



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

ANÁLISIS CRÍTICO SOBRE LA EMISIÓN DE POLVO EN MINERÍA: CAMINOS MINEROS Y PROPUESTA DE UNA ESTRATEGIA DE SUPRESIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

FELIPE ANDRÉS ARANEDA GALLARDO

PROFESOR GUÍA:
GONZALO MONTES ATENAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALDO CASALI BACELLI
JUAN IGNACIO OSSES MÁRQUEZ

SANTIAGO DE CHILE
2016

Resumen de Memoria para optar a trabajo de título

De: Ingeniero Civil de Minas

Por: Felipe Araneda Gallardo

Fecha: Noviembre , 2016

Profesor Guía: Gonzalo Montes Atenas

Análisis crítico sobre la emisión de polvo en minería: caminos mineros y propuesta de una estrategia de supresión

La emisión de material particulado es un aspecto ambiental relevante para las faenas mineras, con impacto directo en la salud de los trabajadores y de las comunidades cercanas. En un levantamiento de información sobre las faenas mineras chilenas se estableció que la generación de polvo debido al tránsito por caminos no pavimentados resulta ser la fuente más comprometida. Se procedió a estudiar esta última fuente de emisión en mayor detalle, referida a los caminos internos de alto tonelaje (tránsito de más de 100 t).

En base a testimonios de profesionales relacionados con caminos mineros, se pone de manifiesto la poca ingeniería sobre la construcción de caminos mineros y la dependencia de soluciones reactivas y costosas para su mantención. Dejan en claro la necesidad de proponer una mejor preparación de la carpeta de rodado y material granular subyacente para tener un mayor desempeño en términos de rodadura y control del polvo. En especial, incorporar el uso de bandas granulométricas como una medida fundamental en el diseño de un camino.

Se estudia la interacción rueda-suelo para comprender más de cerca la suspensión de material particulado (MP10) desde caminos. Para ello se realizan simulaciones computacionales en elementos discretos (DEM) con el software RockyDEM®, sobre un sistema simplificado placa-cajón con partículas de 10 μm para determinar el potencial de emisión de material particulado y el hundimiento de la rueda en el suelo. La penetración de la rueda aumenta con la carga del camión y la disminución de la cohesión del suelo. Para cargas entre 100 y 400 t, la penetración ronda entre 1,5 y 6,0 cm, respectivamente. El potencial de emisión permanece cuasi invariante con respecto a la velocidad de la rueda pero aumenta con la carga de un camión. Tan solo el 23% de la velocidad del camión es adquirida como velocidad media de eyección de las partículas del suelo, es decir, la rueda hace ruptura por sobre la dispersión de estas.

Complementariamente se realizan estudios experimentales de evaporación de agua desde cuarzo, mineral representativo de caminos mineros muestreados, pretratados con agua destilada, medio ácido, con floculante y una emulsión de polímero. La adición de ácido y floculante retardan las tasas de evaporación.

Como cierre se propone un diseño conceptual, resguardando las variables de distribución de tamaño de partículas y mineralogía en el diseño espacial de un camino minero. Se destaca además, el muestreo en superficie del contenido de limo y la aplicación tópica de supresores de polvo, durante la operación de caminos.

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mi familia, por el apoyo incondicional durante toda esta etapa como estudiante. Mis papás han sido un pilar indispensable para encontrar el estímulo de aprender y ser alguien en la vida. No solo por mi educación sino, por todas las posibilidades que me siguen dando hasta hoy, para acceder a todo lo que tengo y anhelo. Además, no quiero olvidar mencionar a mis hermanos Francisco e Ignacio, uno como mi referente y otro como mi gemelo y compañero. De ambos he podido retroalimentar mis ganas por hacer las cosas bien y seguir superándome. Gracias Mamá , Papá y Hermanos.

Ahora, quiero agradecer al profesor Gonzalo Montes por haber aceptado hacer este proyecto conmigo y ser mi profesor guía. No me olvidaré de los incesantes estudios preliminares, entregas y correcciones, para destacar el sentido de lo que hacemos y como lo transmitimos. Gracias también a ESSS por permitirme trabajar a diario en su oficina, para sacar gran parte de los resultados de mi trabajo. Aquí, en especial a Juan Osses , que con paciencia y demasiada disposición me ayudo en todo el proceso, hasta ser parte de mi comisión. Por otro lado, mencionar al profesor Aldo Casali por conformar mi comisión y ayudarme hasta el último detalle para finalizar bien con mi trabajo de memoria.

Quiero dar mi gratitud a la señora Ema Fonseca, encargada del laboratorio de Biohidrometalurgia de la Universidad de Chile, por enseñarme con el mayor detalle a hacer todos los experimentos de mi trabajo y escucharme cuando lo necesité.

Por último, quiero agradecer a las empresas TSP, MOP, INCOLUR e IDIEM por recibirme en sus oficinas y entregarme sus testimonios para hacer de este trabajo más completo y robusto. Aquí, mencionar particularmente a Felipe Halles (de TSP) y Esteban Espinoza (del MOP) por asesorarme más de lo necesario y contribuir sin siquiera conocerme en más de una oportunidad.

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	10
1.1 CONTEXTO Y MOTIVACIÓN	10
1.2 OBJETIVOS	12
1.3 ALCANCES	13
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES.....	14
2.1 CONTEXTO	14
2.1.1 Contaminación por material particulado.....	14
2.1.2 Fuentes de emisión minera de material particulado.....	17
2.1.3 Medidas de control y mitigación	18
2.1.4 Supresores de polvo.....	19
2.2 EL SUELO.....	21
2.2.1 El suelo y su definición.....	21
2.2.2 Constitución física del suelo.....	22
2.2.3 Constitución química del suelo	25
2.2.4 Cohesión en el suelo.....	25
2.2.5 Caminos Mineros.....	26
2.2.6 Balance Fuerza para una partícula del suelo	33
2.2.7 Contribución del fluido: Aire.....	33
2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS.....	35
2.4 CONCLUSIONES ANTECEDENTES	38
CAPITULO 3: METODOLOGÍA.....	40
3.1 ANÁLISIS DE FUENTES DE EMISIÓN DE POLVO EN FAENAS MINERAS	41
3.1.1 Emisiones de MP10: faenas mineras chilenas	41
3.1.2 Mapa con fuentes de emisión de polvo: planta minera	42
3.1.3 Caracterización del suelo: caso de estudio de camino minero	42
3.2 ENTREVISTAS SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS MINEROS	43
3.3 ESTUDIO SOBRE CAMINOS MINEROS: INTERACCIÓN RUEDA-SUELO.....	43
3.3.1 Modelo Matemático	44
3.3.2 Simulaciones DEM.....	44
a) Diseño de las geometrías del sistema rueda-suelo.....	45
b) Parámetros del sistema placa-cajón.....	46
c) Implementación de modelo en RockyDEM®.....	48
d) Fases de simulación en el software RockyDEM®.....	52
3.4 PROGRAMA DE SUPRESIÓN DE POLVO.....	59
3.4.1 Experimentos de laboratorio	59
3.4.2 Diseño de programa de supresión de polvo.....	61
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
4.1 FUENTES DE EMISIÓN DE POLVO EN FAENAS MINERAS	62
4.1.1 Emisiones de MP10: faenas mineras chilenas.....	62
4.1.2 Mapa con fuentes de emisión de polvo: Planta Minera	64
4.1.3 Caracterización del suelo: caso de estudio de camino minero	66
4.2 ENTREVISTAS SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS MINEROS	71
4.2.4 Conclusiones Entrevistas.....	75
4.3 ESTUDIO CAMINOS MINEROS: INTERACCIÓN RUEDA-SUELO	76
4.3.1 Modelo Matemático	76
4.3.2 Simulaciones DEM.....	79
4.3 PROGRAMA DE SUPRESIÓN DE POLVO.....	93

4.3.1 Experimentos de Laboratorio	93
4.3.2 Diseño Conceptual.....	95
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	99
SECCIÓN: FUENTES DE EMISIÓN DE POLVO EN FAENAS MINEROS.....	99
SECCIÓN: ENTREVISTAS A EXPERTOS EN CAMINOS MINEROS.....	99
SECCIÓN ESTUDIO CAMINOS: FENÓMENO RUEDA-SUELO.....	100
SECCIÓN: PROGRAMA DE SUPRESIÓN DE POLVO.....	100
CAPITULO 6: RECOMENDACIONES.....	102
BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXOS	108
ANEXO 1: ESTUDIO DE EMISIONES EN FAENAS MINERAS CHILENAS	108
ANEXO 2: CALIBRACIÓN DE RESISTENCIA A RODADURA (RO)	119
ANEXO 3: ESTIMACIÓN CARGA NORMAL TEÓRICA DE CAMIÓN	121
ANEXO 4: ESPESOR Y COMPACTACIÓN DEL MEDIO GRANULAR	123
ANEXO 5: ESCALAMIENTO PENETRACIÓN RUEDA	124
ANEXO 6: CADENAS DE ESFUERZOS SOBRE PENETRACIÓN EN VARIAS FASES.....	126
ANEXO 7: COMPLEMENTOS DE ANÁLISIS DE ARRASTRE PLACA.....	129
ANEXO 8: LABORATORIO DE EVAPORACIÓN.....	132

Indice de Tablas

TABLA 1. LÍMITE PERMISIBLE PONDERADO CONTAMINANTES D.S 594/99.....	16
TABLA 2. FUENTES DE EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN FAENAS MINERAS.....	17
TABLA 3. SISTEMAS DE CONTROL DE POLVO EN HÚMEDO V/S SECO.....	18
TABLA 4. SUPRESORES DE POLVO CON SUS EFICIENCIAS Y PRINCIPALES DESVENTAJAS.....	21
TABLA 5. CLASIFICACIÓN MINERALES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS (DIXON AND SCHULTZE, 2002).....	22
TABLA 6. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS.....	22
TABLA 7. CLASIFICACIÓN DE TAMAÑO EN LOS FINOS DEL SUELO.....	23
TABLA 8. DIFERENCIAS ENTRE SUELOS ARENOSOS Y ARCILLOSOS.....	23
TABLA 9. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE SUELO FINO Y GRUESO (HOLTZ Y KOVACS, 1981).....	24
TABLA 10. FASES DE DISEÑO DE CAMINO MINERO (THOMPSON Y VISSEN, 1999).....	27
TABLA 11. DESCRIPCIÓN DE CAPAS DE UN CAMINO MINERO (TANNANT Y REGENSBURG, 2001).....	28
TABLA 12. BANDAS GRANULOMÉTRICAS PARA SUBBASE, BASE Y CARPETA (MOP, 2015).....	29
TABLA 13. DISTRIBUCIÓN DEL PESO DE UN CAMIÓN MINERO ENTRE SUS RUEDAS (KOMATSU, 2009).	31
TABLA 14. CONSTANTES DE FACTOR DE EMISIÓN DE LA USEPA PARA CAMINOS MINEROS.....	32
TABLA 15. VALOR POR DEFECTO PARA PARÁMETROS "S" Y "P" EN RELACIÓN EF.....	32
TABLA 16. FAENAS MINERAS CHILENAS Y DOCUMENTOS RESPECTIVOS ACERCA DE EMISIONES DE MP10.....	41
TABLA 17. PROFESIONALES Y TEMÁTICAS DE ENTREVISTAS SOBRE CAMINOS MINEROS.....	43
TABLA 18. DIMENSIONES DE CAJÓN Y PLACA PARA SIMULACIONES.....	45
TABLA 19. RAZÓN ENTRE CADA DIMENSIÓN DEL SISTEMA Y EL DIÁMETRO DE PARTÍCULA.....	46
TABLA 20. COMPACTACIÓN Y ESPESORES UTILIZADOS EN ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES.....	46
TABLA 21. PARÁMETROS DE LA PLACA DEL SISTEMA SIMULADO.....	46
TABLA 22. PARÁMETROS DE LAS PARTÍCULAS DEL MEDIO GRANULAR SIMULADO.....	47
TABLA 23. PARÁMETROS DE INTERACCIÓN PARTÍCULA-PARTÍCULA.....	47
TABLA 24. PARÁMETROS DE INTERACCIÓN PLACA-PARTÍCULAS.....	47
TABLA 25. PARÁMETROS DE ALIMENTACIÓN EN LLENADO DE CAJÓN.....	48
TABLA 26. ETAPAS PARA EL LLENADO DE CAJÓN EN SIMULACIONES.....	49
TABLA 27. PARÁMETROS DE LA RUEDA DE CAMIÓN MINERO SIMULADO.....	51
TABLA 28. FUERZA NORMAL DE PLACA CON RESPECTO A CARGA DE CAMIÓN.....	52
TABLA 29. RANGO DE VALORES TÍPICOS DE COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE ALGUNOS TIPOS DE SUELO.....	54
TABLA 30. FACTORES DE ESCALAMIENTO PARA DETERMINAR POTENCIAL DE EMISIÓN (PE).....	57
TABLA 31. PARÁMETROS DE ADHESIÓN PARA DISTINTOS NIVELES DE COHESIÓN.....	59
TABLA 32. PREPARACIÓN DE SOLUCIONES PARA HUMECTAR MUESTRAS DE EVAPORACIÓN.....	59
TABLA 33. EMISIONES DE POLVO NO CLASIFICADO EN MG/M ³ Y SU RELACIÓN CON NORMA D.S 594/99, PLANTA "EL SOLDADO".....	64
TABLA 34. EMISIONES DE SÍLICE EN MG/M ³ DE SECTORES PRINCIPALES DE PLANTA "EL SOLDADO" Y SU RELACIÓN CON NORMA D.S 594/99.	65
TABLA 35. DUREZA DE MOHS DE LAS PRINCIPALES ESPECIES PRESENTES EN MUESTRA DE CAMINO MINERO.....	68
TABLA 36. ASOCIACIONES MINERALES DE MOSCOVITA Y ARCILLAS DE MUESTRA DE CAMINO MINERO.....	69
TABLA 37. ACTIVIDADES COMUNES DE CONSTRUCCIÓN Y MANTENCIÓN DE CAMINOS NO PAVIMENTADOS.....	72
TABLA 38. TESTIMONIOS DE PROFESIONALES SOBRE PRÁCTICAS DE CONSTRUCCIÓN Y MANTENCIÓN EN CAMINOS MINEROS.....	72
TABLA 39. ESTIMACIÓN COSTOS DE PROGRAMAS DE SUPRESIÓN DE POLVO.....	75
TABLA 40. DEFINICIÓN DE LAS FUERZAS COMPRENDIDAS EN EL PROBLEMA RUEDA-SUELO A ESTUDIAR.....	78
TABLA 41. DISTANCIA DE PENETRACIÓN SISTEMA ROCKYDEM® A DISTINTAS CARGAS DE CAMIÓN.....	79
TABLA 42. VALOR ESTIMADO DE COEFICIENTE DE COMPRESIÓN VOLUMÉTRICO.....	79
TABLA 43. CÁLCULO DE PENETRACIÓN DE CAMIÓN 300T EN CAMINO MINERO.....	80
TABLA 44. PENETRACIÓN RUEDA ESTIMADA PARA DISTINTAS CARGAS DE CAMIÓN.....	80
TABLA 45. DISTANCIA PENETRACIÓN ROCKYDEM® CON EFECTOS DE COHESIÓN.....	80
TABLA 46. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD PARA CLASES DE SUELOS TÍPICOS DE CARPETA DE RODADO.....	82
TABLA 47. PROFUNDIDAD DE SUELO AFECTADO POR PENETRACIÓN RUEDA DE 300 T.....	82
TABLA 48. TIEMPO DE PENETRACIÓN DE SOLUCIÓN TÓPICA DE SUPRESIÓN DE POLVO EN LIMO COMPACTADO, ARENA LIMOSA Y GRAVA ARENA LIMOSA.....	82
TABLA 49. PROFUNDIDAD CUBIERTA POR SUPRESOR EN UN DÍA PARA TRES TIPOS DE SUELOS: LIMO COMPACTADO, ARENA LIMOSA Y GRAVA ARENA LIMOSA.....	83
TABLA 50. VELOCIDAD MEDIA TRASLACIONAL DE PARTÍCULAS EN FUNCIÓN DE V _{CAMIÓN} ENTRE 10 Y 50 KM/H.....	85

TABLA 51. VELOCIDADES V_x , PART Y V_y , PART DETERMINADAS CON LOS MODELOS V_{10} , V_{21} Y V_{32}	89
TABLA 52. DIFERENCIA RELATIVA ENTRE MODELOS DE VELOCIDAD C/R A V_{10} PARA V_x , PART Y V_y , PART, A 10, 30 Y 50 KM/H DE $V_{CAMIÓN}$	90
TABLA 53. PE EN FUNCIÓN DE CARGA CAMIÓN, CON PESO CAMIÓN ENTRE 100-400 T.....	91
TABLA 54. PE PARA DISTINTOS GRADOS DE ADHESIÓN DEL MEDIO GRANULAR, CON ADH ENTRE 0 Y 1000.....	92
TABLA 55. TASA DE EVAPORACIÓN DE DISTINTAS SOLUCIONES HUMECTANTES SOBRE MUESTRAS CON Y SIN CUARZO MOLIDO.....	94
TABLA 56. DIFERENCIA DE EVAPORACIÓN DE DISTINTAS SOLUCIONES HUMECTANTES SOBRE MUESTRAS CON Y SIN CUARZO MOLIDO.....	94
TABLA 57. CONTENIDO DE FINOS EN CAMINOS MINEROS DE FAENAS CHILENAS	108
TABLA 58. FACTOR DE EMISIÓN MP10 POR EXTRACCIÓN MATERIAL PARA FAENAS ESTUDIADAS.....	108
TABLA 59. FACTOR DE EMISIÓN MP10 EN PLANTA POR MINERAL PROCESADO EN FAENAS ESTUDIADAS	109
TABLA 60. DESCRIPCIÓN DE FAENAS MINERAS EXTRAÍDAS DEL SEA PARA ESTUDIOS DE MP10.....	110
TABLA 61. ESCALA DE COLORES PARA DEFINIR RELACIÓN ENTRE NIVELES DE EMISIÓN Y LPP.....	115
TABLA 62. REGISTRO DE EMISIÓN DE PARTICULADO DE TODOS LOS SITIOS EN PLANTA DE "EL SOLDADO"	116
TABLA 63. PARTICIPACIÓN MÁSCICA DE ESPECIES MINERALES EN ANÁLISIS QEMSCAM SOBRE MUESTRA DE CAMINO MINERO.....	117
TABLA 64. PARTICIPACIÓN MÁSCICA DE ELEMENTOS QUÍMICOS EN ANÁLISIS QEMSCAM SOBRE MUESTRA DE CAMINO MINERO.....	117
TABLA 65. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA PARA MUESTRA "PELAMBRES"	118
TABLA 66. ESTIMACIÓN DEL ÁNGULO DE REPOSO EXPERIMENTAL.....	120
TABLA 67. ÁNGULO DE REPOSO ESTIMADO SOBRE $RR=0,5$	120
TABLA 68. ÁNGULO DE REPOSO ESTIMADO SOBRE $RR=0,53$	120
TABLA 69. PARÁMETROS BANDA CONTACTO TEÓRICA	121
TABLA 70. ÁREA DE PLACA (ZOOM BANDA DE CONTACTO).....	121
TABLA 71. VALORES EN RELACIÓN A LA CARGA DE UNA RUEDA MINERA DE CAMIÓN 300T	122
TABLA 72. FUERZA NORMAL EQUIVALENTE ENTRE RUEDA Y SUELO	122
TABLA 73. CÁLCULO VOLUMEN TOTAL OCUPADO POR MEDIO GRANULAR EN SISTEMA ROCKY	123
TABLA 74. ESTIMACIÓN COMPACTACIÓN EN SISTEMA CAJÓN ROCKY	123
TABLA 75. COMPACTACIÓN MEDIO GRANULAR EN SISTEMA PLACA-CAJÓN	124
TABLA 76. ESPESOR MEDIO GRANULAR Y CARPETA DE RODADO	124
TABLA 77. CÁLCULO DE ESFUERZO EJERCIDO POR CAMIÓN 300T SOBRE CAMINO MINERO.....	124
TABLA 78. ESFUERZO TRANSFERIDO DE RUEDA A SUELO PARA DISTINTAS CARGAS.....	125
TABLA 79. ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD VOLUMÉTRICA PARA 300T CAMIÓN	125
TABLA 80. ESTIMACIÓN DE COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD VOLUMÉTRICA GENERAL	125
TABLA 81. TASA DE EMISIÓN Y PE DEL SUELO EN EL RANGO $V_{CAMIÓN}$ DE 10-50 KM/H.....	129
TABLA 82. HUMEDAD PERDIDA DURANTE 70 MIN DE EVAPORACIÓN A 30°C SOBRE CUARZO MOLIDO CON DISTINTAS SOLUCIONES.....	132
TABLA 83. TASA DE EVAPORACIÓN PARA DISTINTAS MUESTRAS CON SOLUCIÓN HUMECTANTE S/SÓLIDO	133
TABLA 84. HUMEDAD PERDIDA DURANTE 70 MIN DE EVAPORACIÓN A 30°C SOBRE MUESTRA CON DISTINTAS SOLUCIONES PERO SIN SÓLIDO	134
TABLA 85. TASA DE EVAPORACIÓN PARA DISTINTAS MUESTRAS CON SOLUCIÓN HUMECTANTE S/SÓLIDO	135
TABLA 86. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE AEROSPRAY 70A BINDER.....	136
TABLA 87. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE CYFLOC C-573 FLOCCULANT.....	136

Indice de Figuras

FIGURA 1. ÁREA TRANSVERSAL TÍPICA DE CAMINO MINERO CON TRÁNSITO DE HASTA 320T (TANNANT Y REGENSBURG, 2001).....	27
FIGURA 2. ILUSTRACIÓN DE LA BANDA DE CONTACTO DE UNA RUEDA (THECONTACTPATCH, 2015).....	30
FIGURA 3. PARTÍCULAS GENERADAS ALREDEDOR DE RUEDA (CHEN ET AL, 1999).	33
FIGURA 4. ESQUEMA DE LOS DIFERENTES MODOS DE TRANSPORTE DE PARTÍCULAS DEL SUELO POR CAUSA DEL VIENTO (NICKLING Y MCKENNA,2009).	34
FIGURA 5. METODOLOGÍA GENERAL DEL TRABAJO	40
FIGURA 6. (A) RUEDA DE CAMIÓN MINERO INCLUYENDO DEFINICIÓN DE BANDA DE CONTACTO (AUTOPISTA.ES, 2015) Y (B) SU ABSTRACCIÓN EN EL SISTEMA PLACA-CAJÓN.	45
FIGURA 7. FASES DE LLENADO CAJÓN (A) RIGIDEZ BASE DE $1 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$ (B) ADICIÓN DE TAPA, RIGIDEZ $1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ (C) COMPACTACIÓN CON PISTÓN, RIGIDEZ $1 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ (D) IMPORTACIÓN DE PLACA, ASENTAMIENTO COMPLETO PARTÍCULAS.....	50
FIGURA 8. HENDIDURAS EN UNA RUEDA MINERA.....	51
FIGURA 9. POSICIÓN DE PLACA EN FASE DE ARRASTRE EN (A) TIEMPO INICIAL Y (B) TIEMPO FINAL.	55
FIGURA 10. REGIÓN CONSIDERADA EN ESTACIONARIO DEL ANÁLISIS POST-SIMULACIÓN DEL ARRASTRE DE PLACA.....	56
FIGURA 11. MUESTRAS HUMECTADAS CON SÓLIDO, PREVIO A EVAPORACIÓN A 30°C	60
FIGURA 12. MUESTRAS HUMECTADAS SIN SÓLIDO, PREVIO A EVAPORACIÓN A 30°C	61
FIGURA 13. CONTRIBUCIÓN DE FUENTES EN T/AÑO EN LA EMISIÓN TOTAL DE MP10 DE ALGUNAS FAENAS MINERAS ...	62
FIGURA 14. CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LAS FUENTES DE EMISIÓN AL TOTAL DE MP10 EN FAENAS MINERAS CHILENAS.....	63
FIGURA 15. RELACIÓN ENTRE EMISIONES DE POLVO NO CLASIFICADO Y SÍLICE CRISTALINA DE PLANTA EL SOLDADO	66
FIGURA 16. PARTICIPACIÓN MÁSCA DE ESPECIES HALLADAS EN ANÁLISIS QEMSCAM SOBRE MUESTRA DE CAMINO MINERO.....	67
FIGURA 17. ASOCIACIONES MINERALES DE ESPECIES HALLADAS EN ANÁLISIS QEMSCAM SOBRE CAMINO MINERO SOBRE MUESTRA DE CAMINO MINERO.	68
FIGURA 18. DISEÑO DE CARPETA DE ACUERDO A LA MINERALOGÍA PARA CONTROLAR ABRASIÓN	70
FIGURA 19. DISTRIBUCIÓN ACUMULADA DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS, DE LA MUESTRA DE CAMINO DE MINERO “PELAMBRES”	70
FIGURA 20. COSTO OPERACIÓN CAMINOS EN BASE A RESISTENCIA RODADURA (GLEISNER ET AL, 2016)	74
FIGURA 21. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE SOBRE UNA PARTÍCULA DEL SUELO EN INTERACCIÓN CON RUEDA DE CAMIÓN MINERO.....	78
FIGURA 22. ZOOM PENETRACIÓN PLACA 300 T SOBRE MEDIO GRANULAR SECO, ADH 1, ADH 100 Y ADH 1000 (IZQ. A DERECHA, DE ARRIBA A ABAJO).	81
FIGURA 23. PE DE SUELO SECO, PARA $V_{\text{CAMIÓN}}$ ENTRE 10-50 KM/H	84
FIGURA 24. V_{PART} , X ADQUIRIDA POR PARTÍCULAS SUSPENDIDAS, A DISTINTO $V_{\text{CAMIÓN}}$	86
FIGURA 25. V_{PART} , Y ADQUIRIDA POR PARTÍCULAS SUSPENDIDAS, A DISTINTO $V_{\text{CAMIÓN}}$	86
FIGURA 26. HISTOGRAMA DE LA VELOCIDAD HORIZONTAL DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS POR PLACA A 50 KM/H.....	88
FIGURA 27. HISTOGRAMA DE LA VELOCIDAD VERTICAL DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS POR PLACA A 50 KM/H.....	88
FIGURA 28. V_x , PART DETERMINADA CON LOS MODELOS DE VELOCIDAD V_{10} , V_{21} Y V_{32} , PARA 10, 30 Y 50 KM/H DE $V_{\text{CAMIÓN}}$	89
FIGURA 29. V_y , PART DETERMINADA CON LOS MODELOS DE VELOCIDAD V_{10} , V_{21} Y V_{32} , PARA 10, 30 Y 50 KM/H DE $V_{\text{CAMIÓN}}$	90
FIGURA 30. PE EN FUNCIÓN DE LA CARGA TOTAL DEL CAMIÓN, CON PESO CAMIÓN ENTRE 100-400 T.....	92
FIGURA 31. PE EN FUNCIÓN DE LA COHESIÓN DEL MEDIO GRANULAR, CON ADH ENTRE 0 Y 1000.....	93
FIGURA 32. DISEÑO CONCEPTUAL PARA LA CONSTRUCCIÓN Y MANTENCIÓN DE UN CAMINO MINERO	96
FIGURA 33. CONSTRUCCIÓN DE CAMINO MINERO EN BASE A LA VARIABLE DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA	97
FIGURA 34. PARTICIPACIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN DE PARTICULADO EN MINA ESPERANZA	111
FIGURA 35. PARTICIPACIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN DE PARTICULADO EN MINA LOS COLORADOS.....	111
FIGURA 36. PARTICIPACIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN DE PARTICULADO EN MINA ANTUCOYA.....	112
FIGURA 37. PARTICIPACIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN DE PARTICULADO EN MINA SIERRA GORDA	112
FIGURA 38. PARTICIPACIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN DE PARTICULADO EN MINA ZALDÍVAR.....	113
FIGURA 39. PARTICIPACIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN DE PARTICULADO EN MINA ÓXIDOS ENCUENTRO.....	113
FIGURA 40. PARTICIPACIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN DE PARTICULADO EN MINA FRANKE	114
FIGURA 41. PARTICIPACIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN DE PARTICULADO EN MINA SANTO DOMINGO	114

FIGURA 42. PARTICIPACIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN DE PARTICULADO EN MINA EL ESPINO.....	115
FIGURA 43. IMÁGENES DE MINI-PILA DE FINO PARA MEDIR ÁNGULO DE CONTACTO EN ROCKYDEM®.....	119
FIGURA 44. CADENAS DE ESFUERZOS PARA MEDIO GRANULAR SECO A DISTINTAS PENETRACIONES	126
FIGURA 45. CADENAS DE ESFUERZOS MEDIO GRANULAR ADH1 A DISTINTAS PENETRACIONES	127
FIGURA 46. CADENAS DE ESFUERZOS MEDIO GRANULAR ADH100 A DISTINTAS PENETRACIONES	127
FIGURA 47. CADENAS DE ESFUERZO MEDIO GRANULAR ADH1000 A DISTINTAS PENETRACIONES.....	128
FIGURA 48. HISTOGRAMA CON LA VELOCIDAD HORIZONTAL DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS POR PLACA A 10 KM/H..	129
FIGURA 49. HISTOGRAMA CON LA VELOCIDAD VERTICAL DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS POR PLACA A 10 KM/H.....	130
FIGURA 50. HISTOGRAMA CON DISTRIBUCIÓN DE V_x , PART PARA PLACA A 30 KM/H.....	130
FIGURA 51. HISTOGRAMA CON DISTRIBUCIÓN DE V_y , PART PARA PLACA A 30 KM/H.....	131
FIGURA 52. MASA DE MUESTRAS DE CUARZO MOLIDO EN FUNCIÓN DE TIEMPO DE EVAPORACIÓN, A 30°C.....	133
FIGURA 53. MASA DE MUESTRAS SIN SÓLIDO EN FUNCIÓN DE TIEMPO DE EVAPORACIÓN, A 30°C.....	135

Capítulo 1: Introducción

1.1 Contexto y Motivación

La actividad minera se enfrenta diariamente a desafíos y cuestionamientos en materia técnica, económica y ambiental. Por ello, su continuidad y éxito no solo está dictada por los beneficios económicos que impulsan el negocio sino también, por su relación con las comunidades, la seguridad operacional y el uso eficiente de recursos tan escasos como el agua y la energía. En este sentido, los lineamientos hacia el futuro apelan primordialmente a mejoras e innovaciones por una minería sostenible en el tiempo y amigable con el medio ambiente.

La circulación de camiones de alto tonelaje por caminos mineros es una de las prácticas que ha resultado ser desafiante en términos ambientales. Al representar la principal fuente de emisiones fugitivas de material particulado para las faenas (Reed y Organiscak, 2006) cuestiona la sostenibilidad del empleo de camiones cada vez más grandes, así como la seguridad de los operadores y la eficiencia en los mecanismos de control y mantención. En más detalle, la generación de material particulado por el uso de caminos mineros, ha pasado a ser una problemática a resolver en forma prioritaria. Debido a este fenómeno, se amenaza la actividad minera poniendo en riesgo la salud de los operadores (silicosis), la visibilidad de operadores de la mina y el rodado de los equipos de transporte. Consecuentemente se ve empeorado el rendimiento y eficiencia de las operaciones de carguío y transporte.

Por lo demás, la contaminación por polvo resulta un ser un grave problema ambiental ya que (Alfaro, 2008):

- Conduce al agotamiento de los nutrientes del suelo y consecuentemente la desertificación.
- Daña a la salud de las personas por inhalación de partículas de sílice cristalina.
- Juega un rol en el cambio climático, interfiriendo en la transferencia radioactiva de longitudes de onda entre la tierra y el sol.

Es necesario comprender el carácter restrictivo de la presencia de polvo o material particulado en tema de reglamentaciones. Para Chile, la norma de calidad primaria (N°59/98) establece un promedio máximo diario de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y anual de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el caso del material particulado respirable, es decir, partículas de diámetro inferior a $10 \mu\text{m}$ (MP10). Los focos de material particulado van desde los caminos mineros e industriales, la tronadura, chancadores y correas transportadoras hasta lo que son laderas y taludes mineros. La supresión de polvo en cada caso esta sujeta a diferentes condiciones de modo que, no es tarea fácil proponer un solución única de una operación a otra.

De momento, la solución más frecuente y directa, para el caso de los caminos mineros, ha sido mediante el riego de agua con camiones aljibes. Sin embargo, las condiciones extremas de zonas áridas y de alta montaña típicas de las faenas mineras chilenas conciben el empleo de agua como una solución costosa e inefectiva. Con una eficiencia no superior al 40% y tasas de evaporación cercanas a los 30 minutos, su práctica diaria significa un excesivo consumo de agua y una solución parcial.

Combatir las emisiones de material particulado en la búsqueda de una solución efectiva y de mayor duración, demanda la necesidad de comprender los tipos de suelo que caracterizan a la actividad minera y la dinámica del suelo mismo con los camiones de alto tonelaje que circulan en las operaciones. Luego, resulta valioso abordar el problema a una escala mesoscópica es decir, a un nivel capaz de apreciar las partículas de finos desprendiéndose una a una del suelo. En la misma línea, evaluar la respuesta a variados aditivos que promueven la aglomeración y/o compactación en el suelo. Se busca alternativas capaces de resistir los altos tonelajes de los camiones mineros, sin riesgos para la salud de las personas o el medio ambiente, de fácil manipulación (manejo) y sin ser corrosivos. Solo por mencionar, algunos de los reactivos que actualmente se emplean con este fin se encuentran emulsiones bituminosas y productos naturales como la Bischofita.

Es necesario ver a los caminos mineros como un activo de la mina, al tener relación directa con la productividad. En mejores condiciones un camino determina un ciclo de carga-descarga de menor tiempo y por ende un menor costo por tonelada transportada. Otras ventajas ante caminos mineros en mejor estado y calidad son:

- Menos emisiones de material fino definen un menor desgaste del camino o deterioro de la carpeta. Se alarga vida útil del camino y se requieren menos recursos en mantención de la carpeta de rodado.
- Menor polución permite mayor visibilidad de los conductores, condiciones más seguras de conducción y ambientalmente más amigables.
- Mayor regularidad del camino ofrece menor resistencia a la rodadura. Luego, se tiene un menor consumo de combustible, menor desgaste del tren de potencia, los neumáticos, llantas y la suspensión de los camiones y vehículos que utilizan el camino.

En definitiva, logrando mantener caminos más estables (con menos polvo) se consume menos agua. Se logra además, tener mejores carpetas de rodado para los camiones tal que, es menor el diesel requerido para los distintos traslados. Los neumáticos presentan una mayor vida útil debido a un menor desgaste y se resguarda posibles daños a la salud de los operadores. Con reactivos y medidas que resguarden mejores condiciones de operación, la actividad minera y sus procesos mejoran indudablemente su sello en eficiencia y sustentabilidad.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Análisis crítico de la generación de polvo en suspensión generado en faenas y caminos mineros mediante estudios conceptuales, experimentales y de modelación numérica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar información sobre la emisión de material particulado en puntos críticos de faenas mineras chilenas.
- Analizar críticamente la literatura científico-tecnológica y la práctica industrial en torno a la construcción y mantención de caminos mineros.
- Estimar el impacto del arrastre de rueda de camión de alto tonelaje a distintas velocidades sobre el potencial de emisión de material particulado MP10 de suelo seco.
- Determinar el efecto de la carga de un camión sobre la penetración de la rueda y el potencial de emisión particulado de suelo seco.
- Evaluar el impacto en potencial de emisión y penetración de la rueda modificando las condiciones de cohesión del suelo.
- Determinar el tiempo de transporte de la solución supresora de polvo para cubrir el volumen de control establecido por la interacción rueda-suelo.
- Diseñar e implementar una estrategia de laboratorio para evaluar la eficiencia en la evaporación de agua desde una muestra de cuarzo fino humectado en presencia de diferentes aditivos (ácido, floculante, emulsión).
- Proponer una estrategia como potencial solución a la emisión de polvo en caminos mineros.

1.3 Alcances

La evaluación sobre la contribución de las principales fuentes de emisiones de particulado en faenas mineras se realiza en base a un grupo limitado de 8 proyectos chilenos. Estos se encuentran ubicados en la segunda y tercera región del país (proyectos de alta cordillera) y representan a la minería del cobre (a excepción de Mina Los Colorados, con extracción de hierro). La información se levanta de estudios de impacto ambiental donde se entregan estimaciones de emisión de polvo en base a la US-EPA, no a mediciones reales de cada mina.

Con respecto a las entrevistas con expertos, los testimonios son en base a 5 profesionales con distintos grados de experiencia en proyectos de construcción y mantención de Caminos Mineros. No son fuentes estrictamente representativas de lo que ocurre en todas las faenas chilenas ni menos, fuera del país. Sin embargo, son tomados como un buen punto de partida para reconocer las distintas aristas en la ingeniería de caminos y el problema del polvo.

En relación a los estudios numéricos, algunas suposiciones y aproximaciones utilizadas son:

- Un sistema simplificado de la interacción rueda-suelo mediante un zoom de la banda de contacto con la superficie. Por ende, no se representa la rueda de un camión minero directamente sino una aproximación de esta.
- El estudio se hace a una velocidad de desplazamiento constante es decir, se evalúa el movimiento estacionario de un camión entre dos puntos. Se excluye el fenómeno rueda-suelo para el inicio y frenado del vehículo en un camino minero.
- La presión de neumático y el área de la rueda no son considerados en interacción rueda-suelo.
- Los parámetros utilizados en las simulaciones se recogen de estudios científicos previos y la calibración directa en software Rocky DEM. No se utilizan valores medidos in-situ.
- El suelo se representa como una sección de material granular y no como un medio infinito bajo la rueda.
- El medio granular se constituye de partículas de $10 \mu\text{m}$ y no una distribución granulométrica como sucede en el caso real del suelo.
- La forma de las partículas se toma como esférica puesto que en gran medida todas han sufrido alto grado de erosión.
- La dispersión de partículas se estudia solo bajo los efectos del movimiento de la rueda de un camión es decir, la acción dinámica del aire sobre la suspensión de polvo solo se analiza conceptualmente.
- Se evalúa exclusivamente el impacto de las ruedas en las emisiones de particulado. Sin embargo, se evalúa interacción con aire en forma teórica.

Por último, los experimentos de laboratorio de evaporación son preliminares y sólo tienen la intención de comparar tasas de evaporación con distintas soluciones de humectación en cuarzo fino.

Capítulo 2: Antecedentes

2.1 Contexto

2.1.1 Contaminación por material particulado

La actividad minera, debido a su impacto directo en la naturaleza, el empleo de múltiples recursos (como agua y energía) y la cercanía a muchos asentamientos humanos conlleva fuertes desafíos de tipo ambiental. Los riesgos de contaminación existen por deterioro de flora, sitios en abandono, liberación de efluentes así como contaminación por aire. Para el último caso, se considera contaminante toda aquella sustancia química, sus compuestos o derivados, agentes físicos y biológicos que al adicionarse al aire pueden alterar o modificar sus características naturales o las del ambiente (Resolución N°1215 MINSAL. Normas sanitarias destinadas a prevenir y controlar la contaminación atmosférica).

Entre los problemas asociados a la contaminación ambiental por polución se tienen:

- Riesgos para la salud.
- Contaminación de cursos fluviales o daño de flora y fauna en zonas adyacentes.
- Rápido desgaste de poleas y rodamientos que generan un aumento en reparaciones y mantenimiento.
- Riesgo de corrosión de equipos.
- Empeoramiento imagen en la comunidad local.

En contaminación por polvo, se define como material particulado sedimentable, sea cual sea su tamaño, a aquel captado sobre una unidad de superficie en una unidad de tiempo. Aquellas partículas que permanecen en suspensión se clasifican en polvo inhalable o MP10 y en polvo respirable o MP2,5. El primer grupo incorpora la fracción gruesa del polvo, bajo $10\ \mu\text{m}$ y sobre $2,5\ \mu\text{m}$. Esta consiste en partículas capaces de permanecer en el aire por un periodo de horas hasta días y, en contacto con las vías respiratorias, pueden llegar hasta la región torácica, causando problemas como irritación de ojos, nariz y garganta. Por otro lado, el MP2,5 representa la fracción fina de polvo, bajo $2,5\ \mu\text{m}$. Estas son capaces de permanecer suspendidas por periodos de días y hasta semanas, por lo cual son capaces de recorrer largas distancias. En este caso, los problemas a la salud son más acentuados pues son partículas capaces de llegar hasta los pulmones y alvéolos. Los principales riesgos en la salud por presencia de MP2,5 son: enfermedad pulmonar crónica, cáncer respiratorio, enfermedades cardiovasculares, aparición e incremento de asma. El origen de estas son clases de material particulado son completamente disimiles.

Específicamente, desde una perspectiva ingenieril, el material particulado toma importancia en partículas con un diámetro inferior a $30\ \mu\text{m}$ ya que permanecen un tiempo considerable

suspendidas luego de ser suspendidas de superficie. El Material erodible del suelo es proporcional al material en este tamaño (Thompson y Visser, 2007).

a) Origen del Material particulado

La composición, nivel de toxicidad y tamaño característico del polvo emitido tienen una fuerte correlación con la fuente de emisión. En este sentido, el material particulado de las faenas mineras se puede dividir en tres grupos (Higuera y Oyarzun, 2004):

1. **Polvo Mineral.** Procedente de las operaciones mineras como resultado de la abrasión o trituración de roca de los procesos mineros. Actividades como tronadura de la mina, traslado y chancado de mineral son algunas de sus fuentes de emisión. Por ende, su composición depende del mineral o material tratado en las operaciones o explotación minera. Habitualmente conforman el material particulado denominado MP10 o grueso.
2. **Polvo de Rodadura.** Tiene su origen en los caminos mineros, afectados por la rodadura de vehículos de alto tonelaje y la acción del viento. Contribuyen principalmente a las emisiones de MP10, al igual que el polvo procedente de la mina. Entre sus principales componentes se encuentra la sílice, debido a su abundancia en la tierra. Asimismo son comunes arcillas como caolinita y feldespatos, debido a su tamaño fino.
3. **Cenizas.** Procedente de procesos pirometalúrgicos y procesos de combustión empleados en minería que dan origen a cenizas. Estas representan la principal fuente de MP2,5 dentro de las actividades mineras. Los componentes químicos encontrados en este grupo varían y pueden llegar a presentar altos niveles de toxicidad. Entre algunas de las especies de este grupo se encuentran sulfatos, metaloides (As y Sb), ácidos y compuestos orgánicos volátiles. Luego, muchos de estos componentes pueden participar de reacciones químicas con el medio ambiente y producir nuevos contaminantes conocidos como especies secundarias.

b) Normativa Medioambiental para minería

A continuación se mencionan los decretos relacionados con la contaminación de particulado y minería.

b.1) Norma de calidad primaria para MP10 (D.S 59/98). De acuerdo al artículo 2º del D.S 59 “La norma primaria de calidad del aire para el contaminante material particulado respirable MP10, es ciento cincuenta microgramos por metro cúbico normal (150 mg/m³N) como concentración de 24 horas. Se considerará sobrepasada la norma de calidad del aire para material particulado respirable cuando el Percentil 98 de las concentraciones de 24 horas registradas durante un período anual en cualquier estación monitorea clasificada como EMRP, sea mayor o igual a 150 mg/m³N. Asimismo, se considerará superada la norma, si antes que concluyese el primer período anual de mediciones certificadas por el Servicio de Salud competente se registrare

en alguna de las estaciones monitoras de material particulado respirable MP10 clasificada como EMRP, un número de días con mediciones sobre el valor de 150 mg/m³N mayor que siete (7). La norma primaria de calidad del aire para el contaminante material particulado respirable MP10, es cincuenta microgramos por metro cúbico normal (50 µg/m³N) como concentración anual. Se considerará sobrepasada la norma primaria anual de calidad del aire para material particulado respirable MP10, cuando la concentración anual calculada como promedio aritmético de tres años calendario consecutivos en cualquier estación monitora clasificada como EMRP, sea mayor o igual que 50 µg/m³” (CONAMA, 2015).

b.2) Norma de calidad primaria para MP2,5. En base al Decreto Supremo N°12/2013 “Se considerará sobrepasada la norma primaria de calidad del aire para material particulado fino respirable MP2,5, en los siguientes casos: a) Cuando el percentil 98 de los promedios diarios registrados durante un año, sea mayor a 50 (µg/m³), en cualquier estación monitora calificada como EMRP; o Cuando el promedio tri-anual de las concentraciones anuales sea mayor a 20 (µg/m³), en cualquier estación monitora calificada como EMRP” (MMA, 2015).

b.3) Valores límites en áreas de trabajo (D.S 594/99). Existen valores límites de exposición en los lugares de trabajo, con la finalidad de resguardar la salud de los trabajadores. En la legislación nacional se establecen los límites máximos para el material particulado y la sílice cristalina. Se regulan además las emisiones a la atmósfera de los equipos de control y captación de material particulado.

En el decreto supremo 594/99 (artículo 66) se establecen los límites permisibles ponderados a los que se pueden someter los trabajadores durante una jornada de trabajo por contaminación de polvo. El promedio ponderado de las concentraciones ambientales de contaminantes químicos no podrá superar los límites permisibles ponderados (LPP) (Tabla 1). Los límites pueden excederse momentáneamente pero no deben superar en cinco veces el valor de LPP y tales excesos no podrán repetirse más de cuatro veces dentro de la jornada diaria ni más de una vez en una hora. Los valores de LPP se conocen a partir del artículo 66 para sílice cristalizada, polvo no clasificado respirable y polvo total.

Tabla 1. Límite permisible ponderado contaminantes D.S 594/99

Sustancia	Límite permisible ponderado (LPP) [mg/m ³]	Comentario
Sílice Cristalizada Cuarzo ($C_{sílice}$)	0,08	Fracción respirable
Polvos no clasificados ($C_{polvo\ no\ clasificado}$)	2,40	Fracción respirable
Polvos no clasificados (Total)	8,00	Polvo exento de Asbesto y con menos de 1% de Sílice Cristalizada Libre

2.1.2 Fuentes de emisión minera de material particulado

Las fuentes de emisión de material particulado en la actividad minera son múltiples. Sin embargo, en proyectos presentados al Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) se reconocen cinco grupos principales (referidos a MP10) (Tabla 2): explotación del rajo, transporte de mineral, planta de procesamiento, erosión eólica y descarga material. La fundición es una fuente importante de contaminación ambiental, pero de MP2,5.

Tabla 2. Fuentes de emisión de material particulado en faenas mineras

Fuente	Focos de emisión	Medidas mitigación	Comentarios
Explotación de rajo	La tronadura, la extracción del mineral y el carguío (mineral y lastre).	La humectación previa a voladura es un mecanismo de control [Cecala et al, 2012].	La perforación tiene una menor contribución con respecto a las anteriores.
Transporte de mineral	Caminos no pavimentados con Camiones de alto tonelaje. Emisión desde ruedas y material cargado.	Riego de agua con camiones aljibes es el método de control más común. Supresores de polvo son soluciones complementarias [Valenzuela, 2014].	Representan la principal fuente de emisiones de polvo en las faenas, constituyendo entre 78% a un 97% de las emisiones totales [Organiscak y Reed, 2006]. Contaminación se traduce no solo en un problema local sino global, por la aparición de una pluma.
Planta de Procesamiento	Chancado primario y descarga de mineral en la Planta. Otros focos de planta son menos relevantes. Molienda y Harneros pueden tener una participación importante, dependiendo de la faena.	Combinación de métodos de control por vía seca (encapsulamiento) y húmeda (agua). En algunos casos se emplean sensores para empleo de aspersores [Cecala et al, 2012].	Las cantidades emitidas van a depender del tipo de material a trabajar (composición, dureza y abrasividad) y los requerimientos en el producto de salida. La trituración e impacto durante chancado implica la generación de polvo. Harneros participan producto de vibración de parrillas, sobrecarga de mineral y su caída.
Erosión Eólica	Conocidas como fuentes fugitivas, afectadas por acción del viento. Participan depósitos de lastre, acopios baja ley, pilas, correas transportadoras y depósitos de relave.	Algunas prácticas de control son humectación con aspersores y barreras contra el viento como mallas, cercas o vegetación.	No representan un problema mayor para los operarios de la mina puesto que, no son sitios con gran tránsito de personal.
Descarga de Material	Incluye descarga lastre en depósito y descarga de mineral baja ley y oxidado (que no va a planta).	Como medidas de mitigación son comunes humectación con aspersores o recubrimiento con mallas durante descarga	En descarga se levanta polvo producto de la caída por gravedad.

2.1.3 Medidas de control y mitigación

Para el control y mitigación de polvo, se distingue entre la supresión en húmedo y en seco del material particulado. La aplicación de una vía u otra de control y mitigación depende de las especificaciones del problema, las etapas subsiguientes y las condiciones del foco de emisión (Cecala et al, 2012). En términos de costos y otras cualidades, cada sistema tiene sus ventajas (Tabla 3).

Tabla 3. Sistemas de control de polvo en húmedo v/s seco

Característica	Sistemas en húmedo	Sistemas en seco
Costo de instalación y utilización	Bajo	Alto
Costo de Mantenición	Alto	Bajo
Probabilidad de Falla	Alto	Bajo

Al momento de abordar el problema, se deben tener en cuenta aspectos tales como:

- Cercanía al flujo de personal.
- Condiciones meteorológicas de viento (magnitud y dirección) y humedad.
- Comunidades cercanas.
- Tipo de roca de la mina y métodos de extracción utilizados.

Los sistemas de colección de polvo en seco se diseñan dentro de un volumen de control, confinando el punto de emisión de material particulado. Se abate el polvo en los puntos de operación y luego, es separado de la columna de aire de la que proviene, mediante precipitación electrostática o uso de filtros. Debido a su estructura, son de gran tamaño y deben adaptarse al sistema u operación. Se utilizan principalmente en puntos de transferencia, zonas de chancado y zonas de movimiento de tierra donde condiciones de manipulación y las etapas subsiguientes del material dificultan el control vía húmeda. Puede tener un costo elevado en su instalación pero, resulta ser más efectivo.

De igual modo, existen otras aplicaciones para controlar la polución como colocar cubiertas y cierres herméticos en los focos de emisión. En las máquinas, también se plantea instalar extractores de polvo, capaces de reducir la exposición del personal.

En condiciones húmedas el material particulado puede ser abordado cuando aun no es suspendido de superficie así como, cuando ya se ha dispersado en el aire. En el primer caso, de carácter preventivo, se emplean rociadores de agua, muchas veces combinados con reactivos químicos llamados “supresores de polvo”, para aglomerar las partículas y estabilizar las condiciones del material sólido previo a la suspensión de partículas. Por otro lado, cuando las partículas ya han sido suspendidas en el aire, pueden emplearse aspersores, capaces de colisionar las partículas de

polvo con gotas de agua, otorgarles mayor peso y precipitar. El tema de los supresores de polvo, se discute una sección más abajo.

Los aspersores se instalan usualmente en puntos de traspaso, tolvas de vaciado y el recorrido de correas. Puede ocurrir la obstrucción de las boquillas de aspersores o su desprendimiento, perdiendo el control sobre la dispersión de polvo. Por ende, para su óptimo funcionamiento requieren de mantención y limpieza periódica. Muchas veces, la ubicación de los aspersores y la necesidad de detenciones se traduce en un problema.

2.1.4 Supresores de polvo

a) El agua: control de polución

El principal mecanismo para evitar la generación de material particulado es regando con agua los suelos, mediante camiones aljibes. La eficiencia de regar con agua cada hora es de 40% y si se aumenta a 30 min sube a 50% (Rosbury y Zimmer, 1983).

El agua como tal participa en muchos fenómenos del suelo. Por un lado, tiene un rol estructural contribuyendo a la agregación de partículas. Por otro, es indispensable para muchas reacciones químicas y el transporte de iones. La asimetría de las moléculas de agua (siendo neutra) es capaz de ofrecer fuerzas adhesivas con partículas cargadas así como también, a través de puentes de hidrógeno atraerse entre sí.

Como principal aglomerante el agua actúa rodeando a las partículas y generando una matriz de succión en el esqueleto del suelo. Su presencia entre los poros del suelos permite la cohesión de partículas bajo la aparición de la fuerza capilar y la tensión superficial del agua. Sin embargo, para humedades muy bajas la fuerza capilar del agua es despreciable frente a la gravedad y fuerzas de Van der Waals. Esto explica la desintegración de agregados y la suspensión de particulado en suelos secos.

Por otro lado, el agua puede ser utilizada como solvente de supresores de polvo tales como sales o reactivos químicos. La presencia de agua puede contribuir a la formación de puentes sólidos entre partículas (cristalización de sustancias disueltas o endurecimiento de aglutinantes presentes en el agua). En definitiva, su presencia en mayor o menor medida es fundamental para el control de emisiones de polvo desde los suelos y por ende, de los caminos mineros.

b) Otros supresores de polvo

En muchos sitios donde se busca evitar constantemente el levamiento de particulado se opera con supresores de polvo y/o estabilizadores químicos de suelo. Usualmente se aplican a los caminos mineros y reducen la suspensión de polvo desde el suelo de variadas formas (Bae et al, 2006; Vorobieff, 2004). En el mercado de los supresores se conocen distintas fuentes y marcas y, se

pueden clasificar de acuerdo a su composición y mecanismo de aplicación. Algunos de los supresores más utilizados en caminos mineros se mencionan a continuación:

1. **Sales Higroscópicas.** Absorben la humedad del ambiente, aumentan la tensión superficial y resisten la evaporación de agua como mecanismo para suprimir el polvo. Adicionalmente poseen un efecto electroquímico reduciendo el espesor de la doble capa y por ende, mejorando la fuerza mecánica entre partículas. Por último reducen la deformabilidad y permeabilidad de los suelos. Algunas sales higroscópicas empleadas como supresores de polvo son el cloruro de magnesio ($MgCl_2$), cloruro de sodio ($NaCl$) y cloruro de calcio ($CaCl$). Su eficiencia se encuentra en función de la humedad relativa y la temperatura del medio ambiente. En faenas mineras un agente muy conocido es la Bischofita (De Castro, 1996; Valenzuela, 2014).
2. **Lignosulfonatos.** Productos orgánicos capaces de formar una nueva superficie en el suelo al actuar como agentes cementantes electroquímicos. Aumentan la conductividad eléctrica del agua capilar e indirectamente modifican la capacidad de intercambio catiónico. Luego, se libera exceso de agua absorbida y se reduce afinidad del agua por las arcillas. Se utilizan principalmente en suelos con alto contenido de arcillas. En condiciones muy lluviosas tienen el problema de desintegrarse fácilmente y escurrir debido a su solubilidad en el agua. Otros productos de este tipo son los aceites sulfonatados, enzimas y el cloruro de amonio.
3. **Asfalto y emulsiones asfálticas.** Funcionan aglomerando y encapsulando las partículas del suelo. Forman una película fina resistente al rodado y pueden aumentar el punto de ruptura del suelo puede subir hasta en 3 ordenes de magnitud, en relación con suelos sin tratamiento alguno (Zimon, 1982). Como gran ventaja sobre otros supresores es ser hidrófobo y no tener restricciones con relación al clima. El único problema es que no es afín con todo tipo de suelo. Un producto comercial de este tipo es DustaSide y DustBloc.
4. **Polímeros.** Se utilizan como agentes adhesivos y enlazantes preferentemente para compactación, por sobre supresión de polvo. Moléculas reaccionan con iones libres del suelo y forman una estructura reticular muy estable y fuerte. Se emplean principalmente para suelos con bajo contenido de arcilla. Como desventaja se resquebrajan fácil y fallan en presencia de agua.
5. **Productos Electroquímicos.** Actúan como dispersores de arcilla y logran una respuesta más plástica del material. Productos de este tipo son enzimas y aceites sulfonatados.

Se enumeran los distintos supresores con sus valores teóricos de eficiencia así como, sus principales desventajas en la Tabla 4.

Tabla 4. Supresores de polvo con sus eficiencias y principales desventajas

Supresor	Eficiencia [%]	Lixiviación suelo	Modifica pH y salinidad	Afecta fauna	Genera Barro	Corrosión materiales	Superficie resbaladiza (higroscópico)	Alto costo	No permite circulación inmediata
Agua ¹	50	x	x		x				
Cloruro Calcio	55	x				x	x		
Cloruro de Magnesio	77	x	x	x		x	x		
Lignosulfonatos	<63						x		
Aceites vegetales y melazas	<84			x			x		
Emulsión asfáltica	>95							x	
Polímeros sintéticos	40-50								x

2.2 El suelo

2.2.1 El suelo y su definición

El suelo puede definirse como un agregado de partículas sólidas de baja resistencia y disgregable. Representa un sistema trifásico al integrarse por aire y agua en los poros de su estructura. El estado o calidad del suelo va a depender de su composición y estructura así como de la densidad, el historial de tensiones y características de las fuerzas aplicadas. Las dos clases principales de suelo a tener en cuenta son los suelos cohesivos es decir, aglomerados y los no cohesivos o granulares.

En términos de composición mineral del suelo, una clasificación general puede hacerse en minerales primarios y secundarios (Tabla 5). Difieren en el grado de alteración química como en la textura del suelo que preferentemente constituyen. El Cuarzo, Mica y Carbonatos son comunes en ambos grupos (Dixon and Schultze, 2002).

¹ Regado con agua a 2 L/m² al mes

Tabla 5. Clasificación Minerales Primarios y Secundarios (Dixon and Schultze, 2002)

Tipo de Mineral	Primarios	Secundarios
Grado Alteración	Sin gran alteración	Alteración química de minerales primarios
Textura Suelo	Arena y Limo	Fracción fina de limo y arcillas
Grupos Minerales	Silicatos, Óxidos de Fe, Óxidos de Zn y Fosfatos	Alumino-Silicatos, Óxidos, Hidróxidos y Carbonatos

2.2.2 Constitución física del suelo

Del suelo puede extraerse muchísima información a partir de sus propiedades físicas como la textura, densidad aparente, color, entre otras.

a) Distribución de Tamaño de partículas

El tamaño de partículas y su distribución, interfiere en las demás propiedades. Por esta razón, es una de las primeras propiedades que es necesario conocer. Un método para clasificar en grupos de tamaño las partículas del suelo es el AASHTO T-88 (Tabla 6). La clasificación de partículas se hace mediante tamizaje para tamaños sobre 75 μm (sobre malla #200). Bajo este tamaño, es necesario realizar pruebas de sedimentación.

Tabla 6. Distribución de tamaño de partículas

Clase	Tamaño [mm]
Colpas	>75
Grava gruesa	19-75
Grava fina	2-19
Finos	<2

La textura representa la distribución de tamaños de la fracción fina inorgánica del suelo es decir, del material con diámetro bajo 2 mm. Con una distribución granulométrica propia para cada suelo, la combinación de material se hace en base a 3 clases de tamaños (Tabla 7). Partículas más grandes se toman como fragmentos de roca. La textura se correlaciona con otras propiedades del suelo como la plasticidad, y permeabilidad del suelo.

Tabla 7. Clasificación de tamaño en los finos del suelo

Clase	Tamaño [mm]
Arena	0.05-2
Limo	0.002-0.05
Arcilla	<0.002

Existen diferentes tipos de textura, de acuerdo a la distribución de limo, arena y arcilla en el suelo. Por medio de un triángulo textural es posible distinguir las múltiples posibilidades de suelos. En los extremos se puede distinguir entre suelos arenosos y arcillosos (Tabla 8).

Tabla 8. Diferencias entre suelos arenosos y arcillosos

Suelo	Arenoso	Arcilloso
Comportamiento	Estable	Inestable, gran reactividad por alta superficie específica de arcillas
Tamaño poro	poros grandes	poros pequeños
Permeabilidad	facilidad en movimiento aire y drenaje de liquido	dificultad en flujo de aire y agua
Fuerzas dominantes	Fuerzas másicas	Fuerzas de superficie como fuerzas de Van der Waals y electrostáticas

Suelos con gradación uniforme es decir, con poca dispersión granulométrica, presentan una alta permeabilidad. Esto, debido a los espacios libres, pocos puntos de contacto entre las partículas y por ende una baja trabazón de las capas del suelo. En el caso contrario, cuando existe una buena gradación del suelo, el espacio entre partículas más grandes es ocupado por los más pequeños y la percolación de fluidos es menos probable así como una mejor trabazón del material.

b) Permeabilidad

Indica la facilidad del suelo para hacer pasar a través de sus espacio vacíos un fluido como agua. Depende fuertemente de la porosidad del suelo es decir, mientras más poros existan y mejor conectados estén, la permeabilidad es mayor. Asimismo , la estructura del suelo y el tamaño de partícula determinan la magnitud de este parámetro. La compactación influye en la permeabilidad ya que, reduce el tamaño de poros.

El grado de permeabilidad de un suelo se expresa a través del coeficiente de permeabilidad (k) medido en cm/s. Permite determinar la cantidad de agua que percola en un tiempo dado, bajo el cuerpo de agua a través del volumen de suelo.

c) Densidades

La **densidad real** representa la masa por unidad de volumen de los sólidos del suelo y es igual a la densidad de las partículas de este. Los valores típicos de densidad real del suelo se encuentran entre 2,6 y 2,7 g/cm³. La densidad de la sección superficial del suelo suele ser muy inferior a la encontrada a mayor profundidad debido a la presencia de material orgánico.

El peso del material sólido del suelo, por unidad de volumen, incluidos los espacios intersticiales o poros, es lo que se conoce como **densidad aparente**. Su valor se determina secando previamente la muestra de suelo. En general, los valores se encuentran entre 0,4 y 2 g/cm³. A través de esta propiedad se pueden anticipar aspectos como el grado de formación de arcilla, movimiento de humedad y contenido orgánico del suelo.

d) Plasticidad

Describe el efecto de la humedad en la deformación y consistencia del suelo. Se enfoca en las partículas de granulometría fina ya que, los suelos granulares se ven menos afectados por la humedad (debido a su alta capacidad de drenaje).

Los límites de Atterberg, Límite Líquido (LL) y Límite Plástico (LP), medidos por método de Casagrande, definen la plasticidad de un material. El primero como el contenido de humedad en el transe de sólido-plástico a líquido y el segundo de semi-sólido a sólido plástico. Finalmente, la diferencia entre estos valores se conoce como Índice de Plasticidad (IP) y es un parámetro referente del comportamiento de los finos en el suelo. Un valor entre 4 y 8 asegura la cohesión por finos y una baja probabilidad de generación de polvo (Thompson y Vissen, 2007). Las arcillas, son principalmente los minerales que aumentan la plasticidad de los suelos.

Finalmente se dispone de una tabla resumen, con las principales características de suelos de partículas gruesas y finas (Tabla 9).

Tabla 9. Características principales de suelo fino y grueso (Holtz y Kovacs, 1981)

Clase de partículas	Gruesos	Finos	
Tipo de Suelo	Arena	Limo	Arcilla
Granulometría [um]	425-75	<75	<2
Plasticidad	Granular, No plástico	No Plástico	Plástico
Efecto agua sobre comportamiento estructural	Bajo	Alto	Alto
Efecto Granulometría sobre comportamiento estructural	Alto	Bajo	Bajo

2.2.3 Constitución química del suelo

La mineralogía del suelo es información fundamental para conocer las condiciones del suelo y sus agregados en términos de área superficial específica, afinidad por el agua, estabilidad, entre otras propiedades.

La corteza terrestre presenta una gran variedad de elementos químicos y múltiples asociaciones de especies minerales. Sin embargo, dentro de los componentes más frecuentes se encuentra la Sílice (SiO_2) y otros minerales silicatos y aluminosilicatos como la Albita y Arcillas respectivamente.

En la composición elemental del material particulado se encuentran elementos livianos como Aluminio, Silicio, Potasio y Calcio y, elementos pesados como el fierro, titanio, zinc y vanadio.

Sílice. La Sílice o Dióxido de silicio se encuentra en la corteza terrestre en forma cristalina o amorfa. La forma cristalina representa la clase de sílice de mayor preocupación y el cuarzo es su forma más común. El sílice cristalino entra a los pulmones y puede causar silicosis originando cicatrices en el tejido pulmonar. Pulmones se endurecen y se dificulta la respiración. Síntomas van desde una simple tos, hasta la falta de aire y silbido del pecho. En condiciones más avanzadas se relaciona con otros problemas del pulmón como lo son fibrosis, enfisema, tuberculosis y cáncer al pulmón. No se disponen tratamientos eficaces y la única medida es el control preventivo acompañado de un diagnóstico precoz. Los silicatos representan el 40% o más del material del suelo (Dixon y Schulz, 2002).

Arcillas. Son una especie abundante en la corteza terrestre. Representan estructuras de capas (octaédricas y tetraédricas) con sustitución de Silicio por Aluminio, de modo que se les conoce como Aluminosilicatos y dan origen a especies como las micas, cloritas y las esmectitas. Con tamaños inferiores a $2 \mu\text{m}$, en términos geotécnicos reducen la permeabilidad del suelo, aumentan la plasticidad y bajan la resistencia. Para el caso de las arcillas expansivas, conducen al hinchamiento cuando se re-hidratán.

2.2.4 Cohesión en el suelo

La cohesión es resultado de fuerzas atractivas y repulsivas entre las partículas del suelo, con impacto directo en la estructura del suelo y su deformación. Entran en juego las fuerzas de Van der Waals de carácter intermolecular, las fuerzas capilares y las fuerzas electrostáticas definida por la carga de las partículas (Castellano, 2005). Su magnitud es elevada entre partículas de arcilla, mientras mínima en el resto de los tamaños. Muchos supresores de polvo aplicados en el suelo se sustentan en aglomerar y aumentar así, la cohesión del suelo (Tannant y Regensburg, 2001).

Otra propiedad importante es la fricción interna, definida como la resistencia al deslizamiento interpartícula. La grava y arena aumentan el efecto de esta propiedad en el suelo. El suelo

estructuralmente esta conformado por agregados de partículas y su estabilidad está fuertemente relacionada con las propiedades de cohesión y fricción interna. Combinadas representan la resistencia al corte del suelo y la capacidad de soporte de este. En definitiva, suelos principalmente de grava y arena, con pequeñas cantidades de arcilla son los más estables es decir, con mayor capacidad de soporte. Los componentes mayoritarios proveen de una alta fricción interna mientras, las arcillas llenan los espacios vacíos y otorgan cohesión.

La ruptura de los agregados del suelo da origen a la pérdida de fino desde el suelo. Material particulado se origina cuando estas partículas finas quedan libres y fuerzas mecánicas promueven su dispersión.

2.2.5 Caminos Mineros

El camino minero es visto como un activo debido a su relación directa con la productividad. Los costos relacionados con esta área de las faenas mineras pueden llegar a representar el 50% de los costos totales de operación (Thompson, 2010). Un camino en mejores condiciones posibilita un ciclo de carga-descarga de menor tiempo y por ende un menor costo por tonelada transportada. Entre otras ventajas encontradas sobre caminos mineros en mejor estado, calidad y resistencia al deterioro se tienen:

- Menos emisiones de material fino. Consecuentemente un menor desgaste del camino o deterioro de la carpeta. Se alarga vida útil del camino y se requieren menos recursos en mantención de la carpeta de rodado.
- Menor polución permite mayor visibilidad de los conductores, condiciones más seguras de conducción y ambientalmente más amigable.
- Mayor regularidad del camino ofrece menor resistencia a la rodadura. Luego, se tiene un menor consumo de combustible, menor desgaste del tren de potencia, los neumáticos, llantas y la suspensión de los camiones y vehículos que utilizan el camino.

a) Diseño de un Camino Minero

En base a los requerimientos del tipo de camión (modelo y carga) así como del largo de la vida del camino se hace el diseño. Las tres etapas fundamentales, en orden cronológico de la construcción son el diseño geométrico, estructural y funcional (Tabla 10). Luego, se continua con el diseño de la mantención del camino y un modelo de emisión de polvo, para hacer una integración completa sobre el funcionamiento en torno a un camino minero (Thompson y Visser, 2007).

Tabla 10. Fases de diseño de Camino Minero (Thompson y Vissen, 1999)

Diseño	Descripción
Geométrico	Punto de partida del diseño de un camino. Se diseña en base al tipo de camión y sus dimensiones. Contempla el trazado horizontal (radios de curva) y vertical (pendientes, caída transversal, súper-elevación, etc). Se define así la distancia de detención y visibilidad, separación de pistas y ancho del camino.
Estructural	Se refiere a los materiales y espesores de las estructuras para soportar las cargas de tránsito y resistir a la erosión (características de materiales de construcción y materiales in-situ, criterios de deformación). Se define a partir de la vida del camino y el volumen de tráfico de camiones.
Funcional	Diseño de la carpeta de rodado, en contacto con el tránsito de camiones mineros. Resguarda los requerimientos de seguridad como las condiciones de frenado bajo cualquier condición medioambiental. Las tareas principales son selección de materiales y mezclado (“blending”). Directa relación con los niveles de emisión de polvo.

b) Construcción de Caminos Mineros

Los caminos mineros, usualmente sin pavimentar se construyen en 4 capas, con una función distinta. Desde la superficie hacia abajo se tiene la carpeta de rodado, la base, la sub-base y la capa subrasante, como se muestra en la Figura 1 para un camino hecho para vehículos de hasta 320t. La descripción de capas de un camino minero se muestra en detalle en la Tabla 11 (Tannant y Regensburg, 2001). El espesor de cada capa se determina a través del método “California Bearing Ratio” (CBR) o mediante el módulo de resiliencia.

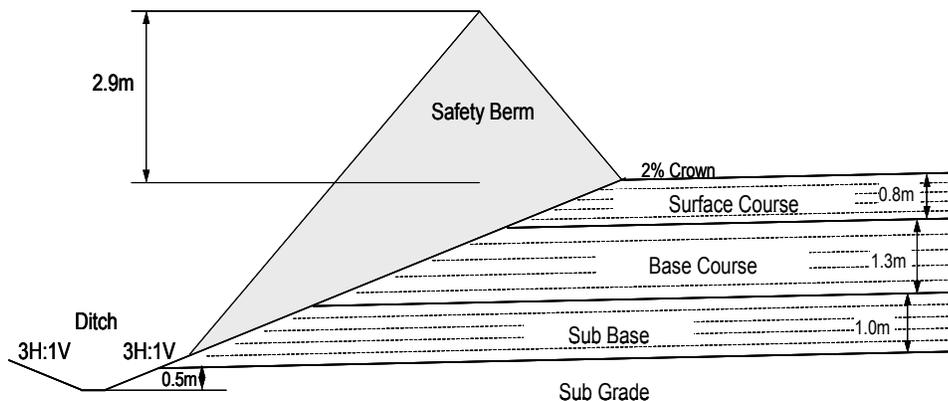


Figura 1. Área transversal típica de camino minero con tránsito de hasta 320t (Tannant y Regensburg, 2001)

Tabla 11. Descripción de capas de un camino minero (Tannant y Regensburg, 2001)

Capa	Descripción
Carpeta de rodado	Capa en contacto directo con las ruedas de los vehículos y sobre la Base. Para esta capa se buscan materiales con alta adhesión, baja resistencia a la rodadura y mínima penetración bajo carga.
Base	Justo debajo de la carpeta de rodado. Es el pilar estructural del camino. Se emplean materiales granulares estabilizados con aglomerantes.
Sub-base	Provee de capacidad de soporte adicional al camino, para distribuir la carga. Hace de barrera con el subrasante para evitar la infiltración de agua y mezcla con material de peor calidad. Se construye del mismo material a la Base.
Subrasante	Representa la capa más profunda. Se constituye de material del suelo original.

Para la construcción de cada capa del camino, se comienza por reconocer la topografía y las condiciones geomecánicas del lugar donde estará emplazado. Por esta razón, se realizan calicatas del sitio y se define el tipo de horizonte.

Usualmente se emplean materiales propios de la mina para construcción, entre los cuales los más habituales son grava natural, piedra picada y tierra estabilizada (Kauffman y Ault, 2001).

Posteriormente, mediante excavaciones y relleno se realizan las adaptaciones del lugar, de modo de nivelar el camino y homogeneizarlo. En el primer caso, se retira material en exceso y/o aquel de mala calidad para rebajar la cota del suelo (cuando el material se retira tan solo superficialmente, se conoce como escarpado) o acondicionado (si es el segundo caso).

Por otro lado, mediante los rellenos se añade material para lograr cierta cota en el diseño del camino, el cual puede provenir de las excavaciones en otros puntos del camino. Sin embargo, el material del camino debe cumplir con ciertas especificaciones como poseer un CBR mayor o igual a 10% para 95% DMCS (densidad máxima compactada del material). Más aún, se aumenta su capacidad de soporte a través de la compactación del suelo y empleando estabilizadores químicos (como Bischofita).

b.1) Materiales para Caminos Mineros

En faenas mineras se aprovecha el material estéril para los rellenos de los caminos. No se utilizan materiales de fuera de la mina debido al costo de traerlos. La grava natural, piedra chancada y tierra son las alternativas que se mencionan (Tannant y Regensburg, 2001).

Bandas granulométricas. El manual de Carreteras entrega la banda granulométrica de acuerdo al tipo de capa, en el caso de caminos rurales (Tabla 12). Sin embargo, es una fuente de vialidad, no para caminos mineros.

Tabla 12. Bandas granulométricas para subbase, base y carpeta (MOP, 2015)

Tamiz [mm]	TM ² -50a	TM-50b	TM-50c	TM-40a	TM-40b	TM-40c	TM-25
50	100	100	100				
40	-	70-100	-	100	100	100	
25	55-100	55-85	70-100	70-100	80-100	80-100	100
20	-	45-75	60-90	50-80	-	-	70-100
10	30-75	35-65	40-75	25-50	50-80	50-80	50-80
5	20-65	25-55	30-60	10-30	35-65	35-65	35-65
2,5	-	-	-	5-15	-	-	-
2	10-50	15-45	15-45	-	25-50	25-50	25-50
0,5	5-30	5-25	10-30	0-5	10-30	15-30	10-30
0,08	0-20	0-10	0-15	0-3	5-15	5-20	0-15

b.2) Compactación del camino

La compactación se realiza para evitar el asentamiento irregular y descontrolado de la estructura del suelo cuando está expuesto a altas cargas, eliminando al máximo los espacios vacíos del suelo. Una mala compactación demanda mantenencias con mayor frecuencia y la reducción en la velocidad del tránsito. El agua contenida en el suelo actúa como un medio deslizante durante la compactación. De este modo, las partículas más pequeñas migran hacia los espacios vacíos durante la vibración. Con el contenido de humedad óptimo (OMC, sigla en inglés) el suelo es compactado a su máxima densidad, definido por el ensayo Proctor.

El proceso se realiza por capas de hasta 0,3 m de material suelto y por ende, en varias pasadas, usualmente 6 (hasta que suelo no comprime más). Se compacta hasta el 95% de la DMCS. Cuando son suelos granulares se emplean rodillos vibratorios (15 t) y para suelos cohesivos rodillos “Pata de cabra”. Una mala compactación en la construcción del camino es decir, en las capas más bajas, no puede ser mejorada en la mantención del camino.

Para conocer el grado de compactación del suelo, se toman muestras de suelo compactado del terreno y se determina su densidad seca. Luego, se compara con valor de laboratorio de DMCS. Sacando la razón entre ambos valores se tiene la compactación.

² TM: Tamaño máximo para granulometría de banda, en mm.

Ensayo Proctor. Se emplea para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo compactado. El ensayo se realiza compactando una muestra cilíndrica normalizada con un pistón (de 4,5 kg) que, se hace caer desde una altura definida (de 460 mm). El procedimiento se hace por capas y se compacta en varios golpes (usualmente 25). Como resultado se entrega una curva de densidad versus humedad.

California Bearing Ratio (CBR). Es un parámetro para inferir la resistencia a la deformación de un material. Se determina a través de un test de penetración sobre una muestra húmeda de material conocido como Ensayo CBR. El CBR en conjunto a la carga aplicada por una rueda entrega una estimación práctica del espesor deseado para evitar la deformación de una capa del suelo. Visto de otro modo, el CBR se utiliza para establecer el espesor de una capa de acuerdo al material y al tipo de tránsito.

c) Ruedas de Camiones Mineros

Los caminos se diseñan para reducir al mínimo la deformación del suelo producto del tránsito de camiones de alto tonelaje. Sin embargo, desde la perspectiva de los camiones es fundamental lo que ocurre con las ruedas y su interacción con el suelo. La zona de contacto entre una rueda y la superficie se conoce como banda de contacto y es responsable de la transmisión de esfuerzos (normales y tangenciales) al suelo. Una ilustración de la banda de contacto (zona rectangular con bordes naranjas) se presenta en la Figura 2 (Thecontactpatch, 2015).

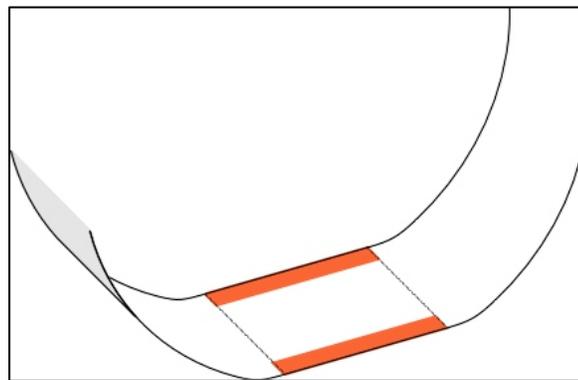


Figura 2. Ilustración de la banda de contacto de una rueda (Thecontactpatch, 2015)

c.1) Distribución del peso entre las ruedas de un camión

El peso del camión transmitido por las ruedas al suelo no es equitativo entre el eje delantero y trasero. En el caso de un camión minero modelo Komatsu 930 E la distribución del peso se indica en la Tabla 13.

Tabla 13. Distribución del peso de un camión minero entre sus ruedas (Komatsu, 2009).

Eje	Condición	Distribución del peso [%]
Delantero	Vacío	48,5
Trasero	Vacío	51,5
Delantero	Cargado	32,8
Trasero	Cargado	67,2

c.2) Penetración de rueda de camión minero

En la interacción rueda-suelo ocurren dos fenómenos complementarios producto de la transmisión de esfuerzos. Uno es la deflexión de la rueda y el otro es su hundimiento (penetración) en el camino. El segundo fenómeno es fundamental en el estudio de la disgregación de material y suspensión de polvo. A partir del parámetro de resistencia a rodadura (RR) o el coeficiente de compresión volumétrica (m_v) se pueden hacer estimaciones de la penetración.

Coefficiente de compresión volumétrica (m_v). El grado de deformación o cambio de volumen se puede estimar por medio de m_v (expresado en kpa^{-1}), para cada tipo de suelo. Su magnitud relaciona el cambio de volumen percibido por el suelo, para un volumen de control dado de acuerdo al esfuerzo aplicado.

En el caso del tránsito de camiones, la carga de las ruedas en la superficie implica una penetración (Δh) sobre la extensión (espesor) de la carpeta de rodado (h), planteando una relación esfuerzo-deformación en base al parámetro m_v como se indica en la Ecuación 1.

$$\Delta h [cm] = m_v [kpa^{-1}] \cdot \Delta \sigma [kpa] \cdot h [cm] \quad [1]$$

Resistencia a Rodadura (RR). Representa la combinación de fuerzas que un vehículo debe vencer para moverse por una superficie dada. Es producto del hundimiento y deformación de la rueda en el suelo. Se expresa en términos porcentuales como un equivalente a la fracción de la fuerza peso del vehículo. Presenta valores típicos de acuerdo al tipo de superficie. En condiciones ideales para un camino bien mantenido equivale al 2% del peso del vehículo. En términos de la operatividad de un camino, este parámetro indica que aumentar en 5% RR, se reduce la producción en 10% y aumentan 35% los costos (Holman, 2006).

d) Tasas emisión de material particulado: caminos mineros

Para caminos sin pavimentar, las emisiones de material particulado total (TPM), MP10 y MP2.5 se pueden estimar a partir de un factor de emisión (EF) mediante la Ecuación 2 (US-EPA, 2006). Los inputs necesarios para determinar EF son el contenido de limo en la superficie (s) en %, el peso del vehículo (w) en t, los días del año con precipitaciones > 0,25 mm (P) y la eficiencia del programa de supresión del polvo (C) en %.

$$EF = k \cdot \left(\frac{s}{12}\right)^a \left(\frac{w}{2.72}\right)^b \left(\frac{365-P}{365}\right) \left(\frac{100-C}{100}\right) \left[\frac{Kg}{Km}\right] \quad [2]$$

Las constantes k, a y b son diferentes para los casos MP2.5, MP10 y material particulado total (TPM). En el caso de material particulado MP10 se recogen las constantes de la US-EPA (Tabla 14).

Tabla 14. Constantes de factor de emisión de la USEPA para caminos mineros

Constante	Valor
a	0.9
b	0.45
k	0.42

Los parámetros “s” y “P” tienen un valor por defecto cuando no se tiene información al respecto y se indican en la Tabla 15.

Tabla 15. Valor por defecto para parámetros "s" y "P" en relación EF

Parámetro	Valor por defecto
s	8,3%
P	105

e) **Mantenimiento de caminos mineros**

Posterior a la fase constructiva, se da inicio a la operatividad de los caminos. Aquí, los caminos se encuentran expuestos al tráfico constante de vehículos de alto tonelaje y se establece un sistema de mantenimiento para su correcta funcionalidad. Los caminos durante la fase operacional pueden alcanzar el 50% de los costos (Thompson y Visser, 2003).

El sub-dimensionamiento y por ende, la reducción de gastos durante el diseño y construcción de los caminos puede ser una de las razones de falla prematura y mantenimiento excesiva. El uso de camiones con tonelajes mayores a los permitidos en el diseño es otro problema que se ve en el tiempo, cuando el sistema de producción de la mina lo requiere. Por ende, es fundamental la mantenimiento durante la vida útil de un camino.

Entre las actividades de mantenimiento se encuentran:

- Reparar baches y pequeñas depresiones del camino, para reducir rugosidad.
- Mejorar condiciones de drenaje.
- Redistribuir material granular del camino.

- Controlar pérdida como polvo.
- Restaurar espesor de carpeta de rodado.

Por último, es necesario indicar que el modelo de mantención implementado busca tener los costos de operación de vehículo y costos de mantención en su mínimo.

2.2.6 Balance Fuerza para una partícula del suelo

Para suspender una partícula de la superficie y hacerla aerotransportable es necesaria una fuerza de arrastre aerodinámico capaz de vencer la fuerza gravitacional y las fuerzas cohesivas interpartícula presentes en el suelo (Liu et al, 2002). En particular, debido al tránsito de vehículos en caminos no-pavimentados la generación de polvo puede explicarse usando dos factores: la acción mecánica del vehículo y la velocidad del viento o turbulencia en la región cercana (Nicholson et al, 1989).

Cuando un vehículo viaja a través de un camino sin pavimento, las fuerzas asociadas al movimiento aplastan y disgregan. Luego, muchos de los agregados y partículas se destruyen, reducen su tamaño y presentan mayor facilidad para aerotransportarse. El deslizamiento y fricción entre las ruedas y el camino, origina esfuerzos de corte en la interfaz que promueve la suspensión de la fracción más fina de material superficial. Finalmente las partículas salen eyectadas como resultado de una fuerza centrífuga generada por la rueda (Tong et al, 2011). La velocidad del vehículo contribuye a la velocidad que adquieren las partículas cuando salen eyectadas del suelo (Chen et al, 1999). Una forma ilustrativa de explicar el fenómeno se encuentra en la Figura 3.

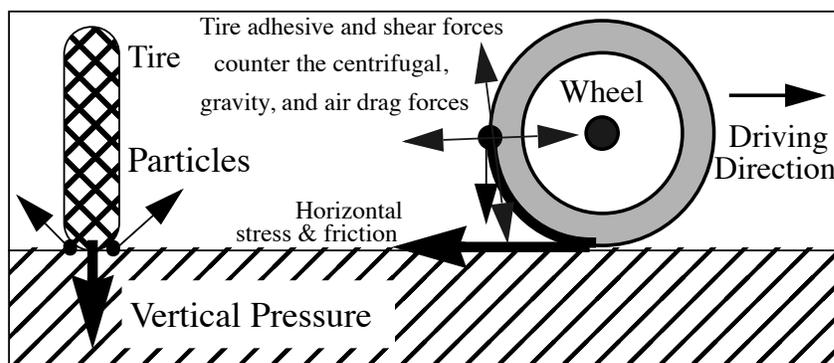


Figura 3. Partículas generadas alrededor de rueda (Chen et al, 1999).

2.2.7 Contribución del fluido: Aire

Para los caminos mineros, las emisiones de particulado ocurren bajo la interacción del aire con las partículas (transporte eólico) en combinación con el movimiento de las ruedas de los

camiones (acción mecánica). Sin la existencia de fluido no ocurre la dispersión de material particulado fuera de los dominios de una rueda y, es la turbulencia justo detrás y a los costados de los camiones la principal impulsora de material particulado (Nicholson et al, 1989; Chen et al, 1999).

El transporte de las partículas del suelo producto del viento puede estar bajo distintos regímenes, en función del tamaño de partícula y la velocidad del viento (Figura 4)(Nickling y McKenna,2009; Kok et al, 2012). En el caso de partículas mas pequeñas ($<20 \mu\text{m}$) las fuerzas interpartícula son superiores a las aerodinámicas. Por esta razón deben aparecer partículas saltantes capaz de suspender a las más pequeñas (Kok et al, 2012) o la disgregación por cargas externas como las de un camión (Nicholson et al, 1989) para la dispersión del material fino. Cuando partículas finas ya se encuentran suspendidas, quedan expuestas a fluctuaciones turbulentas del aire.

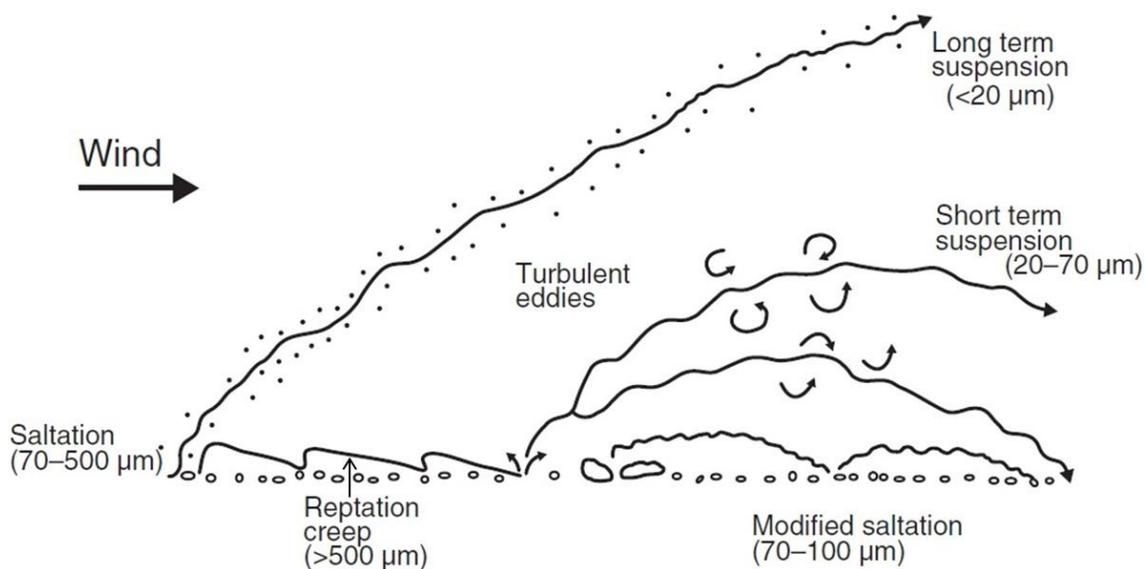


Figura 4. Esquema de los diferentes modos de transporte de partículas del suelo por causa del viento (Nickling y McKenna,2009).

Los componentes del viento que intervienen en la generación de material particulado:

Perfil de velocidades del viento. Las partículas suspendidas desde el suelo son dispersadas y transportadas por el aire de acuerdo a la velocidad del viento cuando las atrapa. El perfil de velocidades del viento $U(z)$ se puede describir como una función logarítmica de la altura de la partícula [Marticorena y Bergametti, 1995] tal que, a mayor distancia de la superficie o pared, mayor velocidad de la capa de aire.

Turbulencia. Al paso de un camión, torbellinos son generados atrás y a los costados de las ruedas. La disgregación de material iniciada por el tráfico de vehículos puede continuarse por el fenómeno de turbulencia. Se considera como una fuente potencial de material particulado, adicional al efecto de las ruedas en la superficie bajo el cual ocurre principalmente la pulverización de material [Piras et al, 2014]. La turbulencia originada detrás del movimiento de un vehículo, producto de la velocidad y forma de este, se conoce como “Vehicle Induced Turbulence” (VIT). Existe una relación proporcional entre el cuadrado de la velocidad de un vehículo y la energía cinética turbulenta (TKE) [Rao et al, 2002].

2.3 Método de Elementos discretos

La emisión de material particulado en caminos mineros es un problema que puede ser abordado a escala mesoscópica. La respuesta de los suelos frente a diferentes cargas se comporta como un flujo de material granular donde las colisiones entre partículas y los desplazamientos relativos entre estas juegan un rol principal. De esta forma, el método de elementos discretos (DEM) es una buena alternativa para estudiar el problema en forma numérica. Particularmente en este trabajo se utiliza el software RockyDEM®.

El software determina el valor de las fuerzas generadas en un sistema granular a partir de la magnitud del solapamiento entre partículas y las leyes de contacto (resortes, amortiguadores, fricción coulombica y fuerzas de interacción). Algunos de los problemas abordados usando DEM han sido procesos tales como mezclado, segregación, separación, almacenaje y transporte de flujos de partículas (Luding, 2007; Cleary, 2000 ; Smith, 2014; O’Sullivan, 2011).

En DEM el medio granular se define como una colección de elementos discretos caracterizados por un tamaño, forma, posición, velocidad y orientación. Se calculan sobre cada partícula las ecuaciones de movimiento e interacción con vecinas. De lo anterior, el número de partículas definidas para realizar las simulaciones tiene un impacto directo sobre la carga de cálculo y el tiempo del mismo. Adicionalmente, las simulaciones que utilizan DEM requieren de buenas referencias relacionadas con las propiedades y parámetros que utiliza (Smith, 2014). Existen pruebas de calibración que incluyen tests de presión-hundimiento, ensayo de compresión en confinamiento, ensayo de corte directo, ángulo de reposo, compresión triaxial, entre otros.

DEM puede emplear dos clases de modelos: Soft Particle Model (SP) y Hard Particle Model (HP) (O’Sullivan, 2011). RockyDEM® utiliza el primero. Aquí las colisiones son el fenómeno de interés y se permiten traslapes entre las partículas al impactar entre ellas. Los elementos poseen una rigidez finita y pueden traslaparse con otros cuerpos debido al carácter elástico de los choques entre partículas lo que tiene como consecuencia la generación de una fuerza normal. Las fuerzas de corte se determinan a partir de los desplazamientos relativos al punto de contacto (en dirección normal al plano normal entre partículas).

Cálculo del traslape (δ): deformación mediante la constante de rigidez (K). La constante de rigidez de un material durante la fase de carga (k_{npl}) se calcula en base al módulo de deformación elástico (E_p), tamaño de partícula (L) y coeficiente de restitución (ϵ) como se indica en la Ecuación 3 (Chang et al, 1995).

$$K_{npl} = E_p \cdot L \quad [3]$$

En la Ecuación 4 se muestra como se calcula la constante de rigidez durante la descarga (k_{npu}) empleando el coeficiente de restitución (ϵ).

$$K_{npu} = \frac{K_{npl}}{\epsilon^2} \quad [4]$$

El valor del coeficiente de restitución tiene un valor entre cero y uno y, representa la energía disipada durante la colisión entre las partículas.

A continuación, se explicitan los modelos de contacto implementados en RockyDEM®. Sin embargo, toda la información complementaria del uso del programa puede encontrarse en el Manual “Rocky user manual 2.30” (RockyDEM®, 2013).

a) Modelo de fuerza normal: “Resorte histerético lineal”

Este modelo de resorte lineal histerético, asume deformaciones plásticas en los puntos de contacto y describe la disipación plástica de energía durante el contacto por medio de la histéresis de un resorte (Walton y Braun, 1986; Luding ,2008). Aquí, la fuerza de contacto es continua y siempre es de carácter repulsivo.

La fuerza normal en un tiempo dado (F_n^t) se calcula utilizando Ecuación 5. Los parámetros utilizados son la fuerza normal en el tiempo de cálculo previo (F_n^{t-dt}), el cambio en el traslape de contacto normal en el paso de tiempo actual (dS_n), el traslape normal en el paso de tiempo pasado y actual respectivamente (s_n^t y s_n^{t-dt}) y las constantes de rigidez para fase de carga y descarga en dirección normal (K_{nl}, K_{nu}).

$$\begin{aligned} F_n^t &= \min(F_n^{t-dt} + K_{nu} \cdot dS_n, K_{nl} \cdot S_n) && \text{si } dS_n \geq 0 \\ F_n^t &= \max(F_n^{t-dt} + K_{nu} \cdot dS_n, 0,001 \cdot K_{nl} \cdot S_n) && \text{si } dS_n < 0 \\ dS_n &= s_n^t - s_n^{t-dt} \end{aligned} \quad [5]$$

b) Modelo de fuerza tangencial: Elástico lineal de fricción

RockyDEM® emplea un modelo elástico lineal basado en la teoría de fricción coulombica de los materiales. El deslizamiento sucede cuando la fuerza tangencial sobrepasa el valor de fuerza de roce $\mu \cdot F_n^t$. Dicha fuerza de roce requiere para su definición de un coeficiente en condiciones estáticas (μ_s) y otro en condiciones dinámicas (μ_d).

El coeficiente de fricción define la razón máxima entre fuerza tangencial y normal antes y después de ocurrir el deslizamiento. Valores típicos del coeficiente de fricción oscilan entre 0,4 y 0,9 en RockyDEM® (RockyDEM®, 2013).

Finalmente, el modelo se implementa con el algoritmo indicado en Ecuación 6. Aquí participan la fuerza de contacto tangencial en el paso de tiempo actual (F_t^t), la fuerza de contacto tangencial en el paso de tiempo previo (F_t^{t-dt}), el desplazamiento tangencial relativo entre partículas en el paso de tiempo actual (ds_t) y el coeficiente de fricción (μ) que, será estático o dinámico, si partículas están en movimiento o no.

$$F_t^t = \min(F_t^{t-dt} + k_{nl} \cdot ds_t, \mu \cdot F_n^t) \quad [6]$$

c) Modelo de Adhesión

Las fuerzas adhesivas tales como puentes líquidos entre partículas pueden incorporarse dentro de las simulaciones por medio de un modelo constante o lineal de adhesión. También puede implementarse un modelo de adhesión para caracterizar la fuerza interna de un material.

De los modelos de adhesión incluidos en RockyDEM®, el *modelo constante* se utiliza principalmente para fenómenos donde no hay efectos de consolidación de partículas importantes. En este caso, la fuerza de adhesión (F_{Adh}) se calcula en base a la masa de la partícula (m_p), la aceleración de gravedad (g), distancia de adhesión (S_{Adh}) y el parámetro de adhesión (f_{Adh}), como se indica en la Ecuación 7.

$$\begin{aligned} F_{Adh} &= f_{Adh} m_p g \quad \text{si } -S_n < S_{Adh} \\ F_{Adh} &= f_{Adh} \quad \text{si } -S_n \geq S_{Adh} \end{aligned} \quad [7]$$

d) Modelo de “Rolling Resistance”

En muchos casos, las partículas presentan diferentes grados de no-esfericidad. Esta cualidad tiene un impacto en el movimiento entre las partículas, haciendo posible su entrelazamiento y dificultando su capacidad de rotar.

RockyDEM® emplea principalmente partículas esféricas debido al alto costo computacional de simular partículas con formas más complejas. Por esta razón, los modelos de fuerzas de contacto insertan el parámetro de nombre “*rolling resistance*”³ para corregir los efectos de no esfericidad en la rotación de las partículas. Mediante este parámetro se aplica un torque que se opone a la rotación relativa entre las partículas. RockyDEM® puede emplear dos modelos (Ai et al, 2011) : tipo A o tipo C.

- En el modelo tipo A se calcula un torque constante sobre la fricción de rodadura entre pares de partículas.
- En el modelo tipo C, el torque total se calcula como la suma del torque generado mecánicamente por un resorte (M_r^k) y el torque viscoso definido con un amortiguador (M_r^d).

e) Paso de tiempo en RockyDEM®

Por último, los modelos anteriores requieren de un paso de tiempo (dt) para calcular las fuerzas y traslapes entre las partículas del medio granular. El tiempo está descrito en función de la constante de rigidez durante la carga (K_{nl}) y la descarga (K_{nu}), así como del tamaño de las partículas mediante la masa de estas (m_p) como se indica en Ecuación 8. El parámetro n_l representa el número de pasos de tiempo por ciclo.

$$dt = \min \left(\left(\frac{\pi}{2n_l} \right) \cdot \min \left(\sqrt{\left(\frac{m_p}{K_{n\Box}} \right)} \right), (\pi/8) \cdot \min \left(\sqrt{\frac{m_p}{K_{nu}}} \right) \right) \quad [8]$$

2.4 Conclusiones Antecedentes

En la actividad minera y particularmente, en las faenas chilenas no se encuentra información abierta sobre los niveles de emisión de material particulado desde cada uno de los equipos y fuentes. Gran parte de las estimaciones están realizadas en base a registros de la USEPA y fuera del territorio nacional. Por ende, es necesario levantar información sobre casos de estudio de material particulado en la actividad minera chilena.

Por otro lado, los caminos mineros son destacados como una fuente predominante de material particulado en las faenas. Pueden afectar mas allá de lo local, producto de la generación de una pluma (referido a Tabla 2). En adición, los caminos tienen directa relación con la productividad de la mina, debido a su participación en el ciclo de carga-descarga de mineral. Luego, el deterioro

³ “rolling resistance” tiene un sentido numérico y no se puede medir.

de los caminos por pérdida de finos en forma de polución puede tener grandes implicancias no solo como un problema ambiental, sino también en el desempeño de la mina. En este sentido, resulta necesario estudiar el problema de emisión de material particulado (MP10) desde los caminos mineros en lo que es origen, es decir, la construcción de los caminos y el fenómeno de interacción de una rueda con el suelo.

Con relación al abatimiento del polvo en los caminos mineros se destacan múltiples soluciones pero, la humectación con camiones aljibes resulta ser la más común. Se destaca una fuerte dependencia de este tipo de soluciones como parte de la mantención de los caminos. Sin embargo, representan una respuesta reactiva al problema de la emisión de material particulado con todos los costos que ello significa en equipamiento, recursos humanos y detenciones por trabajos. En consecuencia, sería una buena alternativa encontrar medidas o una estrategia de supresión de polvo de tipo preventivo.

En definitiva, se debe enfatizar que los caminos son un aspecto fundamental en las faenas mineras y pueden alcanzar hasta el 50% de los costos operacionales de la mina. Por ende, toda práctica en beneficio de un mejor desempeño tendrá impactos económicos positivos. Con un menor deterioro se puede tener ventajas como:

- Reducción de emisiones de material fino, por menor desgaste del camino o deterioro de la carpeta. Luego, se espera una mayor vida útil del camino y menos recursos son necesarios en mantención.
- Mayor visibilidad y por ende, seguridad de los conductores de camiones frente a un nivel de polución más controlado.
- Menor consumo de combustible y desgaste de neumáticos al lograr caminos más parejos, sin la desintegración de la superficie del camino. En otras palabras, una menor resistencia a la rodadura sobre los camiones, hace más fáciles sus trayectos.

Capítulo 3: Metodología

Este trabajo tiene cuatro etapas (Figura 5): (i) Análisis de fuentes de emisión de polvo en faenas mineras, (ii) Entrevistas a personas de empresas e instituciones relacionadas con la construcción de caminos mineros, (iii) Desarrollo de una estrategia para el estudio de caminos mineros: interacción rueda-suelo y (iv) Diseño de un programa de supresión de polvo. A su vez, la etapa (iii) se subdivide en 2 secciones: (i) Modelo matemático y (ii) Simulaciones DEM. La etapa (iv) se subdivide en (i) Experimentos de laboratorio y (ii) Diseño conceptual.

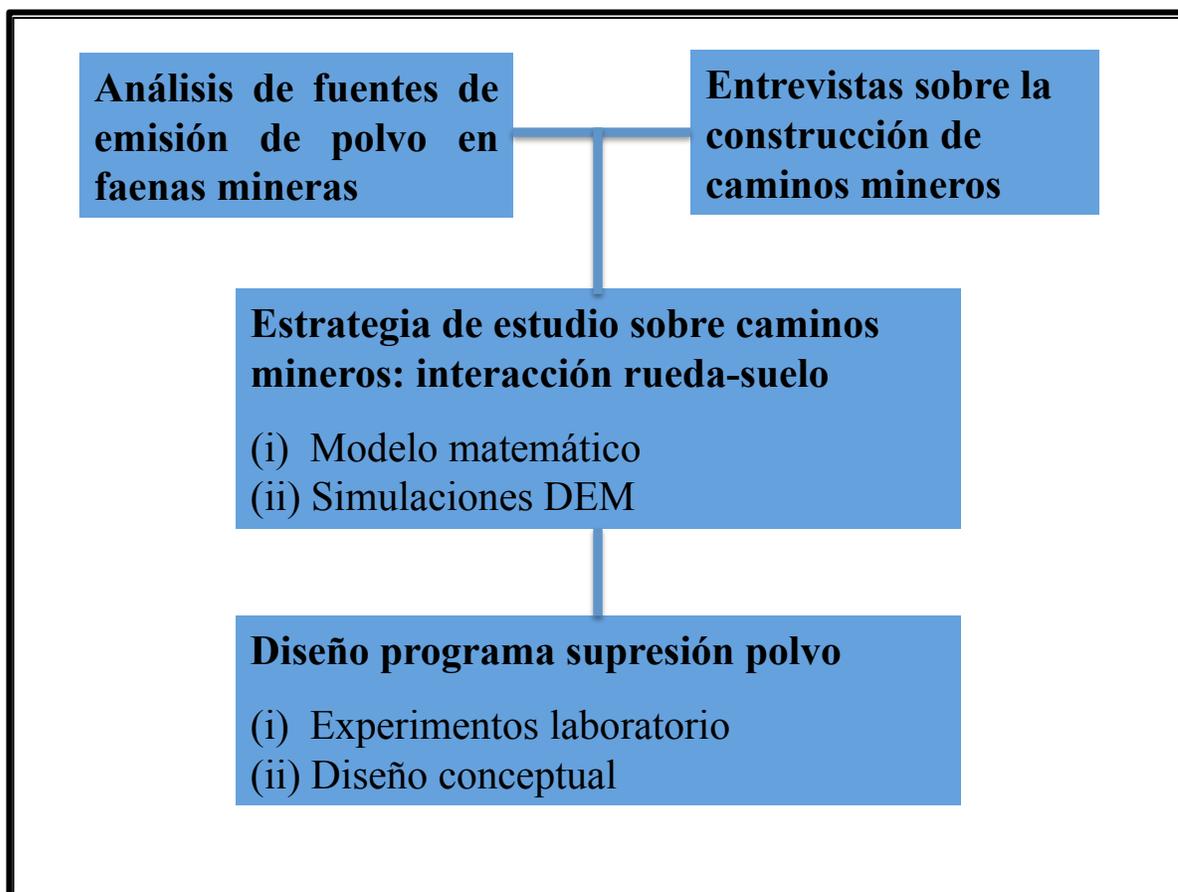


Figura 5. Metodología general del trabajo

3.1 Análisis de fuentes de emisión de polvo en faenas mineras

3.1.1 Emisiones de MP10: faenas mineras chilenas

A partir de la información pública dispuesta por el SEA, se seleccionan 9 proyectos mineros chilenos con estudios de impacto en la calidad del aire. El análisis se hace sobre el documento respectivo presentado al SEA por cada minera referido a las emisiones de MP10 (Tabla 16).

Tabla 16. Faenas mineras chilenas y documentos respectivos acerca de emisiones de MP10

Faena Minera	Documento sobre fuentes de MP10
Mina Esperanza	Evaluación de impactos ambientales
Mina Los Colorados	Análisis de impacto en la calidad del aire
Mina Antucoya	Análisis de calidad del aire
Mina Sierra Gorda	Modelo de evaluación de impacto en la calidad del aire en la localidad de Sierra Gorda
Mina Zaldívar	Plan de gestión de emisiones
Mina Óxidos Encuentro	Estimación de emisiones y análisis de calidad del aire
Mina Franke	Estimación de emisiones atmosféricas
Mina Santo Domingo	Análisis de los efectos sobre la calidad del aire
Mina El Espino	Modelación de las emisiones atmosféricas

Las fuentes de emisión se agrupan en explotación de rajo, transporte de mineral, procesamiento mineral y erosión eólica para evaluar contribuciones a emisiones de polvo por actividad. La explotación incluye tronadura, perforación y la extracción de mineral. El transporte de mineral considera el transporte de material, insumos y personas y, queda representado por la re-suspensión⁴ de polvo proveniente de caminos mineros. Para la planta de procesamiento, la generación de polvo en suspensión está primordialmente asociada a la etapa de chancado primario aunque, en algunas faenas, se consideran también las etapas de chancado secundario-terciario y harneros. Por último, la erosión eólica considera emisiones de polvo producto de la acción del viento, desde botaderos, depósitos de relaves, acopio, pilas de lixiviación y correas. La carga y descarga de material en los distintos puntos de operación fue excluida del estudio, ya que algunos proyectos no entregan información precisa al respecto.

De la información sobre las emisiones de polvo desde las distintas fuentes en cada proyecto minero, se aborda la contribución a la contaminación durante su fase de operación. De esta fase,

⁴ Documentos sobre emisiones de MP10 en faenas se refieren a polvo re-suspendido ya que representa el material que se suspende del suelo no necesariamente por el camión que disgrega el material sino producto del tráfico ulterior (US-EPA, 2006).

se analizan las emisiones en el año de mayor actividad ya que todos los proyectos cuentan con dicha información (no se tiene información de emisiones en todo el plan minero).

El inventario de emisiones de material particulado entregado por los proyectos utiliza la metodología propuesta por la US-EPA (empleando la Ecuación 2 como un factor de emisión). Los valores entregados ya consideran las estrategias de supresión de polvo generado en distintos puntos de la faena. Particularmente, en los caminos mineros el control de polvo es resuelto vía humectación, uso de bischofita y el empleo de otras sales.

3.1.2 Mapa con fuentes de emisión de polvo: planta minera

Se recaban las emisiones de polvo de la planta de procesamiento de una faena minera particular, la planta de “El Soldado”. Esto, principalmente para tener información medida in situ sobre los puntos de emisión de la planta de una faena y como valores referenciales del tema de material particulado en procesamiento mineral. Las mediciones entregadas detallan los valores promedio de concentración de polvo en suspensión en mg/m^3 y su relación con el LPP para la fracción de polvo no clasificado y la fracción respirable de sílice. En resultados se presentan todos los sectores⁵ donde existe emisión de polvo y sus valores con respecto a la norma (D.S594/99), referidos al valor de LPP (los segmentos considerados son <10%, 10-50%, 50-100%, 100-500% y >500%). De esta forma analizar la relación de mediciones con la norma y discutir acerca de la utilidad de este tipo de procedimientos. De esta forma, terminar comparando los valores presentados de polvo no clasificado con los de sílice, para determinar si existe alguna correlación.

3.1.3 Caracterización del suelo: caso de estudio de camino minero

Un camino minero con tránsito de alto tonelaje y sin tratamientos de supresión de polvo (de la faena chilena “Los Pelambres”) es escogido para tener información referencial⁶ del material superficial de un camino minero. De esta forma, hacer un análisis crítico para definir cuales serían las condiciones del origen del material particulado MP10 procedente de un camino minero.

El procedimiento comienza tomando una muestra de 50g directamente del suelo, de un punto aleatorio del camino. La muestra es llevada a análisis mineralógico cuantitativo automatizado (QEMSCAM) para determinar (i) composición mineralógica de la superficie de un camino minero (principales especies y asociaciones minerales) y (ii) distribución granulométrica en la superficie de un camino minero. Se incluye un análisis conceptual sobre la teoría de conminución y la dureza para determinar las condiciones del suelo con propensión a generar MP10.

⁵ Emisiones referidas a sectores “Molino SAG” y “Molienda convencional” no representan a los equipos en sí, sino a las áreas de servicios donde estos se encuentran.

⁶ Se dice referencial ya que información levantada es sobre un camino en particular y sobre un solo punto de muestreo. Para ser representativo de caminos mineros chilenos, son necesarias más fuentes y mediciones.

3.2 Entrevistas sobre la construcción de caminos mineros

En un formato de entrevista se discuten aspectos técnicos y prácticos con personas ligadas a empresas e instituciones relacionadas con la construcción y mantenimiento de caminos mineros de alto tonelaje (de más de 100 t). Específicamente, las preguntas están orientadas a reconocer las prácticas industriales implementadas en la mantención y construcción de caminos. El detalle de las entrevistas se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17. Profesionales y temáticas de entrevistas sobre caminos mineros

Empresa	Profesional	Cargo	Temática
MOP	Esteban Espinoza	Ingeniero de vialidad	Manual de carreteras e ingeniería de caminos no pavimentados.
MOP	Rodrigo Lorca	Ingeniero de vialidad	Manual de carreteras e ingeniería de caminos no pavimentados.
IDIEM	Iván Bejarano	Jefe Laboratorio Geotecnia	Prácticas industriales en construcción y mantención de caminos mineros.
INCOLUR	Rodrigo Rivas	Consultor proyecto de Caminos	Prácticas industriales en construcción y mantención de caminos mineros.
Pascua Lama	Carlos Rojas	Supervisor Desarrollo de Caminos	Prácticas industriales en construcción y mantención de caminos mineros.
TSP	Felipe Halles	Ingeniero en Caminos Mineros	Prácticas industriales en construcción y mantención de caminos mineros.

Por el tipo de temática abordada en las entrevistas, el análisis de los testimonios se hace en dos partes: (a) entrevistas con el MOP: caminos no pavimentados y (b) Entrevistas con profesionales relacionados a la construcción de caminos mineros. De esta forma, sección (a) es empleada para evaluar la rigurosidad de las practicas industriales indicadas por los profesionales (b), que participan desde distintos ángulos en la construcción de caminos mineros.

3.3 Estudio sobre caminos mineros: interacción rueda-suelo

La estrategia para estudiar numéricamente el problema interacción rueda-suelo se implementa teniendo en cuenta (3.3.1) modelo matemático y luego, (3.3.2) estudios numéricos (simulaciones DEM de la rueda en fase de penetración y fase de arrastre). El modelo es necesario para abordar la dinámica entre las partículas de un volumen de control del suelo. La fase de penetración de las simulaciones se desarrolla para evaluar el hundimiento de la rueda en un sistema simplificado. Por último, con la fase de arrastre se estudia el desplazamiento de una rueda. En ambas fases de

simulaciones se varían los parámetros de carga, cohesión y velocidad, para ver si impacto en el problema en cuestión.

3.3.1 Modelo Matemático

A partir de la revisión bibliográfica se plantea un modelo matemático acerca de la cinemática existente para un punto de la rueda y el suelo. La banda de contacto de la rueda es tomada como referencia en el modelo y será implementados en los estudios numéricos.

Por otro lado, se describen las fuerzas que participan de la dinámica de interacción entre la rueda y las partículas del suelo para contextualizar el problema estudiado a través de simulaciones.

3.3.2 Simulaciones DEM

La generación de material particulado producto de la interacción rueda-suelo se evalúa haciendo simulaciones con el software RockyDEM®. El estudio se implementa sobre material granular monodisperso de $10\ \mu\text{m}$ (MP10). La granulometría MP10 representa el fino respirable procedente de un camino minero, problemático en las faenas mineras. Sobre este material se desarrollan dos casos de estudio: sin cohesión (suelo seco) y con efectos de cohesión (incrementada por la adición de un supresor de polvo). De esta forma, se evalúan la diferencias en la penetración de la rueda en el camino y la cantidad de material suspendido.

El elevado costo computacional del método DEM definido por la Ecuación 8 y la escala micrométrica de las partículas de interés (MP10) impide trabajar sobre cualquier dimensión del fenómeno rueda-suelo. Luego, todas las simulaciones se desarrollan sobre un zoom del contacto entre la rueda y la superficie es decir, una sección milimétrica de la banda de contacto.

Para evaluar el efecto de la velocidad en la suspensión de material se desarrollan simulaciones a distintas velocidades (entre 10 y 50 km/h, aumentando de cinco en cinco su magnitud). Asimismo, para estudiar los efectos de carga, se implementan los casos de 100, 200, 300 y 400 t como peso total de camión. Finalmente se estudia el efecto de la cohesión variando los parámetros de adhesión con cohesiones equivalentes a 10 (Adh10), 100 (Adh100) y 1000 (Adh1000) veces la fuerza peso de las partículas, utilizando la Ecuación 7.

Las simulaciones se implementan en dos fases distintas: (1) el hundimiento de la rueda en el suelo y (2) el arrastre de la rueda. En los casos donde se incorporan efectos de cohesión, se incluye una fase previa de acondicionamiento del material para adaptar los nuevos parámetros al sistema.

Con los estudios numéricos se obtiene información sobre la penetración de la rueda en un camino minero y el potencial de emisión de material particulado producto del tránsito de los camiones.

El sistema simplificado para representar el problema rueda-suelo consta de 4 etapas: (a) diseño de las geometrías del sistema rueda-suelo, (b) parámetros del sistema placa-cajón, (c)

implementación del modelo en RockyDEM® y (d) fases de simulación en el software RockyDEM®. A continuación se explica en detalle cada una de las etapas de trabajo.

a) Diseño de las geometrías del sistema rueda-suelo

(i) Dimensiones geometrías del sistema simplificado

Por conveniencia se utiliza programa de dibujo ANSYS SCDM, donde los archivos son guardados en formato *.stl.

Se estudia un sistema simplificado de la dinámica rueda-suelo mediante una geometría que consiste en una placa y un cajón (Figura 6).

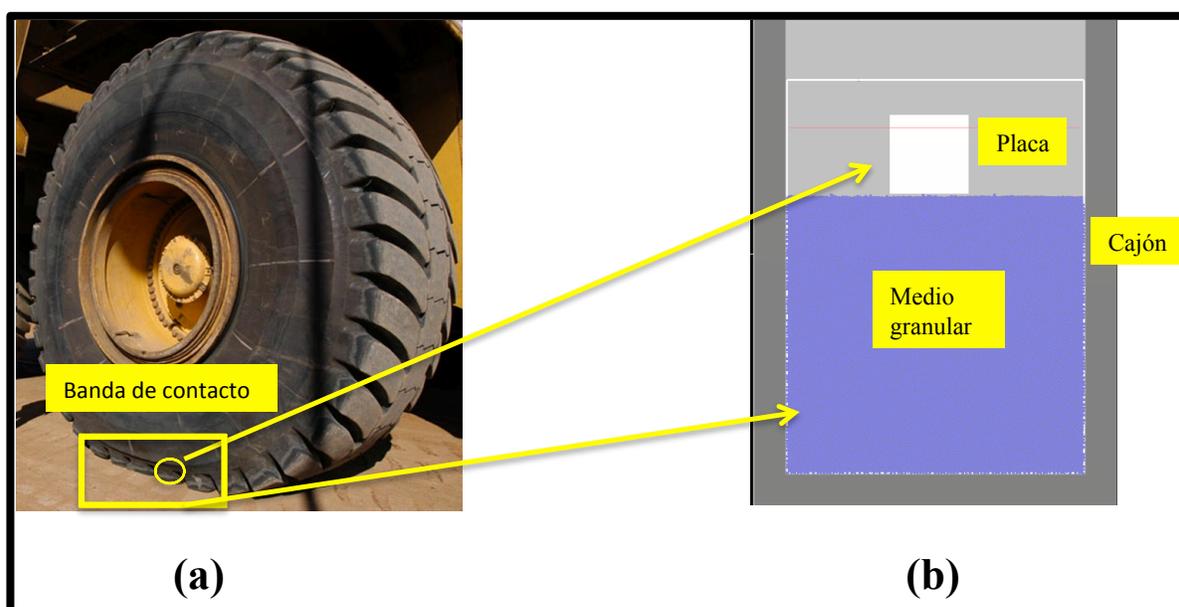


Figura 6. (a) Rueda de camión minero incluyendo definición de banda de contacto (Autopista.es, 2015) y (b) su abstracción en el sistema placa-cajón.

Las dimensiones de ambas geometrías y la razón entre ellas se presentan en las Tablas 18 y 19. La placa se diseña lo suficientemente grande como para tomar un número representativo de partículas de suelo y lo necesariamente pequeña para no tener un impacto más allá de los límites del sistema (paredes cajón).

Tabla 18. Dimensiones de cajón y placa para simulaciones

	Cajón (interior)	Cajón (exterior)	Placa
Largo [mm]	0,95	1,15	0,25
Ancho [mm]	0,2	0,4	0,05
Alto [mm]	1	1,6	0,25

Tabla 19. Razón entre cada dimensión del sistema y el diámetro de partícula

Dimensión geometría/partículas	Cajón	Placa
Largo	95	25
Ancho	20	5
Alto	100	25

En RockyDEM® se importan las piezas placa y cajón, mientras que las partículas son introducidas al sistema como una alimentación o inlet.

(ii) Espesor del medio granular y su compactación.

La Tabla 20 entrega los valores de espesor y compactación utilizados en las simulaciones. La profundidad de la cama de partículas (volumen de control) representa el espesor de la carpeta de rodado (h_{real}) de un camino minero. Los cálculos de estos parámetros se encuentran en detalle en el Anexo 4. Estos valores son fundamentales para determinar la penetración tanto en el sistema como a escala real, como se verá más abajo.

Tabla 20. Compactación y espesores utilizados en análisis de las simulaciones

Parámetro	Notación	Valor
Espesor sistema [cm]	$h_{sistema}$	0,75
Espesor carpeta [cm]	h_{real}	50
Compactación ajustada ⁷	-	68%

b) Parámetros del sistema placa-cajón

(i) Parámetros de la placa

La placa posee las propiedades del material de caucho para representar al neumático (Tabla 21). El parámetro de rigidez, calculado en las simulaciones mediante las Ecuaciones 3 y 4, se utiliza para determinar las fuerzas sobre la placa.

Tabla 21. Parámetros de la placa del sistema simulado

Parámetro	Placa	Comentario
Constante de rigidez (E_{placa}) [N/m ²]	$1 \cdot 10^7$	Se toma el módulo de Young como referencia de la rigidez. Orden de magnitud de módulo del caucho.
Densidad (ρ_{placa}) [Kg/m ³]	950	Densidad del caucho de un neumático. Karnopp et al, 2012.

⁷ Grado de compactación en base a arreglo cúbico centrado en caras de las partículas.

(ii) Parámetros del medio granular

Las propiedades de las partículas del medio granular se presentan en la Tabla 22. El parámetro de rigidez, calculado en las simulaciones mediante las Ecuaciones 3 y 4, se utiliza para determinar las fuerzas sobre el medio granular. Por otro lado, el medio granular queda definido con un arreglo cúbico centrado en las caras (determinando su máxima compactación a 68%).

Tabla 22. Parámetros de las partículas del medio granular simulado

Parámetro	Partícula	Criterio/Referencia
Constante de rigidez ($E_{particula}$) [N/m ²]	1·10 ⁷	Se toma el módulo de Young como referencia de la rigidez. Sawicki y Swidzinski, 1998.
Densidad ($\rho_{particula}$) [kg/m ³]	2650	Valor típico en suelo mina. Hall, 2014.
Distribución	Monodisperso	Utilizado por simplificación.
Tamaño [μ m]	10	Granulometría fina respirable ⁸ .
Forma partículas	Esferas	Efecto de no-esfericidad es corregido por RO

(iii) Parámetros de interacción: partícula-partícula y partícula-placa

Por último, se indican los parámetros relacionados con la interacción partícula-partícula y partícula-placa en las Tablas 23 y 24 respectivamente. Los valores utilizados se recogen de la literatura, buscando su correspondencia con la dinámica de la rueda y el suelo.

Tabla 23. Parámetros de interacción partícula-partícula

Parámetros Partícula-Partícula	Valor	Fuente:
Coefficiente de restitución ($\epsilon_{part-part}$)	0,6	Azzoni et al, 1995
Fricción dinámica ($\mu_{part-part,d}$)	0,55	Chau et al, 1998
Fricción estática ($\mu_{part-part,e}$)	0,6	Chau et al, 1998
Rolling Resistance (RO)	0,52	Calibrado en RockyDEM® (Anexo 2)

Tabla 24. Parámetros de interacción Placa-Partículas

Parámetros Partícula-Placa	Valor	Fuente:
Coefficiente de restitución ($\epsilon_{part-placa}$)	0,5	Azzoni et al, 1995
Fricción dinámica ($\mu_{part-placa,d}$)	0,5	Chau et al, 1998
Fricción estática ($\mu_{part-placa,e}$)	0,3	Chau et al, 1998

⁸ El tamaño de las partículas se define considerando el costo computacional demandado por el programa RockyDEM®.

(iv) Determinar parámetro “rolling resistance” (RO): Medición ángulo de reposo

RO es un parámetro intrínseco del software RockyDEM® y por ende, no puede ser recogido directamente de la literatura. Comúnmente su valor se obtiene mediante calibración es decir, con la medición en laboratorio de otro parámetro (con el que tenga relación) y su posterior ajuste en el software. En este caso, la calibración se hace con el ángulo de reposo. Una vez que se determina su valor en laboratorio, el programa se calibra con todos los parámetros fijos (rigidez, fricción y coeficiente de restitución) mientras el RO se ajusta hasta obtener un ángulo de reposo similar al medido en el laboratorio. Finalmente, se opta por el valor de RO que permite un ángulo de reposo mejor ajustado.

La información referente a la secuencia de pasos para determinar el ángulo de reposo en laboratorio y su calibración está en el Anexo 2.

c) Implementación de modelo en RockyDEM®

c.1) Llenado del cajón

Debido al elevado costo computacional, el llenado del cajón con partículas se realiza una sola vez. Se guarda y utiliza como punto de partida para todas las simulaciones futuras. Los parámetros utilizados durante la alimentación de partículas al sistema están en la Tabla 25.

Tabla 25. Parámetros de alimentación en llenado de cajón

Parámetro inlet	Valor
Tiempo llenado [s]	1
Flujo [t/h]	$1,85 \cdot 10^{-6}$
Número partículas	185737
Forma inlet	Rectangular
Dimensiones inlet [mm ²]	0,2 x 0,95
Constante de rigidez ($E_{partícula}$) [N/m ²]	$1,00 \cdot 10^{-3}$

La introducción de partículas al cajón se hace con un Módulo de Young inferior al real, para hacer más rápido el ingreso de las partículas al sistema. Luego, el parámetro se aumenta en varias fases hasta el valor deseado (Tabla 26). Dicho incremento se hace gradualmente porque al aumentar la rigidez (relación directa con módulo de Young), el sistema granular experimenta un aumento en el hold-up de aire (aumento de volumen aparente del material). De modificar abruptamente el parámetro, el endurecimiento de las partículas haría explosiva la adaptación del medio y muchas saldrían disparadas fuera del sistema.

Tabla 26. Etapas para el llenado de cajón en simulaciones

Etapa	Tiempo Simulación [s]	Constante de rigidez [N/m ²]	Comentario
1	1	1·10 ³	Valor pequeño para ingresar en menor tiempo las partículas (Figura 7(a))
2	0,001	1·10 ⁴	Se sube valor de la constante de rigidez en un orden de magnitud.
3	0,001	1·10 ⁵	Se sube valor de la constante de rigidez en un orden de magnitud.
4	0,001	1·10 ⁶	Se sube valor de la constante de rigidez en un orden de magnitud. En adición, se añade tapa (blanca) a cajón para evitar escape de partículas del sistema (Figura 7 (b)).
5	0,01	1·10 ⁷	Se sube valor de la constante de rigidez. Partículas se reacomodan lentamente.
6	0,03	1·10 ⁷	Se introduce un pistón (rojo) para acelerar decantación de las partículas suspendidas y homogeneizar la superficie (Figura 7 (c)).
7	0,02	1·10 ⁷	Se deja correr el sistema hasta asentar completamente las partículas. Sistema logra compactar partículas, quedando sin movimiento y bien distribuidas en el plano (sin relieve) (Figura 7 (d)).

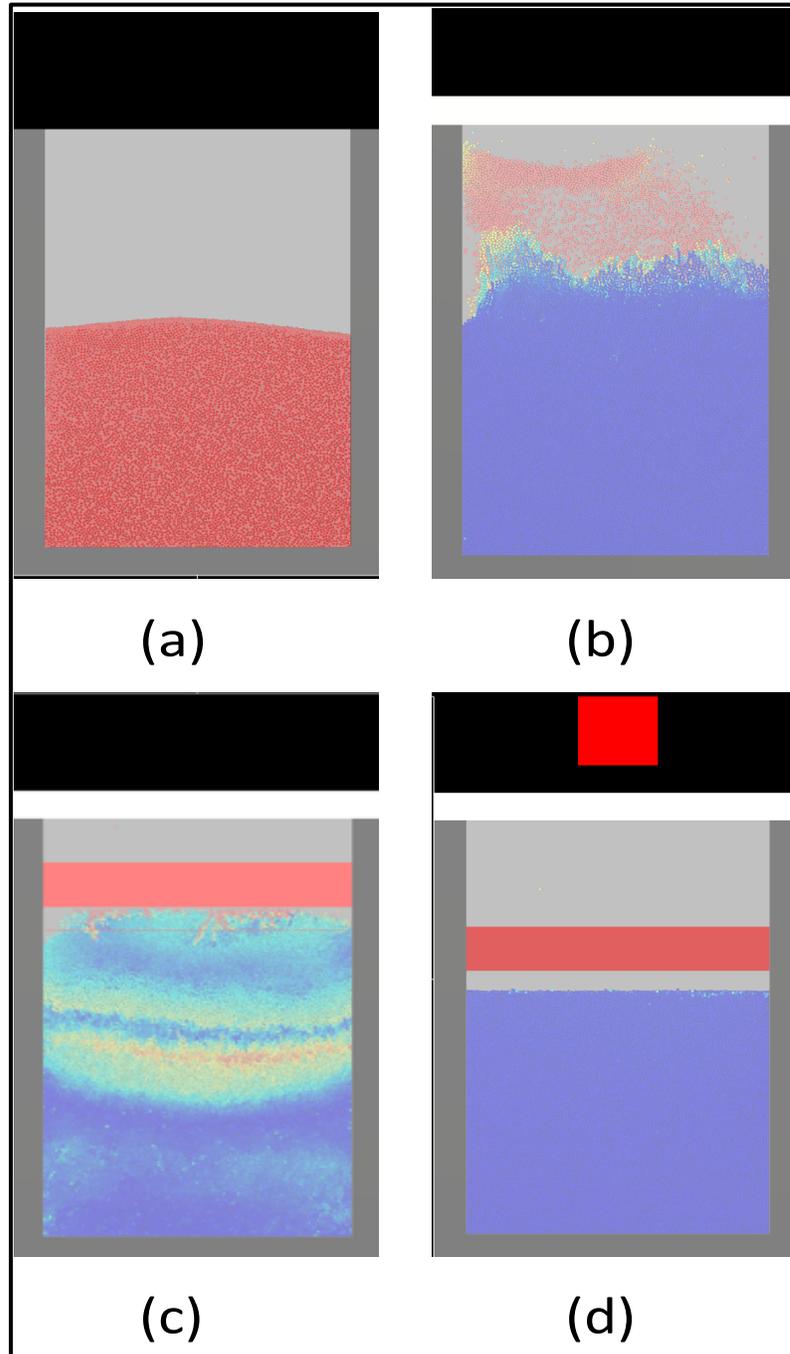


Figura 7. Fases de llenado cajón (a) rigidez base de $1 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$ (b) adición de tapa, rigidez $1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ (c) compactación con pistón, rigidez $1 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ (d) importación de placa, asentamiento completo partículas

c.2) Estimación de la fuerza normal del camión equivalente en la placa

Se necesita conocer la carga aplicada por la placa en el medio granular, que representa la carga normal de una rueda de un camión minero sobre el suelo. Se utiliza para efectos de cálculo el peso de un camión de 100, 200, 300 y 400 t. Se calculan las dimensiones de la banda de contacto y luego, la relación a escala con la placa del sistema en estudio (la placa es un zoom de la banda de contacto). Se utilizan las dimensiones de una rueda de camión minero modelo Komatsu 930E y están indicadas en la Tabla 27.

Tabla 27. Parámetros de la rueda de camión minero simulado

Parámetro	Valor
Número de ruedas	4
Diámetro rueda [m]	4
Ancho rueda [m]	1
Perímetro _{Rueda} [m]	12,6

El ancho de la banda de contacto ($Ancho_{banda}$) es equivalente al ancho de la rueda es decir, igual a 1 m. Para estimar el largo de la banda de contacto ($Largo_{Banda}$) se utilizan las hendiduras de la rueda en contacto temporal con el suelo. Las hendiduras (H) se cuentan haciendo un zoom a la imagen de una rueda de camión minero (Figura 8) considerando aquellas tocando el suelo ($H_{tocando\ suelo}$), de las hendiduras totales ($H_{totales}$).

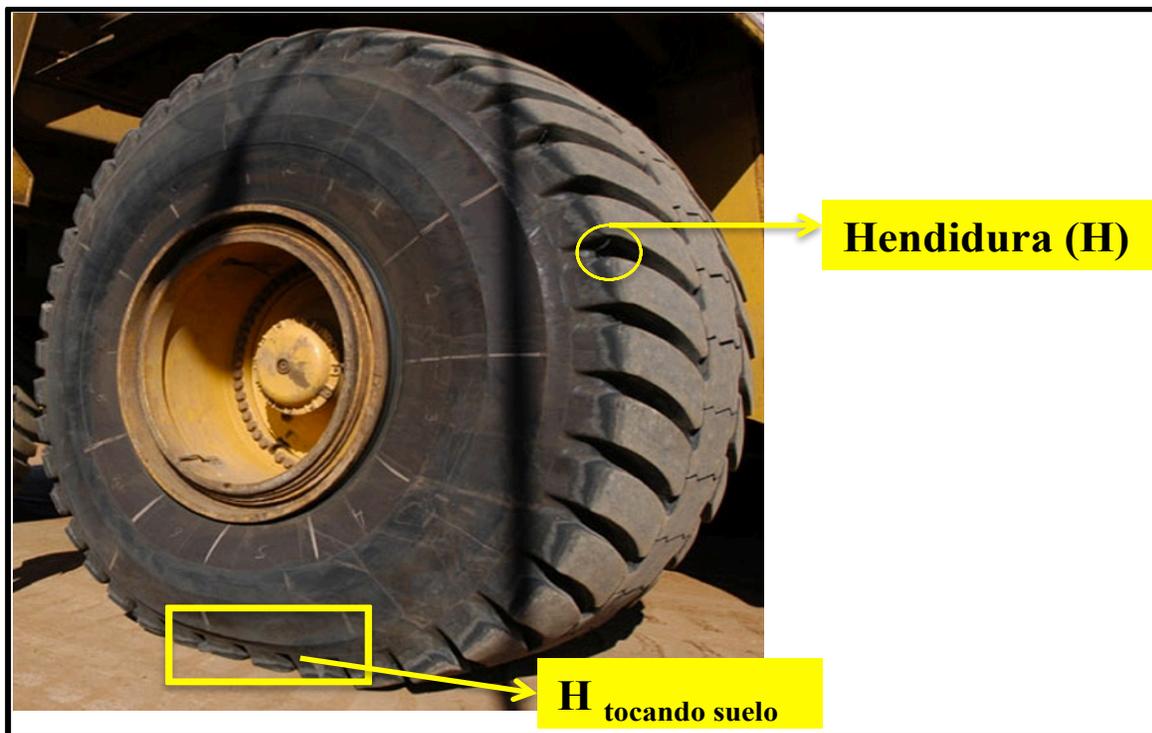


Figura 8. Hendiduras en una rueda minera.

Se define el $Largo_{Banda}$ de acuerdo a la Ecuación 9.

$$Largo_{Banda} = Perímetro_{Rueda} \cdot \frac{H_{tocando\ suelo}}{H_{totales}} \quad [9]$$

Luego, se comparan las escalas entre la banda real de contacto y la placa que replica su efecto. Solo una parte de la carga de la rueda está representada por la placa en el medio granular. Por esta razón, se determina el porcentaje de la banda de contacto representado por la placa a partir de sus dimensiones. De esta forma se llega al valor del Área_{Banda} mediante Ecuación 10.

$$\text{Área}_{Banda} = Largo_{banda} \cdot Ancho_{banda} \quad [10]$$

Finalmente, la fuerza normal equivalente en la placa ($F_{N,placa}$) se estima a partir de la razón entre las áreas de la placa (A_{Placa}) y la banda de contacto (A_{Banda}) por medio de Ecuación 11.

$$F_{N,placa} = \frac{A_{Placa}}{A_{Banda}} \times F_{N,Banda} \quad [11]$$

En la Tabla 28 se indica la presión ejercida por rueda de camión ($\Delta\sigma_{camión}$), que será de igual magnitud a la transferida por la placa en sistema simplificado. Los cálculos en detalle se encuentran en el Anexo 3 (utilizando Ecuaciones 10 y 11).

Tabla 28. Fuerza normal de placa con respecto a carga de camión

Carga camión [T]	$\Delta\sigma_{camión}$ [Kpa]
100	160,29
200	320,59
300	480,88
400	641,18

d) Fases de simulación en el software RockyDEM®

d.1) Penetración placa : simulación del hundimiento de rueda

(a.i) Descripción de la medición de penetración

Posterior al llenado del cajón, se realiza la penetración de la placa en el medio granular a una velocidad de 0,1 m/s⁹. Con esta fase se busca analizar el modo de ruptura de los agregados del suelo debido a la presión (carga normal) ejercida por la rueda en su avance. En cada simulación,

⁹ Notar que selección de velocidad fue arbitraria, simplemente se considera el estado final del esfuerzo normal en la placa.

la placa penetra el medio granular hasta alcanzar valor de la presión equivalente a la carga de la rueda.

La distancia de penetración de la placa se determina midiendo el valor del nodo inferior de placa al término de su hundimiento para cada simulación, usando las herramientas de post-simulación en RockyDEM®. Los valores son normalizados por la escala del sistema placa-cajón dividiendo por el espesor del medio granular. De esta forma, se entrega un factor de penetración (FP) como un adimensional de penetración, que luego será escalado al caso real rueda-suelo. El modo para determinarlo se encuentra en la Ecuación 12.

$$FP = \frac{P_{sist}}{0,75} \quad [12]$$

(a.ii) Escalamiento de penetración: coeficiente de compresibilidad volumétrica ($m_{v,camino}$).

Se busca conocer la relación entre la penetración obtenida en RockyDEM® (P_{sist}) y la penetración esperada para un camión en el suelo real (P_{real}). Por lo tanto, se escala el valor de P_{sist} mediante el coeficiente de compresibilidad volumétrica (m_{camino}). El valor del coeficiente m_{camino} se determina a partir de la penetración de la placa (P_{sist}) en cm, el esfuerzo aplicado por el camión ($\Delta\sigma_{camión}$) en kpa y el espesor del medio granular del sistema ($h_{sistema}$) en cm por medio de Ecuación 1. Con el coeficiente $m_{v,camino}$ se re-calcula la penetración esperada para un camión en el suelo real (P_{real}) con respecto al espesor de la carpeta de rodado, h_{real} en cm.

b) Etapas para el estudio de penetración de placa

Esta sección incorpora las distintas simulaciones a realizar con la placa en modo de penetración y el análisis respectivo (los subíndices serán análogos en la parte de resultados).

Las etapas a seguir para estudiar el efecto de la penetración de la placa en la emisión de polvo son (i) penetración sin efectos de cohesión (caso base), (ii) penetración con efectos de cohesión y (iii) estimación de penetración sobre solución tópica para tratamiento de supresión.

(i) Penetración sin efectos de cohesión (caso base)

Se realizan simulaciones sobre suelo seco, representando la penetración de una rueda con la carga de camión de 100, 200, 300 y 400 t. Posteriormente, los resultados se entregan en este orden, determinando primero FP y luego, estimando el valor de penetración real.

(ii) Penetración con efectos de cohesión

Se evalúan los casos con cohesión 10 (Adh10), 100 (Adh100) y 1000 (Adh1000) para el caso de 300 t. Se utilizan los mismos procedimientos en torno al cálculo del FP.

Adicionalmente, se realiza un análisis cualitativo de la penetración de la rueda en base a las cadenas de esfuerzos. Se comparan así las distintas condiciones del material granular (Adh 0, Adh1, Adh100 y Adh 1000) para el caso de un rueda de un camión con 300 t.

(iv) Estimación de penetración sobre solución tópica para tratamiento de supresión.

Se desea estimar el tiempo necesario de penetración y/o curado de una solución acuosa en el medio poroso definido por un camino minero con tránsito de camiones de tonelaje máximo 300 t. Con esta información se busca inferir las condiciones de penetración de un tratamiento de supresión de polvo, en forma tópica.

El tratamiento a evaluar se propone sobre la penetración de una rueda de camión de 300 t. Se utiliza el valor encontrado en RockyDEM® como input y un volumen de tratamiento (supuesto) de 1,1 veces la zona afectada por el arrastre de las ruedas. A partir del coeficiente de permeabilidad (K) se hace una estimación preliminar de la penetración de la solución acuosa, de acuerdo a las condiciones del material de la carpeta de rodado. Los tipos de suelo frecuentemente encontrados son “Arena Limosa” y “Grava Arena Limosa” y “Limo compactado”. De esta forma, se hacen estimaciones para estos tres casos (Tabla 29). Por simplicidad, los cálculos se realizan sobre un valor máximo de coeficiente de permeabilidad (K).

Tabla 29. Rango de valores típicos de Coeficiente de Permeabilidad de algunos tipos de suelo

Material Carpeta Rodado	K[m/s] (x10⁻⁸)	Fuente
Limo Compactado	7	Dysli y Steiner, 2011; Carter y Bentley, 1991
Arena Limosa	500	Geotechdata, 2015
Grava arenosa limosa	500	Geotechdata, 2015

d.2) Arrastre de placa: estimación del potencial de emisión (PE)

a) Descripción sobre la medición del PE

El mecanismo implementado para evaluar la suspensión de partículas se realiza mediante el arrastre de la placa sobre la superficie. Con este movimiento se intenta emular la acción de cizalle ejercida por la banda de contacto de la rueda al recorrer parte del suelo. La dinámica de fluidos asociada al gas o aire en contacto con la rueda y/o suelo no se incorpora en las simulaciones.

Para estimar un factor de emisión sobre caminos sin pavimentar transitados por vehículos pesados la US-EPA propone una relación (indicada en antecedentes). Sin embargo, este valor está definido sobre casos de suelo real (con una distribución granulométrica diferente del

monotamaño). Adicionalmente, las simulaciones consideran el movimiento de la rueda de manera simplificada representada por el arrastre de una placa sobre el material granular. Los supuestos anteriores hacen difícil la evaluación de las emisiones de polvo de forma directa, por lo que se propone asociar los resultados de las simulaciones con un Potencial de emisión (PE) del material particulado. Con este parámetro se hace referencia a la máxima cantidad de material potencial para ser suspendido por efecto de las ruedas en suelo sin pavimentar.

De esta forma, el PE estimado por las simulaciones se considera como un valor bruto (PE_{BRUTO}) que luego es corregido por el efecto de la distribución granulométrica (Ecuación 17).

$$PE_{Estimado} = 0,083PE_{BRUTO} \quad [17]$$

El factor 0,083 se determina haciendo una corrección simple a partir del contenido de finos habitual en un camino minero (alrededor del 8,3% de acuerdo a la US-EPA). En adelante, el PE reportado será el $PE_{Estimado}$.

El PE se determina a través un plano imaginario ubicado justo en la posición de la superficie, donde está el límite superior del medio granular. La masa de las partículas sobre el plano de la superficie es producto del desplazamiento de la placa y es contada automáticamente por RockyDEM® como material suspendido. El recorrido de la placa durante la fase de arrastre se aprecia en la Figura 9.

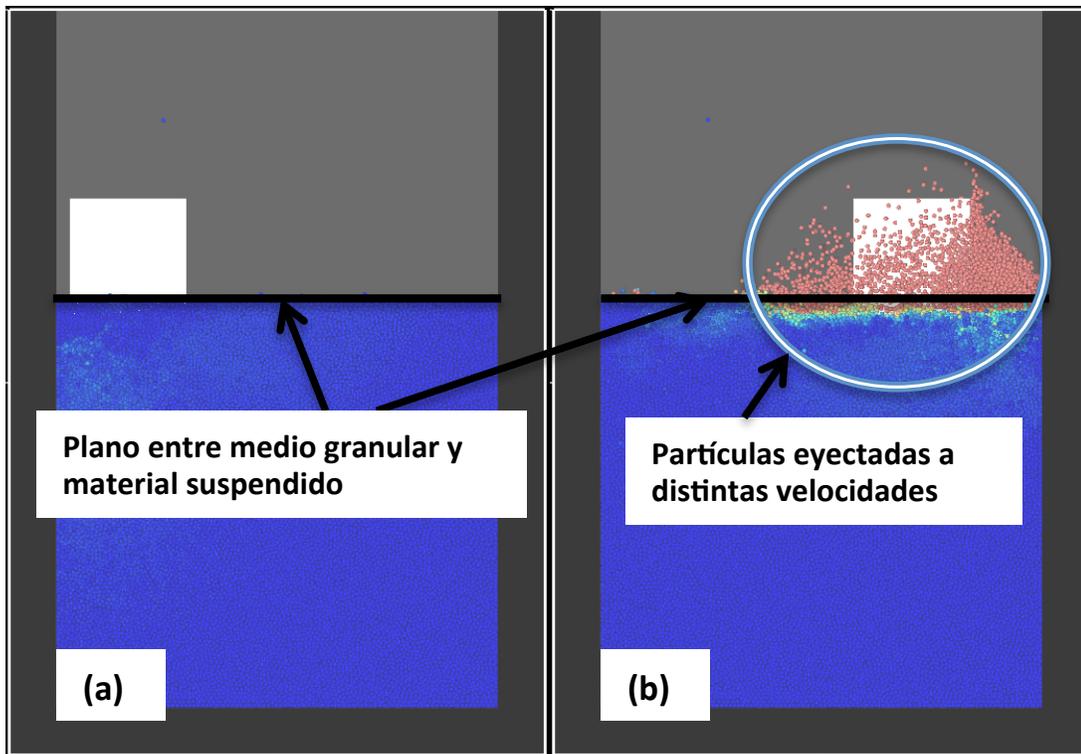


Figura 9. Posición de placa en fase de arrastre en (a) tiempo inicial y (b) tiempo final.

Debido a la escala del problema (zoom rueda en un volumen de control milimétrico del suelo), el contacto entre la sección de la rueda y el suelo ocurre en solo unos instantes. Por ende, las simulaciones se hacen correr con el movimiento de la placa, por un periodo de tiempo del orden de milisegundos.

Por otro lado, el análisis de la suspensión de polvo se hace para el caso de una rueda con una velocidad constante, de modo que se busca que las simulaciones con la placa correspondan al estado estacionario. Consecuentemente, en la etapa de post-simulación cuando de RockyDEM® se obtiene la masa suspendida en el tiempo, se define una región considerada como “estacionario” tal como se ilustra en la Figura 10.

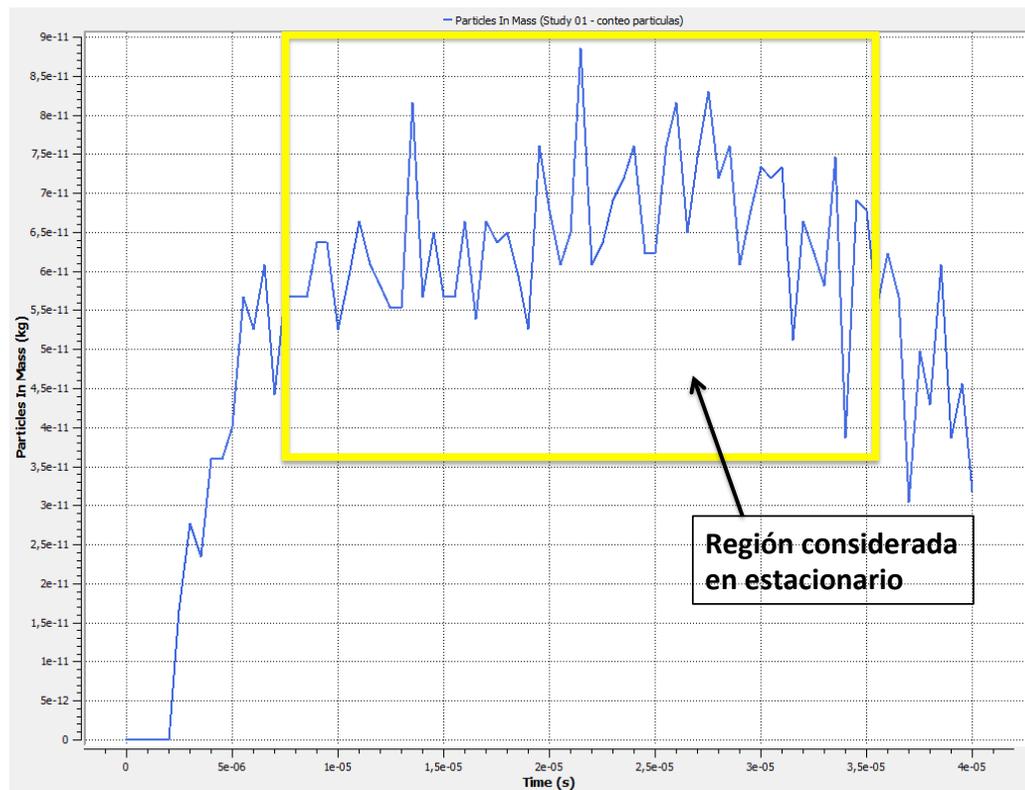


Figura 10. Región considerada en estacionario del análisis post-simulación del arrastre de placa

Del análisis post-simulación, se tiene entonces que la tasa de emisión se obtiene directamente de la simulación con RockyDEM® como la masa de material suspendido por unidad de tiempo, en kg/s. Luego, se realiza una regla de tres entre el largo del cajón (0,9 mm) y 1 km de camino es decir, la razón largo cajón/camino, para obtener la masa suspendida por unidad de distancia. Aquí, se llega al PE para la placa en kg/km. Finalmente, para determinar el PE de una rueda, el valor del PE placa se escala utilizando la razón de área placa/banda. Los factores utilizados en el escalamiento del PE se indican en la Tabla 30.

Tabla 30. Factores de escalamiento para determinar potencial de emisión (PE)

Parámetro	Valor
Razón Largo cajón/camino	$1,05 \cdot 10^6$
Razón Área placa/banda	$4,08 \cdot 10^{-8}$

b) Etapas para el estudio de arrastre de placa

Esta sección incorpora las distintas simulaciones a realizar con la placa en modo arrastre y el análisis respectivo (los subíndices serán análogos en la parte de resultados).

Ahora, las etapas a seguir para estudiar el efecto del arrastre de la placa en la emisión de polvo son: (i) impacto de la velocidad de la rueda en PE, (ii) análisis sobre la velocidad de las partículas suspendidas, (iii) impacto de la carga del camión en PE y (iv) impacto de la cohesión en PE.

(i) Impacto de la velocidad de la rueda en PE.

La placa se desplaza a distintas velocidades entre 10 y 50 km/h (se aumenta magnitud de cinco en cinco) sobre el caso de una rueda con la carga de un camión con 300 t. Luego, se determina el PE en el rango de velocidad utilizado, correspondiente a velocidades comunes para camiones de alto tonelaje en las faenas mineras.

(ii) Análisis sobre la velocidad de las partículas suspendidas

Esta sección se subdivide en 3 partes: a) velocidad media de partículas suspendidas, b) contribución del aire en la suspensión de partículas y c) análisis de la distribución en la velocidad de las partículas suspendidas

a) Velocidad media de partículas suspendidas

En un análisis post-simulación se determina la velocidad media horizontal (V_x) y vertical (V_y) de las partículas suspendidas por el arrastre de la placa. La magnitud de la velocidad encontrada representa el grado de dispersión (dirección x) y eyección (dirección y) de las partículas por el movimiento de una rueda.

A partir de histogramas entregados por RockyDEM® se conoce la distribución de las velocidades de las partículas suspendidas. Luego, la velocidad media denotada como $V_{1,0}$ (más adelante se determinará también de otras formas) se calcula mediante la frecuencia (f) indicada por cada rango de velocidades (barras del histograma) y la velocidad media (V_i) de cada rango (promedio del mínimo con el máximo), como se indica en la Ecuación 13, siendo n el número de barras del histograma.

$$V_{1,0} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i V_i}{n} \quad [13]$$

b) Contribución del aire en la suspensión de partículas

La velocidad de las partículas suspendidas se analiza conceptualmente con respecto a la contribución del aire, en base a la influencia del perfil logarítmico del viento (componente macroscópico de corrientes de aire¹⁰) sobre las partículas suspendidas. El aire tendrá un efecto u otro, de acuerdo a la velocidad de eyección de las partículas. Esta información se utiliza en complemento, para evaluar en forma más completa el grado de eyección de las partículas indicadas por el PE.

c) Análisis de la distribución en la velocidad de las partículas suspendidas

Adicionalmente, se determina la velocidad media de las partículas para los casos de 10, 30 y 50 km/h con los “modelos de velocidad” $V_{2,1}$ y $V_{3,2}$, definidos con las Ecuaciones 14 y 15 respectivamente. Los dos últimos modelos son utilizados en complemento a $V_{1,0}$ para evaluar la uniformidad en la distribución de velocidades (de las partículas suspendidas) y determinar la propensión del grupo de partículas para ser aerotransportables. Este análisis se realiza en equivalencia a trabajos sobre el diámetro de Sauter, sobre la distribución de aire en ingeniería de combustión (Sauter, 1927).

$$V_{2,1} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i V_i^2}{\sum_{i=1}^n f_i V_i} \quad [14]$$

$$V_{3,2} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i V_i^3}{\sum_{i=1}^n f_i V_i^2} \quad [15]$$

(iii) Impacto de la carga del camión en PE

Se evalúan los casos 100, 200, 300 y 400 t de carga de camión para una placa a 50 km/h. Aquí, el PE se calcula para cada carga y se comparan resultados para evaluar el efecto del peso de un camión minero en la emisión de MP10.

(iv) Impacto de la cohesión en PE

Para variar la cohesión entre partículas, el medio granular se acondiciona modificando los parámetros “distancia de adhesión” y “fuerza de adhesión”. Se evalúan los casos suelo sin cohesión (Adh0) y aquellos donde la fuerza de adhesión es igual a la fuerza peso de las partículas (Adh 1), 100 veces mayor (Adh 100) y 1000 veces superior (Adh 1000) (Tabla 31).

Tabla 31. Parámetros de Adhesión para distintos niveles de cohesión.

Parámetro de Adhesión	Adh 0	Adh 1	Adh 100	Adh 1000
Distancia de Adhesión¹¹ (s_{Adh})[m] ($\times 10^{-6}$)	Sin modelo de adhesión	5,00	5,00	5,00
Coefficiente de adhesión (f_{Adh})[%]	0	1	100	1000

3.4 Programa de supresión de polvo

3.4.1 Experimentos de laboratorio

a) Evaluación de la tasa de evaporación

Se evalúa la tasa de evaporación sobre un sistema de cuarzo molido (< 200 #) humectado bajo 3 condiciones diferentes: agua destilada, agua en medio ácido, emulsión de polímero, floculante diluido en agua (Tabla 32). Los experimentos (con agua destilada, medio ácido y floculante diluido en agua) se hacen en duplicado para tener representatividad de cada caso. Las especificaciones de los reactivos floculante y polímero están en el Anexo 8. Adicionalmente, se realizan los mismos experimentos en ausencia de material sólido (los casos de agua destilada, polímero, medio ácido y floculante). Estos últimos son utilizados para determinar si la evaporación varía producto de propiedades coligativas o si existen implicancias de acuerdo al tipo de solución comprendida.

Tabla 32. Preparación de soluciones para humectar muestras de evaporación

Muestra	pH	Preparación
Agua destilada	5,8	Se utiliza directamente
Emulsión de Polímero	5	Sin dilución
Agua con ácido	1,6	H ₂ SO ₄ en 200 g/l
Floculante en medio básico	10	KOH 0,2M+0,2 mg/l(agua)
Floculante en medio ácido	2,8	H ₂ SO ₄ 200 g/L+0,2 mg/l(agua)

En las placas de Petri se esparcen 5 g de cuarzo molido. Luego, sobre cada una se vierten 50 gotitas de la solución supresora de forma lo más homogénea posible. Por último, las muestras se mantienen en sala a 30 °C durante 70 min y se mide su masa cada 5 min en una balanza

¹⁰ Se excluye análisis sobre el efecto de la turbulencia del aire cerca de ruedas de camión en la dispersión de polvo.

¹¹ Se considera el valor sobre-estimado respecto de la realidad de $5,00 \times 10^{-6}$ asumiendo un supresor de polvo de largo alcance.

electrónica. Finalmente, con todas las mediciones de masa hechas se determina la evaporación, a través de la pérdida de masa en el tiempo (masa que se va como humedad). La pendiente sobre los puntos medidos de masa entrega el valor de la tasa de evaporación.

En la Figura 11 y 12, se presentan las muestras con sólido y sin este, bajo las distintas condiciones de humectación.



Figura 11. Muestras humectadas con sólido, previo a Evaporación a 30°C

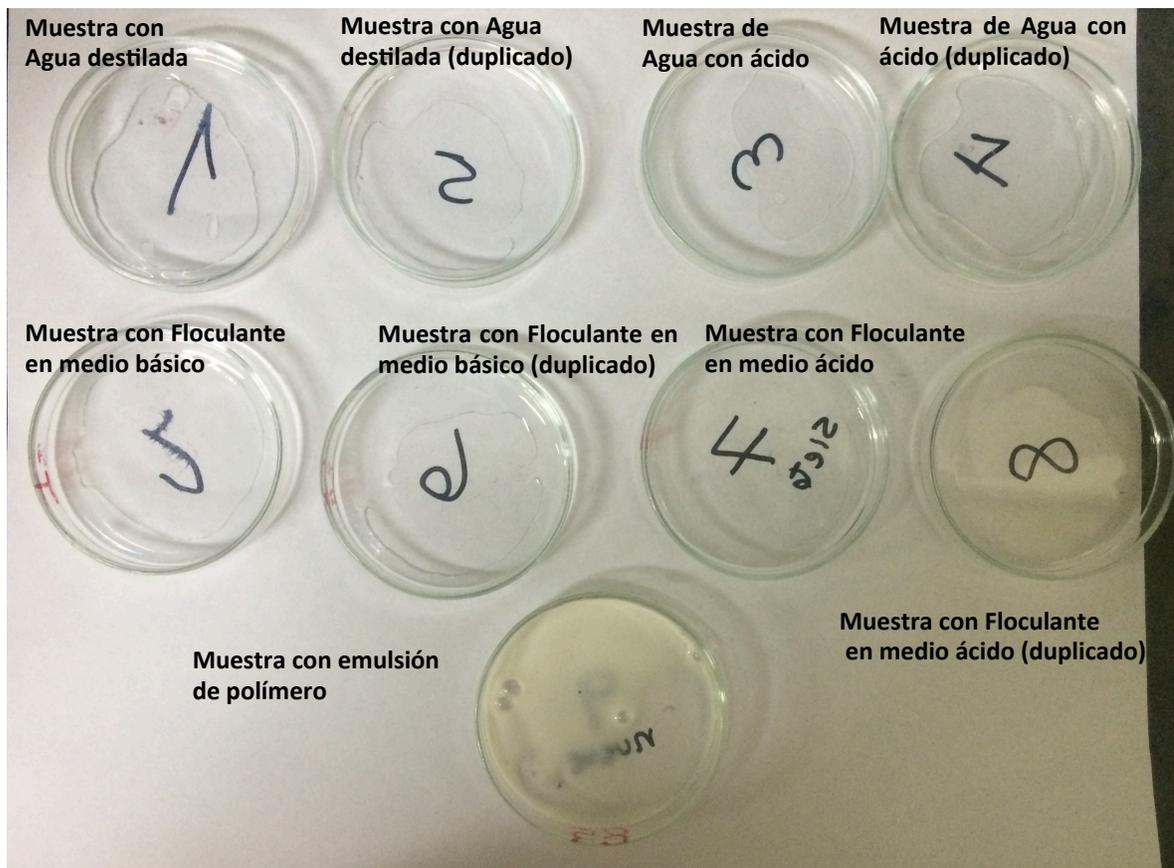


Figura 12. Muestras humectadas sin sólido, previo a Evaporación a 30°C

3.4.2 Diseño de programa de supresión de polvo

En base al trabajo de entrevistas con profesionales vinculados con caminos mineros, los estudios numéricos sobre la interacción rueda-suelo y las pruebas preliminares de laboratorio, se deja esta sección para proponer un diseño conceptual para la supresión de polvo en caminos mineros. También se hacen indicaciones sobre mejores prácticas referidas al problema de generación de polvo y abrir paso a estudios posteriores.

Capítulo 4: Resultados y Discusión

4.1 Fuentes de emisión de polvo en faenas mineras

4.1.1 Emisiones de MP10: faenas mineras chilenas

En la Figura 13, se entregan las estimaciones de emisiones de MP10 de los proyectos mineros chilenos revisados¹² para el año de mayor actividad (mayor tasa de extracción de mineral de su vida útil), indicándose la contribución de las distintas fuentes (explotación rajo, planta, transporte y erosión eólica). El transporte de mineral se presenta como el foco de mayor impacto en la contaminación de MP10. Sin embargo, la actividad en la planta, la explotación del rajo y los otros focos también conforman parte importante de las emisiones en muchas de las faenas. En el Anexo 1 se presenta el detalle de los parámetros principales comprendidos para el cálculo de las emisiones en cada una de las faenas mineras.

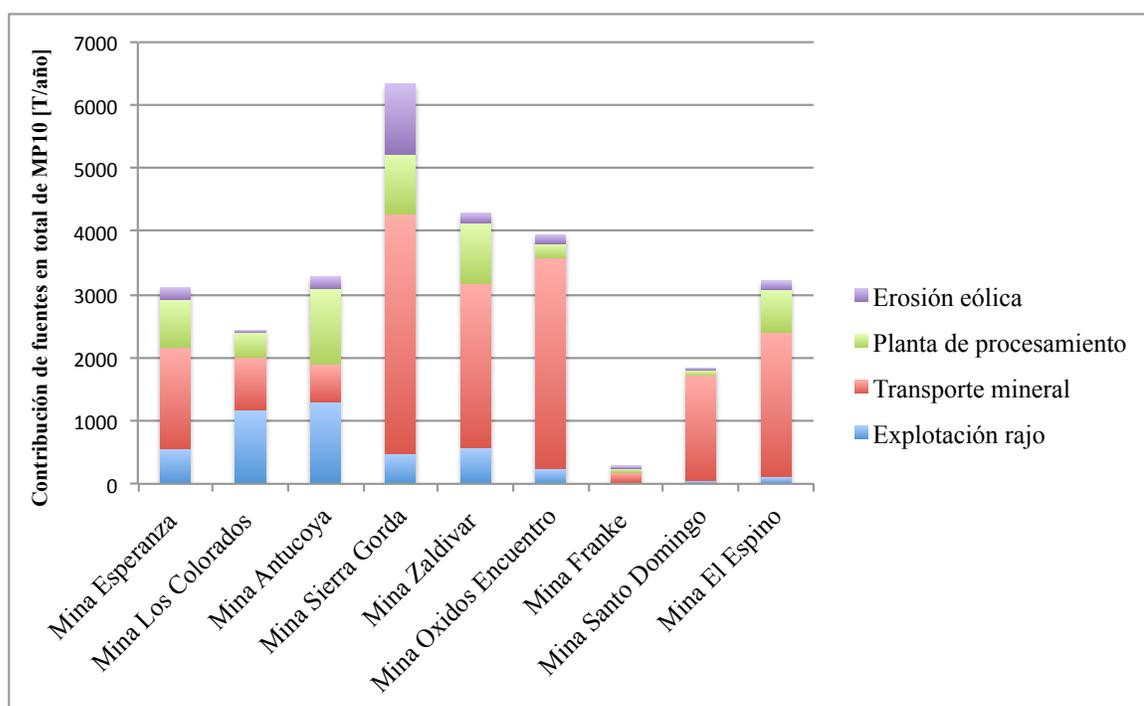


Figura 13. Contribución de fuentes en t/año en la emisión total de MP10 de algunas faenas mineras

Para ser más ilustrativo sobre la actividad contaminante y sus volúmenes de emisión, en la Figura 14 se presenta la contribución porcentual de las distintas fuentes en cada uno de los proyectos mineros revisados. Se reafirma que la participación de las emisiones por el transporte de mineral es preponderante. De esta forma, el polvo resuspendido cuyo origen son los caminos mineros puede considerarse la principal fuente de particulado en la actividad minera chilena.

¹² Los proyectos mineros chilenos revisados, la mayoría en fase de operación (a excepción de Mina El Espino),

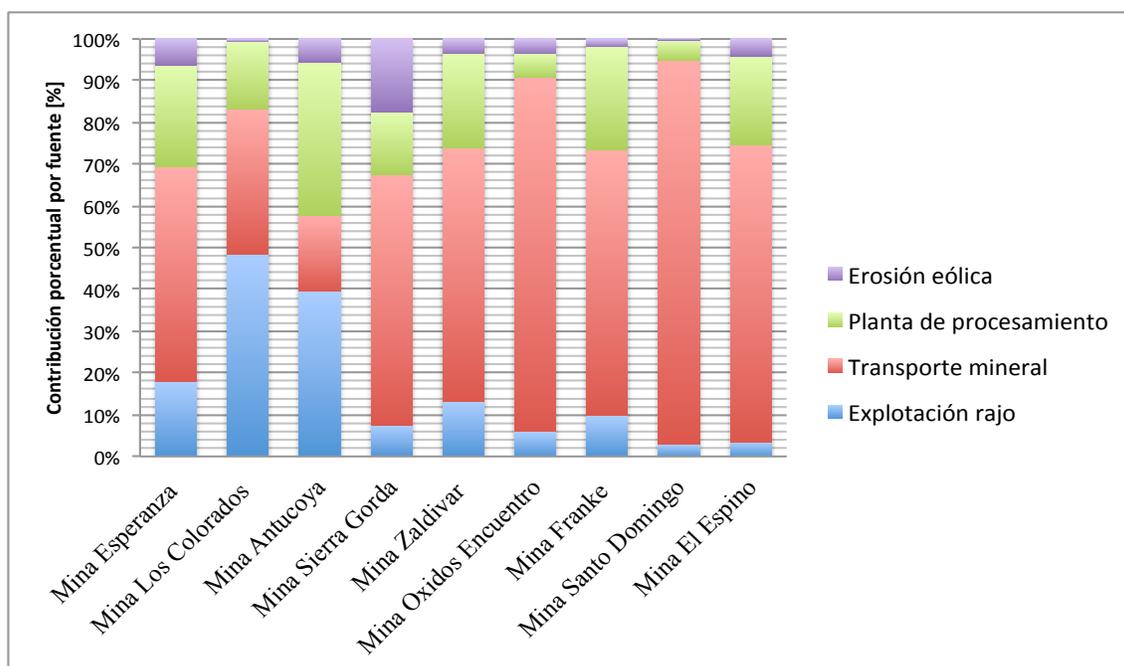


Figura 14. Contribución porcentual de las fuentes de emisión al total de MP10 en faenas mineras chilenas

La información presentada (recabada del SEA) representa estimaciones en base a la US-EPA, sobre los parámetros que ellos utilizan para el cálculo teórico de cada fuente. En este sentido, el análisis no se puede extender mucho más allá por la falta de información de mediciones in-situ sobre cada una de las faenas mineras. Solo por mencionar, la calidad en la construcción de los caminos de acuerdo a su mineralogía, la distribución granulométrica y otras variables, no están incluidas en el cálculo de las estimaciones y pueden implicar un sesgo significativo en la contaminación por polvo. Es decir, puede que las estimaciones sobre una faena sean menos preocupantes que para otras y, en la realidad ocurrir lo contrario.

Entendiendo que los caminos son un foco preponderante, al menos esta fuente debiese tener una actualización de sus volúmenes de emisión, con valores reales, a lo largo de su vida útil. Esto además, porque los caminos son una fuente fugitiva, caracterizada por plumas de aire que pueden sumarse a las de otras faenas y llegar a asentamientos humanos.

Por último, es necesario indicar la falta de estandarización del SEA en la entrega de la información referida a la contaminación ambiental de los proyectos. De partida, cada proyecto minero tiene un nombre distinto para el documento con los antecedentes sobre las emisiones de material. A ello se suma que datos fundamentales como la extensión de caminos y mineral extraído no se presenta en el mismo orden entre los documentos comprendidos y en algunos de ellos ni se menciona. En definitiva, con la presentación actual de la información de cada faena se hace difícil compararlos y sería una mejor práctica estandarizar la entrega de los datos de cada actividad.

4.1.2 Mapa con fuentes de emisión de polvo: Planta Minera

La Tabla 33 menciona los principales focos de emisión de particulado dentro de la faena “El Soldado” para el año 2012 (las fuentes restantes están indicadas en Anexo 1). Se presentan además, los valor de las emisiones de sílice en la faena y su relación con la norma D.S 594/99 (Tabla 34). De todos los focos, la Nave Chancado (2do nivel) y la plataforma principal de molino SAG se encuentran en situación crítica ya que están sobre la norma para polvo no clasificado (>100% de LPP). En el caso de las emisiones de sílice esto ocurre para casi todos los focos, es decir, en todas las secciones de la planta hay al menos un foco en estado crítico.

Tabla 33. Emisiones de polvo no clasificado en mg/m³ y su relación con norma D.S 594/99, planta "El Soldado"

Sector	Punto de emisión	Concentración [mg/m ³]	LPP [%]	Rango				
				<10	10-50	50-100	100-500	>500
Chancador Planta Cátodos	Nave Chancado (1er Nivel)	0,699	29,12		X			
	Nave Chancado (2do Nivel)	4,41	183,73				X	
	Exterior (entre nave Chancado y Harnero)	0,206	85,83			X		
	Nave Harnero (2do Nivel)	0,49	20,41		X			
Chancador primario	Sala de control	0,058	2,29	X				
	Nivel de descarga	0,011	4,58	X				
	Nivel de contra-eje	2,4	100			X		
Chancador 2º/3º	Pasillos Sector Norte	0,221	9,2	X				
	Junto a Chancador	0,466	19,41		X			
	Sala de control	0,471	19,62		X			
	Harnero sector sur	0,449	18,7		X			
Molino SAG	Plataforma principal	5,15	214,58				X	
	Harnero Poniente	0,089	3,7	X				
	Correa Alimentación 3003	0,109	4,54	X				
	Exterior-Sala de compresores	0,077	3,2	X				
Molienda Convencional	Pasillos Superior	0,362	15,08		X			
	Pasillos Inferior	0,079	3,29	X				
	Plataforma molino 2000	0,56	23,33		X			

Tabla 34. Emisiones de sílice en mg/m³ de sectores principales de planta "El Soldado" y su relación con norma D.S 594/99.

Sector	Punto de emisión	Concentración [mg/m ³]	LPP [%]	Rango				
				<10	10-50	50-100	100-500	>500
Chancador Planta Cátodos	Nave Chancado (1er Nivel)	0,081	101,3				X	
	Nave Chancado (2do Nivel)	1,16	1450					X
	Exterior (Entre nave Chancado y Harnero)	0,051	63,3			X		
	Nave Harnero (2do Nivel)	0,117	146,3				X	
Chancador primario	Sala de control	<0,005	<6,3	X				
	Nivel de descarga	<0,006	<7,5	X				
	Nivel de contra-eje	0,719	898,3					X
Chancador 2º/3º	Pasillos Sector Norte	0,075	98,3			X		
	Junto a Chancador	0,131	163,3				X	
	Sala de control	0,112	140				X	
	Harnero sector sur	0,138	172,3				X	
Molino SAG	Plataforma principal	1,53	1912,5					X
	Harnero Poniente	0,024	30		X			
	Correa Alimentación 3003	0,01	12,5		X			
	Exterior-Sala de compresores	<0,006	<7,5	X				
Molienda Convencional	Pasillos Superior	0,106	132,5				X	
	Pasillos Inferior	<0,006	<7,5	X				
	Plataforma molino 2000	0,022	27,5		X			

A pesar de que la información presentada no necesariamente es representativa de todas las faenas mineras chilenas, revela que la planta de procesamiento puede encontrarse en situación crítica en muchos de sus puntos de funcionamiento. Luego, la normativa no se cumple para este caso y es necesario implementar medidas de control.

Por otro lado, la planta representa una fuente cerrada y toma relevancia básicamente cuando interfiere en la salud operacional de los trabajadores. Luego, podría estipularse que los puntos de medición debiesen ser única y exclusivamente aquellos donde hay circulación de personal. Es más, considerar que su significado de crítico es estricto solo cuando hay personas y debiese ser información fundamental para definir una normativa ambiental de material particulado.

Por último, en la Figura 15 se presenta la relación entre las concentraciones de polvo no clasificado y sílice cristalina medidos en la planta de El Soldado, ambos en mg/m^3 .

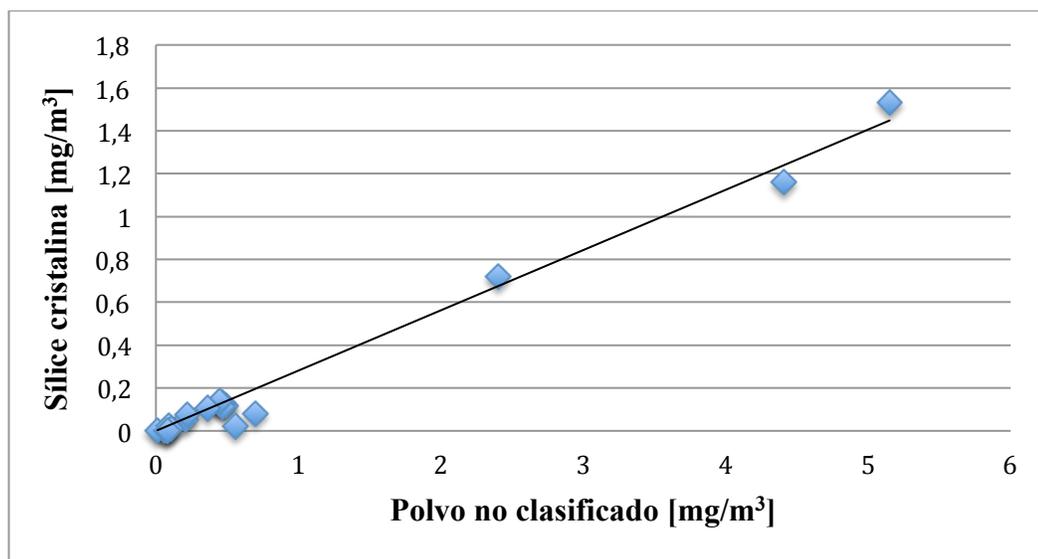


Figura 15. Relación entre emisiones de polvo no clasificado y sílice cristalina de planta El Soldado

De acuerdo al gráfico anterior, existe una relación lineal entre las emisiones de polvo no clasificado ($C_{\text{Polvo no clasificado}}$) y de sílice cristalino ($C_{\text{Sílice}}$). En la Ecuación 16, con un ajuste de $R^2 = 0,98$ la relación es la siguiente:

$$C_{\text{Sílice}} = 0,28 \cdot C_{\text{Polvo no clasificado}} \quad [16]$$

Entendiendo que la concentración en espacios cerrados de ambas componentes del polvo tienen una correlación lineal podría proponerse la medición de una de las variables anteriores sin necesidad de medir la otra. De esta forma, facilitar los protocolos de medición para trabajar con la norma. Sin embargo, la información analizada representa a una planta en particular y habría que evaluar si sucede lo mismo para el resto de las faenas mineras chilenas.

4.1.3 Caracterización del suelo: caso de estudio de camino minero

i) Composición química de muestra de un camino minero

Los resultados entregados por el análisis mineralógico automatizado (QEMSCAM) sobre las muestras del camino de acceso a la faena “Los Pelambres” entregan información cuantitativa de los elementos químicos y las especies minerales presentes. En la Figura 16 se aprecia la contribución porcentual por masa de los principales minerales encontrados en el camino muestreado. Los minerales encontrados de mayor a menor presencia por masa son cuarzo, moscovita, otros silicatos, albita, otras arcillas y por último, minerales no especificados por el análisis.

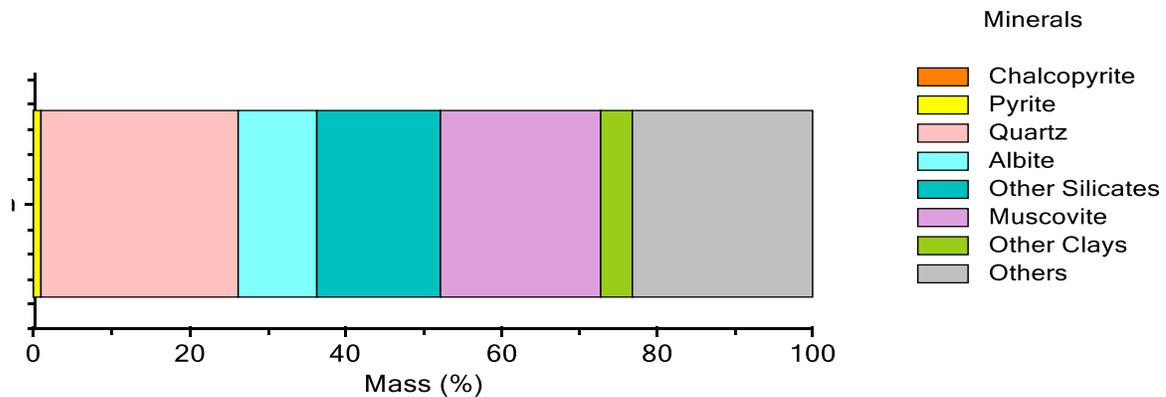


Figura 16. Participación másica de especies halladas en análisis QEMSCAM sobre muestra de camino minero

De las especies minerales reconocidas por QEMSCAM, aquellas situadas en la superficie (o cerca) podrían quedar en contacto directo con las ruedas de camiones de alto tonelaje. Luego, resulta útil estimar que especies son más susceptibles a pulverizarse y emitirse en forma de MP10.

La propiedad más adecuada para evaluar la desintegración de partículas corresponde a la tenacidad, que se define como la resistencia a la ruptura de un mineral. La presencia de micro y macro defectos en la constitución de cada mineral define su tenacidad (King, 2001). No obstante, no existe información específica para cada tipo de material y la mayoría de los minerales se describe como frágil. Es decir, independientemente de la mineralogía, frente a un stress compresivo se espera que las partículas se desintegren producto de los defectos en su estructura. Sin embargo, con tamaños de partícula cada vez menores la presencia de defectos se hace cada vez menor (ya que han desaparecido en etapas de ruptura previas) y las partículas aumentan su energía de fractura y por ende, su resistencia (Tavares and King, 1998). Consecuentemente, no puede asegurarse que la generación de MP10 sea resultado único y exclusivo de la fractura de fallas (en cada partícula) es decir, el mecanismo de compresión. Esto, resulta interesante de discutir ya que, la carga de los camiones o compresión en el suelo no es una variable que puede modificarse desde el diseño de los caminos mineros.

La dureza por otro lado, no se correlaciona en forma directa con el grado de ruptura de un material. No obstante, esta propiedad representa la resistencia de un mineral a ser rayado con otro o lo que podría representar la abrasión entre 2 superficies minerales. Luego, notando diferencias entre un mineral y otro de acuerdo a la escala de dureza de Mohs, se espera que un mineral raye al otro. En este sentido, frente a la deformación de un camino minero, producto del esfuerzo compresivo de una rueda, ocurre un desplazamiento relativo entre las distintas partículas del suelo. Por ende, con diferencias en la mineralogía y como resultado en la dureza de las partículas, la abrasión puede ser fuente de material fino (MP10), que podría tomarse en cuenta. Es por esta razón que, en la Tabla 35 se dispone del valor de dureza de los minerales identificados para una muestra de camino en el análisis QEMSCAM.

Tabla 35. Dureza de Mohs de las principales especies presentes en muestra de camino minero

Mineral	Dureza de Mohs (Pough, 1995)
Calcopirita	3,5
Pirita	8
Cuarzo	7
Albita	6-6,5
Otros silicatos	6
Moscovita	2-2,5
Otras arcillas	Caolinita (2-2,5) /Montmorillonita (1-1,5)
Otros	-

De los minerales comprendidos en el análisis, la moscovita y “otras arcillas” (más del 20% en masa) son las especies más susceptibles a producir fino por efecto de abrasión. Esto, si se tienen como partículas vecinas aquellas constituidas por minerales más duros, para poder rayarlas. Una forma de evaluar si esto ocurre en los caminos mineros es inspeccionar en las asociaciones minerales existentes en la carpeta granular. Por esta razón, en la Figura 17 se presentan las asociaciones minerales encontradas en la muestra de camino minero analizada por QEMSCAM y en la Tabla 36, se entregan los valores exactos para la moscovita y otras arcillas (que son los más susceptibles a rayarse).

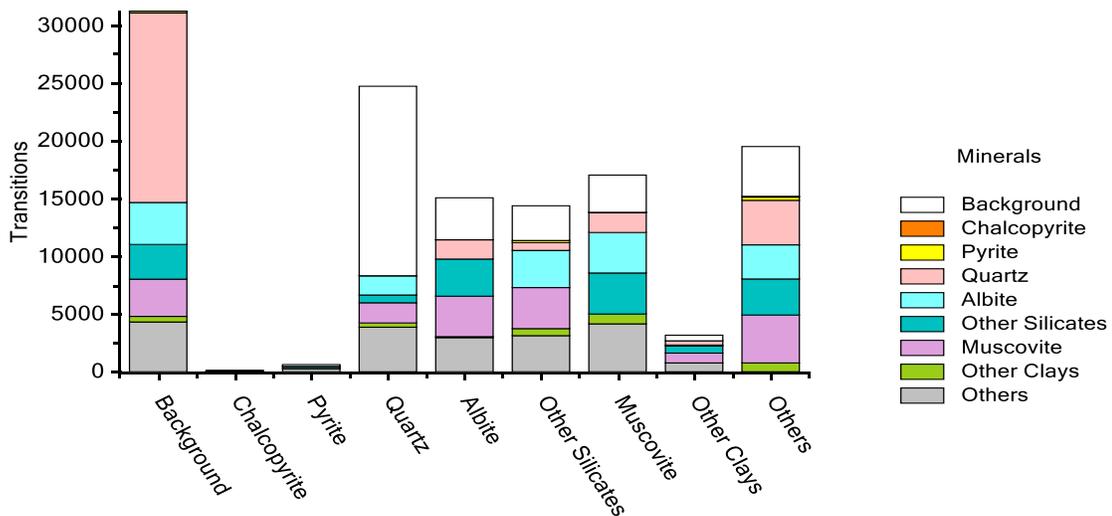


Figura 17. Asociaciones minerales de especies halladas en análisis QEMSCAM sobre camino minero sobre muestra de camino minero.

Tabla 36. Asociaciones minerales de moscovita y arcillas de muestra de camino minero

Mineral	Asociación con moscovita [%]	Asociación con arcillas [%]
Calcopirita	0,01	0,00
Pirita	0,01	0,00
Cuarzo	12,67	13,71
Albita	25,37	3,14
Otros Silicatos	25,74	22,80
Moscovita	0,00	31,84
Otras arcillas	6,18	0,00
Otros	30,03	28,51

De acuerdo a las asociaciones minerales de la moscovita y “otras arcillas” se tiene que, cuarzo, albita y otros silicatos (minerales más duros) son sus vecinos con alta probabilidad (mayor a 50%)¹³. Consecuentemente, puede estipularse que ocurre abrasión sobre el material arcilloso en la muestra de camino y puede ser fuente potencial de partículas MP10.

En definitiva, para un camino minero expuesto constantemente a la deformación por el tránsito de camiones de alto tonelaje, existe la posibilidad de generar MP10 producto de la abrasión entre los minerales duros y blandos que se encuentran en la carpeta de rodado. Luego, como estrategia de supresión de polvo se puede plantear que en el diseño y construcción de los caminos mineros, la carpeta de rodado o principalmente la zona en contacto directo con las ruedas (expuesta a las mayores deformaciones) este constituida por asociaciones minerales con la menor diferencia relativa en dureza posible (Figura 18). No debe desconocerse que, esta representa una medida para el control de polvo originado por un mecanismo de fragmentación es decir, excluye el material particulado resultante de la desagregación del material granular.

¹³ Es necesario conocer que minerales son “Otros” para extender análisis acerca de las asociaciones.

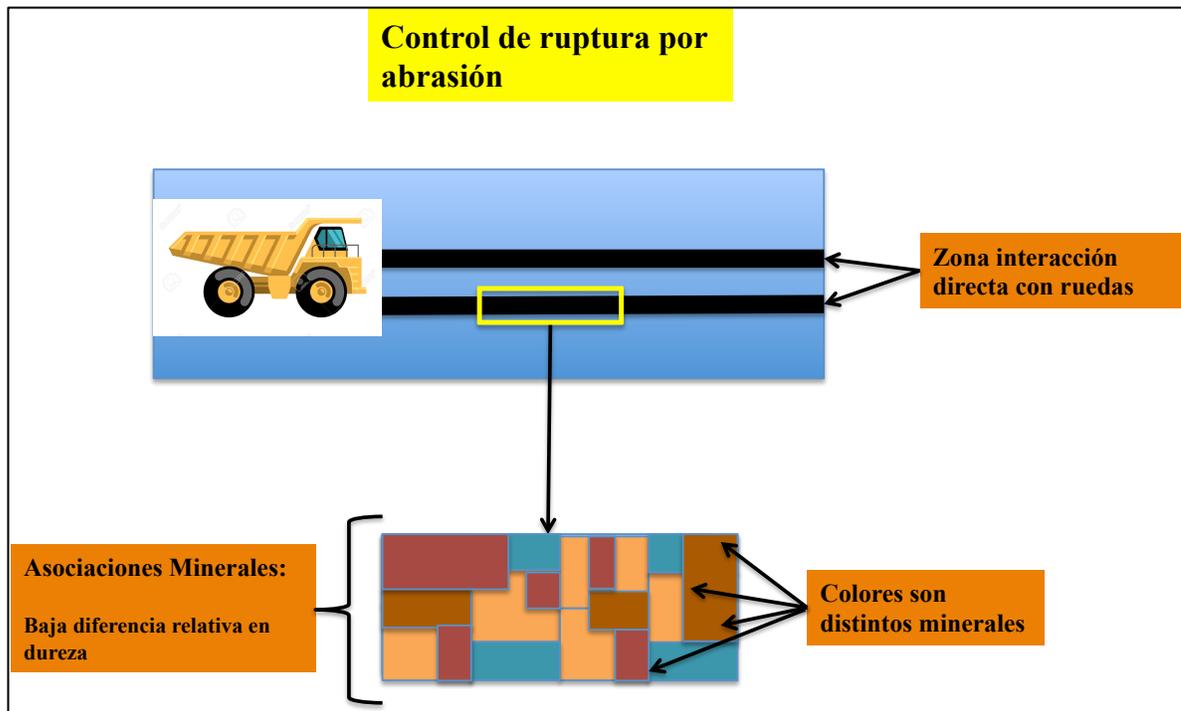


Figura 18. Diseño de carpeta de acuerdo a la mineralogía para controlar abrasión

ii) Distribución Granulométrica de muestra de un camino minero

En la Figura 19 se presenta la distribución acumulada de tamaños de la muestra realizada al camino de Pelambres (tomada a ras de superficie). En el Anexo 1 se presenta información complementaria sobre estos resultados (del análisis QEMSCAM).

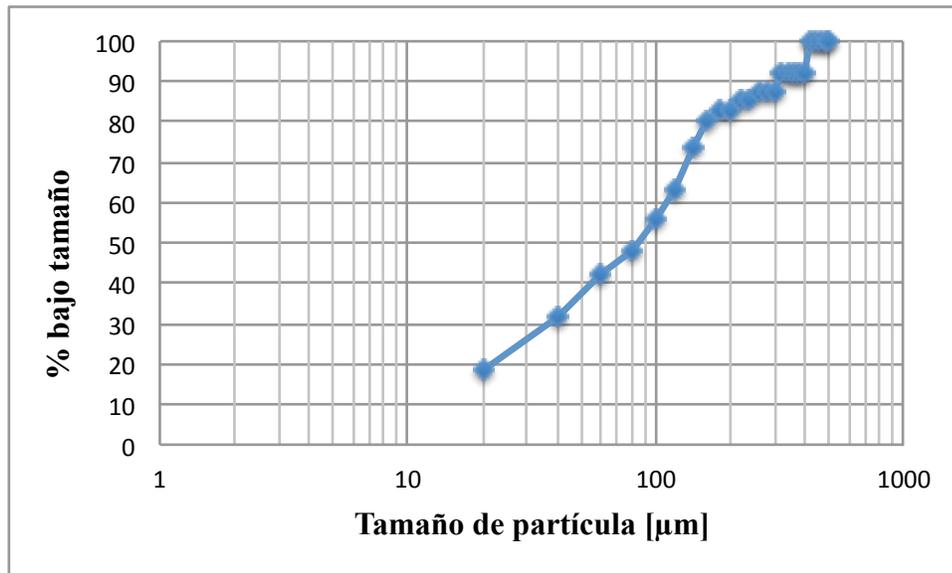


Figura 19. Distribución acumulada de tamaño de partículas, de la muestra de camino de minero "Pelambres"

Como se observa, cerca del 60% de la masa de muestra de camino minero representa partículas bajo $80 \mu\text{m}$. Sin embargo, de acuerdo a los proyectos mineros revisados el contenido de limo (fino $< 80 \mu\text{m}$) es cercano al 10% cuando son construidos. Consecuentemente, el contenido de

limo muestreado en superficie es muy superior al de diseño y significa una evidencia de la pulverización ocurrida en el camino minero durante su existencia. Esto, ya sea por el paso de los camiones o factores como el clima.

Por otro lado, del mismo gráfico se puede estimar en cerca de un 8% las partículas menores a 10 μm (extrapolando en forma lineal la curva) es decir, un camino potencialmente dispuesto para liberar MP10. En este sentido, el análisis granulométrico representa una referencia alarmante del potencial de material particulado del camino muestreado si existe una exposición frecuente al cizalle de vehículos y condiciones meteorológicas desfavorables (corriente de aire de intensidad, sequedad del suelo, etc.).

De acuerdo a lo observado, una estrategia para resolver el problema del fino y potencial emisión de MP10, podría incorporar el muestreo constante del contenido de limo superficial (del camino). Esta práctica se podría implementar con el objeto de mantener el contenido de limo original y reponerlo en la medida que aumenta de forma problemática, principalmente en la zona de contacto directo con ruedas (de camiones de alto tonelaje).

4.2 Entrevistas sobre la construcción de caminos mineros

a) Entrevistas con el MOP: caminos no pavimentados¹⁴

De acuerdo a la información entregada por el MOP, la variable técnica fundamental para la construcción de los caminos mineros es la distribución de tamaño de partículas, implementado como la gradación del camino. En adelante, se menciona la información provista y discusión al respecto.

Información provista: La gradación del material (distribución de tamaño de partículas) es relevante para un camino. Por una parte, las partículas más grandes (del orden de 50 mm) proveen de estabilidad estructural al camino pero pueden entorpecer la rodadura de las ruedas. Por otro lado, los finos ($<75 \mu\text{m}$) son necesarios para lograr la cohesión del suelo pero no pueden sobrepasar cierta proporción. Por esta razón existen bandas granulométricas propuestas de acuerdo al tipo de camino.

Discusión: La gradación del material de los caminos sólo esta normada para los caminos de vialidad. Luego, puede que muchas faenas mineras no implementen el uso de bandas granulométricas específicas para sus caminos. Esto trae como consecuencia, caminos de peor calidad y potencialmente expuestos a un mayor deterioro, incluyendo la pérdida por generación de polvo. En una estrategia preventiva sobre el desempeño estructural (estabilidad del camino) y funcional (tema del polvo) de un camino minero, debiese incorporarse la variable de gradación del material como primordial.

¹⁴ Representan caminos no pavimentados de carpeta granular

En adición, en las entrevistas con el MOP, también se indica que el espesor y número de capas son variables fundamentales en la calidad de un camino. A mayor número de capas y espesor, mayores son los esfuerzos mecánicos que pueden disiparse por una obra. Sin embargo, dependiendo del tipo de camino y las condiciones del suelo subrasante (suelo natural) no es necesario implementar una preparación de muchas capas adicionales. Sobre este punto al menos, la literatura indica su implementación al momento de construir caminos mineros.

Por otro lado, en relación a las actividades de construcción y mantención de caminos no pavimentados de carpeta granular, en la Tabla 37 se mencionan aquellas que según el MOP son fundamentales para lograr estándares de calidad.

Tabla 37. Actividades comunes de construcción y mantención de caminos no pavimentados

Actividad de Construcción y/o Mantención de Caminos	Descripción
Perfilado	Al camino se le da una cierta geometría (pendiente, ancho, etc).
Compactación	El camino se densifica con rodillos.
Espesor y Número Capas	Se construyen capas subbase, base y carpeta de rodado.
Gradación material	Se opera con bandas granulométricas, sobretamaño y %finos.
Aplicación Supresor	Se implementa uso de otros supresores además de agua

b) Entrevistas con profesionales relacionados a la construcción de caminos mineros

En la Tabla 39 se ratifica el cumplimiento de actividades comunes de construcción y mantención de caminos no pavimentados, en base a los testimonios de los profesionales ligados a la ingeniería de caminos mineros. Las entrevistas se denotan del uno al cuatro representando las siguientes entidades en el mismo orden: (1) IDIEM, (2) INCOLUR, (3) Pascua Lama y (4) TSP.

Tabla 38. Testimonios de profesionales sobre prácticas de construcción y mantención en caminos mineros

Actividades principales Construcción y Mantenimiento	Entrevistas				Comentarios técnicos	Relación con literatura
	1	2	3	4		
Perfilado	SI	SI	SI	SI	Aspectos geométricos del camino son tomados en cuenta como pendiente, distancia visible, ancho, etc.	Se cumple por respuesta unánime expertos.
Compactación	SI	SI	SI	SI	Se compacta con el uso de rodillos y a su vez con el propio tránsito de los camiones de alto tonelaje.	No se destaca empleo de ensayo Proctor para compactación óptima (indicado en Manual de Carreteras). Sin embargo, compactación si se realiza.
Espesor y Número Capas	NO	NO	NO	NO	Se opera directamente sobre el subrasante (suelo original). Suelo de alta cordillera es de buena calidad y capacidad soportante (TSP), no justifica adición de capas.	Difiere de literatura por respuesta unánime. Zona geográfica de faenas mineras chilenas se atribuye la principal razón (TSP).
Gradación material	NO	NO	NO	NO	En general solo se limpia subrasante y se retira todo elemento que pueda dañar o entorpecer rodadura de neumáticos.	No se cumple con Manual de Carreteras (MOP) es decir, difiere de Literatura. Observación es unánime.
Aplicación Supresor	NO	SI	SI	SI	Funcionan bien pero fuera de la Bischofita, representan un costo elevado.	Respuesta unánime.No cumple idealidad indicada en Literatura. Supresores funcionan pero deben aplicarse constantemente, sea cual sea.

De acuerdo a las entrevistas, la realidad contrasta en varios de los puntos indicados en la literatura y lo comentado por la institución del MOP. En forma resumida, se acotan las principales razones de las prácticas (descritas por los entrevistados) en los segmentos (1) construcción y (2) mantenimiento de los caminos mineros.

(1) Información provista: Todos los expertos concuerdan en que la construcción de caminos mineros es básicamente su perfilado y compactación, directamente sobre el subrasante. Por ende, no se realiza una mayor preparación de los caminos. Como razones por la baja inversión y poca ingeniería en la construcción se atribuyen:

- Buena calidad de material subrasante, por situarse las faenas en la alta cordillera chilena.
- “En el caso de Colombia son pésimas las condiciones originales del suelo subrasante y están obligados a rehacer completamente la superficie por donde los camiones pasan. Luego, invierten más que en el caso chileno para la construcción de caminos mineros y ventajosamente, no tienen el problema de emisión de material particulado como ocurre acá” (F. Halles).
- “Circuitos de transporte son temporales. Sin embargo, existen muchos caminos de alto tonelaje funcionando por años” (F. Halles).
- En términos de costos, pueden notarse grandes diferencias de acuerdo a la resistencia a rodadura de un camino mineros (Figura 20)

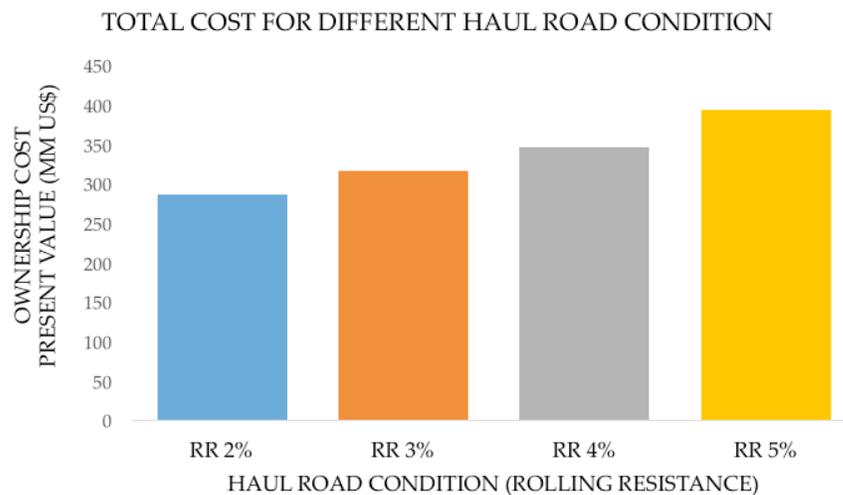


Figura 20. Costo operación caminos en base a resistencia rodadura (Gleisner et al, 2016)

Discusión: Las faenas mineras no tienen puesto el foco en los caminos mineros. Existe una concepción errada asumiendo el hecho de que los caminos son temporales, cuando muchos de ellos pueden seguir utilizándose por períodos que valen una mayor inversión. No está internalizado el concepto de que con caminos de mejor calidad, la productividad de la mina mejora producto de mejores condiciones de rodadura, menor número de mantenimientos y detenciones mínimas en el tránsito. En este sentido, una estrategia con impacto directo en las emisiones de polvo debiese cumplir una función mas bien preventiva sobre los caminos. Incorporar las variables técnicas comentadas en la sección anterior y estandarizar prácticas básicas para asegurar desde un comienzo el cumplimiento de normativas ambientales y de seguridad relacionadas con los caminos.

(2) Información provista: En relación a la mantención los expertos entregan las siguientes observaciones:

- Supresores funcionan bien (mitigan hasta el 90% de emisiones de polvo) pero, son costosos (Bischofita es excepción) ya que requieren de una aplicación frecuente.

- Sea cual sea el supresor de polvo, los camiones aljibes deben estar cada 3 días realizando la misma operación como parte de la mantención del camino. No existe una solución más permanente con la que sean menos las intervenciones durante el uso del camino.
- Programas existentes implican costos en equipos de mantenimiento, alta variación en calidad de caminos (resistencia a rodadura) y detenciones por mantención.
- El rango de valores para los programas fue entregado por TSP y se puede hacer para un camino de largo 1 km y 35 m de ancho (Tabla 39). La extensión de un circuito de caminos depende de cada faena. Sin embargo, en programas de supresión de polvo se pueden anticipar costos en millones de dólares por año cuando se trata de varios kilómetros.

Tabla 39. Estimación costos de programas de supresión de polvo

Programa Supresión	Costo Unitario [US\$/m²]	Cantidad [m²]	Costo total [MUS\$/año]	Fuente
Bischofita	3-4	35000	0,11-0,14	TSP
Emulsión asfáltica	6-8	35000	0,21-0,28	TSP

Discusión: Los programas de supresión y las operaciones de mantención representan una medida reactiva al estado de los caminos. Invertir en la calidad de los caminos durante su construcción podría permitir ahorrar en todos los costos que significan las mantenciones habituales en estos puntos de las faenas y las peores condiciones de rodadura. Luego, una estrategia sobre los caminos debiese atacar el origen del problema y de lo contrario, durante la operación de los caminos realizar un monitoreo constante de variables como la resistencia a la rodadura y el contenido de limo para asegurar su buen desempeño.

4.2.4 Conclusiones Entrevistas

Es necesario destacar que llegar a las personas indicadas y plantear cuestionamientos provechosos acerca de lo que se hace y lo que no en los caminos mineros no fue fácil. Sin embargo, luego de formular preguntas incisivas y desglosar distintos aspectos técnicos con profesionales de la industria, se puede establecer que las faenas mineras no toman mayor compromiso en la construcción de los caminos mineros. La principal razón es que no está internalizado el impacto económico de prácticas deficientes en el desarrollo de los caminos y la productividad de la mina.

Básicamente las actividades sobre los caminos se delimitan a extender y reacomodar material, compactar y perfilar, para finalmente hacer circular los camiones de alto tonelaje. Luego, de forma inevitable las operaciones quedan comprometidas a la implementación regular de programas de mantención y supresión de polvo. Este tipo de prácticas funcionan bien pero son de carácter reactivo y arrastran costos anuales significativos. No se conocen soluciones de carácter permanente o de una durabilidad mayor. Luego, es necesario indagar en la búsqueda de una

mejor preparación de la carpeta de rodado y material granular subyacente. La distribución de tamaño de partículas y consecuentemente el uso de bandas granulométricas, es una variable que se aconseja siempre contemplar, ya que juega un rol principal en la condición de un camino de material granular.

En definitiva, se pone de manifiesto la necesidad de invertir más en la calidad de los caminos y llevar al mínimo las emisiones de material particulado, así como controlar el aumento a la rodadura, sin depender constantemente de soluciones reactivas. De esta forma, una estrategia sobre los caminos debiese incorporar (1) bandas granulométricas y (2) durante la operación de los caminos realizar un monitoreo constante de variables como la resistencia a la rodadura y el contenido de limo para asegurar su buen desempeño.

4.3 Estudio Caminos Mineros: Interacción Rueda-Suelo

4.3.1 Modelo Matemático

(i) Cinemática de Rueda (banda de contacto): curva del cicloide

En esta sección se estudia el desprendimiento de partículas finas del suelo producto del cizalle de las ruedas de un camión de alto tonelaje. Haciendo un análisis conceptual sobre la literatura, la interacción rueda-suelo está sujeta a la dinámica de la banda de contacto. Luego, el movimiento de una partícula del suelo adherida y suspendida por una rueda se puede describir a partir de la parametrización del cicloide. Este se define como el movimiento de un punto en una circunferencia a través de una superficie plana. Los desplazamientos horizontal (x) y vertical (y) se pueden expresar en función del radio de la rueda (R) y el ángulo de rotación (θ) como se indica en la Ecuación 17.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(\theta - \text{sen}(\theta)) \\ R(1 - \cos(\theta)) \end{bmatrix} \quad [17]$$

Derivando con respecto al tiempo $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ y $\dot{y} = \frac{dy}{dt}$, se obtiene la Ecuación 18.

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad [18]$$

Luego, se plantean las Ecuaciones 19 y 20, y se encuentra la velocidad horizontal (V_x) y vertical de la partícula (V_y) en la rueda mediante la Ecuación 19, donde se usa la aproximación $\dot{\theta} \approx \frac{\theta}{t}$

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(\dot{\theta} - \dot{\theta} \cos(\theta)) \\ R \dot{\theta} \text{sen}(\theta) \end{bmatrix} \quad [19]$$

Sea $\dot{\theta} = \omega$ se tiene la Ecuación 20, que representa el movimiento local de la banda de contacto.

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R\omega(1 - \cos(\omega t)) \\ R\omega \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad [20]$$

Por otro lado, el movimiento global de la rueda se representa con los parámetros velocidad lineal de camión minero ($V_{camión}$) y el radio de una rueda de camión minero (R). De esta forma, la velocidad rotacional (ω) de las ruedas del camión minero se determina mediante la Ecuación 21, asumiendo la condición de no-deslizamiento.

$$\omega = \frac{V_{camión}}{R} \quad [21]$$

En los estudios posteriores de simulación con RockyDEM® se utiliza este modelo para representar el movimiento de la banda de contacto en el tiempo. Es decir, se ingresa $V_{camión}$ y ω para caracterizar la velocidad local en la periferia de la rueda.

(ii) Dinámica de rueda-suelo : escala mesoscópica

Para estudiar numéricamente el problema de emisión de polvo debido a la interacción de una rueda con el suelo se aplica la conservación lineal de las fuerzas sobre una partícula de la superficie de masa m_p y aceleración \ddot{u}_p . Las fuerzas participantes del sistema son la fuerza peso del camión transferida a la superficie (F_p), la fuerza normal (F_N) de las partículas en contacto con la partícula, la fuerza de roce de la rueda ($F_{r,rueda}$), la fuerza de roce de la partícula con sus cercanas ($F_{r,part}$) y por último la fuerza de cohesión interpartícula (F_{Adh})¹⁵. El resumen de las fuerzas consideradas en la dinámica del problema se indican en la Ecuación 22.

$$m\ddot{u}_p = F_p + F_N + F_{r,rueda} + F_{r,part} + F_{Adh} \quad [22]$$

El diagrama de cuerpo libre con todas las fuerzas comprendidas en el problema rueda suelo se ilustra en la Figura 21.

¹⁵ Se nota Adh como adhesión o el término genérico para representar las fuerzas que otorgan la cohesión al suelo.

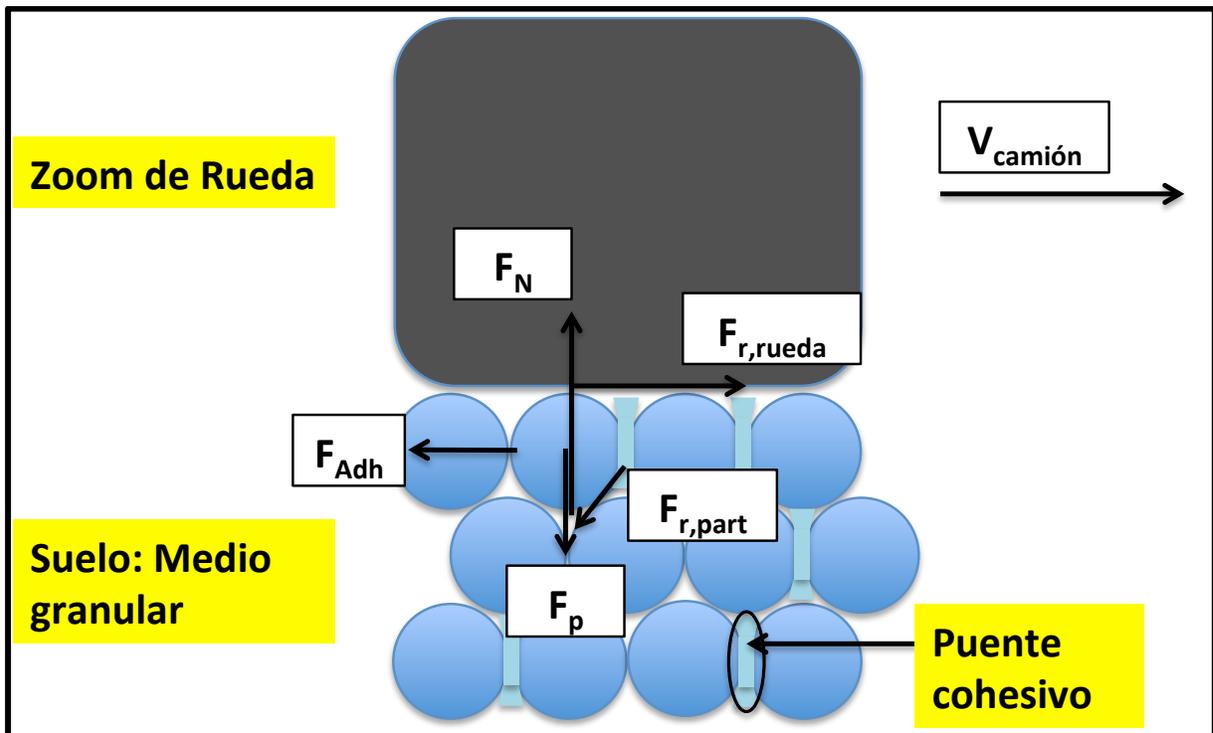


Figura 21. Diagrama de cuerpo libre sobre una partícula del suelo en interacción con rueda de camión minero

La definición de cada una de las fuerzas comprendidas en el problema rueda-suelo a estudiar numéricamente está explicitada en la Tabla 40.

Tabla 40. Definición de las fuerzas comprendidas en el problema rueda-suelo a estudiar

Fuerza [N]	Definición	Descripción
F_p	$\% m_{\text{camión}}g$	Fracción del peso del camión transferido a partícula.
F_N	F_p	Fuerza en respuesta a la carga del camión sobre la partícula. RockyDEM® calcula esta fuerza mediante la Ecuación 5.
$F_{r,rueda}$	$\mu_{part-rueda}N$	Requiere de un coeficiente roce dinámico ($\mu_{part-rueda,d}$) y estático ($\mu_{part-rueda,e}$). RockyDEM® calcula esta fuerza mediante la Ecuación 6.
$F_{r,part}$	$\mu_{part-part}N$	Requiere de un coeficiente roce dinámico ($\mu_{part-part,d}$) y estático ($\mu_{part-part,e}$). RockyDEM® calcula esta fuerza mediante la Ecuación 6.
F_{Adh}	$\% m_p g$	Modelada en este trabajo como la fracción de la fuerza peso sobre la partícula. RockyDEM® calcula esta fuerza mediante la Ecuación 7.

4.3.2 Simulaciones DEM

a) Fase de penetración de la placa

(i) Penetración sin efectos de cohesión (caso base)

Se determina el factor de penetración (FP) mediante la Ecuación 12, para los casos de 100, 200, 300 y 400 t como carga de camión (Tabla 41).

Tabla 41. Distancia de penetración sistema RockyDEM® a distintas cargas de camión

Carga camión [t]	Factor de penetración (FP)[-] (x10 ⁻³)
100	4,01
200	5,68
300	7,87
400	10,10

Se observa un mayor FP en el sistema placa-cajón al introducir una carga de tonelaje superior. Por ende, es mayor la zona de influencia de la placa sobre el sistema de partículas y en el caso real rueda-suelo se estima una mayor región de material disgregado por efecto de la carga del camión.

Ahora, se determina el coeficiente de compresión volumétrico (m_v) a partir de la Ecuación 1, teniendo como input la penetración de la placa en el sistema comprendido (definido como FP), el esfuerzo de la placa en el material ($\Delta\sigma_{camión}$) y el espesor del material granular (h_{sist}). Para el rango 100-400 t se obtiene un valor promedio con su error respectivo (Tabla 42). El detalle de los cálculos se encuentra en el Anexo 5.

Tabla 42. Valor estimado de coeficiente de compresión volumétrico

Promedio	$1,87 \cdot 10^{-4}$
Error[%]	22,92

Finalmente, se determina la penetración (Δh)¹⁶ de un camión en un camino minero por medio de m_v (Tabla 43), utilizando nuevamente la Ecuación 1 en reversa. Los cálculos de penetración se realizan del mismo modo para 100, 200 y 400 t (Tabla 44).

¹⁶ Δh representa cambio de longitud en la relación de compresibilidad volumétrica y en el problema es equivalente a P_{real}

Tabla 43. Cálculo de penetración de camión 300T en camino minero

Parámetro	Valor
m_v [kpa ⁻¹]	$1,87 \cdot 10^{-4}$
H[m]	0,5
$\Delta\sigma$ [kpa]	480,88
Δh [cm]	4,48

Tabla 44. Penetración rueda estimada para distintas cargas de camión

Carga Camión [t]	P_{real} [cm]
100	1,49
200	2,99
300	4,48
400	5,98

(ii) Penetración con efectos de cohesión

Se evalúan los casos donde la fuerza de adhesión es igual a la fuerza peso de las partículas (Adh 1), 100 veces mayor (Adh 100) y 1000 veces superior (Adh 1000) (Tabla 45).

Tabla 45. Distancia Penetración RockyDEM® con efectos de cohesión

Parámetro Adhesión	FP (x10 ⁻³)	Zona influencia c/r suelo seco [%]
0	7,87	100,0 ¹
1	5,47	69,6
100	3,33	42,4
1000	3,07	39,0
¹ Caso base o de referencia		

El factor de penetración disminuye al intensificar los efectos de cohesión entre las partículas del medio granular. Con el aumento de la adhesión se aprecia una reducción de la zona de influencia respecto al caso base. Concibiendo la zona de influencia como el volumen de material disgregado por el hundimiento de la rueda, este representa el potencial de contaminación por material particulado (MP10).

Si bien la rueda no suspende todas las partículas con las que entra en contacto, la región de partículas penetrada es una buena referencia de aquellas que habiendo sido disgregadas podrán salir eyectadas de la superficie, con el avance de las ruedas.

Haciendo un zoom-in sobre el sistema penetrado por una placa equivalente a un camión de 300 t, la Figura 22 presenta de izquierda a derecha las cadenas de esfuerzos para los distintos casos de cohesión en forma creciente (las diferencias se notan en base a la escala de colores sobre la máxima fuerza normal medida en el hundimiento de la placa).

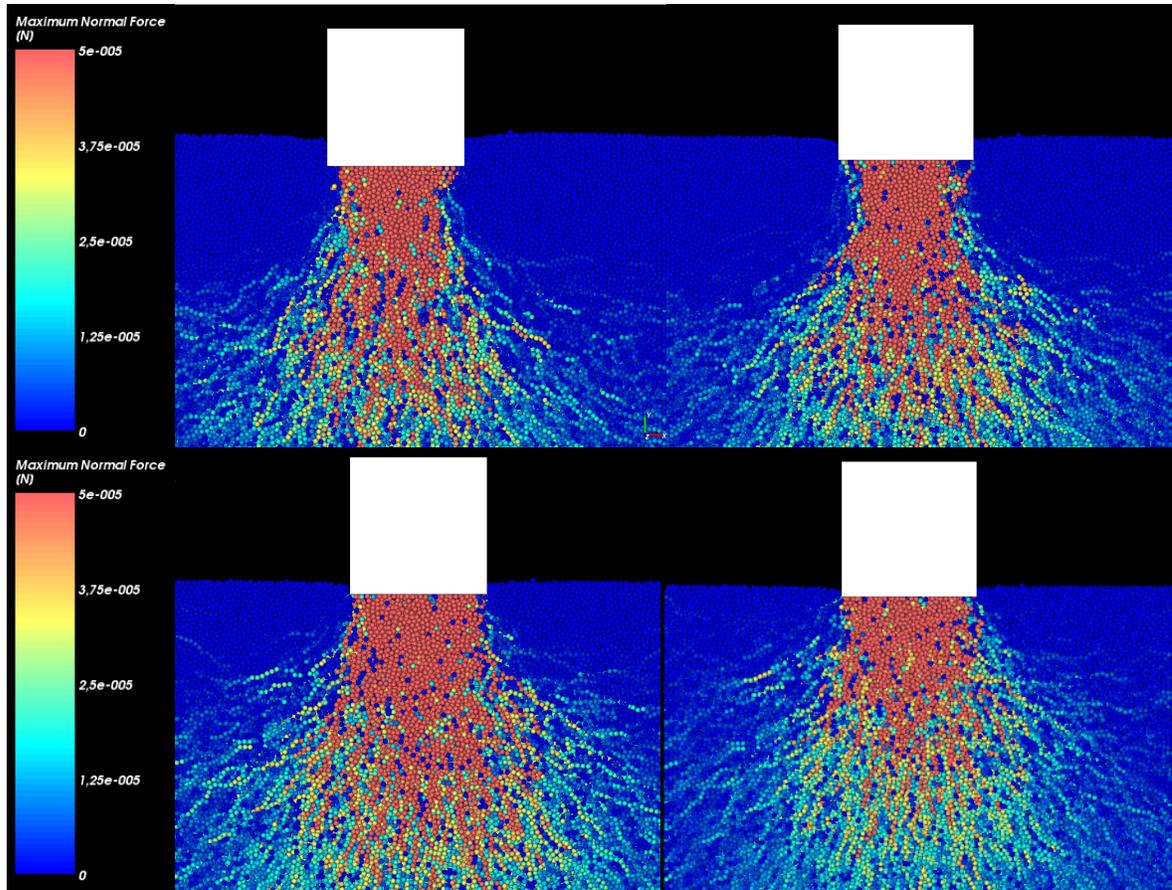


Figura 22. Zoom penetración placa 300 t sobre medio granular seco, Adh 1, Adh 100 y Adh 1000 (izq. a derecha, de arriba a abajo).

En todos los casos, las cadenas de esfuerzos se desarrollan justo debajo de la placa y solo con Adh1000 (última imagen) reducen su extensión en forma notoria. Sin embargo, lo más importante es reconocer la menor profundidad alcanzada por la placa, al aumentar la cohesión del medio granular.

Por último, las cadenas de esfuerzos referentes a la evolución de las fases de penetración en los sistemas con suelo seco, Adh 1, Adh 100 y Adh 1000 se encuentran en Anexo 6.

(iii) Estimación de penetración sobre solución tópica para tratamiento de supresión.

Se evalúan las condiciones de penetración de una solución acuosa tópica genérica para la supresión de polvo de un camino donde transitan camiones de 300 t.

Primero se recogen de la literatura los coeficientes de permeabilidad para los casos comunes de suelo de camino minero (Tabla 46): Limo compactado, arena limosa y grava arena limosa.

Tabla 46. Coeficiente de permeabilidad para clases de suelos típicos de carpeta de rodado

Material Camino	K [m/s] ($\times 10^{-8}$)
Limo Compactado	7
Arena Limosa	500
Grava arenosa limosa	500

Consecuentemente, se considera el valor de la profundidad penetrada por la rueda de un camión de 300 t, considerando los casos con y sin estrategia de supresión (Tabla 47). Se asume una estrategia de supresión capaz de cubrir 1,1 veces la profundidad afectada por rueda, determinada por la simulación con placa.

Tabla 47. Profundidad de suelo afectado por penetración rueda de 300 t

Input	Valor	Comentario
Profundidad penetrada (P_{real}) [cm]	4,48	Penetración para rueda de 300 t.
Profundidad controlada por supresor [cm]	4,93	1,1 veces penetración rueda.

Finalmente en la Tabla 49 de acuerdo a la profundidad que debe ser controlada por la aplicación de supresor (Tabla 48), se determina el tiempo de penetración para las tres condiciones distintas de suelo considerado en este análisis (valores de la Tabla 48).

Tabla 48. Tiempo de penetración de solución tópica de supresión de polvo en limo compactado, arena limosa y grava arena limosa

Material Camino	Tiempo penetración [h]
Limo Compactado	195,56
Arena Limosa	2,74
Grava arenosa limosa	2,74

Entre un suelo de grava limosa o arena limosa y uno compactado de limo se aprecian diferencias de casi 2 ordenes de magnitud (71,4 veces más para el último caso) en el tiempo de penetración. En condiciones de compactación de limo como sucede en zonas de los caminos mineros, sería impracticable la aplicación tópica para resolver completamente el tema de suspensión de polvo de los caminos.

Ahora, haciendo el cálculo en forma inversa se determina cuánto penetraría una solución acuosa si transcurriese un día post-aplicación, para las tres condiciones estructurales del camino (Tabla 49).

Tabla 49. Profundidad cubierta por supresor en un día para tres tipos de suelos: limo compactado, arena limosa y grava arena limosa

Material Camino	Distancia penetrada por día [cm]	Volumen tratado/volumen afectado
Limo Compactado	0,60	0,13
Arena Limosa	43,20	9,64
Grava arenosa limosa	43,20	9,64

De acuerdo a los valores encontrados en base al coeficiente de permeabilidad (K), una solución acuosa de supresión de polvo penetra a una profundidad equivalente de 0,6 cm (o 13% del volumen afectado por rueda), pasadas 24 horas desde su aplicación. Visto de otro modo, se requieren 196 h para penetrar (medio de limo compactado) con una solución acuosa toda la zona afectada por la rueda de un camión (con referencia 300 t). En este sentido, en caminos que ya se encuentran operativos (compactados en su construcción y al paso de camiones), los supresores no tienen posibilidad de penetración y más bien se quedan en la superficie.

En definitiva, se deduce que los supresores no tienen una utilidad evidente en cohesionar la carpeta de rodado, pero sí en modificar el estado de la cara superficial de un camino. Es decir, una estrategia con supresores debe enfocarse más bien en sellar la superficie, encontrando las mejores combinaciones supresor-suelo para lograr un superficie más resistente y permanente en el tiempo.

b) Fase de arrastre de placa: estimación del potencial de emisión (PE)

(i) Efecto de la velocidad en PE

En el sistema placa-cajón en ausencia de cohesión, se realiza el arrastre de la placa. Las velocidades horizontales implementadas referidas como velocidad de camión ($V_{camión}$) están en el rango de 10 a 50 km/h y en la Figura 23 se muestran los PE en el rango de velocidades simulado. Los valores en detalle de PE se encuentran en el Anexo 7.

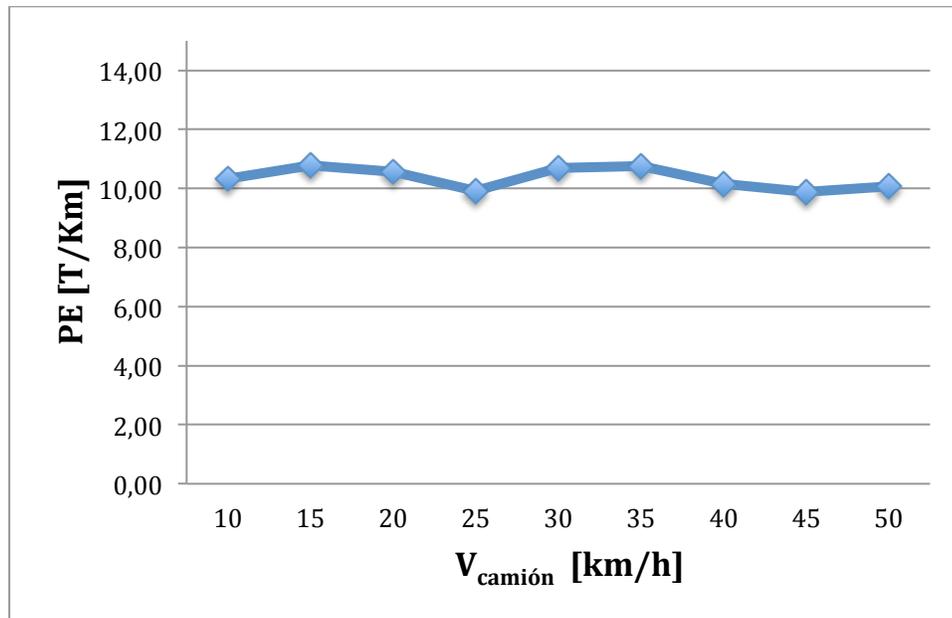


Figura 23. PE de suelo seco, para $V_{\text{camión}}$ entre 10-50 km/h

El PE no varía considerablemente al modificar la velocidad de la rueda entre 10 y 50 km/h, manteniéndose entre las cantidades de 9,88-10,78 t/km de MP10. Sin embargo, los valores de PE son estimados en ausencia de aire. En este sentido, $V_{\text{camión}}$ no afecta la emisión de polvo directamente, pero no puede asegurarse el mismo comportamiento en presencia de aire (el aire en forma de vórtices y corrientes turbulentas, genera fuerzas aerodinámicas sobre las partículas y por ende, tiene un rol dispersivo sobre el material suspendido del suelo).

(ii) Análisis de la velocidad de las partículas suspendidas

a) Velocidad media de partículas suspendidas

En la Tabla 50 se indica la velocidad media traslacional horizontal ($V_{\text{part},x}$) y vertical ($V_{\text{part},y}$) de las partículas suspendidas, para distintas $V_{\text{camión}}$ simuladas en suelo seco. Los valores son determinados en base a modelo de velocidad V_{10} , con la Ecuación 13. Se observa un incremento en la velocidad de las partículas suspendidas, tanto horizontal como verticalmente, al aumentar la $V_{\text{camión}}$. Se transfiere entonces un momentum entre la placa y las partículas. Luego, independiente de que el PE no se vea afectado por $V_{\text{camión}}$, sí se espera una mayor dispersión de partículas por efecto de la velocidad de la rueda.

Tabla 50. Velocidad media traslacional de partículas en función de $V_{camión}$ entre 10 y 50 km/h

$V_{camión}$ [km/h]	V_{placa} [m/s]	$V_{part,x}$ [m/s]	Absorbido de $V_{camión}$ [%]	$V_{part,y}$ [m/s]	Absorbido de $V_{camión}$ [%]
10	2,78	1,52	54,72	0,62	22,32
15	4,17	2,50	60,00	0,95	22,80
20	5,56	3,25	58,50	1,31	23,58
25	6,94	4,02	57,89	1,69	24,26
30	8,33	4,94	59,28	2,01	24,12
35	9,72	5,86	60,27	2,26	23,25
40	11,11	6,68	60,12	2,64	23,76
45	12,50	7,47	59,76	3,00	23,98
50	13,89	7,79	60,19	3,20	24,41

En la misma tabla se indica la proporción de la magnitud entre las velocidades de las partículas suspendidas con respecto al camión, refiriéndose a ellas como el % absorbido de la $V_{camión}$. De acuerdo a este último parámetro se tiene que, la relación entre $V_{camión}$ y las velocidades $V_{part,x}$ y $V_{part,y}$ se mantiene casi constante. Para el rango de velocidades del vehículo simuladas, el promedio de las velocidades $V_{part,x}$ y $V_{part,y}$ es equivalente al 59,05% y 23,69% de la magnitud de $V_{camión}$ respectivamente. Con estos valores se puede inferir entonces que, el arrastre de la placa (en equivalencia al desplazamiento de una rueda) posee una acción más bien de disgregar el suelo y en menor medida de suspender partículas. En adición, el comportamiento de $V_{part,x}$ y $V_{part,y}$ se observa en las Figuras 24 y 25.

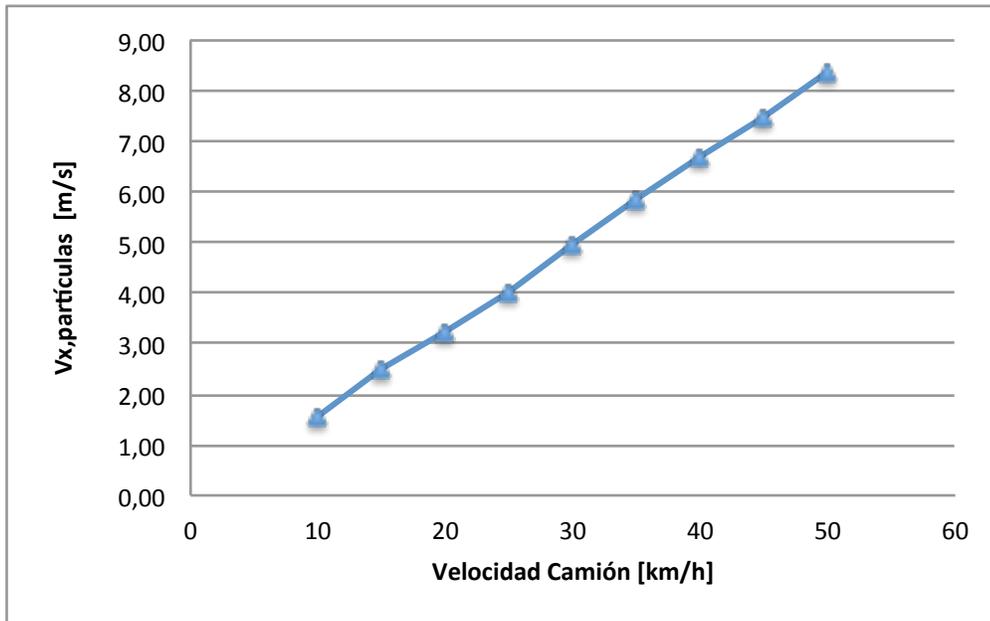


Figura 24. $V_{part,x}$ adquirida por partículas suspendidas, a distinto $V_{camión}$.

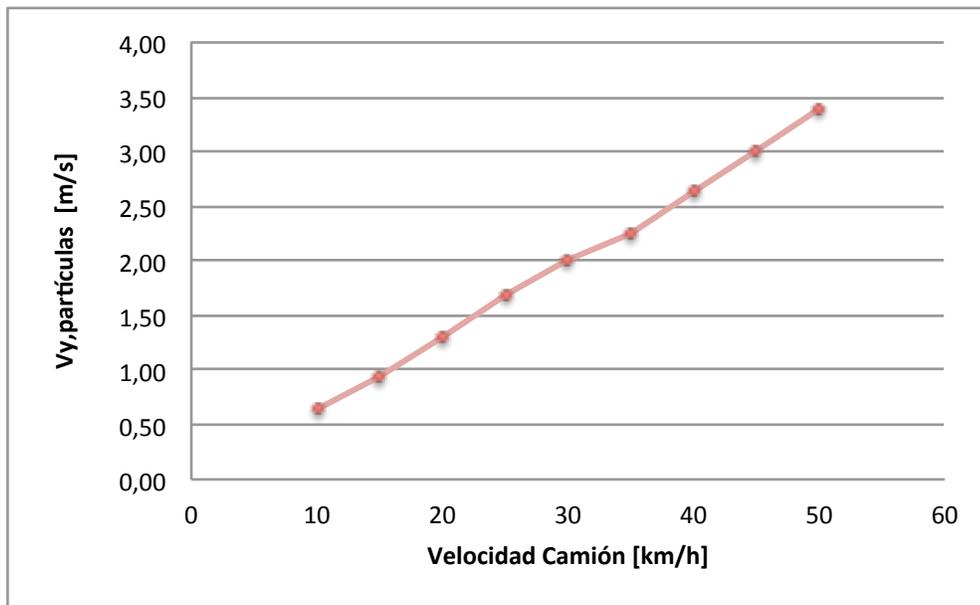


Figura 25. $V_{part,y}$ adquirida por partículas suspendidas, a distinto $V_{camión}$.

Trazando una línea de tendencia lineal sobre los gráficos presentados se conoce una estimación de la velocidad media adquirida por las partículas en dirección X e Y (en el rango de 10 y 50 km/h de $V_{camión}$). De esta forma, se obtienen las Ecuación 23 y Ecuación 24 con un R^2 de 0,999 y 0,998, para el caso $V_{x,part}$ y $V_{y,part}$ respectivamente. La $V_{camión}$ se expresa en m/s para tener consistencia en las ecuaciones.

$$V_{x,part} \left[\frac{m}{s} \right] = (4,60 \cdot 10^{-2}) \cdot V_{camión} \left[\frac{m}{s} \right] \quad [23]$$

$$V_{y,part} \left[\frac{m}{s} \right] = (1,85 \cdot 10^{-2}) \cdot V_{camión} \left[\frac{m}{s} \right] \quad [24]$$

b) Contribución del aire en la suspensión de partículas

Extendiendo la discusión, se puede indicar que la velocidad de dispersión de las partículas depende de la posición a la cual serán recogidas por el aire. Luego, en base al perfil logarítmico del aire, la velocidad del fluido aumenta con la altura respecto de una “pared” (o superficie). Siendo la superficie del suelo el equivalente a una “pared”, las partículas con mayor distancia de eyección (distancia entre la pared y la partícula) producto de la rueda, alcanzan mayores desplazamientos no solo por su velocidad sino por atraparse en capas de aire a mayor velocidad. Es por esto que, aunque $V_{camión}$ no produce diferencias en el PE (volumen de emisión por km) si implica que con una mayor magnitud de $V_{camión}$, la media de las partículas se eyectan con mayor velocidad (alcanzando capas de aire de más altura y velocidad) y tienen mayor probabilidad de aerotransportarse (y no sedimentar de vuelta).

Por lo demás, en relación a la turbulencia detrás y a los costados de la rueda, se esperan torbellinos de mayor intensidad en vehículos que viajen a mayor velocidad. Luego, la turbulencia homogeniza el campo de velocidades en la dirección perpendicular al movimiento del vehículo, acercando las capas de aire de mayor velocidad a la superficie. Consecuentemente, la turbulencia producto del movimiento del vehículo acerca a la superficie del suelo capas de aire con mayor velocidad y acentúa el fenómeno de dispersión de material particulado.

c) Análisis de la distribución en la velocidad de las partículas suspendidas

Ahora, se realiza una discusión en base a la uniformidad de las velocidades $V_{x,part}$ y $V_{y,part}$. Para esto, se presentan primero los histogramas en la dirección X (Figura 26) e Y (Figura 27) de la velocidad de las partículas suspendidas, cuando la placa se mueve a 50 km/h. Los histogramas para las otras $V_{camión}$ se encuentran en el Anexo 7. A simple vista, se aprecia una distribución ancha en la dirección horizontal de la velocidad de suspensión de las partículas. No así en la dirección vertical, aunque tampoco se puede establecer la uniformidad en la velocidad de eyección de las partículas.

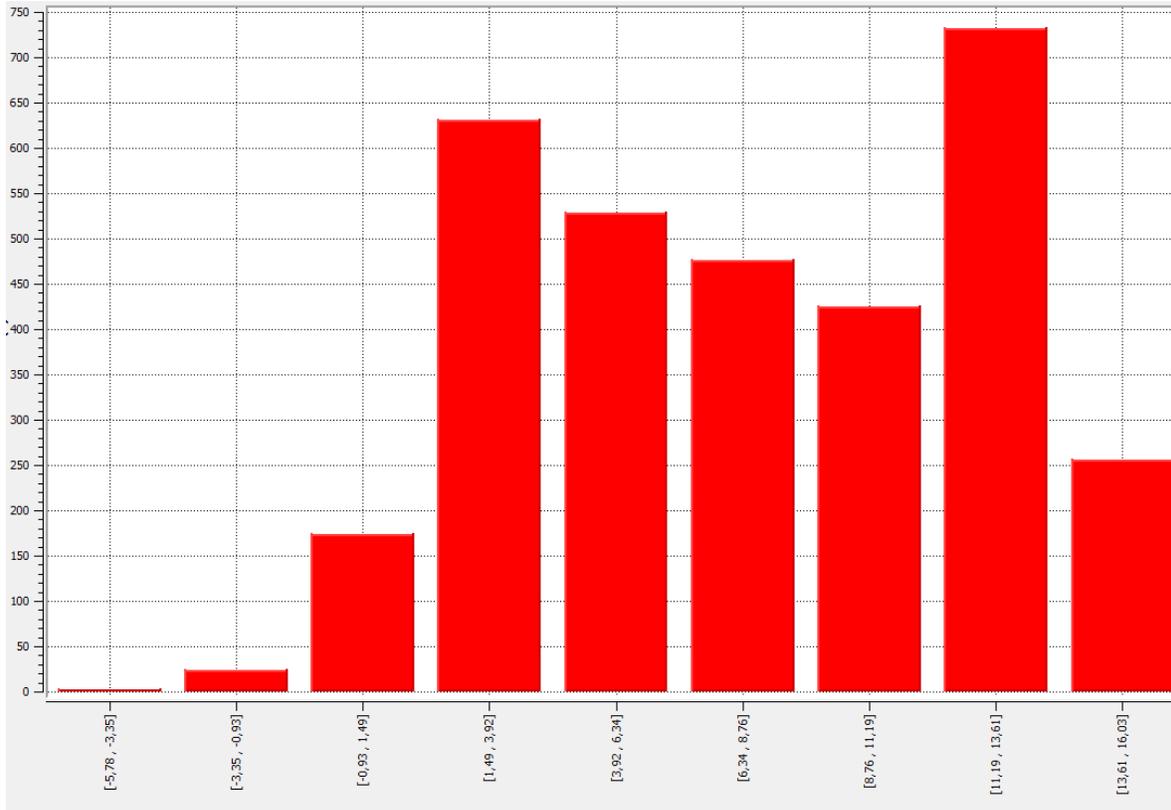


Figura 26. Histograma de la velocidad horizontal de partículas suspendidas por placa a 50 km/h

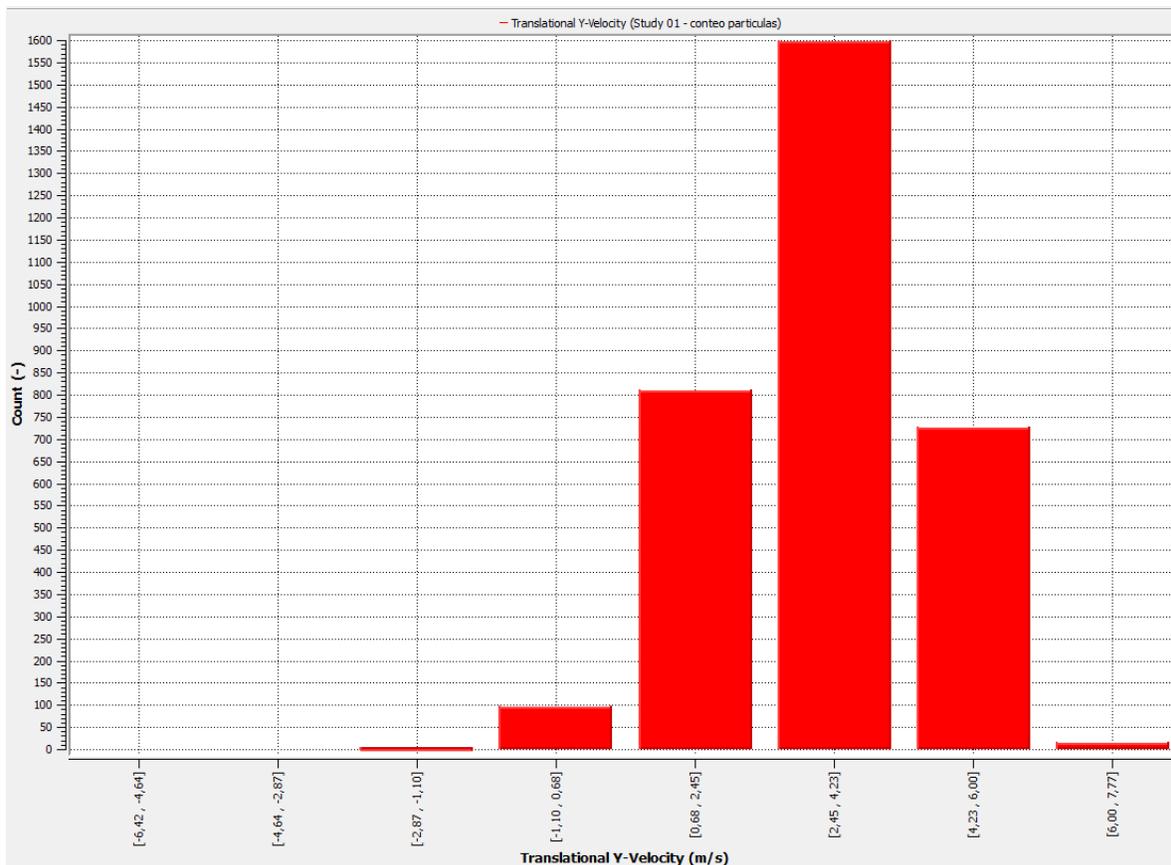


Figura 27. Histograma de la velocidad vertical de partículas suspendidas por placa a 50 km/h

Consecuentemente, se determina la velocidad media de las partículas suspendidas con los modelos V_{10} , V_{21} y V_{32} , para los casos de 10, 30 y 50 km/h de $V_{camión}$ (sobre los histogramas), para así conocer el grado de uniformidad de las variables $V_{x,part}$ y $V_{y,part}$. En la Tabla 51 se presentan los valores obtenidos con los modelos de velocidad, utilizando Ecuaciones 14 y 15.

Tabla 51. Velocidades $V_{x,part}$ y $V_{y,part}$ determinadas con los modelos V_{10} , V_{21} y V_{32} .

$V_{camión}$ [Km/h]	$V_{x,part}$ [m/s]			$V_{y,part}$ [m/s]		
	V_{10}	V_{21}	V_{32}	V_{10}	V_{21}	V_{32}
10	1,52	1,94	2,16	0,62	0,79	0,87
30	4,35	5,97	6,77	1,82	2,33	2,54
50	7,79	10,23	11,45	3,20	3,80	4,17

En las Figuras 29 y 30 se puede apreciar la distancia (euclidiana) entre los valores encontrados para los 3 modelos, en los 3 casos de velocidades $V_{camión}$, sobre la dirección horizontal y vertical respectivamente.

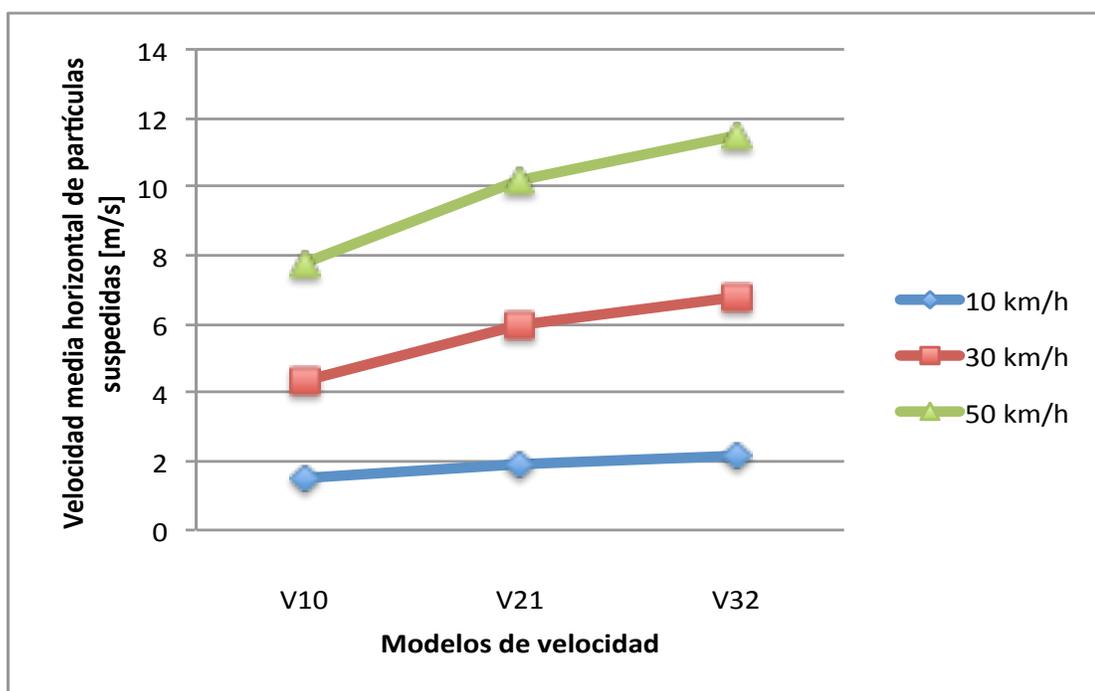


Figura 28. $V_{x,part}$ determinada con los modelos de velocidad V_{10} , V_{21} y V_{32} , para 10, 30 y 50 km/h de $V_{camión}$.

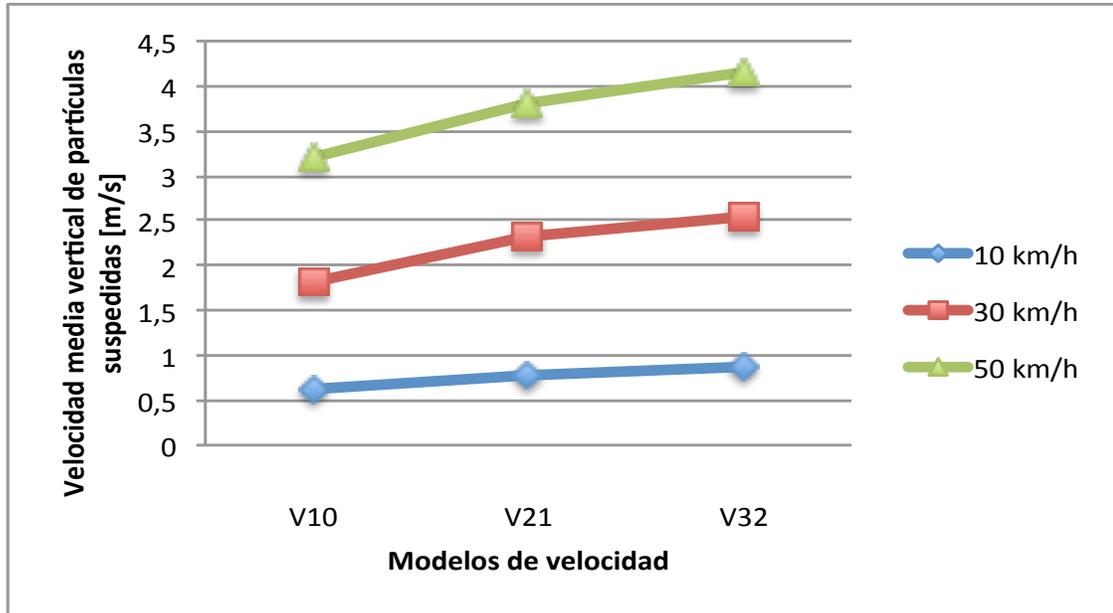


Figura 29. $V_{y,part}$ determinada con los modelos de velocidad V_{10} , V_{21} y V_{32} , para 10, 30 y 50 km/h de $V_{camión}$.

De acuerdo a los gráficos anteriores, los valores de $V_{x,part}$ y $V_{y,part}$ difieren entre un modelo y otro. En este esquema, se puede inferir que la distribución de la velocidad de las partículas suspendidas en ambas direcciones, no es de ningún modo uniforme (como sería si V_{10} , V_{21} y V_{32} fueran similares). Desde un punto de vista físico, se puede indicar que velocidad V_{10} (utilizada usualmente para la media de las partículas) no representa a las partículas eyectables.

Para establecer diferencias más claras sobre la uniformidad de la velocidad de las partículas suspendidas, en la Tabla 52 se indican las diferencias relativas entre los modelos de velocidad (V_{21} y V_{32}) con respecto a V_{10} para $V_{x,part}$ y $V_{y,part}$, a 10, 30 y 50 km/h de $V_{camión}$.

Tabla 52. Diferencia relativa entre modelos de velocidad c/r a V_{10} para $V_{x,part}$ y $V_{y,part}$, a 10, 30 y 50 km/h de $V_{camión}$

$V_{camión}$ [km/h]	Diferencia relativa con V_{10} [%]			
	$V_{x,part}$ [m/s]		$V_{y,part}$ [m/s]	
	V_{21}	V_{32}	V_{21}	V_{32}
10	28,15	42,21	26,56	39,84
30	37,21	55,50	28,45	39,96
50	31,37	47,05	18,57	30,00

De acuerdo a los valores obtenidos, aunque las diferencias son más acentuadas en dirección horizontal ($V_{32} \geq 1,42 \cdot V_{10}$), en dirección vertical las diferencias también son significativas ($V_{32} \geq 1,3 \cdot V_{10}$). En este sentido, se corrobora que el conjunto de partículas no está representado por la media de partículas suspendidas, para disgregarse (dirección x) como tampoco para eyectarse (dirección y). Más aún, entendiendo que V_{32} está sesgada a las velocidades máximas de la distribución, se puede indicar que entre las partículas suspendidas, las de máxima velocidad

tienen una probabilidad de aerotransportarse $\geq 30\%$ mayor que la media de partículas (en el rango 10-50 km/h de $V_{camión}$).

En definitiva, la fracción eyectable no se puede caracterizar por el modelo V_{10} para el caso de $V_{camión}$ entre 10-50 km/h. Se tendrá con seguridad, una fracción de partículas con mayor grado de dispersión y eyección que sus vecinas. Por otro lado, el impacto del aire no será el mismo entre las partículas. Es decir, aquellas partículas con una mayor velocidad de eyección alcanzarán capas de aire más lejanas de la superficie y las afectadas por corrientes de aire a mayor velocidad, serán aerotransportadas con mayor probabilidad.

(iii) Impacto de la carga del camión en PE

Se evalúa el arrastre de placa con cargas equivalentes a 100, 200, 300 y 400 t, considerando el caso de 300 t como el caso base. Luego, se determina el material suspendido para cada caso (Tabla 53) y se observa un incremento en el PE con el aumento de la carga aplicada.

Tabla 53. PE en función de carga camión, con peso camión entre 100-400 t

Carga [t]	PE Placa [kg/km](x10 ⁻³)	PE Banda [t/km]	Variación c/r a caso 300 t [%]
100	2,10	4,27	-58
200	3,26	6,64	-34
300	4,95	10,07	0
400	5,49	11,00	11

En la Figura 30, se despliega el PE en función de la carga total del camión. Aquí se observa que el aumento de la carga externa determina un mayor potencial de material particulado.

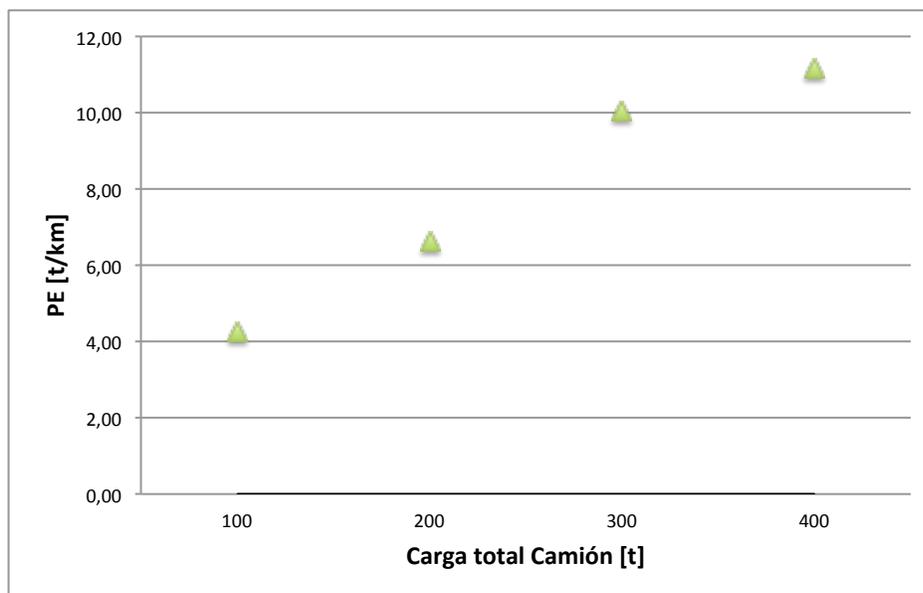


Figura 30. PE en función de la carga total del camión, con peso camión entre 100-400 t

Haciendo un ajuste sobre los puntos medidos se encuentra una relación a la potencia entre el PE y el rango de cargas entre 100 y 400 t, con un $R^2 = 0,98$, como se indica en la Ecuación 25.

$$PE \left[\frac{t}{km} \right] = 4,22 \cdot (Carga Camión [t])^{0,73} \quad [25]$$

(iv) Impacto de la cohesión en PE

Se incorpora el efecto de cohesión en el medio granular para evaluar diferencias en términos del PE para el sistema rueda-suelo. El parámetro de adhesión se modifica y se desarrollan los casos Adh1, Adh100 y Adh1000. Se aprecia una reducción del PE al aumentar la cohesión del medio granular (Tabla 54).

Tabla 54. PE para distintos grados de adhesión del medio granular, con Adh entre 0 y 1000

Adhesión	PE Placa [kg/km] ($\times 10^{-3}$)	PE Banda [t/km]	Reducción [%]
Adh 0	4,95	10,07	0,00
Adh 1	4,51	9,18	-8,89
Adh 100	1,65	3,35	-66,72
Adh 1000	1,54	3,14	-68,81

El efecto de la cohesión puede apreciarse en forma gráfica en la Figura 31, donde los principales cambios ocurren al modificar el parámetro de adhesión entre 1 y 100 veces. Para adhesiones mayores, un aumento en la cohesión no involucra reducciones significativas en el PE. Es decir, luego de aumentar 1000 veces la cohesión del suelo, la emisión de material particulado continúa existiendo ($PE > 3$ t/km) y se hace necesario ordenes de magnitud muy superiores para abatir el problema completamente.

Visto de otro modo, el caso Adh 100 representa un punto de inflexión en el PE. Es decir, para condiciones de cohesión menores o iguales a dicho valor, las fuerzas de cohesión influyen en el comportamiento del medio granular. Luego de dicho valor, prácticamente la deformación del suelo y PE no dependen del parámetro de adhesión.

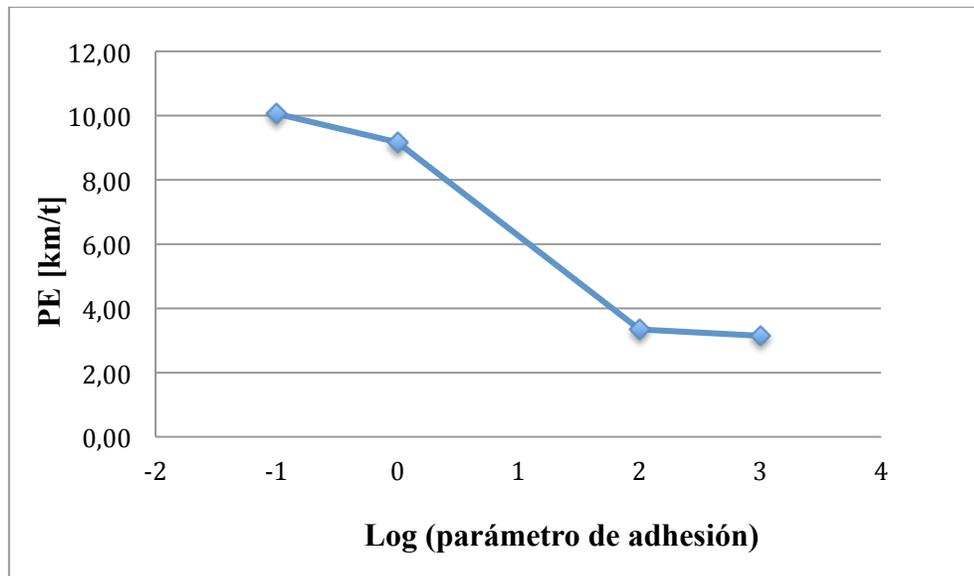


Figura 31. PE en función de la cohesión del medio granular, con Adh entre 0 y 1000

Los resultados permiten indicar que para un suelo mejor agregado (mayor cohesión), en las mismas condiciones de carga y velocidad de un camión las emisiones de particulado bajan. Dado que, son pocos los puntos medidos y distribuidos sin una tendencia clara, no se puede establecer una relación cuantitativa. Sin embargo, la principal reducción de PE ocurre al aumentar entre 1 y 100 el parámetro de adhesión entre las partículas (en casi un 70%). Luego, hasta 1000 veces, no se aprecian grandes mejoras.

4.3 Programa de supresión de polvo

4.3.1 Experimentos de Laboratorio

La Tabla 55 entrega el valor de las tasas de evaporación determinadas para los distintos casos de humectación sobre las muestras con y sin sólido (cuarzo molido fino >200#). Las estimaciones se hicieron haciendo un ajuste lineal sobre las 15 mediciones hechas sobre cada muestra. El detalle sobre las mediciones de cada muestra se encuentra en el Anexo 8. La estimación de la tasa de evaporación se obtuvo con $R^2 > 0,98$.

Tabla 55. Tasa de evaporación de distintas soluciones humectantes sobre muestras con y sin cuarzo molido

Solución de humectación	Tasa evaporación [g/min·cm ²] (x10 ⁻⁴)	
	Muestras con sólido	Muestras sin sólido
Agua destilada	10,83	11,04
Agua con ácido	9,65	10,31
Floculante en medio básico	8,30	10,74
Floculante en medio ácido	8,86	10,70
Emulsión de polímero	6,65	12,91

Se observa el descenso de la tasa de evaporación de agua, en presencia de ácido y floculante (en medio ácido y básico). Esto ocurre tanto para las muestras con y sin material sólido. Las muestras con emulsión representan un caso aparte, ya que fueron aplicadas sin dilución con agua. Por ende, la evaporación en este tipo de muestras está asociada a la volatilidad intrínseca del reactivo y su interacción con las partículas de cuarzo.

La Tabla 56 presenta la diferencia relativa entre la tasa de evaporación en la muestra con agua (caso base) y las muestras restantes. Las diferencias de evaporación para cada caso se realizan tomando el promedio entre las muestras y sus duplicados. En presencia de cuarzo molido las diferencias relativas con el caso base se acentúan, donde la presencia de ácido reduce en cerca del 10% la evaporación y el floculante en cerca del doble de dicho valor. Por otra parte, se aprecia como el polímero actúa en un sentido opuesto cuando se encuentra en contacto con material sólido y en ausencia de este.

Tabla 56. Diferencia de evaporación de distintas soluciones humectantes sobre muestras con y sin cuarzo molido

Solución de humectación	Diferencia relativa de evaporación [%]	
	Muestras con sólido	Muestras sin sólido
Agua con ácido	-9,84	-6,57
Floculante en medio básico	-22,95	-2,72
Floculante en medio ácido	-18,03	-3,04
Emulsión de polímero	-37,54	16,99

Discusión sobre los experimentos de evaporación

En presencia de cuarzo molido se observan tasas de evaporación inferiores a las encontradas en las muestras sin material sólido para todos los casos estudiados. Luego, las diferencias entre las tasas de evaporación se deben en principio a la propiedad coligativa del ascenso ebulloscópico es decir, en presencia de un soluto no volátil se retarda la evaporación del solvente.

Por otro lado, la adición de un floculante y la modificación del pH tienen un efecto retardante del fenómeno de evaporación tanto en presencia de material sólido como sin este. Sin embargo, las diferencias relativas de evaporación con respecto al caso base (humectación con agua destilada), indican que este efecto se hace mucho más perceptible en las muestras con material sólido. De esta forma, se puede inferir que la presencia de ácido y en mayor medida la de floculante, promueve el encapsulamiento de agua entre las partículas a través de su aglomeración. Particularmente a un pH más ácido ($\text{pH} < 2$), se encuentra más próximo del punto isoeléctrico del cuarzo (Alves y Baptista, 2014), donde el estado dispersivo de desestabiliza y se promueve la aglomeración (Somasundaran, 1978). Por ende, las partículas se agregan con más fuerza y con ello, parte del volumen de agua queda atrapado en los intraporos del material. Del mismo modo, los floculantes tienden a bajar la tensión superficial del agua, aumentando la presión capilar del sólido. Consecuentemente, aumentan la cantidad de agua capaz de retener en los microporos y se retarda la evaporación (Tschapek y Boggio, 1981).

La introducción de un polímero (emulsión de acetato de polivinilo con formaldehído) presenta un efecto inverso en las tasas de evaporación cuando se tiene o no material sólido. En las muestras sin sólido, las tasas de evaporación son más altas mientras que en presencia de cuarzo molido, sucede todo lo contrario. Este comportamiento puede, a priori, atribuirse a dos situaciones simultáneas:

- (1) En presencia de sólido, la emulsión de polímero reacciona con este recubriéndolo e impide que parte del agua escape en forma de vapor (sellando la superficie).
- (2) En ausencia de cuarzo, el polímero simplemente se evapora debido a la volatilidad del alcohol acetato y el agua (formulación del reactivo).

En definitiva, teniendo presente la importancia de la humedad en la cohesión del suelo y en evitar la pérdida de fino, una estrategia de supresión de polvo debiese incorporar sustancias como floculantes o un medio ácido para retardar evaporación de humedad.

4.3.2 Diseño Conceptual

Con toda la información recabada se busca proponer una estrategia de carácter preventivo al problema de desgaste de caminos mineros y la generación de material particulado fino bajo 10 μm . Es decir, llevar al mínimo los costos por mantenciones, cumplir normativa sobre material particulado y por sobre todo, mantener en óptimas condiciones el camino. Por esta razón, de acuerdo a la información provista por personas que trabajan en áreas relacionadas con caminos mineros, la literatura disponible, las simulaciones en RockyDEM® y los resultados de laboratorio se plantea un diseño conceptual para resolver problema del polvo en los caminos mineros (Figura 32).

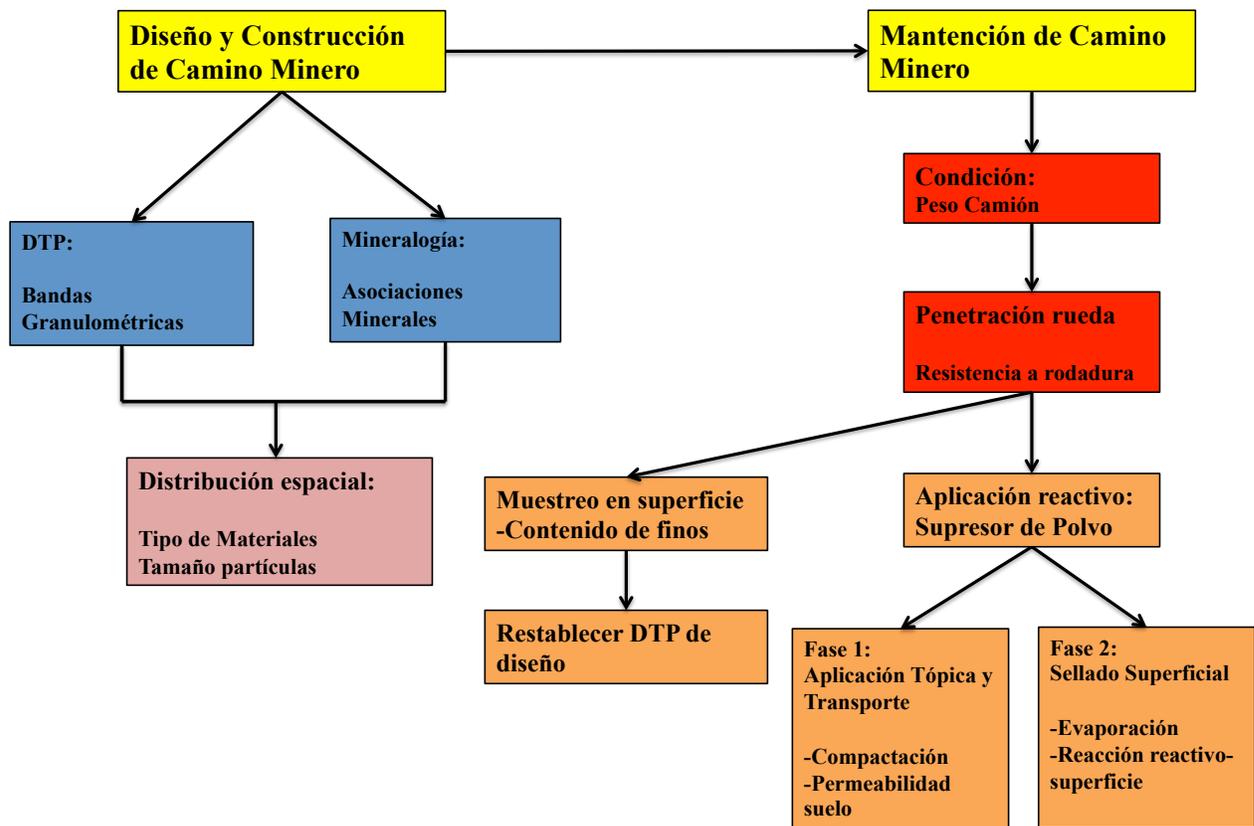


Figura 32. Diseño conceptual para la construcción y mantenimiento de un camino minero

El Diseño conceptual destaca:

- Quedó al descubierto la posibilidad de originar partículas finas a partir de la abrasión entre partículas con distinta dureza es decir, mineralogía. Luego, como parte de un diseño espacial se propone que la zona en contacto directo con ruedas debiese ser diseñada, construida y mantenida con materiales de asociaciones minerales de baja susceptibilidad a la abrasión entre sí (baja diferencia relativa en su dureza). Una alternativa económica sería extender una carpeta solo de partículas de cuarzo, y evitar materiales de dureza inferior. Esta medida controla parte del fino originado por fragmentación no así, el producido por la desagregación del medio granular.
- De acuerdo a los testimonios de entrevistas se destaca como una variable que optimiza la calidad de los caminos mineros el empleo de bandas granulométricas, es decir, la importancia de la distribución de tamaño de partículas (DTP) en la construcción de la carpeta de rodado. Con una distribución ancha de tamaños se puede lograr una mayor densificación del suelo y consecuentemente, un suelo más resistente a deformarse. Más aún, con un suelo de tipo “well-graded” (distribución granulométrica ancha), las fuerzas de contacto entre las partículas se reducen (número de coordinación de contacto entre partículas aumenta) y la probabilidad de ruptura de las partículas parentales decrece hasta en 5/6 (Shi et al, 2015).
- Sin embargo, puede presentarse el fenómeno de segregación por tamaños, es decir, que finos desciendan por los poros y queden ubicados en la zona inferior del medio granular

cuando hay vibración (Drnevich et al, 2007). Esto podría ser un problema cuando la rueda penetra, ya que partículas de capas inferiores de la carpeta de rodado quedarían expuestas al cizalle de estas mismas y a la acción del aire. Una alternativa mencionada en la literatura es compactar primero partículas gruesas y luego, añadir las partículas finas (Lade et al, 1998), asegurando la máxima densificación y mínima segregación. Sería necesario hacer pruebas experimentales para ver si realmente es una medida efectiva. Propuesta se ilustra en la Figura 33.

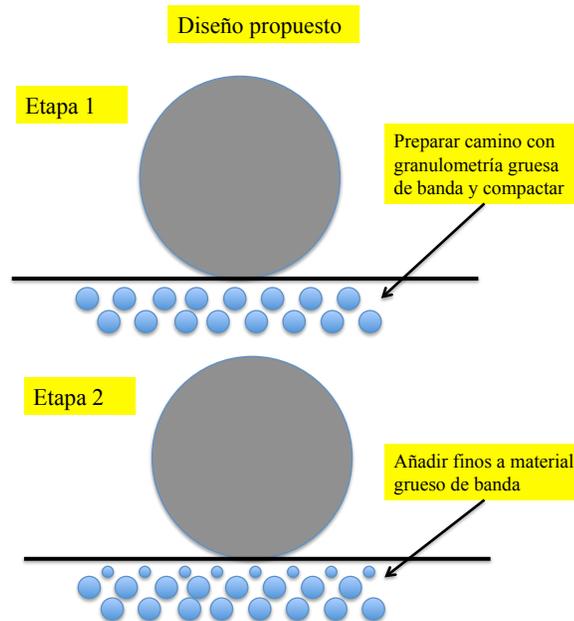


Figura 33. Construcción de camino minero en base a la variable de distribución de tamaño de partícula

- Como actividad de mantenimiento de carácter preventivo es óptimo conservar las condiciones de la superficie del camino con la distribución granulométrica de diseño. Es decir, muestrear periódicamente el contenido de finos superficial y reparar si proporción de este tamaño es superior a la de camino original. Esto, principalmente en zona en contacto directo con ruedas de camiones mineros. Recordar que una distribución granulométrica con exceso de finos es una referencia alarmante del potencial de material particulado del camino (si está expuesto al tránsito de vehículos y condiciones meteorológicas desfavorables).
- Medir periódicamente la penetración de la rueda en base al parámetro resistencia de rodadura (RR). Mantener valor en el rango óptimo de 2-3% y asegurar así una buena rodadura (baja rugosidad) y disgregación de material superficial mínimo. De esta forma, se reduce la propensión a hundir ruedas de camiones, se limita el desprendimiento de fino y consecuentemente, se evita la formación de material particulado.
- Por último, con la penetración de la rueda estimada por RockyDEM® (de acuerdo a la carga del camión), se conoce la profundidad de suelo expuesta a disgregación y emisión de MP10. Luego, con el diseño se busca que una aplicación tópica de supresor de polvo

sea capaz de cubrir toda la zona afectada. En principio, esto no es posible ya que la compactación del suelo implica una permeabilidad muy baja del medio granular. Luego, habría que ver si es posible jugar con estas dos últimas variables para lograr un mayor grado de percolación de la solución o reactivo de supresión. Asimismo, tener un control sobre la tasa de evaporación del reactivo aplicado es decir, hacer efectiva su reacción con la superficie antes de que pueda evaporarse.

Capítulo 5: Conclusiones

El trabajo analiza críticamente el problema de la generación de polvo en las faenas mineras chilenas y particularmente, en los caminos mineros. Integrado por análisis de tipo conceptual, experimental y numéricos, puede indicarse que cumple con el objetivo general planteado. Resumiendo la información comprendida en todo el desarrollo, se destaca la falta de ingeniería en el diseño y construcción de los caminos mineros de faenas chilenas. Del conjunto de estudios y la estrategia propuesta, se destacan las variables de distribución granulométrica y mineralogía como fundamentales para definir la calidad de los caminos, en relación a la generación de polvo. En adelante, se encuentran las conclusiones específicas de cada sección del trabajo.

SECCIÓN: FUENTES DE EMISIÓN DE POLVO EN FAENAS MINEROS

La generación de polvo en las faenas mineras tiene como principal foco los caminos mineros, es decir, de transporte de material con camiones de alto tonelaje. Sin embargo, estimaciones entregadas por el SEA pueden estar sesgadas de la realidad en el caso de los caminos, porque no consideran variables fundamentales como, el impacto de la distribución granulométrica y la mineralogía. Por lo demás, se evidencia la falta de estandarización en la entrega de documentos, falta grave para poder comparar y analizar proyectos.

Por otro lado, en relación a la planta, esta toma relevancia cuando afecta la salud operacional de los trabajadores. Luego, de todos los puntos de muestreo solo debiesen ser abordados como críticos aquellos con circulación de personal. Más aún, en base al mapa de polvo de la faena El Soldado, se encuentra una relación lineal entre la concentración de sílice (C_{Silice}) y la de polvo no clasificado ($C_{Polvo\ no\ clasificado}$). Luego, al menos para esta faena se puede proponer la medición de una de estas variables sin necesidad de medir la otra.

Por último, el análisis QEMSCAM sobre el camino de faena “Los Pelambres” destaca el mecanismo de abrasión entre partículas de distinta dureza como posible causante del material particulado en los caminos mineros. Luego, a raíz de diferencias en la mineralogía se puede tener mayor o menor susceptibilidad a la generación de polvo.

La granulometría de la muestra de camino tomada evidenció diferencias en el contenido de fino (60% bajo $80\ \mu m$) con respecto al valor de diseño de camino (orden del 10% bajo $80\ \mu m$). Se evidencia entonces, la producción de fino con el uso del camino muestreado.

SECCIÓN: ENTREVISTAS A EXPERTOS EN CAMINOS MINEROS

Queda en evidencia de los testimonios entregados por profesionales del rubro de caminos mineros la poca inversión inicial en caminos de la faena y la dependencia de frecuentes mantenciones con la aplicación de supresores de polvo. Se puso de manifiesto que la práctica difiere considerablemente de la teoría presente sobre el diseño y construcción de caminos

mineros. Se destaca el uso de bandas granulométricas como una medida aconsejable en el diseño y construcción de caminos mineros.

SECCIÓN ESTUDIO CAMINOS: Fenómeno Rueda-Suelo

Del sistema implementado en RockyDEM® se determinó que en el suelo seco la penetración de las ruedas oscila entre 1,5 y 6,0 cm, cuando transitan camiones cuyo peso oscila entre 100 y 400 t, respectivamente. Es decir, se alcanza mayor profundidad cuando se tiene un mayor peso transferido por las ruedas a la superficie.

En ausencia de aire, el potencial de emisión se observa invariable frente al movimiento de una rueda con alto tonelaje (300 t) y entrega cantidades del orden de 10 t/km para la velocidad del camión en el rango de 10-50 km/h. Sin embargo, la velocidad de las partículas suspendidas depende de la velocidad del camión. La media de las partículas se suspende con una velocidad horizontal y vertical equivalente al 59,05% y 23,69% de la velocidad del camión respectivamente. Es decir, la velocidad del camión no afecta el volumen de material dispersado pero sí su grado de eyección. En complemento, es la velocidad del aire cercana a las ruedas la componente que acentúa la dispersión de las partículas suspendidas.

El hundimiento de la rueda es sinónimo de la ruptura de agregados y se acentúa con la carga del camión. Mientras el arrastre del vehículo significa el despegue de partículas disgregadas y se incrementa indirectamente con la velocidad del vehículo a través de su interacción con el aire.

Por último, con respecto al efecto de la cohesión, la reducción más significativa del PE (de casi un 70%) se aprecia al aumentar adhesión hasta 100 veces el valor base (suelo seco). Luego, hasta 1000 veces, no se aprecian grandes mejoras.

SECCIÓN: PROGRAMA DE SUPRESIÓN DE POLVO

Laboratorio sobre tasa de evaporación

La adición de floculante sobre cuarzo fino molido y humectado, reduce la pérdida de humedad en cerca del 20% mientras que con ácido, de un 10%. Este comportamiento se explica por el encapsulamiento de agua durante la aglomeración de partículas.

Evaluación de penetración solución tópica de un supresor

Las soluciones aplicadas para supresión de polvo tardan del orden de 200 h en percolar por toda la zona afectada por una rueda (caso 300 t) pensando en limo compactado. Luego, son de carácter superficial y toda estrategia de supresión debe enfocar su eficiencia en combinarse con el suelo para sellar en forma más resistente y permanente en el tiempo.

Diseño Conceptual

Se esperan caminos de mejor calidad y menor pérdida de fino como material particulado atacando el origen del problema: la construcción de los caminos. Incorporar en el diseño aspectos técnicos como la banda granulométrica óptima y control de abrasión por diferencias en las asociaciones minerales, tal que se podrían asegurar mayores estándares en la ingeniería de caminos mineros. Al mismo tiempo se propone el monitoreo frecuente de la resistencia a la rodadura o su equivalente en penetración de la rueda para anticiparse a los deterioros que surgen con el uso de los caminos. Por lo demás, es una práctica aconsejable muestrear contenido de fino superficial y mantener en valores cercanos al de diseño. Con este tipo de medidas se espera reducir emisiones de polvo, la frecuencia de mantención y los costos de prácticas correctivas.

Capítulo 6: Recomendaciones

Para trabajos futuros se recomienda realizar estudios experimentales sobre las variables de mineralogía, granulometría y forma de las partículas, indicadas como fundamentales en el diseño y construcción de los caminos mineros. Es vital determinar qué minerales son potencialmente más susceptibles a formar material particulado fino, así como la distribución de tamaños que frente a la compresión de la rueda emite más polvo. En este trabajo se dedujo su importancia tan solo en forma conceptual y hace falta información cuantitativa al respecto. Se espera así, proveer de mejores estrategias para construir caminos de mejor calidad y reducir el problema del polvo.

Con relación a los estudios numéricos, se propone desarrollar simulaciones con más información acerca de la distribución granulométrica exacta de las carpetas de rodado de algunas faenas y no tan solo de partículas finas ($10\ \mu\text{m}$). Proponer un sistema capaz de incorporar con mayor precisión el área de pisada de las ruedas y la distribución de presiones de los neumáticos así como la distribución de cargas disímil entre las ruedas de un camión para, de este modo, abordar el fenómeno rueda-suelo en forma más cercana a la realidad. Desarrollar además, simulaciones en un rango más amplio sobre las variables de carga, velocidad y grado de cohesión. De este modo se tendría un mayor número de puntos de medición e inferir relaciones más robustas sobre las variables de penetración y potencial de emisión de un camino minero. Por otro lado, incluir directamente el efecto del fluido en el suelo cerca de las ruedas de un camión como una variable imprescindible en la suspensión de material particulado. En adición, evaluar el problema rueda-suelo en condición transiente de modo que, se puede abordar las condiciones de emisión de polvo durante el frenado e inicio del movimiento de un camión de alto tonelaje.

Por otra parte, entendiendo que los supresores actúan superficialmente en los caminos, sería útil conocer qué reacciones ocurren entre el supresor y la carpeta y, cuáles son las que aumentan la resistencia al cizalle de las ruedas de camiones mineros. Todo esto, con el objetivo de anticipar la duración de un programa de supresión y proponer estrategias con menor frecuencia de mantenciones, reducir costos a largo plazo y bajar la propensión de los caminos para emitir polvo.

En definitiva, se deja en claro que los trabajos desarrollados acá fueron abordados como preliminares y referenciales sobre las variables de control fundamentales en la problemática del polvo de las faenas mineras chilenas de alta cordillera y en particular, de los caminos mineros con tránsito de alto tonelaje.

Bibliografía

Ai J, Chen J.F, Rotter J.M, Ooi J.Y. Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations, 2011. Powder Technology. Vol. 206: 269-282.

Alfaro S. Influence of soil texture on the binding energies of fine mineral dust particles potentially released by wind erosion, 2008. Geomorphology Vol. 93:157–167

Alves J.A y Baptista J. The Behavior of Zeta Potential of Silica Suspensions, 2014. New Journal of Glass and Ceramics, 4, 29-37.

Autopista.es. Michelin-goodyear neumáticos mas grandes mundo. <www.autopista.es> [consulta: 10 Mayo, 2015].

Azzoni A. Y De Freitas M.H. Experimentally Gained Parameters, Decisive for Rock Fall Analysis, 1995. Rock Mech. Rock Engng. 28(2), 111-124.

Carter M. y Bentley S.P. Correlations of soil properties, 1991. Pentech Press.

Chang Ch., Chao S., Chang Y. Estimates of Elastic modulo for granular material with anisotropic random packing structure, 1995. Int.J.Solids Structures. Vol 32, 1989-2008.

Chau K.T, Wong R.H.C y Lee C.F. Rock Fall problems in Hong Kong and some new experimental results for coefficients of restitution, 1998. Int.J.R. Mech Mng Sc. Vol 35: 662-663.

Chen J., Fu X., Wegman E. Real-Time Simulation of Dust Behavior Generated by a Fast Traveling Vehicle. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, 1999. Vol. 9 (2): 81–104.

Cleary P. DEM simulation of industrial particle flows: case studies of dragline excavators, mixing in tumblers and centrifugal mills, 2000. Powder Technology Vol 109: 83-104.

CONAMA. Norma de calidad primaria para MP10 [en línea] <<http://sinca.mm.gob.cl/uploads/documentos/73881f634e74a87884b626007d5e585f.pdf>> [consulta: 15 Agosto, 2015].

Cecala A., Schall J., O'Brien A. Colinet J., Fox W., Franta R., Joy J., Reed O., Reeser P., Rounds J., Schultz M. Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing, 2012. MINE Safety and Health Administration (MSHA). 314 pages.

De Castro. Physical an Chemical Stability of Admixtures in Unpaved Road Soils, 1996. North Dakota State University, Bismark, North Dakota.

Dixon J.B y Schulze D.J. Soil Mineralogy with Environmental Applications, 2002. SSSA Book

series #7, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.

Dysli M. y Steiner W. Correlations in soil mechanics, 2011. PPUR

Drnevich V., Evans A. y Prochaska A. A study of effective soil compaction control of granular soils, 2007. Indiana Department of Transportation.

Geotechdata. Swiss Standard SN670010b. Characteristics coefficients of soils. Association of Swiss Road and Traffic Engineers [en línea]. <<http://www.geotechdata.info/parameter/permeability.html>> [consulta: 15 Julio, 2015].

Gleisner S., Albornoz J., Graell T, Halles F. The economic impact of haul road maintenance strategies in the success of long-term mine plans, 2016.

Grima A.P y Wypych P.W . Development and validation of calibration methods for discrete element modelling, 2011. Granular Matter, 13,127-132.

Higuera P. y Oyarzun R. Mineralogía y Residuos Mineros [en línea]. <http://www.uclm.es/users/higuera/MGA/Tema05/Tema05_Res_Min_1_1.htm>. [consulta: 10 Mayo, 2015]

Holman P. Caterpillar Haul Road Design and Management, 2006. Big Iron University. St. Charles, IL.

Holtz, R. D., W. Kovacs. Introduction to Geotechnical Engineering, 1981. Prentice Halls.

Karnopp D., Margolis M. y Rosenberg R. Appendix: System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems, Fifth Edition, 2012.

King R.P. Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems, 2001.

Kok J.F, Parteli E.J.R, Michaels T.I y Bou Karam D.. The physics of wind- blown sand and dust , 2012. Rep. Prog. Phys. Vol.75.

Komatsu, 2015. Komatsu 930-E [en línea]. <http://www.komatsu.com/ce/products/pdfs/KAC_930E-4SE.pdf> [consulta: 2 Junio, 2015]

Lade P., Liggio C. y Yamamuro J. Effects of Non-Plastic Fines on Minimum and Maximum Void Ratios of Sand, 1998. Geotechnical Testing Journal. Vol. 21: 336–347.

Liu S y Sun D.A. Simulating the collapse of unsaturated soil by DEM, 2002. Int.J.Numer.Anal.Meth.Geomech. Vol. 26:633–646.

Luding S. Contact models for very loose granular materials, 2007. Symposium on Multiscale Problems in Multibody System Contacts, Springer, p. 135-150.

- Marticorena B. y Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *Journal of geophysical research*. Vol. 100. 16415-16430.
- MMA. Diario oficial de la Republica de Chile. Cuerpo I - 24. Lunes 9 de Mayo de 2011 [en línea]. [consulta: 12 Mayo, 2015].
- MOP. Manual de Carreteras, Volumen 8: Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control, 2015. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad.
- Nicholson K.W, Branson J.R. Gless P., Cannell R.J. The Effects of Vehicle Activity on Particle Resuspension, 1989. *J. Aerosol Sci.* Vol 20: 1425-1428.
- Nickling W.G y McKenna Neuman C. Aeolian sediment transport *Geomorphology of Desert Environments*, 2009. Capítulo 17: 517-555.
- O'Sullivan C. Particulate Discrete Element Modelling. *Applied Geotechnics* . Vol.4. Spon Press
- Organiscak J y Reed W. Evaluation of dust exposure to truck drivers following the lead haul truck, 2006.
- Piras L., Dentoni V., Massacci G. y Lowndes I. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2014 Vol. 28, No. 5, 323–341.
- Pough F. A field guide to rocks and minerals, 1995. Quinta Edición.
- Rao K.S y Gunter R.L. "Turbulence and dispersion modeling near highways." *Atmospheric Environment*, 2002. Vol.27: 4337-4346.
- RockyDEM®. Rocky user manual 2.30, 2013. Granular Dynamics International.
- Sawicki A. y Swidzinski W. Elastic moduli of particulate materials, 1998. *Powder Technology*. Vol. 96: 24-32.
- Sauter J. Determining the Efficiency of Atomization by its Fineness and Uniformity, 1926. *Aeronautics Library*, California Institute of Technology.
- Smith W., Melanz D., Senatore C., Iagnemma K., Peng H. Comparison of discrete element method and traditional modeling methods for steady-state wheel-terrain interaction of small vehicles, 2014. *J. Terramechanics*. 56: 61-75.
- Somasundaran P. Principles of Flocculation, Dispersion and Selective Flocculation. 1978; Vol. 48: 947-970.
- Shi D., Zheng L., Xue J., Sun J. DEM Modeling of Particle Breakage in Silica Sands under

- One-Dimensional Compression, 2015. *Acta Mechanica solida sónica*, Vol. 29: 78-94.
- Tannant D.D y Regensburg B. Guidelines for mine haul road design, 2001. School of Mining and Petroleum Engineering Department of Civil and Environmental Engineering University of Alberta.
- Tavares L.M, King R.P. Single-particle fracture under impact loading, 1998. *Int. J. Miner. Process.* Vol. 54:1–28
- Thecontactpatch. C.2020 The contact patch [en línea]. <<http://the-contact-patch.com/book/road/c2020-the-contact-patch>> [consulta: 20 Julio, 2015]
- Thompson R.J, Visser A.T. Designing and managing unpaved opencast mine haul roads for opencast mine haul roads for optimum performance, 1999. SME Annual Meeting, Denver, Colorado.
- Thompson R.J, Visser A.T. Mine haul road maintenance management systems, 2003. *J.S Afr. Inst. Min. Metall.* Vol. 103: 303-312.
- Thompson R.J, Visser A.T. Selection, performance and economic evaluation of dust palliatives on surface mine haul roads, 2007. *J.S Afr. Inst. Min. Metall.* Vol 107: 435-450.
- Thompson R.J. Contributions From Improved Surface Mine Haulage Road Design, Operation and Management Techniques To Sustainable Development, 2010. Sustainable Mining Conference 2010.
- Tong X. , Luke E. y Smith R. Sensitivity studies on particle emissions and transport around a moving vehicle, 2011. Proceedings. India Ground systems engineering and technology symposium (GVSETS).
- Tschapek M., Boggio L. Surfactants and soil water evaporation and migration, 1981. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenkd.* Vol.144: 112-120
- US EPA. Ch.13.2.2 “Unpaved Road”, Compilation of air pollution Emission Factors (AP-42) 2006. U.S.EPA Research Triangle Park, N.C.
- Valenzuela P. , Palma J. ,Vega S. Dust suppressant treatments. Quality control, 2014, *Journal of Construction.* Vol.13(3): 27 – 35.
- Vorobieff G. Chemical Binders used in Australia, 2004. AustStab. NZIHT Stabilisation of road pavements seminars.
- Walton O., Braun R. Viscosity, granular temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks. *J. of Rheology* 1986; 30 : 949-980.

Zimon A. Adhesion of dust and powder 1982. Springer US.

Anexos

Anexo 1: Estudio de emisiones en faenas mineras chilenas

En la Tabla 57 se indica el contenido de finos en caminos mineros de algunas faenas mineras chilenas. A excepción de la Mina Óxidos Encuentro, el valor de este parámetro es menor o igual al 10%. Luego, la mayor contribución porcentual de emisiones por parte de caminos (apreciada en el gráfico anterior).

Tabla 57. Contenido de finos en caminos mineros de faenas chilenas

Faena Minera	Contenido Finos [%]
Esperanza	2,8-4,1
Los Colorados	5
Antucoya	10
Sierra Gorda	5
Zaldívar	2
Óxidos Encuentro	Interior rajo: 20 Transporte mineral: 26,9 fuera de mina: 9,6
Franke	5
Santo Domingo	8,5
El Espino	10

Las emisiones totales de MP10 guardan una relación del orden de 10^{-5} toneladas por tonelada de material extraído del rajo (Tabla 58). Sin embargo, el valor encontrado varía entre $2,77 \cdot 10^{-5}$ y $9,41 \cdot 10^{-5}$. De esta forma, los volúmenes de emisión de polvo son estrictamente dependientes a cada faena minera. Minera Esperanza y Antucoya fueron excluidos de este análisis por falta de información acerca de la tasa de extracción de material en sus faenas.

Tabla 58. Factor de emisión MP10 por Extracción Material para faenas estudiadas

Faena Minera	Material Extraído [Mt/año]	Emisiones Totales MP10 [ton/año]	Factor Emisión/Extracción ($\times 10^{-5}$)
Mina Los Colorados	84,00	2419,82	2,88
Mina Sierra Gorda	69,35	6337,13	9,14
Mina Zaldívar	80,30	4292,00	5,34
Mina Óxidos Encuentro	41,98	3950,33	9,41
Mina Franke	9,54	264,60	2,77
Mina El Espino	51,00	3491,78	6,85

Haciendo estimaciones sobre un factor de relación entre las emisiones de MP10 procedentes de la planta y el ritmo de mineral procesado, se aprecia una relación del orden de 10^{-5} toneladas de polvo emitido en la planta por tonelada de mineral procesado (Tabla 59).

Tabla 59. Factor de emisión MP10 en planta por mineral procesado en faenas estudiadas

Faena Minera	Mineral Procesado [ktpd]	Emisiones Planta [tpd]	Factor Emisión/Procesamiento ($\times 10^{-5}$)
Mina Esperanza	88,00	2,08	2,37
Mina Los Colorados	28,50	1,08	3,78
Mina Antucoya	134,00	3,30	2,46
Mina Sierra Gorda	110,00	2,59	2,36
Mina Zaldívar	50,00	2,64	5,29
Mina Óxidos Encuentro	65,00	0,61	0,93
Mina Franke	11,10	0,17	1,57
Mina Santo Domingo	65,00	0,24	0,36
Mina El Espino	26,30	1,87	7,11

Se presenta una descripción resumen de los 10 proyectos mineros extraídos del SEA para estudios de MP10 (Tabla 60).

Tabla 60. Descripción de Faenas Mineras extraídas del SEA para estudios de MP10

Faena Minera	Material Extraído [Mt/año]	Mineral Procesado [ktpd]	Región	Descripción	Estado	Vida útil [año]
Mina Esperanza	No se especifica	88	Segunda	Proyecto de explotación y procesamiento de mineral, con producción de concentrado cobre-oro y Mo.	En construcción	18
Mina Los Colorados	84	28,5	Tercera	Proyecto de mina a rajo abierto para abastecer con preconcentrado de hierro.	En construcción	20
Mina Antucoya	No se especifica	134	Segunda	Faena minera de extracción de cobre fino, a través de procesos de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención.	En construcción	23
Mina Sierra Gorda	69,35	110	Segunda	Proyecto de cobre-molibdeno. Se producen concentrados de cobre y molibdeno y cátodos de cobre	En construcción	21
Mina Zaldivar	80,3	50	Segunda	Proyecto de rajo abierto con producto final cátodos de 98% pureza.	En construcción	13
Mina Óxidos Encuentro	41,98	65	Segunda	Faena con producción de cátodos aprovechando capacidad de Mina El Tesoro.	En construcción	8
Mina Franke	9,54	11,1	Segunda	Contempla la extracción recursos de oxido y sulfuros de cobre.	En construcción	8
Mina Santo Domingo	No se especifica	65	Tercera	Proyecto contempla la explotación de los rajos Santo Domingo e Iris Norte. Con producción de concentrado de cobre y magnetita.	En construcción	18,5
Mina El Espino	51	26,3	Cuarta	Explotación del yacimiento El Espino con minerales sulfurados y en menor proporción, oxidado. Producción de concentrado de cobre con contenido de oro y cátodos de cobre alta pureza.	En construcción	20

En todas las faenas mineras comprendidas se dispone la información acerca de la contribución porcentual de distintas fuentes en una torta. Con más detalle, se tiene los casos Mina Esperanza (Figura 34), Mina Los Colorados (Figura 35), Mina Antucoya (Figura 36), Mina Sierra Gorda (Figura 37), Mina Zaldívar (Figura 38), Mina Óxidos Encuentro (Figura 39), Mina Franke (Figura 40), Mina Santo Domingo (Figura 41) y El Espino (Figura 42).

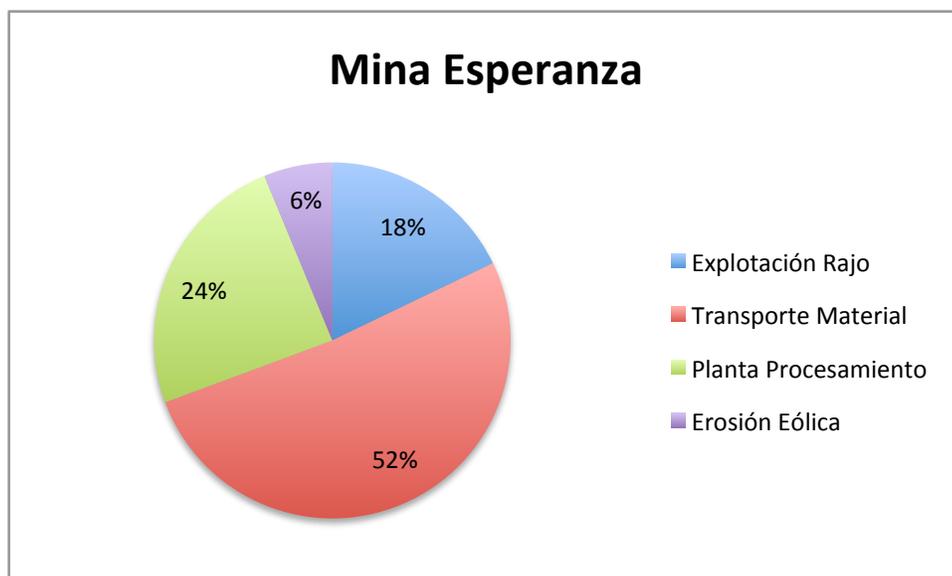


Figura 34. Participación de las fuentes de emisión de particulado en Mina Esperanza

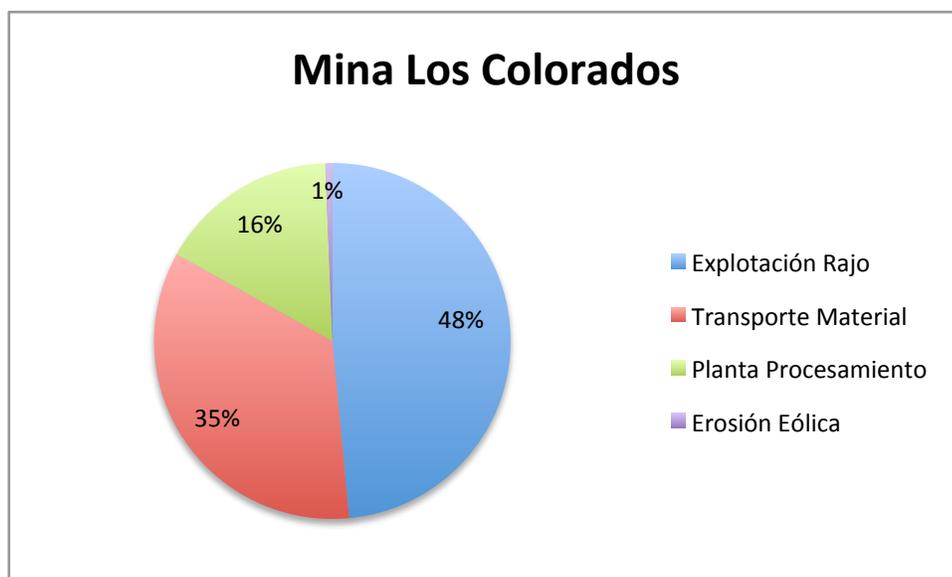


Figura 35. Participación de las fuentes de emisión de particulado en Mina Los Colorados

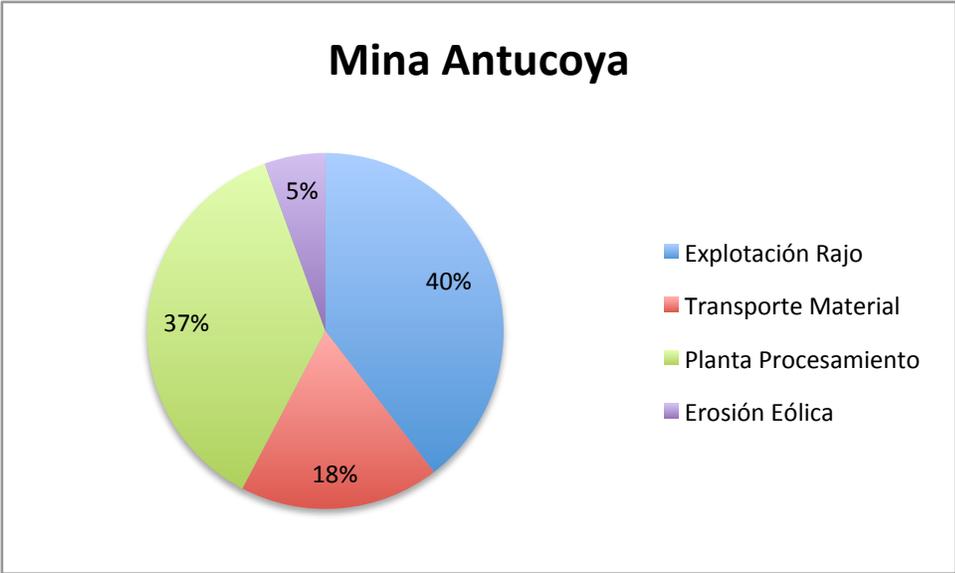


Figura 36. Participación de las fuentes de emisión de particulado en Mina Antucoya

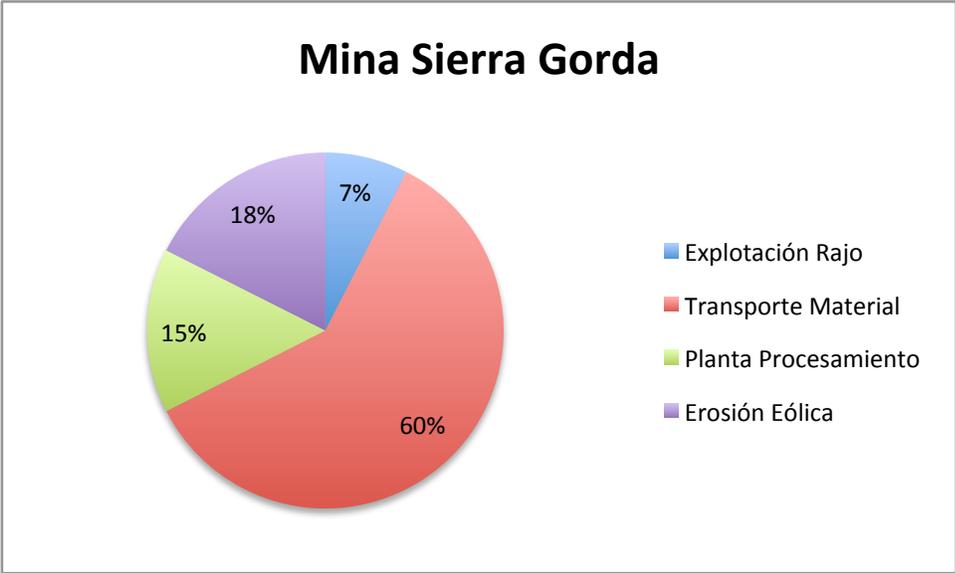


Figura 37. Participación de las fuentes de emisión de particulado en Mina Sierra Gorda

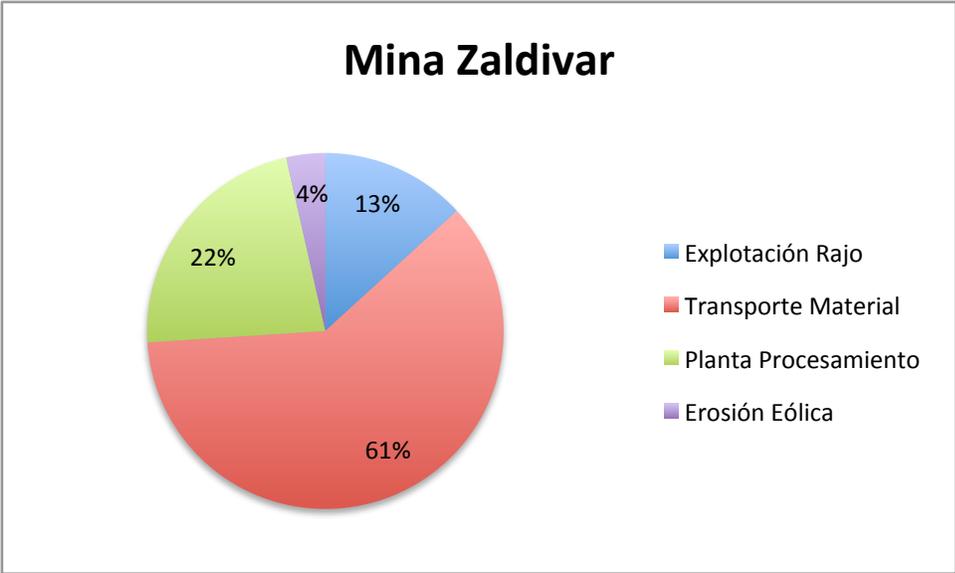


Figura 38. Participación de las fuentes de emisión de particulado en Mina Zaldivar

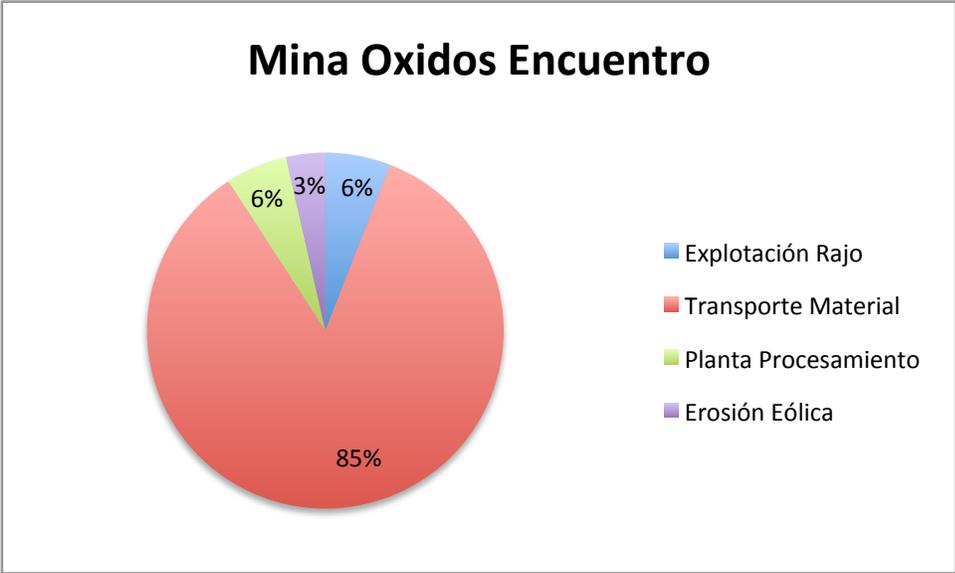


Figura 39. Participación de las fuentes de emisión de particulado en Mina Óxidos Encuentro

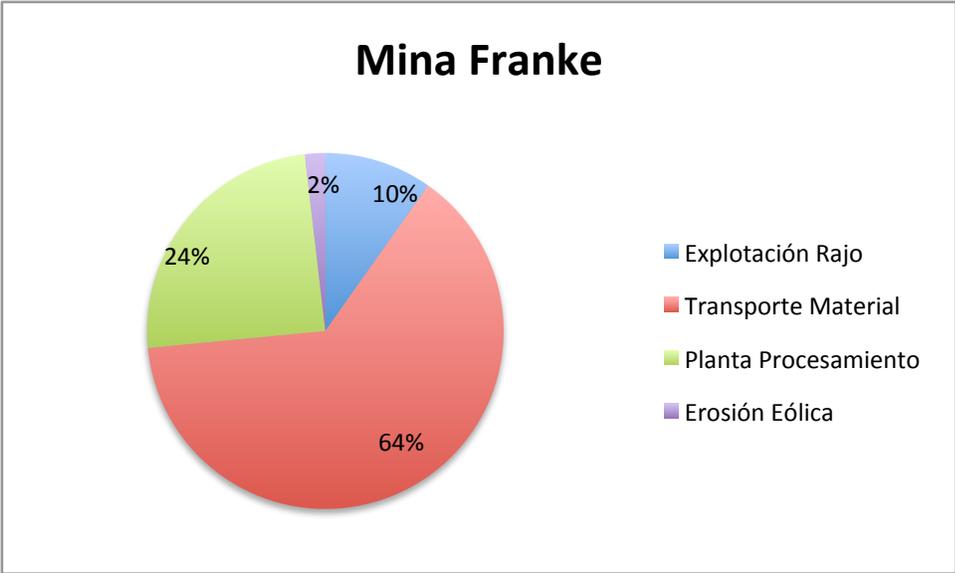


Figura 40. Participación de las fuentes de emisión de particulado en Mina Franke

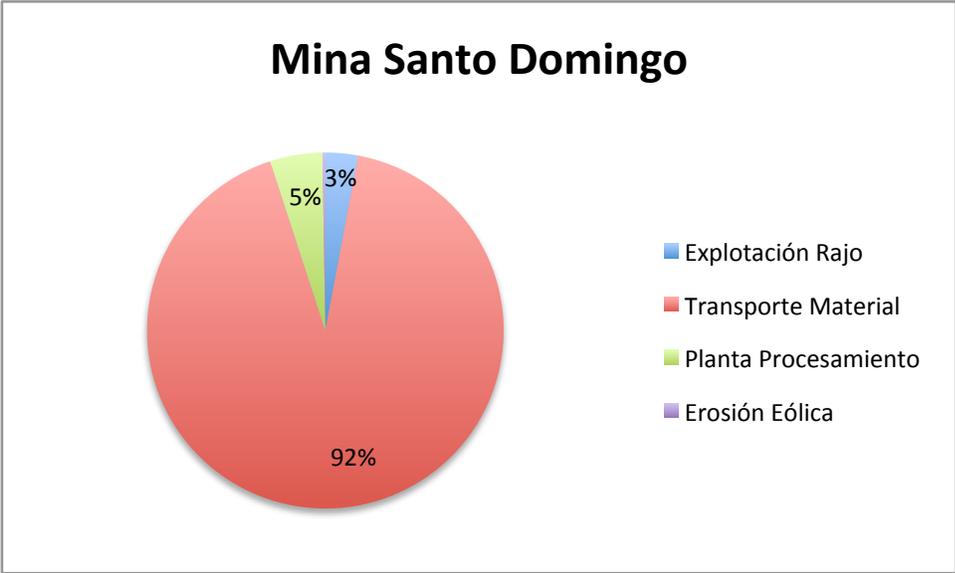


Figura 41. Participación de las fuentes de emisión de particulado en Mina Santo Domingo

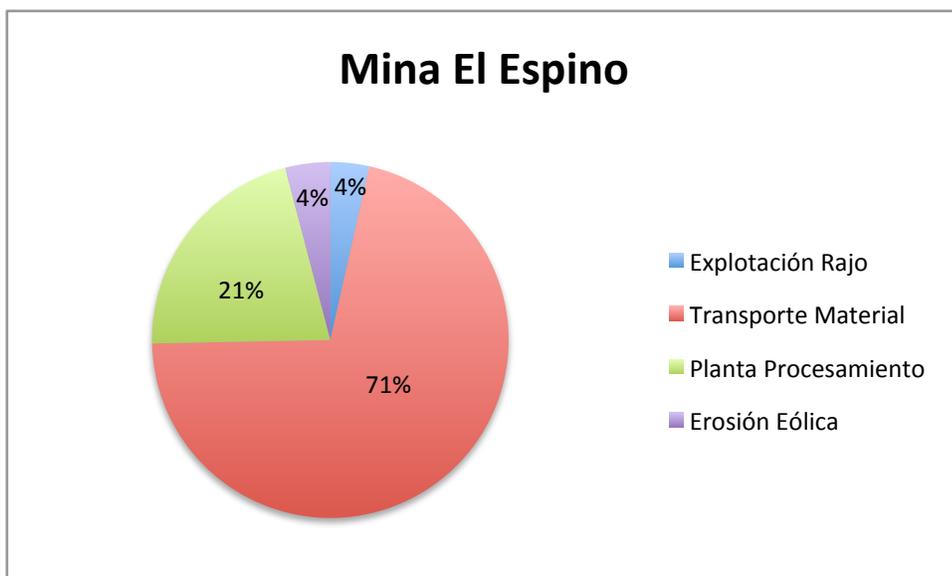


Figura 42. Participación de las fuentes de emisión de particulado en Mina El Espino

La relación con el LPP (D.S 594/99) sobre cada foco de emisión se representa a través de una escala de colores (Tabla 61), en el material entregado por planta “El Soldado”, sobre emisiones de polvo del dicho para el año 2012.

Tabla 61. Escala de colores para definir relación entre niveles de emisión y LPP

Color	Emisión c/r LPP [%]
	Menor al 10% del LPP
	Entre el 10% y 50% del LPP
	Entre el 50% y 100% del LPP
	Entre el 100% y 500% del LPP
	Sobre el 500% del LPP

En adición, se entrega el registro de emisión de polvo no clasificado respirable y sílice respirable para cada foco dentro de la planta (Tabla 62).

Tabla 62. Registro de emisión de particulado de todos los sitios en Planta de "El Soldado"

Sector	Fuente (Punto de emisión)	Polvo no clasificado fracción respirable		Sílice fracción respirable	
		Concentración [mg/m3]	Porcentaje del límite permisible ponderado (LPP) [%]	Concentración [mg/m3]	Porcentaje del límite permisible ponderado (LPP) [%]
Electroobtención y Exterior					
	Exterior Nave EW	0,056	2,3	<0,006	<
Chancador Planta Cátodos					
	Nave Chancado (1er Nivel)	0,699	29,12	0,081	101
	Nave Chancado (2do Nivel)	4,41	183,73	1,16	14
	Exterior (Entre nave Chancado y Harnero)	0,206	85,83	0,051	63
	Nave Harnero (2do Nivel)	0,49	20,41	0,117	146
Oficina Contratistas					
	Exterior Pacoll	0,044	1,83	<0,006	<
	Exterior ProMining	0,044	1,83	0,012	
Servicio Medico					
	Exterior	0,044	1,83	<0,005	<6
	Paradero cerca	0,08	3,3	<0,006	<
Oficinas					
	Taller	0,156	6,5	0,021	2
	Laboratorio Metalurgico	0,127	5,3	0,022	<
	Gerencia	0,084	3,5	<0,006	2
Oficina Planta					
	Mesas	0,126	5,3	0,028	
	Pasillo	0,115	4,8	0,018	2
Chancador primario					
	Sala de control	0,058	2,29	<0,005	<6
	Nivel de descarga	0,011	4,58	<0,006	<
	Nivel de contraeje	2,4	100	0,719	898
Chancador 2º/3º					
	Pasillos Sector Norte	0,221	9,2	0,075	98
	Junto a Chancador	0,466	19,41	0,131	163
	Sala de control	0,471	19,62	0,112	1
	Harnero sector sur	0,449	18,7	0,138	172
Oficina SAG					
	Plataforma principal	5,15	214,58	1,53	191
	Harnero Poniente	0,089	3,7	0,024	
	Correa Alimentación 3003	0,109	4,54	0,01	1
	Exterior-Sala de compresores	0,077	3,2	<0,006	<
Oficina Convencional					
	Pasillos Superior	0,362	15,08	0,106	13
	Pasillos Inferior	0,079	3,29	<0,006	<

En las Tablas 63 y 64 se indican los resultados en detalle entregados por QEMSCAM sobre muestra de camino minero.

Tabla 63. Participación másica de especies minerales en análisis QEMSCAM sobre muestra de camino minero

Mineral	Masa Muestra [%]
Calcopirita	0,08
Pirita	1,02
Cuarzo	26,11
Albita	13,27
Otros silicatos	14,97
Moscovita	19,22
Otras arcillas	3,43
Otros	21,93

Tabla 64. Participación másica de elementos químicos en análisis QEMSCAM sobre muestra de camino minero

Elemento	Masa Muestra [%]
Si	24,30
S	0,83
O	38,11
Na	1,33
K	2,70
Fe	3,08
Al	7,37
Otros	22,28

Se entrega la distribución de tamaño promedio de las muestras tomadas en el camino de Pelambres (Tabla 65) .

Tabla 65. Distribución de Tamaño de partícula para muestra "Pelambres"

Rango Tamaño partículas [μm]	Masa Masa[%]	Masa Acumulada[%]	Rango Tamaño partículas [μm]	Masa Masa[%]	Masa Acumulada[%]
0-20	18,49	18,49	220-240	0	85,29
20-40	13,16	31,65	240-260	2,05	87,34
40-60	10,61	42,26	260-280	0	87,34
60-80	6,15	48,41	280-300	0	87,34
80-100	7,66	56,07	300-320	4,51	91,85
100-120	6,83	62,9	320-340	0	91,85
120-140	11,12	74,02	340-360	0	91,85
140-160	6,27	80,29	360-380	0	91,85
160-180	2,35	82,64	380-400	0	91,85
180-200	0	82,64	400-420	8,15	100
200-220	2,65	85,29	420-440	0	100

Anexo 2: Calibración de Resistencia a Rodadura (RO)

A continuación se detallan los pasos para determinar el ángulo de reposo en laboratorio y su calibración en RockyDEM®:

1. Se solicita material originario de un camino minero (camino aleatorio).
2. Se hace una clasificación mediante tamizaje y luego, una prueba de sedimentación para seleccionar material fino.
3. Finalmente, se junta todo el material clasificado (representativo de material MP10) y se construye una mini-pila (Grima et al, 2011).
4. En una lectura visual del ángulo de reposo, se toman 5 imágenes sobre la mini-pila construida. Las imágenes tomadas se importan a programa ANSYS SCDM y en cada una se mide ángulo de reposo.
5. Se entrega el valor medio de ángulo de reposo como un valor representativo del problema rueda-suelo.
6. Se realiza el mismo experimento como una simulación de calibración en RockyDEM® (RockyDEM®, 2013).
7. Finalmente se determina el parámetro de RO para el cual se tiene el ángulo de reposo medido en laboratorio.

Ángulo de contacto se mide sobre una mini-pila construida de finos, para calibrar Resistencia a rodadura en RockyDEM® y se toman 5 imágenes sobre mini-pila (Figura 43).

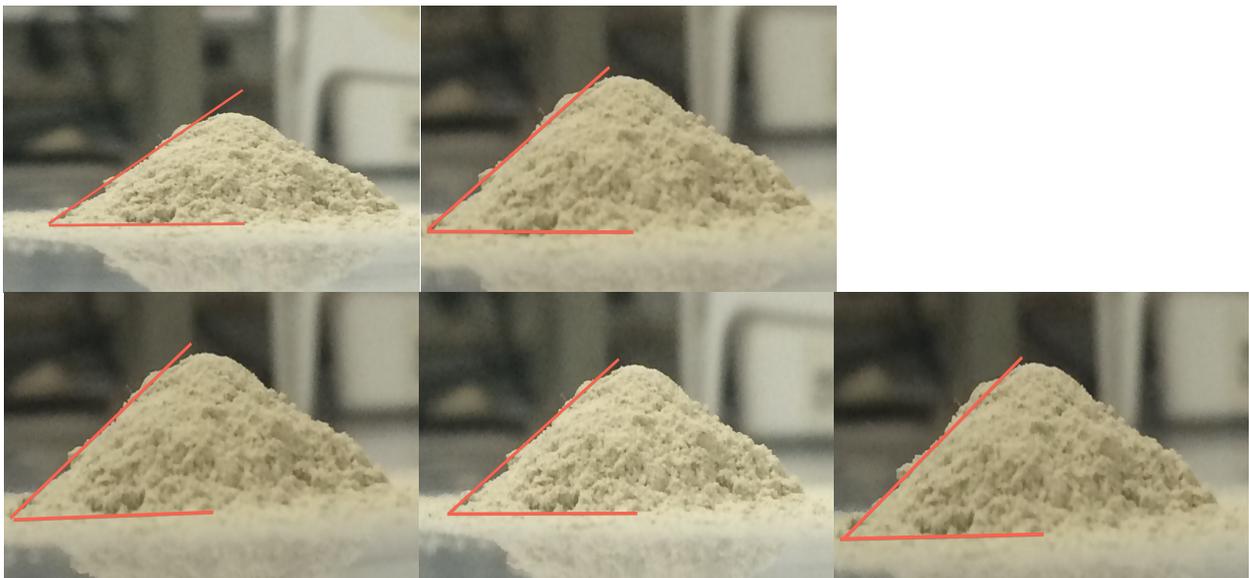


Figura 43. Imágenes de mini-pila de fino para medir ángulo de contacto en RockyDEM®

Imágenes se analizan mediante programa ANSYS SCDM y se obtienen los valores de ángulo de reposo encontrados sobre cada imagen (Tabla 66).

Tabla 66. Estimación del ángulo de reposo experimental

Angulo de reposo experimental	
Medición	Valor (°)
1	30
2	33,69
3	33,69
4	37,57
5	30,62
Promedio	33,11

En conocimiento de ángulo de reposo para material fino, se procede a calibrar Resistencia de rodadura en programa RockyDEM®. Estimación sobre RR=0,5 (Tabla 67) y RR= 0,53 (Tabla 68) entregan valores de ángulo de reposo cercano al experimental.

Tabla 67. ángulo de reposo estimado sobre RR=0,5

RR: 0,5	
Medición	Angulo de reposo (°)
plano yx=1	28,07
plano yx=-1	28,07
plano yz=1	25,35
plano yz=-1	26,57
Promedio	27,015

Tabla 68. ángulo de reposo estimado sobre RR=0,53

RR: 0,53	
Medición	Angulo de reposo (°)
plano yx=1	32,47
plano yx=-1	34,99
plano yz=1	37,87
plano yz=-1	36,03
Promedio	35,34

Las mejores simulaciones se logran con los promedios de ángulo de reposo en RR= 0,5 ($\alpha = 27.02^\circ$) y RR=0,53 ($\alpha = 35.34^\circ$). Finalmente al comparar ángulos de reposo de simulaciones con el medido en laboratorio se decide un valor de RR=0,52.

Anexo 3: Estimación carga normal teórica de camión

Los inputs de la banda de contacto se encuentran en la Tabla 69.

Tabla 69. Parámetros banda contacto teórica

Parámetro Banda contacto	Valor
Perímetro Rueda [m]	12,57
H tocando suelo	5,00
H totales rueda	41,00
L Banda [m]	1,53
Ancho banda [m]	1,00

A partir de la Ecuación 9 se determina el $Largo_{Banda}$ como:

$$Largo_{Banda} = 12,57 \cdot \frac{5}{41} = 1,53 [m^2]$$

Luego, mediante la Ecuación 10 se obtiene el Área_{Banda} como:

$$\text{Área}_{Banda} = 1,53 \cdot 1 = 1,53 [m^2]$$

Por otro lado, se determina el área de placa (zoom de la banda) utilizando sus dimensiones, largo y ancho (Tabla 70).

Tabla 70. Área de placa (zoom banda de contacto)

Parámetro	Placa
Largo [mm]	0,25
Ancho [mm]	0,25
Área [m ²]	$6,25 \cdot 10^{-8}$

Finalmente la razón de áreas entre la placa y banda de contacto se expresa en un factor , $f_{Placa/Banda}$ igual a:

$$f_{Placa/Banda} = \frac{6,25 \cdot 10^{-8} [m^2]}{1,53 [m^2]} = 4,08 \cdot 10^{-8}$$

Con el supuesto de una distribución equitativa del peso de todo el camión sobre sus cuatro ruedas, la carga normal sobre la banda y la placa se indican en la Tabla 71.

Tabla 71. Valores en relación a la carga de una rueda minera de camión 300T

Parámetro	Valor
Carga final por rueda [T]	75
Fuerza peso por rueda [N]	735000
Carga por área banda [N/m ²]	479613

Por último se obtiene la fuerza normal en la placa ($F_{N,placa}$) como:

$$F_{N,placa} = f_{Placa/Banda} \times \text{Fuerza peso, rueda [N]}$$

$$F_{N,placa} = 4,08 \cdot 10^{-8} \times 735000 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ [N]}$$

Finalmente, se calcula fuerza normal de placa para todas las cargas de camión comprendidas en los estudios numéricos de penetración (Tabla 72).

Tabla 72. Fuerza normal equivalente entre rueda y suelo

Carga camión [T]	Fuerza normal placa [N]
100	0,01
200	0,02
300	0,03
400	0,04

Anexo 4: Espesor y compactación del medio granular

Para determinar el espesor del medio granular se observa la parte azul del cajón (llena de partículas) en la figura desplegada al término del llenado (Figura 10 de metodología). Se estima que el volumen de control comprendido representa el 58,95% del largo del cajón. Luego, el espesor del medio granular del sistema debiese ser 0,59 mm. Con el espesor definido y el número total de partículas se encuentra el grado de compactación del medio granular. Para esto, se consideran esferas monodispersas de 10 μm en un arreglo cúbico centrado en las caras.

Lo primero a determinar es el volumen total ocupado por el medio granular (Tabla 73).

Tabla 73. Cálculo Volumen total ocupado por medio granular en sistema Rocky

Volumen partícula [mm^3]	5,24 $\cdot 10^{-7}$
Número partículas sistema	185737
Volumen total partículas [mm^3]	0,10

Se continua por estimar la compactación como la razón entre el volumen total del medio granular y el volumen efectivo de solido, que son los 185737 partículas (Tabla 74).

Tabla 74. Estimación Compactación en sistema Cajón Rocky

Volumen total partículas [mm^3]	0,10
Volumen medio granular [mm^3]	0,11
Compactación estimada cajón [%]	86,75

La compactación estimada es superior al empaquetamiento máximo de esferas mono dispersas (arreglo hexagonal, 74%) y se atribuye al solapamiento de las partículas producto de una constante de rigidez (modulo de Young) inferior al real en las partículas del suelo, igual a $1,00 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$. Por ende, se decide aplicar una corrección en el espesor del medio granular por este efecto, utilizando el empaquetamiento máximo cúbico centrado en las caras (Tabla 75).

Tabla 75. Compactación medio granular en sistema placa-cajón

Parámetro	Valor
Volumen total sólido ¹⁷ [mm ³]	0,10
Volumen Medio granular ¹⁸ [mm ³]	0,11
Compactación Estimada [%]	86,66
Compactación Ajustada [%]	68,00

El equivalente a escala real del medio granular (sistema simplificado) se toma como la carpeta de rodado (h_{real}) de un camino minero principal. Finalmente los valores de espesor utilizados en las simulaciones están indicados en la Tabla 76.

Tabla 76. Espesor Medio Granular y Carpeta de Rodado

Parámetro	Valor
$h_{sistema}$ [cm]	0,08
h_{real} [cm]	50,00

Anexo 5: Escalamiento penetración rueda

En conocimiento del área total de interacción rueda-suelo y la fuerza peso de un camión de 300 T se determina el esfuerzo compresivo aplicado por el vehículo sobre un camino minero (Tabla 77). Se hace el mismo cálculo para otras cargas (Tabla 78).

Tabla 77. Cálculo de Esfuerzo ejercido por camión 300T sobre camino minero

Parámetro	Valor
Carga Total Camión [Kg]	$3,00 \cdot 10^5$
Fuerza Peso [N]	$2,94 \cdot 10^6$
Área Total [m ²]	6,12
Esfuerzo Aplicado [Kpa]	480,88

¹⁷ Volumen ocupado únicamente por las partículas

¹⁸ Volumen aparente (partículas y poros).

Tabla 78. Esfuerzo transferido de Rueda a Suelo para distintas cargas

Carga Camión [T]	$\Delta\sigma_{rueda}$ [Kpa]¹⁹
100	160,29
200	320,59
300	480,88
400	641,18

Ahora se determina el coeficiente de compresión volumétrica empleando la Ecuación 1 y las penetraciones encontradas en sistema de Rocky (Tabla 79). De igual modo, se hacen los cálculos para cargas entre 100 y 400 T definiendo un valor promedio con su error respectivo (Tabla 80).

Tabla 79. Estimación del coeficiente de compresibilidad volumétrica para 300T camión

$\Delta\sigma$ [Kpa]	480,88
Δh [cm]	$5,90 \cdot 10^{-3}$
H [cm]	0,08
m_v [Kpa⁻¹]	$1,63 \cdot 10^{-4}$

Tabla 80. Estimación de coeficiente de compresibilidad volumétrica general

Carga Camión [T]	m_v (x10⁻⁴)
100	2,49
200	1,77
300	1,63
400	1,57
Promedio	1,87
Desviación	0,43
Error [%]	22,92

¹⁹ Esfuerzo rueda-suelo es equivalente a fuerza normal aplicada por placa del Anexo 3.

Anexo 6: Cadenas de Esfuerzos sobre penetración en varias fases

Se despliegan en detalle las cadenas de esfuerzos para distintas condiciones del medio granular estudiado: suelo seco (Figura 44), Adh 1 (Figura 45), Adh 100 (Figura 46) y Adh 1000 (Figura 47). De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, placa penetra al equivalente de 100 , 200, 300 y 400 T respectivamente de carga de un camión.

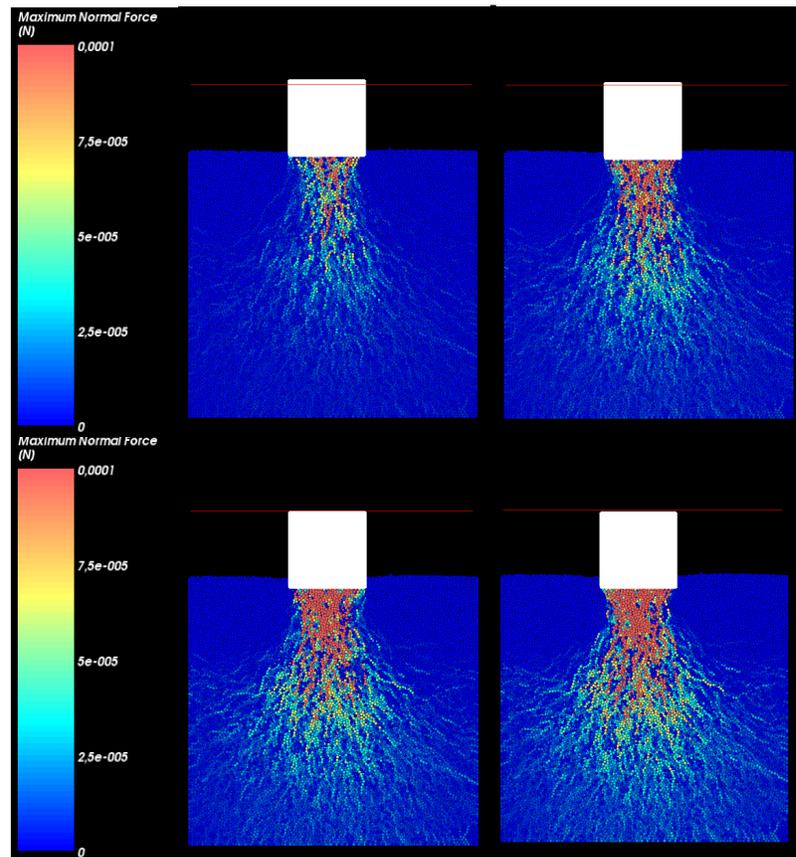


Figura 44. Cadenas de esfuerzos para medio granular seco a distintas penetraciones

La zona enrojecida indica el segmento de partículas enfrentado a mayores esfuerzos normales y por ende, donde ocurre la mayor parte de la ruptura del medio granular. Partículas provenientes de dicha ubicación representan una potencial fuente de material a suspenderse con el avance de la rueda.

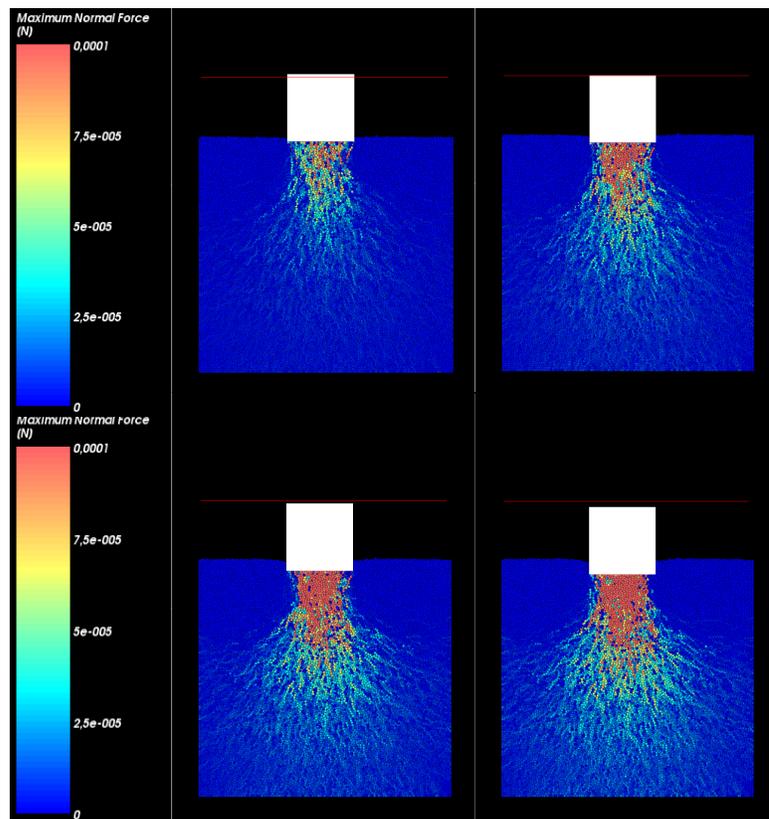


Figura 45. Cadenas de esfuerzos medio granular Adh1 a distintas penetraciones

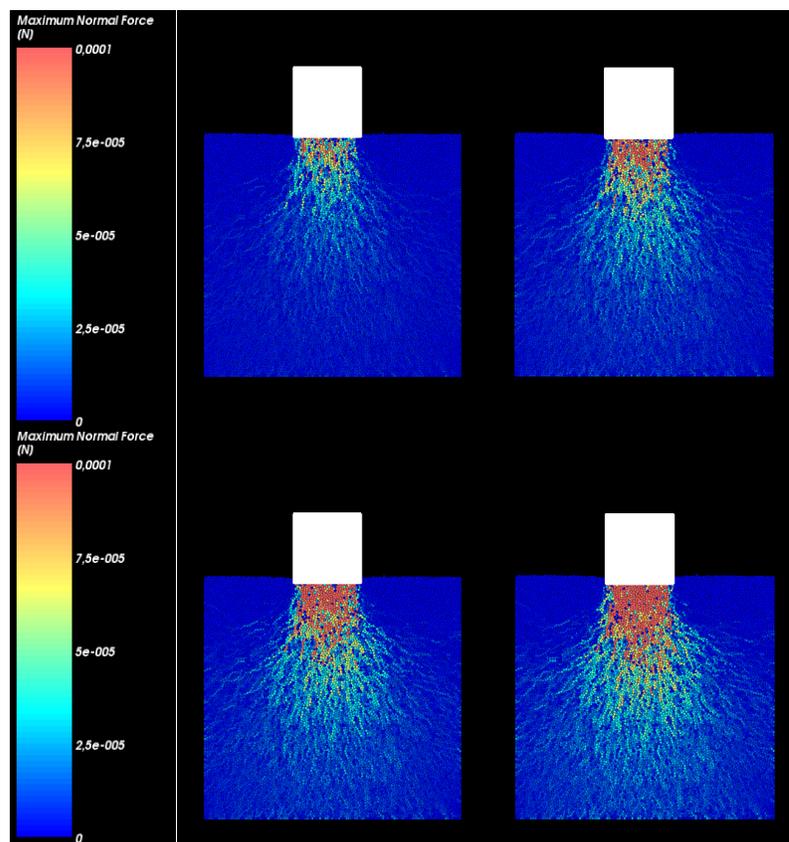


Figura 46. Cadenas de esfuerzos medio granular Adh100 a distintas penetraciones

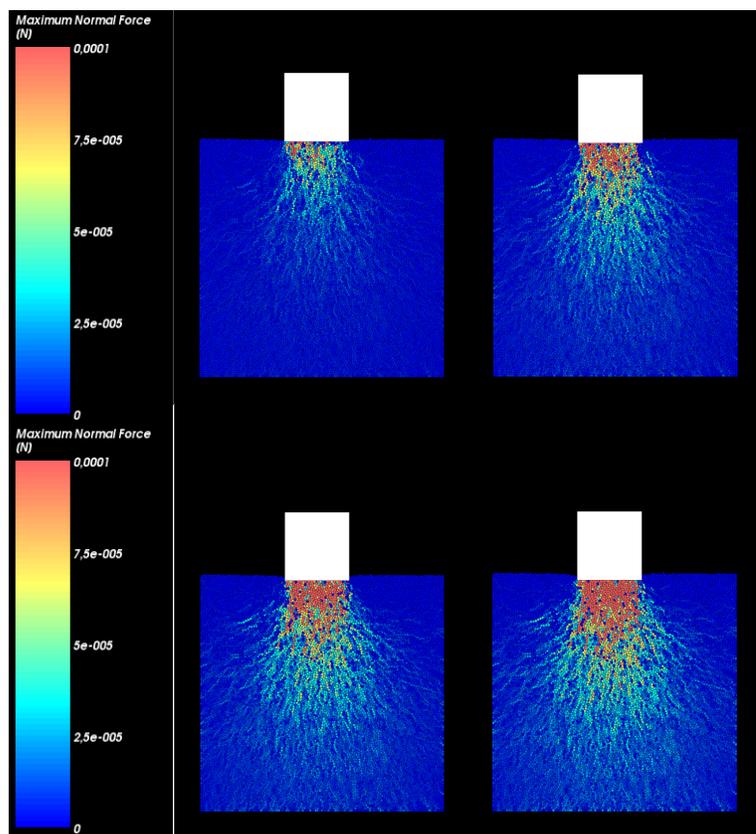


Figura 47. Cadenas de esfuerzo medio granular Adh1000 a distintas penetraciones

En todos los casos, cadenas de esfuerzos crecen con hundimiento. Sin embargo, zona enrojecida aparece más tardíamente con los sistemas a cohesiones más altas. Luego, se espera que un suelo acondicionado a una cohesión mayor responda con menor deformación a una carga vertical.

Anexo 7: Complementos de análisis de arrastre placa

La tasa de emisión encontrada para cada caso (Tabla 81), determinados a partir de la masa suspendida sobre plano de la superficie.

Tabla 81. Tasa de emisión y PE del suelo en el rango $V_{camión}$ de 10-50 Km/h

$V_{camión}$ [m/s]	Masa total [Kg] (x10-9)	Tiempo corrido [s] (x10-5)	Tasa emisión [Kg/s] (x10-5)	PE [Kg/Km] (x10-3)	PE [Kg/Km] (x10 ⁵)	PE [T/Km]
10	4,82	14,70	3,28	5,08	1,25	10,33
15	5,03	10,60	4,75	5,30	1,30	10,78
20	4,93	8,00	6,16	5,19	1,27	10,56
25	4,63	6,15	7,53	4,88	1,20	9,92
30	4,99	5,75	8,69	5,26	1,29	10,70
35	5,02	5,20	9,66	5,29	1,30	10,76
40	4,75	4,35	10,91	5,00	1,23	10,16
45	4,61	3,80	12,14	4,86	1,19	9,88
50	4,70	3,70	12,70	4,95	1,21	10,07

En las Figuras 48 y 49 se presentan los histogramas de velocidad para 10 km/h.

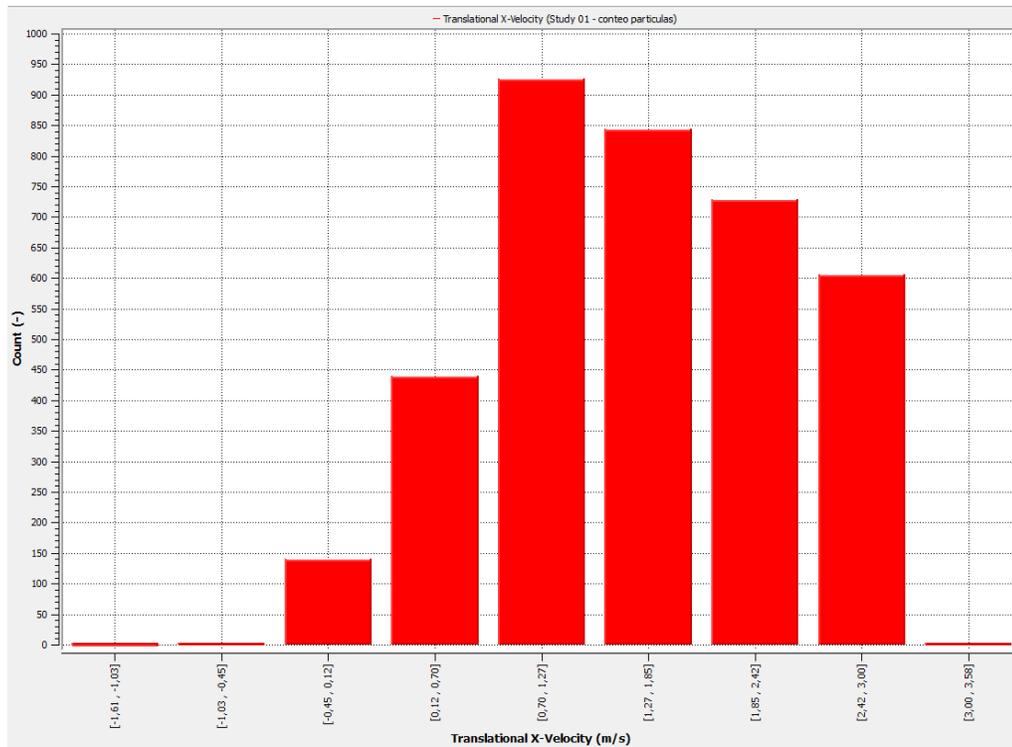


Figura 48. Histograma con la velocidad horizontal de partículas suspendidas por placa a 10 Km/h

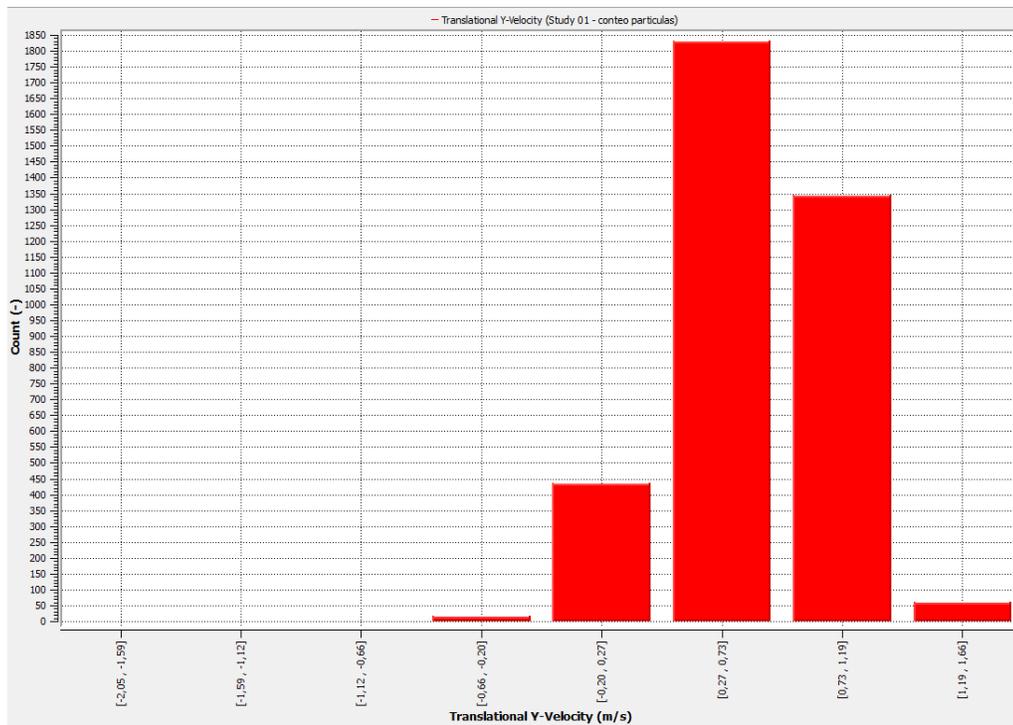


Figura 49. Histograma con la velocidad vertical de partículas suspendidas por placa a 10 Km/h

En las Figuras 50 y 51 se presentan los histogramas de velocidad para 30 km/h.

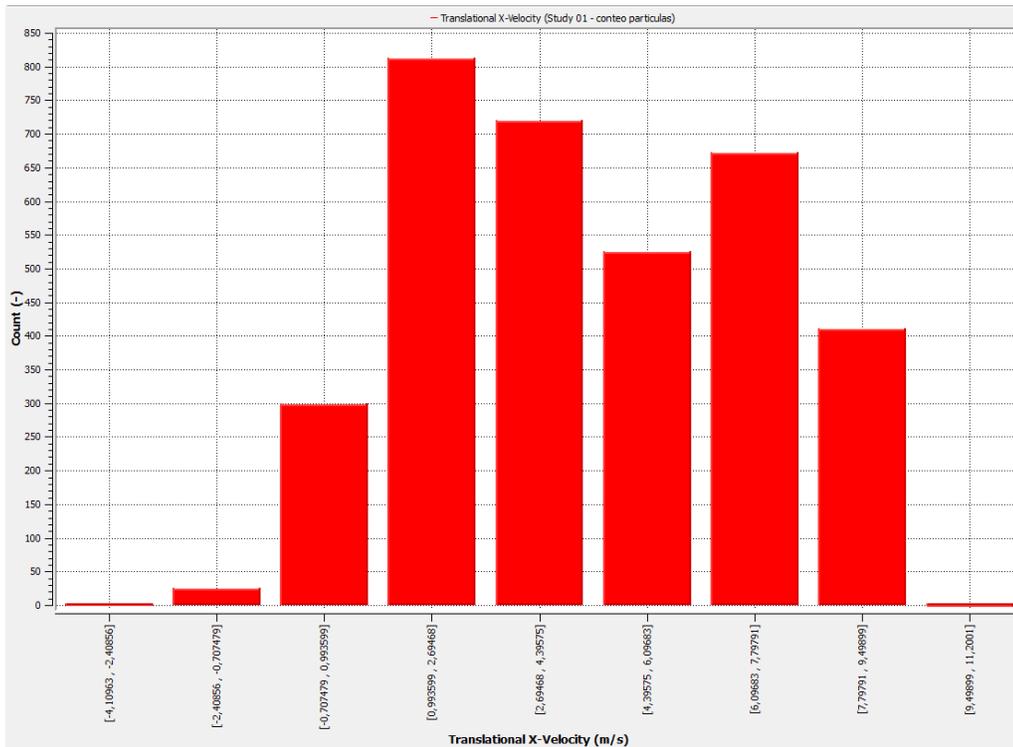


Figura 50. Histograma con distribución de $V_{x,part}$ para placa a 30 Km/h

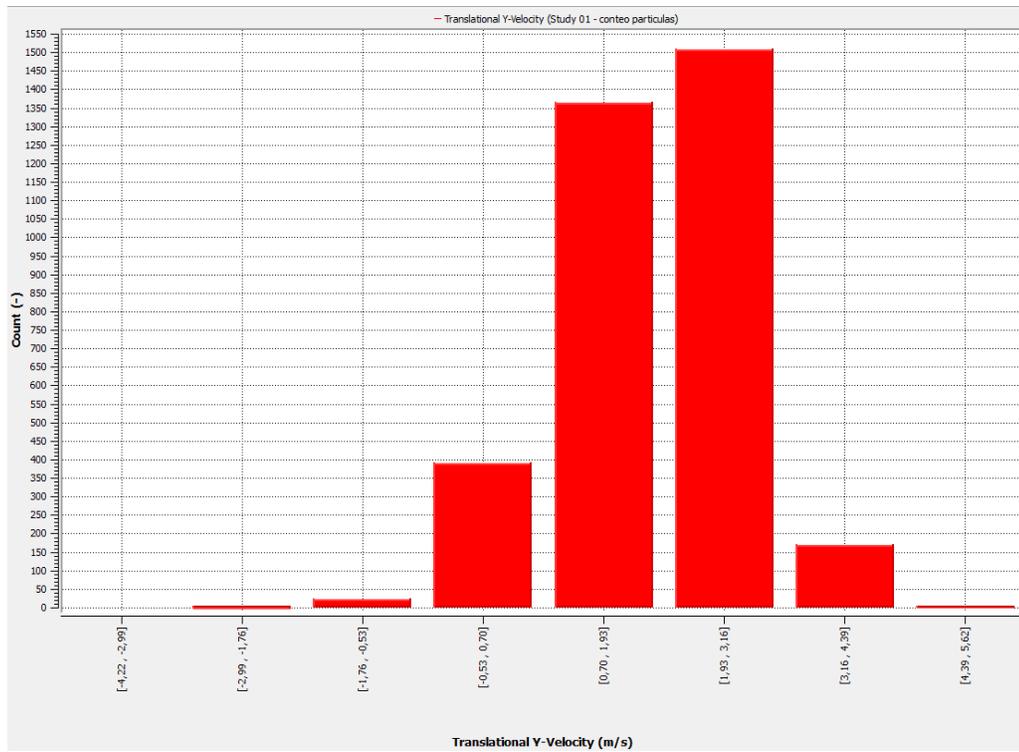


Figura 51. Histograma con distribución de $V_{y,part}$ para placa a 30 Km/h

Anexo 8: Laboratorio de evaporación

Evaporación sobre muestras con sólido

Se despliegan los valores de masa de solución añadida a cada muestra de cuarzo molido (bajo malla #200) y la masa perdida, luego de 70 min de evaporación a 30°C (Tabla 82). En adición, se determina la humedad perdida en las distintas condiciones de humectación para las mismas condiciones de evaporación.

Tabla 82. Humedad perdida durante 70 min de evaporación a 30°C sobre cuarzo molido con distintas soluciones

Muestra	Masa agua añadida [g/cm ²] (x10 ⁻²)	Masa agua perdida [g/cm ²] (x10 ⁻²)	Humedad retenida [%]	Humedad perdida [%]
Agua destilada	5,98	1,63	72,78	27,22
Agua destilada (duplicado)	5,55	1,66	70,06	29,94
Agua en medio ácido	5,91	1,52	74,25	25,75
Agua en medio ácido (duplicado)	5,55	1,49	73,25	26,75
Floculante en medio básico	5,69	1,27	77,64	22,36
Floculante en medio básico (duplicado)	6,05	1,27	78,95	21,05
Floculante en medio ácido	6,19	1,31	78,86	21,14
Floculante en medio ácido (duplicado)	5,45	1,34	75,32	24,68
Emulsión de polímero	5,48	0,96	82,58	17,42

Se grafican los 15 puntos medidos cada 5 min, durante todo el período de evaporación en las 9 muestras humectadas de cuarzo molido (Figura 52).

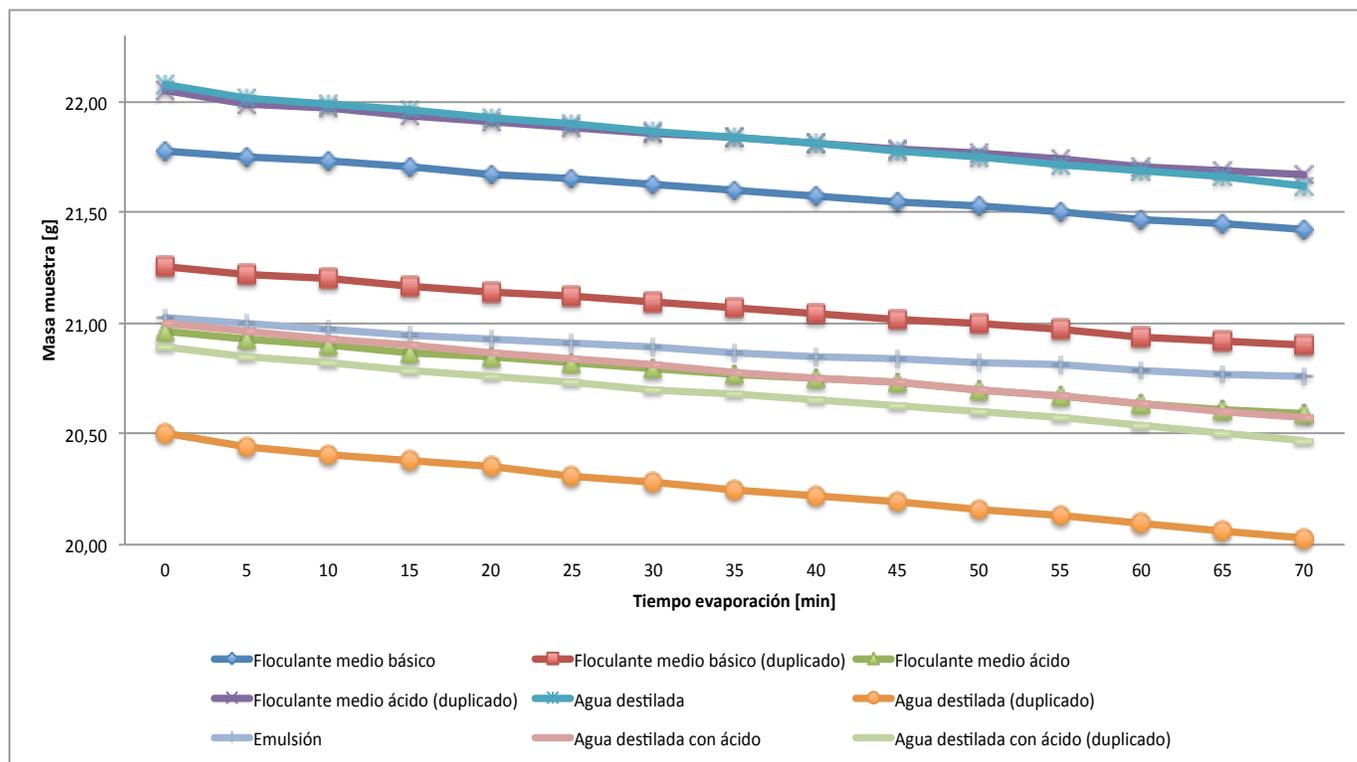


Figura 52. Masa de muestras de cuarzo molido en función de tiempo de evaporación, a 30°C

En la Tabla 83, se entregan tasas de evaporación encontradas para muestras con distintas soluciones en ausencia de sólido, con un R^2 superior o igual a 0,98.

Tabla 83. Tasa de evaporación para distintas muestras con solución humectante s/sólido

Muestra	Tasa evaporación [g/min·cm ²] (x10 ⁻⁴)	R ² (x10 ⁻¹)
Agua destilada	-10,19	9,88
Agua destilada (duplicado)	-11,88	9,86
Agua con ácido	-11,25	9,88
Agua con ácido (duplicado)	-9,37	9,87
Floculante en medio básico	-10,72	9,88
Floculante en medio básico (duplicado)	-10,75	9,90
Floculante en medio ácido	-11,85	9,80
Floculante en medio ácido (duplicado)	-9,55	9,84
Emulsión de polímero	-12,91	9,88

Evaporación sobre muestras sin sólido

En la Tabla 84 se presentan las mediciones sobre la humedad inicial y final sobre muestras sin cuarzo molido (<#200).

Tabla 84. Humedad perdida durante 70 min de evaporación a 30°C sobre muestra con distintas soluciones pero sin sólido

Muestra	Masa agua añadida [g/cm ²] (x10 ⁻²)	Masa agua perdida [g/cm ²] (x10 ⁻²)	Humedad retenida [%]	Humedad perdida [%]
Agua destilada	6,61	1,49	77,54	22,46
Agua destilada (duplicado)	8,45	1,70	79,92	20,08
Agua en medio ácido	6,22	1,66	73,30	26,70
Agua en medio ácido (duplicado)	6,83	1,41	79,27	20,73
Floculante en medio básico	6,61	1,56	76,47	23,53
Floculante en medio básico (duplicado)	6,76	1,56	76,96	23,04
Floculante en medio ácido	6,19	1,77	71,43	28,57
Floculante en medio ácido (duplicado)	5,69	1,41	75,16	24,84
Emulsión de polímero	7,89	1,84	76,68	23,32

Ahora, se grafican los 15 puntos medidos cada 5 min, durante todo el período de evaporación en las 9 muestras con distintas soluciones en ausencia de sólido (Figura 53).

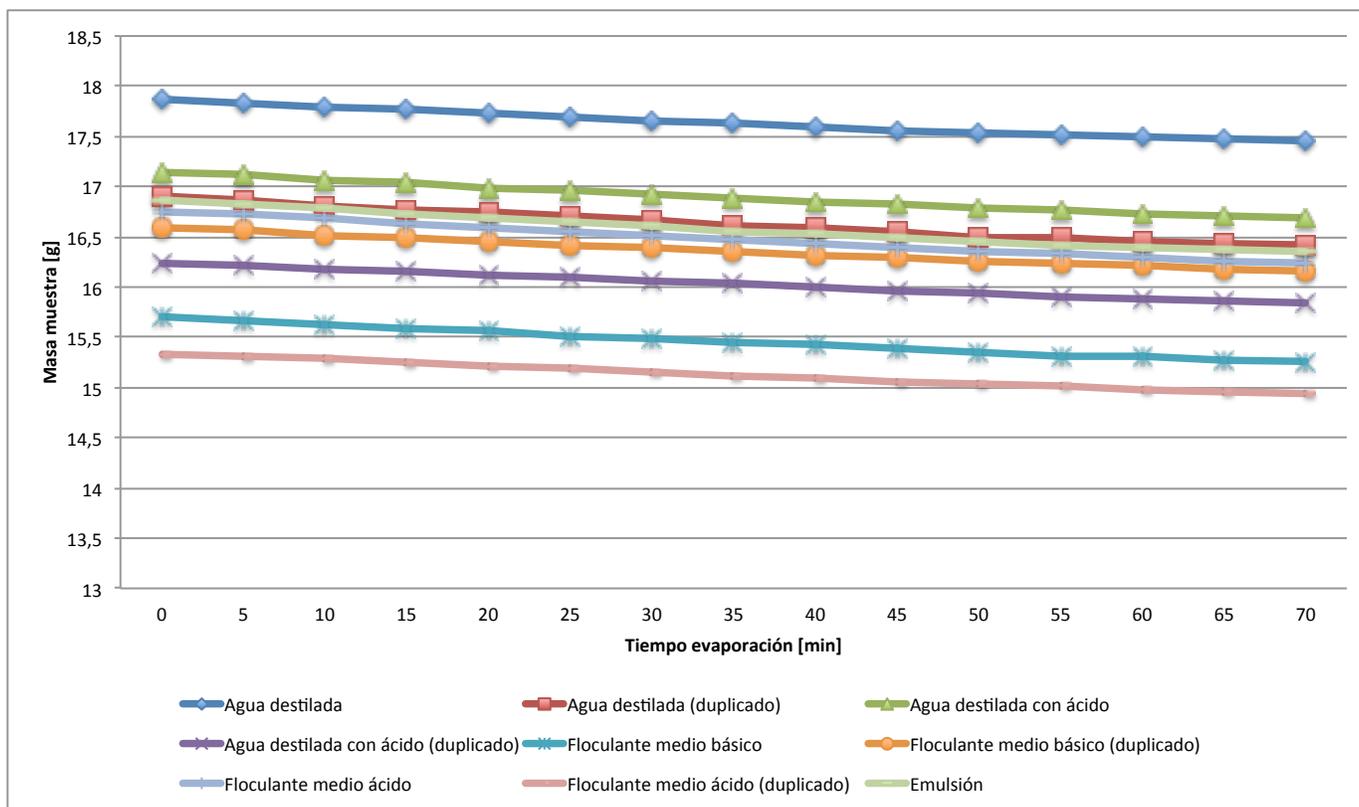


Figura 53. Masa de muestras sin sólido en función de tiempo de evaporación, a 30°C

En la Tabla 85, se entregan tasas de evaporación encontradas para muestras con distintas soluciones en ausencia de sólido, con un R^2 superior o igual a 0,98.

Tabla 85. Tasa de evaporación para distintas muestras con solución humectante s/sólido

Muestra	Tasa evaporación [g/min·cm ²] (x10 ⁻⁴)	R ² (x10 ⁻¹)
Agua destilada	-10,19	9,88
Agua destilada (duplicado)	-11,88	9,86
Agua con ácido	-11,25	9,88
Agua con ácido (duplicado)	-9,37	9,87
Floculante en medio básico	-10,72	9,88
Floculante en medio básico (duplicado)	-10,75	9,90
Floculante en medio ácido	-11,85	9,80
Floculante en medio ácido (duplicado)	-9,55	9,84
Emulsión de polímero	-12,91	9,88

Los reactivos empleados en la experiencia de laboratorio se explican a continuación:

1) **AEROSPRAY 70A BINDER:** Agente supresor de polvo y estabilizador de suelo de la compañía Cytec Industries Inc. Reduce y elimina la erosión superficial producto del viento y la lluvia. Asimismo controla el polvo del transporte de material seco y vehículos livianos. Produce un filme superficial cuando se emplea en concentraciones elevadas. A partir de su ficha de datos de seguridad se conocen las propiedades físicas y químicas del reactivo (Tabla 86).

Tabla 86. Propiedades físicas y químicas de AEROSPRAY 70A Binder

Propiedad	Descripción
Color	Blanco
Sólidos	58 + 1%
Viscosidad [cps]	2250 ± 1250
pH	5.0 ± 0.5
Gravedad Específica	1.0 – 1.2
Tg (teórica)	19°C
Film on Glass	Slightly Hazy
Borax Stability	Buena

2) **CYFLOC C-573 Flocculant:** Agente Floculante de Amina Policuaternaria en agua, de la compañía Cytec Industries Inc. El componente del reactivo es un Polímero de Etilendiamina de Epiclorohidrina de Dimetilamina, en concentración 48-52%. A partir de su ficha de datos de seguridad se conocen las propiedades físicas y químicas del reactivo (Tabla 87).

Tabla 87. Propiedades físicas y químicas de CYFLOC C-573 Flocculant

Propiedad	Descripción
Color	Amarillo a Ámbar
Aspecto	Líquido
Olor	Amina leve
pH	5.0-7.0
Gravedad Específica	1.14-1.18