de un ABCC, el que es de \$1,73 pesos.

#### 8.4. Titulación del agua desionizada

En el Gráfico 8.12, se presenta la titulación del agua con las concentraciones, tiempos e incrementos con los que se efectuaron las muestras de ABCC. Esto sirve para comparar como base para la titulación efectuada en las pruebas, donde se puede apreciar que el pH promedio del agua desionizada es aproximadamente 6.



**Gráfico 8.12: Titulación del agua.**

Lo importante de notar en el Gráfico 8.12, es el rápido descenso del pH en el agua a medida que se añade el ácido y como un menor tiempo de espera provoca un descenso mayor del pH. Además, esto permite comparar y verificar el comportamiento de capacidad de neutralización ácida de la muestra.