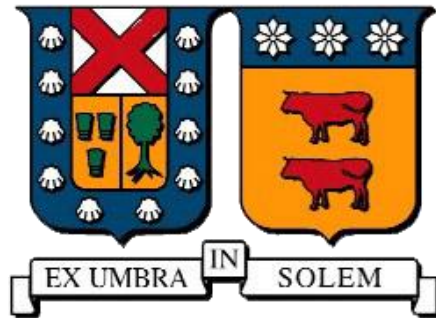


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA
Y DE MATERIALES**



**DESARROLLO DE GEOPOLÍMERO EN BASE A RELAVE DE
COBRE PARA SUPRESIÓN DE POLVO EN DEPÓSITOS DE
RELAVE DE LA COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO**

**Trabajo de propuesta de memoria de titulación presentado en
conformidad a los requisitos y reglamentos requeridos para
obtener el título de Ingeniero Civil Metalúrgico**

**Profesor Guía: Jesús Casas De Prada
Profesora Supervisora: Karim Sazo Cortés**

**BASTIÁN ALEXIS MORALES PIMENTEL
2023**

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mi familia que me ayudó durante toda esta aventura a lograr mis objetivos y superar todas las dificultades: a mi madre Francy, a mi padre Juan, a mi hermana Alejandra y mis hermanos Pablo y Claudio. También a mis abuelos y familiares cercanos.

También quisiera agradecer a los profesores y apoyos académicos del departamento de metalurgia, los cuales siempre estuvieron con buena disposición de enseñar e hicieron que las asignaturas fueran agradables y fructíferas.

Agradezco a mi profesor guía Dr. Jesús Casas, quién siempre confió en mí para alcanzar los objetivos propuestos en cada uno de los desafíos que surgieron a través del tiempo, además de siempre tener excelente disposición para atender cualquier tipo de duda o consulta.

Mención especial al profesor Hector Henao (Q.E.P.D.), quien siempre estuvo con la mejor disposición y ganas para traspasar sus conocimientos hacia sus alumnos, dejando una indudable huella en cada uno de nosotros.

Agradecer también a mi profesora guía Karim Sazo de la Compañía Minera Cerro Negro, quien siempre estuvo disponible las veces que tuve que ir a faena, ayudándome y guiándome en cada uno de los problemas.

Quiero extender mis agradecimientos a todas las personas de quien me hice amigo en la universidad, las cuales me hicieron vivir momentos que jamás olvidaré, ayudándome en todo y haciendo que cualquier tiempo libre sea un momento agradable de risas y buena amistad.

RESUMEN

El procesamiento de minerales corresponde al método para concentrar una especie de interés mediante una serie de etapas, donde están poseen procesos que generan residuos que pueden provocar un impacto medio ambiental. Uno de estos residuos se denomina relave, el cual se produce masivamente en la etapa de flotación y debe ser depositado en lugares específicos dentro de la planta: los denominados depósitos de relaves. Estos conllevan aspectos medio ambientales, donde uno de ellos corresponde la emisión de polvo.

Se desarrolló con éxito un supresor de polvo geopolimérico producido a partir de relave de cobre y cal hidráulica, el cual tiene la eficiencia de reducción de polvo de 98,8% con respecto a un relave sin tratamiento. De esta forma, este supresor de polvo logra mitigar el impacto ambiental de los depósitos de relave.

Para producir el geopolímero, la mezcla debe poseer una relación molar Si/Al de 3,7, además de una relación másica cal/relave de 1/4. Se encuentra que el impacto de estas variables ocurre cuando el tiempo de fraguado es de al menos 21 días, mientras que la variable de espesor de geopolimerización tiene un impacto solo en los primeros días de fraguado. Se observó que la exposición solar provoca un agrietamiento completo de las muestras geopoliméricas durante este proceso de fraguado, pero no disminuye la capacidad de supresión de polvo del geopolímero.

Se ha caracterizado el geopolímero desarrollado, encontrándose que posee una resistencia a la compresión de 0,4 MPa, mientras que su dureza varía según el tipo de fraguado. Por último, de los ensayos SPLP y ABA se encuentra que el geopolímero desarrollado posee una mediana estabilización de elementos químicos y que no se tiene potencial de emisión de drenaje ácido minero respectivamente.

El costo OPEX para la geopolimerización es de \$ 1.900.000 por hectárea por año, mientras que para el método de aspersión de agua, utilizado actualmente en la Compañía Minera Cerro Negro, este costo asciende a \$ 47.000.000 por hectárea por año. El consumo de agua es radicalmente menor en el método de geopolimerización. El costo operativo total de la implementación de geopolímero en los depósitos de relave de la Faena Minera Cerro Negro es de \$ 71.700.000 por año para las 38 hectáreas estimadas de relave expuesto en faena, utilizándose el método de geopolimerización in situ como forma de aplicación industrial, el cual posee un CAPEX aproximado de \$ 2.000.000.

ABSTRACT

Mineral processing is a form of extractive metallurgy that separates valuable minerals from the ore into a concentrated, marketable product, but which have processes that generate waste causing an environmental impact. One of these wastes is called tailings, which is produced massively in the flotation stage and must be deposited in specific places within the plant where the ore is being processed: the so-called tailings deposits. These cause various environmental problems, one of which is the emission of dust.

A geopolimeric dust suppressor produced from copper tailings and hydraulic lime was successfully developed, which has the dust reduction efficiency of 98.8% with respect to an untreated tailing. In this way, this dust suppressor manages to mitigate the environmental impact of tailings deposits.

To produce the geopolymer, the mixture must have an unadjusted Si/Al molar ratio of 3.7, and a hydraulic lime/tailings mass ratio of 1/4. It is found that the impact of these variables occurs when the setting time is greater than 21 days, while the geopolimerization thickness variable has only an impact on the first days of setting. It was observed that sun exposure causes complete cracking of geopolimerical samples during this setting process, but the dust suppression capacity did not decrease.

It has characterized the developed geopolymer, finding that it possesses a compressive strength of 0.4 MPa, while its hardness varies according to the type of setting. Finally, from the SPLP and ABA tests it is found that the developed geopolymer possesses a medium stabilization of chemical elements and that it has no potential for emission of mineral acid drainage respectively.

The OPEX cost for geopolimerization is \$ 1,900,000 per hectare per year, while for the method of water spraying, currently used in the Cerro Negro Mining Company, this cost amounts to \$ 47,000,000 per hectare per year. Water consumption is radically lower in the geopolimerization method. The total operating cost of the implementation of geopolymer in the tailings deposits of Cerro Negro is \$ 71,700,000 per year for the 38 hectares estimated of tailings, using the method of geopolimerization on-site as a form of industrial application, which has a CAPEX of \$ 2,000,000.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO II: ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	16
2.1. RELAVES DE COBRE	16
2.2. GEOPOLÍMEROS.....	19
2.1.1. ACTIVACIÓN ALCALINA DE SISTEMAS ALTOS EN CALCIO.....	20
2.1.2. ACTIVACIÓN ALCALINA SISTEMAS HÍBRIDOS.....	22
2.1.3. ACTIVACIÓN ALCALINA DE SISTEMAS BAJOS EN CALCIO; LOS GEOPOLÍMEROS.....	23
2.1.3.1. REACCIÓN QUÍMICA PRINCIPAL	26
2.1.4. AGENTE ACTIVANTE Y REACTIVOS.....	29
2.1.4.1. EFECTO DEL ION HIDROXILO OH^-	29
2.1.4.2. EFECTO DE LA SÍLICE.....	30
2.1.4.3. EFECTO DE LOS CATIONES.....	32
2.1.4.4. EFECTO DEL AGUA UTILIZADA.....	32
2.1.4.5. CAL HIDRÁULICA.....	33
2.1.5. PROPIEDADES EXHIBIDAS POR LOS GEOPOLÍMEROS	34
2.1.6. GEOPOLÍMEROS COMO SUPRESOR DE POLVO	36
2.3. CASO DE ESTUDIO: COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO	37
CAPÍTULO III: OBJETIVOS	40
3.1. OBJETIVO GENERAL	40
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	40
CAPÍTULO IV: TRABAJO EXPERIMENTAL	41
4.1. MOTIVACIONES DEL TRABAJO EXPERIMENTAL	41
4.2. MATERIALES A UTILIZAR.....	41
4.3. MUESTRAS A PREPARAR.....	42
4.4. ENSAYOS A REALIZAR	43
4.5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	44
4.5.1. EXPERIMENTOS PRIMERA PARTE	44
4.5.1.1. CARACTERIZACIÓN MATERIA PRIMA.....	44
4.5.1.2. PREPARACIÓN PRIMERAS MUESTRAS.....	44

4.5.1.3.	RESISTENCIA A LA EROSIÓN POR VIENTO	45
4.5.2.	EXPERIMENTOS SEGUNDA PARTE.....	47
4.5.2.1.	PRUEBA DE RESISTENCIA A LA EROSIÓN EN INTEMPERIE.....	47
4.5.3.	EXPERIMENTOS TERCERA PARTE: CARACTERIZACIÓN DE SUPRESOR DE POLVO GEOPOLIMÉRICO	48
4.5.3.1.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	48
4.5.3.2.	RESISTENCIA MECÁNICA SUPERFICIAL	49
4.5.3.3.	DENSIDAD	50
4.5.3.4.	HUMEDAD	51
4.5.3.5.	ESTABILIDAD EN AGUA.....	51
4.5.3.6.	ENSAYO SPLP	51
4.5.3.7.	ENSAYO ABA	52
4.5.3.8.	ENSAYO NAG.....	53
4.6.	EVALUACIÓN ECONÓMICA	53
4.6.1.	EXPERIMENTO DE GEOPOLIMERIZACIÓN IN SITU	54
4.6.2.	ESTIMACIONES DE EVALUACIÓN ECONÓMICA	54
CAPÍTULO V: RESULTADO Y DISCUSIONES		56
5.1.	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	56
5.2.	EXPERIMENTOS PRIMERA PARTE	57
5.2.1.	MUESTRAS PREPARADAS.....	57
5.2.2.	ENSAYO EN TÚNEL DE VIENTO	58
5.3.	EXPERIMENTOS SEGUNDA PARTE	67
5.3.1.	PRUEBA RESISTENCIA A LA EROSIÓN EN LA INTEMPERIE.....	67
5.4.	EXPERIMENTOS TERCERA PARTE: CARACTERIZACIÓN DE SUPRESOR DE POLVO GEOPOLIMÉRICO.....	74
5.4.1.	ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	74
5.4.2.	RESISTENCIA MECÁNICA SUPERFICIAL	74
5.4.3.	DENSIDAD	75
5.4.4.	HUMEDAD.....	76
5.4.5.	ESTABILIDAD EN AGUA.....	78
5.4.6.	ENSAYO SPLP.....	79
5.4.7.	ENSAYO ABA.....	80
5.5.	EVALUACIÓN ECONÓMICA Y APLICACIÓN INDUSTRIAL	82
5.5.1.	APLICACIÓN INDUSTRIAL	82

5.5.1.1.	MÉTODO I: EXTRACCIÓN MATERIAL PARA GEOPOLIMERIZACIÓN Y REAPLICACIÓN	83
5.5.1.2.	MÉTODO II: GEOPOLIMERIZACIÓN IN SITU	84
5.5.1.3.	MÉTODO III: APLICACIÓN SOLUCIÓN ACTIVADORA EN PROCESO DE DEPOSITACIÓN DE RELAVE	86
5.5.1.4.	COMPARACIÓN MÉTODOS DE APLICACIÓN: VENTAJAS Y DESVENTAJAS	87
5.5.2.	EVALUACIÓN ECONÓMICA	88
5.5.2.1.	COSTOS SUPRESIÓN DE POLVOS VÍA HUMECTACIÓN	89
5.5.2.2.	COSTOS SUPRESOR DE POLVO GEOPOLIMÉRICO	91
5.5.2.3.	COMPARACIÓN COSTOS DE MÉTODOS DE MITIGACIÓN EMISIÓN DE POLVOS	95
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES		98
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES		100
REFERENCIAS		101
ANEXO		105
ANEXO 1.	MEDICIONES DE DUREZA	105
ANEXO 2.	ESTIMACIÓN DE COSTOS OPERACIONALES PARA MÉTODOS DE SUPRESIÓN DE POLVO	106
ANEXO 3.	ESTIMACIÓN ÍNDICE MARSHALL & SWIFT	109
ANEXO 4.	ESTIMACIÓN CÁLCULO SUPERFICIE DEPÓSITOS DE RELAVE DE FAENA MINERA CERRO NEGRO	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Catastro de relaves en Chile. Fuente: Sernageomin.	16
Figura 2: Asentamiento poblacional en relave abandonado, Copiapó, 2015. Fuente: Relaves.org.....	17
Figura 3: Esquema contaminación de curso de agua cercano producto de erosión del relave [3].	17
Figura 4: Inventario Emisiones de relaves en estudio Andacollo, modelo de la Unión Europea. De A hasta E: Relaves. F y G: colegios [4].	18
Figura 5: Diagrama ternario $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ [17].	20
Figura 6: Estructura tobermorita. Adaptado desde [16].....	21
Figura 7: Modelo de estabilidad de geles en función del calcio presente y pH [21].	22
Figura 8: Calcinación del caolín para producción de geopolímero. Adaptado desde [18].	23
Figura 9: Efecto en la resistencia a la compresión de pretratamientos o aditivos para relaves [24].	25
Figura 10: Primera etapa geopolimerización [26].	26
Figura 11: Segunda etapa geopolimerización [26]. Se observa que el aluminato puede también participar en la reacción sustituyendo al silicato.	27
Figura 12: Estructura tridimensional del gel N-A-S-H [13].	27
Figura 13: Modelo gráfico activación alcalina de sistemas bajos en calcio [27].	28
Figura 14: Sílice soluble en escoria y en aluminosilicatos en función del pH de la solución activadora [14].	29
Figura 15: Diagrama de solubilidad del aluminio en función del pH [14].	30
Figura 16: Recopilación estudios anteriores resistencia a la compresión v/s relación Si/Al [8].	31
Figura 17: Resistencia a la compresión de geopolímeros con distintos cationes. Comparación entre mortero sin arena, con arena de río y arena de desierto [32].	32
Figura 18: Resultados obtenidos en resistencia a la compresión vs tiempo de curado para geopolímeros con distintos tipos de aguas. PW = Agua destilada. TW = Agua corriente. SW = Agua de mar [34].	33
Figura 19: Resistencia a la compresión vs Tiempo de curado, recopilación [8].	34
Figura 20: Resistencia a la compresión vs Temperatura de curado, recopilación [8].	35
Figura 21: Resistencia a la compresión vs Relación Agua/Sólidos, recopilación [8].	35
Figura 22: Eficiencia del geopolímero para la inmovilización del arsénico [9].	36
Figura 23: Emisión de polvo materiales comunes para supresión de polvo y geopolímero. La medición de polvo de fondo tiene un valor de $0,02 \text{ mg/m}^3$. "Control" sin ningún tipo de aditivo [38].	36

Figura 24: Depósitos de relaves minera Cerro Negro. Fuente: SEA.	37
Figura 25: Ubicación estaciones de monitoreo cercanas a la minera Cerro Negro [40]. ...	39
Figura 26: Muestras de geopolímero en día 0. Elaboración propia.	45
Figura 27: Esquema de ensayo resistencia a la erosión por viento en túnel de viento. Elaboración propia.....	46
Figura 28: Túnel de viento en laboratorio y porta muestra.....	47
Figura 29: Muestras de geopolímero y relave en el depósito N°2 en minera Cerro Negro.	48
Figura 30: Máquina de tracción y una de las probetas fabricadas.....	49
Figura 31: Medidor de dureza junto con muestra fabricada en laboratorio UTFSM.....	49
Figura 32: Medidor de dureza junto con algunas muestras de supresor de polvo geopolimérico fabricadas en la faena minera Cerro Negro.	50
Figura 33: Procedimiento realizado en laboratorio para medición de densidad.	50
Figura 34: Muestras de geopolímero puestas a prueba en ensayo de humedad.	51
Figura 35: Muestras ensayo SPLP trabajadas. Izquierda: Muestra en agitación durante 18 hrs. Derecha: Filtración de soluciones.	52
Figura 36: Muestras fabricadas para estudiar método de aplicación N°2. A: Muestra 1; B: Muestra 2; C: Muestra 3; D: Vista lateral muestra 3.....	54
Figura 37: Resultados túnel de viento en día 7 de fraguado. Rve = Relave. Espr = Espesor. Elaboración propia.	58
Figura 38: Resultados ensayo túnel de viento día 21 de fraguado. Rve = Relave. Espr = Espesor. Elaboración propia.	60
Figura 39: Desarrollo de aspecto superficial que sufren las muestras cuando pasa el tiempo de fraguado. Izquierda: muestra N°1 día 7, Derecha: muestra N°2 día 21.	61
Figura 40: Promedio día 7 y 21 del porcentaje no erosionado de cada muestra en distintas velocidades en túnel de viento. Rve = Relave. Espr = Espesor. Elaboración propia.	62
Figura 41: Esquema que muestra el efecto de la cal en las propiedades mecánicas.....	63
Figura 42: Comparación entre muestra N°1 (tiempo de fraguado de 21 días) y muestra de control. Elaboración propia.....	64
Figura 43: Estimación de tasa de pérdida de masa de muestras geopoliméricas.	65
Figura 44: Eficiencia reducción de polvo muestras geopoliméricas.	67
Figura 45: Esquema de explicación de resultados de las pruebas de emisión de polvo en terreno. Elaboración propia.	68
Figura 46: Antes y después muestra N°1 en terreno.	69
Figura 47: Antes y después Muestra N°2 en terreno.	69
Figura 48: Antes y después Muestra N°3 en terreno.	70

Figura 49: Muestras de geopolímero preparada en bandeja e in situ para observación de fraguado. Día 0.	70
Figura 50: Estado de muestras preparadas para observación de fraguado y efecto de humectación después de 1 semana.	71
Figura 51: Fracturas producidas en las muestras preparadas in situ al cabo de 5 minutos aproximadamente.	71
Figura 52: Ampliación de fractura producida en muestra in situ en los primeros 5 minutos de fraguado.	72
Figura 53: Esquema que representa la diferencia en las distintas condiciones de fraguado con respecto a la humedad del geopolímero. Elaboración propia.	72
Figura 54: Esquema que muestra el efecto de grietas en la erosión por viento. Elaboración propia.	73
Figura 55: Resultado ensayo de compresión realizado a muestras de supresor de polvo geopolimérico.	74
Figura 56: Resultado en boxplot de pruebas de dureza en muestra de laboratorio y de faena.	75
Figura 57: Resultados ensayos de densidad en geopolímero.	76
Figura 58: Mediciones de masa para ensayo de humedad.	77
Figura 59: Porcentaje de variación entre mediciones de humedad.	77
Figura 60: Muestras de geopolímero en vaso precipitado junto con agua. Izquierda: Muestra en el día 0. Derecha: Muestra en el día 28.	78
Figura 61: Prueba resistencia a la lluvia. Izquierda: Antes de la prueba. Derecha: Después de la prueba.	78
Figura 62: Resultados ensayo SPLP.	79
Figura 63: Esquema gráfico de aplicación de supresor de polvo geopolimérico bajo método I.	83
Figura 64: Esquema aplicación geopolímero bajo segundo método. Geopolimerización in situ.	84
Figura 65: Muestras fabricadas para investigar sobre Método II de aplicación con 10 días de fraguado. A: Primera muestra, no presenta fractura. B: Segunda muestra, presenta fractura. C: Tercera muestra, presenta fractura.	86
Figura 66: Esquema disposición de relave en Tranque de Relaves N°6 de la Faena Minera Cerro Negro. Zonas marcadas en rojo pueden ser las posibles zonas donde ingrese la solución activadora. Adaptado desde [39].	87
Figura 67: Sistema de aspersores tipo estadio en talud del tranque de relaves N°6 [49]. ..	89
Figura 68: Ajuste lineal datos Marshall & Swift [50].	109
Figura 69: Curvas de nivel Tranque de relave N°1-2. Extracto desde [56].	110

Figura 70: Dibujo Tranque de Relave N°1 y N°2 de Faena Minera Cerro Negro.	111
Figura 71: Depósito de relave N°3 con sus curvas de nivel. Extracto desde [56].	111
Figura 72: Dibujo tranque de relave N°3 de Faena Minera Cerro Negro.....	112
Figura 73: Depósito de relave N°4 con sus curvas de nivel. Extracto desde [56].	112
Figura 74: Dibujo tranque de relave N°4 de Faena Minera Cerro Negro.....	113
Figura 75: Depósito de relave N°5 con sus curvas de nivel. Extracto desde [56].	113
Figura 76: Dibujo tranque de relave N°5 de Faena Minera Cerro Negro.....	114
Figura 77: Depósito de relave N°6 con sus curvas de nivel. Extracto desde [56].	114
Figura 78: Dibujo tranque de relave N°6 de Faena Minera Cerro Negro.....	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Emisiones depósitos de relave Minera Cerro Negro proyecto a 14 años.....	38
Tabla 2: Reporte Estaciones de Monitorio para la velocidad del viento, año 2018.....	39
Tabla 3: Tabla resumen condiciones impuestas en muestras fabricadas.	42
Tabla 4: Masa de relave y cal para fabricar muestras en faena minera. Muestra de 1 a 3 corresponde a supresor geopolimérico. Muestra 4 corresponde a muestra de relave.	47
Tabla 5: Condiciones preparación muestras geopoliméricas para método II de aplicación.	54
Tabla 6: Comparación entre resultados FRX y lo presentado por Sernageomin en su catastro.	56
Tabla 7: Resultados análisis FRX cal hidráulica Soprocal 6.	56
Tabla 8: Condiciones muestras fabricadas en primera parte.....	57
Tabla 9: Resultado ensayo túnel de viento día 7.....	58
Tabla 10: Matriz de correlaciones resultados túnel de viento día 7.	59
Tabla 11: Resultados ensayo túnel de viento día 21 de fraguado para muestras.....	59
Tabla 12: Matriz de correlaciones resultados experimento túnel de viento día 21.....	60
Tabla 13. Resultados túnel de viento para muestra de control. Elaboración propia.	64
Tabla 14: Cálculo de pérdida de masa para muestras geopoliméricas y de control.	65
Tabla 15: Estimación de eficiencia en reducción de polvo de muestras geopoliméricas...66	
Tabla 16: Resultados pruebas erosión en terreno. Muestras N°1 a 3 corresponden a supresor de polvo geopolimérico. Muestra N°4 corresponde a relave (muestra control). .68	
Tabla 17: Resultados ensayo de densidad en geopolímero.	75
Tabla 18: Resultado análisis químico ensayo SPLP.....	79
Tabla 19: Contenido de azufre en depósitos de relave de la Compañía Minera Cerro Negro.	80

Tabla 20: Resultados Potencial de Acidez del relave.	80
Tabla 21: Resultados PA para muestras analizadas.....	81
Tabla 22: Resultados ensayo Sobek para determinación de potencial de neutralización.	81
Tabla 23: Resultado ensayo ABA muestra relave y geopolímero.....	82
Tabla 24: Comparación distintos métodos de aplicación industrial de supresor de polvo geopolimérico.	88
Tabla 25: Cálculo consumo de agua por humectación en CIA Minera Cerro Negro.....	89
Tabla 26: Desglose cálculo OPEX para método humectación con agua.	90
Tabla 27: Estimaciones uso de material para geopolimerización.	91
Tabla 28: Costo reactivo para geopolimerización.....	92
Tabla 29: Desglose costo OPEX para método de supresión de polvo geopolimérico.	93
Tabla 30: Resumen cálculo de área superficial y costo de geopolimerización de los depósitos de relave de la Faena Minera Cerro Negro.....	93
Tabla 31: Análisis de sensibilidad OPEX supresor de polvo geopolimérico. Valores en \$/ha/año.....	94
Tabla 32: Análisis de sensibilidad en consumo de agua de supresor de polvo geopolimérico. Valores en m ³	94
Tabla 33: Desglose costo OPEX para método de supresión de polvo geopolimérico.	95
Tabla 34: Variación OPEX de geopolímero y método actual en faena minera Cerro Negro.	96
Tabla 35: Variación en consumo de agua para distintos geopolímeros con respecto al método actual en faena minera Cerro Negro.	96
Tabla 36: Resultados medición dureza muestra geopolimérica de laboratorio.	105
Tabla 37. Resultados medición dureza muestra geopolimérica de faena minera Cerro Negro.	105
Tabla 38: Cálculo costo energético para método actual en Faena Minera.....	106
Tabla 39: Cálculo costo en remuneraciones de geopolimerización.....	107
Tabla 40: Desglose costo combustible supresor de polvo geopolimérico.	107
Tabla 41: Cálculo costo energético para geopolimerización.....	107
Tabla 42: Cálculo costo en mantención de geopolimerización.	108
Tabla 43: Cálculo costo en remuneraciones de geopolimerización.....	108
Tabla 44: Resumen cálculo de área superficial de los depósitos de relave de Faena Minera Cerro Negro.....	115

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El procesamiento de minerales corresponde a una serie de pasos que se le debe realizar a un mineral para lograr extraer y concentrar la especie de interés (usualmente la que tenga mayor valor económico) desde otras especies que no son de interés denominadas ganga. En el caso del procesamiento de minerales sulfuros de cobre suele seguir la ruta de procesamiento de conminución, flotación, fundición y refinación. En el proceso de flotación se busca una separación de minerales selectiva entre la especie de interés y la ganga, donde se genera el concentrado y el relave.

El relave es un desecho minero de tamaño fino que se genera masivamente y contiene baja concentración de especies de interés. En general, los minerales que se encuentran en mayor cantidad en este desecho son la sílice (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de calcio (CaO), entre otros, mientras que los elementos más comunes en trazas (contenido inferior a 1%) son el cobre (Cu), vanadio (V), cromo (Cr) [1].

En Chile, se genera alrededor de 537 millones de toneladas anuales y se proyecta que al año 2026 se depositen en torno a 900 millones de toneladas, teniendo que ser almacenados en lugares específicos de una minera denominados depósitos de relaves [2]. Estos depósitos de relaves deben ser debidamente controlados para mitigar el impacto ambiental que puedan generar; donde, por ejemplo, este impacto puede ser por producto del drenaje minero (emisión ácida del relave producto de la oxidación de minerales sulfurados), derrumbamientos de las paredes del depósito, contaminación de los suelos y arrastre de material fino por la acción del viento, es decir, emisión de polvo [1].

La emisión de polvo es un tema importante a tratar en los depósitos de relave, dado que este material fino (partículas con un tamaño menor a 30 micrones) y arrastrado por el viento puede llevar los metales pesados contenidos en el relave a zonas cercanas, pudiendo afectar suelos, cursos de agua, asentamientos urbanos y a los mismos trabajadores de la minera [3]. Esta emisión contribuye a la saturación de polvos en localidades, donde por ejemplo, se ha encontrado que depósitos de relave contribuyen con el 37%, correspondiente a 50 toneladas al año, del inventario de emisiones en una

ciudad en Chile [4]. Para evitar este fenómeno, se debe utilizar supresores de polvo, donde comúnmente se utiliza humectación por medio de agua, polímeros que actúan como aglomerantes, sales minerales o formación de vegetación superficial [5]. Utilizar agua suele ser poco eficiente, dado que debe aplicarse con frecuencia producto de la evaporación de la misma, conllevando altos costos de material y transporte [6]. La aplicación de sales minerales, como por ejemplo bischofita, se ha encontrado efectiva para este propósito dado que se logra reducir en un 90% las emisiones de polvo, sin embargo, se desconoce el real impacto ambiental que puede tener este material [7].

En este trabajo, se propone la utilización del poco estudiado supresor de polvo geopolimérico en base a relave de cobre para ser aplicado superficialmente en un depósito de relave, para así poder reutilizar este mismo desecho minero y que actúe como un supresor de polvo económico y sustentable con el medio ambiente.

Los geopolímeros son un tipo de polímero sintético formado a partir de la reacción química que ocurre entre materiales en base a aluminosilicatos y un agente alcalino, donde se genera un producto con propiedades ligantes que confiere como resultado un material de características cementantes. El geopolímero tiene la particularidad de poder ser producido a partir de diversas fuentes, incluyéndose desechos industriales como los relaves de cobre, generando materiales para construcción más amigables con el medio ambiente que el cemento Portland ordinario [8], además de poder estabilizar elementos químicos presentes en el material base [9].

El relave de cobre a utilizar corresponde a un material presente a los depósitos de relave de la Compañía Minera Cerro Negro. Además, para que el geopolímero sea económico, se plantea utilizar agua de procesos y cal hidráulica.

A modo de conocer el comportamiento del geopolímero desarrollado, se busca realizar una serie de pruebas de laboratorio e in situ a fin de cuantificar las propiedades exhibidas y determinar su potencial aplicación para supresión de polvo. Entonces, se buscará conocer la resistencia mecánica superficial y su resistencia a la erosión por viento. Adicionalmente, se reportará propiedades como la densidad, humedad y estabilidad física en agua para las piezas que muestren mejor comportamiento.

Además, para conocer la estabilidad química que posee el supresor de polvo geopolimérico, se realizarán los siguientes ensayos normados al geopolímero que resulte con las mejores prestaciones para la aplicación: Ensayo SPLP (Synthetic Precipitation

Leaching Procedure), Ensayo ABA (Acid-Base Accounting) y Ensayo NAG (Net Acid Generation), donde el primero mide la movilidad de los analitos presentes en el material, el segundo determina la posibilidad de generar drenaje minero y el último cuantifica la acidez de este drenaje minero (de existir).

CAPÍTULO II: ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.1. RELAVES DE COBRE

Para procesar un mineral, se debe realizar una serie de pasos para lograr el objetivo de concentrar en la mayor medida la especie que se busca extraer. En el caso del procesamiento de minerales sulfuros de cobre, es decir, minerales que tienen compuestos de cobre asociados al azufre, se suele seguir la ruta de procesamiento de conminución, flotación, fundición y refinación, donde se obtienen cátodos de cobre con una pureza del 99,99%. La etapa de flotación corresponde a un proceso que busca, mediante la utilización de burbujas y las propiedades de los minerales tratados, la separación de estos de forma selectiva entre la especie de interés y la ganga, por lo que se generan dos grandes corrientes: la corriente que contiene la mayor cantidad de especie de interés se denomina concentrado, mientras que la especie que contiene la mayor cantidad de ganga se denomina relave.

De esta forma, los relaves de cobre son un tipo de desecho industrial que se genera masivamente en la minería producto de la actividad de la flotación, el cual debe ser dispuesto en los denominados depósitos de relave. Estos relaves contienen distintos minerales como por ejemplo pirita, cuarzo, etc., mientras que menas de interés como la calcopirita son recuperadas en el proceso de flotación en el concentrado.

En Chile, se tiene que existen aproximadamente 750 depósitos de relave, donde la producción anual es de 537 millones de toneladas, el cual va a ir en aumento dado la disminución de ley de mineral de cobre que se está presentando en la actualidad. El estado actual de los relaves en Chile es el siguiente:

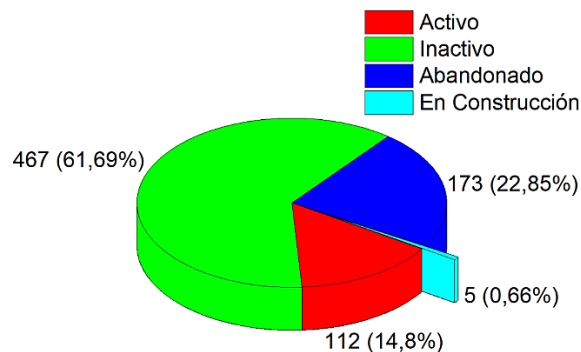


Figura 1: Catastro de relaves en Chile. Fuente: Sernageomin.

Se puede observar que existe una gran proporción de relaves abandonados, los cuales van a estar sufriendo proceso erosivo y contaminando las comunidades contiguas (véase Figura 2). Sin embargo, este proceso erosivo lo van a estar sufriendo todos los relaves que no estén sometidos a un plan de mitigación de emisión de particulado fino (PM 2,5, PM10 y PM30), y, considerando que la mayoría de los relaves en Chile tienen una topografía que favorece los vientos agresivos, resulta vital generar planes de acción para este fenómeno [10].



Figura 2: Asentamiento poblacional en relave abandonado, Copiapó, 2015. Fuente: Relaves.org.

Ejemplo de este fenómeno; en Alemania se ha llevado un estudio de un depósito de relave, en donde se observa que los minerales contenidos en el relave fueron encontrados en un curso de agua cercano, lo cual se debe a la acción del viento que arrastra material fino. Este fenómeno queda representado en la siguiente figura:

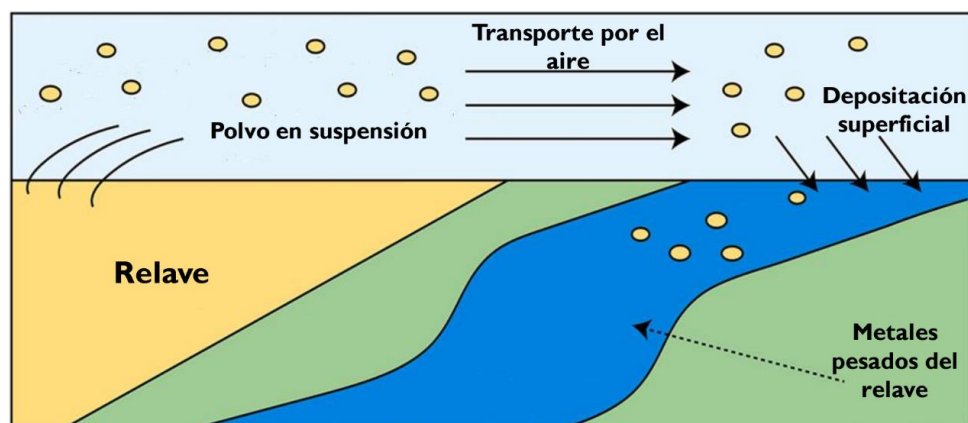


Figura 3: Esquema contaminación de curso de agua cercano producto de erosión del relave [3].

Otro estudio [4] analizó las emisiones que influyen en la saturación de material particulado PM10 en la ciudad de Andacollo, Región de Coquimbo, Chile. Se tomaron en consideración 5 depósitos de relaves, los cuales se encuentran a menos de 3 km de una zona poblada y muestras tomadas en dos colegios. La masa total de los 5 depósitos estudiados de 1,088.109 toneladas, mientras que el área total de los relaves es de 5,8 hectáreas. De esta forma, el modelamiento de las emisiones en cada zona de muestra se observa a continuación:

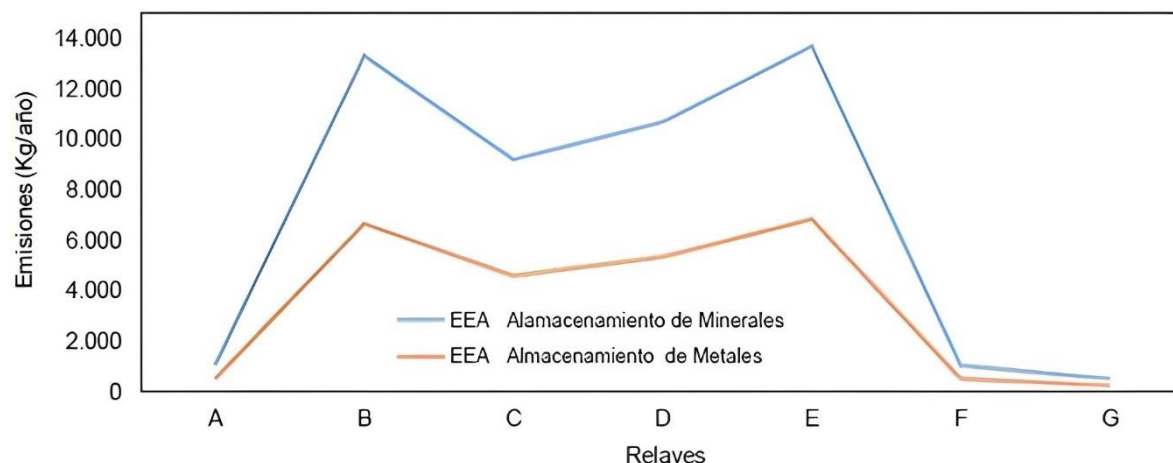
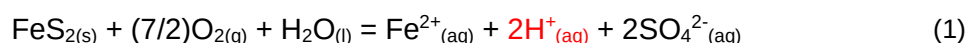


Figura 4: Inventario Emisiones de relaves en estudio Andacollo, modelo de la Unión Europea. De A hasta E: Relaves. F y G: colegios [4].

Este estudio concluye que las emisiones por año de estos relaves son de 50 toneladas, representando un 37% de todo el inventario de emisiones que se realizan en la ciudad. Además, la tasa de mortalidad, mortalidad infantil, cáncer de pulmón, próstata y al sistema respiratorio en la ciudad de Andacollo es mayor que los reportados a nivel nacional, lo cual se debe al contenido de polimetálicos en las emisiones de los relaves [4].

Cabe destacar que el drenaje minero también es un tema importante que considerar, puesto que un material que en inicio parece estable químicamente, puede estar generando un drenaje ácido debido a los sulfuros que pueden estar presentes en él, el cual es una consecuencia de procesos químicos que sufre el mineral y genera serios problemas medioambientales puesto que se genera ácido y metales lixiviados que se introduce al medioambiente [11]. De esta forma, resulta importante conocer la mineralogía del relave y, además, poder cuantificar esta emisión. Un ejemplo de reacción química generadora de ácido que sufren los relaves es la de la pirita [12]:



La anterior reacción da cuenta de la generación de ácido desde un mineral presente en el pasivo minero, donde también lo sufre minerales como la Pirrotita (Fe_{1-x}S), Enargita (Cu_3AsS_4), etc [12].

El drenaje minero dependerá del comportamiento del material para producir y consumir ácido, lo cual se puede medir mediante el ensayo ABA. En caso de producir ácido, es posible cuantificar la capacidad de emisión mediante el ensayo NAG.

2.2. GEOPOLÍMEROS

Los geopolímeros, término acuñado por Joseph Davidovits en los años 80', corresponden a materiales cementantes en base a aluminosilicatos, denominados precursores, que interaccionan químicamente con disoluciones alcalinas, denominados activadores, originándose un material endurecido y con propiedades ligantes [13], [14]. Los geopolímeros pertenecen a una clase de materiales que comúnmente se llaman materiales activados alcalinamente, los cuales pueden clasificarse en tres grandes grupos dependiendo de la composición química del sistema [14]:

- **Sistemas altos en calcio:** Estos corresponden al sistema $(\text{Na,K})_2\text{O} - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$. El material más característico de este grupo corresponde a las escorias de alto horno, las cuales contienen típicamente CaO (35 – 40%), SiO_2 (25 – 40%), MgO (5 – 12%) y Al_2O_3 (5 – 15%) [13]. En este caso se requiere condiciones moderadas de alcalinidad y el principal producto de la reacción química es un aluminosilicato cálcico hidratado, denominado gel C-A-S-H, el cual es similar al gel C-S-H obtenido en la hidratación del cemento Portland ordinario [13], [14], [15].
- **Cemento alcalino híbrido.** Corresponde a un sistema que tiene un nivel de contenido medio de CaO , específicamente entran en esta clasificación precursores con contenidos de CaO , SiO_2 y Al_2O_3 mayores a 20% [14].
- **Sistemas bajos en calcio.** Estos corresponden al sistema $(\text{Na,K})_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$. Los materiales más característicos utilizados en esta clasificación son el metacaolín y ceniza volante tipo F, es decir, aluminosilicatos con un contenido de CaO menor al 10% en masa [13]. De esta forma, también entra en esta clasificación los relaves de cobre. Para este sistema se requiere de condiciones más agresivas de alcalinidad y el principal producto de la reacción

química corresponde a un aluminosilicato alcalino hidratado, denominado gel N-A-S-H [14]. Este gel también recibe el nombre de **geopolímero**.

A continuación, se realizará una descripción general de los sistemas nombrados anteriormente, junto con una breve descripción de los precursores comúnmente utilizados. Luego, se hará una breve revisión de los factores que influyen en la geopolimerización.

2.1.1. ACTIVACIÓN ALCALINA DE SISTEMAS ALTOS EN CALCIO

Corresponde a la activación alcalina de materiales que poseen una alta cantidad de CaO en la composición química; precursores que poseen una relación Ca/(Si+Al) mayor a 1 [16], en donde el principal material utilizado es la escoria vítrea de alto horno (en inglés, GGBFS, ground granulated blast furnace slag). A continuación, se observa un diagrama ternario del sistema CaO - SiO₂ - Al₂O₃:

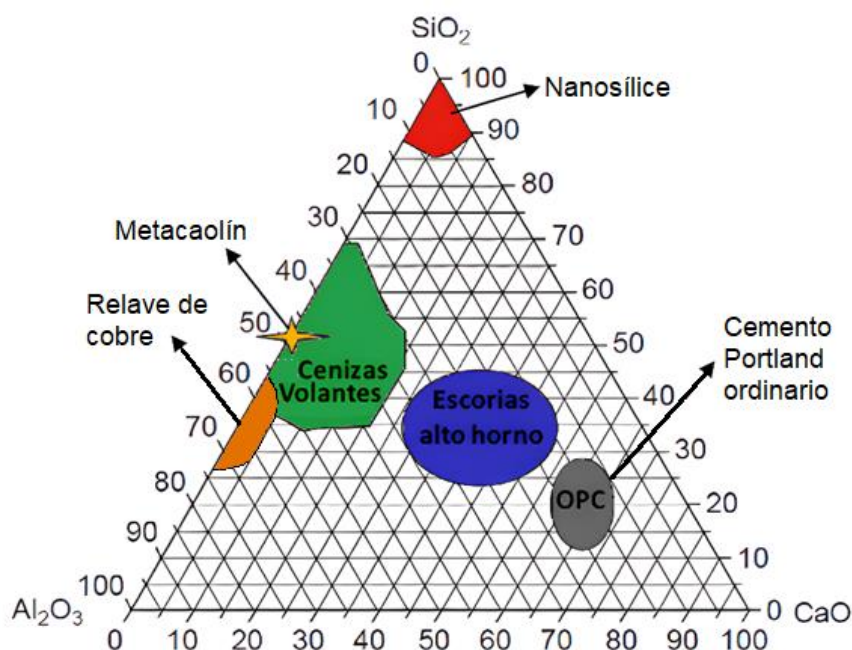


Figura 5: Diagrama ternario CaO-SiO₂-Al₂O₃ [17].

Como se puede observar, la composición másica de CaO en estos sistemas ronda el 40%, a diferencia de los sistemas con bajo contenido de CaO (metacaolín, entre otros). El producto de la reacción química de activación entre el material precursor y el activador es un aluminosilicato cálcico hidratado, llamado gel C-A-S-H, el cual es similar al gel C-S-H (silicato cálcico hidratado por sus siglas) generado en la hidratación del cemento Portland, pero con menores proporciones CaO/SiO₂, que oscila entre 0,9 a 1,2, mientras que en el

gel C-S-H esta relación de CaO/SiO_2 se eleva hasta 1,5 a 2,2 [17]. Debido a esto, la cantidad de Al (aluminio) presente en el gel C-A-S-H es mayor que en cemento Portland, por lo que conduce a un mayor grado de polimerización y mayor grado de entrecruzamiento entre los geles formados, dando lugar a minerales conocidos como tobermoritas [18]. Esta estructura se muestra en la siguiente figura:

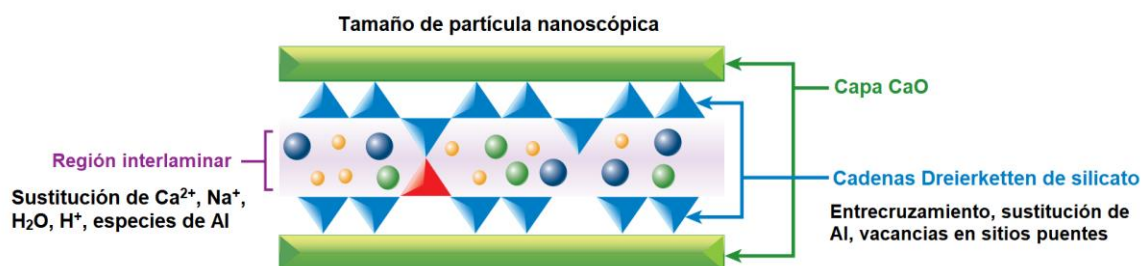


Figura 6: Estructura tobermorita. Adaptado desde [16].

En la Figura 6, se observa una ilustración de la tobermorita. Dicha estructura se constituye de cadenas de silicatos del tipo Dreierketten, es decir, la disposición de tetraedros de silicio en el espacio se repite a intervalos de tres tetraedros, de forma que existen dos que se encuentran pareados y uno que sirve de puente entre las cadenas [19]. Los triángulos denotan sitios de silicatos tetraédricos Dreierketten (el triángulo rojo denota sustitución de Al en un sitio puente), rectángulos verdes representan las capas de CaO y los círculos denotan especies presentes en el espacio interlaminar. Algunos cationes balancean la carga negativa generada cuando Al^{3+} reemplaza al Si^{4+} en las regiones tetraédrica de la cadena [18]. La incorporación de aluminio en el gel C-A-S-H es preferentemente en los sitios puente de la estructura, aunque es posible encontrar Al en la región interlaminar, sin embargo, esta fuerte preferencia del Al a sustituirse en sitios específicos impone una limitación estructural en la relación total Al/Si, el cual se restringe a un valor menor a 0,20, puesto que comienza una saturación de este elemento y una precipitación de otras fases ricas en Al que perjudica la formación de geles, pudiendo afectar las propiedades mecánicas del material [16], [18]. La incorporación del magnesio en la estructura C-A-S-H también es limitada por el radio atómico del Mg^{2+} , el cual no es afín a los sitios para el Ca^{2+} en la estructura de tobermorita [16].

La reactividad de la escoria depende fuertemente de la cantidad de fase vítrea presente, donde se recomienda valores sobre 90%, pero también se ha observado activación alcalina con cantidad de fase vítrea de 30 a 65% [14]. Sin embargo, aunque se ha observado que esta estructura vítrea es fundamental en la reactividad, no existe una

correlación exacta entre reactividad y cantidad de fase vítrea, por lo que no existe una garantía de que a mayor fase vítrea la escoria sea más reactiva [13]. De todas formas, se tiene un parámetro que permite estimar la reactividad potencial intrínseca de las escorias, el cual se denomina grado de depolimerización (DP) [13], [14], calculado por los autores Duxson y Provis en [20] según la siguiente reacción:

$$DP = \frac{n(CaO) - 2n(MgO) - n(Al_2O_3) - n(SO_3)}{n(SiO_2) - 2n(MgO) - 0,5n(Al_2O_3)} \quad (2)$$

Este parámetro típicamente tiene el valor de 1,3 – 1,5 en este tipo de escorias, en donde mayores valores indican un mayor grado de depolimerización y, a priori, una mayor reactividad del material [20]. Además, estos mismos autores indican que el tamaño de partícula es dominante en la reacción; las partículas con un tamaño mayor a 20 μm reaccionan lentamente, mientras que las que tienen un tamaño menor a 2 μm reaccionan completamente en aproximadamente 24 [h] en el material activado alcalinamente.

2.1.2. ACTIVACIÓN ALCALINA SISTEMAS HÍBRIDOS

Corresponde a cuando se activa alcalinamente precursores con contenido de CaO, SiO₂ y Al₂O₃ sobre 20%, donde los productos formados son una mezcla de diferentes tipos de geles, los cuales van a depender de las condiciones de reacción y que interactúan generando cambios estructurales y composicionales [14]. Se ha encontrado que el Ca interactúa con el gel N-A-S-H, generando un nuevo gel tipo (N, C)-A-S-H cuando este calcio reemplaza parcialmente al sodio, y que el pH influye en esta interacción; desde una cierta cantidad de calcio y un pH mayor a pH > 12 prevalece la formación del gel C-A-S-H sobre otro tipo de geles como se observa en la figura a continuación [13]:

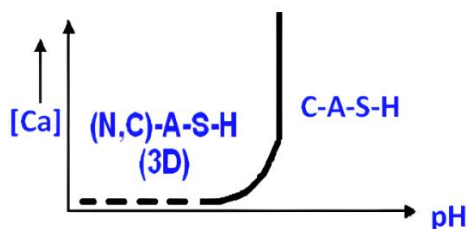


Figura 7: Modelo de estabilidad de geles en función del calcio presente y pH [21].

En presencia de calcio y a medida que progresa la reacción, el gel N-A-S-H se degenera perdiendo el aluminio y tendiendo a estructuras más depolimerizadas, aunque los

cambios a este gel N-A-S-H aparentemente no generan ningún impacto en la resistencia del material [14].

2.1.3. ACTIVACIÓN ALCALINA DE SISTEMAS BAJOS EN CALCIO; LOS GEOPOLÍMEROS

Corresponde a la activación alcalina de materiales que poseen una baja proporción de CaO, como es el caso del metacaolín o la ceniza volante tipo F (es decir, específicamente las que poseen un contenido másico de CaO menor al 10% en masa), los cuales se pueden observar en la Figura 5. También en esta clasificación se puede incluir a los relaves de cobre, los cuales contienen una composición másica de SiO₂ de 55%, CaO de 2%, Al₂O₃ 15%, entre otros [22].

El metacaolín es el producto de la calcinación del caolín (específicamente, la reacción que sufre la caolinita en el caolín) en el rango de temperatura entre 500 a 800 [°C], el cual se utiliza dado a que tiene una gran reactividad además de su fácil obtención. Sin embargo, se ha observado que si la calcinación se realiza a una temperatura menor a 400 [°C] o mayor a 950 [°C], entonces los productos no son activables alcalinamente debido a la gran cristalinidad que poseen [18]. Esto se encuentra representado en la siguiente figura:

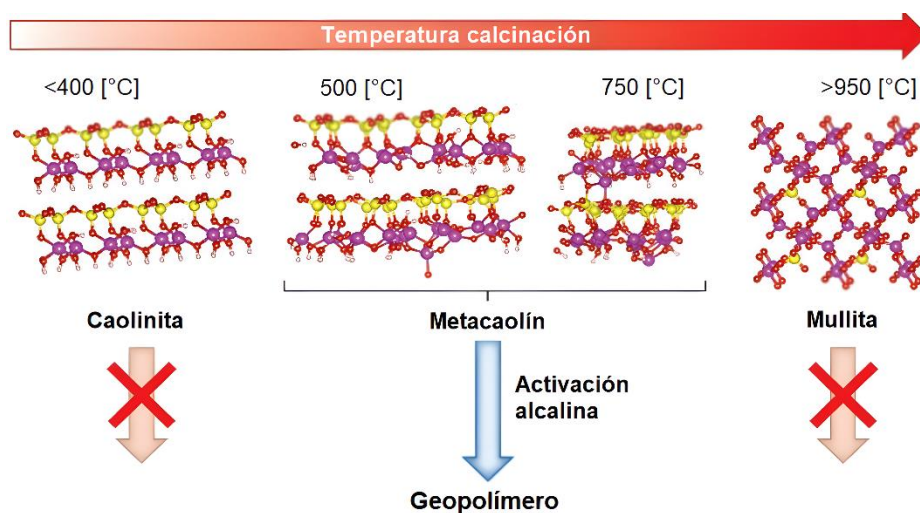


Figura 8: Calcinación del caolín para producción de geopolímero. Adaptado desde [18].

La usabilidad del metacaolín para el proceso de geopolimerización depende fuertemente del tamaño de partícula, pureza y cristalinidad de la caolinita inicial y, como regla, las partículas de metacaolín debe ser menor a 5 µm [14].

Como ventaja de uso del metacaolín, se tiene que genera emisiones de CO₂ en su producción de 5 a 6 veces menores que el proceso productivo del cemento Portland, aunque suele tener precios altos y fluctuantes al ser un producto comercial, en comparación a otros residuos industriales, pero generando geles mejor definidos dada a la alta pureza y reactividad del material [18].

La ceniza volante corresponde a un residuo sólido de las centrales termoeléctricas durante la combustión del carbón, conteniendo principalmente incombustibles asociados a este, como aluminosilicatos remanentes de los minerales asociados en el depósito del carbón, y que se obtienen por precipitación mecánica o electrostática del polvo en suspensión de gases que provienen de la combustión [13], [16], [18]. Su morfología es de esferas huecas que pueden o no contener esferas pequeñas, y consisten esencialmente en una fase vítrea con pequeñas cantidades de fases cristalinas como cuarzo, mullita y magnetita [14]. Sin embargo, su composición es altamente variable, lo cual depende del tipo de carbón utilizado, la velocidad de enfriamiento y el proceso de combustión al que fueron sometida; de todas formas, los constituyentes principales son la sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃) y óxido de hierro (Fe₂O₃) [13]. Su tamaño de partícula es variable, pero como norma general se tiene que el 50% de las partículas presentan diámetros entre 30 – 40 µm, mientras que su superficie puede variar entre 250 a 500 m²/kg y una densidad de 2300 kg/m³ aproximadamente [13].

Según la norma ASTM C618-08a, estas cenizas volantes pueden clasificarse en función de su contenido de CaO; ceniza volante tipo C, la cual contiene alta cantidad de CaO (entre 15% y 30%) y ceniza volante tipo F, con contenidos de CaO inferiores a 10% y de interés para la activación alcalina.

En términos generales, los requisitos para que la ceniza volante sea susceptible a activación alcalina son [14]:

- Tener menos de 5% de material no quemado.
- Tener menos de 10% de óxido de hierro (Fe₂O₃).
- Contenido de CaO menor a 10%
- Contenido de SiO₂ reactiva mayor a 40%
- Del 80 a 90% de las partículas bajo 45 µm.
- Contenido de fase vítrea mayor a 50%.
- Relación [SiO₂]_{reactiva} / [Al₂O₃]_{reactiva} mayor a 1,5.

En Chile, la norma NCh3520:2020 regula una serie de requisitos físicos y químicos que debe tener la ceniza volante para emplearse en la fabricación de hormigón, además de poder emplearse en fabricación de morteros y lechadas.

Los relaves de cobres también pueden ser un material activable químicamente y existen diversos estudios que demuestran las buenas propiedades que se obtienen al someterlos a activación alcalina. Sin embargo, se ha encontrado que debido a la alta cristalinidad que poseen los relaves, se tiene que es un material con una baja reactividad para generar el proceso de geopolimerización [23]. Se ha encontrado que luego de 24 hrs después del contacto con una solución alcalina solo ha reaccionado un 5%, mientras que en el caso del metacaolín y escoria reaccionan un 80% y 60% respectivamente [23]. Debido a esto, este material se suele utilizar junto con otros precursores para tener buenas propiedades. En la siguiente figura, se observa el efecto en la resistencia mecánica desarrollada por el geopolímero dado distintos tipos de pretratamientos realizados al relave de cobre:

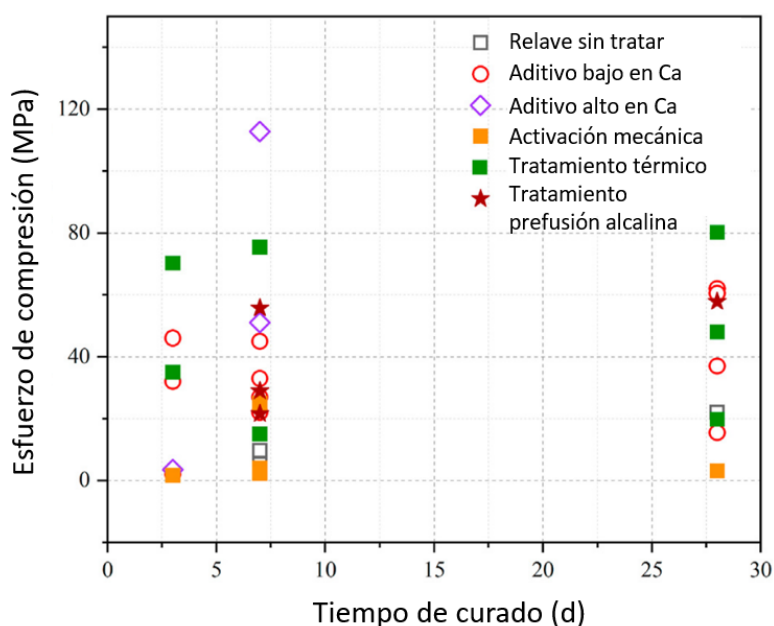


Figura 9. Efecto en la resistencia a la compresión de pretratamientos o aditivos para relaves [24].

Se observa que, en general, las grandes adiciones de calcio tienden a mejorar la resistencia mecánica, lo cual se verá más adelante (véase 2.1.4.5 CAL HIDRÁULICA). Otros tratamientos también muestran buenos resultados, sin embargo, son relativamente más caros que agregar calcio al sistema.

2.1.3.1. REACCIÓN QUÍMICA PRINCIPAL

La reacción química que ocurre en el proceso de activación alcalina en estos sistemas, llamada reacción de geopolimerización, está compuesta por tres etapas, las que según el modelo propuesto por Glukgovsky, corresponde a destrucción-coagulación, coagulación-condensación y condensación-cristalización [25]. A continuación, se realiza una breve descripción de estas etapas:

1) Primera etapa. Etapa de destrucción-coagulación.

En esta etapa ocurre una disolución del material precursor, el aluminosilicato, en sus respectivos monómeros de silicato y aluminato, representados por $[\text{Si}(\text{OH})_4]^-$ y $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ respectivamente, lo cual sucede debido al efecto que tiene los iones OH^- de romper los enlaces covalentes Si-O-Si, Al-O-Al y Al-O-Si presentes en un inicio y formando una fase coloidal. Esto solo es posible en un medio fuertemente alcalino, con pH igual o mayor a 13. Además, los cationes de metales alcalinos neutralizan la carga de los aniones resultantes, formando nuevos enlaces que evitan una reacción reversible [13], [18], [25], [26]. Esta etapa puede representarse en la siguiente figura:

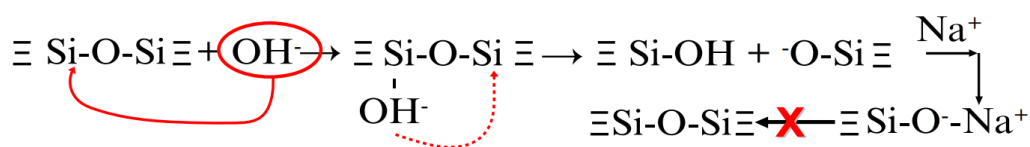


Figura 10: Primera etapa geopolimerización [26].

2) Segunda etapa. Etapa de coagulación-condensación

En esta segunda etapa se acumula los productos disgregados, generando un contacto entre ellos y formando una fase coagulada. De esta forma, se tiene que las especies $[\text{Si}(\text{OH})_4]^-$ y $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, que poseen carga eléctrica -1, son conectadas entre ellas a través del grupo OH del silicato con el ion Al del aluminato, la cual inicia un proceso de equilibrio químico, conocido como condensación, dando lugar a compuestos intermedios. Esta etapa está catalizada por los iones OH^- . La condensabilidad del ácido silícico es dependiente del pH y aumenta con este, por lo que a pH mayor a 7, la desagregación del enlace Si-O-Si da lugar a $\text{Si}(\text{OH})_4$, el cual condensa nuevos enlaces Si-O-Si y genera el dímero representado en la siguiente figura:

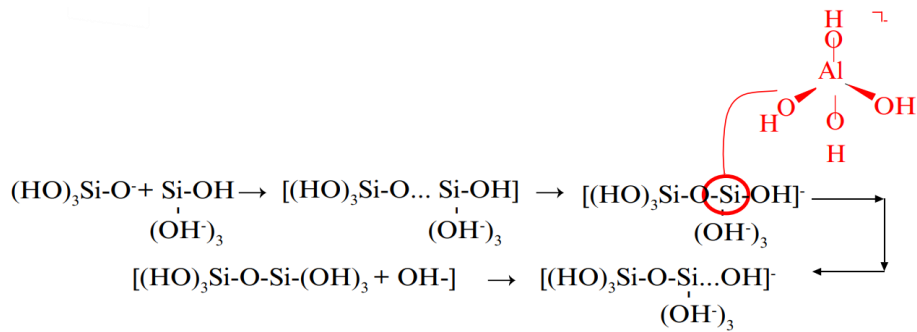


Figura 11: Segunda etapa geopolimerización [26]. Se observa que el aluminato puede también participar en la reacción sustituyendo al silicato.

3) Tercera etapa. Etapa de condensación-cristalización

En esta última etapa, las partículas presentes en el material inicial sirven para la precipitación del producto en la reacción, en donde las características de este dependerán de la mineralogía y composición química del material precursor. Los productos pueden o no experimentar cristalización. Los geles amorfos que se generan se denominan gel N-A-S-H o aluminosilicato sódico hidratado, mientras que las fases cristalinas o semicristalinas se denominan zeolitas. La estructura del gel N-A-S-H, el cual es un polímero tridimensional, se muestra en la Figura 12.

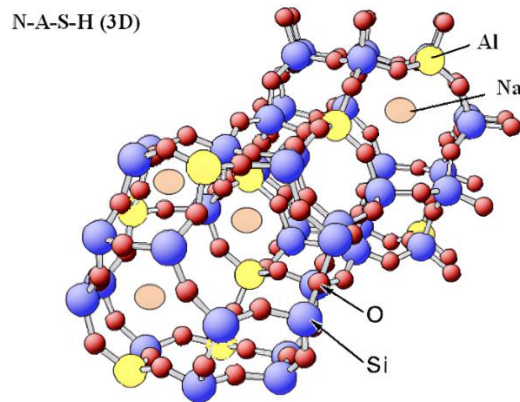


Figura 12: Estructura tridimensional del gel N-A-S-H [13].

Adicionalmente, se ha desarrollado un modelo que explica más en detalle la formación del gel N-A-S-H y la activación alcalina en sistemas bajos en calcio. Este modelo se puede observar en la figura a continuación:

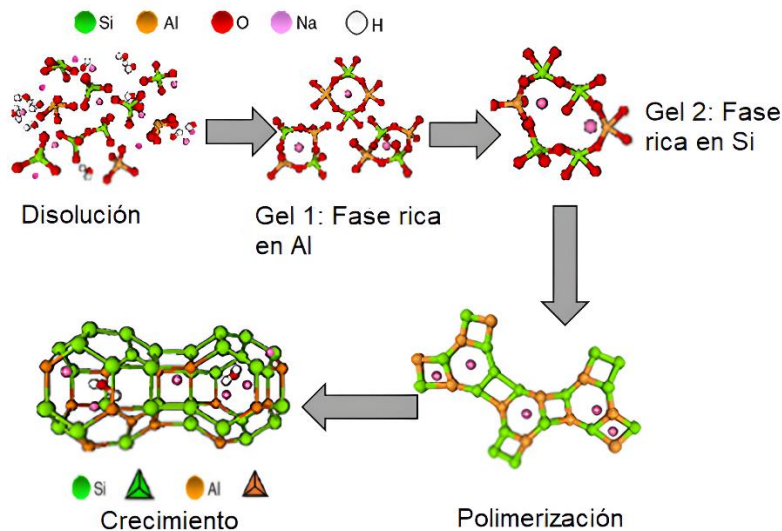


Figura 13: Modelo gráfico activación alcalina de sistemas bajos en calcio [27].

Esta representación dice lo siguiente: cuando el material precursor de aluminosilicatos es activado alcalinamente, se disuelve principalmente en los monómeros antes mencionados, silicato y aluminato. Estos monómeros interaccionan para formar dímeros, trímeros y así sucesivamente, hasta que eventualmente la solución alcanza la saturación, momento en el cual precipita el Gel 1, que corresponde a un gel N-A-S-H rico en Al, como producto intermedio de la reacción. Este gel posee una relación Si/Al de aproximadamente 1. La precipitación se explica debido a que el contenido de Al^{3+} en el medio es mayor en un inicio de la activación química (primeros minutos hasta primeras horas) que otras especies, puesto que los enlaces Al-O son más débiles que los enlaces Si-O y por tanto se disuelven más tempranamente. Mientras la reacción progresa, la cantidad de enlaces Si-O disueltos van aumentando, por lo que aumenta la cantidad de silicio en el medio y en el gel N-A-S-H, transformando este en un nuevo gel, denominado Gel 2, con una relación Si/Al de aproximadamente 2. Dicho aumento del silicio conlleva un aumento en las propiedades mecánicas de los geles de aluminosilicatos [13], [26].

Este producto resultante también recibe el nombre de Polímero Inorgánico Alcalino. Se ha observado que la temperatura de curado y el tipo de activador impactan la cinética de la reacción; a mayor temperatura de curado, mayor es el grado de reacción. Además, mayores tiempos de curado genera estructura ricas en sílice, lo que favorece las propiedades mecánicas [14]. También, se han sugerido ciertos límites para la formación de materiales resistentes, los cuales son [28]:

- Relación M_2O/SiO_2 desde 0,2 a 0,48
- Relación SiO_2/Al_2O_3 desde 3,3 a 4,5
- Relación H_2O/M_2O desde 10 a 25
- Relación M_2O/Al_2O_3 desde 0,8 a 1,6

Donde M es el elemento alcalino.

2.1.4. AGENTE ACTIVANTE Y REACTIVOS

La solución alcalina es el segundo componente esencial en el diseño del material activado alcalinamente. Dependiendo del sistema a trabajar, es decir, si es un sistema alto o bajo en calcio, se van a utilizar ciertos activadores. En los sistemas altos en calcio, se necesita una alcalinidad moderada, por lo que se opta sales débiles del tipo R_2CO_3 , R_2S o RF , donde R puede ser un ion alcalino como Na, K, Ca o Li. También se puede utilizar sales de ácido fuertes como Na_2SO_4 o $CaSO_4 \cdot H_2O$. Para el caso de sistema bajo en calcio se utiliza hidróxidos o silicatos alcalinos, como NaOH y silicato sódico hidratado [14].

Los cationes y aniones que participan en la activación alcalina tienen distintos roles en el proceso, por lo que a continuación se hará una pequeña revisión de estos:

2.1.4.1. EFECTO DEL ION HIDROXILO OH^-

Como se dijo anteriormente, los iones OH^- inducen la hidrólisis de los enlaces Si-O-Si y Si-O-Al del material, además de generar el aumento de pH para iniciar las reacciones de disolución y condensación del material precursor [14]. Cabe destacar que la solubilidad del sílice es baja en el rango de pH desde 3 a 11, pero aumenta con pH menor a 3 y sobre 11 [14], como se puede observar en la siguiente figura:

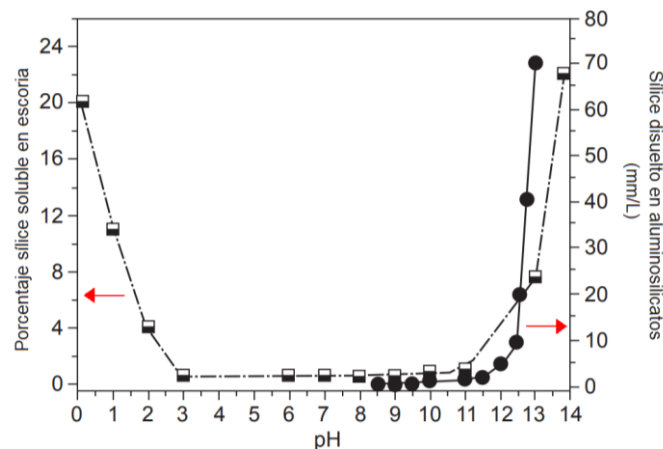


Figura 14: Sílice soluble en escoria y en aluminosilicatos en función del pH de la solución activadora [14].

Cuando aumenta la acidez del sistema al trabajar con escoria, los compuestos formados son inestables, por lo que al aumentar el pH no solo se consigue disolución del material precursor, sino que también se consigue formación de hidratos estables y el comportamiento cementante del material [14].

La solubilidad de los aluminatos también sigue con comportamiento similar que la sílice: se solubiliza a pH ácido y básico como se observa en la Figura 12. De esta figura, se tiene que en medio ácido coexisten los iones Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ y $[\text{Al}(\text{OH})_2]^+$, mientras que en medio básico prevalece el ion $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$. Esta especie es la que reacciona con la sílice disuelta, favoreciendo la polimerización y generando los geles C-A-S-H o N-A-S-H descritos anteriormente [14]. Cabe destacar la existencia de un mínimo de solubilidad que se encuentra aproximadamente a pH de 6,3 (véase Figura 15).

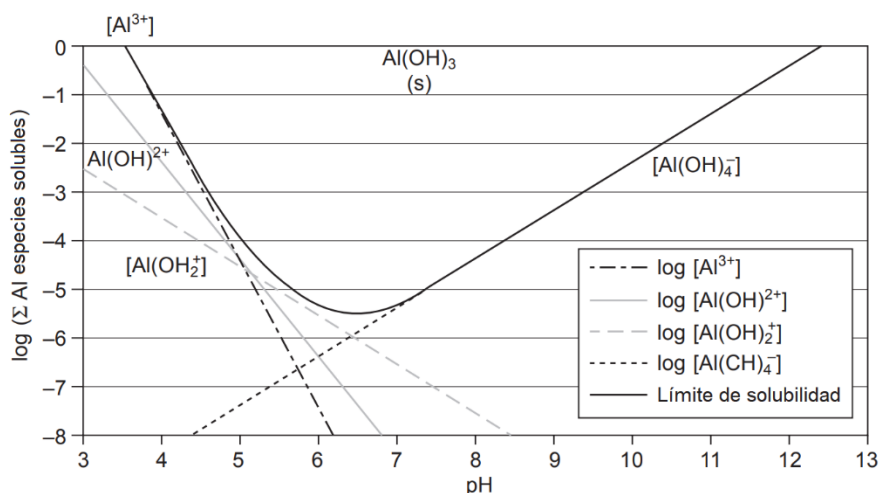


Figura 15: Diagrama de solubilidad del aluminio en función del pH [14].

En el caso de estar trabajando con sistemas alto en calcio, como por ejemplo escorias, una muy alta cantidad de iones hidroxilos puede ser contraproducente dado que el calcio es menos soluble a altos pH [14], [17], siendo este el motivo por el cual en este tipo de materiales precursores no se necesita una excesiva alcalinidad.

2.1.4.2. EFECTO DE LA SÍLICE

La presencia de silicio soluble es de vital importancia en este tipo de materiales, dado que este silicio influye directamente en las propiedades que se reportan del geopolímero puesto que afecta a los enlaces formados en la geopolimerización. El silicio disponible en el sistema no solo puede provenir del material precursor, sino que también puede estar presente en el activador que se utilice. Es posible agregar silicio soluble en forma de

silicato de sodio, además de un agente alcalino como NaOH para mantener el pH sobre 10 para que la solución tenga buena viscosidad, dando como resultado el silicato sódico hidratado *waterglass* [14]. Este es comúnmente usado dado que aumenta la cantidad de sílice soluble en el sistema, por lo que rápidamente se incorpora en la estructura N-A-S-H, favoreciendo los enlaces Si-O-Si que son más fuertes que los enlaces Si-O-Al y, por tanto, mejorando la resistencia mecánica del material [29]. Sin embargo, un exceso de silicio en la reacción puede disminuir la resistencia mecánica del material debido a que existiría fases sin reaccionar, lo que actúa como defecto en la estructura aglutinante [30]. A continuación, se presenta una compilación de información recopilada por distintos autores sobre la resistencia a la compresión a diferentes relaciones Si/Al y con distintos materiales precursores:

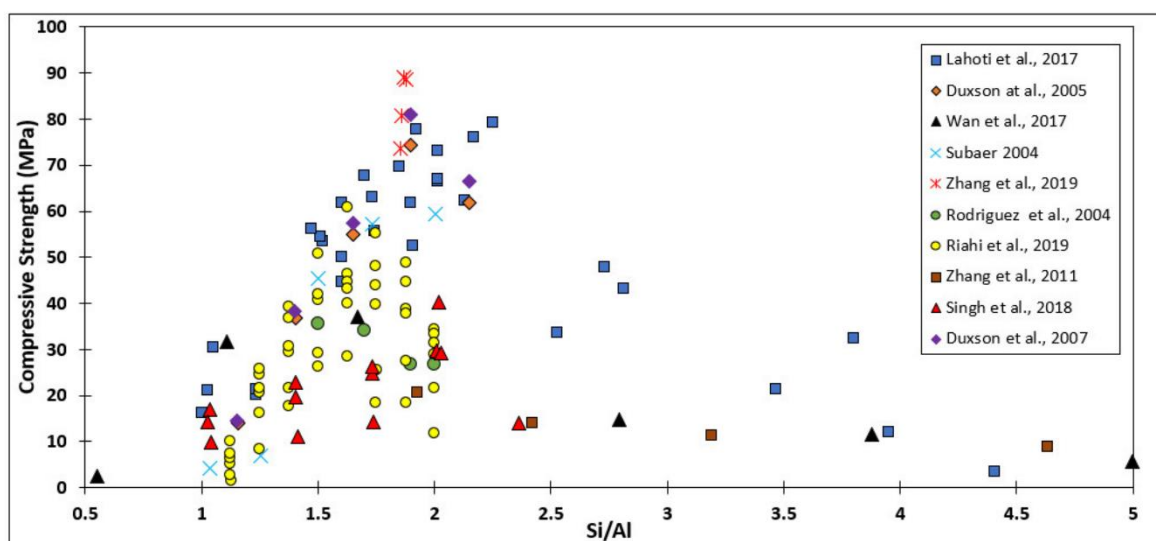


Figura 16: Recopilación estudios anteriores resistencia a la compresión v/s relación Si/Al [8].

Es posible observar cómo, en general, se obtienen las mejores propiedades mecánicas cuando la relación Si/Al es cercana a 1,9-2,1 [8], [30], [31].

Otra forma de agregar sílice soluble al sistema es mediante la adición de arena para la geopolimerización. Se ha encontrado que tanto la arena de desierto como la arena de río pueden aportar químicamente al sistema puesto que el silicio presente puede disolverse en la solución altamente alcalina, sin embargo, se debe considerar que la porosidad del geopolímero aumenta al agregar estas arenas, lo que puede generar un efecto contraproducente en la resistencia mecánica final [32]. Esto se puede apreciar en la siguiente figura:

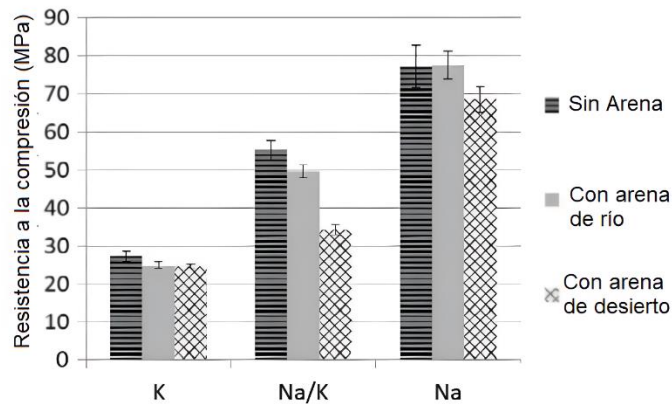


Figura 17: Resistencia a la compresión de geopolímeros con distintos cationes. Comparación entre mortero sin arena, con arena de río y arena de desierto [32].

La adición de sílice resulta fundamental cuando el material precursor presenta baja reactividad, como es el caso del relave de cobre. De esta forma, para lograr un buen resultado para este tipo de material, se debe geopolimerizar con una combinación de silicato sódico e hidróxido de sodio [8].

2.1.4.3. EFECTO DE LOS CATIONES

Los cationes presentes en el sistema, como por ejemplo el sodio y potasio, tienen un rol significativo en la activación alcalina, puesto que neutralizan la carga eléctrica que se produce cuando el tetraedro SiO_4 es reemplazado por AlO_4^- , observándose los metales alcalinos en la Figura 12 como rol estructural. Además, ayudan a evitar la reversibilidad de la primera etapa de la geopolimerización, como se observa en la Figura 10. Por lo tanto, se debe esperar que la relación Me/Al sea aproximadamente 1, donde Me corresponde a los cationes. Desde la Figura 17, es posible observar que existen diferencias cuando el catión es Na^+ o K^+ , teniendo mayores resistencias mecánicas cuando se utiliza Na^+ , lo cual se debe a que este catión es más pequeño y consecuentemente puede fluir más fácilmente a través de la estructura [14].

Sin embargo, no todos los cationes tienen efectos positivos en estos materiales. Se ha encontrado que el Mg^{+2} genera disminución de las propiedades mecánicas, lo cual se debe a la precipitación de fases con baja resistencia mecánica [33].

2.1.4.4. EFECTO DEL AGUA UTILIZADA

Para fabricar un geopolímero, es posible utilizar distintos tipos de aguas para el proceso, incluso es posible incluir agua de mar para la geopolimerización, lo cual trae distintos

beneficios; se ha encontrado que el agua de mar favorece la resistencia mecánica resultante dado que este posee mayor alcalinidad [34], lo que se observa en la siguiente figura:

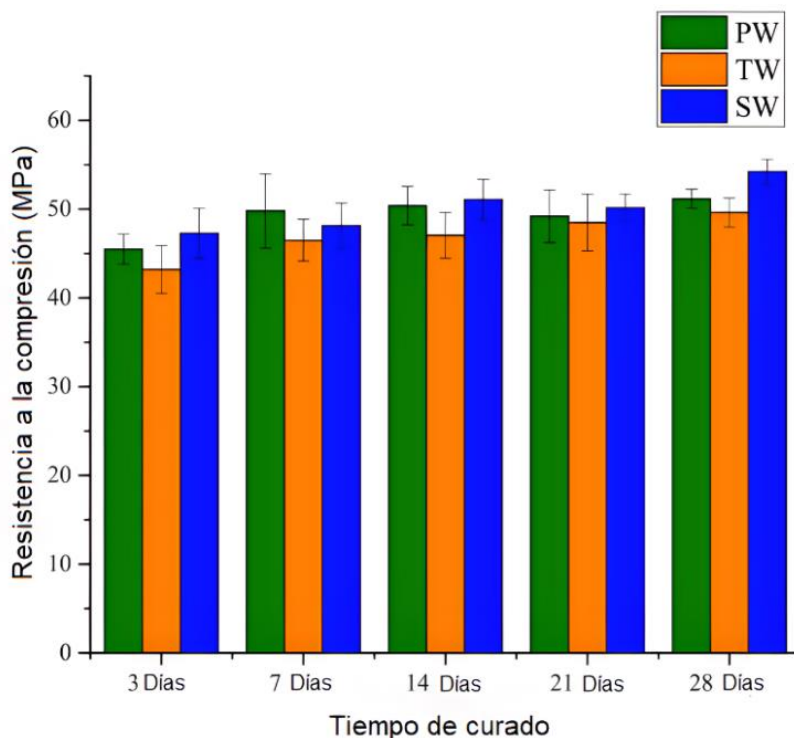


Figura 18: Resultados obtenidos en resistencia a la compresión vs tiempo de curado para geopolímeros con distintitos tipos de aguas. PW = Agua destilada. TW = Agua corriente. SW = Agua de mar [34].

Además, se ha encontrado que es posible realizar la geopolimerización a temperatura ambiente utilizando este tipo de agua con alta carga de iones, lo que resulta importante para asegurar la viabilidad económica del geopolímero [35].

2.1.4.5. CAL HIDRÁULICA

La cal hidráulica corresponde a un reactivo que se puede utilizar para producir la solución alcalina que se requiere en la geopolimerización. Es un reactivo poco utilizado para estos materiales, pero que sin embargo es bastante económico en comparación a otros reactivos como el hidróxido de sodio. La adición de este reactivo aumenta la precipitación de geles ligantes en el geopolímero, por lo que se genera una estructura menos porosa y más compacta, aumentando la resistencia mecánica [8], [36].

2.1.5. PROPIEDADES EXHIBIDAS POR LOS GEOPOLÍMEROS

Las propiedades que exhiben los geopolímeros son diversas, y estas van a depender de las condiciones en las que se realiza la geopolimerización. Entre estas condiciones, se encuentra el agente activante, tiempo de curado, temperatura de curado, material precursor, etc.

El pH que se debe alcanzar para una correcta disolución de los aluminosilicatos presentes en el material es de 13-14, lo cual se asocia al rompimiento de los enlaces químicos revisados anteriormente en este estudio. Además, el tamaño de partícula también afecta esta reacción, en donde a menor tamaño de partícula se asocia con una mayor reactividad del material [8].

Con respecto al tiempo de curado, se ha encontrado que a mayor tiempo mayor es la resistencia mecánica, lo cual se debe a una mayor cantidad de fase reaccionada. Esto se puede ver en la siguiente figura:

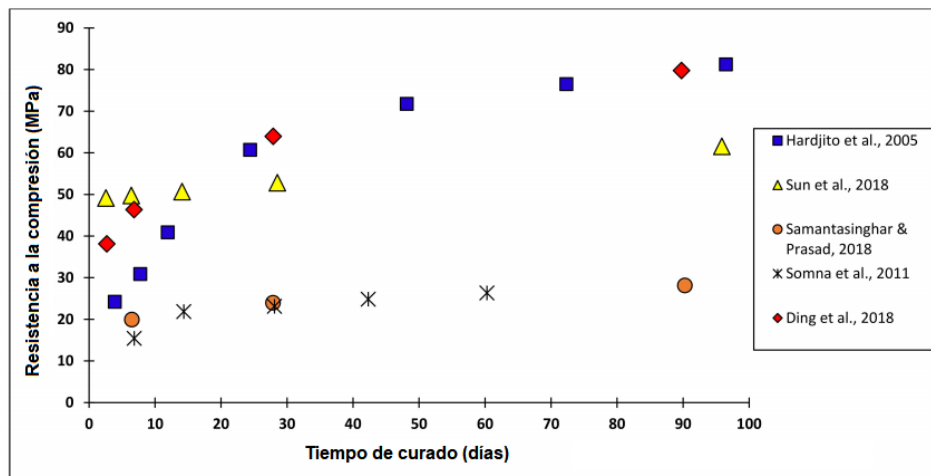


Figura 19: Resistencia a la compresión vs Tiempo de curado, recopilación [8].

Además del tiempo de curado, también se debe considerar la temperatura en la que este se realiza; puede ser desde temperatura ambiente hasta 120 °C (véase Figura 20). Similar al caso anterior, mientras mayor es la temperatura de curado mayor será la resistencia mecánica, lo cual se debe a que aumenta la cinética de las reacciones [8].

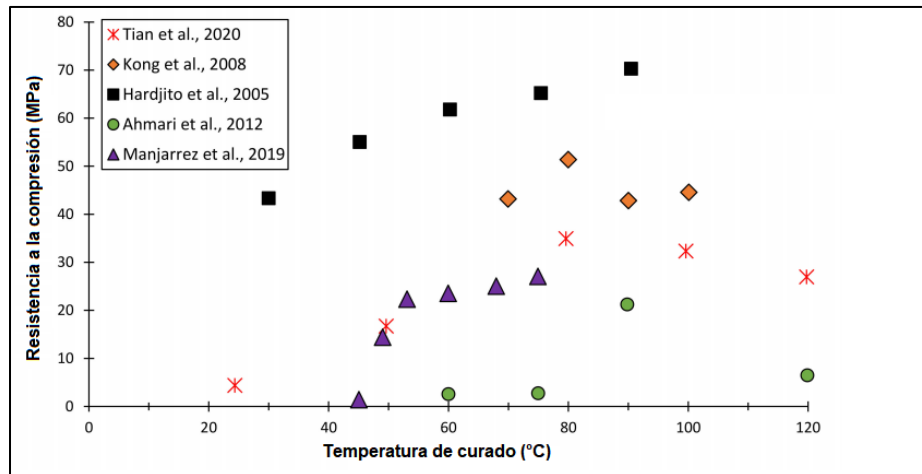


Figura 20: Resistencia a la compresión vs Temperatura de curado, recopilación [8].

También se ha encontrado que la relación agua-sólidos del material resulta importante a la hora de formar el geopolímero, donde se ha encontrado que una mayor relación agua/sólidos conlleva a una disminución en la resistencia mecánica, lo cual se debe a que aumenta la porosidad de la pieza producto de la evaporación del agua, aunque aumenta su trabajabilidad producto de que la pasta se vuelve más fluida y fácil de trabajar. La recopilación se puede observar en la siguiente figura:

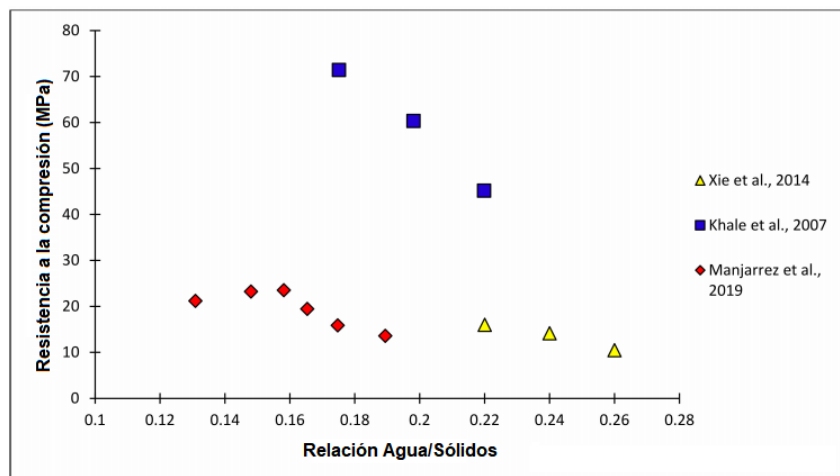


Figura 21: Resistencia a la compresión vs Relación Agua/Sólidos, recopilación [8].

Una característica importante que poseen los geopolímeros es su capacidad para lograr la inmovilización de los elementos presentes en el material precursor, como puede ser el Pb, Cu, Cr, Cd, As, entre otros. El mecanismo por el cual se ocurre la inmovilización no se conoce totalmente, sin embargo es posible medir sus efectos [37]. En el caso del

arsénico, por ejemplo, se tiene que logra una eficiencia de inmovilización de casi 100% como se observa en la siguiente figura:

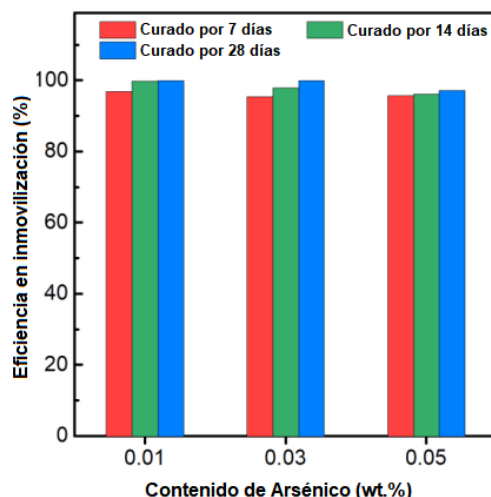


Figura 22: Eficiencia del geopolímero para la inmovilización del arsénico [9].

2.1.6. GEOPOLÍMEROS COMO SUPRESOR DE POLVO

Se ha investigado la utilización de geopolímero en base a metacaolín para la estabilización de suelos para evitar que estos emitan polvos, en donde se comparó este geopolímero contra otros tipos de supresores de polvo, como por ejemplo polímeros y bischofita. Los resultados de emisión de polvo (véase Figura 23) muestran que el geopolímero tiene una emisión de polvo PM10 de 0. Estos resultados son bastante satisfactorios para este estudio, dado que abre la posibilidad para desarrollar el geopolímero como supresor de polvo en los depósitos de relave.

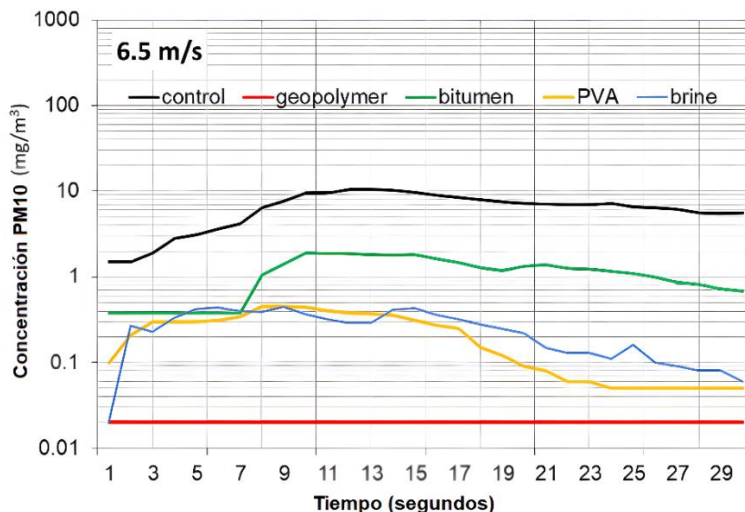


Figura 23: Emisión de polvo materiales comunes para supresión de polvo y geopolímero. La medición de polvo de fondo tiene un valor de 0,02 mg/m³. “Control” sin ningún tipo de aditivo [38].

2.3. CASO DE ESTUDIO: COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO

La compañía minera Cerro Negro se encuentra ubicada en la comuna de Cabildo, Región de Valparaíso, a unos 210 km al norte de Santiago, Chile. La minera tiene una planta de disminución de tamaño (considerando chancado y molienda), flotación, lixiviación, extracción por solventes y electroobtención, por lo que tiene la capacidad de tratar minerales sulfurados y oxidados.

La planta cuenta con 6 depósitos de relaves existentes, además de un séptimo depósito que se planea incorporar a la planta. Estos se pueden observar en la siguiente figura:

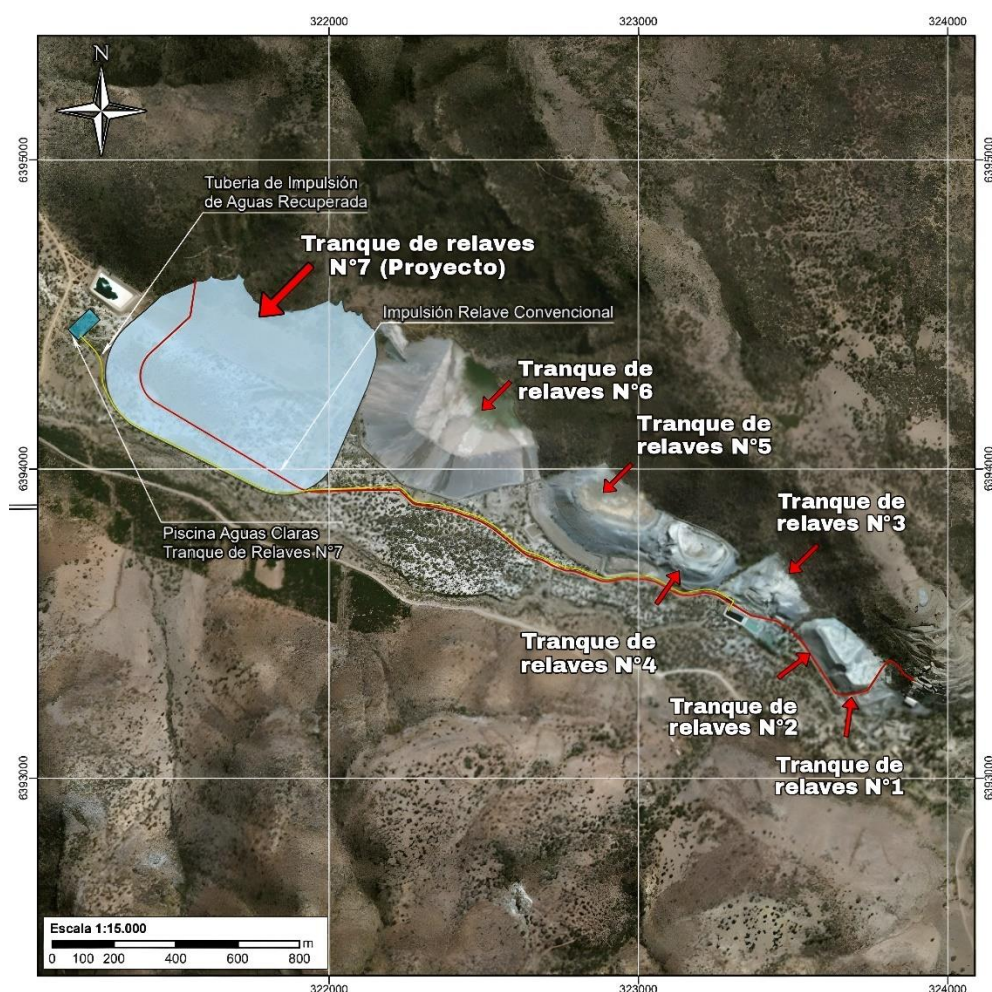


Figura 24: Depósitos de relaves minera Cerro Negro. Fuente: SEA.

Al observar el informe de evaluación entregado a la SEA en el 2018 para el proyecto “Plan de desarrollo de Largo Plazo – Compañía Minera Cerro Negro S.A.” [39], se tiene una capacidad de procesamiento nominal de 70.000 ton/mes en la línea de sulfuros (aunque

actualmente se trabaja un equivalente al 40% de la capacidad nominal para el cumplimiento de normas medioambientales), los cuales producen 2.000 ton/mes de concentrado, por lo que gran parte de este mineral inicial es depositado como relave. Luego, este nuevo relave y el existente se puede utilizar para fabricación del geopolímero como supresor de polvo. Producto de la antigüedad de los depósitos presentes en la faena minera, no se tiene un plan de mitigación acorde a las nuevas exigencias de evaluaciones ambientales, por el hecho de que antes no se tenía por obligación tener el buen manejo de este residuo, por lo que de esta forma se busca mejorar la condición de este pasivo ambiental presente en la faena por medio de la geopolimerización, desarrollando un producto que evite la erosión por viento [40]. Hasta el momento, en la faena solo se cuenta con método de mitigación en el depósito N°6, el cual consiste en humectación mediante aspersores de agua, el cual se ha reportado en la literatura que posee una eficiencia en la reducción de polvo de aproximadamente 40% [41].

De este informe, también se reporta (véase Tabla 1) las emisiones de material particulado fino PM2,5, PM10 y PM30 para los 14 años considerados en el proyecto.

Tabla 1: Emisiones depósitos de relave Minera Cerro Negro proyecto a 14 años.

Fuente	Emisión (t/año)		
	PM2,5	PM10	PM30
Erosión Tranque N°1	0,1	0,65	1,29
Erosión Tranque N°2	0,58	3,91	7,81
Erosión Tranque N°3	0,52	3,55	7,10
Erosión Tranque N°4	0,59	3,99	7,97
Erosión Tranque N°5	1,01	6,86	13,73
Erosión Tranque N°6	1,37	9,26	18,53
Erosión Tranque N°7	0 (año 1 y 2)	0 (año 1 y 2)	0 (año 1 y 2)
	5,47 (año 3-14)	37,09 (año 3-14)	74,19 (año 3-14)
Total en 14 años	124,02	840,16	1680,3

Fuente: Adaptado desde [40].

Con respecto a la velocidad del viento, se tiene los valores reportados para el año 2018 en las estaciones de monitoreo Guayacán y Portales, en donde la ubicación referencial se encuentra en la figura a continuación:

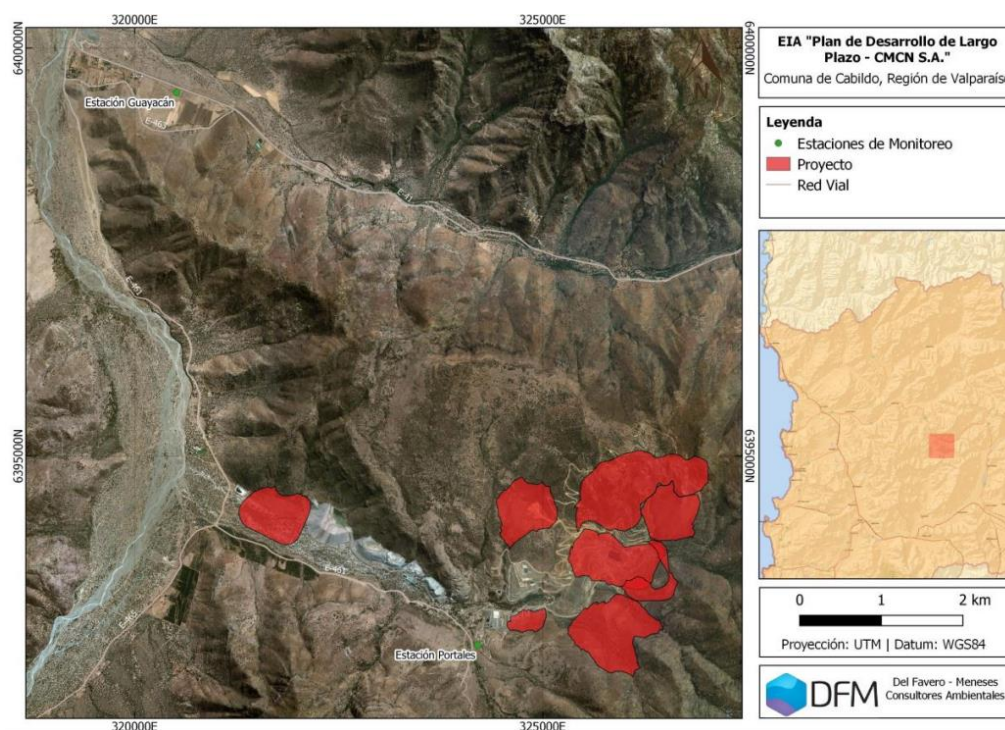


Figura 25: Ubicación estaciones de monitoreo cercanas a la minera Cerro Negro [40].

De estas estaciones de monitoreo, se reportan los siguientes datos:

Tabla 2: Reporte Estaciones de Monitoreo para la velocidad del viento, año 2018.

	Velocidad, m/s	
Variable	Guayacán	Portales
Promedio	1,92	1,39
Máximo	7,76	9,25
Mínimo	0,14	0,00

Fuente: Extracto de [40].

De esta forma, es posible observar que la máxima velocidad de viento que se registra en la zona es de 9,25 m/s, por lo que resulta importante ver el comportamiento del supresor de polvo en estas condiciones extremas.

Entonces, con las condiciones vistas en este capítulo se busca desarrollar un geopolímero que cumpla el rol de supresión de polvos en depósitos de relave de la minería, debiendo cumplir con los requisitos para este propósito; buena resistencia a la erosión por viento y tener en cuenta consideraciones económicas para conocer si realmente puede ser un sustituto de otros métodos de supresión de polvo como, por ejemplo, la humectación de la superficie utilizando agua. A continuación, se presentan los objetivos de este trabajo de memoria.

CAPÍTULO III: OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un geopolímero económico utilizando relave de cobre para ser empleado como supresor de polvo en depósitos de relave de la compañía minera Cerro Negro.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Estimar las mejores condiciones de fabricación del geopolímero para ser utilizado como supresor de polvo en depósito de relave considerando las variables de: relación Si/Al y relación cal/relave.
- 2) Desarrollar pruebas con el supresor de polvo geopolimérico para su aplicación en depósitos de relave mediante pruebas de resistencia a la erosión por viento en laboratorio y en la faena minera.
- 3) Evaluar la factibilidad económica, a nivel de ingeniería de perfil, de la implementación del geopolímero desarrollado mediante un caso de estudio aplicado a la faena minera Cerro Negro.

CAPÍTULO IV: TRABAJO EXPERIMENTAL

4.1. MOTIVACIONES DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

Lo que se plantea realizar en este trabajo es probar distintas condiciones de fabricación para este geopolímero, a fin de obtener las condiciones idóneas que permitan las mejores propiedades para la resistencia a la erosión por viento. Esto se logra, naturalmente, cuando la muestra trabajada presenta las mejores prestaciones en los ensayos de resistencia a la erosión por viento. El detalle de estas pruebas se verá más adelante en este capítulo.

También, es importante destacar la consideración de poner a prueba el supresor de polvo geopolimérico en condiciones reales, lo que se logra realizando las pruebas de erosión y fraguado directamente sobre los depósitos de relave de la Faena Minera Cerro Negro.

Adicionalmente, a modo de caracterización del supresor de polvo desarrollado y seleccionado, se buscará realizar pruebas para conocer propiedades de este. Las pruebas consistirán en conocer la estabilidad química de este mediante los ensayos SPLP, ABA y NAG, además de medir su densidad, humedad, estabilidad física en agua y mediciones de su resistencia mecánica superficial mediante determinación de dureza

Luego, se busca tomar en cuenta las consideraciones económicas de la utilización de este supresor de polvo geopolimérico en los depósitos de esta faena minera, tomando en cuenta el costo asociado de materiales, reactivos, área superficial de los relaves a tratar, así como también insumos como el combustible o la energía eléctrica.

Finalmente, al tener todos los antecedentes recopilados es posible indicar si el método de supresión de polvo mediante geopolimerización es una alternativa factible técnica y económicamente.

4.2. MATERIALES A UTILIZAR

Para la fabricación del supresor de polvo se va a utilizar un relave de cobre de la empresa minera Cerro Negro, los cuales corresponden a un relave del depósito número N°1 y N°2 de la minera.

Con respecto a los reactivos a utilizar y tomando en consideración que se requiere un geopolímero económico, se va a utilizar cal hidráulica (para buscar la alcalinidad), además

de polvo de óxido de aluminio para poder ajustar la relación Si/Al a un valor requerido, el cual se revisará más adelante. Con respecto al agua, se busca utilizar agua que se encuentre disponible en esta faena minera, como puede ser agua de proceso y también podría utilizarse agua que percola a través de los relaves y que es colectada a través de canales.

4.3. MUESTRAS A PREPARAR

Se prepara el geopolímero combinando el relave de cobre, agua, cal hidráulica y opcionalmente óxido de aluminio (en forma de Al_2O_3). Se analizará dos relaciones molares Si/Al; una relación de 3,8, la que se obtiene al combinar directamente el relave con la cal hidráulica. La segunda relación molar Si/Al estudiada es de 2,5, por lo que se agrega Al_2O_3 para dicho propósito, según lo mostrado en Figura 16: Recopilación estudios anteriores resistencia a la compresión v/s relación Si/Al [8]. Para el cálculo de la relación molar se asume que todo el Si y Al de los materiales se encuentra en forma de SiO_2 y Al_2O_3 respectivamente. La relación entre la cal hidráulica y el relave será de 1 a 2 y 1 a 4. Por último, para analizar el efecto del espesor en las propiedades de la muestra, se estudiará un espesor de 8 mm y 25 mm, por lo que el resumen del total de muestras a preparar se muestra a continuación:

Tabla 3: Tabla resumen condiciones impuestas en muestras fabricadas.

Muestra	Relación molar Si/Al (-)	Relación Cal/Relave (-)	Espesor (mm)
1	3,7	1/2	8
2	3,7	1/2	25
3	3,7	1/4	8
4	3,7	1/4	25
5	2,5	1/2	8
6	2,5	1/2	25
7	2,5	1/4	8
8	2,5	1/4	25

Fuente: Elaboración propia.

Cada muestra será fabricada en duplicado, por lo que se tiene 16 muestras que se deben preparar. El agua utilizada para la preparación es aproximadamente una relación másica agua/sólidos de 0,40 a 0,50, dado que con esta cantidad de agua se alcanza una pasta fluida y fácil de trabajar, tal como se indicó en 2.1.5.

4.4. ENSAYOS A REALIZAR

Los principales ensayos que se realizarán son los necesarios para poder determinar si el geopolímero fabricado logra las prestaciones necesarias para ser considerado supresor de polvo: esto corresponde al ensayo de resistencia a la erosión por viento en un túnel de viento y en la intemperie. Este ensayo permitirá conocer cuanto polvo se libera efectivamente desde las muestras de relave y la muestra de control, que corresponde a relave sin tratar. Por lo tanto, en las pruebas de laboratorio se busca medir la erosión en velocidades de viento específicas, mientras que para la medición en la intemperie, se preparará un set de muestras con el supresor geopolimérico, a fin de conocer cómo se comportaría en condiciones reales donde se tiene variaciones en el ángulo de viento, ráfagas de viento, luz solar y condiciones de humedad ambiental específicas de la zona, lo que puede afectar las condiciones de fraguado de las muestras.

Los ensayos que se pueden considerar como secundarios, son los que se le realizarán al geopolímero con las mejores prestaciones en el primer ensayo de túnel de viento. Estos se realizan con el fin de caracterizar el material por lo que, a priori, no serán utilizados para definir qué condiciones son las mejores para fabricar un supresor de polvo geopolimérico.

Uno de estos secundarios corresponde a analizar la resistencia mecánica en compresión, el cual se realizará basado en la norma ASTM C109, el cual es comúnmente utilizado para este tipo de materiales [42]. Además, se realizará otro ensayo que medirá la dureza de la muestra para estimar resistencia mecánica en la superficie dado que la erosión del viento depende de que tan fácilmente las partículas pueden ser liberadas desde la superficie del material, siendo propiedades altamente correlacionadas [43].

Para la medición de humedad se realizará con una diferencia de masa de la muestra cuando esté a temperatura ambiente y comparar cuando seque en la estufa de secado. Con respecto a la densidad, se realizará midiendo el volumen de líquido desplazado por una masa conocida de geopolímero. La estabilidad en agua se realizará dejando muestras expuestas en agua por semanas, observándose la integridad de las piezas con el paso del tiempo.

Para la estabilidad química, se realizará tres tipos de ensayos: el primero, corresponde al ensayo SPLP normado por EPA (United States Environmental Protection Agency) [44]. Para el ensayo ABA, se realizará el procedimiento descrito por el mismo organismo en su

documento técnico para la predicción de drenaje ácido [45]. Por último, para el ensayo NAG se tiene que también se encuentra documentado por EPA y descrito en detalle en [46]. Sin embargo, como se verá más adelante, este ensayo no fue realizado.

Para el caso de estudio, se calculará el área superficial de los depósitos de relaves que se deben controlar en su emisión de polvo, así como la cantidad de geopolímero que se debe producir y su costo asociado, para luego en conjunto con los resultados de las propiedades desarrolladas por el geopolímero, se verifique si es económicamente rentable y técnicamente factible su utilización. Esto se compara con la utilización de aspersión de agua presente en la faena para el depósito N°6.

4.5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.5.1. EXPERIMENTOS PRIMERA PARTE

4.5.1.1. CARACTERIZACIÓN MATERIA PRIMA

Afin de conocer la composición química que posee los materiales implicados en la preparación del geopolímero, donde son mayormente relevante el relave y cal hidráulica, se realiza una Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X (FRX) a dichos materiales, la cual fue realizada en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la UTFSM Casa Central. También se realiza una Espectroscopía de Absorción Atómica al relave de cobre en el mismo laboratorio, utilizando el equipo Perkin PinAAcle 900F Flame.

Para que el material esté apto para dicha caracterización se debe asegurar que la granulometría sea menor que malla #100, de tal forma que se toma una muestra representativa de este utilizando un Divisor de Muestras Rotatorio Powteq RSD100 junto con un Alimentador Vibratorio VF100 y un Micro Pulverizador Vibratorio Fritsch. Una vez se logre el tamaño de partícula requerida se manda a muestreo.

Adicionalmente y a modo de referencia, se compara los resultados de la caracterización en el laboratorio con lo reportado por Sernageomin en su Catastro Geoquímico de Depósitos de Relave en Chile [47].

4.5.1.2. PREPARACIÓN PRIMERAS MUESTRAS

Una vez conocida las composiciones de todo el sistema (véase Tabla 6 y Tabla 7), se realiza la mezcla de relave, cal hidráulica, agua y alúmina (sólo para muestras de N° 5 a

N° 8) dentro de un tarro con agitación manual durante 10 minutos y respetando las condiciones impuestas para el experimento (véase Tabla 3), para luego ser coladas en pequeñas bandejas de aluminio formando muestras de aproximadamente 200 [g] cada una. La totalidad de muestras fueron dejadas a la sombra y a temperatura ambiente, las cuales luego fueron puestas a prueba en el ensayo de erosión en el túnel de viento. A continuación, se observa las muestras de geopolímero fabricadas.



Figura 26: Muestras de geopolímero en día 0. Elaboración propia.

Una vez que se tiene los resultados de los ensayos realizados en los geopolímeros fabricados, se procede a fabricar muestras adicionales para caracterizar el supresor de polvo geopolimérico y poner a prueba este en la faena minera. La preparación de estas muestras será revisada posteriormente. Las muestras se someten al siguiente ensayo:

4.5.1.3. RESISTENCIA A LA EROSIÓN POR VIENTO

Se utiliza un túnel de viento de laboratorio mediante un tubo de acero galvanizado con medidas de 1,70 m y 23 cm de diámetro el cual, junto con un soplador industrial y un anemómetro para medir la velocidad de viento impuesta, permiten tener la velocidad de 5 m/s, 9 m/s y 11 m/s en concordancia con lo reportado por la estación Portales y Guayacán vista en Tabla 2. Para ver el esquema del experimento, véase la Figura 27.

Como se observa en la figura anterior, las pruebas tienen una duración de 10 minutos, donde se compara la masa inicial contra la masa final de la muestra. También se incluirá un experimento a una muestra de relave de cobre para comparar los resultados entre el geopolímero y una muestra sin tratar.

Las mediciones a los geopolímeros se realizaron al día 7 y al día 21 afín de observar alguna característica importante en el desarrollo de las propiedades durante el fraguado.

Para observar los equipos del ensayo realizado en el laboratorio véase la Figura 28.

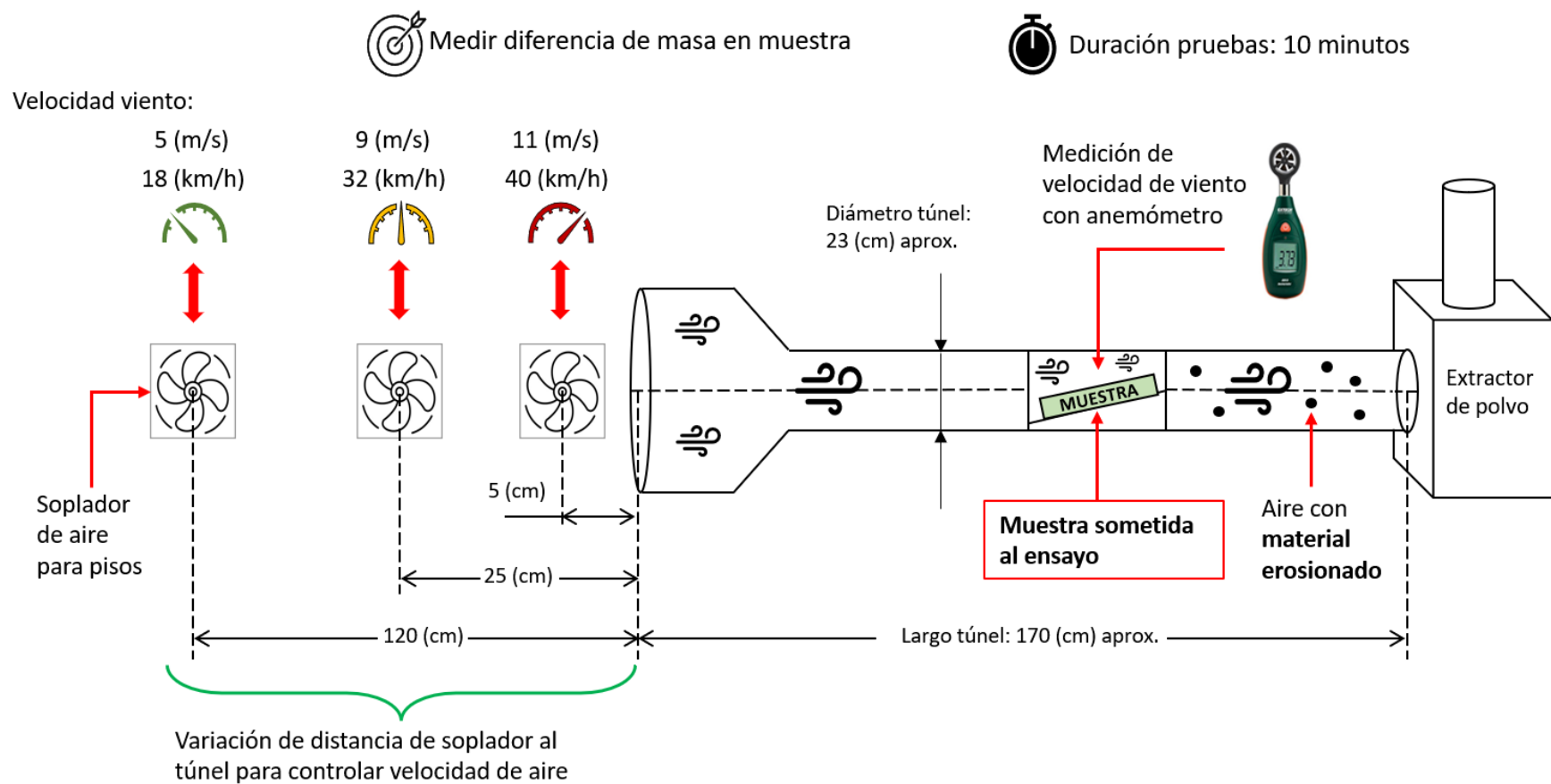


Figura 27: Esquema de ensayo resistencia a la erosión por viento en túnel de viento. Elaboración propia.



Figura 28: Túnel de viento en laboratorio y porta muestra.

4.5.2. EXPERIMENTOS SEGUNDA PARTE

Dado que los resultados observados en el experimento del túnel de viento permiten observar que la mejor preparación de este supresor de polvo geopolimérico es con una relación molar Si/Al de 3,7 (sin ajustar), relación másica cal/relave de 1/4 y que no se observa un mayor impacto del espesor de la muestra, entonces se procede a continuar las pruebas con nuevas muestras preparadas siguiendo las anteriores proporciones.

4.5.2.1. PRUEBA DE RESISTENCIA A LA EROSIÓN EN INTEMPERIE

Se dispone tres muestras de supresor de polvo geopolimérico y una muestra de relave preparado en el Laboratorio DIP de la faena minera Cerro Negro, las cuales fueron preparadas como siguen:

Tabla 4: Masa de relave y cal para fabricar muestras en faena minera. Muestra de 1 a 3 corresponde a supresor geopolimérico. Muestra 4 corresponde a muestra de relave.

Muestra	Masa relave, g	Masa Cal, g	Relación másica cal/relave	Masa total, g
Muestra 1	3.454	1.151	1/4	4.605
Muestra 2	3.447	1.149	1/4	4.596
Muestra 3	2.870	957	1/4	3.826
Muestra 4 Control	3.416	No aplica	No aplica	3.416

Dichas muestras fueron preparadas en bandejas grandes de aluminio y utilizando la misma agua disponible en la faena. Una vez preparada las muestras, fueron dispuestas en la zona superior del depósito de relave N°2, tal como se observa en la siguiente figura:



Figura 29: Muestras de geopolímero y relave en el depósito N°2 en minera Cerro Negro.

Luego, cada una semana se realiza una medición de la masa de las muestras a fin de detectar alguna diferencia producto de la erosión del viento, además de observar el efecto del sol en el fraguado.

Adicionalmente, se fabrican distintas muestras solo para observación del proceso de fraguado cuando se tiene humectación con agua cada 2 días en la primera semana de esta etapa, así como también una pequeña geopolimerización del relave in situ.

4.5.3. EXPERIMENTOS TERCERA PARTE: CARACTERIZACIÓN DE SUPRESOR DE POLVO GEOPOLIMÉRICO

Una vez que se tiene identificado el supresor de polvo geopolimérico que se desea poner a prueba en una aplicación real, se realizó una serie de experimentos para poder caracterizar dicho producto desarrollado, a fin de aumentar el conocimiento sobre este. De esta forma, los experimentos que se realizaron se describen a continuación:

4.5.3.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

El ensayo se realiza siguiendo las medidas de probeta reportadas en la norma ASTM C109 [42]. De esta forma, se fabrican dos muestras de 50 mm x 50 mm x 50 mm que fueron sometidas a compresión en una máquina de ensayos universales Z030 AllroundLine Zwick-Roell del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la UTFSM Casa Central, la cual se puede observar en la siguiente figura:



Figura 30: Máquina de tracción y una de las probetas fabricadas.

La precarga y velocidad de desplazamiento inicial establecida para el ensayo es de 10 N y 0,1 mm/min respectivamente, mientras que durante el ensayo se fija una velocidad constante de 10 N/s. Por último, el ensayo se detiene cuando la probeta sufre una falla completa.

4.5.3.2. RESISTENCIA MECÁNICA SUPERFICIAL

Para este ensayo se utiliza un medidor de dureza portable TIME TH-110 del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la UTFSM Casa Central, junto con una muestra preparada específicamente para la medición de la resistencia mecánica superficial y muestras de geopolímero de la faena minera. A continuación, se observan algunas muestras analizadas junto con el medidor de dureza:



Figura 31: Medidor de dureza junto con muestra fabricada en laboratorio UTFSM.



Figura 32: Medidor de dureza junto con algunas muestras de supresor de polvo geopolimérico fabricadas en la faena minera Cerro Negro.

Las mediciones se realizan en toda la superficie superior de las muestras y la distancia entre cada una de ellas es de 5 mm aproximadamente. La dureza es reportada en HL. Se realizaron un total de 74 mediciones en el caso de la muestra preparada en laboratorio UTFSM y 68 mediciones a las muestras fraguadas en el depósito de relave N°2 de la Compañía Minera Cerro Negro.

4.5.3.3. DENSIDAD

El ensayo se realiza conociendo la masa de la muestra de geopolímero (28 días de fraguado) y midiendo el volumen de agua que este desplaza en una probeta graduada de 100 ± 1 mL. Luego, se obtiene la densidad con la relación entre la masa medida y el volumen desplazado (que corresponde al volumen de la muestra que se masa) siguiendo la siguiente ecuación:

$$Densidad = \frac{masa\ muestra}{Volumen_f - Volumen_i} \quad (3)$$

A continuación, se puede observar la forma en la que se realizó el experimento:

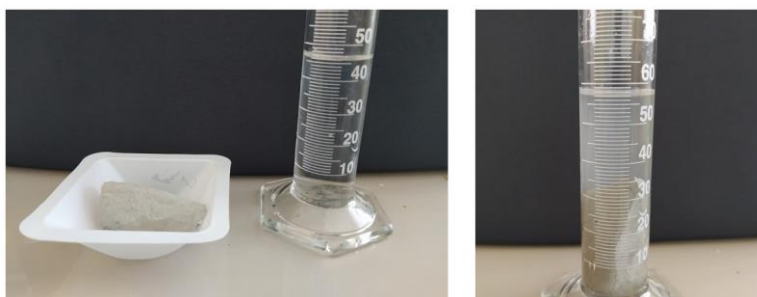


Figura 33: Procedimiento realizado en laboratorio para medición de densidad.

4.5.3.4. HUMEDAD

Cada muestra con 28 días de fraguado será pesada utilizando una balanza analítica, para luego ser introducida en un horno de secado a una temperatura de 120 °C. Luego, cada 3 horas se realiza una medición de la masa. Al llegar a las 6 horas, se van realizando mediciones cada 1 hora hasta encontrar que la variación de masa de la medición sea 100 veces menor que la primera variación de masa, momento en el cual se detiene el experimento puesto que la variación de masa se estabiliza y se determina la humedad entre la primera y última medición de masa de la muestra. Para realizar la medición se utiliza un desecador para enfriar las muestras.

En la siguiente figura se observa las muestras trabajadas:



Figura 34: Muestras de geopolímero puestas a prueba en ensayo de humedad.

4.5.3.5. ESTABILIDAD EN AGUA

Se deja cada muestra (de 3 semanas de fraguado cada una) en un vaso precipitado con agua, de tal forma que se revisará periódicamente cada 4 días para ir observando las variaciones cualitativas que se observan en las piezas. La duración máxima del experimento es de 28 días.

Adicionalmente, se simulará una lluvia con una piseta para observar la resistencia que posee el geopolímero frente a este agente, siendo una condición más agresiva que tener las muestras en agua estática dentro de un vaso precipitado. Esta prueba también corresponde a una prueba cualitativa.

4.5.3.6. ENSAYO SPLP

Este ensayo se encuentra normado por EPA [44]. Se realizará tanto para el geopolímero como para el relave. La solución filtrada es analizada mediante una Espectroscopia de Absorción Atómica en el equipo Perkin PinAAcle 900F Flame del Laboratorio del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la UTFSM Casa Central,

requiriendo análisis para Cu, Fe y Mg. Para agitación de las muestras se utilizó un agitador magnético.

A continuación, se observa las muestras que permanecieron durante 18 hrs agitándose bajo una campana de extracción de gases y la filtración de las soluciones:

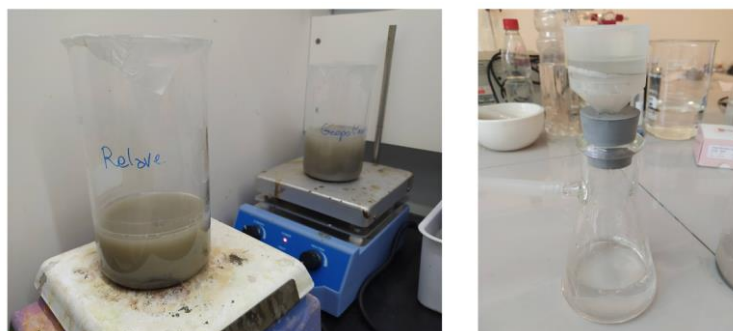


Figura 35: Muestras ensayo SPLP trabajadas. Izquierda: Muestra en agitación durante 18 hrs. Derecha: Filtración de soluciones.

4.5.3.7. ENSAYO ABA

Este ensayo se realizará tanto para el geopolímero como para el relave. Este consta de dos partes: la primera parte corresponde a la determinación del Potencial de Acidez (PA) de la muestra mientras que la segunda parte corresponde a la determinación del Potencial de Neutralización (PN) de la muestra. Utilizando estos valores, se obtiene el valor de Potencial Neto de Neutralización (PNN) según:

$$PNN = PN - PA \quad (4)$$

Luego, este permite categorizar el material bajo los criterios:

- Bajo o Nulo Potencial de Generación de Ácido: Valor $PNN > 20$ kg/ton y relación $PN/PA > 3$.
- Potencial Marginal de Generación de Ácido: Valor $PNN < 20$ kg/ton y la relación PN/PA se encuentra entre 1 y 3.
- Alto Potencial de Generación de Ácido: Valor $PNN < 0$ kg/ton, relación $PN/PA < 1$.

Para obtener el potencial de acidez, se debe realizar un análisis químico para determinar el contenido total de azufre de la muestra. Por razones de tiempos y recursos, no se realiza este análisis químico, por lo que se utilizará lo reportado por Sernageomin en sus

datos geoquímicos de depósitos de relave, los cuales presentan el contenido de azufre de dichos depósitos [47]. Para determinar el valor de PA, se utiliza la siguiente ecuación [45]:

$$31,25 \cdot \%S \text{ total} = PA \quad (5)$$

Por otro lado, para la determinación del potencial de neutralización se trabajó según el método Sobek, reportado en [46]. Las ecuaciones que se utilizan en el ensayo son las siguientes:

$$\text{Constante } C = (\text{mL ácido en blanco}) / (\text{mL base en blanco}) \quad (6)$$

$$\text{mL ácido consumido} = (\text{mL ácido añadido}) - ([\text{mL base añadida}] \times C) \quad (7)$$

$$\frac{\text{kg CaCO}_3 \text{ equivalente}}{\text{ton de mineral}} = (\text{mL ácido consumido}) \times 25,0 \times (N \text{ de adición}) \quad (8)$$

4.5.3.8. ENSAYO NAG

Este ensayo se encuentra normado por EPA [46]. No se realiza ni al relave ni al geopolímero dado que las muestras no presentaron un comportamiento de emisión de ácido según el ensayo ABA realizado, por lo que este ensayo no se utiliza.

4.6. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para realizar y tomar en cuenta las implicancias económicas de este supresor de polvo geopolimérico, se busca encontrar el costo que posee el geopolímero en su producción y aplicación, para así este ser comparado con el método implementado en la Faena Minera de Cerro Negro, el cual es humectación mediante aspersores de agua.

Por lo tanto, en primera instancia se realizó una breve revisión de los posibles métodos de aplicación industrial del producto desarrollado en este trabajo, a fin de poder seleccionar el que posea la mayor relación ventajas/desventajas. Luego, con el fin de complementar la hipótesis de del método seleccionado, se realizó una pequeña prueba de laboratorio del método seleccionado, correspondiente a la geopolimerización in situ (los motivos se verán en su respectiva sección más adelante) la cual se detalla a continuación:

4.6.1. EXPERIMENTO DE GEOPOLIMERIZACIÓN IN SITU

Se fabricaron 3 muestras de geopolímero siguiendo este método (para más información del método, véase Método ii: geopolimerización in situ). Estas muestras siguen las siguientes condiciones de preparación:

Tabla 5: Condiciones preparación muestras geopoliméricas para método II de aplicación.

Muestra	Espesor geopolímero, mm	Masa relave, g	Masa cal, g	Masa agua, g
Muestra 1	Muestra completa	1.293,1	323,3	808,2
Muestra 2	8	2.892,9	152,3	380,7
Muestra 3	8	1.643,3	132,4	331,1

De esta forma, para simular el método se agrega el agua con la cal hidráulica a través de una piseta hacia el relave contenido en las bandejas. Para conocer la cantidad de agua agregada, esta corresponde a poseer una relación agua/sólido de 0,5, correspondiente a un valor límite de las muestras fabricadas en sección 4.3. A continuación, se puede observar las muestras preparadas:

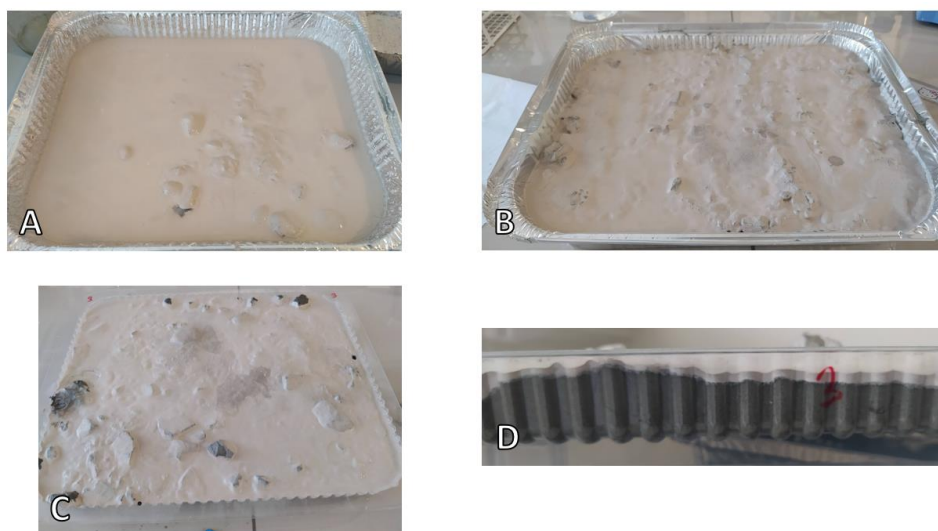


Figura 36: Muestras fabricadas para estudiar método de aplicación N°2. A: Muestra 1; B: Muestra 2; C: Muestra 3; D: Vista lateral muestra 3.

4.6.2. ESTIMACIONES DE EVALUACIÓN ECONÓMICA

Una vez conociendo el método específico de aplicación del geopolímero junto con las condiciones operativas que posee el método de aspersión de agua, se procede a comparar el OPEX (*Operational Expenditure* en inglés, se refiere a los gastos operativos

del proyecto) y CAPEX (*Capital Expenditure* en inglés, se refiere a la inversión de capital que se tiene en el proyecto) para poder discernir entre los métodos e indicar cual es la mejor opción entre estos.

Para la estimación del OPEX se realizó el cálculo económico de los costos asociados a la fabricación del geopolímero, es decir el costo de material (cal hidráulica y agua en la faena). Por otro lado, se realiza el cálculo de consumo de agua para el método de aspersión de agua en la faena minera. Además, se estima el costo asociado a diversos insumos o recursos que se debe disponer para ambos métodos, como por ejemplo el costo de energía, combustible, remuneraciones y mantenciones.

Por otro lado, para la estimación del CAPEX, se estimó el precio de los equipamientos necesarios para la aplicación del método seleccionado para la aplicación del producto geopolimérico. Por otro lado, para el método utilizado en la Minera Cerro Negro se posee los datos de costo en los que se implicaron al momento de instalar dicho método.

Por último, para poder indicar el precio de geopolimerizar todos los relaves de la Faena Minera Cerro Negro, contemplando los depósitos de relaves desde el N°1 al N°6, (véase Figura 24), se realiza la estimación de dicha área de los depósitos utilizando Google Maps, en conjunto con curvas de nivel de los depósitos y, utilizando la herramienta computacional SpaceClaim, se realiza el dibujo simplificado de cada depósito en formato CAD para así obtener el área expuesta de los depósito de relave.

CAPÍTULO V: RESULTADO Y DISCUSIONES

5.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

El resultado de la caracterización por FRX y Absorción Atómica realizada, donde también se compara los resultados con lo descrito por Sernageomin en su Catastro Geoquímicos de Depósitos de Relave en Chile [47], se resume la siguiente tabla:

Tabla 6: Comparación entre resultados FRX y lo presentado por Sernageomin en su catastro.

	FRX, Laboratorio DIMM UTFSM	Espectroscopía de Absorción atómica, Laboratorio DIMM UTFSM	Sernageomin, promedio depósitos CIA Cerro Negro
Elemento	% en peso	% en peso	% en peso
Si	12,98	No analizado	21,42
Fe	5,40	4,69	7,05
Ca	4,88	No analizado	7,04
Al	3,64	No analizado	2,28
Mg	2,15	1,49	6,59
S	-	-	0,08
Otros	70,95	93,82	55,53

Se observa que existen diferencias en cuanto a los resultados encontrados entre el análisis por FRX, Absorción Atómica y lo reportado por Sernageomin, lo cual puede deberse a que la composición que se puede encontrar en el relave es bastante variable, por lo que no necesariamente se deberá encontrar los mismos valores. De aquí en más, se utilizan los valores reportados por FRX para la preparación del geopolímero.

Por otro lado, para la cal hidráulica se tiene:

Tabla 7: Resultados análisis FRX cal hidráulica Soprocál 6.

Elemento	% en peso
Si	4,12
Fe	1,04
Ca	24,37
Al	0,46
Mg	0,00
S, obtenido desde [48].	1,0
Otros	69,01

5.2. EXPERIMENTOS PRIMERA PARTE

Se recopila la siguiente información en la fabricación de las muestras para el ensayo de resistencia a la erosión en el túnel de viento.

5.2.1. MUESTRAS PREPARADAS

La condiciones y cantidad de material adicionado a cada muestra se observan en la siguiente tabla:

Tabla 8: Condiciones muestras fabricadas en primera parte.

Muestra	Relave (g)	Cal Hca. (g)	Alúmina (g)	Relación molar Si/Al	Relación Cal/Relave	Masa Inicial (g)	Espesor (mm)
1	100	25	-	3,7	1/4	181,7	11
2	100	25	-	3,7	1/4	188,7	6
3	100	25	-	3,7	1/4	166,2	26
4	100	25	-	3,7	1/4	180,4	27
5	100	50	-	3,7	1/2	197,9	7
6	100	50	-	3,7	1/2	194,4	10
7	100	50	-	3,7	1/2	267,7	27
8	100	50	-	3,7	1/2	232,6	27
9	100	25	3,08	2,5	1/4	178,4	6
10	100	25	3,08	2,5	1/4	156,7	6
11	100	25	3,08	2,5	1/4	163,7	26
12	100	25	3,08	2,5	1/4	163,7	24
13	100	50	2,13	2,5	1/2	176,7	6
14	100	50	2,13	2,5	1/2	200,5	8
15	100	50	2,13	2,5	1/2	189,6	18
16	100	50	2,13	2,5	1/2	215,4	24
Relave	210,3	-	-	-	-	210,3	25

De la tabla anterior es posible observar la masa inicial de cada una de las muestras, en donde se considera el agua adicionada para hacer la mezcla. La variabilidad en los resultados es debido a que la preparación y vertimiento de la mezcla en las bandejas de aluminio no es 100% uniforme pero que, sin embargo, los valores se mueven dentro de un rango aceptable de variación. El promedio de masa inicial de las muestras es de 191 g mientras que el promedio de espesor es de 7,5 mm y 24,9 mm para las muestras de 8 y

25 mm respectivamente. La muestra relave se prepara para tener una muestra control en el ensayo del túnel de viento.

5.2.2. ENSAYO EN TÚNEL DE VIENTO

Los resultados de la primera medición en túnel de viento (es decir, a los 7 días), se muestra a continuación:

Tabla 9: Resultado ensayo túnel de viento día 7.

Muestra	Material no erosionado, %			
	5 m/s	9 m/s	11 m/s	Promedio
Si/Al = 3,7, Cal/Relave = 1/4, Espesor 8 mm	99,11%	99,09%	99,06%	99,09%
Si/Al = 3,7, Cal/Relave = 1/4, Espesor 25 mm	99,59%	99,53%	99,52%	99,55%
Si/Al = 3,7, Cal/Relave = 1/2, Espesor 8 mm	99,14%	98,75%	98,61%	98,83%
Si/Al = 3,7, Cal/Relave = 1/2, Espesor 25 mm	99,33%	99,12%	99,10%	99,18%
Si/Al = 2,5, Cal/Relave = 1/4, Espesor 8 mm	99,37%	99,11%	98,99%	99,16%
Si/Al = 2,5, Cal/Relave = 1/4, Espesor 25 mm	99,59%	99,47%	99,34%	99,47%
Si/Al = 2,5, Cal/Relave = 1/2, Espesor 8 mm	99,42%	99,28%	99,14%	99,28%
Si/Al = 2,5, Cal/Relave = 1/2, Espesor 25 mm	99,50%	99,41%	99,30%	99,40%

Luego, al graficar se tiene lo siguiente:

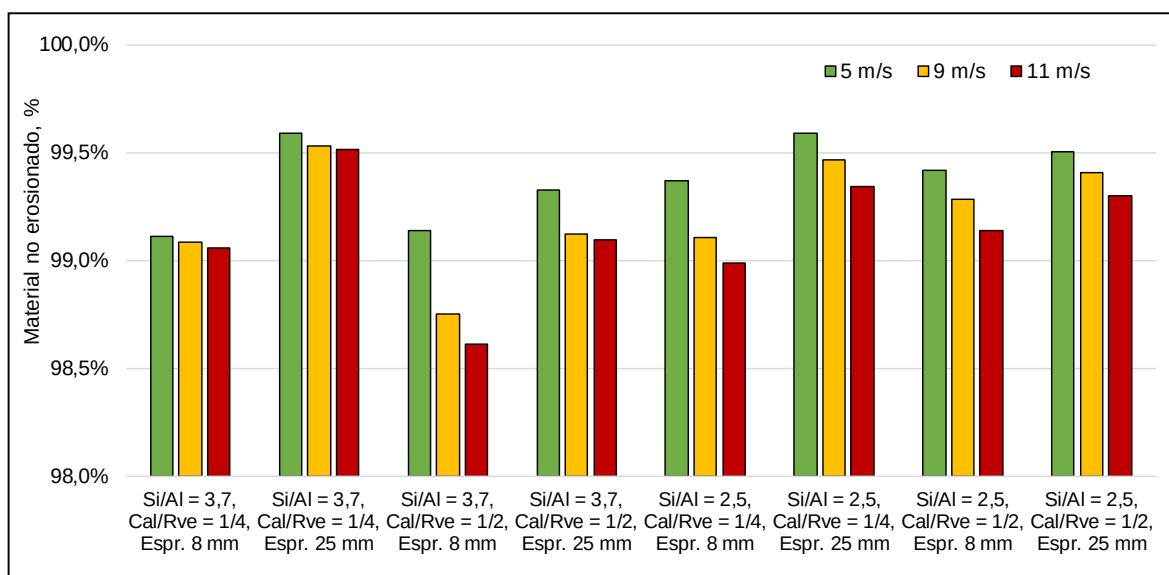


Figura 37: Resultados túnel de viento en día 7 de fraguado. Rve = Relave. Espr = Espesor.
Elaboración propia.

Adicionalmente, se calcula la matriz de correlaciones de los resultados obtenidos:

Tabla 10: Matriz de correlaciones resultados túnel de viento día 7.

	Si/Al	Cal/Relave	Espesor	5 m/s	9 m/s	11 m/s
Si/Al	1					
Cal/Relave	0	1				
Espesor	0	0	1			
5 m/s	-0,52	-0,20	0,71	1		
9 m/s	-0,41	-0,33	0,68	0,91	1	
11 m/s	-0,24	-0,37	0,72	0,84	0,98	1

	Interpretación	Rango de valores	Elementos correlacionados
	Correlación nula	$0,00 \leq r_{xy} < 0,10$	
	Correlación débil	$0,10 \leq r_{xy} < 0,30$	(Cal/Relave^5 m/s); (Si/Al^11 m/s)
	Correlación moderada	$0,30 \leq r_{xy} < 0,50$	(Si/Al^9 m/s); (Cal/Relave^9 m/s); (Cal/Relave^11 m/s)
	Correlación fuerte	$0,50 \leq r_{xy} < 1,00$	(Si/Al^5 m/s); (Espesor^5 m/s); (Espesor^9 m/s); (Espesor^11 m/s)

Luego, los resultados del mismo ensayo, pero en el día 21 de fraguado de las muestras son los siguientes:

Tabla 11: Resultados ensayo túnel de viento día 21 de fraguado para muestras.

Muestra	Material no erosionado, %			
	5 m/s	9 m/s	11 m/s	Promedio
Si/Al = 3,7, Cal/Relave = 1/4, Espesor 8 mm	99,99%	99,99%	99,99%	99,99%
Si/Al = 3,7, Cal/Relave = 1/4, Espesor 25 mm	99,99%	99,99%	99,99%	99,99%
Si/Al = 3,7, Cal/Relave = 1/2, Espesor 8 mm	99,98%	99,98%	99,97%	99,98%
Si/Al = 3,7, Cal/Relave = 1/2, Espesor 25 mm	99,98%	99,98%	99,97%	99,98%
Si/Al = 2,5, Cal/Relave = 1/4, Espesor 8 mm	99,97%	99,97%	99,96%	99,97%
Si/Al = 2,5, Cal/Relave = 1/4, Espesor 25 mm	99,97%	99,97%	99,97%	99,97%
Si/Al = 2,5, Cal/Relave = 1/2, Espesor 8 mm	99,96%	99,96%	99,96%	99,96%
Si/Al = 2,5, Cal/Relave = 1/2, Espesor 25 mm	99,96%	99,96%	99,96%	99,96%

Luego, al graficar los resultados se tiene lo siguiente:

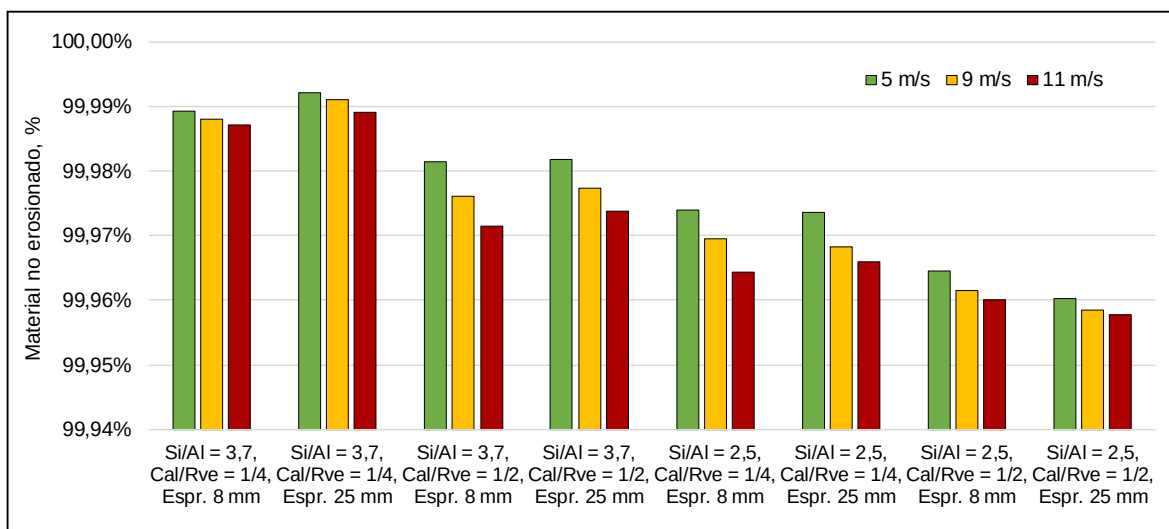


Figura 38: Resultados ensayo túnel de viento día 21 de fraguado. Rve = Relave. Esp. = Espesor. Elaboración propia.

Y la correspondiente matriz de correlaciones se observa a continuación:

Tabla 12: Matriz de correlaciones resultados experimento túnel de viento día 21.

	Si/Al	Cal/Relave	Espesor	5 m/s	9 m/s	11 m/s
Si/Al	1					
Cal/Relave	0	1				
Espesor	0	0	1			
5 m/s	0,86	-0,49	-0,02	1		
9 m/s	0,86	-0,50	0,00	0,99	1	
11 m/s	0,84	-0,50	0,04	0,96	0,99	1

	Interpretación	Rango de valores	Elementos correlacionados
	Correlación nula	$0,00 \leq r_{xy} < 0,10$	(Espesor^5 m/s); (Espesor^9 m/s); (Espesor^11 m/s)
	Correlación débil	$0,10 \leq r_{xy} < 0,30$	
	Correlación moderada	$0,30 \leq r_{xy} < 0,50$	(Cal/Relave^5 m/s)
	Correlación fuerte	$0,50 \leq r_{xy} < 1,00$	(Si/Al^5 m/s); (Si/Al^9 m/s); (Si/Al^11 m/s); (Cal/Relave^9 m/s); (Cal/Relave^11 m/s)

De los resultados encontrados en el ensayo, es posible determinar diversos efectos que generan cada condición impuesta en el sistema. Al revisar los resultados de todos los ensayos se observa que todos poseen el comportamiento necesario para este tipo de experimento, el cual es que, a mayor velocidad del viento, mayor es la diferencia de masa

detectada entre el inicio y el final de la prueba en el túnel de viento y, por lo tanto, mayor es la erosión sufrida por el material.

Luego, al observar los resultados del día 7 se tiene que no existe una clara tendencia en los resultados entre las muestras, lo cual se puede deber a que existe una gran influencia del tiempo de fraguado en los resultados puesto que la diferencia de masa detectada en los experimentos va a corresponder mayormente a humedad. De esta forma, mientras menos es el tiempo de fraguado para realizar las pruebas, mayor va a ser la tendencia de las muestras a tener una mayor variación de masa durante el ensayo del túnel de viento por la humedad superficial eliminada. En efecto, las muestras mostraban una apariencia mucho más húmeda y brillante durante los ensayos en el día 7 (véase la Figura 39), apariencia totalmente distinta a la que se presentaba al día 21, donde si se observa un aspecto más seco y opaco, sin brillo.

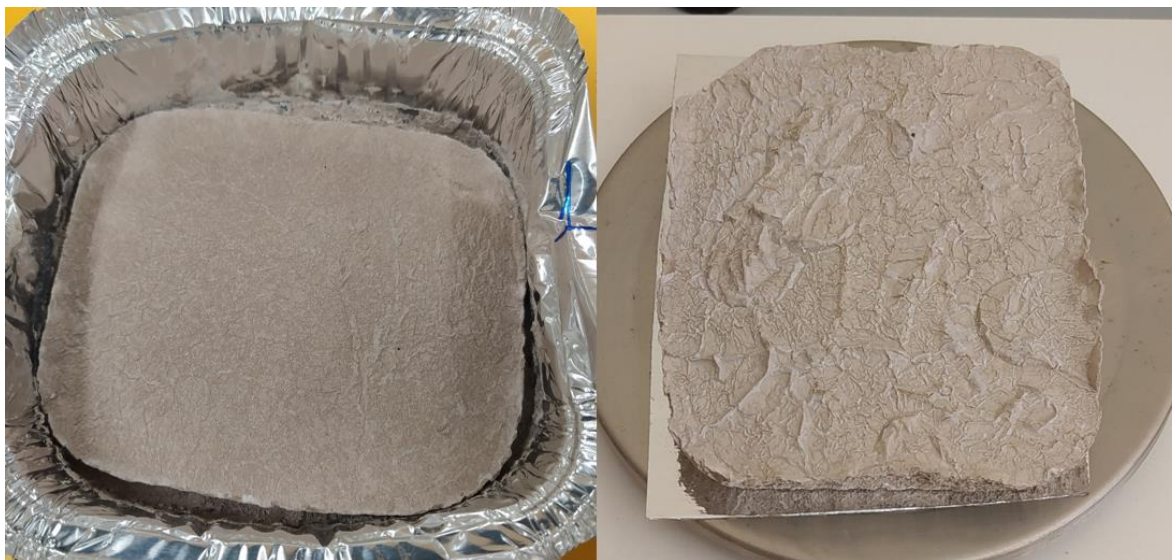


Figura 39: Desarrollo de aspecto superficial que sufren las muestras cuando pasa el tiempo de fraguado. Izquierda: muestra N°1 día 7, Derecha: muestra N°2 día 21.

De la matriz de correlaciones del día 7 (véase Tabla 10) se observa que solamente el espesor de los experimentos juega un rol importante en los resultados de experimento, lo cual confirma el hecho de que un mayor espesor implica un mayor contenido de humedad no expuesta en la superficie (relación volumen/superficie de la muestra aumenta) y por lo tanto, menor erosión en las pruebas.

Tomando en consideración los resultados, el porcentaje de muestra no erosionada al día 7 de fraguado, en promedio, ronda el valor de 99,24%, lo cual de por sí es un valor bajo

de erosión. Sin embargo, al revisar los resultados del ensayo en el día 21 estos son mucho mejores; se tiene que el promedio de material no erosionado es de 99,97%. En el siguiente gráfico se comparan los promedios de cada muestra en el día 7 y 21:

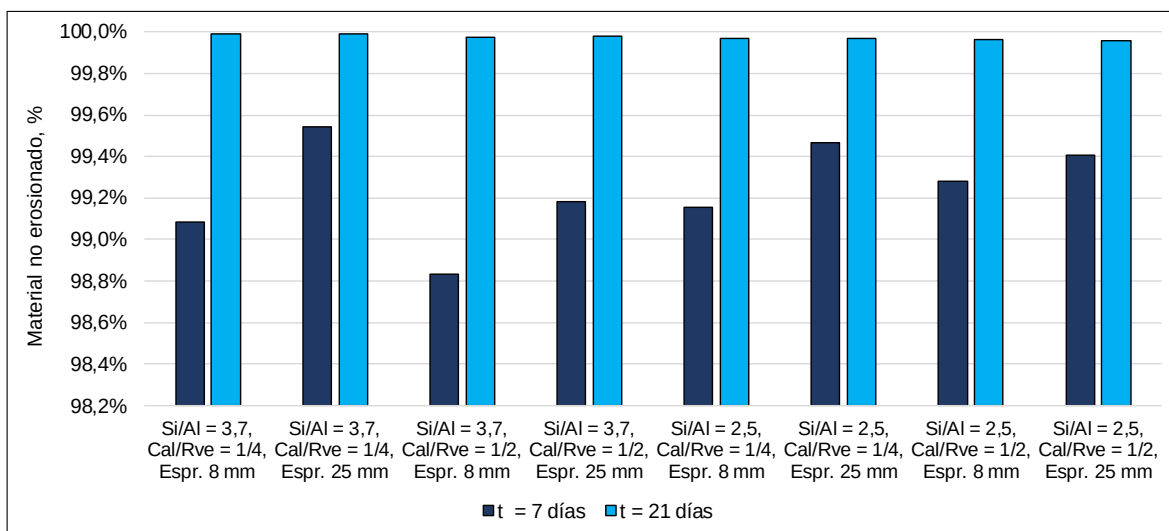


Figura 40: Promedio día 7 y 21 del porcentaje no erosionado de cada muestra en distintas velocidades en túnel de viento. Rve = Relave. Espr = Espesor. Elaboración propia.

La gran diferencia entre cada tiempo de fraguado se debe, como se dijo anteriormente, a que la muestra en el tiempo de 7 días presenta una gran cantidad de humedad en su superficie, por lo que la prueba en el túnel de viento va a tender a evaporar gran parte del agua superficial, siendo esta registrada al momento de hacer la diferencia de masa entre el inicio y el final de la prueba de erosión. De esta forma, se tiene en la prueba al día 21 la diferencia de masa detectada será en gran parte por material efectivamente erosionado.

De los resultados presentados al día 21, es posible observar distintas tendencias en el material. Primero, se tiene que existe un gran impacto entre ajustar o no ajustar la relación molar Si/Al, lo cual se puede observar en la matriz de correlaciones (véase Tabla 12). Ahora bien, se tiene que existe una pequeña tendencia de mejorar la resistencia a la erosión cuando no se ajusta la relación Si/Al. Este resultado puede contradecir lo expuesto Figura 16, donde se muestra que el óptimo de relación molar Si/Al para geopolimerizar corresponde a un rango entre 1,8 a 2,5 pero, sin embargo, investigadores han encontrado que los relaves tienen mejores prestaciones mecánicas cuando geopolimerizan en relaciones molares desde 3 hasta 10 [8]. Dado este motivo, resulta más atractivo realizar un supresor geopolimérico sin ajustar el aluminio del sistema, tanto económicamente como mecánicamente por las propiedades desarrolladas.

Otro efecto que es posible observar según los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al día 21 es la resistencia a la erosión por viento disminuye cuando existe mayor cal en el geopolímero, lo cual queda expuesto en la correlación (moderada y fuerte) con valor negativo en la matriz de correlaciones correspondiente (véase Tabla 12). Esto puede ocurrir debido a que, si bien la cal tiene un rol importante en la geopolimerización dado que genera el aumento de pH necesario para que ocurran las reacciones descritas en la sección 2.1.3.1, además de generar más precipitación de geles ligantes (véase sección 2.1.4.5), un exceso de esta puede generar una mayor cantidad de fase no reaccionante y que va a corresponder a cal hidráulica pura, por lo que tendrá baja resistencia mecánica y por ende menor resistencia a la erosión por viento. De esta forma, debe existir un correcto balance entre el material precursor (relave) y el agente activante (cal hidráulica) para alcanzar un óptimo de propiedades mecánicas dado que se maximiza la fase ligante, geopolímero. Lo anterior queda representado en el siguiente esquema:

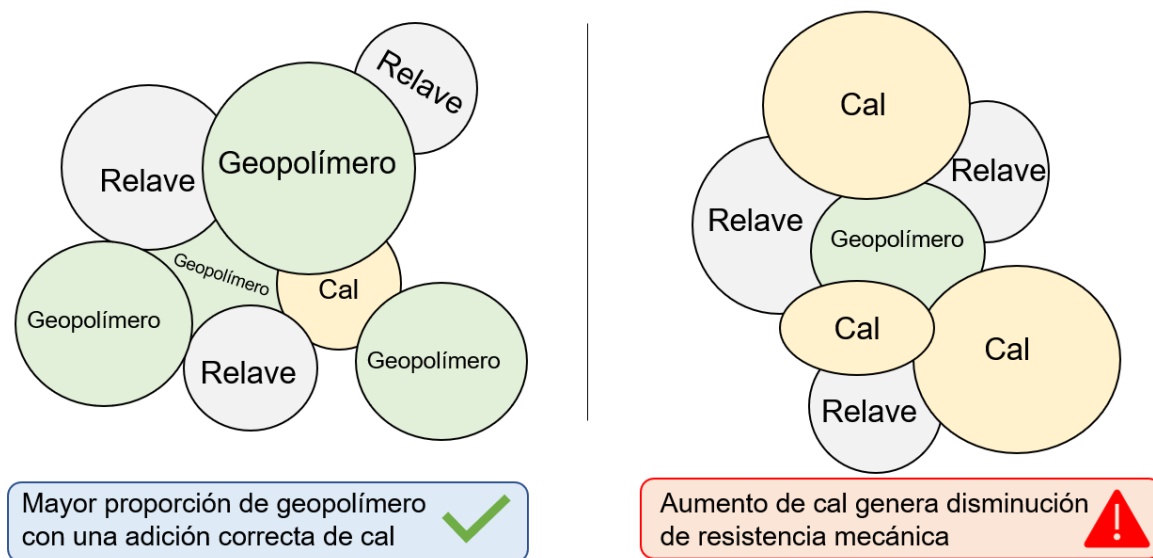


Figura 41: Esquema que muestra el efecto de la cal en las propiedades mecánicas.

Por último, se observa que el espesor no tiene ningún tipo de impacto en los resultados del día 21, demostrando que la humedad presente en la muestra es mínima y no importante en términos de la resistencia a la erosión.

Cabe destacar que también se realizó el ensayo a una muestra de relave sin ningún tipo de tratamiento, a fin de comprar una muestra sin supresor de polvo versus las muestras que actúan como supresor de polvo geopolimérico. Los resultados para la muestra control son los siguientes:

Tabla 13. Resultados túnel de viento para muestra de control. Elaboración propia.

	Masa inicial	Material no erosionado, %		
		5 m/s	9 m/s	11 m/s
Muestra control	210,3	99,70%	97,31%	95,09%

A continuación, se muestra una comparación entre la muestra de control de y una muestra al día 21 en el ensayo del túnel de viento:

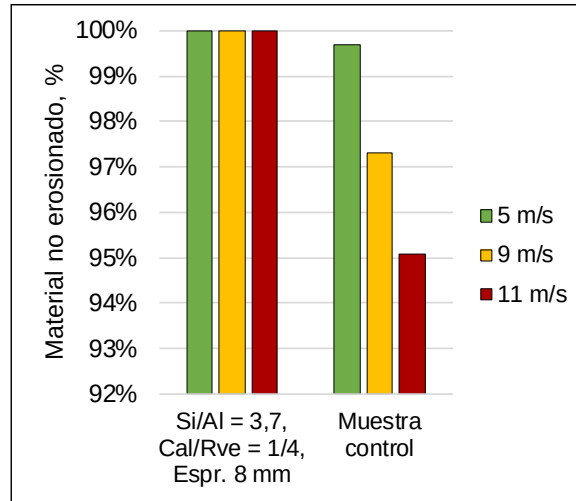


Figura 42: Comparación entre muestra N°1 (tiempo de fraguado de 21 días) y muestra de control. Elaboración propia.

De los resultados, se observa que el supresor de polvo le otorga al relave una mejora sustancial en la capacidad de resistir la erosión producto del viento, por lo cual es un resultado bastante satisfactorio desde el punto de vista del supresor de polvo geopolimérico. En efecto, mientras que el supresor de polvo geopolimérico tiene prácticamente nula erosión durante la prueba del túnel de viento, el relave está perdiendo el 5% de su material aproximadamente en solo 10 minutos para el caso de la velocidad de viento de 11 m/s, lo cual representa una erosión bastante grande.

Adicionalmente, se realiza una estimación de la tasa de pérdida de masa que posee cada muestra por unidad de área, asumiendo que no hay emisión de humedad. Para esto, utilizando las dimensiones de cada muestra para obtener el área superficial, se determina la masa liberada por área a través del tiempo. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 14: Cálculo de pérdida de masa para muestras geopoliméricas y de control.

Muestra	Superficie muestra, cm ²	Pérdida de masa, g/m ² /min		
		5 m/s	9 m/s	11 m/s
Si/Al = 3,7, Cal/Relave = 1/4, Espesor 8 mm	140,6	0,10	0,11	0,12
Si/Al = 3,7, Cal/Relave = 1/4, Espesor 25 mm	102,1	0,09	0,10	0,13
Si/Al = 3,7, Cal/Relave = 1/2, Espesor 8 mm	142,4	0,15	0,22	0,27
Si/Al = 3,7, Cal/Relave = 1/2, Espesor 25 mm	83,2	0,24	0,31	0,36
Si/Al = 2,5, Cal/Relave = 1/4, Espesor 8 mm	77,0	0,21	0,25	0,28
Si/Al = 2,5, Cal/Relave = 1/4, Espesor 25 mm	111,7	0,33	0,39	0,46
Si/Al = 2,5, Cal/Relave = 1/2, Espesor 8 mm	80,4	0,33	0,38	0,40
Si/Al = 2,5, Cal/Relave = 1/2, Espesor 25 mm	83,2	0,50	0,54	0,60
Control	69,1	8,21	78,19	140,30

Nota: Para el cálculo del área superficial se toma en cuenta las superficies directamente expuestas al viento, es decir, no se considera la base ni la superficie trasera de la muestra.

Luego, gráficamente se obtiene lo siguiente:

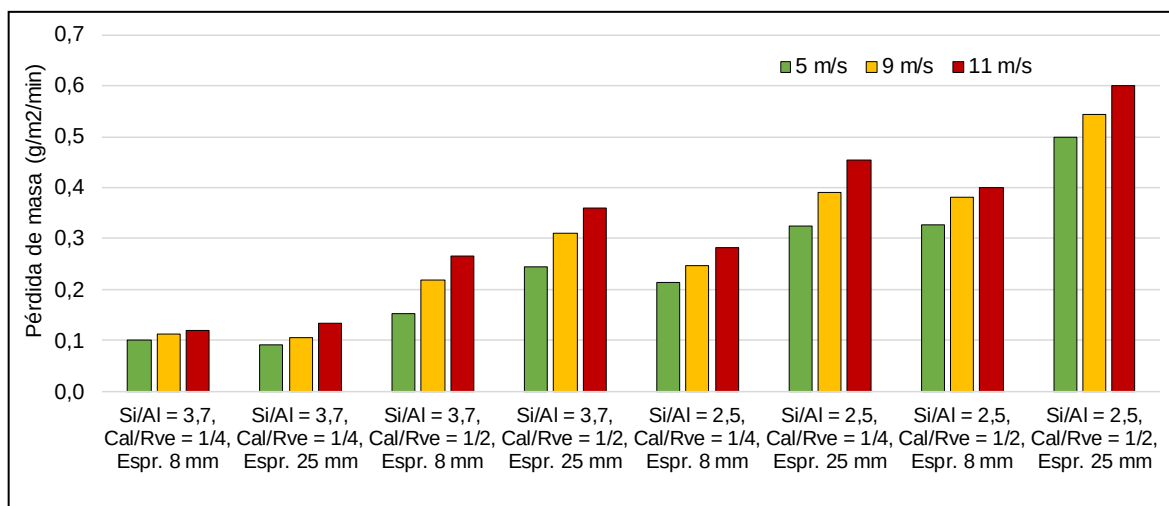


Figura 43: Estimación de tasa de pérdida de masa de muestras geopoliméricas.

De los resultados, es posible observar que existe una tasa de pérdida de masa, en promedio entre todas las muestras, de 0,29 g/m²/min, siendo un valor extremadamente bajo si se compara con los resultados de la muestra de control, la cual en promedio genera una pérdida de 75,57 g/m²/min. De esta forma, la erosión que se genera en las muestras geopoliméricas es prácticamente nula si se compara con la muestra de control, siendo casi dos órdenes de magnitud menos.

Luego, al observar los resultados de pérdida de masa de las muestras geopoliméricas, es posible observar que las que presenta la menor erosión corresponde a las primeras dos muestras, con relación molar Si/Al = 3,7, Cal/Relave = 1/4 y espesor de 8 mm o 25 mm, por lo que estas muestras son las que tienen las mejores condiciones de preparación para lograr los mejores resultados en el ensayo en el túnel de viento y, por tanto, corresponde a la preparación de supresor de polvo geopolimérico que será puesta a prueba en una aplicación en terreno y en ensayos de caracterización química, física y mecánica.

Adicionalmente, es posible observar nuevamente el efecto de la Cal Hidráulica sobre la resistencia a la erosión de las muestras, donde se tiene que un exceso de esta cal empeora el rendimiento de la muestra y, naturalmente, encarece la preparación del supresor de polvo.

Dado los cálculos realizados, es posible obtener un porcentaje de eficiencia en la reducción de polvo de las muestras. Esto es posible dado que se conoce la erosión que presenta una muestra de relave sin ningún tipo de supresor de polvo. De esta forma, se tiene lo siguiente:

Tabla 15: Estimación de eficiencia en reducción de polvo de muestras geopoliméricas.

Muestra	Eficiencia en reducción de polvo, %		
	5 m/s	9 m/s	11 m/s
Si/Al = 3,7, Cal/Relave = 1/4, Espesor 8 mm	98,79%	99,86%	99,92%
Si/Al = 3,7, Cal/ Relave = 1/4, Espesor 25 mm	98,89%	99,87%	99,90%
Si/Al = 3,7, Cal/ Relave = 1/2, Espesor 8 mm	98,15%	99,72%	99,81%
Si/Al = 3,7, Cal/ Relave = 1/2, Espesor 25 mm	97,02%	99,60%	99,74%
Si/Al = 2,5, Cal/ Relave = 1/4, Espesor 8 mm	97,38%	99,68%	99,80%
Si/Al = 2,5, Cal/ Relave = 1/4, Espesor 25 mm	96,04%	99,50%	99,68%
Si/Al = 2,5, Cal/ Relave = 1/2, Espesor 8 mm	96,03%	99,51%	99,71%
Si/Al = 2,5, Cal/ Relave = 1/2, Espesor 25 mm	93,93%	99,31%	99,57%

El gráfico asociado a la tabla anterior es el siguiente:

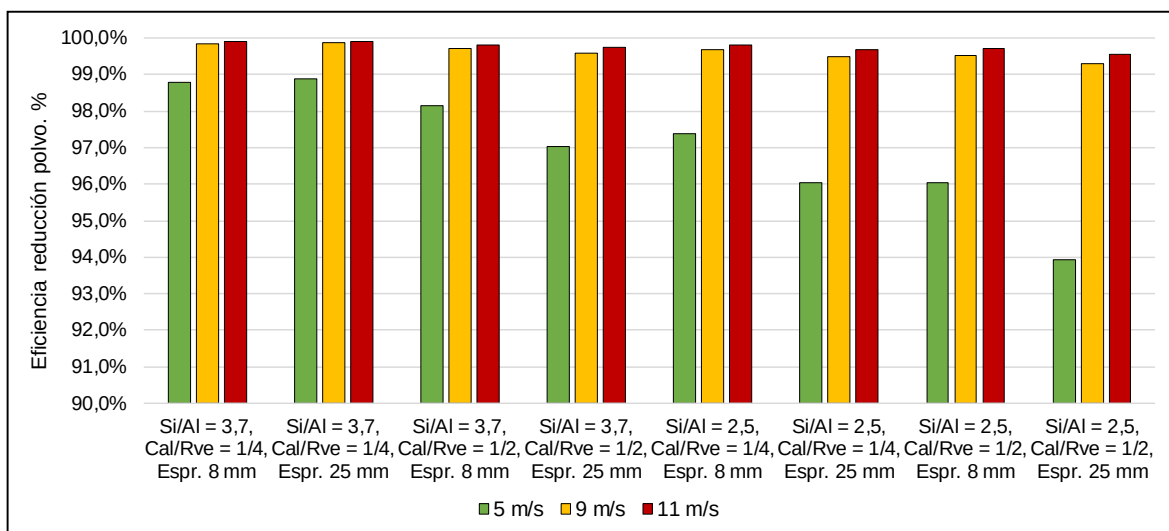


Figura 44: Eficiencia reducción de polvo muestras geopoliméricas.

Los resultados muestran que los geopolímeros tienen una capacidad excepcional de reducir la emisión de polvo cuando la velocidad de viento es alta, mientras que esta capacidad decae levemente cuando la velocidad de viento es baja en las muestras que presentan peor comportamiento, con un 93,9% de eficiencia en reducción de polvo para la muestra de peor calidad. Sin embargo, la muestra que se desarrollará para las pruebas de caracterización posee un buen comportamiento a todas las velocidades de viento, con un 98,8% de eficiencia aproximadamente cuando la velocidad de viento es de 5 m/s, siendo un resultado sustancialmente superior a la eficiencia del método actual de humectación, el cual posee una eficiencia de 40% [41].

5.3. EXPERIMENTOS SEGUNDA PARTE

Los resultados de los experimentos en faena realizados a las muestras fabricadas del supresor de polvo geopolimérico (relación molar Si/Al $\approx$ 3,7 y relación másica Cal/Relave = 1/4) se muestra a continuación:

5.3.1. PRUEBA RESISTENCIA A LA EROSIÓN EN LA INTEMPERIE

Los resultados de las mediciones de masa a través del tiempo de cada muestra se muestran a continuación:

Tabla 16: Resultados pruebas erosión en terreno. Muestras N°1 a 3 corresponden a supresor de polvo geopolimérico. Muestra N°4 corresponde a relave (muestra control).

Muestra	Masa, g			Variación de masa, %	
	t = 0 días	t = 10 días	t = 17 días	1ra variación	2da variación
Muestra 1	6.297	4.256	4.259	32,41%	-0,07%
Muestra 2	6.742	4.310	4.314	36,07%	-0,09%
Muestra 3	5.688	3.563	3.566	37,36%	-0,08%
Muestra control	3.416	3.390	3.386	0,76%	0,12%

Como se observa, la muestra que corresponde relave sin ningún tipo de tratamiento sufre una erosión de 0,76% en la primera medición y otra de 0,12% en la segunda medición. Pero, por otro lado, las muestras de geopolímero sufren un gran cambio de masa en un inicio, lo cual se debe a la pérdida de humedad que sufre el material dado el proceso de fraguado. Sin embargo, se tiene que desde el día 10 al día 17 se presenta una leve ganancia de masa (de 3 a 4 gramos por muestra) por parte de estas muestras geopoliméricas, lo cual se debe a que las características del lugar en donde se encuentran las muestras no corresponden a un sistema aislado, por lo que estas se contaminan con el relave de la zona, presentando un aumento de masa entre mediciones. En términos de erosión, el geopolímero posee una menor erosión que la zona de relave en donde se encuentran. Lo anterior queda representado en el siguiente esquema:

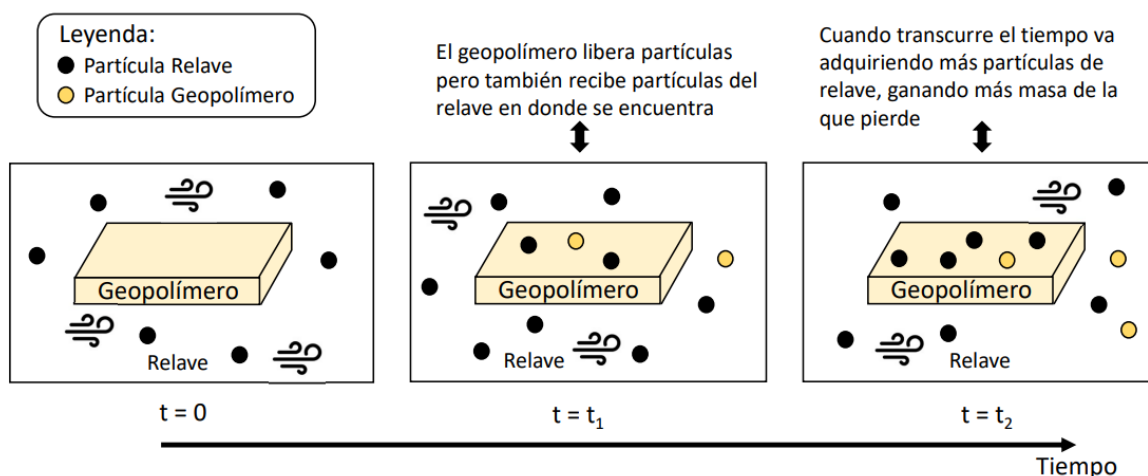


Figura 45: Esquema de explicación de resultados de las pruebas de emisión de polvo en terreno. Elaboración propia.

Producto del anterior fenómeno, se tiene que estos resultados de erosión no son precisos como el sistema aislado que se presenta en el túnel de viento, donde si existe una cierta

certeza de que el material se erosiona. Sin embargo, esto replican los resultados de laboratorio mediante el túnel de viento, dado que se presentaba una erosión al viento casi nula en las pruebas, siendo esto lo observado en la Tabla 16 con las pruebas en terreno y, por lo tanto, el geopolímero sigue teniendo factibilidad técnica para su utilización como supresor de polvo.

Con respecto al efecto que genera la intemperie en el fraguado de las piezas, se observó que las muestras sufren un agrietamiento durante este proceso. En la siguiente figura se puede observar un antes y después de las muestras:



Figura 46: Antes y después muestra N°1 en terreno.



Figura 47: Antes y después Muestra N°2 en terreno.



Figura 48: Antes y después Muestra N°3 en terreno.

De lo observado en las muestras, se tiene que estas grietas no son superficiales, sino que más bien son grietas completas que fracturan el geopolímero en distintas piezas. Adicionalmente, de las muestras que se prepararon para revisar el efecto de la humectación en el proceso de fraguado, se tiene que la humectación tuvo efecto observable a simple vista para evitar el proceso de fracturación en el geopolímero, aunque solo en la muestra que fue preparada en bandeja de aluminio, dado que la muestra preparada in situ presentó el mismo fenómeno de agrietamiento. Estos resultados pueden observarse en la siguiente figura:



Figura 49: Muestras de geopolímero preparada en bandeja e in situ para observación de fraguado. Día 0.



Figura 50: Estado de muestras preparadas para observación de fraguado y efecto de humectación después de 1 semana.

De esta forma, se puede considerar que la muestra preparada en bandeja y con humectación no sufre el proceso de fracturación debido a que tiene una mayor humedad durante el proceso de fraguado que las otras muestras analizadas. Esto también se puede deducir por el hecho de que las muestras preparadas in situ sufrieron fracturación alrededor de 5 minutos después de preparadas, tal como se observa a continuación:



Figura 51: Agrietamiento producido en las muestras preparadas in situ al cabo de 5 minutos aproximadamente.



Figura 52: Ampliación de fractura producida en muestra in situ en los primeros 5 minutos de fraguado.

De esta forma, tener la muestra en condiciones de fraguado húmedas resulta importante para evitar que estas se fracturen en el proceso. Luego, las muestras in situ se fracturan al instante dado que son muestras que van a presentar la menor humedad en el fraguado producto del proceso de percolación del agua a través del depósito, lo cual no ocurre cuando las muestras están en una bandeja de aluminio (en las Figura 46, Figura 47 y Figura 48 se observan como estas muestras tienen una humedad elevada mientras se encuentran en la bandeja, mientras que en la Figura 51 se observa una muestra menos húmeda en comparación). El fenómeno se representa en la siguiente figura:

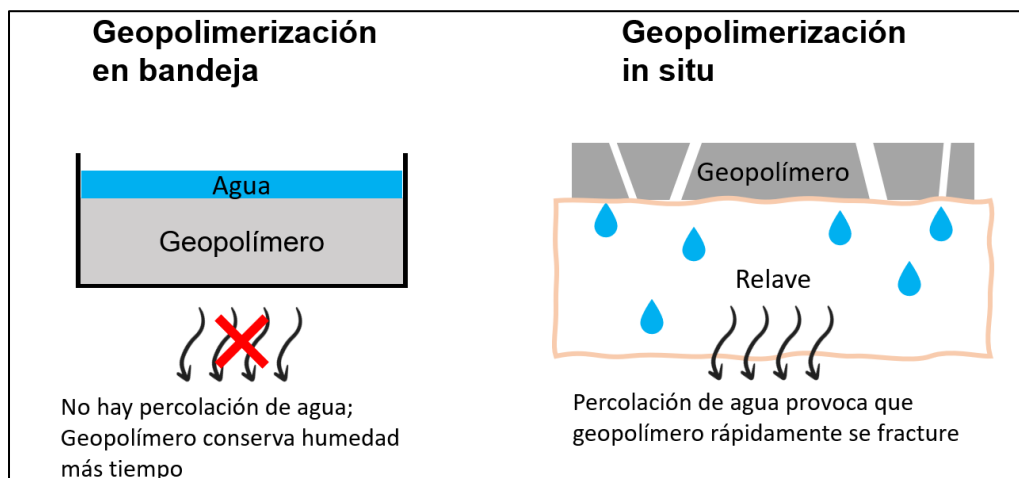


Figura 53: Esquema que representa la diferencia en las distintas condiciones de fraguado con respecto a la humedad del geopolímero. Elaboración propia.

De esta forma, se puede concluir que este fenómeno de agrietamiento es una condición que siempre ocurriría cuando se aplique industrialmente este producto geopolimérico, dado que resulta difícil replicar las condiciones de fraguado que se tiene en bandejas de aluminio cuando se realiza la implementación del supresor geopolimérico industrialmente.

Si bien la fracturación es un fenómeno que puede afectar gravemente la integridad del geopolímero preparado, es importante destacar que las piezas que se generan por este suceso siguen reduciendo la emisión de polvo de relave puesto que sigue siendo geopolímero. Luego, como las grietas representan un bajo porcentaje del área superficial del geopolímero preparado, entonces este supresor de polvo seguirá cumpliendo su función. Y si bien las grietas provocan que el material subyacente quede expuesto al ambiente, estas al tener una cierta profundidad pueden evitar el viento provoque el arrastre y suspensión del material expuesto por dichas grietas, tal como se ejemplifica en la siguiente figura:

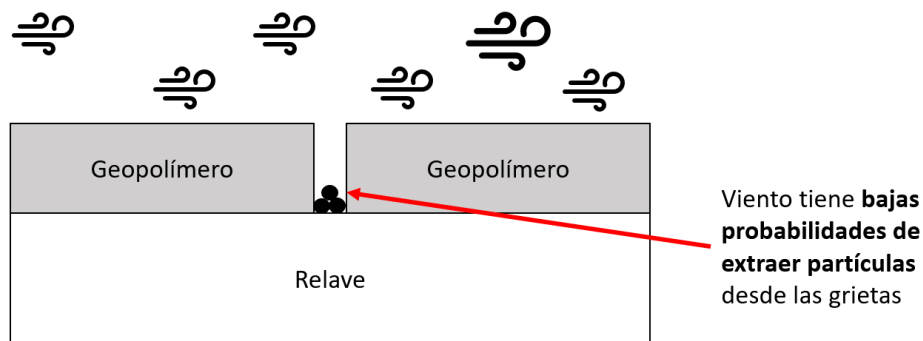


Figura 54: Esquema que muestra el efecto de grietas en la erosión por viento. Elaboración propia.

Por lo tanto, desde las pruebas en terreno se pudo confirmar la viabilidad técnica del método de supresión de polvo propuesto, dado que es posible lograr un satisfactorio proceso de geopolimerización, aumentando la capacidad de resistir la erosión por viento que posee el relave. Sin embargo, durante el proceso de fraguado del geopolímero sufre un agrietamiento dada la condición de exposición solar constante de las muestras, pero como hipótesis, dicho fenómeno no reduciría su capacidad para el abatimiento de polvo, aunque de igual manera resulta importante estudiar el geopolímero bajo estas condiciones de fraguado para tener una mejor proyección de su funcionamiento en aplicación industrial real.

5.4. EXPERIMENTOS TERCERA PARTE: CARACTERIZACIÓN DE SUPRESOR DE POLVO GEOPOLIMÉRICO

5.4.1. ENSAYO DE COMPRESIÓN

Las curvas obtenidas de la máquina de compresión se muestran a continuación:

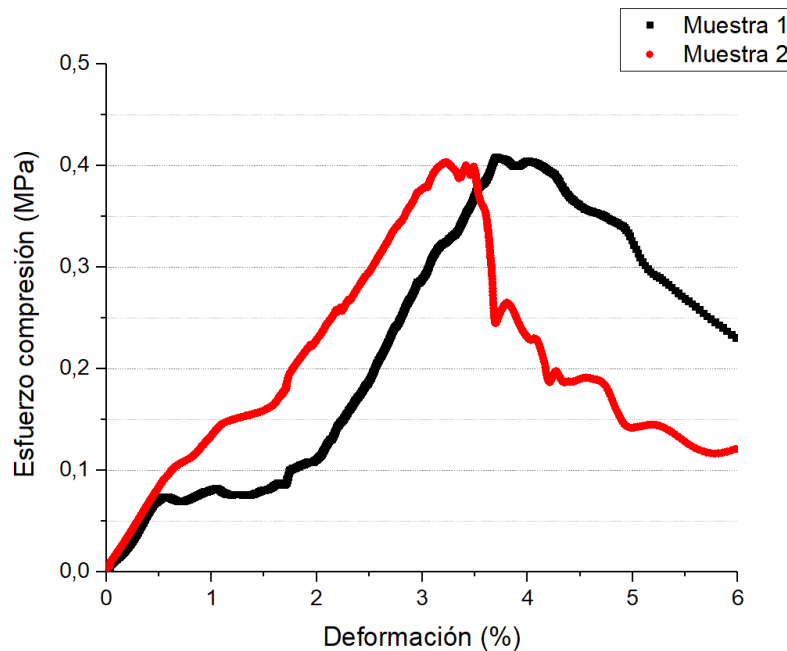


Figura 55: Resultado ensayo de compresión realizado a muestras de supresor de polvo geopolimérico.

De los resultados obtenidos, se tiene que el supresor de polvo geopolimérico posee una resistencia a la compresión de 0,4 MPa aproximadamente, lo cual representa un valor bajo y que se debe a la baja reactividad del relave de cobre al proceso de geopolimerización y a la búsqueda de economizar la preparación del geopolímero; por ejemplo, no se utiliza temperatura ni presión en la preparación de las muestras. Puesto que la resistencia a la compresión no es un aspecto fundamental en la supresión de polvo, no se busca maximizar su valor a priori.

5.4.2. RESISTENCIA MECÁNICA SUPERFICIAL

De las pruebas de dureza donde se obtuvieron 142 mediciones en total, las cuales se pueden revisar en Anexo 1, se realiza el siguiente gráfico:

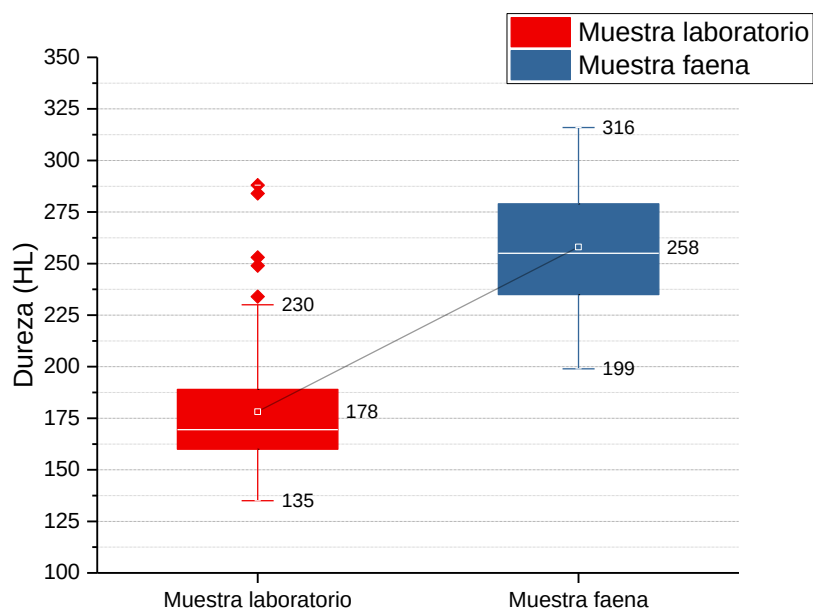


Figura 56: Resultado en boxplot de pruebas de dureza en muestra de laboratorio y de faena.

De los resultados, se tiene que la dureza Leeb promedio que presenta la muestra de laboratorio preparada es de 178 HL, mientras que la muestra de faena (expuesta a la intemperie sobre el depósito de relave N°2 de faena minera en el proceso de fraguado) tiene un valor promedio de 258 HL. De esta forma, es posible observar el impacto que genera la luz solar directa durante el proceso de fraguado en la resistencia mecánica superficial, dado que permite que se alcance un ligero aumento de esta propiedad superficial, lo que repercute directamente en la capacidad de soportar la erosión del viento; a mayor resistencia mecánica superficial, menor será la erosión por viento. Este fenómeno ocurre porque la luz solar genera un aumento en la cinética de las reacciones químicas que se producen en el material, por lo que se genera una mayor cantidad de fase ligante y, por tanto, mayor resistencia mecánica.

5.4.3. DENSIDAD

Los resultados de los ensayos de humedad se muestran a continuación:

Tabla 17: Resultados ensayo de densidad en geopolímero.

N° Muestra	Masa, g	Vol i, mL	Vol f, mL	ρ , g/mL
1	18,8	50	61	1,7
2	19,7	40	52	1,6
3	5,7	20	24	1,4
4	9,3	20	25	1,9

5	6,0	20	23	2,0
6	33,4	54	69	2,2
7	15,7	50	57	2,2
8	11,6	40	47	1,7
9	12,0	40	46	2,0
10	25,2	46	56	2,5

Luego, gráficamente se tiene lo siguiente:

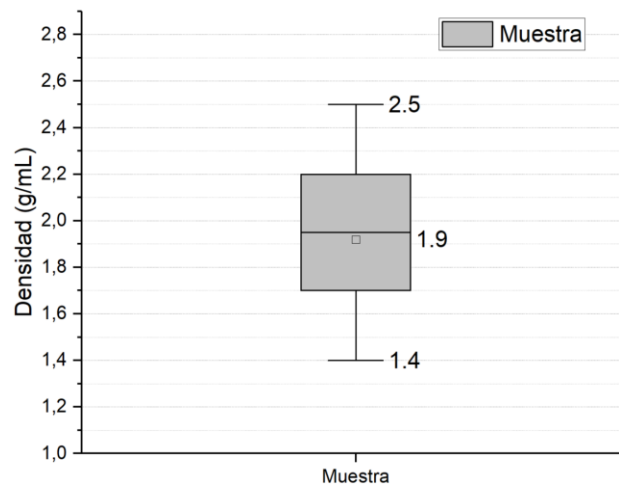


Figura 57: Resultados ensayos de densidad en geopolímero.

Por lo tanto, el resultado reportado de densidad de las muestras al día 28 de fraguado es de 1,9 g/mL o 1,9 t/m³.

5.4.4. HUMEDAD

De las mediciones de humedad, se observa los valores de masa reportados para cada una de las muestras trabajadas:

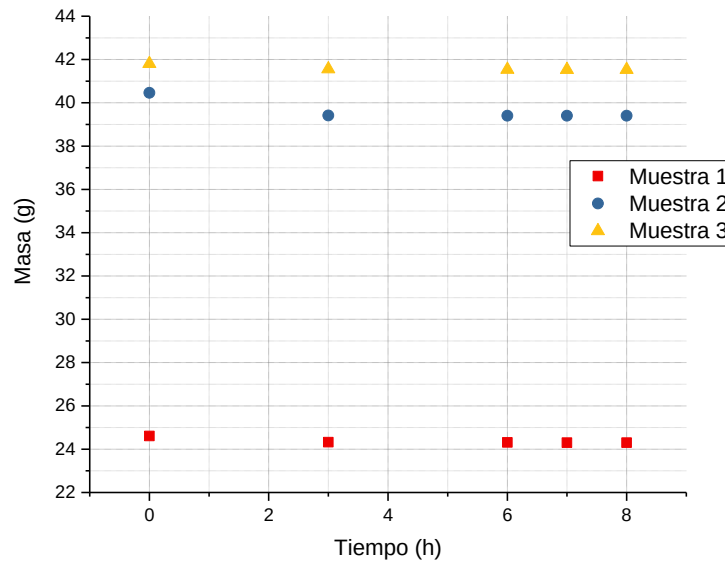


Figura 58: Mediciones de masa para ensayo de humedad.

Luego, al calcular el porcentaje de variación entre las mediciones se obtiene lo siguiente:

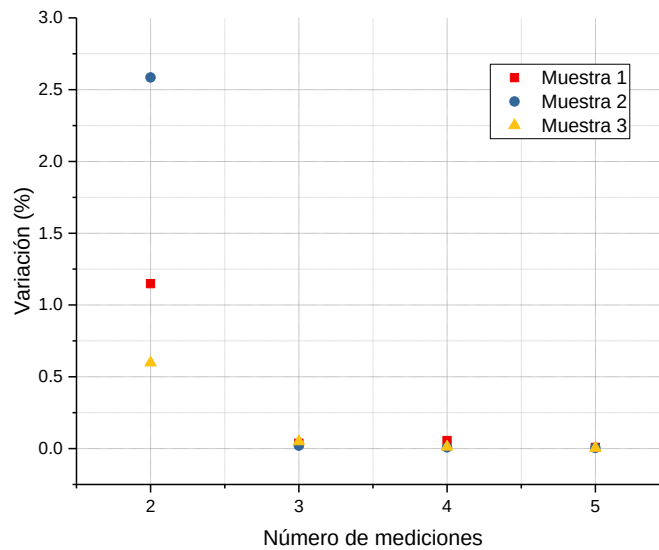


Figura 59: Porcentaje de variación entre mediciones de humedad.

De esta forma, se observa que en la medición 5 se alcanza a la estabilidad en la masa reportada, por lo que es posible determinar la humedad de la muestra. Por lo tanto, al hacer la estimación se tiene que el porcentaje promedio de humedad que poseen las muestras analizadas es de aproximadamente 1,43% en base húmeda.

5.4.5. ESTABILIDAD EN AGUA

De las muestras con 3 semanas de fraguado que fueron sumergidas en un vaso precipitado, se observa que la condición acuosa donde se encuentran las muestras no impacta de manera visible la integridad de las piezas, lo que es un indicativo de que este producto geopolimérico pueden soportar condiciones de agua sin sufrir alteraciones en su integridad física. Esto queda reflejado en la siguiente figura:

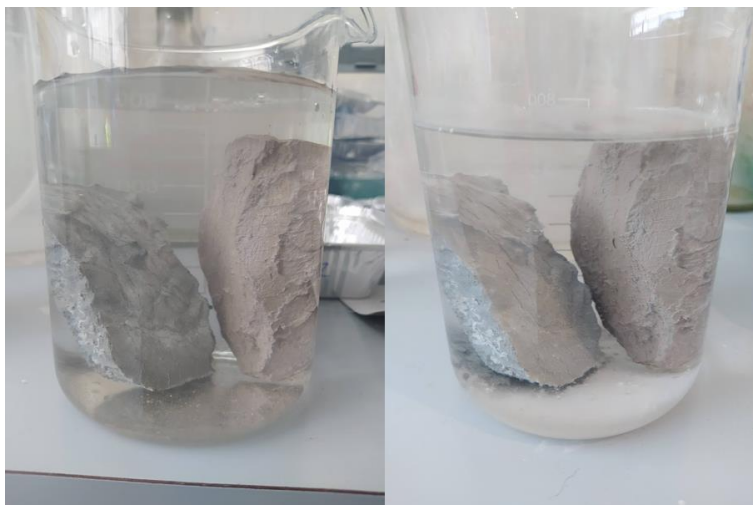


Figura 60: Muestras de geopolímero en vaso precipitado junto con agua. Izquierda: Muestra en el día 0. Derecha: Muestra en el día 28.

Por otro lado, de las pruebas en donde se simula una lluvia mediante una piseta sobre las muestras, estas no sufren ningún tipo de disgregación o fracturación al someterse a la prueba, por lo que el geopolímero posee las condiciones para soportar las condiciones climáticas referente a la lluvia. El antes y después de la prueba se puede observar en la siguiente figura:



Figura 61: Prueba resistencia a la lluvia. Izquierda: Antes de la prueba. Derecha: Después de la prueba.

5.4.6. ENSAYO SPLP

Los resultados del análisis químico SPLP se muestran a continuación:

Tabla 18: Resultado análisis químico ensayo SPLP.

	Cu (g/L)	Fe (g/L)	Mg (g/L)
Geopolímero 1	0,001	0,003	0,003
Geopolímero 2	0,001	0,004	0,004
Relave 1	0,001	0,006	0,007
Relave 2	0,001	0,004	0,006

Gráficamente:

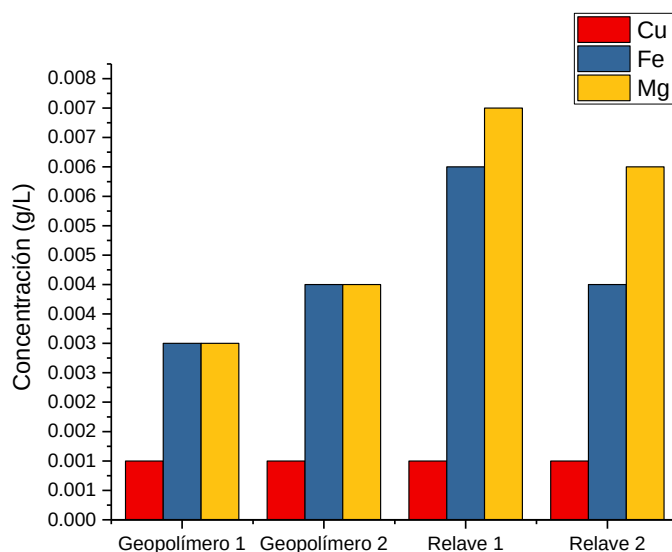


Figura 62: Resultados ensayo SPLP.

De los resultados, se observa una mediana estabilización química del geopolímero con respecto al relave. En el caso del cobre, no se presenta una mejora en la estabilización. Para el hierro, se tiene una reducción del 30% de lixiviación del elemento, mientras que para el Mg se alcanza una reducción de 46,2%. La mediana estabilización de los elementos químicos puede ocurrir debido a que las condiciones de geopolymerización (cal hidráulica) no son óptimas desde el punto de vista de la reacción, generando una baja cantidad de fase geopolimérica, por lo que es posible indicar que esta geopolymerización estabiliza medianamente el movimiento de analitos de los depósitos de relave. Sin embargo, dado el fracturamiento que posee el geopolímero desarrollado en el proceso de fraguado, es posible que el agua lluvia pase a través de las grietas y pueda disolver los elementos del relave.

5.4.7. ENSAYO ABA

Para el Potencial de Acidez (PA), según los datos reportados por Sernageomin se presenta el siguiente nivel de azufre en los depósitos de relave de la Compañía Minera Cerro Negro:

Tabla 19: Contenido de azufre en depósitos de relave de la Compañía Minera Cerro Negro.

N° Depósito	S total, %
Depósito N°1	0,06
Depósito N°2	0,14
Depósito N°3	0,19
Depósito N°4	0,05
Depósito N°5	0,01
Depósito N°6	0,05
Promedio	0,08

Fuente: Extracto de [47].

Dado que existe una gran variabilidad en valores que se pueden reportar de azufre en un muestreo de depósitos de relaves producto de la variabilidad que pueden poseer estos, se considerarán tres casos de estudio: el primer caso considera el promedio (0,08% S total), luego el segundo caso va a considerar el máximo valor reportado, 0,19% S total para el depósito N°3, y el último caso considera un 50% más que el máximo reportado, es decir 0,29% de S total. Cabe destacar que el valor de azufre reportado por un análisis químico del año 2021 realizado por la Compañía Minera Cerro Negro al tranque de relave N°1 y N°2 es de 0,16% aproximadamente, por lo que la condición máxima descrita anteriormente (0,29%) cubre este valor [49].

De esta forma, se tienen los siguientes valores de PA utilizando la Ecuación (5):

Tabla 20: Resultados Potencial de Acidez del relave.

S total, %	PA, kg CaCO ₃ equiv./ton mineral
0,08	2,50
0,19	5,94
0,29	8,91

Por otro lado, en el caso de la cal hidráulica se tiene que su contenido de azufre es de 1,0%, considerando el máximo valor reportado [48]. Por lo tanto, su valor de PA es de 31,25 kg CaCO₃equiv./ton mineral. De esta forma, considerando la cantidad de relave y

cal agregada para preparar el geopolímero, se tienen las siguientes estimaciones del PA ponderado y para cada nivel estimado de PA del relave:

Tabla 21: Resultados PA para muestras analizadas.

Muestra	S total, % (relave)	PA, kg CaCO ₃ equiv./ton mineral
Relave	0,08	2,50
	0,19	5,94
	0,29	8,91
Geopolímero	0,08	9,96
	0,19	12,27
	0,29	14,50

Es posible observar como el geopolímero presenta un mayor Potencial de Acidez debido a que la cal hidráulica presenta un aumento de azufre con respecto al relave.

Luego, para la estimación del Potencial de Neutralización se obtuvo lo siguiente:

- Se estimó que el geopolímero reacciona con HCl 1:3 en categoría *Moderado* según la norma, por lo que se debe utilizar ácido HCl 0,5 N con un volumen de 40 mL. Por otro lado, el relave se estimó que está en la categoría de *Leve* según la norma, por lo que se debe utilizar un volumen de 40 mL de concentración 0,1 N [46].

De esta forma, de las titulaciones realizadas se tiene lo siguiente:

Tabla 22: Resultados ensayo Sobek para determinación de potencial de neutralización.

Muestra	Volumen NaOH, mL*	Constante C	Ácido consumido, mL	$PN = \frac{\text{kgCaCO}_3\text{equiv.}}{\text{ton mineral}}$
Geopolímero	16,58	1,48	15,38	192,31
Geopolímero en Blanco	26,94			
Relave	1,52	1,20	38,18	95,44
Relave en Blanco	33,24			

Nota *: El volumen de NaOH añadido es el teórico considerando la estandarización de esta solución.

Luego, calculando el potencial neto de neutralización:

Tabla 23: Resultado ensayo ABA muestra relave y geopolímero.

Muestra	S total, % (relave)	PNN, kg CaCO ₃ equiv./ton mineral	PN/PA
Relave	0,08	92,94	38,18
	0,19	89,50	16,07
	0,29	86,53	10,71
Geopolímero	0,08	182,62	19,85
	0,19	180,04	15,68
	0,29	177,82	13,27

De esta forma y según los criterios que se tiene para el ensayo ABA, tanto el relave como el geopolímero se encuentran en la categoría de Bajo o Nulo Potencial de Generación de Ácido, puesto que tiene un valor PNN > 20 kg/ton y una relación PN/PA > 3. Esto es un resultado comprensible dado que el relave utilizado para las muestras se encuentra en la intemperie y depositado durante una cantidad grande de tiempo, por lo que las reacciones químicas generadoras de ácido ya se produjeron, dejando un remanente marginal de azufre en la muestra. Por otro lado, los geopolímeros tuvieron un bajo consumo de ácido en la prueba Sobek, por ende se tuvo que adicionar una gran cantidad de NaOH para lograr el pH 7, por lo que tienen un gran valor de Potencial de Neutralización.

5.5. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y APLICACIÓN INDUSTRIAL

Con los resultados obtenidos de las pruebas de erosión por viento, es posible indicar que la geopolimerización de relaves es una alternativa viable para lograr la supresión de polvos de los depósitos de los mismos relaves. De esta forma, se procederá a realizar una revisión de los posibles métodos de aplicación que puede poseer el supresor de polvo de geopolimérico, para luego seleccionar un método entre ellos y poder realizar un cálculo de OPEX y CAPEX para dicho método. De esta forma, en la siguiente sección se hará revisión de los potenciales métodos de aplicación del supresor de polvo geopolimérico.

5.5.1. APLICACIÓN INDUSTRIAL

Para asegurar el éxito del supresor de polvo geopolimérico, se debe definir el cómo aplicar el geopolímero en el depósito de relave, lo cual es un aspecto fundamental para lograr el buen desempeño del producto y puede ser determinante entre que el producto llegue o no a aplicarse en escala industrial. Entre las alternativas más factibles para la aplicación del geopolímero, se tienen los siguientes métodos:

- Extracción del material superficial ya presente y geopolimerización para su reaplicación en la superficie.
- Geopolimerización in situ, lo que corresponde a una aplicación directa de la solución activadora sobre el depósito de relave
- Utilización de solución activadora en el proceso de depósito del relave.

A continuación, se hará una revisión de cada una de las propuestas para encontrar la mejor opción de aplicación.

5.5.1.1. MÉTODO I: EXTRACCIÓN MATERIAL PARA GEOPOLIMERIZACIÓN Y REAPLICACIÓN

El primer método para aplicación del supresor de polvo estudiado consiste en poder recolectar la primera capa del depósito de relave, para luego este ser geopolimerizado y reaplicado en la superficie. El proceso, por tanto, debe constar con una etapa de extracción, luego otra etapa que permita la mezcla entre el material precursor y la solución activadora y una última etapa que corresponda a la aplicación superficial del supresor de polvo geopolimérico.

Para la primera etapa, se puede utilizar retroexcavadoras para lograr extraer el material superficial de relave. Luego, el material debe ser colectado y recibido por un camión mixer, el cual junto con la solución activadora va a lograr la geopolimerización. Por último, mediante tuberías o pitoneo se puede enviar este geopolímero a través de toda la superficie del depósito. A continuación, se observa cómo se ejecutaría el proceso:

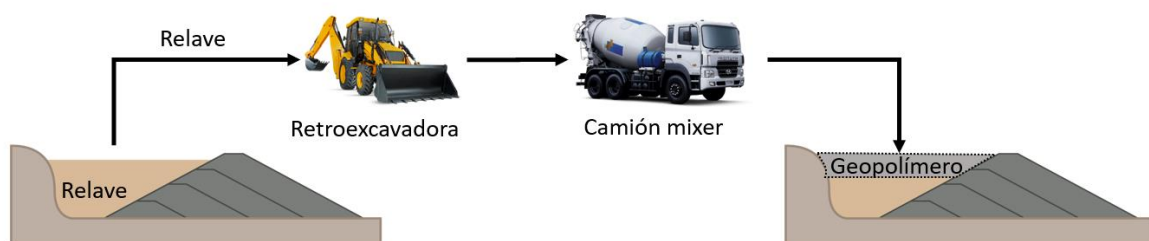


Figura 63: Esquema gráfico de aplicación de supresor de polvo geopolimérico bajo método I.

Naturalmente, este método solo se admite cuando es posible el acceso de vehículos pesados a la zona en donde se requiere la geopolimerización.

Este método resulta el más ineficaz para lograr el cometido, dado que se gasta una gran cantidad de recursos para la extracción de este material (ya sea por diversos métodos) y

posterior aplicación. De esta forma, las ventajas que se tiene es que puede aplicarse a un depósito de relave preexistente (uno abandonado o inactivo, dado que en un relave activo resulta difícilmente aplicable por el hecho de que los camiones no tienen la capacidad para estar sobre el relave en estado pastoso). Otra ventaja es que se puede lograr una buena geopolimerización en la muestra dado que se tiene un paso de mezcla del relave con la solución activadora, lo que va a permitir un buen contacto entre el material precursor y dicha solución. Entre las desventajas, se tiene que puede resultar bastante costoso y tedioso el hecho de extraer el relave existente en la superficie, generando emisiones de polvo, uso de maquinarias pesadas, etc. Además, se debe poseer la accesibilidad de la maquinaria pesada.

5.5.1.2. MÉTODO II: GEOPOLIMERIZACIÓN IN SITU

El presente método puede resultar uno de los más prometedores para lograr la geopolimerización de un depósito relave. Consiste en aplicar la solución activadora (es decir, la solución que contiene agua y cal hidráulica) directamente sobre el depósito de relave para generar las reacciones químicas necesarias para transformar dicho relave superficial en geopolímero (es decir, en supresor de polvo). Esto se encuentra esquematizado en el siguiente diagrama:

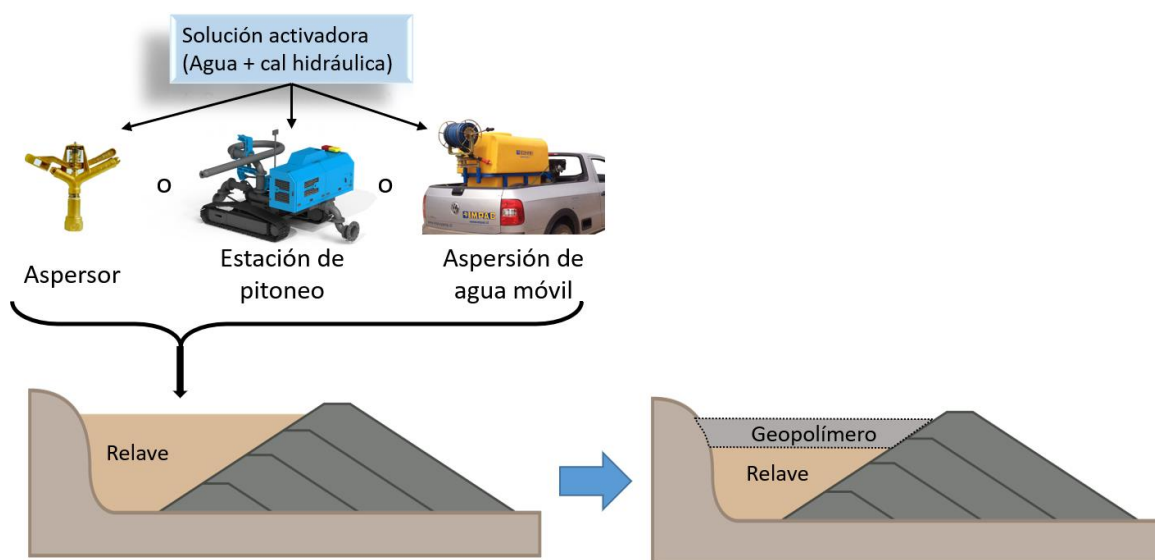


Figura 64: Esquema aplicación geopolímero bajo segundo método, geopolimerización in situ.

Como se puede observar, la solución activadora requiere de algún tipo de maquinaria que sea capaz de realizar dicho trabajo de aspersar la solución para lograr el contacto entre la solución y el relave. Para dicho propósito, puede utilizarse instrumentos simples como

pueden ser los aspersores de agua común y corriente (como los que se encuentran ahora en la faena minera), o estaciones de pitoneo de agua (similares a lo utilizado en el repulpeo de relaves, pero utilizando una menor presión de salida de agua), pasando por maquinaria simple como puede ser estanques con bomba para el rociamiento de la solución utilizando una camioneta [50].

Esto tiene ventajas con respecto al proceso anterior: no existe movimiento de material de relave bajo ningún tipo, por lo que solo se requiere de maquinaria para rociar la solución activadora al depósito de relave. Además, es un método que se puede aplicar a cualquier tipo de relave, ya sea abandonado, inactivo o activo. Como desventaja, se tiene que no existe agitación durante el proceso de fraguado, por lo que puede que no se desarrollen correctamente las reacciones químicas en el relave, resultando en un geopolímero de malas características. Además, este método depende fuertemente del estado en el que se encuentre el relave en su superficie; un relave muy compactado tendrá dificultad respecto a la penetración de la solución activadora, por lo que puede que no se alcance un espesor deseado de geopolímero en la superficie.

En el laboratorio, a modo de observar si es posible de aplicar este método, se realizaron pruebas siguiendo el método de aplicación propuesto. Los resultados se pueden observar a continuación:

5.5.1.2.1. RESULTADO EXPERIMENTO GEOPOLIMERIZACIÓN IN SITU

De las muestras fabricadas, se observa en la Figura 36 que la suposición de 8 mm de geopolimerización de la muestra C y D no se cumple, por lo que se está agregando más solución activadora de la necesaria debido a la baja permeabilidad que presenta el relave, por lo que la superficie de las muestras pueden poseer un geopolímero con exceso de cal y, por tanto, una relación cal/relave distinto a 1/4. De esta forma, para aplicar este método, se debe conocer con exactitud la permeabilidad para agregar la cantidad necesaria de solución activadora. Cabe destacar que, si el relave se encuentra compactado, puede resultar necesario realizar una descompactación de la superficie.

Un resultado interesante de las muestras fabricadas es que solo presentaron el comportamiento de agrietamiento (explicada en Figura 53) las muestras donde se agregó solución para geopolimerizar una parte del relave presente, es decir, de la Figura 36, solo se agrietó la segunda y tercera muestra, mientras que la primera muestra no se agrieta debido a que posee una gran humedad durante el fraguado, replicando los resultados

obtenidos de la geopolimerización en la faena minera. Esto se observa en la siguiente figura:

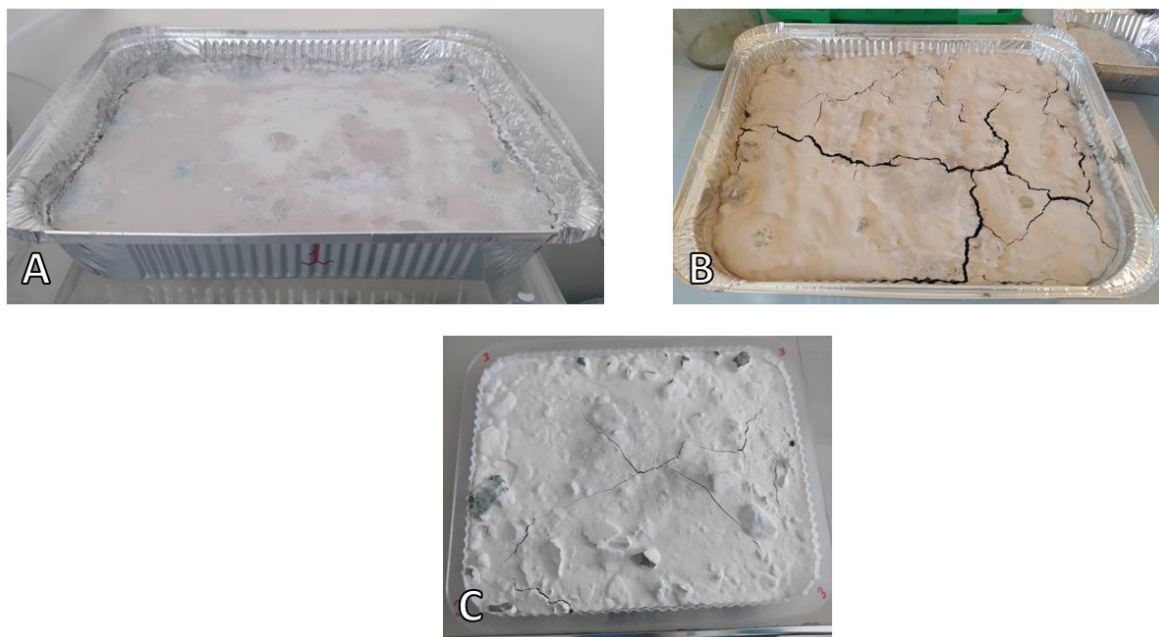


Figura 65: Muestras fabricadas para investigar sobre Método II de aplicación con 10 días de fraguado. A: Primera muestra, no presenta fractura. B: Segunda muestra, presenta fractura. C: Tercera muestra, presenta fractura.

5.5.1.3. MÉTODO III: APLICACIÓN SOLUCIÓN ACTIVADORA EN PROCESO DE DEPOSITACIÓN DE RELAVE

Este método difiere con los métodos anteriores puesto que solo puede ser aplicado a un relave que se encuentra activo, dado que se requiere de todo el sistema que se posee al momento de depositar el residuo en el tranque de relave. La técnica consiste en agregar la solución activadora necesaria para la geopolimerización antes del proceso de ciclonaje (clasificación de relaves), durante, o después del proceso de ciclonaje a modo que el relave se deposite ya con la solución activadora, logrando la geopolimerización. En el siguiente diagrama se observan las posibles zonas en donde se puede realizar el ingreso de la solución activadora:

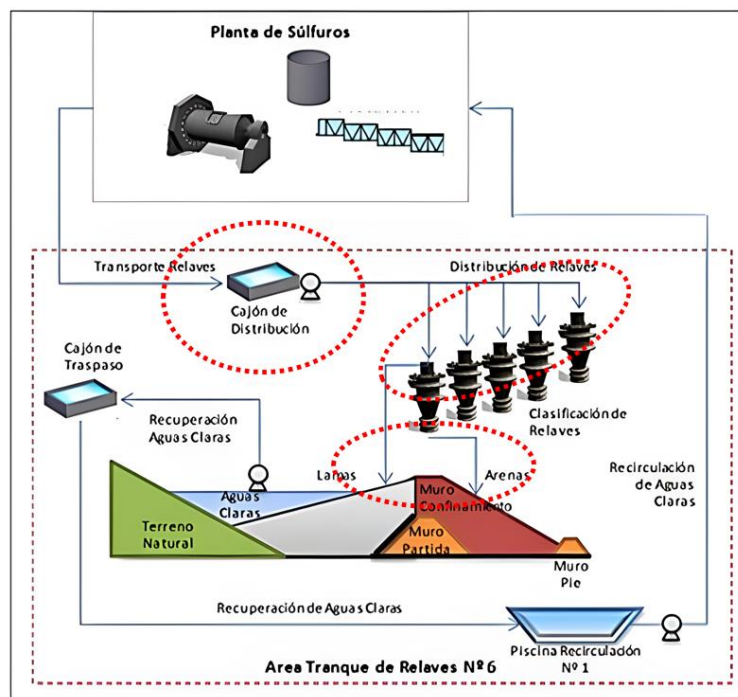


Figura 66: Esquema disposición de relave en Tranque de Relaves N°6 de la Faena Minera Cerro Negro. Zonas marcadas en rojo pueden ser las posibles zonas donde ingrese la solución activadora. Adaptado desde [39].

Como ventajas que posee el proceso, se tiene que este puede generar una buena geopolimerización dado que permite que el material precursor y solución activadora tengan una buena mezcla, otorgándose buenas propiedades resultantes. Además, se utiliza instalación ya existente en la faena, por lo que el costo de inversión es bajo. Como desventaja, se tiene que solo se puede aplicar a los relaves que se encuentran activos, por ende, no se podría utilizar para abatimiento de emisión de polvos en depósitos abandonados o inactivos, al menos que se reinstale el equipamiento necesario para llevar a cabo el depósito de relave. Otra desventaja es que se posee un mayor gasto de reactivos en este método, por el hecho de que existe poco control de la geopolimerización superficial, dando más preponderancia a una geopolimerización a través del volumen.

5.5.1.4. COMPARACIÓN MÉTODOS DE APLICACIÓN: VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Una vez estudiado los posibles métodos de aplicación que puede poseer el supresor de polvo geopolimérico, se procede a enumerar las posibles ventajas y desventajas que posee cada método en la siguiente tabla:

Tabla 24: Comparación distintos métodos de aplicación industrial de supresor de polvo geopolimérico.

Método	Ventajas	Desventajas
Método I: Extracción, geopolimerización y reaplicación	- Puede ser aplicado a relaves preexistentes - Posee excelente agitación entre el material precursor y solución activante	- No puede aplicarse a un relave activo - Requiere de maquinarias pesadas trabajando sobre el relave y, por tanto, dando restricciones de accesibilidad. - Generación de polvo en el proceso
Método II: Geopolimerización in situ	- Requiere una inversión mínima en maquinaria - Puede ser aplicado a la mayoría de depósitos de relave	- Puede que no se realice correctamente la geopolimerización debido a la nula agitación - Depende fuertemente de la permeabilidad del relave superficial y su estado de compactación
Método III: Aplicación solución activadora previo depósito de material de relave	- Corresponde a un método que resulta simple pero eficaz para lograr el contacto entre relave y solución activante - Utiliza instalación preexistente	- Puede existir dificultades para utilizarse en depósitos inactivos o abandonados, dado que requiere la reinstalación de los equipos utilizados en proceso de disposición - En depósitos activos, solo puede utilizarse cuando se está llegando a la etapa final de la vida útil - Exceso en consumo de reactivos

De esta forma, es posible observar que cada método va a poseer ventajas y desventajas, por lo que dependerá de los requerimientos que se tengan para utilizar un método u otro. Sin embargo, el método I resulta más ineficiente que los otros métodos planteados, por lo que no debiese ser una opción que se deba seguir trabajando. Por otro lado, resulta interesantes ahondar más en los métodos II y III para entender mejor como sería la geopolimerización bajo estos métodos y los resultados que se tendrían en terreno. En el presente trabajo, se consideró el método de aplicación II para el análisis económico, el se describirá en la siguiente sección.

5.5.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Una vez que se conoce el método de aplicación industrial más prometedor para llevar a cabo la supresión de polvo mediante el producto geopolimérico, se tratará el cálculo económico que conlleva la implementación de este método y la implementación del método actual de la faena minera.

5.5.2.1. COSTOS SUPRESIÓN DE POLVOS VÍA HUMECTACIÓN

La supresión de polvo vía humectación corresponde al método que se está utilizando actualmente en la Faena Minera Cerro Negro, el cual consiste en rociar agua a la superficie del depósito para lograr adhesión entre partículas (debido al agua) y así evitar la erosión por viento de dichas partículas de relave.

Este método puede resultar bastante caro de mantener, puesto que se utiliza el recurso hídrico de manera poco eficiente dado que se debe humectar la superficie continuamente en el día y durante toda la época estival, donde hay una mayor tasa de evaporación del agua.

En la Compañía Minera Cerro Negro, se ejecuta este método solo al depósito de relave N°6, y durante los meses de mayor temperatura ambiental en Chile, comprendidos entre Septiembre y Marzo, realizándose la humectación continua desde las 7 am hasta 6 pm utilizando 15 aspersores tipo estadio, los cuales tienen un consumo entre 800 L/h hasta 3.270 L/h [51]. En la siguiente figura se puede observar dicho sistema de control:



Figura 67: Sistema de aspersores tipo estadio en talud del tranque de relaves N°6 [51].

Adicionalmente, cada aspersor abarca un diámetro de 20 m aproximadamente (por lo que cubren 314 m² cada unidad). De esta forma, entre la totalidad de aspersores instalados en la actualidad, se tiene que estos cubren un área de 4.710 m².

Por lo tanto, realizando las estimaciones de consumo de agua se tiene lo siguiente:

Tabla 25: Cálculo consumo de agua por humectación en CIA Minera Cerro Negro.

Ítem	Valor	Unidad
Área a humectar	4.710	m ²
Consumo por aspersor	2.035	L/h
	22,4	m ³ /día

N° Aspersores	15	-
Tasa recirculación de agua (suposición)	70	%
Consumo agua total aspersión	100	m ³ /día
Meses del año a humectar	7	meses
Consumo agua por año	21.200	m ³ /año
Costo Agua (suposición: 1 US\$/m³)	\$ 900	\$/m ³
Costo agua por año	\$ 19.000.000	\$/año
Costo normalizado reactivos humectación	\$ 40.400.000	\$/ha/año

Nota: Valores son aproximados.

Sin embargo, se debe incluir costos asociados a los recursos operacionales implicados en el proceso, como el uso energético, remuneraciones, etc. Estos valores se consideran a continuación (para más detalles del cálculo, véase Anexo 2):

Tabla 26: Desglose cálculo OPEX para método humectación con agua.

Ítem	Método actual de aspersión de agua
Costo de agua, \$/ha/año	\$ 40.400.000
Costo cal hidráulica, \$/ha/año	\$ 0
Costo combustible, \$/ha/año	\$ 0
Costo energético, \$/ha/año	\$ 2.200.000
Costo mantenciones, \$/ha/año	\$ 150.000
Costo remuneraciones, \$/ha/año	\$ 4.200.000
Costo OPEX aprox., \$/ha/año	\$ 46.950.000

Luego, para la determinación del CAPEX, es decir el costo de los instrumentos y equipos implicados en este método, se posee el costo en el que incurre la Compañía Minera Cerro Negro cuando se implementó este método de humectación en el año 2015. Estos gastos se desglosan a continuación:

- Materiales: \$ 235.000
- Bomba: \$ 1.500.000
- Mano de obra: No aplica. Instalado por operarios de la planta.

Luego, para escalar el precio desde el año 2015 al año 2023, se utilizó el índice de precios Marshall & Swift [52]. Considerando que los valores corresponden a una industria de procesos, en el año 2015 se tiene un valor del índice de 1.467,4. Luego, el valor estimado para el año 2023 es de 1.613,3 (véase Anexo 3), siendo el costo CAPEX de:

$$CAPEX_{aspersión_{2023}} = (1.613,3/1.467,4) \cdot \$ 1.735.000 \approx \$ 1.900.000 \quad (9)$$

De esta forma, el costo CAPEX del método de aspersión de agua, escalado al año 2023, corresponde a \$ 1.900.000.

5.5.2.2. COSTOS SUPRESOR DE POLVO GEOPOLIMÉRICO

Para la preparación del geopolímero desarrollado, este trabajo investigó distintas condiciones de preparación y cantidades de reactivos, encontrándose que la mejor forma de preparar dicho geopolímero es teniendo una relación molar Si/Al sin ajustar (por lo que se tendrá una relación aproximadamente de 3,7) y una relación másica Cal Hidráulica/Relave de 1/4. Por otro lado, la cantidad de agua utilizada es para lograr una relación másica agua/sólidos de 0,50 aproximadamente. En base a lo anterior, se procede a calcular la cantidad de reactivos a utilizar para la geopolymerización, es decir, el OPEX del proyecto.

Para lograr la geopolymerización de 2 cm de relave en 1 ha de área, es decir 10.000 m², suponiendo que la densidad aparente del relave es de 1,5 t/m³, se debe tratar 300 toneladas de relaves con 75 toneladas de cal hidráulica y 187,5 m³ de agua. Lo anterior se encuentra en la siguiente tabla:

Tabla 27: Estimaciones uso de material para geopolymerización.

	Valor	Unidades
Volumen de relave a geopolymerizar		
Espesor	2	cm
Área	10.000	m ²
Volumen	200	m ³
Densidad aparente relave	1,5	t/m ³
Cantidad y relaciones de materiales		
Cantidad relave	300	t
Relación cal/relave	1/4	
Cantidad cal	75	t
Relación agua/sólido	0,5	
Agua adicionada	187,5	m ³

Luego, el costo del agua será el mismo que se tiene el cálculo del método anterior, correspondiente a 1 US\$/m³, equivalentes a 900 \$/m³ aproximadamente.

Para el caso del precio de la cal hidráulica, se realiza una estimación a través del costo de la cal viva en la Faena Minera Cerro Negro. Para esta estimación, se toma en cuenta el precio actual en planta, el cual corresponde a \$ 298 el kg de cal. De esta forma, es posible obtener un factor entre el precio de la cal en planta y el precio comercial de esta cal viva (\$ 1.090 /kg de cal [53]), obteniéndose un factor de 0,27. Por otro lado, el precio comercial de la cal hidráulica corresponde a \$ 228 el kg [54], por lo que el precio en planta estimado de dicha cal corresponde a \$ 62 el kg de cal hidráulica al aplicar el factor de conversión calculado anteriormente.

Realizando los cálculos respectivos, se tiene que el costo del geopolímero, en términos de la solución activadora a utilizar, son los siguientes:

Tabla 28: Costo reactivo para geopolimerización.

Costo	Valor	Unidad
Relave	No posee	-
Cal hidráulica	\$ 62.000	\$/t
Agua	\$ 900	\$/m ³
Geopolímero	\$ 4.800.000	\$/ha
	3 (suposición)	Años
Costo Normalizado de Reactivos para Geopolimerización	\$ 1.600.000	\$/ha/año

Nota: Valores aproximados.

Hay que destacar que el producto geopolimérico es de larga duración en el tiempo. Si bien debe ser un parámetro que se debe estudiar en un futuro, es posible indicar que los geopolímeros, por ejemplo, tienen una buena resistencia a un ataque ácido (como puede ser una lluvia ácida), teniendo incluso mejor comportamiento que un cemento Portland Ordinario [55]. De esta forma, se tiene que un geopolímero puede tener una duración aproximada de 1 a 10 años, sin embargo, es un parámetro que debe estudiarse en profundidad. Se considera una vida útil de 3 años a efectos de los cálculos, por lo que el costo normalizado de reactivos para la geopolimerización es de \$ 1.600.000 por hectárea por año.

Luego, considerando los distintos costos operativos implicados (como combustible, energía, entre otros), se presenta el siguiente desglose de estos (véase Anexo 2 para detalles de cálculo):

Tabla 29: Desglose costo OPEX para método de supresión de polvo geopolimérico.

Ítem	Geopolimerización de 2 cm y a 3 años
Costo de agua, \$/ha/año	\$ 60.000
Costo cal hidráulica, \$/ha/año	\$ 1.500.000
Costo combustible, \$/ha/año	\$ 0 (aspersión fija) o \$ 40.000 (aspersión móvil)
Costo energético, \$/ha/año	\$ 17.000 (aspersión fija) o \$ 12.000 (aspersión móvil)
Costo mantenciones, \$/ha/año	\$ 14.000
Costo remuneraciones, \$/ha/año	\$ 260.000
Costo OPEX aprox., \$/ha/año	\$ 1.851.000 o \$ 1.886.000

De esta forma, el costo OPEX del método de geopolimerización para supresión de polvo es de \$ 1.900.000 por hectárea por año aproximadamente. Luego, utilizando la información estimada de costo operacional, se puede realizar un cálculo inicial del costo para aplicar el supresor a los depósitos de relave de la Faena Minera Cerro Negro considerando el área superficial expuesta de estos (para conocer el método de estimación, véase Anexo 4). De esta forma, se tiene lo siguiente:

Tabla 30: Resumen cálculo de área superficial y costo de geopolimerización de los depósitos de relave de la Faena Minera Cerro Negro.

Número de depósito	Área superficial, m ²	Costo geopolimerización, \$/año
N°1 y N°2	37.500	\$ 7.100.000
N°3	36.000	\$ 6.800.000
N°4	34.500	\$ 6.500.000
N°5	82.000	\$ 15.500.000
N°6	190.000	\$ 35.900.000
Total	380.000	\$ 71.700.000
	38 (ha)	

Nota: Valores aproximados.

De esta forma, el costo de geopolimerizar toda la superficie de los depósitos de relave de la Faena Minera Cerro Negro es de \$ 71.700.000 pesos por año aproximadamente.

Cabe destacar que, para los cálculos anteriores, se realizó suposiciones en cuanto el espesor de geopolimerización que se debe aplicar industrialmente y la vida útil que posee dicho geopolímero, pero dado que tanto el espesor como la duración son valores supuestos y que requieren de estudios específicos que permitan determinarlos, se realizó un análisis de sensibilidad de estos parámetros para determinar el nivel de holgura que posee el método propuesto para supresión de polvo. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 31: Análisis de sensibilidad OPEX supresor de polvo geopolimérico. Valores en \$/ha/año.

		Centímetros de geopolimerización			
		2	3	5	10
Años de geopolimerización	2	2.900.000	4.100.000	6.500.000	12.500.000
	3	1.900.000	2.700.000	4.300.000	8.400.000
	5	1.200.000	1.600.000	2.600.000	5.000.000
	10	600.000	800.000	1.300.000	2.500.000

Nota: Los valores resaltados corresponden a parámetros plausibles para una potencial aplicación.

Y, por otro lado, el consumo de agua asociado a cada geopolímero del análisis anterior es el siguiente:

Tabla 32: Análisis de sensibilidad en consumo de agua de supresor de polvo geopolimérico. Valores en m³.

		Centímetros de geopolimerización			
		2	3	5	10
Años de geopolimerización	2	94	141	234	469
	3	63	94	156	313
	5	38	56	94	188
	10	19	28	47	94

Nota: Los valores resaltados corresponden a parámetros plausibles para una potencial aplicación.

Se considera que los posibles años de duración del producto geopolimérico puede ser de 3 a 5, con un espesor que puede oscilar entre 2 y 3 cm. Luego, los valores reportados de costo OPEX y consumo de agua no varían en exceso, manteniéndose en el mismo orden de magnitud. El parámetro que tiene el mayor impacto corresponde a espesor de geopolimerización, lo cual se debe a que en el desglose de costo OPEX (véase Tabla 29) el mayor costo es el relacionado a los reactivos utilizados (mayor espesor, más reactivos).

Ahora, para conocer el CAPEX del método de la geopolimerización, se debe considerar los equipos que pueden utilizarse según planteado en el método propuesto para aplicación de este producto, lo cual fue visto en 5.5.1.2. Se tienen tres posibles formas de aplicación: mediante aspersores, utilización de una estación de pitoneo o utilización de un sistema móvil de aspersión. Resulta particularmente interesante la primera y última opción, en cuanto que son métodos económicos de implementar puesto que requieren una mínima inversión en maquinaria y tiene una fácil implementación industrial.

Si se selecciona el método con aspersores de agua, entonces el CAPEX es similar a los \$ 1.900.000 vistos en la sección anterior. En caso de utilizar el sistema móvil, se puede utilizar el producto Pulverizador Plataforma de 400 L, el cual posee un valor comercial de \$ 1.600.000 aproximadamente [50]. Considerando costos como envíos, materiales o instrumentos adicionales que se puedan requerir, se puede redondear un costo cercano a \$ 2.000.000 aproximados.

5.5.2.3. COMPARACIÓN COSTOS DE MÉTODOS DE MITIGACIÓN EMISIÓN DE POLVOS

A continuación, se observa una tabla comparativa de los valores de costo operacional de ambos métodos:

Tabla 33: Desglose costo OPEX para ambos métodos de supresión de polvo.

Ítem	Geopolimerización de 2 cm y a 3 años	Método actual de aspersión de agua
Costo de agua, \$/ha/año	\$ 60.000	\$ 40.400.000
Costo cal hidráulica, \$/ha/año	\$ 1.500.000	\$ 0
Costo combustible, \$/ha/año	\$ 0 (aspersión fija) o \$ 40.000 (aspersión móvil)	\$ 0
Costo energético, \$/ha/año	\$ 17.000 (aspersión fija) o \$ 12.000 (aspersión móvil)	\$ 2.200.000
Costo mantenciones, \$/ha/año	\$ 14.000	\$ 150.000
Costo remuneraciones, \$/ha/año	\$ 260.000	\$ 4.200.000
Costo OPEX aprox., \$/ha/año	\$ 1.851.000 o \$ 1.886.000	\$ 46.950.000

Se observa que el método actual de aspersión de agua tiene un gran consumo de este recurso en comparación con el método propuesto en este trabajo. Este método geopolimérico, por otro lado, tiene que la cal hidráulica es la que posee el mayor impacto en su costo operacional. Dado esto, resulta importante disminuir el consumo de este reactivo para lograr un supresor de polvo geopolimérico con costos aún más bajos. El método actual también posee un gran costo energético y en remuneraciones, lo cual se debe a que se emplea continuamente durante 7 meses del año, al contrario que la geopolimerización, el cual es una única aplicación cada cierto tiempo, dependiendo de la vida útil estimada para el geopolímero.

Del análisis de sensibilidad es posible obtener el porcentaje de variación del valor obtenido de costo y consumo de agua en el supresor de polvo geopolimérico con respecto al método actualmente empleado en la faena minera. Los resultados se observan a continuación:

Tabla 34: Variación OPEX de geopolímero y método actual en faena minera Cerro Negro.

		Centímetros de geopolimerización			
		2	3	5	10
Años de geopolimerización	2	-1.500%	-1.000%	-600%	-300%
	3	-2.300%	-1.600%	-1.000%	-500%
	5	-3.600%	-2.700%	-1.600%	-800%
	10	-7.300%	-5.400%	-3.300%	-1.700%

Nota: Los valores resaltados corresponden a parámetros plausibles para una potencial aplicación.

Mientras que para el consumo de agua se tiene lo siguiente:

Tabla 35: Variación en consumo de agua para distintos geopolímeros con respecto al método actual en faena minera Cerro Negro.

		Centímetros de geopolimerización			
		2	3	5	10
Años de geopolimerización	2	-48.000%	-32.000%	-19.000%	-9.500%
	3	-72.000%	-48.000%	-28.000%	-14.000%
	5	-119.000%	-80.000%	-48.000%	-23.500%
	10	-239.000%	-159.000%	-96.000%	-47.500%

Nota: Los valores resaltados corresponden a parámetros plausibles para una potencial aplicación.

Se observa que el costo operacional del método de aspersión de agua es mayor en todos los casos analizados que el método propuesto en este trabajo, ocurriendo lo mismo que el consumo de agua, por lo que resulta en una excelente opción para ser utilizado en los depósitos de relaves, y también como un futuro reemplazo de la opción de humectación en el tranque N°6. Como se observa en la Tabla 35, el consumo de agua en el caso de la humectación es al menos 2 órdenes de magnitud mayor que el caso de la geopolimerización, lo cual se debe a que la aspersión utiliza activamente este recurso, mientras que la geopolimerización solo se utiliza para generar la geopolimerización. De esta forma al considerar que el recurso hídrico es crítico, resulta bastante favorable el producto geopolimérico desarrollado.

Con respecto al costo de inversión CAPEX, se tiene que el equipamiento necesario tanto para el método actual de aspersión de agua y el método propuesto para la geopolimerización son bastante similares, no existiendo grandes diferencias en este apartado por la simplicidad de ambos métodos. El CAPEX del método actual corresponde a \$ 1.900.000, mientras que para el método propuesto corresponde a \$ 2.000.000.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

La supresión de polvos mediante la geopolimerización para depósitos de relave de cobre ha sido desarrollada satisfactoriamente utilizando cal hidráulica como agente activante. Se ha encontrado que las mejores condiciones de preparación para la geopolimerización de relave de cobre son a una relación molar Si/Al de 3,7 aproximadamente, y una relación másica Cal Hidráulica/Relave de 1/4, las cuales tienen un efecto durante todo el proceso de fraguado, mientras que el espesor del geopolímero no resulta relevante en las propiedades a largo plazo del geopolímero. Este proceso genera una eficiencia en la reducción de polvo de al menos 98,8% con respecto a relave sin tratar. La estimación de pérdida de masa a través del tiempo del geopolímero es de 0,10 g/m²/min a una velocidad de viento de 5 m/s, mientras que el relave posee una tasa de 8,21 g/m²/min en las mismas condiciones de viento.

De las pruebas de geopolimerización en terreno, se encontró que las muestras geopoliméricas no sufren una erosión durante el transcurso del tiempo, detectando un aumento de masa al final de la prueba, lo que se debe a que el sistema no es completamente aislado, además de que la tasa de erosión del geopolímero es muy baja, replicándose los resultados de laboratorio. Por otro lado, el relave estudiado para la erosión por viento en terreno se erosiona en un 0,44% en promedio, demostrando comparativamente que es más susceptible a erosionarse que las muestras geopoliméricas. Además, las muestras geopoliméricas en terreno demostraron un agrietamiento completa en el proceso de fraguado, lo cual puede deberse a la rápida tasa de evaporación del agua presente en la muestra. Sin embargo, dichas fracturas no comprometerían la capacidad de reducción de emisión de polvo de las muestras.

De los resultados de las pruebas de caracterización del geopolímero, se tiene que este posee una resistencia a la compresión de 0,4 MPa, el cual es un valor bajo y que se debe a la búsqueda de economizar la producción del geopolímero, además de la baja reactividad que posee el relave de cobre al proceso de geopolimerización. Se encontró que el promedio de dureza reportada para las muestras de geopolímero en laboratorio es de 178 HL, mientras que para las muestras preparadas en faena y fraguadas con exposición directa al sol es de 258 HL, por lo que se observa que esta condición de fraguado tiende a desarrollar mejores propiedades superficiales en el material geopolimérico. Además, las muestras geopoliméricas demostraron poseer una excelente

estabilidad en agua, dado que en ningún momento presentaron dificultad para soportar las condiciones acuosas, siendo aptas para sufrir lluvias en condiciones de aplicación industrial.

De las pruebas químicas realizadas, el resultado del ensayo SPLP muestra que el geopolímero desarrollado presenta una mediana estabilización de elementos químicos como el Cu, Fe o Mg, con un valor de 0%, 30% y 46% de estabilización respectivamente, lo que puede ocurrir debido a que la fase geopolimérica se encuentra en gran proporción dentro del material. Del ensayo ABA, se observa el valor del Potencial de Neutralización Neto de la muestra de relave y geopolímero es de 177,82 y 86,53 kg CaCO₃ equivalentes por tonelada de mineral respectivamente, junto con una relación PN/PA de 10,7 y 13,3 respectivamente. Por lo tanto, ninguno de los materiales estudiados tiene emisión de drenaje ácido minero.

Del estudio económico realizado, el costo operacional para el método de geopolimerización es de \$ 1.900.000 por hectárea por año aproximadamente, considerando una duración del geopolímero de 3 años. El precio de aplicar el producto a los tranques de la Faena Minera Cerro Negro es de \$ 71.700.000 por año a las 38 hectáreas estimadas de relave expuesto en la faena. El costo de la humectación mediante aspersores, por otro lado, es de \$ 47.000.000 por hectárea por año. Al analizar el consumo de agua que poseen los dos métodos, se tiene que en el caso del geopolímero el consumo de agua radicalmente menor que en el caso de la humectación con aspersores. De esta forma, se concluye que la aplicación de geopolímero es económicamente factible con respecto de la aspersion de agua, además que se tiene un menor consumo hídrico, lo cual es un aspecto clave en cualquier tipo de inversión.

Por último, se analiza que el método más prometedor para aplicación industrial de producto es la geopolimerización in situ. Su principal ventaja es su fácil implementación, además de que es posible aplicar a cualquier tipo de depósito de relave. Como desventajas, depende fuertemente del estado de la superficie del depósito de relave y la capacidad de percolación de la solución activadora, lo que requiere de estudios en profundidad.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

Como recomendaciones, se tiene lo siguiente:

- Puede resultar interesante poner a pruebas más condiciones de relaciones molares Si/Al y relaciones másicas cal hidráulica/relave, a fin de tener un mayor espectro de elección del tipo de preparación.
- Estudiar el efecto de la cantidad de agua adicionada en el proceso inicial de geopolimerización, así como también el efecto de la humectación durante el fraguado de muestras.
- Comparar el efecto de reducción en emisión de polvo del geopolímero con otros tipos de métodos en las pruebas de túnel de viento: humectación, bischofita, etc.
- Realizar pruebas piloto de los métodos de aplicación estudiados.
- Estudiar agregar otro tipo de material precursor a las muestras que pueda mejorar las prestaciones del producto resultante, como por ejemplo escorias.
- Estudiar la permeabilidad de los relaves y como poder mejorar esta característica en vistas del método II de aplicación propuesto en este trabajo.
- Estudiar y determinar el efecto de las grietas en un posible deterioramiento de la capacidad de reducción en emisión de polvo.
- Determinar y estudiar la compatibilidad del método de geopolimerización con respecto al método de fitoestabilización para la remediación de depósitos de relave.

REFERENCIAS

- [1] MINMINERÍA, "Plan Nacional de Depósitos de Relaves para una Minería Sostenible," 2019.
- [2] M. Gajardo, "Relaves en Chile: situación actual y futura," ed. SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA, 2019.
- [3] A. E. Cleaver, H. E. Jamieson, C. J. Rickwood, and P. Huntsman, "Tailings dust characterization and impacts on surface water chemistry at an abandoned Zn-Pb-Cu-Au-Ag deposit," *Applied Geochemistry*, vol. 128, p. 104927, 2021/05/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104927>.
- [4] M. C. Parodi, K. M. Alencar Da Silva, P. R. Pacheco, and E. M. Mera, "Estudio comparativo de factores de emisión en relaves abandonados e inactivos y su contribución al inventario de PM10: el caso Andacollo, Región de Coquimbo, Chile," *Información tecnológica*, vol. 33, pp. 129-144, 2022.
- [5] D. V. Makarov, O. T. Konina, and A. A. Goryachev, "Dusting Suppression at Tailings Storage Facilities," *Journal of Mining Science*, vol. 57, no. 4, pp. 681-688, 2021/07/01 2021, doi: 10.1134/S1062739121040165.
- [6] H. I. Inyang, S. Bae, and M. A. Pando, "Contaminant dust suppression materials: A cost-effectiveness estimation methodology," *Measurement*, vol. 93, pp. 563-571, 2016/11/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.024>.
- [7] I. Katra, "Comparison of Diverse Dust Control Products in Wind-Induced Dust Emission from Unpaved Roads," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 23, 2019, doi: 10.3390/app9235204.
- [8] H. Castillo *et al.*, "Factors Affecting the Compressive Strength of Geopolymers: A Review," *Minerals*, vol. 11, no. 12, p. 1317, 2021.
- [9] A. Bah, J. Jin, A. Ramos, and F. Li, "Arsenic(V) Immobilization in Fly Ash and Lead-Zinc Mine Tailing-based Geopolymer: Performance and Mechanism Insight.," vol. Volumen 306, ed. *Chemosphere*: Cambridge: Cambridge Open Engage; 2022, 2022.
- [10] P. Valenzuela, J. Palma, and R. Espinace, "MITIGACION DE POLVO EN DEPOSITOS DE RESIDUOS," ed. GA: Geotecnica Ambiental, s.f.
- [11] I. Park *et al.*, "A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling," *Chemosphere*, vol. 219, pp. 588-606, 2019/03/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.053>.
- [12] U. David L. Fey, "Acid-Base Accounting," in *Assessing the Toxicity Potential of Mine-Waste Piles Workshop*, ed, 2003, pp. https://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr-03-210/Section508/IX_Acid-base_Accounting-508.pdf.
- [13] C. Varga Fernández, "Cementos activados alcalinamente. Comportamiento reológico y durable en medio ácido," Doctor of Philosophy, Departamento de Química Inorgánica y Química Técnica, Universidad Nacional de Educación a Distancia (España), 2015.
- [14] F. Pacheco-Torgal, J. A. Labrincha, C. Leonelli, Á. Palomo, and P. Chindaprasirt, "Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes," 2015: Woodhead Publishing, doi: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16511-7>.
- [15] F. Puertas, M. Palacios, H. Manzano, J. S. Dolado, A. Rico, and J. Rodriguez, "C-A-S-H gels formed in alkali-activated slag cement pastes. Structure and effect on cement properties and durability," *MATEC Web of Conferences*, vol. 11, p. 01002, 2014.

- [16] J. L. Provis and S. A. Bernal, "Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials," *Annual Review of Materials Research*, vol. 44, no. 1, pp. 299-327, 2014/07/01 2014, doi: 10.1146/annurev-matsci-070813-113515.
- [17] M. Carrasco and F. Puertas, "Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: Alkali activated cements or geopolymers," *Revista Ingenieria de Construccion*, vol. 32, pp. 5-12, 08/01 2017.
- [18] M. T. Marvila, A. R. G. d. Azevedo, and C. M. F. Vieira, "Reaction mechanisms of alkali-activated materials," (in en), *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 14, 2021, doi: 10.1590/S1983-41952021000300009.
- [19] D. A. Domínguez, "Estudio de la variación de la morfología y las propiedades microestructurales de materiales base cemento con adiciones de sílice de distinta granulometría," Doctor of Philosophy PeerReviewed, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid, 2016. [Online]. Available: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/36572/1/T36984.pdf>
- [20] P. Duxson and J. L. Provis, "Designing Precursors for Geopolymer Cements," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 91, no. 12, pp. 3864-3869, 2008, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02787.x>.
- [21] I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, and D. E. Macphee, "Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na₂O–CaO–Al₂O₃–SiO₂–H₂O," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 9, pp. 923-931, 2011/09/01/ 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006>.
- [22] L. Manjarrez, A. Nikvar-Hassani, R. Shadnia, and L. Zhang, "Experimental Study of Geopolymer Binder Synthesized with Copper Mine Tailings and Low-Calcium Copper Slag," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 31, no. 8, p. 04019156, 2019/08/01 2019, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002808.
- [23] A. Nikvar-Hassani, H. Vashaghian, R. Hodges, and L. Zhang, "Production of green bricks from low-reactive copper mine tailings: Chemical and mechanical aspects," *Construction and Building Materials*, vol. 324, p. 126695, 2022/03/21/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126695>.
- [24] Z. Xiaolong, Z. Shiyu, L. Hui, and Z. Yingliang, "Disposal of mine tailings via geopolymerization," *Journal of Cleaner Production*, vol. 284, p. 124756, 2021/02/15/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124756>.
- [25] J. L. Provis and J. S. J. van Deventer, Elsevier Science, Ed. *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications* (Civil and Structural Engineering). Woodhead Publishing, 2009.
- [26] A. Palomo, P. Krivenko, I. Garcia-Lodeiro, E. Kavalerova, O. Maltseva, and A. Fernández-Jiménez, "A review on alkaline activation: new analytical perspectives," *Materiales de Construcción*, vol. 64, no. 315, p. e022, 09/30 2014, doi: 10.3989/mc.2014.00314.
- [27] W. Wang and T. Noguchi, "Alkali-silica reaction (ASR) in the alkali-activated cement (AAC) system: A state-of-the-art review," *Construction and Building Materials*, vol. 252, p. 119105, 2020/08/20/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119105>.
- [28] D. Khale and R. Chaudhary, "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review," *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 3, pp. 729-746, 2007/02/01 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0401-4.
- [29] M. M. Al Bakri Abdullah, H. Kamarudin, O. A. K. A. Abdulkareem, C. M. R. Ghazali, A. R. Rafiza, and M. N. Norazian, "Optimization of Alkaline Activator/Fly ASH Ratio on the Compressive Strength of Manufacturing Fly ASH-BASED Geopolymer,"

- Applied Mechanics and Materials*, vol. 110-116, pp. 734-739, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.734.
- [30] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, S. W. Mallicoat, W. M. Kriven, and J. S. J. van Deventer, "Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 269, no. 1, pp. 47-58, 2005/11/01/ 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.06.060>.
- [31] Q. Wan et al., "Geopolymerization reaction, microstructure and simulation of metakaolin-based geopolymers at extended Si/Al ratios," *Cement and Concrete Composites*, vol. 79, pp. 45-52, 2017/05/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.014>.
- [32] S. Chuah et al., "The properties of fly ash based geopolymer mortars made with dune sand," *Materials & Design*, vol. 92, pp. 571-578, 2016/02/15/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.070>.
- [33] D. Shi, Y. Yao, J. Ye, and W. Zhang, "Effects of seawater on mechanical properties, mineralogy and microstructure of calcium silicate slag-based alkali-activated materials," *Construction and Building Materials*, vol. 212, pp. 569-577, 2019/07/10/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.288>.
- [34] S. Siddique and J. G. Jang, "Mechanical Properties, Microstructure, and Chloride Content of Alkali-Activated Fly Ash Paste Made with Sea Water," *Materials*, vol. 13, no. 6, 2020, doi: 10.3390/ma13061467.
- [35] H. M. Giasuddin, J. G. Sanjayan, and P. G. Ranjith, "Strength of geopolymer cured in saline water in ambient conditions," *Fuel*, vol. 107, pp. 34-39, 2013/05/01/ 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.035>.
- [36] L. Qing, S. Shaokang, J. Zhen, W. Junxiang, and L. Xianjun, "Effect of CaO on hydration properties of one-part alkali-activated material prepared from tailings through alkaline hydrothermal activation," *Construction and Building Materials*, vol. 308, p. 124931, 2021/11/15/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124931>.
- [37] L. Zheng, W. Wang, and Y. Shi, "The effects of alkaline dosage and Si/Al ratio on the immobilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash-based geopolymer," *Chemosphere*, vol. 79, no. 6, pp. 665-671, 2010/04/01/ 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.02.018>.
- [38] N. Hanegbi and I. Katra, "A Clay-Based Geopolymer in Loess Soil Stabilization," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 7, 2020, doi: 10.3390/app10072608.
- [39] "Plan de Desarrollo de Largo Plazo - Compañía Minera Cerro Negro S.A. Capítulo 1: Descripción de Proyecto," Compañía Minera Cerro Negro, 2018. Accessed: 2022.
- [40] DFM, "Estimación de Emisiones y Modelación de Dispersión de Contaminantes EIA "Plan de Desarrollo de Largo Plazo – CMCN S.A.", 2018. [Online]. Available: https://seia.sea.gob.cl/archivos/2018/10/10/Anexo_4-1_Inventario_y_Modelacio_769_n_de_Emisiones_Rev0.pdf
- [41] "Prácticas para suprimir el polvo." <https://www.mch.cl/reportajes/practicas-para-suprimir-el-polvo/#> (accessed 2023).
- [42] A. INTERNATIONAL, "ASTM C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)," 2020.
- [43] R. Chen, I. Lee, and L. Zhang, "Biopolymer Stabilization of Mine Tailings for Dust Control," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 141, no. 2, p. 04014100, 2015/02/01 2015, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001240.

- [44] O. US EPA, "SW-846 Test Method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure," (in en), Other Policies and Guidance 2022-09-20 1994.
- [45] U. S. E. P. A. EPA, *ACID MINE DRAINAGE PREDICTION*. 1994, p. 52.
- [46] B. W. Downing, "Acid–Base Accounting Test Procedures," in *Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils*, 2014, pp. 229-252.
- [47] "Datos de Geoquímica de Depósitos de Relaves de Chile (actualización: 13/01/2020)." Sernageomin. (accessed 2022).
- [48] Soprocal. *Ficha Técnica: Cal Hidráulica Soprocal 6*, s.f. [Online]. Available: https://www.mimbral.cl/media/catalog/product/fi/ficha_tec_cal_hidraulica.pdf. Accessed: 2022.
- [49] L. Ortiz, "INFORME ICP, VALORACIÓN DE METALES CONTENIDOS," Compañía Minera Cerro Negro, 2021.
- [50] "Pulverizador Plataforma 400 lts.Far-30 7 hp." <https://www.impact-online.cl/072000096-pulverizador-plataforma-400-lts-far-30-7-hp.html> (accessed 2023).
- [51] D. d. M. Ambiente, "APÉNDICE A.7.2 (iii) Duodécimo Reporte Trimestral Informe sobre mejoras al sistema de control de emisiones Tranque de Relaves n°6," COMPAÑÍA MINERA CERRO NEGRO S.A., 2020. Accessed: 2022.
- [52] "Índices de Marshall & Swift, Guías, Proyectos, Investigaciones de Gestión de Proyectos." Universidad Michoacana De San Nicolas De Hidalgo. (accessed 2023).
- [53] "Cal viva 1 kg Iberica." <https://www.easy.cl/cal-viva-1-kg-iberica-119079/p> (accessed 2023).
- [54] "Cal hidráulica 25 kilos soprocal 6 Soprocal." Easy.cl. <https://www.easy.cl/cal-hidraulica-25-kilos-soprocal-6-soprocal-119078/p> (accessed 2022).
- [55] M. Amran *et al.*, "Long-term durability properties of geopolymer concrete: An in-depth review," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, p. e00661, 2021/12/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00661>.
- [56] "Análisis histórico de los precios de energía eléctrica en minería y su impacto en competitividad." Cochilco. <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Analisis%20Historico%20de%20Precios%20de%20EE%2024-12-2014%20vf.pdf> (accessed 2023).
- [57] "ANEXO 1 - 1 Cartografías y planos," in "Estudio de Impacto Ambiental," Compañía Minera Cerro Negro S.A.

ANEXO

ANEXO 1. MEDICIONES DE DUREZA

Los resultados que permiten obtener la Figura 56 se muestran a continuación:

Tabla 36: Resultados medición dureza muestra geopolimérica de laboratorio.

Muestra laboratorio, Dureza Leeb						
169	164	189	183	249	284	152
166	139	164	146	158	179	161
136	176	156	161	183	211	163
182	160	167	135	152	164	159
189	137	288	234	172	193	178
164	192	167	162	253	179	176
207	160	228	154	150	166	173
146	172	174	230	179	155	220
149	176	147	215	150	168	
181	206	195	170	179	164	
166	227	178	199	148	163	

Mientras que las mediciones a las muestras fraguadas en la faena minera Cerro Negro otorgan los siguientes resultados:

Tabla 37. Resultados medición dureza muestra geopolimérica de faena minera Cerro Negro.

Muestra Cerro Negro, Dureza Leeb						
248	221	221	234	248	233	274
228	255	236	279	284	276	279
316	233	283	233	279	307	256
246	294	265	237	226	250	242
249	293	268	278	255	233	220
271	310	229	290	257	268	241
237	292	227	247	307	302	256
253	225	220	255	306	308	215
277	274	250	253	205	256	
244	287	241	257	199	307	

ANEXO 2. ESTIMACIÓN DE COSTOS OPERACIONALES PARA MÉTODOS DE SUPRESIÓN DE POLVO

Para obtener el costo total OPEX de la operación de los métodos de supresor de polvo geopolimérico y el método actual en la Faena Minera Cerro Negro, se realiza una serie de suposiciones para obtener costos asociados a combustible, energía, mantenciones y remuneraciones.

Para el caso del método actual, se realizó diversas consideraciones permitiendo un valor operacional más aproximado que solo considerar el consumo y costo del agua.

Para el caso de la geopolimerización, se considera el método II propuesto en el capítulo 5.5.1. Luego, se consideró aspersión fija y aspersión móvil para los cálculos que siguen tal como se discute al final de la sección 5.5.2.2. Además, se toma en cuenta la suposición de una vida útil de geopolimerización de 3 años.

A continuación, se detalla el desglose para los cálculos operacionales:

- **Método actual en Faena Minera Cerro Negro:**

El costo de combustible es despreciable por el hecho de que no se utiliza activamente en el proceso. Para el costo energético, se considera la bomba de impulsión de solución, por lo tanto:

Tabla 38: Cálculo costo energético para método actual en Faena Minera.

Ítem	Valor	Unidad
Consumo bomba de impulsión	10	hp
	25.444	btu/h
Precio energía, obtenido desde [56].	US\$ 20	US\$/MMBTU
Costo energía	\$ 450	\$/h
	\$ 5.000	\$/día
	\$ 1.000.000	\$/año
Costo energético método actual	\$ 2.200.000	\$/ha/año

Luego, para el costo en mantenciones se supone un valor de \$ 10.000 al mes, por lo que al considerar los datos operaciones se tiene un costo normalizado en mantención de \$ 150.000 por hectárea por año. Por último, para estimación de remuneración se tiene lo siguiente:

Tabla 39: Cálculo costo en remuneraciones de geopolimerización.

Ítem	Valor	Unidad
Operarios	2	operario/ha
	1	operario
	\$ 600.000	\$/operario/mes
Costo remuneraciones	7	Meses
	\$ 4.200.000	\$/ha/año

- **Geopolimerización:**

Para obtener el costo de combustible, se tiene que la aspersión fija no requiere un consumo de combustible esencialmente. Por otro lado, para el método de aspersión móvil, se tiene un consumo activo de combustible para trasladar el estanque que contiene la solución activadora. El consumo se estima a continuación:

Tabla 40: Desglose costo combustible supresor de polvo geopolimérico.

Ítem	Valor	Unidad
Capacidad equipo, [50].	0,4	m ³
Requerimiento de agua	187,5	m ³
N° Viajes	469	viajes
Consumo combustible camioneta minera	7	km/L
Distancia viaje	2	km/viaje
	0,29	L/viaje
Requerimiento Combustible	134	L/ha
Precio Combustible Estimado en Faena	\$ 800	\$/L
Costo combustible	\$ 107.200	\$/ha
	\$ 40.000	\$/ha/año

Luego, para el costo energético, el método de aspersión fija se requiere la energía necesaria para la bomba de impulsión de la solución a los aspersores. El resumen del cálculo se tiene a continuación:

Tabla 41: Cálculo costo energético para geopolimerización.

Ítem	Valor	Unidad
Consumo bomba de impulsión	10	hp
	25.444	btu/h

Precio energía, obtenido desde [56].	US\$ 20	US\$/MMBTU
Costo energía	\$ 450	\$/h
	\$ 5.000	\$/día
Tiempo para geopolimerizar	3	ha/mes
Costo energético geopolimerización	\$ 50.000	\$/ha
	\$ 17.000	\$/ha/año

Para el método de aspersión móvil, tal como indica el fabricante en ficha técnica, la bomba tiene una potencia de 7 hp [50]. De esta forma, realizando el mismo procedimiento que la tabla anterior, se tiene un costo de \$ 12.000 por hectárea por año.

Para el cálculo de mantenciones se realizó las siguientes suposiciones:

Tabla 42: Cálculo costo en mantención de geopolimerización.

Ítem	Valor	Unidad
Reparaciones camioneta	\$ 60.000	\$/mes
	3	ha/mes
	\$ 20.000	\$/ha
Otros equipos	\$ 70.000	\$/mes
	3	ha/mes
	\$ 23.000	\$/ha
Costo mantención	\$ 43.000	\$/ha
	3	año
	\$ 14.000	\$/ha/año

Por último, para el cálculo de remuneraciones se tiene lo siguiente:

Tabla 43: Cálculo costo en remuneraciones de geopolimerización.

Ítem	Valor	Unidad
Operarios	4	operario
	3	ha/mes
	\$ 600.000	\$/operario/mes
Costo remuneraciones	\$ 800.000	\$/ha
	\$ 260.000	\$/ha/año

ANEXO 3. ESTIMACIÓN ÍNDICE MARSHALL & SWIFT

Para estimar el índice Marshall & Swift del año 2023, se realiza ajuste lineal de los datos reportados en [52], por lo que se obtiene el siguiente gráfico:

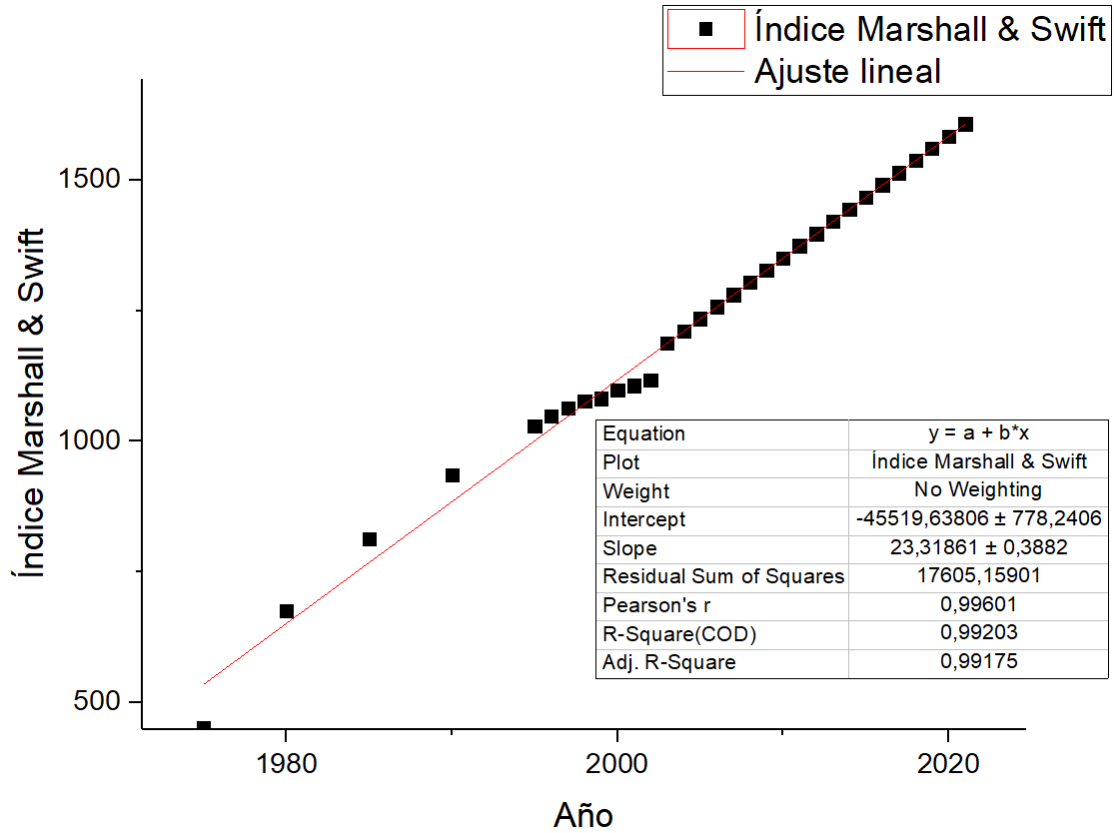


Figura 68: Ajuste lineal datos Marshall & Swift [52].

De esta forma, la ecuación del ajuste es la siguiente:

$$\text{Índice}(\text{año}) = -45.519,6 + 23,3 \cdot \text{año} \quad (10)$$

Por lo tanto, el índice en el año 2023 corresponde a 1.613,3, tal como se observa a continuación:

$$\text{Índice}(2023) = -45.519,6 + 23,3 \cdot 2023 = 1.613,3 \quad (11)$$

ANEXO 4. ESTIMACIÓN CÁLCULO SUPERFICIE DEPÓSITOS DE RELAVE DE FAENA MINERA CERRO NEGRO

Para estimar el área de la superficie expuesta de los depósitos de relave, se utiliza la herramienta de medición de Google Maps en conjunto con las curvas de nivel de dichos depósitos, los cuales se presentan en [57]. Utilizando esta información, se procede a realizar el dibujo CAD 3D en la herramienta computacional SpaceClaim para así obtener la superficie expuesta de cada tranque de relave. De esta forma, se tiene lo siguiente:

- **Depósitos N°1 y Depósito N°2:** De las curvas de nivel, se tiene que la distancia entre curvas de nivel es de 5 m, por lo que se tiene una altura de 35 metros para los depósitos N°1 y 2 tal como se observa a continuación:

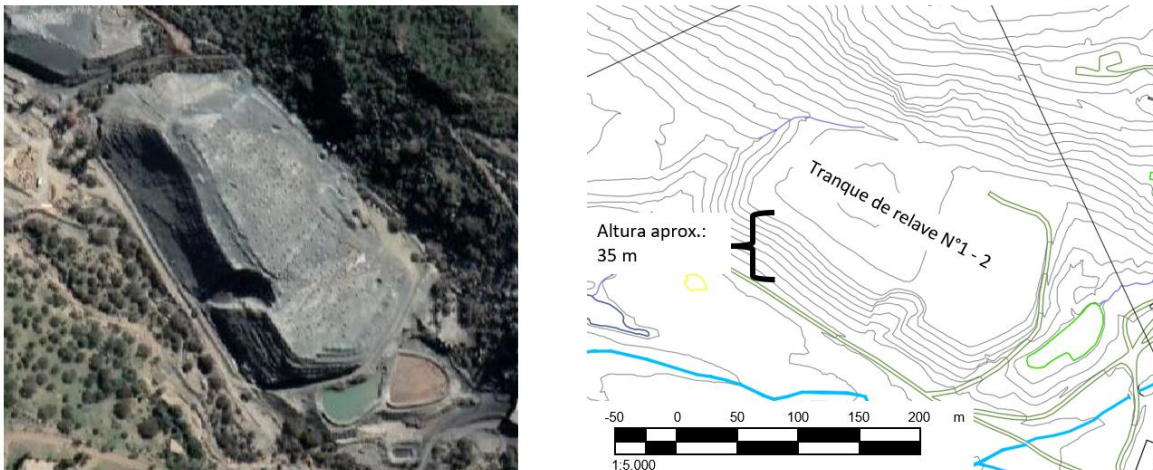


Figura 69: Curvas de nivel Tranque de relave N°1 y N°2. Extracto desde [57].

Luego, estimando diversas medidas del depósito de relave mediante Google Maps, se obtiene el siguiente dibujo:

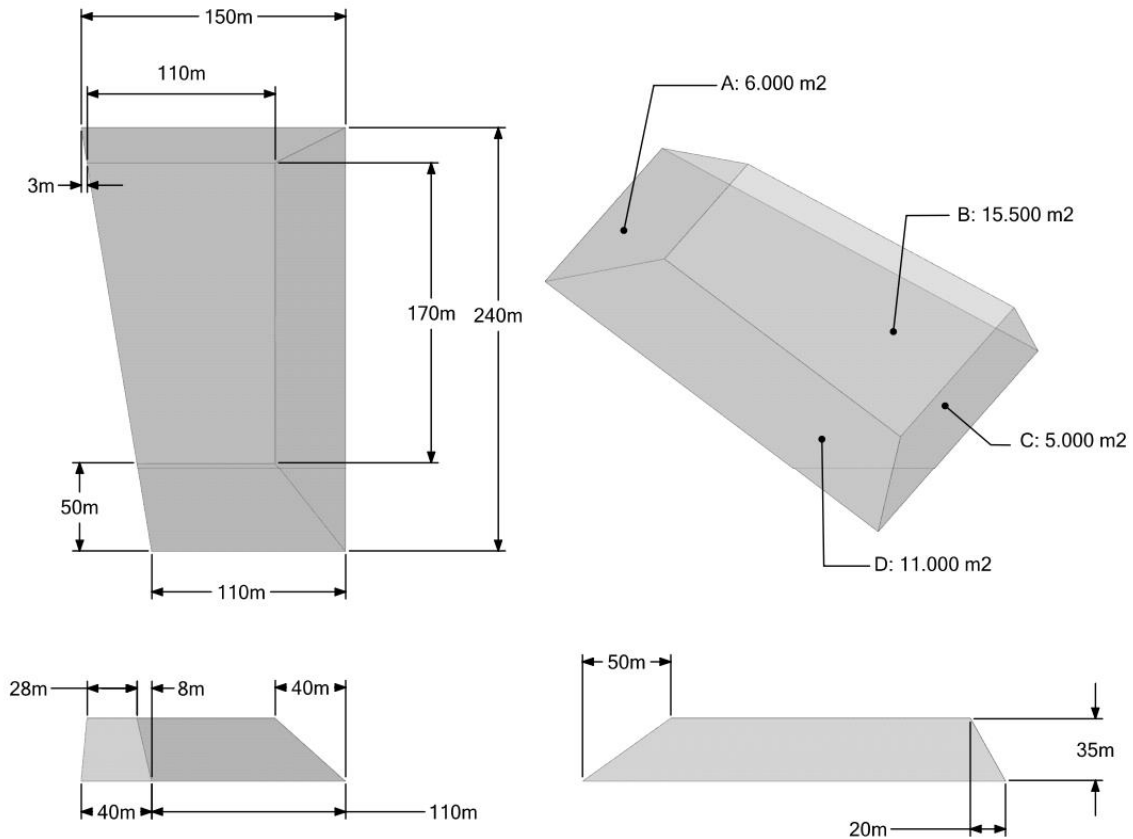


Figura 70: Dibujo Tranque de Relave N°1 y N°2 de Faena Minera Cerro Negro.

Por lo tanto, el área total del depósito N°1 y N°2 es de 37.500 m².

- **Depósito N°3:** Este depósito de relave, al contrario que el anterior, no se encuentra bien definido en su estructura como se puede observar a continuación:

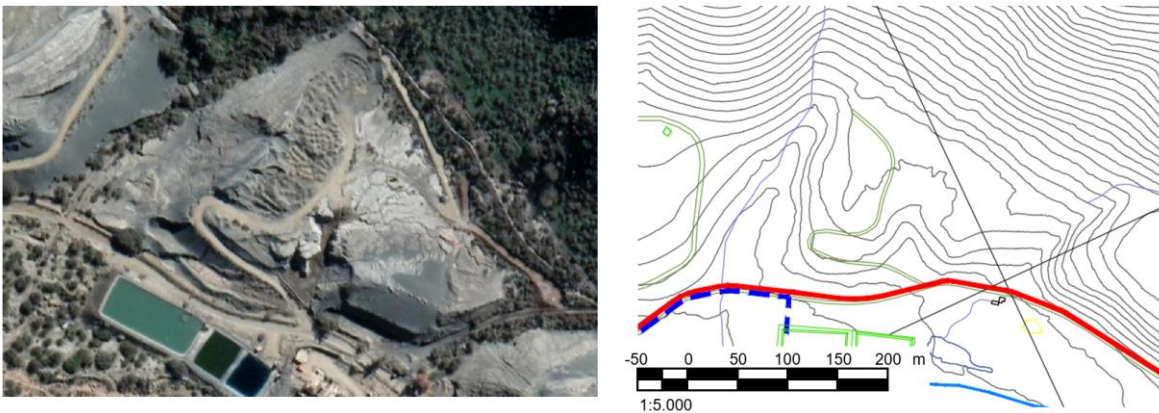


Figura 71: Depósito de relave N°3 con sus curvas de nivel. Extracto desde [57].

Sin embargo, dada las curvas de nivel, se considerará una altura de 20 metros para efectos de los cálculos. De esta forma, se tiene el siguiente dibujo del depósito:

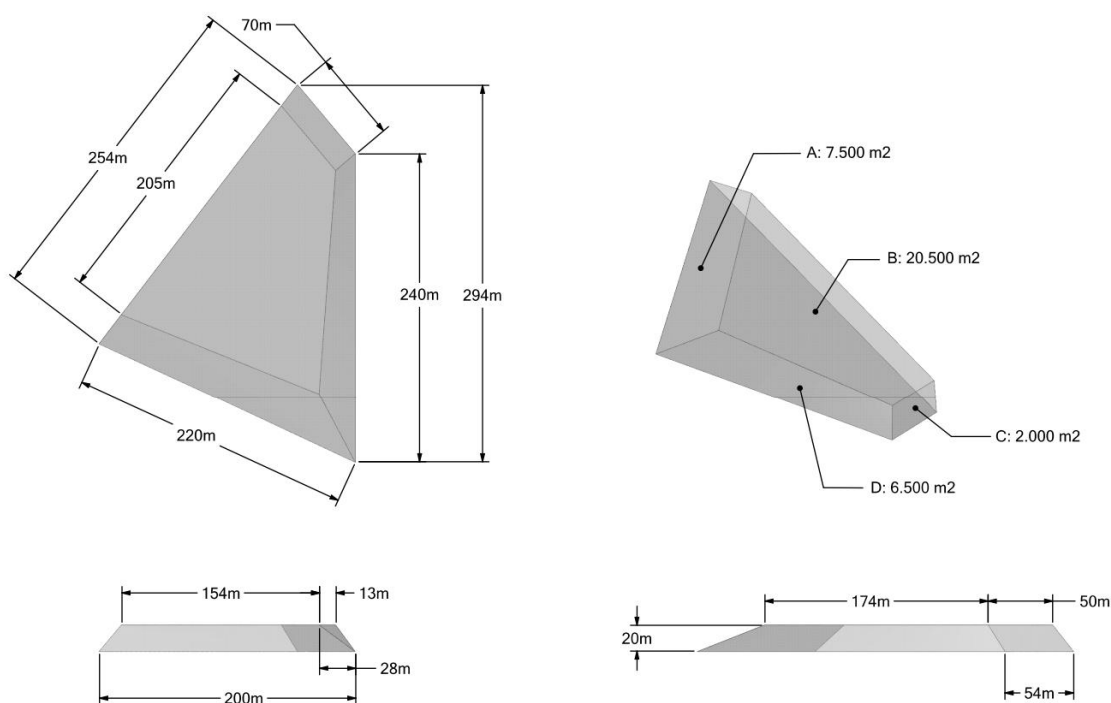


Figura 72: Dibujo tranque de relave N°3 de Faena Minera Cerro Negro.

De esta forma, se estima que su área total es de 36.000 m².

- **Depósito N°4:** Se estima una altura de 20 metros siguiendo las curvas de nivel del depósito, lo que se observa a continuación:

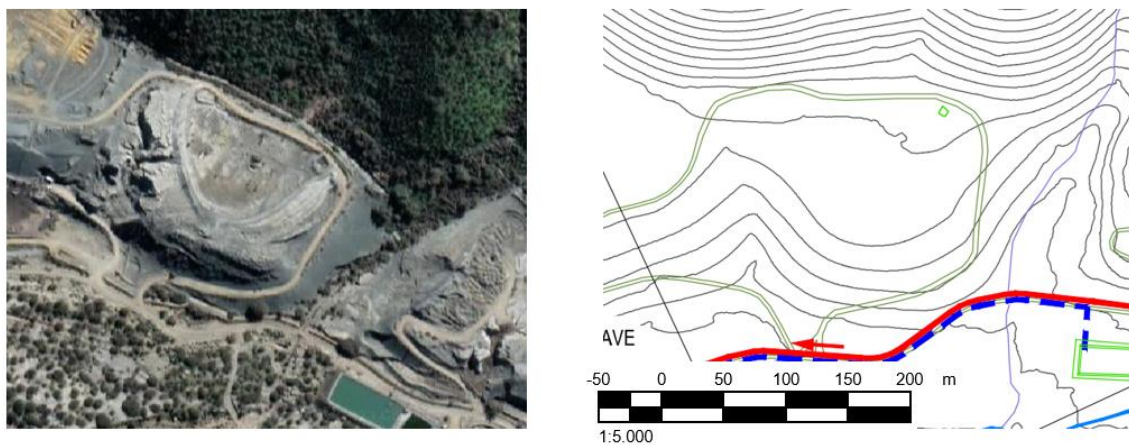


Figura 73: Depósito de relave N°4 con sus curvas de nivel. Extracto desde [57].

Luego, el dibujo de dicho depósito se muestra a continuación:

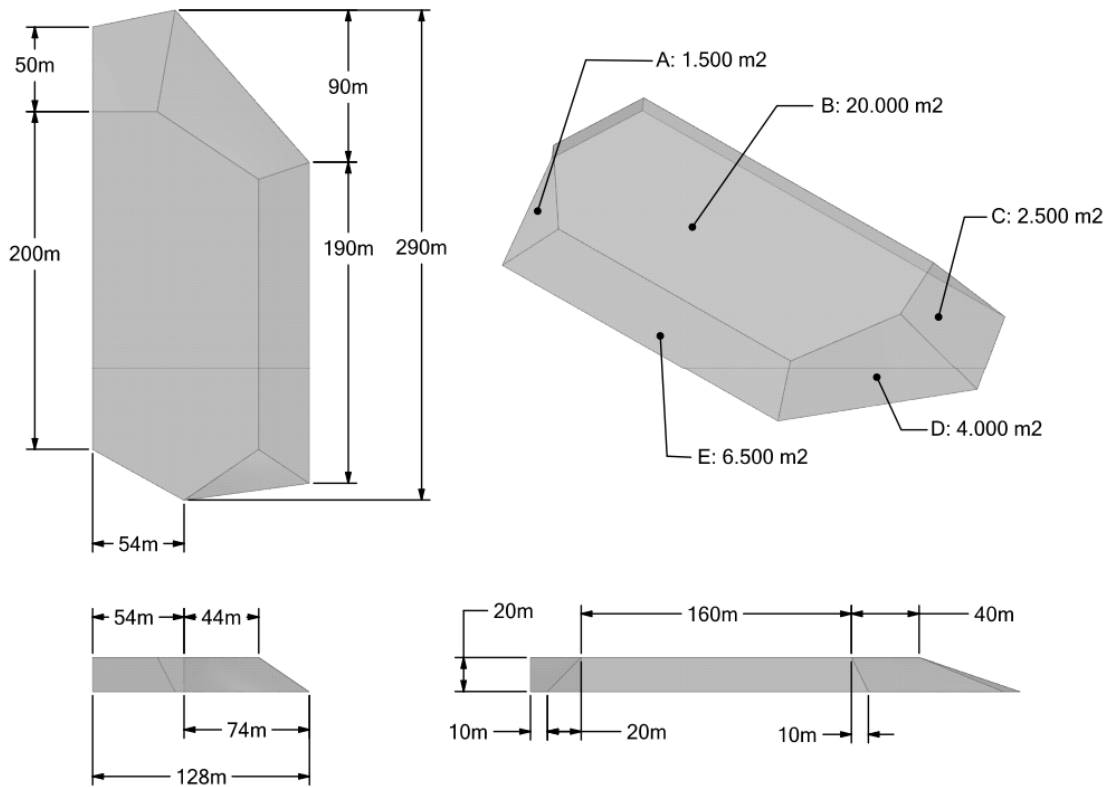


Figura 74: Dibujo tranque de relave N°4 de Faena Minera Cerro Negro.

Por lo tanto, el área total corresponde a 34.500 m².

- **Depósito N°5:** Se estima mediante las curvas de nivel que posee una altura de 40 metros, tal como se observa a continuación:

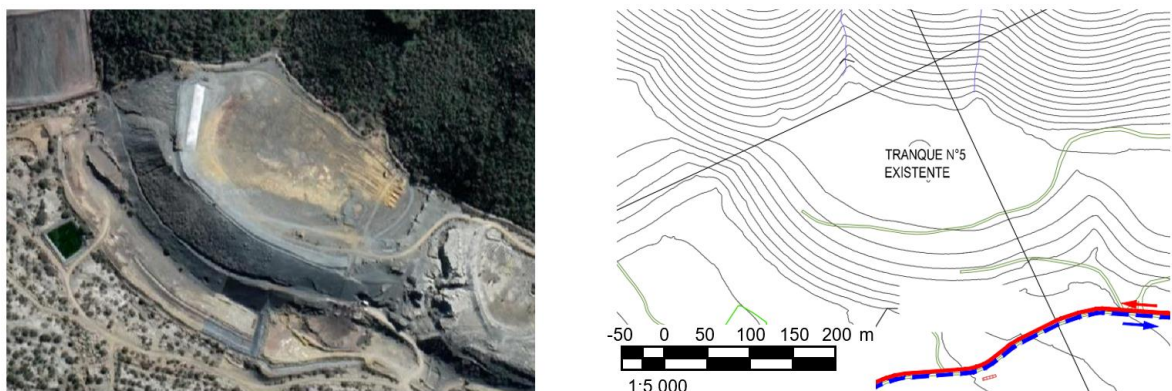


Figura 75: Depósito de relave N°5 con sus curvas de nivel. Extracto desde [57].

Luego, el dibujo de dicho depósito es el siguiente:

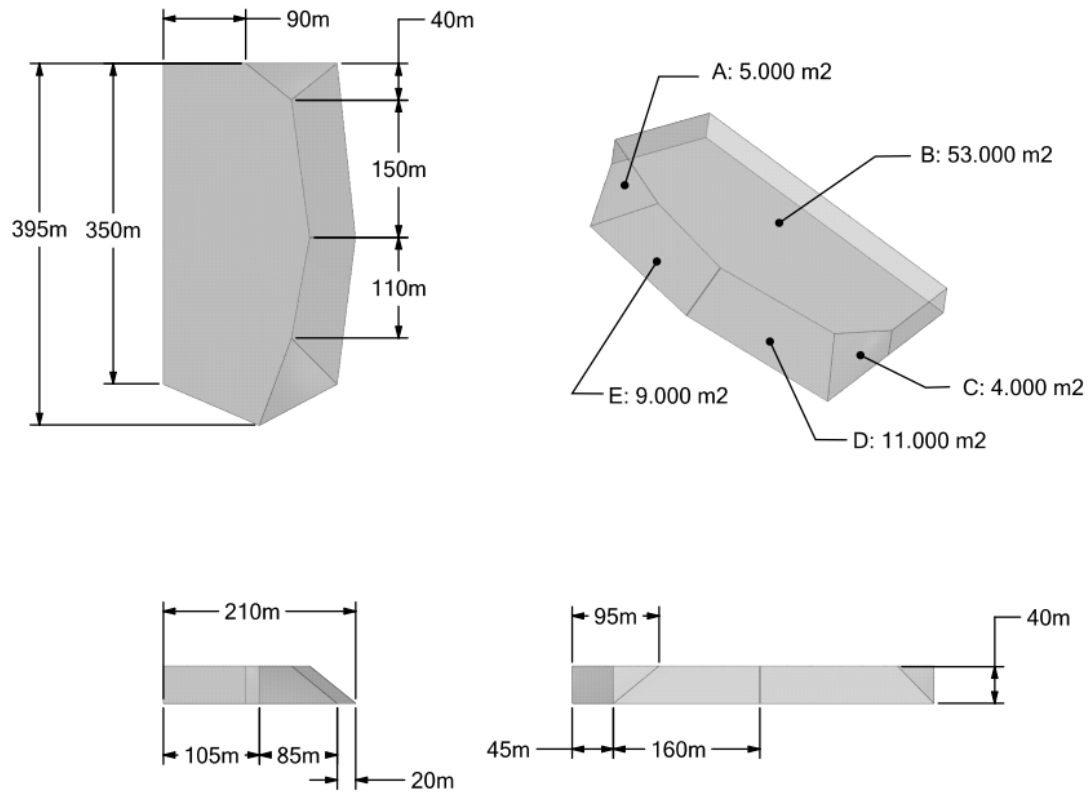


Figura 76: Dibujo tranque de relave N°5 de Faena Minera Cerro Negro.

De esta forma, el área superficial aproximado del tranque de relave N°5 es de 82.000 m².

- **Depósito N°6:** De las curvas de nivel del depósito, se tiene una altura aproximada de 45 metros como se observa a continuación:

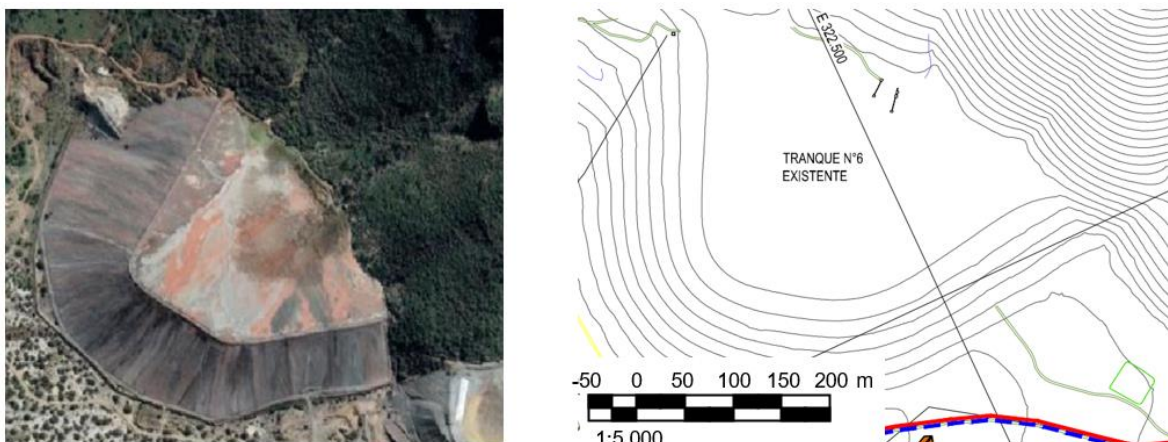


Figura 77: Depósito de relave N°6 con sus curvas de nivel. Extracto desde [57].

Por lo tanto, el resumen del área superficial de los depósitos y el costo de geopolimerización es el siguiente:

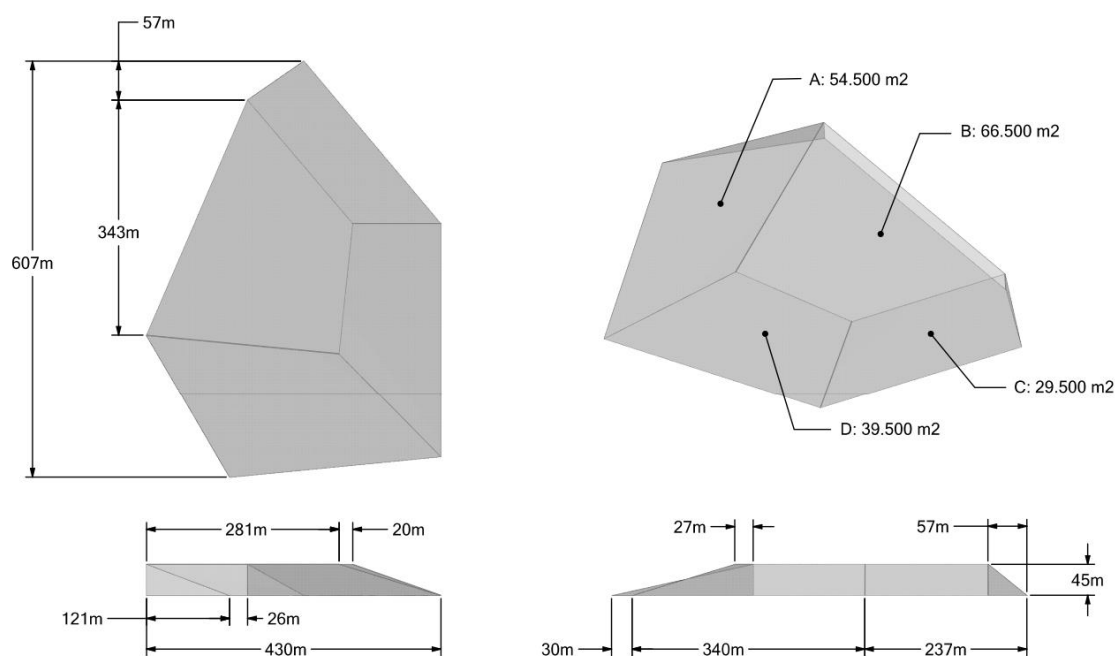


Figura 78: Dibujo tranque de relave N°6 de Faena Minera Cerro Negro.

Por lo tanto, el área superficial del depósito N°6 es de 190.000 m² aproximadamente.

De esta forma, el resumen de los cálculos de superficie expuesta de cada depósito de relave se muestra a continuación:

Tabla 44: Resumen cálculo de área superficial de los depósitos de relave de Faena Minera Cerro Negro.

Número de depósito	Área total, m ²
N°1 y N°2	37.500
N°3	36.000
N°4	34.500
N°5	82.000
N°6	190.000
Total	380.000
	38 (ha)

Nota: Valores aproximados.