

# Metodologías para el uso de factores de emisión

Material particulado en  
depósitos de relaves  
abandonados

Matías Silva  
Gonzalo Suazo



NACIONES UNIDAS

CEPAL



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA



cooperación  
alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

# Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

 [www.cepal.org/es/publications](http://www.cepal.org/es/publications)

 [www.cepal.org/apps](http://www.cepal.org/apps)

SERIE

**MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO**

**170**

# Metodologías para el uso de factores de emisión

## Material particulado en depósitos de relaves abandonados

Matías Silva  
Gonzalo Suazo



Este documento fue elaborado por Matías Silva y Gonzalo Suazo, Consultores de la Unidad de Políticas para el Desarrollo Sostenible de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Los autores agradecen los valiosos insumos de Eduardo Zúñiga, Pedro Claussen y Benjamín Díaz, del Ministerio de Minería de Chile, y de María Paz Domínguez, Efrén Osorio, Natalia Pérez y Alejandro Rojas de la Universidad Técnica Federico Santa María para la preparación del documento. El trabajo fue revisado y supervisado por Mauricio Pereira y Carlos de Miguel, funcionarios de la Unidad de Políticas para el Desarrollo Sostenible de la CEPAL, con los aportes de Stefania De Santis, Consultora de la misma Unidad, y de Achim Constantin, Director de Proyecto del Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) de Alemania.

Esta publicación se enmarca en las actividades del proyecto ejecutado por la CEPAL, la *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), y el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) "Cooperación Regional para la Gestión Sustentable de los Recursos Mineros en los Países Andinos (MINSUS)", financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización.

Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Publicación de las Naciones Unidas  
ISSN: 1680-8886 (versión electrónica)  
ISSN: 1564-4189 (versión impresa)  
LC/TS.2020/92  
Distribución: L  
Copyright © Naciones Unidas, 2020  
Todos los derechos reservados  
Impreso en Naciones Unidas, Santiago  
S.20-00474

Esta publicación debe citarse como: M. Silva y G. Suazo, "Metodologías para el uso de factores de emisión: material particulado en depósitos de relaves abandonados", *serie Medio Ambiente y Desarrollo*, N° 170 LC/TS.2020/92), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2020.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Publicaciones y Servicios Web, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

# Índice

<b>Resumen</b> .....	7
<b>Introducción</b> .....	9
<b>I. Alcance</b> .....	13
<b>II. Situación de los depósitos de relaves en situación de abandono en Chile</b> .....	15
A. Situación General .....	15
B. Análisis de variables de interés en fenómenos de erosión eólica .....	19
1. Superficie ocupada a nivel regional.....	19
2. Características del sector de emplazamiento .....	19
3. Existencia de cubierta vegetal .....	20
4. Distancia entre depósitos .....	21
5. Distancia a sitios poblados.....	22
C. Consideraciones respecto a la estabilidad física-química .....	23
<b>III. Mecanismos de erosión eólica en suelos y relaves</b> .....	25
A. Umbral de erosión del viento.....	26
B. Estudio de erosión eólica en depósitos de relaves.....	29
<b>IV. Metodologías para el cálculo del factor de emisión</b> .....	33
A. Variables que influyen en la utilización de un factor de emisión.....	34
1. Variables cuantificadas .....	34
2. Variables referidas .....	35
3. Variables no cuantificadas .....	35

B.	Factores de emisión .....	36
1.	Erosión eólica de áreas expuestas (EPA, 1978) .....	37
2.	Erosión eólica en pilas activas de agregados (EPA, 1983; 1985a) .....	37
3.	Manipulación y almacenamiento de pilas de agregados (EPA, 2006a) .....	38
4.	Erosión eólica industrial (EPA, 2006b) .....	39
5.	Almacenamiento, manipulación y transporte de productos minerales y metálicos (EEA, 2019a, b).....	41
V.	<b>Aplicación de las metodologías de estimación de factores de emisión</b> .....	43
A.	Consideraciones en la evaluación y aplicación de los factores de emisión.....	44
1.	US EPA 1978.....	44
2.	US EPA 1985a.....	45
3.	US EPA 2006a, FE para pilas de agregados.....	45
4.	US EPA 2006b, FE para erosión eólica industrial.....	45
5.	EEA 2019a, b, almacenamiento y manipulación de productos metálicos/minerales.....	45
6.	US EPA 1985b, modelo para erosión en reservorios inagotables.....	45
B.	Caso estudio.....	46
1.	Ciudad de Andacollo, antecedentes generales.....	46
2.	Ciudad de Copiapó, antecedentes generales.....	55
VI.	<b>Conclusiones y recomendaciones</b> .....	63
	Bibliografía.....	65
	<b>Anexos</b> .....	69
Anexo 1	Modelo EPA 1985 <i>Rapid Assessment of Exposure to Particulate Emissions from Surface Contamination Sites</i> .....	70
Anexo 2	Catastro de información sobre tranques inactivos y abandonados en Andacollo: ejemplo de base de datos.....	74
Anexo 3	Catastro de información meteorológica de uso público para la estimación de factores de emisión.....	75
Anexo 4	Información base para el cálculo de emisiones en Andacollo y Copiapó.....	79
	Serie Medio Ambiente y Desarrollo: números publicados.....	87
	<b>Cuadros</b>	
Cuadro 1	Distribución de depósitos de relaves en Chile según su origen mineralógico.....	16
Cuadro 2	Distribución por regiones naturales de depósitos de relaves inactivos, en situación de abandono y PAM.....	17
Cuadro 3	Tipos de emplazamiento de depósitos de relaves .....	19
Cuadro 4	Cantidad de depósitos según distancia al depósito más cercano.....	21
Cuadro 5	Multiplicador $k_i$ según diámetro aerodinámico de partículas para almacenamiento y manipulación y almacenamiento de pilas activas.....	39
Cuadro 6	Multiplicador $k_i$ según diámetro aerodinámico de partículas, para erosión eólica en terrenos industriales .....	39
Cuadro 7	Resumen de formulaciones de Factores de Emisión de EPA .....	41
Cuadro 8	Factores de emisión de material particulado en suspensión reportados por EEA .....	42
Cuadro 9	Inputs necesarios para evaluación en factores de emisión, clasificados según tipo .....	44
Cuadro 10	Inventario de emisiones de MP <sub>10</sub> para la ciudad de Andacollo.....	53
Cuadro 11	Comparación de factores de emisión aplicados a las ciudades de Andacollo y Copiapó.....	60
Cuadro 12	Inventario de emisiones anuales en Copiapó .....	61

**Gráficos**

Gráfico 1	Relaves en condición activa, inactiva, en abandonado y en construcción .....	10
Gráfico 2	Depósitos de relaves en condición inactiva y de abandonado por región .....	17
Gráfico 3	Tipología de depósitos de relaves en condición inactiva y de abandono .....	18
Gráfico 4	Método de construcción de los tranques de relaves en condición inactiva y en abandono .....	18
Gráfico 5	Distribución de la superficie ocupada por depósitos de relaves en situación de abandono por región .....	19
Gráfico 6	Distribución de depósitos en situación de abandono, según sector de emplazamiento .....	20
Gráfico 7	Distribución de depósitos según existencia de cubierta vegetal .....	21
Gráfico 8	Distribución de depósitos en situación de abandono según distancia entre depósitos.....	22
Gráfico 9	Distribución de depósitos en situación de abandono según distancia de sitios poblados .....	22
Gráfico 10	Cantidad de depósitos de relave en condición activa, inactiva y abandonados.....	47
Gráfico 11	Factores de Emisión evaluados entre 2015 y 2018 para el contexto de la comuna de Andacollo. Promedio anual .....	51
Gráfico 12	Respuesta del FE EPA 2006b, para distinto número de perturbaciones y umbral de erosión .....	52
Gráfico 13	Inventario de emisiones para Andacollo para cada metodología de factores de emisión.....	53
Gráfico 14	Cantidad de depósitos de relave en condición activa, inactiva y abandonados en la ciudad de Copiapó .....	56

**Imágenes**

Imagen 1	Tranques de relaves abandonados en el seno de la ciudad de Andacollo.....	23
Imagen 2	Tipos de transporte eólico de partículas.....	26
Imagen 3	Fuerzas actuando sobre una partícula de diámetro $d$ sobre una superficie bajo las influencias de una corriente de aire .....	27
Imagen 4	Representación gráfica de velocidad umbral $u^*$ en base a mediciones y expresiones semi-empíricas .....	28
Imagen 5	Tasas de erosión de depósitos de relaves de oro en Sudáfrica, variación en la inclinación del talud.....	30
Imagen 6	Tasas de erosión de depósitos de relaves de oro en Sudáfrica, variación en el largo del talud .....	30
Imagen 7	Distribución actual de depósitos de relaves en la localidad de Andacollo .....	47
Imagen 8	Depósitos en situación de abandono en la comuna de Andacollo .....	48
Imagen 9	Depósitos en quebradas con mayor potencial de daño .....	49
Imagen 10	Ejemplo de superposición de área de depósitos en Andacollo .....	49
Imagen 11	Segundo ejemplo de superposición de área de depósitos al este de Andacollo.....	50
Imagen 12	Distribución actual de depósitos de relaves en la ciudad de Copiapó .....	56
Imagen 13	Depósitos inactivos y abandonados en la ciudad de Copiapó .....	57
Imagen 14	Concentración de depósitos en situación de abandono entrando por Ruta 5 Norte a la ciudad de Copiapó .....	57
Imagen 15	Pasivos Ambientales Mineros (440 y 441), sector Punta Negra .....	58
Imagen 16	Pasivos Ambientales Mineros (69, 742 y 1052), sector poniente de Copiapó .....	59
Imagen 17	Depósitos de Relaves en un radio de 2 km, entrada a la ciudad de Copiapó por Ruta 5 (Panamericana Norte) .....	59
Imagen 18	Ejemplo de superposición de área de depósitos en Copiapó, según lo establecido por la NPI australiana, 2015.....	60





## Resumen

En 2019 Chile identificó un total de 742 depósitos de relaves, de los cuales 463 se encontraban inactivos y 173 en situación de abandono. Dentro de los relaves inactivos y abandonados, 53 son clasificados como pasivo ambiental minero debido al riesgo que significan para la salud de las personas y el medio ambiente. Uno de los factores de riesgo asociados a los depósitos de relaves es su erosión eólica y la emisión de partículas al aire. En este estudio se resumen distintas metodologías internacionales para la estimación de emisiones de material particulado a través del uso de factores de emisión y se discuten las necesidades y disponibilidad de información para la utilización de cada uno de ellos. También se realiza una aplicación práctica en dos ciudades de Chile con larga historia minera, Andacollo y Copiapó, como forma de analizar la sensibilidad de los factores de emisión a la información meteorológica disponible para los depósitos.

Si bien existen varias formulaciones para factores de emisión, ninguna de ellas se enfoca específicamente en los depósitos de relaves abandonados. Además, el proceso de erosión de cada depósito depende de parámetros propios del material en estudio por lo que se requiere de análisis acabados de sus propiedades físicas, así como de su interacción frente a parámetros climáticos locales. Lo anterior evidencia la necesidad e importancia de generar metodologías específicas para medir las emisiones derivadas de los depósitos de relaves internacionalmente replicables y empíricamente validadas.

Si se considera la cantidad y diversidad de depósitos de relaves en el país, contar con un factor de emisión del tipo heurístico se vuelve una herramienta crucial para normalizar las estimaciones, al menos hasta que se cuente con herramientas especializadas para cuantificar la erosión de relaves en situación de abandono. Por ello, se propone considerar los factores de emisión elaborados en 2019 por la Agencia Europea de Medio Ambiente para la estimación de las emisiones de material particulado.



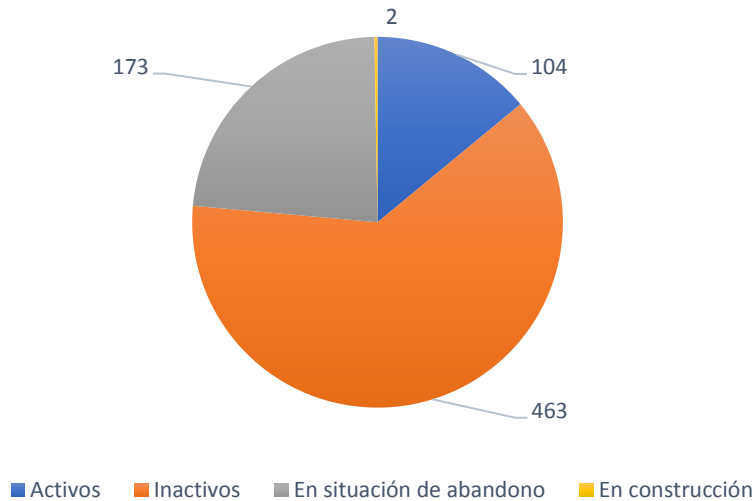
## Introducción

La emisión de material particulado a la atmósfera puede ser un problema aún mayor para la salud pública de Chile en las próximas décadas si se considera el significativo número de depósitos de relaves en condición inactiva, abandonada o paralizada. Esta situación se replica en otros países mineros de América Latina y el Caribe. Según el riesgo que un relave, abandonado o paralizado, podría representar para la población o el medio ambiente también puede ser considerado un Pasivo Ambiental Minero (PAM).

El Ministerio de Minería de Chile, a través del Decreto Supremo (D.S.) No 248 de 2007, define relave como la "suspensión de sólidos en líquidos, formando una pulpa, que se generan y desechan en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina. El vocablo se aplicará, también, a la fracción sólida de la pulpa". El mismo D.S. define depósito de relaves como: "toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una Planta de concentración húmeda de especies de minerales".

El Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) ha definido a los PAM como: "faena minera abandonada o paralizada, incluyendo sus residuos, que constituye un riesgo significativo para la vida o salud de las personas o para el medio ambiente" (Biblioteca del Congreso Nacional, 2012). El último catastro de faenas mineras realizado en el país por SERNAGEOMIN en 2019 identificó la existencia de un total de 742 depósitos de relaves, de los cuales 104 se encuentran activos, 463 inactivos, 173 en situación de abandono y 2 en construcción. Hay que notar que de los relaves inactivos y abandonados 31 y 22 son clasificados además como PAM, respectivamente (gráfico 1).

**Gráfico 1**  
**Relaves en condición activa, inactiva, en abandono y en construcción**  
 (En número)



Fuente: SERNAGEOMIN, 2019.

Respecto a los depósitos en situación de abandono, no se dispone de antecedentes que permitan evaluar su condición física-química actual, presentando una importante incertidumbre respecto a sus potenciales impactos al medio ambiente y a las comunidades. La mayor concentración de estos depósitos se encuentra en las Regiones de Atacama, Coquimbo y Valparaíso. Es importante mencionar además que un gran número de estos depósitos se clasifican como "depósitos pequeños", por tanto, no tienen la obligación de presentar compromisos de Planes de Cierre (Leyes 20.551<sup>1</sup> y 20.819<sup>2</sup>). La gran mayoría de estos depósitos operaron en años en que no existía una legislación que obligara a realizar un adecuado cierre de las instalaciones. Esto fue modificado en un comienzo por el reglamento de seguridad minera y posteriormente con la Ley 20.551. Esta realidad país dificulta el control y cuantificación de su impacto medioambiental en periodos que superen el ciclo minero. Ejemplos de deterioro del medio ambiente, producto de la liberación de material particulado, lo constituyen los casos emblemáticos de depósitos de relaves de la compañía Sally-Hotchild en Copiapó, Planta Whitle en Ovalle, La Paciencia en Rinconada de Los Andes y los depósitos de Andacollo.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) declara como contaminante atmosférico al material particulado en suspensión (MP), específicamente a las fracciones de partículas con diámetro aerodinámico igual o menor a 10 y 2,5  $\mu\text{m}$  (MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub>, respectivamente), debido a que éstas presentan efectos nocivos a la salud de la población expuesta a ellas (OMS, 2006).

Para establecer regulaciones sobre la emisión de material particulado es necesario contar con medios para evaluar la calidad del aire, así como con herramientas para cuantificar las emisiones particulares de cada fuente productora. Son tres los caminos posibles para llevar a cabo esta tarea: i) medir directamente las emisiones, ii) estimar las emisiones mediante expresiones simples del tipo empírico-analíticas, o iii) estimarlas mediante el desarrollo de modelos matemáticos/fenomenológicos

<sup>1</sup> Ley 20.551, "Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras" (Ministerio de Minería, 2011), publicado el 11 de noviembre de 2011 y entrado en vigor el 11 de noviembre de 2012.

<sup>2</sup> Ley 20.819, "Modifica la Ley N° 20.551 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras e introduce otras modificaciones legales", publicado el 14 de marzo de 2015.

avanzados (IPCC, 2006). En el caso de la medición directa de emisiones se plantea el desafío de individualizar las emisiones de una fuente en particular respecto a los aportes de otras fuentes.

En este sentido, las tareas de cuantificación de emisiones de contaminantes datan desde mediados de la década de los años 60 en Estados Unidos, donde se generaron expresiones matemáticas simples para estimar las emisiones medioambientales, las que fueron denominadas "Factores de Emisión" (Southerland, 2014). El Factor de Emisión (FE) correspondía al promedio estadístico de la tasa de emisión de contaminantes atmosféricos producto de procesamiento de una cantidad de material dado o a partir del uso de algún parámetro de interés, por ejemplo, la distancia recorrida por un vehículo (EPA, 1968).

Actualmente los FE se utilizan a nivel mundial para la estimación de material particulado emitido a la atmósfera para diversas actividades industriales. Éstos son definidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (US EPA, por sus siglas en inglés) como: "valores numéricos que representan la cantidad de un contaminante específico liberado a la atmósfera (u otro cuerpo receptor) asociado a una actividad que es capaz de emitir dicha sustancia. Éstos, generalmente, se expresan como la razón entre la cantidad del contaminante emitido dividido por unidad de peso, volumen, distancia o duración de la actividad que lo emite y son utilizados en la estimación de emisiones a partir de varias fuentes de contaminación" (EPA, 2007).

La industria minera actual ha evaluado el impacto ambiental de sus operaciones mediante el uso de estas expresiones. Sin embargo, en el caso de tranques<sup>3</sup> en situación de abandono la actividad propia que genera la emisión queda supeditada a factores propios del material depositado al momento del cese de la operación y a factores climatológicos. Esto presenta la incertidumbre y el desafío de contar tanto con información técnica en cantidad y calidad que permita la evaluación temporal de la emisión de material particulado.

Se debe mencionar que no existen metodologías para estimar las emisiones desde depósitos de relaves, y especialmente aquellos en situación de abandono. A nivel mundial no se han desarrollado factores de emisión para estimar específicamente emisiones de material particulado desde depósitos de relaves, por lo que se deben ocupar valores de contextos similares. Estos factores asimilables corresponden a estimaciones de emisiones producidas por vientos sobre material apilado y áreas abiertas. Su desarrollo comienza desde un estudio fenomenológico del traspaso de energía desde los vientos a material erosionable y consideran exclusivamente como variables la velocidad umbral de suspensión, velocidad de vientos y humedad superficial. Sin embargo, quedan fuera otras variables que afectan a la erosión, como: ángulo de la pendiente, extensión de la pendiente, distribución de tamaño de partícula, entre otras. Por otro lado, depósitos de relaves antiguos, como aquellos en abandono, presentan una alta heterogeneidad, con propiedades geotécnicas que varían en tiempo y espacio, por ejemplo, contenido de finos, cementación entre partículas, densidades superficiales, etc. Lo que dificulta la adopción de factores de emisión. Por tanto, el uso de factores de emisión presenta una incertidumbre inherente y debe considerarse como una herramienta válida, aunque aproximada, de la emisión real de estas estructuras de almacenamiento.

En términos normativos, no existen a nivel nacional indicaciones sobre el uso de factores de emisión en depósitos de relaves u otros residuos mineros. Por ejemplo, el Decreto Supremo N°248 (Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves) del Ministerio de Minería of. 2007, o Formulario E700, no especifica ningún aspecto respecto al material particulado en suspensión generado por efecto de la erosión eólica.

Por cómo se generan las emisiones de material particulado desde los depósitos de relaves en situación de abandono, sólo pueden ser clasificados como emisiones fugitivas. La única regulación a

---

<sup>3</sup> En el artículo 6(n) del Decreto Supremo N° 248 se define tranque de relaves como: "aquel depósito de relaves donde el muro de contención es construido con la fracción más gruesa del relave (arenas)."

nivel nacional que vela sobre éstas es el Decreto 105 Ministerio Medio Ambiente of. 2019 (MMA, 2019), desarrollado en el contexto de contaminación de Concón, Quintero y Puchuncaví. En el artículo 11, punto 1 "Para el material particulado (MP)" letra b, indica: "Las emisiones fugitivas provenientes de las fuentes señaladas en el cuadro 7, serán estimadas utilizando las metodologías requeridas para la Declaración de Emisiones que se realiza en el marco del D.S. N°138/2005 del MINSAL cuantificadas a través de factores de emisión definidos en el documento de la Agencia de Medio Ambiente de Estados Unidos, AP 42: "*Compilation of Air Pollutant Emission Factors*", o el que lo reemplace." Estableciendo un precedente para su uso en otros contextos no regulados, como lo son los relaves. Por otra parte, las normas de calidad de aire indican las concentraciones de MP<sub>10</sub> y MP<sub>2,5</sub> que se consideran aceptables, mas no se ha reportado cómo la presencia de un pasivo minero termina incidiendo sobre estas variables.

Por otro lado, el Decreto Supremo 40 (MMA, 2013) establece que para la predicción de los impactos ambientales es posible utilizar modelos, simulaciones, mediciones o cálculos matemáticos, y entendiendo que existen predicciones sólo de carácter cualitativo según la naturaleza del impacto. Por otro lado, se indica además que el "uso de procedimientos o metodologías necesarios para cumplir la exigencia señalada en el inciso anterior deberá estar debidamente justificado".

Considerando lo anteriormente expuesto, el uso de factores de emisión en depósitos de relaves requiere de una revisión permanente, en consideración del estado de la práctica y de los últimos desarrollos en investigación en temas de residuos mineros masivos. En este contexto, este estudio, corresponde a una revisión metodológica de factores de emisión utilizados o identificados como adecuados para ser utilizados depósitos de relaves en situación de abandono. Además, esta serie, será un insumo para el proyecto "Guía de Compensación de Relaves en el Marco de SEIA", actualmente en desarrollo por parte del Ministerio de Minería de Chile.

## I. Alcance

El presente documento es desarrollado para apoyar las políticas de sustentabilidad del Plan Nacional de Relaves liderado por el Ministerio de Minería del Gobierno de Chile (2019)<sup>4</sup>, que busca, entre otras cosas, disminuir y minimizar el impacto de tranques y depósitos de relaves en situación de abandono, así como contribuir a una minería más sostenible en América Latina y el Caribe.

Este informe técnico se focaliza en estudiar y presentar el estado del arte en el uso de Factores de Emisión (FE) para la estimación de material particulado generado desde fuentes fijas. Se presentan aspectos técnicos, así como la física del problema, discutiendo la aplicabilidad de los FE a tranques de relave en situación de abandono. Si bien los FE permiten estimar la cantidad de material particulado (MP) suspendido que puede generar un depósito en abandono, estos no consideran la química propia del material, por ejemplo, la presencia de metales pesados o metaloides. De igual forma, no evalúa la concentración del MP en puntos particulares de exposición, por lo que el potencial de afectación para la salud humana requerirá de información adicional.

El documento contiene una mirada holística al problema de depósitos de relaves en situación de abandono en Chile, identificando variables de interés (superficie ocupada a nivel regional, características del sector de emplazamiento, existencia de cubierta vegetal, distancia a sitios poblados, y distancia entre depósitos) que influyen en la cuantía de las emisiones de material particulado a la atmósfera. Se discute sobre el mecanismo de erosión eólica en suelos y depósitos de relaves de modo de establecer una mirada racional al fenómeno. La revisión bibliográfica se centra exclusivamente en las formulaciones existentes para estimar las emisiones de material particulado a la atmósfera, sin considerar los efectos que este material puede ocasionar en la salud de población o medio vivo, ni en los potenciales impactos en el medio ambiente por afectaciones de aguas subterráneas o superficiales por el transporte de contaminantes. De igual forma, se excluyen los potenciales impactos en flora y fauna por la generación, arrastre, transporte y depósito de material particulado. Los FE son un componente importante, pero no único al momento de cuantificar el riesgo potencial de un depósito en situación de abandono.

---

<sup>4</sup> Para más información, véase: <http://www.planderelaves.cl/assets/pdf/politicaserelaves.pdf>.

En base al estudio bibliográfico se presenta un resumen con las distintas formulaciones existentes para los FE en base a guías y normativas internacionales. Se detallan los principales factores o parámetros propios de cada metodología, así como la aplicabilidad de estos a la realidad nacional. A modo de ejemplo, se realizó un estudio de aplicabilidad de las distintas metodologías presentadas en este documento a las ciudades de Andacollo (región de Coquimbo) y de Copiapó (región de Atacama) tomando en cuenta la información meteorológica disponible para ambas ciudades.

Las formulaciones que se presentan, así como las metodologías de estimación, se centran exclusivamente en depósitos de relaves en situación de abandono, excluyendo otras estructuras mineras en abandono con potencial de generación de material particulado como botaderos de desmonte, plantas de beneficio, pilas de lixiviación, etc. La aplicación a otras estructuras de los FE presentes en este documento requerirá de estudios de aplicabilidad y validación específicos.



## II. Estado de los depósitos de relaves en situación de abandono en Chile

Este capítulo tiene por objeto analizar de manera cualitativa y cuantitativa los depósitos de relaves en condición inactiva y de abandono, así como aquellos que, de éstos, son considerados Pasivos Ambientales Mineros (PAM), catastrados a la fecha por SERNAGEOMIN en Chile. En primer lugar, se describe la situación actual de los depósitos de relaves, en base a su distribución según estado de actividad y mineralogía, para luego profundizar en cuanto a la cantidad, tipología y métodos de construcción de los depósitos. Un análisis más detallado de estos depósitos se realiza con base en la determinación de FE y de identificación de variables críticas que permitan una cuantificación de la emisión de material particulado a la atmosfera. En particular, se analiza la información disponible considerando cinco variables: a) superficie ocupada a nivel regional, b) características geográficas del sector de emplazamiento, c) existencia de cubierta vegetal, d) distancia de sitios poblados, y e) distancia entre depósitos. Los gráficos y figuras presentados en esta sección representan, en términos generales, la situación actual de los depósitos a nivel nacional. El detalle de las variables en estudio por región político-administrativa se encuentra disponible en [www.ministeriomineria.cl/](http://www.ministeriomineria.cl/).

### A. Situación General

Chile es actualmente el primer productor de cobre a nivel mundial, con una producción de 5.83 millones de toneladas métricas, para el año 2018, equivalente al 27,7% de la producción mundial (COCHILCO, 2018). Si bien esta actividad es fundamental en la constitución del Producto Geográfico Bruto (Banco Central, 2019), no está exenta de desafíos ligados a la existencia de instalaciones mineras inactivas, abandonadas o paralizadas y sus potenciales efectos sobre las comunidades y el ambiente.

Como se mencionó con anterioridad, el último catastro de faenas mineras realizado en Chile por SERNAGEOMIN (2019) identificó la existencia de un total de 742 depósitos de relaves, de los cuales un 14% se encuentran activos, un 62% inactivos, un 23% en abandono y un 0,3% en proceso de construcción. Además, dentro de los depósitos inactivos y en abandono existen los clasificados como

PAM y que equivalen a un 7,1% de los depósitos totales. De un punto de vista mineralógico y en relación con los yacimientos mineros que originaron los relaves, de los 742 depósitos identificados en el catastro de SERNAGEOMIN, un 39,2% almacena relaves de cobre, un 27,2% relaves de oro, un 24,8% corresponden a relaves mixtos y un 8,5% contienen relaves de otros minerales (como plata, hierro, molibdeno, sílice, zinc, carbonato de calcio, plomo, caolín y caliza). El 0,3% restante corresponde a 2 depósitos de los cuales se desconoce su origen mineralógico (cuadro 1).

**Cuadro 1**  
**Distribución de depósitos de relaves en Chile según su origen mineralógico**

Origen mineralógico	Cantidad	(en porcentajes)
Cobre	291	39,2
Oro	202	27,2
Cobre – Oro	150	20,2
Oro – Cobre	34	4,6
Oro - Cobre - Plata	17	2,3
Cobre - Molibdeno	17	2,3
Hierro	4	0,5
Oro - Plata	4	0,5
Sílice	4	0,5
Zinc	3	0,4
Cobre - Oro - Plata	3	0,4
Oro - Zinc	3	0,4
Carbonato de Calcio	2	0,3
Zinc - Oro	1	0,1
Cobre - Oro - Hierro	1	0,1
Oro - Cobre – Oro	1	0,1
Zinc – Plomo	1	0,1
Caolín	1	0,1
Caliza	1	0,1
S/A	2	0,3
<b>Total</b>	<b>742</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia sobre la base de SERNAGEOMIN, 2019.

Se observa que en el Norte Chico se emplazan 498 depósitos de relaves en condición inactiva y en abandono (incluyendo PAM), correspondiente al 78,3% del total de estos depósitos a nivel nacional. Luego se encuentra la Zona Central y el Norte Grande con un 10,4% y 10,1%, respectivamente, y finalmente la Zona Austral con un 1,3% de los depósitos (cuadro 2). La distribución por región político-administrativa de estos 3 tipos de depósitos de relaves se presenta en el Gráfico 2. En el caso de los 53 depósitos de relaves inactivos o abandonados categorizados por el Ministerio de Minería como PAM un 83% se emplazan en el Norte Chico (principalmente en la Región de Coquimbo), un 9,4% en el Norte Grande y un 7,5% en la Zona Central. En la Zona Sur y Austral no existen depósitos inactivos o abandonados tipo PAM.

**Cuadro 2**  
**Distribución por regiones naturales de depósitos de relaves inactivos y abandonados, y clasificados como PAM**

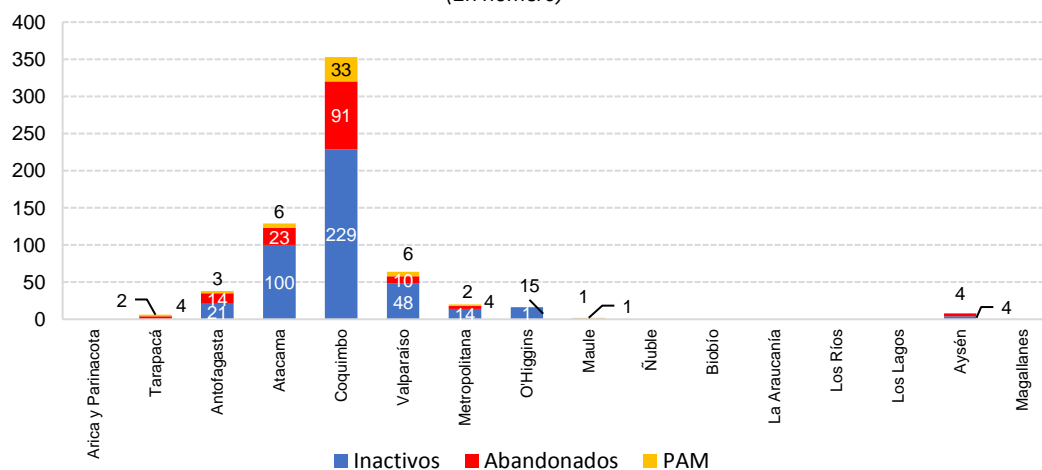
Estado	Tipología <sup>a</sup>	Método de construcción <sup>a,b</sup>	Regiones naturales				
			Norte Grande	Norte Chico	Zona Central	Zona Sur	Zona Austral
Inactivos	Tranques de arenas de relaves	Aguas Abajo	1	15	4	-	-
		Aguas Arriba	4	136	7	-	-
		Eje Central	2	50	2	-	-
		Sin antecedentes	15	102	18	-	3
	Embalse	-	7	41	20	-	1
	Filtrado	-	1	1	-	-	-
	Pretel de relaves	-	1	-	-	-	-
	Depósitos de relave Espesados en interior mina (DREIM)	-	-	-	1	-	-
Abandonados	Tranques de arenas de relaves	Aguas Abajo	-	1	1	-	-
		Aguas Arriba	8	36	-	-	-
		Eje Central	3	3	2	-	-
		Sin antecedentes	15	67	7	-	4
	Embalse	-	2	2	-	-	-
Inactivos o abandonados clasificados como PAM	Tranques de arenas de relaves	Aguas Abajo	-	1	-	-	-
		Aguas Arriba	1	18	-	-	-
		Eje Central	-	6	-	-	-
		Sin antecedentes	4	17	4	-	-
	Embalse	-	-	2	-	-	-
<b>Total</b>			<b>64</b>	<b>498</b>	<b>66</b>	<b>0</b>	<b>8</b>

Fuente: Elaboración propia sobre la base de SERNAGEOMIN, 2019.

<sup>a</sup> Definiciones sobre tipos de estructura y método de construcción se pueden encontrar en la "Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves", SERNAGEOMIN, 2007.

<sup>b</sup> El método de construcción aguas arriba está prohibido en Chile desde 1970 (D.S. 86, reemplazado en la actualidad por el D.S. 248 de 2007, ambos del Ministerio de Minería).

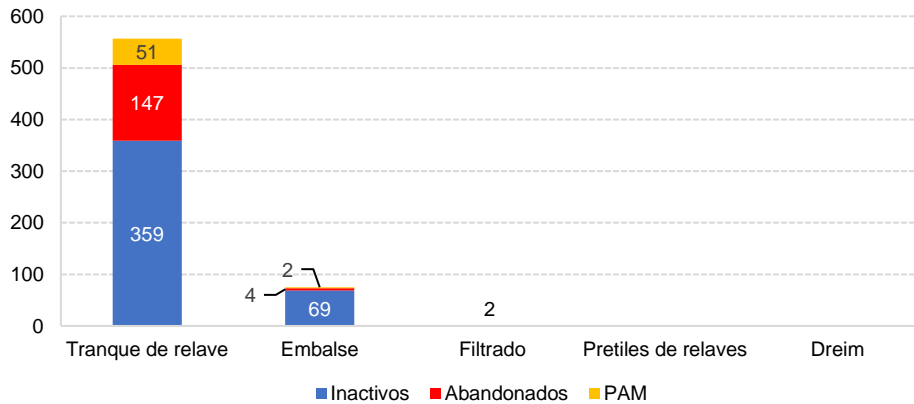
**Gráfico 2**  
**Depósitos de relaves en condición inactiva y de abandonado por región**  
 (En número)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de SERNAGEOMIN, 2019.

Respecto a la tipología de los depósitos, éstos corresponden principalmente a tranques de arenas de relaves y embalses de relaves, con un porcentaje de 87,6% y 11,8% del total catastrado (gráfico 3). Este tipo de depósitos se encuentran emplazados principalmente en la región del Norte Chico (regiones de Atacama y Coquimbo) y la Zona Central (regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule). El 0,6% restante lo constituyen depósitos de relaves filtrados, pretiles de relaves y del tipo DREIM (Depósito de relaves espesados en interior mina).

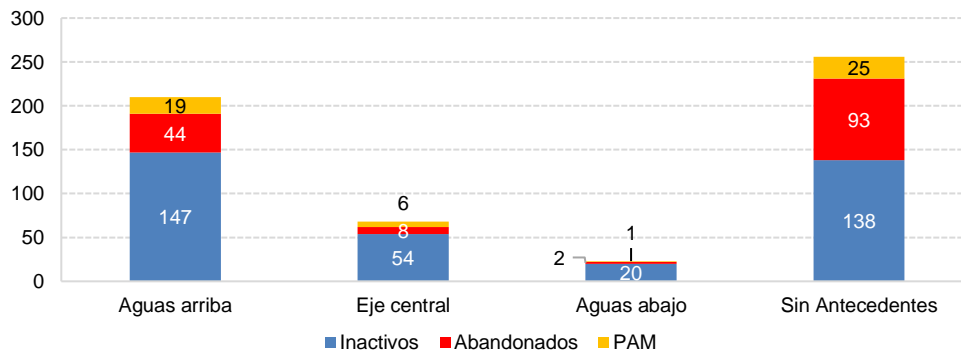
**Gráfico 3**  
**Tipología de depósitos de relaves en condición inactiva y de abandono**  
 (En número)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de SERNAGEOMIN, 2019.

En relación con el método de construcción de los tranques de arenas de relaves, existe un total de 210 "aguas arriba" (método prohibido en Chile desde 1970, luego de la promulgación del Decreto Supremo N°86 del Ministerio de Minería), 68 "eje central" y 23 "aguas abajo", los que constituyen un 54,0% del total catastrado. Un 46,0% (256 depósitos) de los depósitos no presenta información referente al método de construcción empleado (gráfico 4).

**Gráfico 4**  
**Método de construcción de los tranques de relaves en condición inactiva y en abandono**  
 (En número)



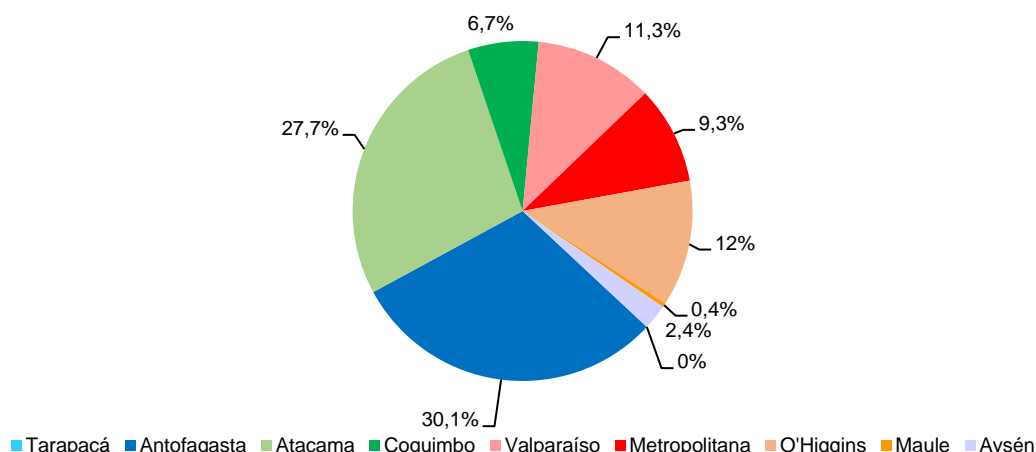
Fuente: Elaboración propia sobre la base de SERNAGEOMIN, 2019.

## B. Análisis de variables de interés en fenómenos de erosión eólica

### 1. Superficie ocupada a nivel regional

A nivel nacional, la superficie ocupada por los depósitos de relaves en situación de abandono, alcanzan aproximadamente 3.121 hectáreas, según estimaciones realizadas utilizando imágenes satelitales y considerando las coordenadas georreferenciadas que definen el emplazamiento de cada depósito. Las regiones de Antofagasta y Atacama son las que presentan los mayores porcentajes de depósitos en situación de abandono, alcanzado en conjunto un 57,8%, seguidas por las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins, Valparaíso, Metropolitana, Coquimbo y Aysén con un porcentaje total del 41,8%. Las regiones de Tarapacá y del Maule menos de un 0,35% del total (gráfico 5).

**Gráfico 5**  
Distribución de la superficie ocupada por depósitos de relaves en situación de abandono por región  
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de SERNAGEOMIN, 2019.

### 2. Características del sector de emplazamiento

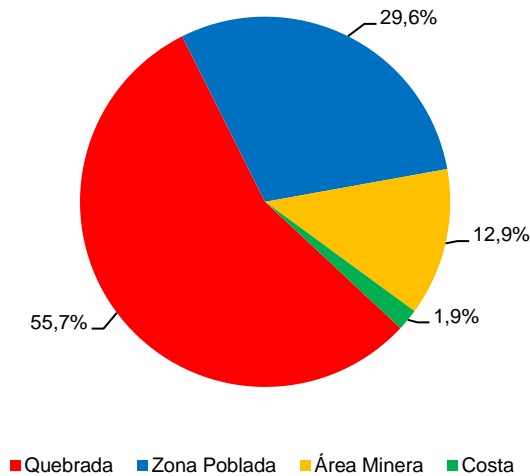
Para analizar el sector de emplazamiento de los depósitos de relaves se definen cuatro categorías (cuadro 3). En base a estas categorías, los sectores donde se emplazan los depósitos corresponden mayoritariamente a quebradas (55,7%) y zonas pobladas (29,6%). Un menor porcentaje se emplazan en áreas mineras (12,9%), mientras que los 12 depósitos restantes (1,9%) se ubican en las cercanías de la línea de costa marítima (gráfico 6).

**Cuadro 3**  
Tipos de emplazamiento de depósitos de relaves

Sector de emplazamiento	Descripción
Quebrada	Cuencas de quebradas y/o depósitos que se emplazan a una distancia mayor a 1 (km) de zonas pobladas, sectores mineros o de la línea de costa.
Zona Poblada	Sectores habitados y/o depósitos que se emplazan a una distancia menor a 1 (km) de dichas zonas. Se excluyen depósitos ubicados en áreas mineras.
Área Minera	Zonas donde se desarrollan actividades asociadas al sector minero (explotación, procesamiento, refinación, carguío y transporte, etcétera).
Costa	Depósitos ubicados a menos de 1 (km) de la línea de costa marítima.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.

**Gráfico 6**  
**Distribución de depósitos en situación de abandono, según sector de emplazamiento**  
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.

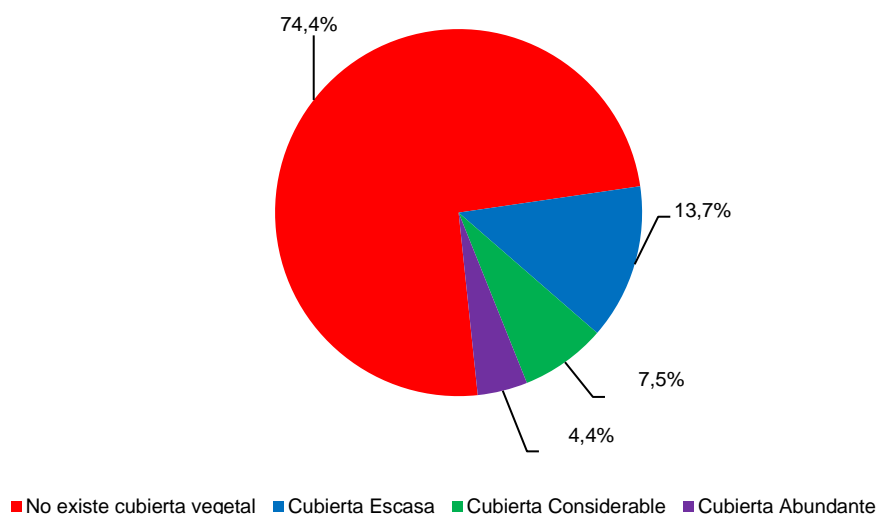
### 3. Existencia de cubierta vegetal

Autores como Espinace *et al.* (2006) y Blight (2008) han demostrado en diversos estudios que la cubierta vegetal actúa como medio de protección en los depósitos de relaves al aumentar la rugosidad de la superficie y disminuir las tasas de erosión eólica. Mediante el análisis de imágenes satelitales, se identificaron los depósitos de relaves que presentan cubierta vegetal de acuerdo con:

- **Escasa:** se distinguen pastizales, especies arbustivas y/o arbóreas en algunas partes del depósito.
- **Considerable:** existen áreas del depósito cubiertas por vegetación; la superficie está protegida de manera parcial.
- **Abundante:** el talud o la totalidad de la superficie del depósito se encuentran cubiertas por abundante vegetación.

De los 636 depósitos de relaves identificados (gráfico 7), el 74,4% no presenta cubierta vegetal, 13,7% tiene una cubierta escasa, 7,5% una cubierta considerable y sólo el 4,4% (equivalente a 28 depósitos) una cubierta abundante.

**Gráfico 7**  
Distribución de depósitos según existencia de cubierta vegetal  
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.

#### 4. Distancia entre depósitos

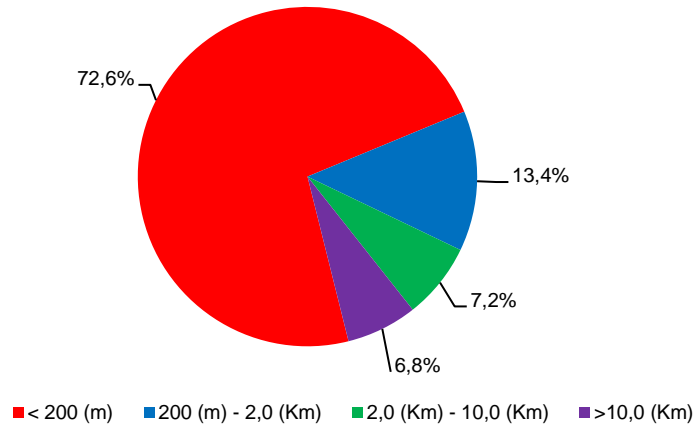
La *National Pollutant Inventory Guide* (NPI, 2015) del Departamento del Medio Ambiente del gobierno de Australia establece en sus definiciones que si dos fuentes de emisión (no se especifica a los tranques de relave) se encuentran a menos de 2 km, deben considerarse como uno sola fuente de emisión, a menos que existan áreas residenciales situadas entre ambos depósitos (el concepto de área residencial no viene establecido en las definiciones de la NPI). Para distancias entre 2 y 10 km queda a criterio del evaluador si se considera como una o dos instalaciones, a menos que existan áreas residenciales entre estos depósitos. Si la distancia entre los emisarios de material particulado es superior a 10 km, deben tratarse como instalaciones independientes. En base a este criterio, es posible concluir que en Chile existen 547 depósitos en situación de abandono separados a menos de 2 km de otro depósito, 46 depósitos se encuentran a una distancia de 2 a 10 km, y 43 se emplazan a más de 10 km del depósito más cercano (cuadro 4). En el gráfico 8 se presenta su distribución porcentual respecto la distancia del depósito más cercano.

**Cuadro 4**  
Cantidad de depósitos según distancia al depósito más cercano

Distancia entre depósitos	Cantidad de depósitos	Porcentaje
< 200 (m)	462	72,6
200 (m) – 2,0 (km)	85	13,4
2,0 (km) – 10,0 (km)	46	7,2
> 10,0 (km)	43	6,8

Fuente: Elaboración propia sobre la base de NPI, 2015 y sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.

**Gráfico 8**  
**Distribución de depósitos en situación de abandono según distancia entre depósitos**  
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de NPI, 2015 y sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.

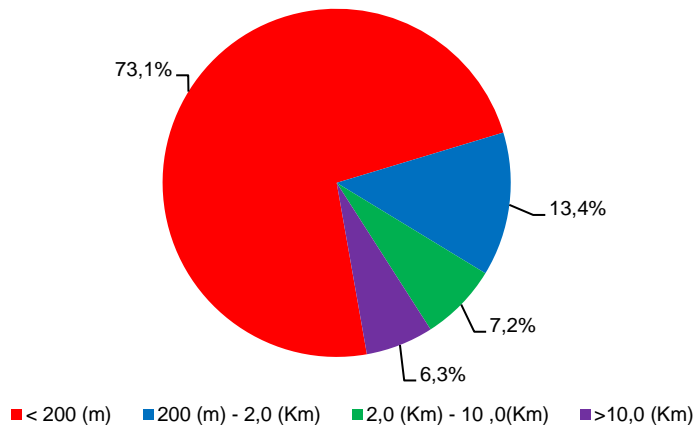
### 5. Distancia a sitios poblados

Según lo indicado en el punto anterior, además de conocer la distancia entre los depósitos o fuentes de emisión, es necesario conocer la distancia a áreas residenciales. Este análisis se realizó de manera preliminar utilizando información de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.

De manera orientativa, un primer análisis de los antecedentes disponibles permite concluir que 465 depósitos de relaves en situación de abandono se encuentran a menos de 200 m de un sitio poblado, 85 entre 200 m y 2 km de distancia, 46 depósitos entre 2 y 10 km, y 40 depósitos a más de 10 km, como se ilustra, de manera porcentual, en el gráfico 9.

Es necesario indicar que por sí sola la distancia a poblados o a tranques de relave en cercanías no considera factores como la dirección del viento, pudiendo existir el caso de receptores de material particular en cercanías de una instalación, pero en contra de la dirección predominante del viento que sopla desde la fuente emisora.

**Gráfico 9**  
**Distribución de depósitos en situación de abandono según distancia de sitios poblados**  
 (En porcentajes)

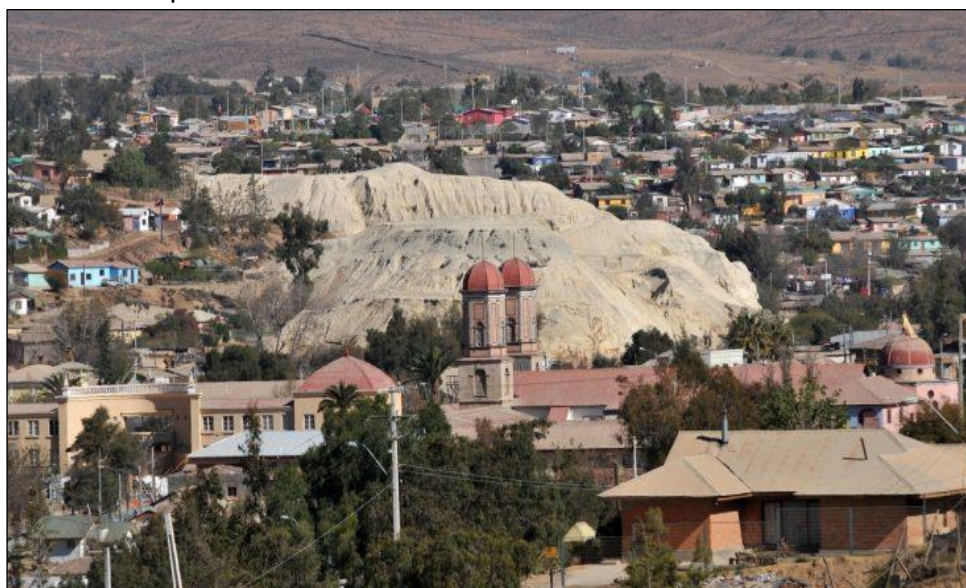


Fuente: Elaboración propia sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.



Como ejemplo de la cercanía entre centros poblados y depósitos abandonados destacan los 8 depósitos de relaves, clasificados además como PAM, existentes en plena ciudad de Andacollo (imagen 1). Otros ejemplos relevantes corresponden a los depósitos de relaves de Sally-Hochschild en Copiapó, Planta Whitle en Ovalle, La Paciencia en Rinconada de Los Andes, entre otros.

**Imagen 1**  
**Tranques de relaves abandonados en el seno de la ciudad de Andacollo**



Fuente: Revista Técnicos Mineros, 2016.

Para más información véase: <http://www.revistatecnicosmineros.com/2016/06/minera-teck-propone-trabajar-en-la-remocion-de-los-relaves-abandonados-de-andacollo/>.

## C. Consideraciones respecto a la estabilidad física-química

En el pasado y a mediano y largo plazo los depósitos de relaves en condición de abandono han presentado y podrían presentar problemas de estabilidad física y química (incluyendo fenómenos de erosión eólica) si se consideran los siguientes aspectos:

- i) De la totalidad de los depósitos de relaves categorizados como PAM, no se dispone de antecedentes respecto de su actual condición de estabilidad o de condiciones superficiales de los materiales. Ejemplos lo constituyen los casos de las regiones de Antofagasta, Copiapó, Coquimbo y Valparaíso, emplazados cerca a sectores poblados, terrenos de uso agrícola o próximos a cauces de ríos. Si bien hasta la fecha no se han reportado inestabilidades físicas o problemas de contaminación medioambientales significativas, estos depósitos podrían presentar inestabilidades como consecuencia de las intensas lluvias y aluviones de gran magnitud que se están presentando producto del cambio climático (ej. Región de Atacama en 2015 o Quebrada “La Marquesa”, Región de Coquimbo en 2016).
- ii) Existen alrededor de 600 depósitos de relaves categorizados como pequeños. De este número, un 89% se encuentra en situación de abandono, con una importante incertidumbre respecto a su condición física-química actual.

- iii) Respecto a los incidentes que se han generado en depósitos de relaves, en Chile entre 1915 y 2010, se han reportado y documentado 38 casos (Dobry y Alvarez, 1967; Castro y Troncoso, 1989; Troncoso, 2002; Villavicencio *et al.* 2014). El análisis de los casos permite concluir que el 36,8% de los incidentes se produjo en tranques de arenas de relaves en condición de abandono o parcialmente abandonados del tipo aguas arriba emplazados entre las regiones IV y VI, con alturas de muros entre 5 y 50 metros, con nula o deficiente compactación, con taludes en dirección aguas abajo generados por simple depósito hidráulico de las arenas de relave cicloneadas y alto grado de saturación. Esto es significativo en consideración que el 91,8% de los depósitos en situación de abandono actuales se concentran en estas regiones (SERNAGEOMIN, 2019).

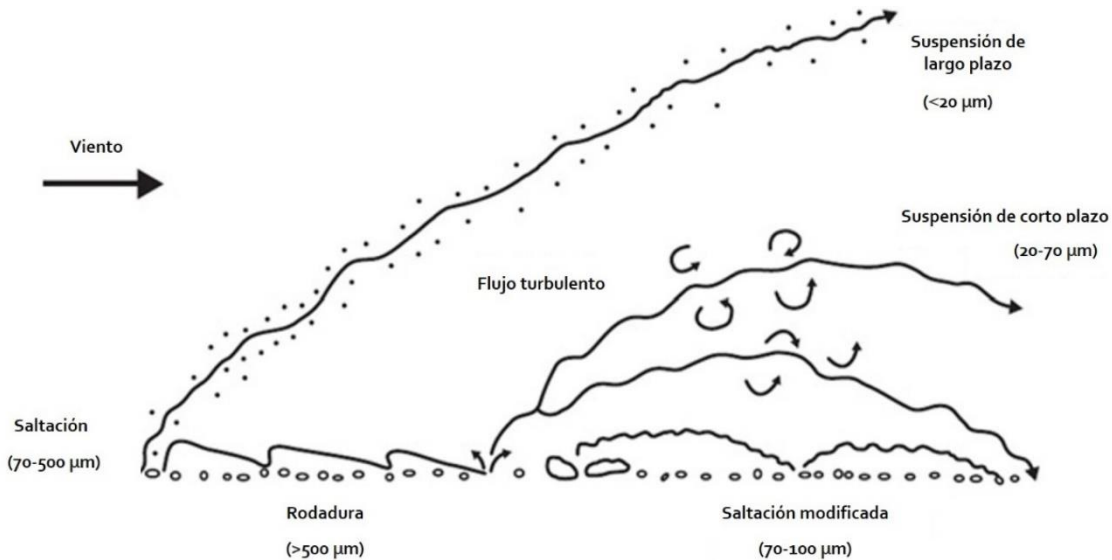
### III. Mecanismos de erosión eólica en suelos y relaves

La erosión del suelo es un proceso geológico normal, que se manifiesta con mayor intensidad en ambientes áridos y semiáridos, y suele ser generado tanto por factores antropogénicos, como por acción del agua y del viento (Buschiazzo *et al.*, 2003). La erosión eólica consiste en la remoción progresiva de partículas del suelo producto de la sollicitación ejercida por el viento sobre la superficie del material. Según Valenzuela (2015), dicho fenómeno provoca efectos tanto *in situ*, tales como la degradación y pérdida del material en un lugar específico; como en regiones aledañas, con presencia de polvo atmosférico en localidades cercanas a la zona de origen de tal fenómeno, lo que podría traer consigo enfermedades respiratorias y contaminación ambiental. La degradación erosiva ocurre cuando corrientes turbulentas de aire pasan sobre la superficie del suelo generando fuerzas suficientes y superiores a las de resistencia al movimiento, establecidas por gravedad, fricción y cohesión del material. Dicha degradación es conocida con el nombre de abrasión, desarrollándose principalmente en regiones con clima árido y semiáridos, como los encontrados en la zona norte del país. Las partículas así desprendidas inician su movilización y transporte, mediante los mecanismos de rodadura (*creep*), saltación (*saltation*) y suspensión, como se ejemplifica en la imagen 2.

El transporte denominado **rodadura o arrastre (*creep*)**, corresponde al rodado de las partículas a lo largo de la superficie del suelo, generado por el viento y, además, por el impacto existente entre partículas quietas con otras que ya fueron movilizadas. A medida que ocurre tal fenómeno, las partículas se van desgastando, dando paso a otras con menor diámetro que podrían, a su vez, generar transporte por saltación o suspensión. Generalmente las partículas que se mueven mediante este mecanismo se encuentran en un rango de 500 a 2000  $\mu\text{m}$  de diámetro.

La **saltación** corresponde al principal medio de transporte que genera erosión eólica y comprende aproximadamente entre un 50% a un 80% del total de partículas movilizadas por la acción del viento. Estas generalmente poseen un diámetro comprendido entre 70 y 500  $\mu\text{m}$ . Shao (2008) plantea que las partículas bajo saltación son dispersadas en la superficie atmosférica con un ascenso vertical empinado cercano a 55°, seguido de un descenso horizontal, hasta golpear el resto de las partículas en un ángulo cercano a 10° de suspensión

Imagen 2  
Tipos de transporte eólico de partículas



Fuente: Nickling y McKenna Neuman, 2009.

El fenómeno de **suspensión** corresponde al transporte por flotación en el aire de partículas pequeñas, el cual se inicia por choque de otras ya movilizadas, generalmente por el impacto de partículas provenientes de la saltación. El volumen de material suspendido puede estimarse según el cráter creado por la partícula de saltación que impacta el terreno (Kon *et al.*, 2007). A partir de lo descrito por Dentoni *et al.* (2018), y dependiendo del diámetro que presenten las partículas sujetas al fenómeno presentado, existirán 2 tipos de suspensión: de largo plazo (<20  $\mu\text{m}$ ) y de corto plazo (20-70  $\mu\text{m}$ ).

En lo que respecta tanto a los fenómenos de saltación y suspensión, en los cuales sí existe un levantamiento de la partícula hacia la capa atmosférica debido a la acción del viento, la permanencia de esta en el aire será el resultado de la interacción entre la velocidad terminal de sedimentación ( $w_t$ ) (dependiente del diámetro de la partícula, su densidad y la turbulencia que esta experimenta mientras cae) y la velocidad Lagrangiana ( $ku_*$ ) (Hunt *et al.*, 1979) de un volumen de aire dispersado hacia la atmosfera por la turbulencia existente en la capa límite de la interacción suelo-atmosfera. A partir de lo observado por Shao (2008), si  $w_t/ku_* \ll 1$ , la dispersión turbulenta prevalecerá sobre las fuerzas gravitacionales ejercidas sobre la partícula, generando un fenómeno de suspensión de largo plazo. Por el contrario, si la relación es  $w_t/ku_* \gg 1$ , la acción gravitacional predomina sobre la dispersión turbulenta del aire, generando suspensión de corto plazo. En cuanto al fenómeno de la saltación, las partículas generalmente poseen un diámetro en el rango de clasificación de arenas finas a gruesas, por ende, su velocidad terminal es mucho mayor que la velocidad Lagrangiana, generando una rápida sedimentación.

## A. Umbral de erosión del viento

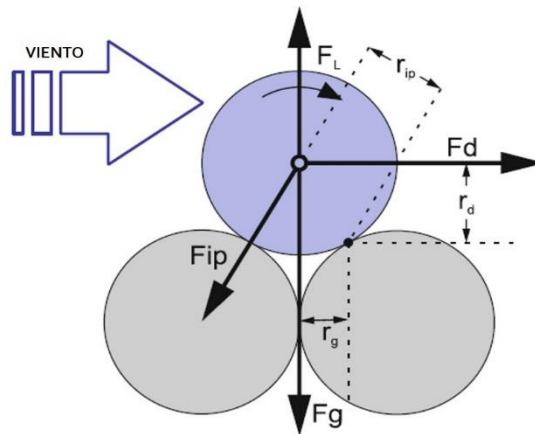
Entendemos por viento a la velocidad con la cual se mueve una determinada masa de aire en el tiempo y espacio, donde dicho movimiento se genera para balancear la existencia de algún gradiente de presión (Stowhas, 2016). Lo anteriormente expuesto se puede representar mediante las expresiones que relacionen la velocidad media estacionaria del viento en un determinado lugar de análisis,  $\bar{v}(x)$ , con las componentes transitorias, locales y aleatorias del mismo lugar,  $w(x, t)$ .

La velocidad media del viento se entiende como la magnitud y dirección promedio de los vientos atmosféricos según la circulación general de la atmósfera, una vez suavizados y filtrados las componentes transitorias y locales, causados por perturbaciones barométricas, térmicas o de densidad. A medida que las masas de aire se mueven, el movimiento es retardado por la fricción existente en la interacción de la superficie terrestre y la masa de aire movilizadas, hecho que genera una variación de velocidades del viento a medida que aumenta la altura sobre la superficie de la tierra (el denominado perfil de velocidades).

Para que ocurra alguno de los mecanismos de transporte mencionados en la interacción erosiva del viento y del suelo, se debe superar una "velocidad crítica" dependiente mayoritariamente del diámetro de las partículas y otros factores descritos con posterioridad. Dicha velocidad crítica recibe el nombre de **velocidad de fricción del umbral de erosión del viento** y corresponde a la mínima velocidad para la cual comienza a generarse el fenómeno de arrastre, saltación o suspensión (Dentoni *et al.*, 2018). Es decir, en función del diámetro, existirá una velocidad crítica específica para cada modelo de transporte.

En la literatura existen diversos modelos para estimar la velocidad de fricción del umbral de erosión del viento. En general, se plantea como común denominador la interacción entre las partículas representadas en la Imagen 3. Según Shao y Lu (2000), en la interacción interactúan la fuerza gravitacional ( $F_g$ ), fuerzas cohesivas entre partículas ( $F_{ip}$ ), fuerza de arrastre dependiente del grado de turbulencia que exista en la superficie límite donde ocurra el fenómeno del transporte ( $F_d$ ), y fuerzas de succión generadas por gradientes de presión entre las líneas de flujo que rodean la partícula ( $F_L$ ).

**Imagen 3**  
Fuerzas actuando sobre una partícula de diámetro  $d$  sobre una superficie bajo las influencias de una corriente de aire



Fuente: Shao y Lu, 2000.

Bagnold en el año 1941<sup>5</sup>, planteó un modelo que en función de las densidades del aire y de las partículas, su diámetro, y del grado de turbulencia en la capa límite, permite establecer una relación en la que la velocidad umbral  $u_{*t}$  varía proporcional a un factor  $A$  dependiente del número de Reynolds y la raíz cuadrada del diámetro de la partícula. Lo anterior es válido solo para partículas superiores a 100  $\mu\text{m}$ , pero falla en la predicción de un mínimo alrededor de los 75  $\mu\text{m}$  y el subsecuente incremento de la velocidad umbral  $u_{*t}$  a medida que disminuye el diámetro (Shao y Lu, 2000). Dicho incremento en  $u_{*t}$  a medida que decrece el diámetro de las partículas a partir de los 75  $\mu\text{m}$ , se debe a que aumenta la cohesión entre estas

<sup>5</sup> Bagnold, R. A. (1941), The Physics of Blown Sand and Desert Dunes.

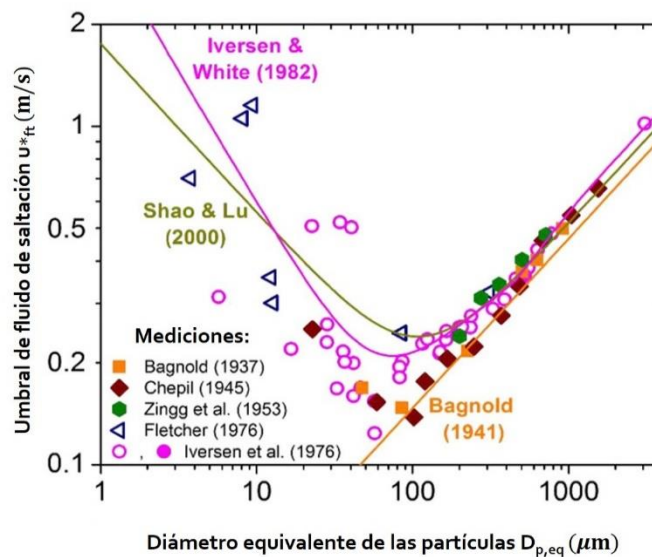
y considerando el diámetro que poseen, las partículas descansan bajo la capa viscosa en donde se desarrolla la turbulencia y son poco susceptibles a las fuerzas aerodinámicas ejercidas por el viento.

En el modelo de Greeley-Iversen (1987) se cuantifican las fuerzas involucradas en balance de momentos de Bagnold (más algunas consideraciones de fuerzas adicionales), mediante expresiones dependientes del diámetro y densidad de la partícula, además de la velocidad del viento  $u_*$ , asociados a distintos factores de peso adimensionales determinados empíricamente. Según Kon *et al.* (2007), en lo que respecta a la expresión de la determinación de la velocidad umbral  $u_{*t}$ , esta posee un carácter similar a la descrita por Bagnold, vale decir, proporcional a la raíz cuadrada del diámetro de la partícula en estudio, pero corregida mediante factores calibrados en laboratorio dependientes del número de Reynolds  $F(Re_{*t})$  y del diámetro de la partícula, que consideran implícitamente la fuerzas de cohesión.

Además de las representaciones de velocidad umbral  $u_{*t}$  descritas con anterioridad, Shao y Lu (2000) señalan que el modelo de Greeley-Iversen posee expresiones carentes de sentido físico que no pueden interpretarse de manera clara. El mismo autor plantea que un tratamiento más explícito con respecto a las fuerzas cohesivas ( $F_{ip}$ ), puede generar un esquema más preciso y con mayor sentido físico. Se considera que estas fuerzas cohesivas corresponden a fuerzas electrostáticas y de Van der Waals en partículas esféricas libres de la influencia de la humedad y la unión química. Como resultado de estas consideraciones, Shao y Lu (2000) establecen que la velocidad umbral  $u_{*t}$  es proporcional a la gravedad y de las densidades tanto del aire como de la partícula en estudio y a una constante dimensional  $\beta$ .

Cabe destacar que los modelos anteriores fueron descritos bajo la hipótesis de partículas esféricas y sin contenido de humedad, despreciando otro tipo de fuerzas cohesivas tales como fuerzas de capilares y de Coulomb, o la propia cohesión verdadera de suelos finos. Por ende, en todos los esquemas planteados se introduce un grado de incertidumbre en el estudio de la velocidad umbral  $u_{*t}$ . La comparación gráfica de los modelos presentados, junto con otros que se pueden encontrar en la literatura, se presentan en la imagen 4.

Imagen 4  
Representación gráfica de velocidad umbral  $u^*$  en base a mediciones y expresiones semi-empíricas



Fuente: Kok *et al.*, 2012.

## B. Estudio de erosión eólica en depósitos de relaves

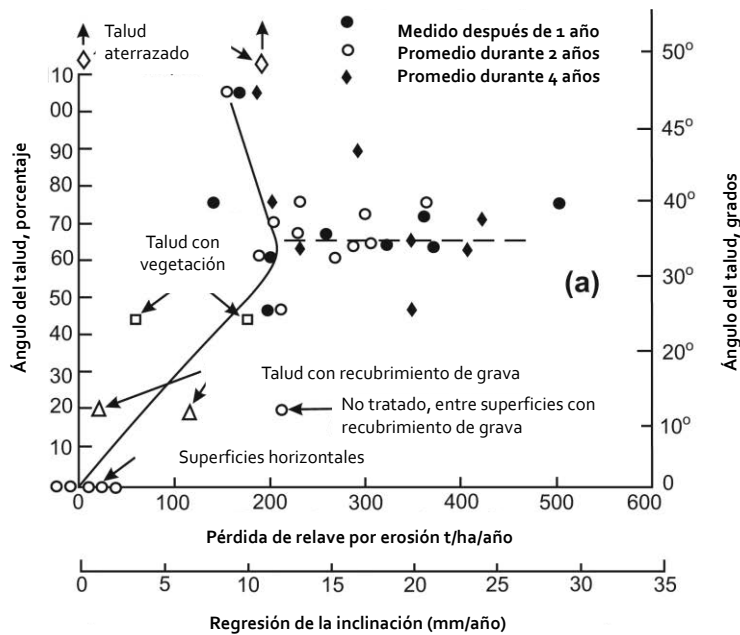
Existe un número limitado de estudios de erosión eólica en relaves donde el enfoque de los estudios ha sido la medición in situ o en cámaras de viento del material removido. Al igual que en Chile, los esfuerzos se han concentrado tanto en la generación de modelos sobre erosión en tranques activos (Kon *et al.* 2007; Jia *et al.* 2014), como en la supresión de material particulado mediante distintas técnicas (Olson y Veith 1987; Hadjiev y Hadjiev 2003; Buikema *et al.* 2017). Por ejemplo, Stefanescu *et al.* (2011) evaluó la tasa de erosión eólica e hídrica en el área minera de la ciudad de Roşia Montană, Rumania, utilizando el método *Universal Soil Loss Equation* (USLE, Wischmeier y Smith, 1978), el cual representa el promedio de pérdidas anuales de suelo a largo plazo en unidades [ton/ha/año]. Los datos de ingreso para la utilización del modelo comprenden tanto parámetros empíricos tales como coeficientes de erosionabilidad del suelo, uso del suelo y de erosividad de la lluvia; además de factores calculados a partir de la morfometría de la zona de estudio asociados a la longitud y ángulo de la pendiente. Del área total analizada por el autor (21 km<sup>2</sup>), un 5% correspondía a depósitos de relave u otros tipos de desechos mineros, sin protección alguna. Las tasas de erosión registradas alcanzaron valores mayores a 16 [ton/ha/año], lo que según el criterio ICPA del Instituto de Investigación de Pedología y Agroquímica de Rumania corresponde a una tasa de erosión alta o extremadamente alta.

Observaciones de Blight (2012) establecieron que el método USLE es considerado válido solo para pendientes menores o iguales a un 25% (14°) con respecto a la horizontal, perdiendo validez para el análisis en terrenos más empinados, ej. presas de relaves. El profesor Blight (University of the Witwatersrand) fue uno de los pioneros en el estudio de fenómenos de erosión eólica en depósitos de relaves. Uno de sus estudios permitió analizar la acreción de material en depósito con pendientes de 20°, con cubierta vegetal en su primer tercio y cubierta de grava de aproximadamente 50% de la superficie restante de la longitud del depósito. El resultado de estas mediciones muestra que existe acreción en la zona cubierta por vegetación y capas de rocas, con un valor acumulado de 1.450 [ton/ha], mientras que en la zona desprotegida del suelo posee una tasa de erosión cercana a 1.300 [ton/ha] en un periodo de 3 años. De manera análoga, analizando dunas de arena, pero bajo el enfoque del parámetro de factor de amplificación de viento, Blight (2008) observó que éste crece a medida que el viento recorre la pendiente del suelo, aumentando consigo la posibilidad de arrastre de material. Por otro lado, el factor de amplificación disminuye súbitamente al alcanzar una superficie plana o bien, el tope de la duna, hecho contrario a lo pensado en las primeras investigaciones sobre la mecánica de la erosión eólica en Sudáfrica, donde se creía que el polvo y el material erosionado, provenían de la parte superior de cualquier tipo de depósito (Blight, 1991).

A partir de estos primeros análisis, diversas investigaciones fueron llevadas a cabo para determinar cuáles son las principales variables que afectan en la tasa de erosión eólica en depósitos de relave, siendo concluyentes en que los factores más relevantes en dicho fenómeno son: **el ángulo y longitud del talud**, imágenes 5 y 6 (Blight, 1989; Blight, 1991; Blight, 2012), **además de su tipo de cubierta o rugosidad** (Amponsah-Dacosta, 2015 y Zhang *et al.*, 2015).

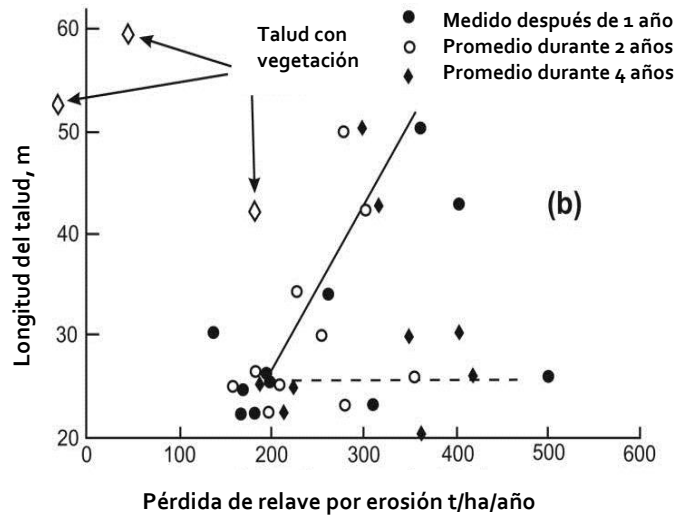
De la imagen 5 se desprende que la mayoría de las pendientes sobre las cuales se efectuaron las mediciones, y que además tienen las mayores tasas de erosión por acción del viento y el agua, poseen un ángulo de inclinación de aproximadamente 35°, concentrando su respectiva tasa de erosión entre 200 a 300 [ton/ha/año]. En las pendientes cubiertas por pasto, estas poseen una menor tasa de erosión que aquellas que no poseen ningún tratamiento, alcanzando magnitudes inferiores a 100 [ton/ha/año] e incluso, en algunos casos, presentando acreción (Blight, 2008). En la Imagen 6 se detalla que en tres superficies a un mismo ángulo de inclinación (aproximadamente 15°), pero con distinta capa superficial (dos poseían cubierta de grava y otra ningún tipo de protección), la variación en la tasa de erosión puede ser desde 25 [ton/ha/año] para el caso de las superficies cubiertas con grava, hasta 200 [ton/ha/año] para el caso con suelo descubierto.

**Imagen 5**  
**Tasas de erosión de depósitos de relaves de oro en Sudáfrica, variación en la inclinación del talud**



Fuente: Blight, 2012.

**Imagen 6**  
**Tasas de erosión de depósitos de relaves de oro en Sudáfrica, variación en el largo del talud**



Fuente: Blight, 2012.

En Chile, los estudios acerca de los efectos de la acción eólica sobre los depósitos de relaves han sido desarrolladas mayoritariamente en la última década. Espinace et al. (2006) realizaron una investigación en el tranque de arenas de relave N°3 de la planta Manuel Antonio Matta Ruiz (ENAMI, Copiapó), estableciendo una metodología para estimar la altura del depósito a partir de la cual el muro



de dicha instalación comienza a erosionarse en función de las velocidades y dirección del viento, y caracterización geotécnica del sector. Este trabajo, resultó luego en la generación de la NCh3266-2012 "Depósitos de relaves - Caracterización del producto supresor de material particulado - Evaluación de propiedades de desempeño de los relaves tratados con supresor de material particulado". Durante los años comprendidos entre 2008 y 2010, nuevamente el tranque de arenas de relave N°3 de la planta Manuel Antonio Matta Ruiz fue objeto de estudio, pero esta vez mediante los procedimientos e instrumentación descritos en la NCh3266-2012<sup>6</sup>. En dichas campañas se evaluaron in situ los mecanismos de transporte de partículas correspondientes a elementos en saltación y arrastre mediante la construcción de 12 canchas de prueba (8 de ellas fueron estabilizadas con supresor de material particulado). El desempeño del relave en las dos situaciones consideradas fue diferente, producto del efecto del material supresor. En algunas canchas no protegidas, se observó erosión en casi toda su extensión, alcanzando pérdidas de relave en un espesor de hasta los 10 [cm] lo que corresponde a una tasa de retroceso de 1,25 [cm/mes] durante 8 meses. Por otro lado, las canchas estabilizadas disminuyeron su erosión en un 81,6% respecto a las canchas sin estabilizar.

Valenzuela (2015), realizó además mediciones en túnel de viento con la finalidad de analizar el desempeño de probetas de relave variando su densidad, humedad y tratamiento con producto supresor de material particulado. Según el autor, una probeta preparada a densidad mínima, en estado seco, sin producto supresor, presentó una resistencia nula a la acción del viento con arrastre de material cercano al 90%, mientras que otra probeta preparada a la misma densidad mínima, pero con un 18% de humedad, presentó un valor de arrastre cercano al 1%. Cabe mencionar que todos los ensayos fueron efectuados a una sollicitación eólica de 12 horas a una velocidad de viento de 12 [m/s]. Lo anterior resalta la importancia de las variables de estado (humedad, densidad, profundidad) en procesos de erosión en depósitos de relaves. A lo anterior, se deben agregar características propias de los materiales (resistencia a esfuerzos de corte, granulometría, rugosidad, etc.)

---

<sup>6</sup> NCh3266-2012 (2012), Depósitos de relaves - Caracterización del producto supresor de material particulado - Evaluación de propiedades de desempeño de los relaves tratados con supresor de material particulado. Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile.



## IV. Metodologías para el cálculo del Factor de Emisión

Los Factores de Emisión (FE) se desarrollan metodológicamente a partir de análisis estadísticos de información específica y que deben cumplir con estándares de transparencia, consistencia, comparabilidad y precisión (IPCC, 2006). Si bien los FE son una herramienta útil y sencilla, conllevan a incertidumbres que no se deben obviar al momento de utilizarlos. Los FE se pueden presentar como un valor heurístico, generalmente resultado del promedio de toda la información disponible a largo plazo; o si la actividad es más compleja, se puede presentar como una ecuación empírica que relaciona variables independientes con la fuente de las emisiones con una precisión predictiva mayor (EPA, 2013). Si bien con las ecuaciones definidas en los FE se cuenta con una herramienta versátil y adaptable para realizar una estimación, los resultados obtenidos pueden ser influenciados si no se cuenta con información abierta sobre las variables de dependencia. Por otra parte, los valores heurísticos imponen una cuantificación del contaminante liberado, por lo que se deben respaldar, asegurando el cumplimiento de los estándares anteriormente mencionados.

Existen también FE en función de una actividad emisora, los que se han determinado en base a campañas de muestreo y diversas metodologías empíricas. En el caso de material particulado en suspensión, existen un gran número de estudios en función de la procedencia desde una fuente móvil o estacionaria, envergadura de la actividad, entre otros. Esto se puede observar en la "AP 4.2: Compilation of Air Pollutant Emission Factors" de la EPA o en la "EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook", de la Agencia Ambiental Europea (EEA por sus siglas en inglés). Cabe destacar que numerosas agencias ambientales de distintos países han optado por la utilización de los factores de emisión de la EPA, en vez de generar conocimiento basado en los contextos propios de cada nación, aumentando por cierto la incerteza en la estimación de las emisiones.

En este contexto, los FE se han utilizado como herramienta para implementar normativas asociadas a calidad de aire, como la *National Pollutant Inventory* del Departamento de Medio Ambiente y Energía del Gobierno Australiano. En el caso del material particulado total (y sus fracciones de menor diámetro) existen diversas normativas que consideran el uso de FE en procesos de determinación y proyección de emisiones, identificación de línea de base, entre otros usos. Estos Factores de Emisión deben estar asociados al proceso que genera la suspensión, encontrándose así estándares que permiten

identificar las emisiones asociadas a: tránsito de vehículos por caminos tanto pavimentados como sin pavimentar, generación eléctrica, uso de suelos en agricultura, entre otros.

En el caso particular de tranques o embalses de relaves, e independiente de su estado de operación, no existen a nivel nacional o internacional metodologías específicas para la estimación de FE, que permitan ser luego utilizados en la cuantificación de emisiones de material particulado. Dada la incertidumbre respecto a la estimación de emisiones de material particulado desde tranques de relave inactivos y abandonados, incluyendo a los considerados PAM, los ingenieros suelen utilizar FE asimilables a estas fuentes, por ejemplo, estimaciones de erosión eólica para el acopio y manipulación de material en pilas. Estas metodologías, al no ser desarrolladas específicamente para estos relaves, no consideran todas las variables que inciden en la generación y suspensión de material particulado a la atmósfera, entre las que se encuentran: efectos de envejecimiento del material, procesos aleatorios de cementación, distribución de tamaño de partícula, pendientes, parámetros de estado, entre otros (Watson *et al.*, 1999; Blight, 2007; Behbahani, 2015 y Haustein *et al.*, 2015).

## A. Variables que influyen en la utilización de un factor de emisión

Las distintas metodologías disponibles para utilizar un FE de erosión eólica consideran una serie de variables las cuales han evolucionado desde la definición de las primeras ecuaciones en la década de los años 70. Así, las variables típicamente consideradas, se pueden clasificar en 3 grupos: i) variables cuantificadas, ii) referidas, y iii) no cuantificadas. Las primeras corresponden a variables abundantemente estudiadas y para las que se cuentan con expresiones para la cuantificación de contaminante liberado. La segunda categoría corresponde a aquellas variables que se han cuantificado pobremente o que por su presencia se asumen que anulan la emisión de material particulado. Finalmente, las variables no cuantificadas, corresponden con factores que se han reportado como incidentes, pero no se han logrado correlacionar con las emisiones de este contaminante.

### 1. Variables cuantificadas

Estas variables se han estudiado ampliamente, reportándose numerosas correlaciones entre la emisión de material en suspensión y su valor. Estas variables son:

- i) **Velocidad de vientos:** Tal como se presentó anteriormente, se ha determinado que existe una velocidad mínima para el levantamiento de material particulado, denominada velocidad umbral ( $v^*$ ). Este parámetro indica el punto en el cual las ráfagas de viento transmiten energía suficiente como para vencer la fuerza gravitatoria y suspender material erosionable. Se ha cuantificado que la cantidad de material en suspensión aumenta potencialmente con respecto a la velocidad de los vientos, reportando relaciones cuadráticas, de tercer orden y de orden no entero para satisfacer esta relación (Chang, 2006; Sullivan y Ajwa, 2011).
- ii) **Humedad de la pila:** La presencia de agua en la superficie de pilas y rellenos, fomenta la agregación del material, modificando el tamaño y densidad aparente de las partículas, lo que se traducen en la reducción de emisiones a la atmósfera. Gherboudj *et al.* (2015) contrastaron información medida desde estaciones de monitoreo con imágenes satelitales de Medio Oriente y el Norte de África, encontrando una fuerte dependencia entre la humedad y la cantidad de material en suspensión. Por otra parte, la EPA, mediante el estudio de procesos de carga y descarga en industrias de carbón, azufre y una termoeléctrica de carbón, generaron una relación inversa de orden no entero entre las emisiones de material y la humedad del material (EPA, 1987).

- iii) **Factores climáticos:** En la década de años 60 se consideraban como una variable fundamental los procesos de condensación/evaporación en la superficie de terrenos, pues inciden tanto en la humedad como en la estructura superficial de los depósitos. De esta forma se desarrollaron relaciones no lineales que incorporan tanto la temperatura media mensual, como la precipitación media mensual (Skidmore, 1986 y Pattey *et al.*, 2015) en la estimación de emisiones de material particulado.
- iv) **Tráfico sobre la superficie:** Las emisiones de material particulado por efecto de la circulación de vehículos motorizados y/o tránsito de seres vivos por sobre superficies sin pavimentar, son una variable cuantificada y ampliamente reportada. Estas pueden o no ser un factor relevante en relaves abandonados según cómo la comunidad se relaciona con cada uno de ellos, por ejemplo, en depósitos localizados dentro de comunidades establecidas. Dado el nivel de incertidumbre de este punto, no se profundizará más sobre esta variable en el presente documento.

## 2. Variables referidas

Estas variables se han dejado de estudiar o su efecto no ha logrado penetrar en metodologías de estimación de suspensión de material particulado actualizadas. Las principales variables son:

- i) **Distribución de tamaño de partícula/contenido de finos:** los factores de emisión de la EPA, asumen una distribución de tamaño de material particulado en suspensión constante, independiente de las características del suelo de cual provienen dichos contaminantes (Pattey *et al.*, 2015). Esta distribución considera que el valor de MP<sub>10</sub> corresponde con el 50% de partículas suspendidas totales, además, que la relación MP<sub>2,5</sub>/MP<sub>10</sub> es en torno a un 12-15% (EPA, 2006 a,b). Sin embargo, Cigagna *et al.* (2014) estudiaron las condiciones atmosféricas del suroeste de Cerdeña, zona caracterizada por una fuerte presencia de actividad minera, tanto activa como en abandono, reportando que en dicho lugar la razón MP<sub>2,5</sub>/MP<sub>10</sub> es superior al 55%. Por otro lado, Cowherd *et al.* (2010) concluyeron que los factores de emisión propuestos por la AP 42 sobreestiman dicha proporción.
- ii) **Textura:** varios autores han buscado relacionar la textura del suelo y el potencial de emisión de este (Alfaro y Gomes, 2001; Alfaro *et al.*, 2004; Gherboudj *et al.*, 2015; Pi *et al.*, 2019). De forma general, sólo han desarrollado relaciones cualitativas para explicar las emisiones de material particulado. Por ejemplo, Alfaro *et al.* (2004), basándose en una clasificación de texturas propuestas por Chatenet *et al.* (1996), modelaron un set de datos reportado por Nickling y Gillies (1989), concluyendo que la textura no es una variable en la generación de polvo en suspensión; sin embargo, puede afectar indirectamente a la formación de costras superficiales.
- iii) **Cobertura Orgánica/Salinidad del material:** la *National Pollutant Inventory* (NPI) de Australia, reconoce estas medidas como estabilizadores de superficie de suelo, permitiendo considerar cero emisiones si existe una cobertura vegetal o de otros organismos, como líquenes, musgos u otros, o si el material acumulado presenta una alta salinidad (NPI, 1999; NPI, 2012). Estos hallazgos son discutibles si se consideran otras alternativas de remediación, como los supresores de polvo en depósitos de relaves.

## 3. Variables no cuantificadas

Investigadores han reportado estas variables como influyentes en el proceso de suspensión de material particulado por efecto de erosión del viento; sin embargo, no se ha podido cuantificar o incorporar su efecto sobre las emisiones. Estos parámetros son:

- i) **Morfología superficial:** las estructuras presentes en la superficie de un suelo, tales como presencia de material grueso, costras, material suelto, entre otros, inciden sobre la facilidad con que vientos pueden suspender material (Pattey *et al.*, 2015; Watson y Chow, 2000). En particular, Alfaro *et al.* (2004), reportó que la presencia de costras se vuelve un factor limitante, inclusive por sobre la velocidad de vientos.
- ii) **Edad/Envejecimiento:** se ha reportado que con el paso del tiempo se presenta un proceso de cementación o envejecimiento de los relaves, lo que influye en las propiedades resistentes de los materiales (Troncoso, 1994). Pese a lo anterior, no se ha logrado identificar si estos procesos ayudan a potenciar o reducir la suspensión de material como resultado del aumento de la cohesión efectiva de los suelos (Duku *et al.* 2006; NPI, 2012).
- iii) **Pendiente:** como se discutió anteriormente, Blight (2007) exploró el efecto tanto de la inclinación de la pendiente como su extensión como una variable primaria en la erosión de relaves. Según su investigación, la principal fuente de polvo no es la cima de los depósitos, sino los taludes en los depósitos, reportando que entre 30° y 35° de pendiente de muro corresponden a pendientes de máximo potencial de suspensión.
- iv) **Forma/Construcción:** se ha observado que la geometría de pilas de acopio modifica la velocidad del viento por sectores, así Toraño *et al.* (2007) realizaron simulaciones mediante software de dinámica de fluidos sobre pilas expuestas a vientos, evidenciando modificaciones en el perfil de velocidad del viento a medida que este atraviesa la pila. En este sentido, y como es esperable, no tendrá el viento el mismo efecto si el depósito se emplaza en un valle, cuenca o quebrada.

## B. Factores de emisión

Como se mencionó en secciones anteriores, no existe a la fecha un Factores de Emisión específico para tranques o depósitos de relave. Pese a lo anterior, se suele utilizar en la práctica alguno de los FE disponibles o recomendados en la literatura para estructuras de similares características.

La AP 42 en su quinta edición de 1995 (versión actual, revisada en 2006) presenta formulaciones para estimar FE para el cálculo de Pilas de material agregado (capítulo 13.2.4 "*Aggregate Handling And Storage Piles*", EPA 2006a) y para el Erosión eólica industrial (capítulo 13.2.5 "*Industrial Wind Erosion*", EPA 2006b) las cuales se incluyeron en este documento. Se consideraron también los FE definidos por la EEA para el acopio, manejo y transporte de minerales (EEA, 2019a), y para el acopio, manejo y transporte de metales (EEA, 2019b). Adicionalmente se incluyó la formulación del FE para pilas de agregado de la AP 42 del año 1985 dado que dicha metodología es considerada como alternativa de cálculo en el "*WRAP Fugitive Dust Handbook*" del año 2006, (*Countess Environmental*, 2006).

A continuación, se presenta un resumen de factores de emisión que resultan más adecuados para ser utilizados en depósitos de relaves. Las ecuaciones que definen los FE serán presentadas cronológicamente para finalizar con un cuadro comparativo. Se incluyó para efectos de la comparación el FE propuesto por EPA en 1978 con el objetivo de visualizar la evolución histórica en las estimaciones. Esto en el contexto de que las actualizaciones del AP 42 constituyen avances en las formulaciones muchas de las cuales han sido reemplazadas por nuevos factores.

Cabe destacar que la mayoría de ellos fueron o son propuestos por la EPA, y que han sido adoptados de manera transversal por diferentes países, entre ellos Chile, aun cuando el origen de estas formulaciones y metodologías requieren de una adaptabilidad a la industria minera nacional y, en particular, a tranques de relave.

## 1. Erosión eólica de áreas expuestas (EPA, 1978)

La ecuación (1) presenta la formulación propuesta por EPA para estimar la totalidad del material particulado suspendido desde un suelo producto de agentes externos. Su formulación proviene de la sinergia de pruebas de campo de generación de polvo suspendido durante tormentas de arena. A diferencia de versiones posteriores del FE por parte de EPA, esta formulación considera variables climáticas (sumatoria mensual de precipitaciones y temperaturas), y de caracterización del tamaño de partículas del material en acopio. El porcentaje de finos es acotado a un rango definido, sin que exista una ecuación particular o factor correctivo en el caso que se supere el porcentaje de finos como ocurriría en depósitos de relaves (los avances tecnológicos en los procesos de molienda, flotación, separación y disposición de relaves probablemente impactarán en el contenido de finos al comparar depósitos en operación respecto a depósitos en abandono de mediados de siglo). Otra limitación de esta expresión si se pretende utilizar en depósitos de relaves, es que no considera factores geométricos propios del depósito o el estado de la cobertura del material.

La formulación del FE quedará definida entonces por la siguiente ecuación.

$$FE_{TSP} \left[ \frac{lb}{acre \text{ año}} \right] = 3400 \frac{(s/15)(e/50)(f/25)}{(PE/50)^2} \quad (1)$$

con

$$PE = 3,16 \cdot \sum_1^{12} \left( \frac{\bar{p}_i}{\bar{T}_i} \right)^{10/9} \quad (2)$$

Donde:

*e*: La erosionabilidad superficial (ton/acre año), EPA reporta con valor de 47 para todo tipo de terreno

*s*: El contenido superficial de material fino (%), es reportado en el rango de 0,1 – 19,3

*f*: El porcentaje de tiempo en que el viento supera las 12 mph (5,36 m/s) (%)

*PE*: El índice de precipitación- evaporación de Thornthwaite

$\bar{p}_i$ : La precipitación media del mes "i" (mm)

$\bar{T}_i$ : Temperatura media mensual del mes "i" (°F)

Una de las ventajas de esta ecuación es que considera una serie de factores, por lo que se puede aplicar a variadas situaciones. Sin embargo, simplifica la relación con el viento a un término lineal, y por otro lado, el factor de Thornthwaite tiende a indeterminar la expresión si se aplica en zonas desérticas, por lo que sólo se considera válido si las precipitaciones son mayores a 13 mm/año (Skidmore, 1986). Debido a la cantidad de supuestos involucrados en la generación de esta expresión, se cataloga con un bajo índice de confiabilidad (EPA, 1978).

## 2. Erosión eólica en pilas activas de agregados (EPA, 1983; 1985a)

Esta formulación es definida para estimar la totalidad del material particulado suspendido desde pilas de agregados de carbón y de azufre. Nace de la conjugación de dos estudios, el primero estima las emisiones en zonas de acopio de arena y grava, mientras que el segundo aporta los factores de corrección en base a mediciones en plantas de hierro y acero. Corresponde a una versión modificada de la formulación de EPA de 1978, por lo que los comentarios a dicha formulación siguen siendo válidos. Se introdujo en 1983 como el suplemento 14 a la Tercera edición del AP 42, y luego como la formulación oficial en la cuarta edición del AP 42 en 1985.

Esta nueva función deja de considerar la temperatura y precipitación medias mensuales, reduciendo el factor climático a la cantidad de días en que las precipitaciones son mayores a 0,25 mm.

Este cambio elimina la incertidumbre de trabajar con valores promedios, reflejándose directamente el efecto climático en la humedad del material. Sin embargo, el denominador del término asociado a la precipitación (235) procede de la extensión de un estudio realizado en terreno que duró 4 meses, mientras que el factor del viento continúa siendo un término lineal, por lo que se evalúa el FE con un bajo nivel de confiabilidad (EPA, 1985). A diferencia de la formulación de 1978, el FE definido por la eq. (3), considera el FE en kilogramo por unidad de superficie por día, en contraste a los valores anuales que se desprenden en la eq. (2).

$$FE_{TSP} \left[ \frac{kg}{ha \cdot día} \right] = 1,9 \cdot \left( \frac{s}{1,5} \right) \cdot \left( \frac{365 - p}{235} \right) \cdot \left( \frac{f}{15} \right) \quad (3)$$

Donde:

$s$ : El contenido superficial de material fino (%) entendido como el porcentaje de material que pasa la malla 200 (ASTM-136) equivalente a 0,0075mm. Se reportan valores típicos para varias industrias en el rango de 1,6 a 18

$p$ : número de días en que la precipitación supera 0,25 mm

$f$ : El porcentaje de tiempo en que el viento supera las 12 mph (%)

### 3. Manipulación y almacenamiento de pilas de agregados (EPA, 2006a)

Este FE se define para estimar emisiones de material particulado en suspensión de pilas de agregados. Está formulada para pilas activas con ciclos de carga y descarga donde las actividades que generan emisión de material particulado tienen relación con la carga de material (*batch drop* o *continuous*), tráfico de maquinaria, erosión eólica en la superficie de la pila y áreas aledañas, y con la transferencia del material (*batch drop* o *continuous*). Reporta que la máxima capacidad de emitir partículas sólidas con la pila recién constituida y en temporadas secas y fuertes vientos. Si bien, este FE no contiene un factor de corrección para la cantidad de material fino, se debe considerar el rango de validez de esta expresión, según se discute más abajo. A diferencia de los FE de EPA de 1978 y 1985, este FE, eq. (4), considera valores de emisión por tonelada de material depositado, lo que en la práctica implica estimar el volumen y densidad del material depositado.

$$FE_i \left[ \frac{kg}{ton} \right] = k_i \cdot (0,0016) \cdot \left( \frac{U}{2,2} \right)^{1,3} \cdot \left( \frac{M}{2} \right)^{-1,4} \quad (4)$$

Donde:

$k_i$ : Es multiplicador para estimar las emisiones en función del diámetro aerodinámico, toma los valores definidos en el Cuadro 5

$U$ : Es la velocidad media del viento (m/s)

$M$ : Es el contenido de humedad del material (%)

Esta ecuación es válida dentro de un rango de contenido de finos de 0,44 – 19%; contenido de humedad de 0,25-4,8% y velocidad del viento de 0,6-6,7 m/s. Esta fórmula está rankeada con una confiabilidad máxima (EPA, 2006a).

Además, en el cuadro 5 se reportan los valores típicos de contenido de finos y humedades para distintas industrias. Aquellas asimilables a procesos mineros varían en los rangos de 0,7% a 15% y 0,9% a 7,8% respectivamente.



**Cuadro 5**  
**Multiplicador  $k_i$  según diámetro aerodinámico de partículas para almacenamiento y manipulación y almacenamiento de pilas activas**

TSP	MP10	MP2,5 (EPA, 2006a)
0,74	0,35	0,053

Fuente: EPA, 2006a.

#### 4. Erosión eólica industrial (EPA, 2006b)

Esta formulación a diferencia del punto anterior fue definida para estimar las emisiones asociadas a la erosión que puede causar el viento en áreas expuestas y de material apilado en instalaciones industriales. Considera que estas superficies están compuestas de forma no homogénea con material no erosionable (material con diámetros mayores a 1 cm) y con material erosionable, cuya disponibilidad es finita, por lo tanto, agotable. Así define como perturbación a alguna acción que resulta en la disponibilidad de nueva superficie erosionable, por ejemplo: la incorporación o retiro de material, el volteo de éste, paso de vehículos, entre otros (EPA, 1988). La base de esta metodología es que el polvo arrastrado por el viento desde las áreas expuestas ocurrirá solo cuando se cumplen dos condiciones: i) la superficie del área expuesta está alterada y ii) los vientos sobrepasan un umbral de velocidad del viento. De esta forma no se producirá erosión eólica hasta que la superficie vuelva a estar perturbada y el que viento nuevamente supera el umbral de velocidad. Este factor de perturbación plantea al desafío de su uso y validez en el caso de tranques de relave en situación de abandono.

A partir de pruebas en pilas de carbón se determinó que la velocidad umbral de erosión supera los 5 m/s, medido a 15 cm de la superficie, o 10 m/s a 7 m sobre el área expuesta. Además, este FE reporta que la erosión del viento presenta mayores correlaciones con ráfagas de viento de mayor velocidad que con la velocidad media del viento en los lugares de prueba considerados.

La variable meteorológica medida en EE.UU. que mejor refleja a las ráfagas se denomina como "la milla más rápida", la cual representa la velocidad de una masa de viento de una milla de extensión que atraviesa un anemómetro de contacto, de 1 milla, en el menor tiempo posible. Esta variable es informada en los resúmenes datos climatológicos locales mensuales, de dicho país. Cabe destacar que pueden existir eventos de vientos que superen en velocidad a "la milla más rápida".

La formulación del FE quedará definida entonces por la eq. (5), donde la cantidad de material se estima respecto a la superficie del depósito, y no en base a su tonelaje como en la eq (4).

$$FE_i [g/m^2 \text{ año}] = k_i \cdot \sum_{j=1}^N P_i \quad (5)$$

Donde:

$k_i$ : Es multiplicador para estimar las emisiones en función del diámetro aerodinámico, toma los valores definidos en la cuadro 6

$N$ : Es el número de perturbaciones anuales, toma valores enteros entre 1 y 365

$P$ : Es el potencial de erosión correspondiente a la milla de viento más rápida observada (o probable) para el n-ésimo periodo entre perturbaciones,  $g/m^2$

**Cuadro 6**  
**Multiplicador  $k_i$  según diámetro aerodinámico de partículas, para erosión eólica en terrenos industriales**

TSP	MP10	MP2,5 (EPA, 2006b)
1	0,5	0,075

Fuente: EPA, 2006b.

Para el cálculo del FE, si partes de la superficie de estudio están sujetas a distinta frecuencia de perturbaciones, entonces dichas áreas se deberán tratar por separado. Entonces, para una superficie perturbada diariamente, se considera  $N=365$ ; mientras que, si ocurrieran una vez cada 6 meses, sería  $N=2$ .

El potencial de erosión,  $P$ , se define como:

$$P = \begin{cases} 58 \cdot (u^* - u_t^*)^2 + 25 \cdot (u^* - u_t^*), & u^* > u_t^* \\ 0, & u^* \leq u_t^* \end{cases} \quad (6)$$

donde:

$u^*$ : Es la velocidad de fricción (m/s)

$u_t^*$ : Es la velocidad umbral de fricción (m/s), EPA (1988) reporta este parámetro para relaves con magnitudes menores a 0,25 [m/s]

La velocidad umbral de fricción ( $u_t^*$ ) de una superficie sin costras, se puede estimar en terreno mediante procedimiento detallado en el mismo EPA (2006b). En el EPA se presenta además una tabla de velocidades umbrales típicos para materiales asociados a almacenamiento de carbón en un rango desde los 0,54 m/s a los 1,33 m/s. Se presentan resultados de velocidades obtenidos a partir de ensayos en túneles de viento.

Junto a lo anterior, cabe resaltar que el modelo fue desarrollado para áreas secas, expuestas y con potencial de erosión limitado. Además, las características fisicoquímicas de los materiales considerados por EPA al estimar esta metodología de FE (pilas de carbón y otros materiales) no son directamente comparables al material de relave minero.

Por su parte, la velocidad de fricción de cada evento se calcula según:

$$u^* = 0,053 \cdot u_{10}^+ \quad (7)$$

Donde:

$u^*$ : Es la velocidad de fricción (m/s)

$u_{10}^+$ : Es la milla más rápida leída a 10 m de altura o corregida para dicha altitud (m/s)

Debido a la naturaleza no lineal del modelo, cada evento debe tratarse por separado, así mismo, si la razón altura/base de la pila excede el valor 0,2, la superficie deberá tratarse como la suma de varias subáreas con diferente nivel de exposición al viento. Además, al representar eventos intermitentes, esta información no puede ser agregada u obtenida de modelos de dispersión que consideren estado estacionario. No se reportan factores de corrección en función de la humedad del material o para presencia de costras u otras aglomeraciones superficiales. Sin embargo, nuevamente existe la dificultad de aplicar un factor perturbación  $N$  que por definición caracteriza pilas o estructuras de acopio en operación y en estado dinámica, a depósitos remanentes en situación de abandono donde la intervención y perturbación debería por definición ser nula o casi nula.

El cuadro 7 presenta un resumen con las distintas formulaciones presentadas en el AP-42 de EPA y que se analizaron en el presente informe.

**Cuadro 7**  
**Resumen de formulaciones de Factores de Emisión de EPA**

Año	Factor de Emisión	Unidades	Ventajas	Desventajas
1978	$FE = 3400 \frac{\left(\frac{s}{15}\right)\left(\frac{e}{50}\right)\left(\frac{f}{25}\right)}{\left(\frac{PE}{50}\right)^2}$ $PE = 3,16 \cdot \sum_1^{12} \left(\frac{\bar{p}_i}{T_i}\right)^{10/9}$	FE: lb/acre/año s: % e: ton/acre/año f: % $\bar{p}_i$ : mm $T_i$ : °F	Considera varias variables asociadas a la erosión. Las variables se pueden encontrar reportadas.	Bajo nivel de confiabilidad reportado por EPA. No aplicable a lugares muy áridos. Solo estima partículas totales en suspensión y no fracciones menores.
1985	$FE = 1,9 \cdot \left(\frac{s}{1,5}\right) \cdot \left(\frac{365-p}{235}\right) \cdot \left(\frac{f}{15}\right)$	FE: kg/día/ha s: % f: día f: %	Simplifica efecto climático a un factor lineal. Aplicable en todo tipo de zonas.	Bajo nivel de confiabilidad. Está desarrollado pensando en pilas activas. Solo estima partículas totales en suspensión y no fracciones menores.
1995 (rev. 2006)	$FE = k_i \cdot (0,0016) \cdot \left(\frac{U}{2,2}\right)^{1,3} \cdot \left(\frac{M}{2}\right)^{-1,4}$	FE: kg/ton U: m/s M: %	Alto nivel de confianza. Variables fácilmente medibles. Estima tanto TSP como fracciones menores.	Desarrollado para pilas activas. Considera masa de pila y no la superficie que abarca.
1995 (rev. 2006)	$FE = k_i \cdot \sum_{j=1}^N P_i$ $P_i = \begin{cases} 58 \cdot (u^* - u_t^*)^2 + 25 \cdot (u^* - u_t^*), & u^* > u_t^* \\ 0, & u^* \leq u_t^* \end{cases}$ $u^* = 0,053 \cdot u_{t0}^+$	FE: g/m <sup>2</sup> $u^*$ : m/s $u_t^*$ : m/s $u_{t0}^+$ : m/s	Alto nivel de confianza. Estima tanto TSP como fracciones menores. Desarrollado específicamente para efectos erosivos.	La variable $u_{t0}^+$ sólo es reportada en EE. UU. Desarrollado para superficies secas. Se debe considerar efecto de subdivisiones de la superficie.

Fuente: Elaboración propia sobre la base de EPA, 1978; EPA, 1985a; EPA, 2006a, b.

## 5. Almacenamiento, manipulación y transporte de productos minerales y metálicos (EEA, 2019a, b)

La Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA por sus siglas en inglés), reporta valores heurísticos para el uso de FE, reportando un valor recomendado y una banda de confianza para este factor, utilizando como base a EPA (2006) y a una serie de estudios realizados en Europa.

La EEA reporta FE para dos tipos de industria: la de productos minerales y la de productos metálicos. La primera considera la producción de cemento, cerámicas, cristales; mientras que la segunda hace referencia a la producción de minería metálica. En consideración, que no se reporta una diferencia explícita en cuanto a dimensiones, granulometrías, formas de almacenamiento, entre otras variables, para ser cotejadas con depósitos de relaves, se presentan aquí los factores de emisión para los dos tipos de industrias.

Estos FE se han desarrollado tanto para almacenamiento, manipulación y transporte de material, sin ningún tipo de control, por lo que se desprende que el material apilado no alcanzaría a presentar efectos de envejecimiento.

**Cuadro 8**  
**Factores de emisión de material particulado en suspensión reportados por EEA**

	Estado	Fracción	Valor	Límite inferior	Límite superior
Almacenamiento de minerales (EEA, 2019a) [ton/ha/año]	No controlado	TSP <sup>a</sup>	16,4	8,2	32,8
		MP10 <sup>b</sup>	8,2	4,1	16,4
		MP2,5 <sup>c</sup>	0,82	0,41	1,64
	Controlado	TSP	1,64	0,62	3,28
		MP10	0,82	0,41	1,64
		MP2,5	0,082	0,041	0,164
Almacenamiento de metales (EEA, 2019b) [ton/ha/año]	No controlado	TSP	8,2	4,1	16,4
		MP10	4,1	2,1	8,2
		MP2,5	0,41	0,21	0,84
	Controlado	TSP	0,82	0,41	1,64
		MP10	0,41	0,21	0,82
		MP2,5	0,041	0,021	0,082

Fuente: EEA, 2019a,b.

<sup>a</sup> Visschedijk *et al.*, 2004.

<sup>b</sup> Peutz (2006) / EPA, 2006.

<sup>c</sup> Visschedijk *et al.*, 2004.

## V. Aplicación de las metodologías de estimación de factores de emisión

Con el objetivo de clarificar la aplicabilidad de las distintas metodologías de FE a la realidad de Chile, en este capítulo se presentan dos casos estudio correspondientes a las ciudades de Andacollo en la IV región de Coquimbo, y a la ciudad de Copiapó en la III región de Atacama. Ambas ciudades presentan una actividad minera de importancia en los alrededores y presentan una cantidad importante de tranques de relave en situación de abandono en cercanías al medio urbano.

Como se presenta en las siguientes secciones, la factibilidad en la aplicación, así como la diferencia y dispersión en los resultados que se obtienen en las estimaciones de emisión en tranques de relave en situación de abandono tienen relación tanto con el nivel de información disponible respecto tanto al material de relave depositado, como a factores climáticos locales como velocidades y direcciones de viento, así como pluviometrías. Para enfatizar este punto, se ha realizado un catastro de la información disponible en el país a partir de bases de datos públicas y privadas que se presenta en los anexos de este documento.

Los insumos necesarios para la evaluación de los FE se encuentran resumidos en el cuadro 9, éstos han sido clasificados en función del tipo de información al que corresponden. De las clasificaciones ahí expuestas, se observa que la información meteorológica (y por consiguiente matemática) es sensible respecto de la disponibilidad, calidad y continuidad de los valores de entrada que se le entregan a los FE. Además, se ha incorporado para el análisis una nueva ecuación de predicción de material particulado en suspensión, base del modelo EPA y que se desarrolla en el Anexo 1.

**Cuadro 9**  
**Insumos necesarios para evaluación en factores de emisión, clasificados según tipo**

Inputs	Nombre	Comentario
<i>Geotécnicos</i>		
S	Contenido de finos	Se debe estimar o ir a terreno a evaluar cada caso
E	Erosionabilidad	Valor empírico, se debe recurrir a fuentes bibliográficas
$u^*_t$	Velocidad umbral de erosión	Se debe estimar o ir a terreno a evaluar cada caso
$u_{t,7}$	Velocidad umbral de erosión ajustada por elementos no erosionables equivalente a 7 m de altura	Se debe estimar o ir a terreno a evaluar cada caso y corregir matemáticamente
N	Número de perturbaciones	La definición por EPA no sería estrictamente aplicable a tranques en situación de abandono
<i>Meteorológicos</i>		
$p_i$	Precipitaciones mensuales	Información disponible depende la ubicación y disponibilidad de las estaciones de monitoreo
P	Días en que la precipitación es mayor a 0,25 mm	
$T_i$	Temperatura media mensual	
<i>Eólicos</i>		
F	Fracción del tiempo que la velocidad es mayor a 5,36 m/s	En función de información obtenible de red meteorológica o calidad de aire
$u_{10}^+$	Milla más rápida medida a 10m	No se reporta en Chile, se debe aproximar
$[u]^a$	Velocidad media anual	En función de información obtenible de red meteorológica o calidad de aire
<i>Superficiales</i>		
$V^a$	Fracción cubierta con vegetación	Estimable a partir de fotos satelitales
<i>Matemáticos</i>		
x	Razón adimensional de velocidades	Cálculo a partir de información eólica
F(x)	Función de velocidades de vientos	Cálculo a partir de información eólica
$u^*$	Velocidad de fricción	Cálculo desde milla más rápida

Fuente: Elaboración propia sobre la base de EPA, 1978; EPA, 1985a, EPA, 2006a, b.

<sup>a</sup> Inputs correspondientes a función agregada para análisis, se detalla en Anexo 1.

## A. Consideraciones en la evaluación y aplicación de los factores de emisión

### 1. US EPA 1978

Este FE, tal como se vio anteriormente, presenta la condicionante de requerir el porcentaje de finos del material, la erosionabilidad, el porcentaje del tiempo que el viento supera los 5,36 m/s, pluviometría en el depósito y temperaturas medias. Con estos parámetros se estima la cantidad de material particulado en suspensión total (diámetro aerodinámico mayor a 30  $\mu$ m).

En la actualidad en Chile el proyecto FONDEF ID18I10189 "Diseño de un prototipo automatizado móvil para el monitoreo y modelación de variables ambientales en Faenas Mineras" realiza, como parte de su investigación, un catastro del contenido de material fino en tranques y depósitos de relaves en situación de abandono. A diciembre de 2019 se habían recolectado 51 muestras provenientes de 8 tranques de relave donde para el 53% de las muestras el contenido de finos varía entre 40 y 50 %. Con el objetivo de evaluar la sensibilidad de este parámetro se trabajó en el rango de 15 a 50% de contenido de finos. Además, para estimar las emisiones de MP10, se utilizó el ponderador 0,5, para estimar esta fracción respecto del total reportado por EPA 2006b (cuadro 6).

## 2. US EPA 1985a

Las variables de dependencia de este FE son el contenido de finos, la cantidad de días que hubo precipitación mayor a 0,25 mm de agua y el porcentaje del tiempo que el viento supera los 5,36 m/s y fue desarrollado para la estimación del material suspendido total. Al igual que el caso anterior, se usó un porcentaje de finos de un 20% y una sensibilización en el mismo rango, junto con utilizar el mismo multiplicador para poder estimar la fracción MP<sub>10</sub>.

## 3. US EPA 2006a, Factores de Emisión para pilas de agregados

Este factor de emisión fue desarrollado para estimar las emisiones procedentes de una pila durante su construcción. Por lo que no aplica para los casos de interés del presente documento.

## 4. US EPA 2006b, Factores de Emisión para erosión eólica industrial

Para poder evaluar este FE, hace falta conocer información referente a las variables de dependencia. Para su utilización se hicieron las siguientes consideraciones:

- Número de perturbaciones: ante la incertidumbre de cuántos eventos de generación de material erosionable ocurren sobre los relaves, se realizó un análisis de sensibilidad con valores de perturbaciones anuales N de 2, 12 y 36.
- Velocidad umbral de erosión: EPA (1988) indica un procedimiento para la estimación in situ de esta variable y reporta el valor para dos depósitos de relaves (Ajo y Hayden) en Arizona, Estados Unidos, sin especificar procedencia, edad, presencia de material no erosionable u otras características. Para su evaluación dentro del caso de estudio, se consideró el promedio de dichos valores reportados (0,2 m/s) y se sensibilizó con valores de 0,15 m/s como mínimo (valor corresponde a valor mínimo reportado en EPA (1988) para terrenos de alta erosionabilidad) y como máximo 0,4, correspondiente a una superficie altamente protegida de la erosión según procedimiento de EPA1985b.
- Milla más rápida: este valor se aproximó mediante la corrección de altura de medición de las velocidades máximas horarias medidas. Se promediaron y tabularon los valores máximos diarios de cada mes (N=2 y N=12) o cada 10 días (N=36).
- Área erosionada: debido a que no se cuenta con información específica de la altura de los depósitos de relaves, se asumirá que la altura de estos no afecta sobre el perfil de vientos en distintas zonas constructivas de las pilas. Como consecuencia, se evalúa el peor escenario en que toda la superficie de los relaves está emitiendo material particulado.

## 5. EEA 2019a, b, almacenamiento y manipulación de productos metálicos/minerales

Estos factores de emisión al ser unos valores heurísticos no presentan problemas ni se requieren consideraciones adicionales, salvo la superficie de los depósitos.

## 6. US EPA 1985b, modelo para erosión en reservorios inagotables

Este modelo, depende del porcentaje de vegetación, el cual se consideró nulo para todos los casos. La velocidad media anual se obtuvo en base a los datos recopilados y del umbral de erosión medido a 7 metros de altura, para el cual se tomaron los mismos valores usados para la evaluación del FE EPA 1995 "Erosión eólica industrial" corregidos para la altura antes indicada. El detalle de este modelo se presenta en el Anexo 1.

## B. Caso estudio

### 1. Ciudad de Andacollo, antecedentes generales

La ciudad de Andacollo es una de las 6 comunas de la provincia del Elqui ubicada en la Región de Coquimbo, Chile. Limita al norte con La Serena, al sur con Ovalle, al oeste con Coquimbo y al este con las comunas de Vicuña y Río Hurtado, con una superficie de 310 km<sup>2</sup> y una altura de 1.000 msnm (Valenzuela, 2015).

Según datos del Censo del año 2017, la ciudad acoge un total de 11.044 habitantes, equivalente al 4,34% de la región (254.336 habitantes), de los cuales un 90% aproximadamente corresponde a población urbana y un 10% corresponde a población rural que, en su mayoría, se distribuye en torno a las cuevas de El Manzano y San Antonio (GORE Coquimbo, según Censo 2002).

Históricamente, su principal actividad económica ha sido la minería, que va desde la extracción artesanal y pirquinera ampliamente distribuida en el territorio, hasta grandes instalaciones, que han dejado piques mineros y tranques de relave en distintos sectores de la ciudad.

Hasta hace pocos meses, dos compañías de capitales extranjeros eran dueñas de la mayoría de las faenas mineras de la ciudad de Andacollo: Compañía Minera Carmen de Andacollo y Compañía Minera Dayton. La primera de ellas, perteneciente a Teck (90%) y a la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), actualmente explota un yacimiento de cobre a rajo abierto, mientras que la Compañía Minera Dayton, encargada hasta hace poco de la explotación de yacimientos de oro, entró en quiebra, vendiendo sus últimos recursos en el mes de septiembre 2019.

La ciudad de Andacollo, así como sectores aledaños, fueron declarados Zona Saturada por Material Particulado Respirable MP<sub>10</sub> como concentración anual y de 24 horas según el DSo8 del Ministerio del Medio Ambiente del año 2009, estableciendo un Plan de Descontaminación Atmosférica el año 2014 mediante el DS59 el cual entró en vigencia el 02 de enero del año 2015. Los relaves en situación de abandono ubicados en la ciudad de Andacollo son considerados como fuente de emisión según en el Inventario de Emisiones del año 2011, CENMA (2011).

#### Situación general de los depósitos de relave

Según el último catastro de faenas mineras realizado en Chile por el SERNAGEOMIN (2019), existen en total 121 depósitos de relave en Andacollo, distribuidos como se muestra en la Imagen 7. Es posible visualizar que gran parte de estos depósitos se encuentran en el radio urbano y algunos se ubican dentro del perímetro central de la ciudad, en las cercanías de la Basílica de Andacollo (Toro, 2017). El detalle se puede encontrar en el Anexo 2.

Respecto al estado de actividad de estos depósitos, 8 actualmente están activos, 77 se encuentran paralizados o inactivos y 36 están abandonados (gráfico 10). Además, dentro estas dos últimas clasificaciones, 8 han sido catalogados como pasivos ambientales mineros, es decir, constituyen un riesgo significativo para el medio ambiente, la vida y/o para la salud de las personas (Biblioteca del Congreso Nacional, 2012).

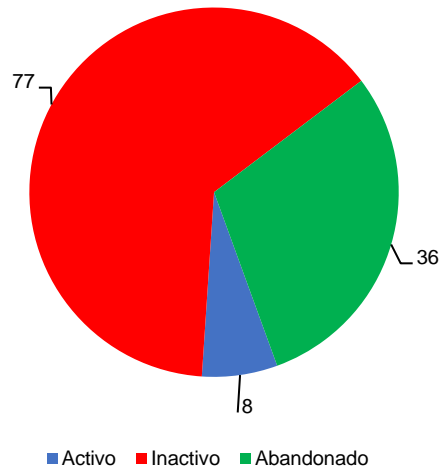


**Imagen 7**  
**Distribución actual de depósitos de relaves en la localidad de Andacollo**



Fuente: Adaptado de SERNAGEOMIN 20019 sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.

**Gráfico 10**  
**Cantidad de depósitos de relave en condición activa, inactiva y abandonados**  
*(En número)*



Fuente: Catastro SERNAGEOMIN, 2019.

**Estado de los depósitos en situación de abandono**

En la imagen 8, se muestra la distribución de los 113 depósitos de relave de Andacollo en estado inactivo (azul) y abandonado (amarillo), diferenciando además los PAM en color rojo. Todos estos depósitos cubren en total una superficie de 78,5 ha (0,785 Km<sup>2</sup>) aproximadamente.

Realizando un análisis de imágenes satelitales, es posible precisar que todos estos depósitos se encuentran a menos de 4 km de la comuna. Sin embargo, algunos de ellos, como los depósitos inactivos

696-700-701, 735-736-737-738-240 y los depósitos abandonados 277-279-585-1097, se agrupan en quebradas junto a otros depósitos aislados (236, 273 y 710), resultando menos críticos en términos del potencial de erosión, en contraste a otros depósitos que se ubican en medio de la ciudad.

Por otra parte, al lado este de la comuna (Imagen 9), existen una serie de depósitos de relave (255-641-1004-722-231-642-262-271-252-261) que, si bien abarcan un área de 9,8 ha (0,098 km<sup>2</sup>) y se ubican a más de 2 km de la zona poblada de Andacollo (radio de la circunferencia amarilla), podrían superponerse entre sí, formando un gran depósito de relaves que abarca una superficie cercana al triple de la original (26 ha aproximadamente), como se muestra en la Imagen 10. Esto según lo establecido por la *National Pollutant Inventory Guide* (NPI) (NPI, 2015) señala que, si dos o más fuentes de emisión distan a menos de 2 km y no presentan áreas residenciales entre sí, deberían considerarse como una unidad emisora.

Este efecto se ve incrementado aún más, si se consideran todos los depósitos que al lado este de la ciudad, distan a menos de 2 km y no presentan zonas residenciales "significativas" entre medio de los relaves. Esto último, considerando que la NPI no define explícitamente qué se entiende por área residencial, por lo que el segundo ejemplo señalado en la Imagen 10 corresponde a un tranque de 120 ha que abarca un área donde se emplazan sólo 3 propiedades, y que, a modo de criterio, no se considera que conforman un área residencial.

El uso de las recomendaciones por parte de la NPI, 2015 deberá evaluarse y adaptarse a la realidad nacional en cuanto a geografía, localización y estado de los depósitos en situación de abandono.

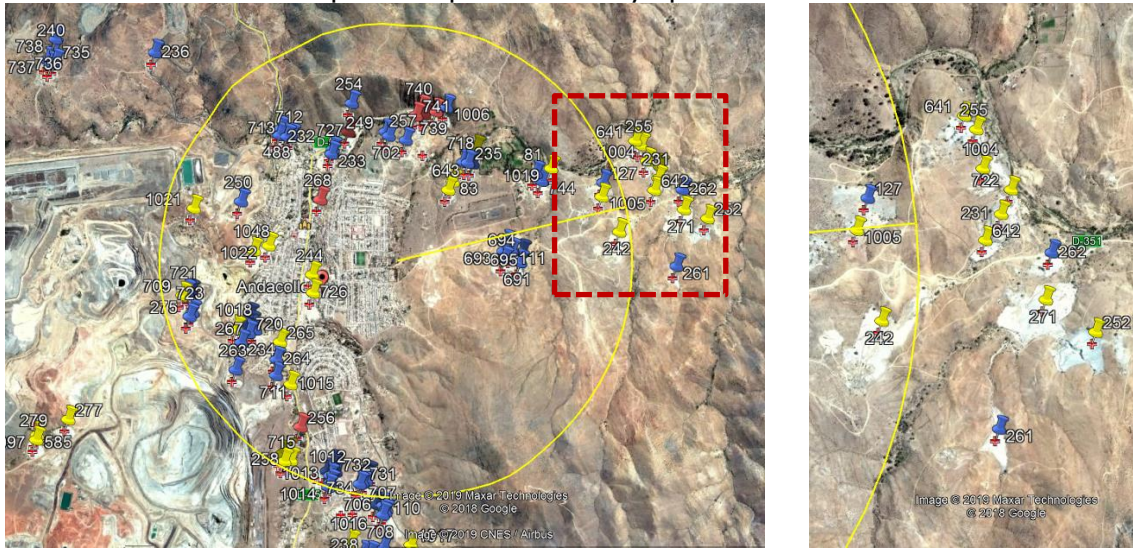
**Imagen 8**  
**Depósitos en situación de abandono en la comuna de Andacollo**



Fuente: Adaptado de SERNAGEOMIN 20019 sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.

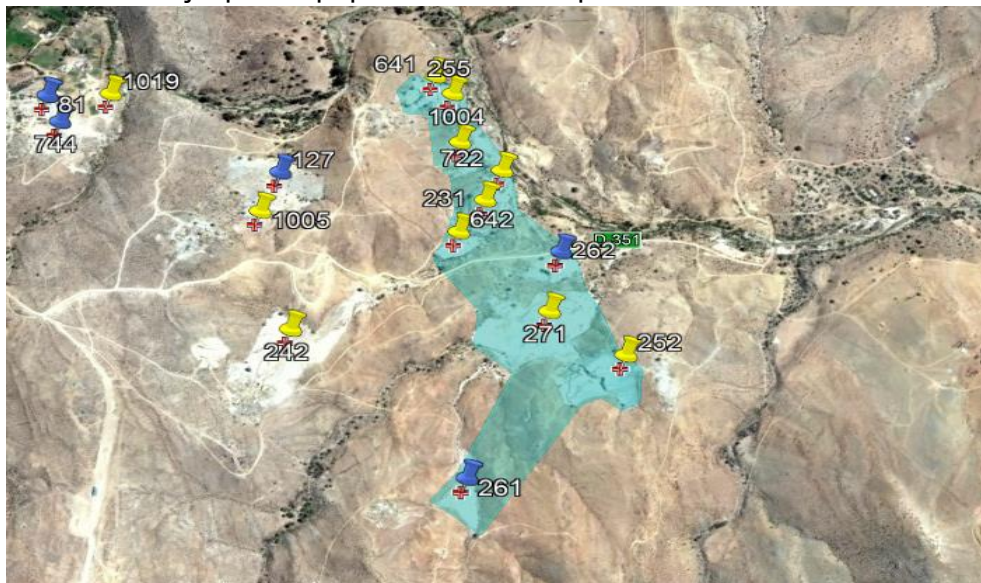


**Imagen 9**  
**Depósitos en quebradas con mayor potencial de daño**



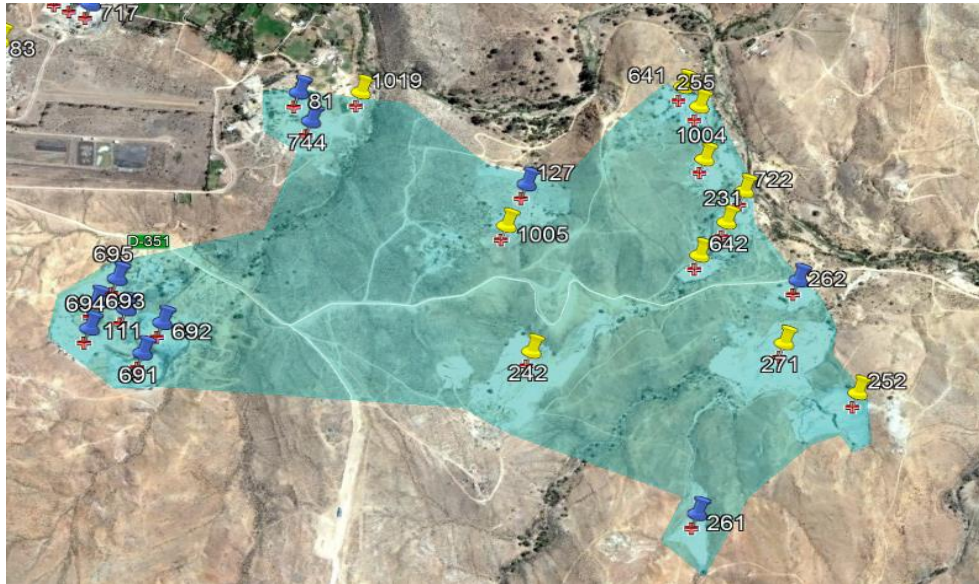
Fuente: Adaptado de SERNAGEOMIN 2009 sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.

**Imagen 10**  
**Ejemplo de superposición de área de depósitos en Andacollo**



Fuente: Adaptado de SERNAGEOMIN 2009 sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*, según lo establecido por la NPI australiana, 2015.

**Imagen 11**  
**Segundo ejemplo de superposición de área de depósitos al este de Andacollo**



Fuente: Adaptado de SERNAGEOMIN 20019 sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*, según lo establecido por la NPI australiana, 2015.

### Información base para la estimación de Factores de Emisión

Los datos necesarios para la evaluación de los FE se obtuvieron de la red de estaciones CEAZA-Met, perteneciente al Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA)<sup>7</sup> en 2019, el cual depende de la Universidad de La Serena, la Universidad Católica del Norte y el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA-Intihuasi) de Chile.

Se decidió utilizar esta red debido a que reporta la totalidad de las variables necesarias para la evaluación de los FE. Además, reporta las velocidades de vientos como promedios horarios y no valores puntuales, como es el caso de la red del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), dependiente del Ministerio de Medio Ambiente de Chile. Otras redes de medición meteorológica como la Dirección Meteorológica de Chile, el servicio Meteorológico de la Armada de Chile y la Red Agrometeorológica de INIA (AGROMET), no reportan información específica de la ciudad de Andacollo. En el Anexo 3 se presenta un resumen de las fuentes disponibles con información meteorológica de interés.

La información recopilada corresponde a los valores horarios de temperatura del aire, precipitación y velocidad promedio del viento medida a 5 m de altura, desde el 1/1/2014 hasta el 31/12/2018. El detalle de la data se encuentra en el Anexo 3 del presente documento donde se presentan cálculos asociados a la velocidad de los vientos, para su posterior uso en los FE de EPA de 1985a y 2006b y modelo de vientos EPA 1985b.

Se consideró un área total de relaves en situación de abandono de aproximadamente 78,54 ha, correspondiente a 113 depósitos inactivos o abandonados. Estos corresponden a los tranques presentes en la comuna de Andacollo.

<sup>7</sup> Para más información, véase: [www.ceazamet.cl](http://www.ceazamet.cl).

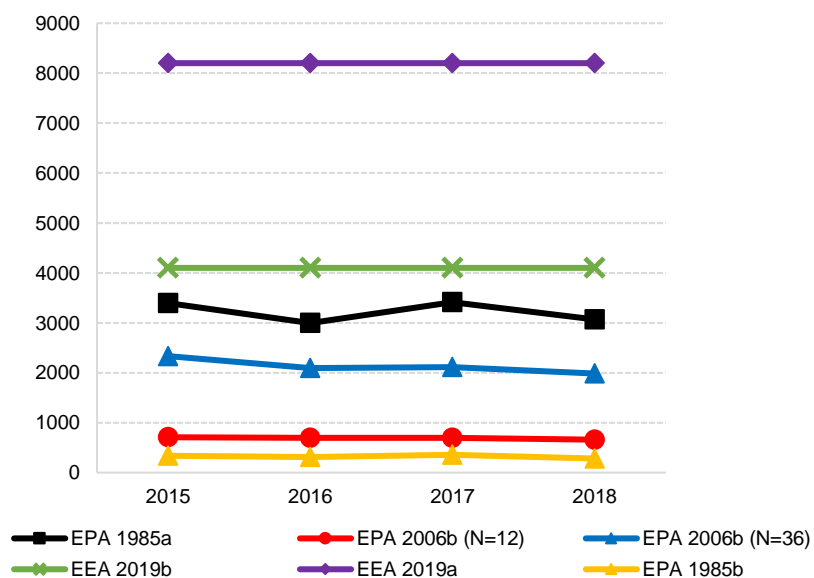
## Resultados y discusión

Al analizar los resultados de cada metodología para el cálculo de los factores de emisión, y como se presenta en el gráfico 11, se encuentra que todas las metodologías presentan un comportamiento estable en órdenes de magnitud a lo largo de los 4 años evaluados. En el caso particular del FE propuesto por EPA en 1978, las estimaciones de erosión superan las 430 ton/ha para el año 2018 por lo que fue excluido de los resultados que se presentan a continuación. Este nivel de erosión es equivalente a más del 95% del material del depósito asociado a la faena de "Planta Rubilan". Esta alta estimación se debe a la fuerte dependencia del FE respecto de la cantidad de precipitaciones, y a la incapacidad del factor para representar zonas áridas. En este mismo sentido otros tres relaves habrían tenido pérdidas que fluctúan entre un 11% y un 24% de su masa constituyente. Estos resultados confirman el desuso de esta metodología en los AP 42 de EPA. El uso del resto de los FE se traduce en tasas de pérdida de masa menores al 3,5% anual, para el peor de los casos, y en promedio, menores a un 0,08% anual.

En relación a la influencia de las precipitaciones en las estimaciones, si bien el FE de 1985a tiene dependencia de las precipitaciones, su efecto se encuentra amortiguado al considerar días que superan el umbral de 0,25 mm y no la cantidad total de lluvias.

Por otra parte, la poca variabilidad del modelo EPA de 1985b, se debe a su dependencia al promedio anual de velocidad de los vientos, por lo tanto, aunque existieran unos pocos eventos de gran magnitud, su impacto sobre el resultado final sería atenuado por el comportamiento anual. Caso contrario, el FE EPA de 2006b, sí tiene capacidad de considerar eventos puntuales, por lo que su estabilidad en el tiempo de estudio se debe a que no hubo diferencias significativas en el comportamiento eólico durante los años estudiados.

**Gráfico 11**  
Factores de Emisión evaluados entre 2015 y 2018 para el contexto de la comuna de Andacollo. Promedio anual (kg/ha/año)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de EPA 1985a,b, EPA 2006b, EEA 2019a,b.

Los resultados del gráfico 11 indican que quienes reportan menores tasas de erosión son el modelo EPA 1985b y el FE EPA 2006b considerando un factor de perturbación N igual a 2 (correspondiente a 2 eventos anuales de perturbación). En el caso de la metodología EPA 1985b, esta si bien se desarrolló para estimar

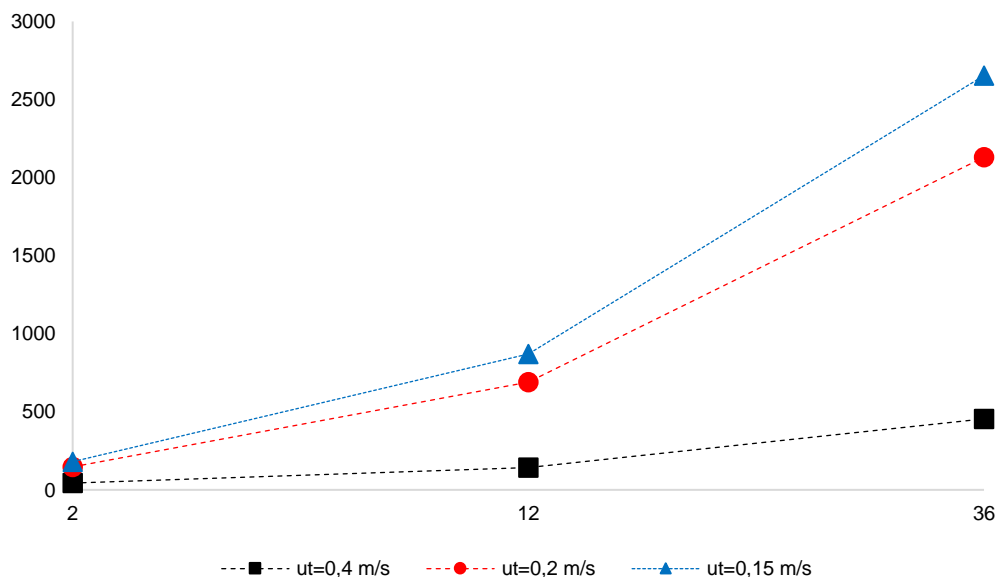


emisiones de MP<sub>10</sub>, considera a la fuente emisora como un reservorio inagotable de material erosionable y no fue incorporado como un factor de emisión oficial en la AP<sub>42</sub>, seguramente, debido a su mayor complejidad de evaluación. Requiere estimar la velocidad a una elevación de 7m por lo que es necesario corregir la información meteorológica disponible a 10 m asumiendo una distribución de velocidad verticales. Además, y al igual que para el FE 2006b, es necesario en este caso asumir valores de la velocidad umbral de erosión (ver capítulo V, sección: A.4: "US EPA 2006b, FE para erosión eólica industrial").

Los dos FE propuestos por la EEA entregan las mayores estimaciones de erosión invariantes en el tiempo dado sus formulación (ver cuadro 8). El FE EPA 1985a entrega estimaciones cercanas a las del FE EEA2019b para acopio de metales no controlados.

En el caso del FE EPA 2006b, se observa un incremento progresivo en las estimaciones a medida que el factor de perturbación "N" aumenta. Esto muestra en parte la sensibilidad de los resultados a los parámetros de entrada donde en particular el factor de perturbación presenta una definición para acopios activos lo que no representa la realidad de tranques de relave en abandono. Un factor N igual a 12 implica un episodio de perturbación por mes. En particular para este FE, se realizó una sensibilización tanto en el número de perturbaciones como en el umbral de velocidad, el cual es necesario asumir en este caso (ver punto V.A.4). Como se aprecia en el gráfico 12, se ve una relación directa y lineal respecto del número de perturbaciones lo que se puede atribuir en parte a las simplificaciones realizadas al considerar que el viento afecta por igual a todos los depósitos de relaves, sin evaluar subáreas, geometría de los apilados, razón altura/base o lejanía del punto de medición. La memoria de cálculo se presenta en el Anexo 4.

**Gráfico 12**  
**Respuesta del FE EPA 2006b, para distinto número de perturbaciones y umbral de erosión**  
*(kg/ha/año)*



Fuente: Elaboración propia sobre la base de EPA, 2006b.

### Comparación con estudios previos - Inventario de emisiones de MP<sub>10</sub>

En consideración de los resultados, se decide realizar el inventario anual de emisiones de MP<sub>10</sub> para cada metodología, considerando el promedio de cada FE estimado durante los 4 años de evaluación. De esta forma los resultados se detallan en el cuadro 10 y en el gráfico 13, donde se aprecian los resultados de la sensibilización de variables, con excepción de los FE de la EEA, que corresponden a bandas de confianza reportadas por este mismo organismo.

**Cuadro 10**  
Inventario de emisiones de MP<sub>10</sub> para la ciudad de Andacollo

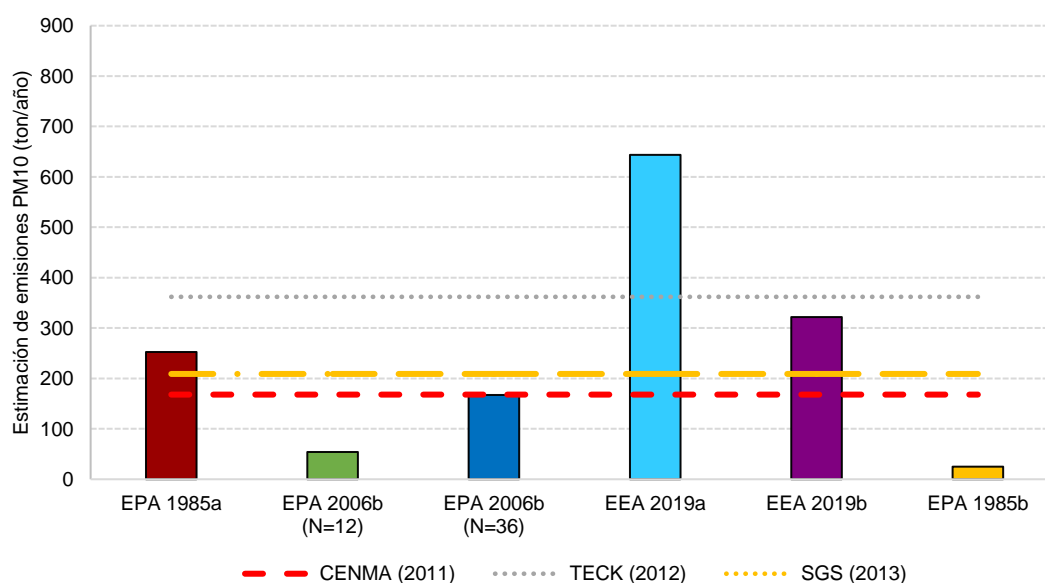
Metodología	Media [ton/año]	Valor inferior [ton/año]	Valor superior [ton/año]
EPA 1985a	253	189	631
EPA 2006b (N=2)	12	3	14
EPA 2006b (N=12)	54	11	68
EPA 2006b (N=36)	167	36	208
EEA 2019a	644	322	1 287
EEA 2019b	322	165	644
EPA 1985b	25	7	67
CENMA (2011)	168	-	-
TECK (2012) <sup>a</sup>	362	-	-
SGS (2013) <sup>b</sup>	209	-	-

Fuente: Elaboración propia sobre la base de EPA, 1985a; EPA, 2006b; EEA, 2019a, b; CENMA, 2011; TECK, 2012; SGS, 2013.

<sup>a</sup> Valor extrapolado de TECK (2012), quien aplicaba FE a una superficie de 3,5 ha.

<sup>b</sup> Valor extrapolado a la superficie considerada.

**Gráfico 13**  
Inventario de emisiones para Andacollo para cada metodología de factores de emisión  
(Toneladas/año)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de EPA, 1985a; EPA, 2006b; EEA, 2019a, b; CENMA, 2011; TECK, 2012; SGS, 2013.

Al analizar los resultados de cada metodología para el cálculo de los factores se evidencian los diferentes órdenes de magnitud, por lo que la elección del FE es crítica al momento de reportar emisiones. Respecto del análisis de sensibilidad del FE EPA (1985a), se ve que presenta facilidad de sobreestimar el valor respecto del caso base, triplicando la estimación de emisiones de MP<sub>10</sub>, en comparación del caso definido como estándar. Se destaca que la variable analizada corresponde al contenido de finos, por lo que se vuelve imperativo una cuantificación detallada o definir una banda justificada respecto de esta variable, especialmente por la heterogeneidad de las tecnologías usadas durante la construcción de los depósitos.

Por otra parte, el FE EPA (2006b) presenta facilidad para subestimar el caso base en función del umbral de erosión, entregando valores un orden de magnitud menor, respecto del caso base. Mientras que la dependencia del parámetro N es sensible, sobre todo porque no tiene una metodología clara de cómo definirlo. En particular, si sólo se consideran acciones antrópicas, se podría definir un N=0 para relaves abandonados y por consiguiente no reportar emisiones por parte de éstos y en particular de aquellos considerados pasivos mineros.

El modelo EPA (1985b) presenta estimaciones de MP<sub>10</sub> similares a aquellas entregadas por el FE EPA (2006b) donde ambas requieren estimar o asumir la velocidad umbral de erosión. Dado que la formulación del modelo EPA (1985b) considera como parámetro base la velocidad media anual, la sensibilización consideró los valores máximos y mínimos de velocidad media mensual durante el año. En el caso del FE EPA (2006b) se sensibilizó respecto del umbral de erosión. En ambos casos, al momento de utilizar estas herramientas, se debe tener una baja incertidumbre respecto del umbral de erosión de cada depósito de relaves.

Se comparan los resultados con los informes "Diagnóstico de Calidad de Aire y Medidas de Descontaminación, Andacollo" (CENMA, 2011), el Anexo N°5 de DIA "Recuperación de Suelos Contaminados por Relaves Abandonados" (Teck, 2012), y el "Catastro de fuentes de emisión de MP<sub>10</sub> no identificadas y propuestas de medidas de mitigación en polígono de zona saturada de Andacollo" (SGS, 2013) proporcionados por Ministerio de Minería de Chile para el desarrollo del presente trabajo. En primera instancia, al comparar los valores de estos, se observa que TECK (2012) duplica en magnitud a CENMA (2011), mientras que SGS (2013) se encuentra entre ambos, evidenciando que no existe una norma clara para reportar emisiones fugitivas de material particulado desde depósitos de relave.

En el caso de las emisiones estimadas por SGS (2013), es posible que los valores presentados sobreestimen las emisiones de los tranques al presentar posibles inconsistencias metodológicas en los valores de velocidad de viento utilizadas.

Para el caso de CENMA (2011) reporta emisiones utilizando la metodología EPA 2006b, no queda claro el valor N que usan (se cita: "(...) se asumieron doce perturbaciones por mes N=12 (...)", sin embargo, N corresponde a perturbaciones anuales), reportando un valor de 168 ton/año, similar al estimado en el presente informe con FE EPA (2006b) para un N=36 cuantificado en 167 ton/año, dado la ausencia de memoria de cálculo, no se puede identificar si la diferencia se debe a que utilizaron un área mayor, ráfagas de mayor magnitud o un error al momento de reportar en el valor de N al momento de detallar el procedimiento. Al comparar con el resto de las metodologías se observa que este valor queda próximo al límite inferior de FE EPA (1985a) y EEA (2019b).

Por otra parte, TECK (2012), corresponde a una Declaración de Impacto Ambiental (DIA), desarrollada para el traslado de material acopiado en depósitos de relave, cuya superficie era de 3,5 ha. En él usan una variación del FE EPA (1985), sin factor de corrección para lluvias. El valor allí reportado fue extrapolado para las 78,5 ha de interés para el presente informe, lo que se traduce en emisiones de MP<sub>10</sub> de 362 ton/año. Este valor, si bien, supera a los 253 ton/año estimadas con FE EPA (1985) queda contenido en la banda del análisis de sensibilidad. Esta diferencia se debe a los supuestos hechos por TECK, con una proporción de finos del 30% y que un 10% del tiempo los vientos sobre 5,36m/s, superando el 20% de finos propuestos en este informe y 7% promedio del tiempo en que los vientos que superaron el umbral anteriormente dicho, durante el tiempo de evaluación del FE. Además, este valor está contenido dentro de los rangos de estimación de EEA (2019b) y dentro del límite inferior de EEA (2019a).



En el caso de SGS (2013), este informe corresponde a un catastro de fuentes de emisión de MP<sub>10</sub> para el polígono de zona saturada de Andacollo. Los resultados que ahí se presentan corresponden al análisis de 18 tranques en la zona de Andacollo. Las emisiones fueron estimadas utilizando la metodología EPA 2006b considerando un factor de perturbación N constante e igual a 12 justificando esto en lo indicado previamente por CENMA (2011). Las velocidades de viento corresponden a valores obtenidos en la estación de monitoreo de Minera Dayton. Aún cuando el inventario de MP<sub>10</sub> cae dentro de los rangos cercanos a otras estimaciones, se identifica un problema metodológico al estimar el potencial de erosión P (ecuación 6) considerando la velocidad de fricción,  $u^*$ , como igual al promedio de las velocidades de viento anuales en la estación meteorológica de Dayton.

## 2. Ciudad de Copiapó, antecedentes generales

La ciudad de Copiapó, capital de la provincia homónima y de la región de Atacama de Chile, tiene una superficie de 16.681,3 km<sup>2</sup> y se ubica a una altura media de 391 msnm. Limita al norte con Diego de Almagro y Chañaral, al noroeste con la comuna de Caldera, al sur con Huasco y Vallenar, al oeste con el océano Pacífico y al este con las provincias argentinas de Catamarca y La Rioja.

Según el último Censo realizado en Chile (año 2017), Copiapó cuenta con un total de 153.937 habitantes, correspondiente al 53,79% de la región de Atacama, posicionándose como una de las 16 ciudades más pobladas de Chile (INE, 2017).

Entre sus localidades, Paipote, situada al suroriente de la ciudad, ha presentado un crecimiento exponencial en los últimos años, lo que justifica el incremento de casi el 15% de la población de la comuna (24.846 habitantes) respecto al Censo del año 2002, donde se registraron 129.091 habitantes. Este hecho ha llevado a que, en enero del presente año, la Cámara de Diputados aprobara de forma unánime, el Proyecto de Resolución que solicita al Presidente de la República la creación de la comuna de Paipote, independizándose así de la ciudad de Copiapó. Lo que se suma a la inminente creación de su propio distrito electoral, para las próximas elecciones de alcaldes y gobernadores del año 2020.

Según Valenzuela (2015), Copiapó ha crecido en estrecha relación con los procesos de desarrollo económicos de la región de Atacama, con especial dependencia de la actividad minera, lo que ha ocasionado periodos de crecimiento explosivo y otros de carácter estanco, según los vaivenes propios de la minería.

### Estado de los depósitos de relave

Actualmente, existen en total 84 depósitos de relave en la ciudad de Copiapó (SERNAGEOMIN, 2019) distribuidos como se muestra en la imagen 12 donde es posible observar que gran parte de estos depósitos se ubica al suroeste de la capital, con pocos ejemplares al nororiente de las localidades de Paipote y San Fernando.

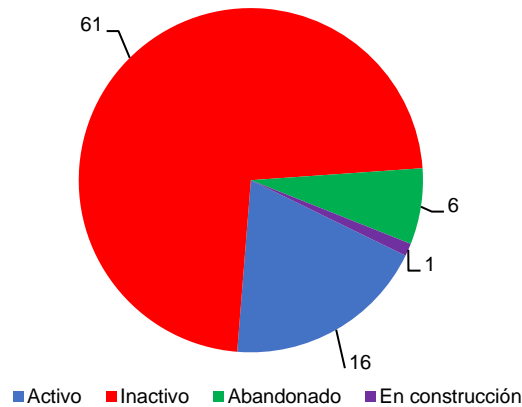
**Imagen 12**  
**Distribución actual de depósitos de relaves en la ciudad de Copiapó**



Fuente: Adaptado de SERNAGEOMIN 20019 sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma Google Earth Pro.

Gran parte del total de los depósitos se encuentran inactivos (cerca del 73% correspondiente a 61 depósitos), 6 de ellos están abandonados, 16 actualmente activos y sólo 1 es reportado en proceso de construcción (gráfico 14) (SERNAGEOMIN, 2019).

**Gráfico 14**  
**Cantidad de depósitos de relave en condición activa, inactiva y abandonados en la ciudad de Copiapó**  
*(En número)*

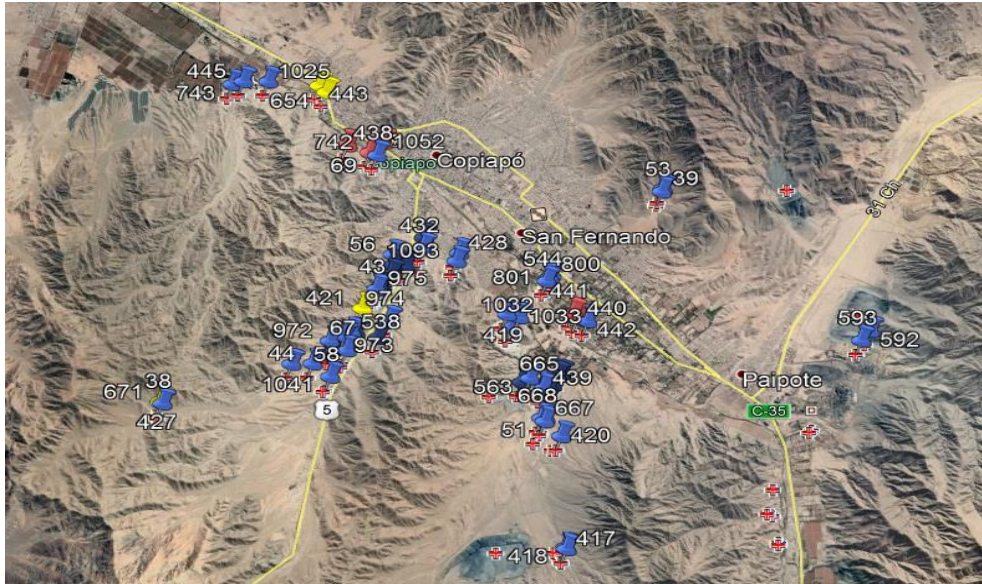


Fuente: Catastro SERNAGEOMIN, 2019.

**Depósitos inactivos, abandonados y Pasivos Ambientales Mineros en Copiapó**

Realizando un análisis más detallado, 68 de los 84 depósitos de relave de la ciudad se encuentran en situación de abandono. En la imagen 13 se muestra su distribución en color azul para los depósitos inactivos y en amarillo para los depósitos abandonados, señalando además aquellos considerados como Pasivos Ambientales Mineros en color rojo, que en este caso corresponden a 5 tranques de relave de oro y cobre.

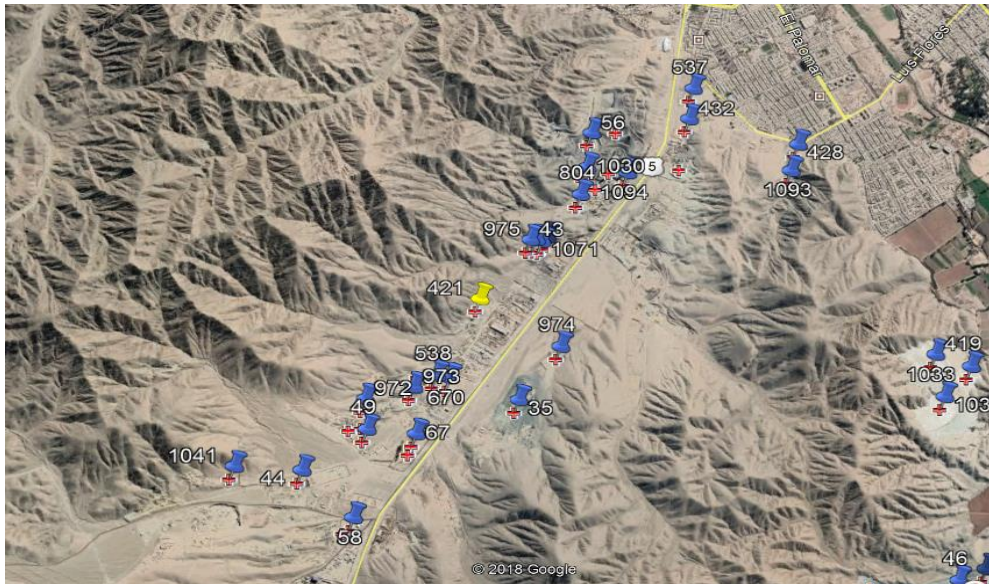
**Imagen 13**  
**Depósitos inactivos y abandonados en la ciudad de Copiapó**



Fuente: Adaptado de SERNAGEOMIN 20019 sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.

Entrando a la ciudad por Ruta 5, a ambos lados de la carretera se emplaza el 46% de estos depósitos, a una distancia de 5 kilómetros del centro urbano de la ciudad, que decrece a medida que se avanza por dicha ruta entrando a la capital (imagen 14). Casi la totalidad de estos depósitos son inactivos, exceptuando el tranque de relaves 421, que corresponde al único depósito abandonado ubicado al lado noroeste de dicha ruta.

**Imagen 14**  
**Concentración de depósitos en situación de abandono entrando por Ruta 5 Norte a la ciudad de Copiapó**



Fuente: Adaptado de SERNAGEOMIN 20019 sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.

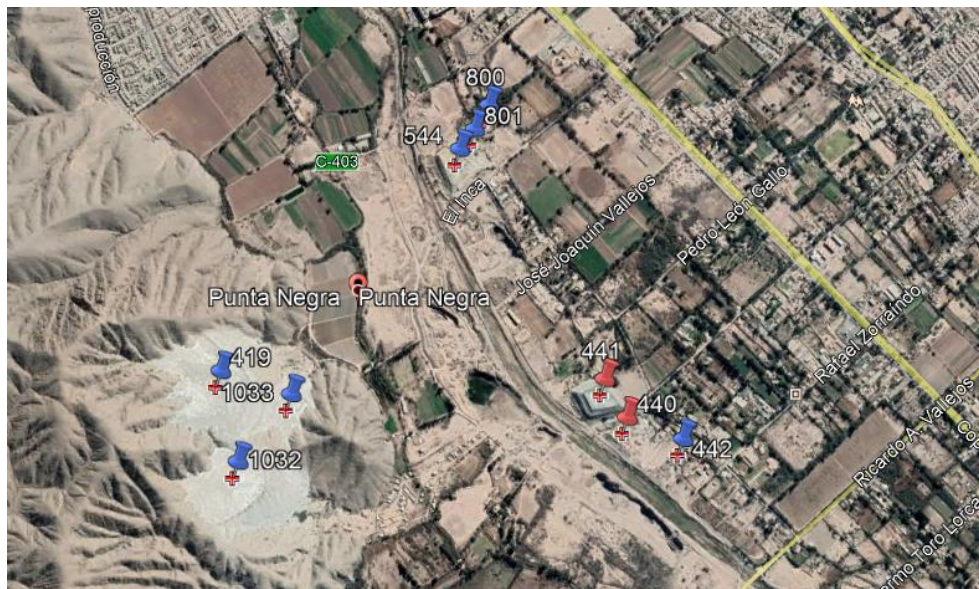


Las demás aglomeraciones de depósitos se localizan en los alrededores de Punta Negra, sector ubicado al sur de San Fernando que presenta un amplio desarrollo de actividad agrícola, al oeste del centro de Copiapó y en la localidad de Mirador (a un costado de la Ruta 5), donde también se distingue gran cantidad de prados agrícolas al observar imágenes satelitales. De los depósitos mencionados anteriormente, cabe destacar aquellos que han sido catalogados como PAM por el Ministerio de Minería, según el Catastro de Pasivos Ambientales Mineros, en 2019. En específico, los tranques de relave inactivos 440 y 441, ubicados al suroriente de Punta Negra, cuya superficie alcanza las 2 ha aproximadamente (imagen 15), y los depósitos 69, 742 y 1052, que se emplazan al oeste del centro de Copiapó y cubren un área de 9 ha aproximadamente (imagen 16).

Estos 5 depósitos resultan críticos al considerar su superficie y cercanía con los límites urbanos de la ciudad; sin embargo, teniendo en cuenta el efecto de superposición de fuentes emisoras, en base a lo establecido por la *National Pollutant Inventory Guide* (NPI, 2015), casos como los depósitos ubicados a ambos lados de la Ruta 5 (imagen 14), pueden resultar más críticos, considerando que estos se emplazan dentro de un radio de 2 km, como se muestra en la imagen 16.

Si el criterio de la NPI se aplica en este caso, la superficie del depósito de relaves aumenta de 20 ha, que corresponde a la sumatoria de las áreas individuales de cada depósito, a 164 ha aproximadamente (más de 8 veces), lo que evidentemente trae consigo un aumento significativo en el cálculo de las emisiones de material particulado, por lo que se debe tener especial cuidado y criterio a la hora de establecer en qué casos se debe aplicar lo establecido en la guía australiana. Esto último considerando que, en este ejemplo de la ciudad de Copiapó, los depósitos se emplazan en un área minera de campamentos e instalaciones industriales que pueden ser o no consideradas como áreas residenciales, puesto que los mismos procesos involucrados en una planta de cobre y oro podrían aumentar las emisiones de material, lo que se traduce en la inminente necesidad de definir qué se entiende por áreas residenciales y así unificar los criterios para el cálculo de las emisiones.

**Imagen 15**  
**Pasivos Ambientales Mineros (440 y 441), sector Punta Negra**



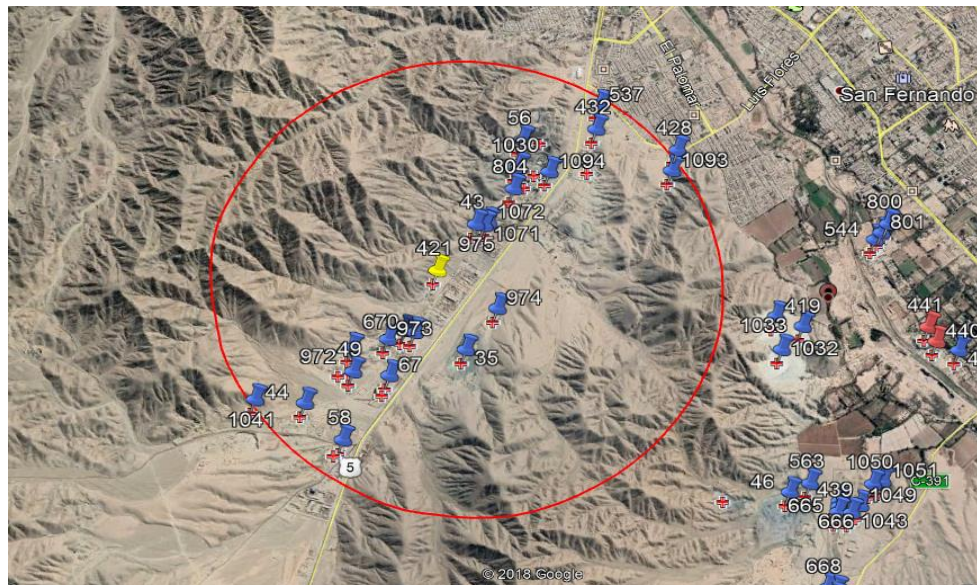
Fuente: Adaptado de SERNAGEOMIN 20019 sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.

**Imagen 16**  
**Pasivos Ambientales Mineros (69, 742 y 1052), sector poniente de Copiapó**



Fuente: Adaptado de SERNAGEOMIN 20019 sobre la base d imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.

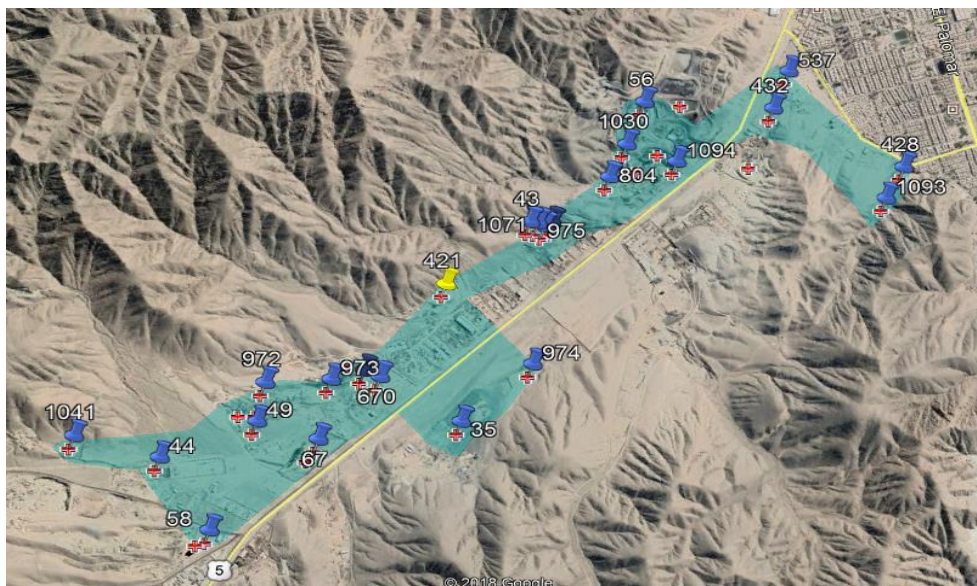
**Imagen 17**  
**Depósitos de Relaves en un radio de 2 km, entrada a la ciudad de Copiapó por Ruta 5 (Panamericana Norte)**



Fuente: Adaptado de SERNAGEOMIN 20019 sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.



**Imagen 18**  
Ejemplo de superposición de área de depósitos en Copiapó, según lo establecido por la NPI australiana, 2015



Fuente: Elaboración propia sobre la base de NPI, 2015 y sobre la base de imágenes satelitales disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*.

### Resultados y discusión

Para el estudio práctico del comportamiento de los FE en el contexto de la ciudad de Copiapó, se utilizan datos procedentes de la Dirección Meteorológica de Chile del año 2017. Para el cálculo de estos, se realizan los mismos supuestos descritos en el acápite de Andacollo y se contrastarán con el inventario de emisiones del informe "Antecedentes Técnicos Medidas de Descontaminación para Material Particulado Respirable Copiapó y Tierra Amarilla" (*Enviromodeling*, 2019), proporcionado por Ministerio de Minería de Chile. En este documento se indica que se utilizará la metodología EPA (2006b), sin especificar número de perturbaciones, área considerada, umbral de erosión de los depósitos, consideraciones geométricas sobre el material apilado ni resultados sobre la modelación eólica que utilizaron para los cálculos.

**Cuadro 11**  
Comparación de factores de emisión aplicados a las ciudades de Andacollo y Copiapó

Factor de emisión [kg/ha/año]	Copiapó	Andacollo
EPA 1985a	19	3217
EPA 2006b (N=2)	144	147
EPA 2006b (N=12)	683	689
EPA 2006b (N=36)	1 935	2 131
EEA 2019a	8 200	8 200
EEA 2019b	4 100	4 100
EPA 1985b	79	322

Fuente: Elaboración propia sobre la base de EPA, 1985 a, b; EPA, 2006b; EEA, 2019a, b.

Al comparar los FE de ambas localidades (cuadro 11), se aprecia que EPA (2006b) reporta estimaciones en Copiapó ligeramente menores a las de Andacollo. Mientras que ambas metodologías

de 1985a,b reportan valores significativamente inferiores en la capital de la región de Atacama, respecto de la comuna de la región de Coquimbo. Específicamente el FE EPA (1985a) es 2 órdenes de magnitud menor, mientras que el modelo EPA responde con una magnitud menor al 25%. Estas diferencias se deben a efectos orográficos presentes en Copiapó, que frenan y filtran los vientos, por lo que las ráfagas son de menor intensidad, en promedio.

Al considerar las 427,6 ha de depósitos de relave en situación de abandono, se observa que sólo el FE EPA (1985) entrega un valor de emisión similar a (*Enviromodeling*, 2019), el resto de las metodologías estiman valores al menos un orden de magnitud mayor (cuadro 12). Debido al bajo detalle de los procedimientos de cálculo, detallados al principio del presente apartado, no se puede determinar a ciencia cierta cuál es el motivo de estas diferencias.

**Cuadro 12**  
**Inventario de emisiones anuales en Copiapó**

Metodología	Emisiones (ton/año)
EPA 1985a	8
EPA 2006b (N=2)	61
EPA 2006b (N=12)	292
EPA 2006b (N=36)	827
EEA 2019a	3 506
EEA 2019b	1 753
EPA 1985b	34
<i>Enviromodeling</i> (2019)	9,1

Fuente: Elaboración propia sobre la base de EPA, 1985a,b; EPA, 2006b; EEA, 2019a, b.

La comparación en las estimaciones de material particulado entre ambas ciudades en el cuadro 11 plantea una serie de interrogantes sobre el correcto uso de los Factores de Emisión en cuanto a su representatividad de los procesos propios en un tranque de relaves en abandono. Las distintas formulaciones y metodologías presentadas en este documento requieren de parámetros de entrada que en la actualidad no se encuentran disponibles. En consideración de la cantidad, heterogeneidad, diversidad y extensión de los depósitos de relaves distribuidos en Chile, realizar mediciones detalladas de las variables sensibles de cada uno de ellos se puede volver una tarea intensiva y costosa, por lo que contar, en primera instancia, con FE del tipo valor heurístico, con una banda de confianza, como son los de la EEA, se vuelven una herramienta objetiva y clara al momento de reportar emisiones de material particulado.





## VI. Conclusiones y recomendaciones

A partir de este informe técnico se han podido presentar y resumir distintas metodologías para la estimación de emisiones de material particulado a la atmósfera a través del uso de Factores de Emisión (FE). El estudio del fenómeno de erosión en suelos, así como la evolución en las formulaciones de los distintos FE llevan a la conclusión de que existe un vacío técnico para estimar la cantidad de material particulado generado desde depósitos de relaves en situación de abandono. Esto se debe, entre otras cosas, a que el proceso de erosión depende de parámetros propios del material en estudio, lo que requiere de un entendimiento acabado de sus propiedades físicas, así como de su interacción frente a parámetros climáticos locales.

Las formulaciones presentes tanto en la AP<sub>42</sub> de EPA como en las fichas técnicas de la EEA, ambas para erosión eólica industrial, fueron formuladas en un principio tanto para pilas de carbón como para acopios de minerales o metales. Estos depósitos, aun cuando presentan similitudes con depósitos de relave en abandono, no logran capturar en su totalidad la erosión propia de estos depósitos.

En el caso particular del FE EPA (2006b), los resultados de aplicabilidad son sensibles respecto de la selección de la metodología y de variables dentro de los mismos, como lo son la velocidad umbral de erosión, el contenido de finos del depósito o el número de perturbaciones (N). Este último parámetro, formulado por EPA, por definición aplicaría sólo a estructuras en crecimiento o actividad permanente, lo que dificulta su utilización para estructuras en situación de abandono. La estimación de la velocidad umbral requiere de un estudio en terreno particular para cada tranque, y la milla más rápida de viento para estimar el potencial de erosión no es un término técnico utilizado por meteorología en el país por o que es necesario estimarla desde registros. A todo lo anterior se suma la necesidad de datos climáticos locales lo que puede otorgar una alta incertidumbre a las estimaciones. Por lo mismo, el FE más reciente de EPA presenta dificultades de aplicación al momento de considerar la realidad de los depósitos de relaves en Chile en cuanto al nivel y profundidad de la información disponible.

Los FE de la EEA (2019a,b) para la estimación de las emisiones de material particulado toman como base a EPA (2006b) pero incorporan adicionalmente estudios propios. Contar con estos FE, del tipo valor heurístico, se vuelve una herramienta crucial para normalizar las estimaciones cuando se considera la cantidad y diversidad de depósitos de relaves en el país, al menos hasta que se cuente con herramientas especializadas para

cuantificar la erosión de relaves en situación de abandono. Dado que el uso de otras formulaciones podría llevar a diferencias importantes sensibles a variables climatológicas, además de a las propiedades de los depósitos, se sugiere considerar en un primer momento el FE EEA (2019a, b).

No obstante, y en consideración a lo discutido en el presente informe, se estima además necesario desarrollar una metodología propia para la estimación de emisiones de material particulado procedente de depósitos de relaves en situación de abandono que: i) permita reducir las incertidumbres de Factores de Emisión (FE) generados en lugares con características geográficas, climáticas y productivas distintas, e ii) identifique los parámetros que puedan controlar o dominar su proceso de erosión, más allá de la velocidad del viento, como por ejemplo las modificaciones fisicoquímicas de las propiedades de los relaves a lo largo del tiempo.

En cualquier caso, es importante contar con información de calidad respecto a las propiedades, estados y geometría de los depósitos en situación de abandono, así como desarrollar campañas de medición a nivel nacional, en terreno y laboratorio, que permitan calibrar las formulaciones de factores de emisión ya existentes de la mejor manera posible o bien desarrollar una metodología propia para estas estructuras.

## Bibliografía

- Alfaro S.C., y Gomes L. (2001), Modeling mineral aerosol production by wind erosion : Emission intensities and aerosol size distributions in source areas. *Journal of Geophysical Research*, 106:75–84.
- Alfaro S. C., Louis J., Nickling W. (2004), Estimation of PM<sub>20</sub> emissions by wind erosion : main sources of uncertainties. *Geomorphology*, 59: 63–74.
- Amponsah-Dacosta F. (2015), A field-scale performance evaluation of erosion control measures for slopes of mine tailings dams. 10<sup>th</sup> international conference on acid rock drainage and IMWA annual conference.
- Banco Central de Chile (2019), Boletín Estadístico, Volumen 90° N1115.
- Behbahani A. M. (2015), Hazard and Risk Assessment of Wind Erosion and Dust Emissions in Denmark - A Simulation and Modelling Approach.
- Biblioteca del Congreso Nacional (2012), Informe: Pasivos Ambientales Mineros en Chile.
- Blight G. (2012), Long-term research on amelioration of wind and water erosion of mine tailings storages in Southern Africa, *Transactions of the Royal Society of South Africa*, 67:2, 91-102.
- \_\_\_\_\_ (2008), Wind erosion of waste impoundments in arid climates and mitigation of dust pollution, *Waste Management & Research*, 26:523-533.
- \_\_\_\_\_ (2007), Wind erosion of tailings dams and mitigation of the dust nuisance. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 107(February), 99–108.
- \_\_\_\_\_ (1991), Erosion and anti-erosion measures for abandoned gold tailings dams, National Meeting of American Society for Surface Mining and Reclamation, Durango, Colorado, USA, pp. 323-330.
- \_\_\_\_\_ (1989), Erosion losses from the surfaces of gold-tailings dams, *Journal of the South African Institute of Mining & Metallurgy*, 89(1): 23-29.
- Buikema, N. D., Zwissler, B. E., Seagren, E. A., Oommen, T., y Vitton, S. (2017), Stabilisation of iron mine tailings through biocalcification, *Environmental Geotechnics*, 5(2), 94-106.
- Buschiazzo D. y Aimar S. (2003), *Erosión eólica: procesos y predicción*. Publicado en el libro Viento, suelo y plantas, editores, Alberto Golberg y Alicia Kin, Ediciones Instituto Nacional De Tecnologías Agropecuarias (INTA).
- Castro G., Troncoso J. (1989), Effects of 1985 Chilean earthquake on three tailing dams, en *Proceedings of the Fifth Chilean Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Santiago, Chile.
- Catastro de Depósitos de Relaves en Chile (actualización 24-04-2019), [en línea] <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>.

- Catastro de Pasivos Ambientales Mineros (2017), Comunicación con Ministerio de Minería.
- Chang C. (2006), Characteristics and Emission Factors of Fugitive Dust at Gravel Processing Sites. *Aerosol and Air Quality Research*, 6(1): 15–29.
- Chatenet B., Marticorena B., Gomes L., Bergametti G. (1996), Assessing the microped size distributions of desert soils erodible by wind. *Sedimentology*, 43(5): 901-911.
- CENMA (2011), Diagnóstico de calidad de aire y medidas de descontaminación, Andacollo. BIP 30076363-0.
- Cigagna M., Dentoni V., Grosso B., Massacci, G. (2014), Emissions of Fugitive Dust from Mine Dumps and Tailing Basins in South- Western Sardinia Emissions of fugitive dust from mine dumps and tailing basins in south- western Sardinia. In *Mine planning and equipment selection*.
- COCHILCO (2018), Anuario de Estadísticas del cobre y otros minerales.
- Countess Environmental (2006), WRAP Fugitive Dust Handbook.
- Cowherd C., Donaldson J., Hegarty R., Ono D. (2010), Proposed Revisions to Fine Fraction Ratios Used for AP 42 Fugitive Dust Emission Factors (noviembre).
- Dentoni V. et al. (2018), Industrial Wind Erosion: PM Emission from the Erodible Flat Surfaces of Tailing Basins. In Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production (pp. 15-27), Springer, Cham.
- Dobry R., Alvarez L. (1967), Seismic failures of Chilean tailings dams. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE* 93(6). pp 237-260.
- Duku P.M., Stewart J.P., Whang D. H. (2006), Effect of post-compaction ageing on seismic compression of fine-grained soils. *Ground Modification and Seismic Mitigation*, (Gsp 152), 411–416.
- Enviromodeling (2019), Antecedentes técnicos medidas de descontaminación para material particulado respirable Copiapó y Tierra Amarilla.
- EPA (2013), Recommended Procedures for Development of Emissions Factors and Use of the WebFIRE Database Development of Emissions Factors and Use of the WebFIRE Database.
- \_\_\_\_\_ (2007), Emissions Factor Uncertainty Assessment.
- \_\_\_\_\_ (2006), AP- 42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources (with revision till November 2006).
- \_\_\_\_\_ (2006a), AP-42 Compilation of air pollutant emission factors, Fifth Edition. Aggregate Handling and Storage Piles. (with revision till November 2006).
- \_\_\_\_\_ (2006b), AP-42 Compilation of air pollutant emission factors, Fifth Edition. Industrial Wind Erosion. (with revision till November 2006).
- \_\_\_\_\_ (1988), Control of open fugitive dust sources. North Carolina: Office of Air Quality Planning And Standards.
- \_\_\_\_\_ (1987), Update of fugitive dust emission factors in AP 42 section 11-2. North Carolina: Midwest Research.
- \_\_\_\_\_ (1985a), AP 42 Compilation of air pollutant emission factors, Fourth Edition.
- \_\_\_\_\_ (1985b), Rapid assessment of Exposure to particulate emissions from Surface contamination sites. EPA/600/8-85/002, by Cowherd C., Muleski G., Englehart P., Gillette D.
- \_\_\_\_\_ (1983), Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Third edition, supplement 14.
- \_\_\_\_\_ (1978), Fugitive Emissions from integrated iron and steel plants. Kansas city.
- \_\_\_\_\_ (1968), AP 42 Compilation of air pollutant emission factor, R. L. Duprey, Ed., (I, Vol. I), Durham.
- EEA (2019a), EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. 2.A.5.c Storage, handling and transport of mineral products.
- \_\_\_\_\_ (2019b), EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 2.C.7.d Storage, handling and transport of metal products 2019.
- Espinace R. et al. (2006), Evaluación del efecto eólico en tranques de relave. Artículo presentado en el XVIII Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG 2006). San Juan, Argentina.
- Gherboudj I., Beegum S. N., Marticorena B., Ghedira, H. (2015), Dust emission parameterization scheme over the MENA region: Sensitivity analysis to soil moisture and soil texture. *Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 10915–10938.
- Gobernación regional región de Coquimbo (GORE) (2015), Estrategia Regional de Desarrollo, Andacollo, 8 de mayo de 2015, [en línea] <https://www.gorecoquimbo.cl/>.
- Greeley R., e Iversen J. D. (1987), Wind as a geological process: on Earth, Mars, Venus and Titan (Vol. 4), CUP Archive.

- Hadjiev, A. y P. Hadjiev, (2003), On some methods for surface erosion control on tailings ponds and waste fly-ash piles, *Mining and mineral processing*. Sofia (46), 185-187.
- Haustein K. *et al.* (2015), Testing the performance of state-of-the-art dust emission schemes using Testing the performance of state-of-the-art dust emission schemes using DO<sub>4</sub> Models field data. *Geoscientific Model Development*, 8(February), 341–362.
- Hunt J. C. R., Weber A. H. (1979), A Lagrangian statistical analysis of diffusion from a ground-level source in a turbulent boundary layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105(444), 423-443.
- Jia, Q., Al-Ansari, N., & Knutsson, S. (2014). Modeling of wind erosion of the Aitik Tailings Dam using SWEEP model, *Engineering*, 6(7), 355-364.
- Kim, D.S., Cho, G.H., White, B.R., 2000. A wind-tunnel study of atmospheric boundary-layer flux over vegetated surfaces to suppress PM<sub>10</sub> emission on Owens (dry) lake. *Boundary Layer Meteorol.* 97, 309–329.
- Kok J. F., Parteli E. J., Michaels T. I., Karam D. B. (2012), The physics of wind-blown sand and dust. *Reports on progress in Physics*, 75(10), 106901.
- Kon L. C., Durucan S. y A. Korre, (2007), The development and application of a wind erosion model for the assessment of fugitive dust emissions from mine tailings dumps, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 21(3), 198-218.
- INE (2017), Memoria del Censo 2017, Instituto Nacional de Estadísticas Chile.
- INN (2012), Depósito de relaves - Caracterización del producto supresor de material particulado - Evaluación de propiedades de desempeño de los relaves tratados con supresor de material particulado.
- IPCC (2006), INTRODUCTION TO THE 2006 GUIDELINES. In *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (pp. 1–12).
- Ministerio de Minería (2019), Bases para una política nacional de depósitos de relaves, julio de 2019, Gobierno de Chile.
- \_\_\_\_\_ (2015), Glosario Minero, Gobierno de Chile, [en línea] <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-a/>.
- \_\_\_\_\_ (2015), Ley N° 20.819 "Modifica la Ley n° 20.551 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras e introduce otras modificaciones legales", Gobierno de Chile.
- \_\_\_\_\_ (2011), Ley 20.551 "Regula el cierre de faenas e instalaciones mineras", Gobierno de Chile.
- \_\_\_\_\_ (2007), Decreto Supremo N° 248 "Reglamento para la aprobación de proeyctos de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves", Gobierno de Chile.
- MMA (Ministerio del Medio Ambiente) (2019), Decreto 105 "Aprueba plan de prevención y descontaminación atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví", Pub. L. No. 105, Gobierno de Chile.
- \_\_\_\_\_ (2013), Decreto Supremo N° 40 "Aprueba reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental", Gobierno de Chile.
- Nickling W.G., y Gillies J.A. (1989), Emission of fine-grained particulates from desert soils. In *Paleoclimatology and Paleometeorology: modern and past patterns of global atmospheric transport* (pp. 133-165). Springer, Dordrecht.
- Nickling W.G. and McKenna Neuman C. (2009), *Aeolian sediment transport Geomorphology of Desert Environments* ed A Parsons and A D Abrahams (New York: Springer) pp 517–555.
- NPI (National Pollutant Inventory) (2015), *National Pollutant Inventory Guide Version 6.1*; Department of the Environment, Australian Government.
- \_\_\_\_\_ (2012), *National Pollutant Inventory Emission Estimation Technique Manual for Mining*. Department of the Environment, Australian Government.
- \_\_\_\_\_ (1999), *Emission estimation technique manual for copper concentrating, smelting and refining*. Department of the Environment, Australian Government.
- OMS (2006), Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre: actualización mundial 2005 (No. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02).
- Pattey E., Qiu G., Fiset S., Ho E., Macdonald D., & Liang C. (2015), Primary particulate matter emissions and trends from Canadian agriculture. *WIT Transactions on Ecology and The Environment* 2, 198, 143–154.
- Peutz (2006), *Emissiegegevens fijnstof (PM<sub>10</sub>) overslagsbedrijven in het industriegebied Europort/ Maasvlakte te Rotterdam*. Rapportnummer FR 4897 - 2, 20, diciembre de 2006 (en danés).

- Pi H., Sharratt B., Lei J. (2019), Wind erosion and dust emissions in central Asia: Spatiotemporal simulations in a typical dust year. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(2), 521-534.
- SERNAGEOMIN (2019), Catastro de Depósitos de Relaves en Chile.
- \_\_\_\_\_ (2007), Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves.
- SGS (2013), Catastro de fuentes de emisión de MP10 no identificadas y propuestas de medidas de mitigación en polígono de zona saturada de Andacollo. OL208649-MMA-01.
- Shao Y. y Lu H. (2000), A simple expression for wind erosion threshold friction velocity. *J Geophys Res* 105: 22,437-22,443.
- Shao Y. (2008), Physics and modelling of wind erosion. Vol. 37. Springer Science & Business Media.
- Skidmore E. L. (1986), Wind Erosion Climatic Erosivity. *Climatic Change*, (9), 195-208.
- Ștefănescu L., Constantin V., Surd V., Ozunu A. y Vlad Ș. (2011), *Assesment of soil erosion potential by the USLE method in Roșia Montană mining area and associated NATECH events*. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. 6(1): 35-42.
- Stowhas L. (2016), Fundamentos de Hidrología Aplicada. Editado por Raúl Flores y Álvaro Ossandón, Valparaíso, Chile, Editorial USM.
- Southerland J. H. (2014), An Abridged History of Emission Inventory and Emission Factor Activities (pp. 1-18). North Carolina: EPA.
- Sullivan D. A., y Ajwa H. A. (2011), Evaluation of wind erosion emissions factors for air quality modeling. *Soil Science Society of America Journal*, 75(4), 1285-1294.
- TECK (2012), DIA proyecto "Recuperación de suelos contaminados por relaves abandonados". SIGA Ingeniería Aplicada.
- Toraño J. A. et al. (2007), Influence of the pile shape on wind erosion CFD emission simulation. *Applied Mathematical Modelling*, 31, 2487-2502.
- Toro D. (2017), Propuesta para la regulación jurídica de pasivos ambientales mineros: Casos de relaves de Chañaral y Andacollo. Universidad de Chile, Facultad de derecho, Santiago.
- Troncoso, J. H. (1994), Tailings Dams Geotechnical Engineering: A Report of Technical Committee TC-7. In Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (Vol. 6:213-216). AA BALKEMA.
- Troncoso J., (2002), Dynamic properties and seismic behavior of thickened tailings deposits, International Symposium on Paste and Thickened Tailings Disposal, Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile.
- Valenzuela P. (2015), Sistema de medición de la estabilidad de depósitos mineros de relave frente a la acción eólica, para su recuperación como espacio urbano sostenible. El caso de la ciudad de Copiapó en Chile. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica superior de Arquitectura.
- Villavicencio G., et al. (2014), Failures of sand tailings dams in a highly seismic country. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(4), 449-464.
- Visschedijk, A. J. H., Pacyna, J., Pulles, T., Zandveld, P. y Denier van der Gon, H. (2004), Coordinated European Particulate Matter Emission Inventory Program (CEPMEIP), en Dilara, P., et al. (eds.), *Proceedings of the PM emission inventories scientific workshop*, Lago Maggiore, Italia, 18 de octubre de 2004.
- Watson, J. G., Chow, J. C. (2000), Reconciling Urban Fugitive Dust Emissions Inventory and Ambient Source Contribution Estimates : Summary of Current Knowledge and Needed Research. Reno: Desert research institute.
- Watson, J. G., Chow, J. C., Pace, T. G. (1999), Fugitive dust emissions. In W. T. Davis (Ed.), *Air Pollution Engineering Manual* (Second, pp. 117-135). New York: John Wiley Inc.
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1978), Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Zhang, K., Zhang, W., Tan, L., An, Z. Zhang, H., (2015), *Effects of gravel mulch on aeolian transport: a field wind tunnel simulation*. *Journal of Arid Land*, 7(3): 296-303.

## **Anexos**

## Anexo 1

### Modelo EPA 1985 *Rapid Assessment of Exposure to Particulate Emissions from Surface Contamination Sites*

#### Modelo EPA 1985

Este procedimiento se desarrolla para la estimación de emisiones de material particulado desde "reservorios ilimitados" de polvo. Para una muestra de suelo, si el 60%, o más, es pasante a una malla de 1 mm de luz, entonces se puede considerar que el suelo como un reservorio ilimitado. Estos se caracterizan por una baja retención de humedad, no contar con costras o si las tiene, éstas son de fácil fractura (módulo de ruptura <1bar, es decir se puede reducir fácilmente con la mano y/o espesor menor o igual a 6 mm).

En él se desarrolla un modelo matemático, el cual considera que el arrastre de MP<sub>10</sub> es proporcional a la tercera potencia de la velocidad del viento y que la distribución de velocidades del viento se puede representar como una distribución de Rayleigh. De esta forma se propone la integral, para el cálculo del potencial de erosión eólica, desde reservorios de potencial inagotable:

$$I([u], u_t) = \int_{u_t}^{\infty} \text{freq}(u) \cdot u^3 du$$

Donde:

$I$ : Integral del potencial erosivo eólico

$u$ : velocidad del viento

$u_t$ : umbral de erosión

$[u]$ : velocidad media anual del viento

La resolución de dicha integral, bajo las condiciones anteriormente dichas es:

$$I([u], u_t) = ([u])^3 \cdot F(x)$$

Donde:

$x$ : es la razón adimensional  $(\sqrt{\pi}/2) \cdot (u_t/[u]) = 0,886 \cdot (u_t/[u])$ .

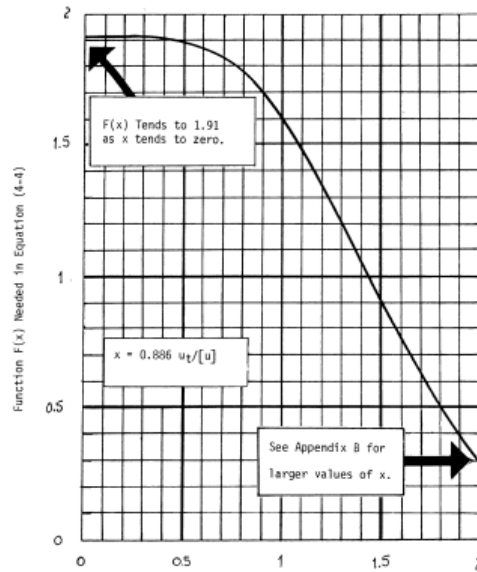
$F(x)$ : función del potencial erosivo, la cual se define como:

$$F(x) = \begin{cases} 0,18 \cdot (8x^3 + 12x) \cdot e^{-x^2}, & \text{si } x \geq 2 \\ 1,91297 - 0,027805x + 0,48113x^2 - 1,09871x^3 + 0,335341x^4, & \text{si } x < 2 \end{cases}$$

La expresión para  $x \geq 2$ , es propuesta inmediatamente en (EPA, 1985b), mientras que para la segunda propone la solución gráfica expuesta en la Imagen A1.1. El polinomio recién expuesto, es una regresión efectuada a dicho gráfico.



**Imagen A1.1**  
**Solución gráfica para  $F(x)$ , cuando  $x < 2$**



Fuente: Modelo EPA 1985.

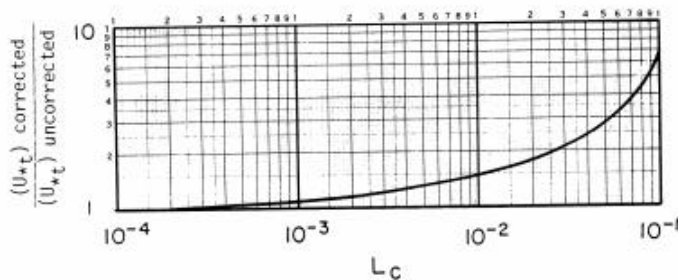
Finalmente, la ecuación para estimar las emisiones de MP<sub>10</sub> desde estas fuentes es:

$$FE_{PM10} = 0,036 \cdot (1 - V) \cdot \left(\frac{[u]}{u_t}\right)^3 \cdot F(x)$$

Donde  $V$  es el porcentaje de cobertura vegetal.

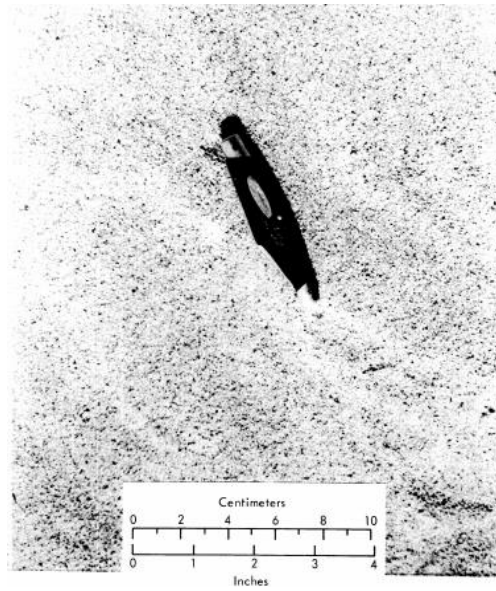
Cabe destacar que  $u_t$  debe ser corregido en caso de que la superficie a evaluar cuente con material no erosionable (diámetro mayor a 1 cm), esto se puede lograr determinando por inspección visual el factor  $L_C$ . La relación para la corrección de  $u_t$  y la estimación de  $L_C$  se presentan en desde la Imagen A1.2.

**Imagen A1.2**  
**Factor de corrección de  $u_t$  en función de  $L_C$**



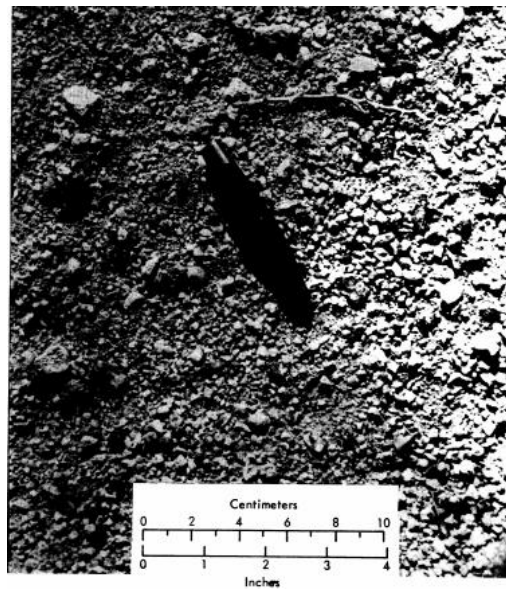
Fuente: Modelo EPA 1985.

**Imagen A1.3**  
**Superficie libre de material no erosionable,  $L_C < 10^{-3}$**



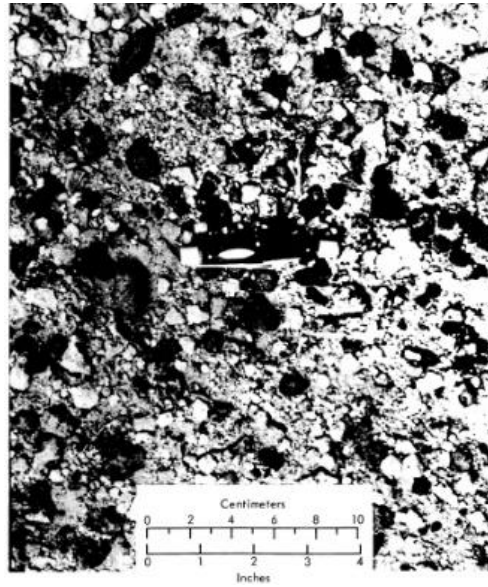
Fuente: Modelo EPA 1985.

**Imagen A1.4**  
**Superficie con presencia tanto de material erosionable como no erosionable,  $L_C \approx 0,01$**



Fuente: Modelo EPA 1985.

**Imagen A1.5**  
Superficie con gran presencia de material no erosionable,  $L_C \approx 0,1$



Fuente: Modelo EPA 1985.

## Anexo 2

### Catastro de información sobre tranques inactivos y abandonados en Andacollo: ejemplo de base de datos

NOMBRE_FAE	REGIÓN	PROVINCIA	COMUNA_INS	TIPO_INSTA	RECOBRERSO	ESTADO_INS
FAENA SAN MIGUEL (EX-ANDACOLLO)	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO-COBRE	INACTIVO
FAENA SAN MIGUEL (EX-ANDACOLLO)	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	INACTIVO
FAENA SAN MIGUEL (EX-ANDACOLLO)	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	INACTIVO
FAENA SAN MIGUEL (EX-ANDACOLLO)	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	INACTIVO
PLANTA LOS LEONES	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	ABANDONADO
PLANTA SAN JUAN	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	INACTIVO
PLANTA IRENE	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	INACTIVO
PLANTA LOS LITRES	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	INACTIVO
PLANTA PUNTA CALETONES	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	COBRE-ORO	PAM
PLANTA AZULINA, NUEVA ESPERANZA, RENACIMIENTO	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	INACTIVO
PLANTA PRINCESA Y ANDRONICA	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO-COBRE- PLATA	INACTIVO
PLANTA BUFALO (EX PLANTA TAPIA)	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	ABANDONADO
LAS TAZAS - CHISPERA (EX PLANTA LA EXOTICA)	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	INACTIVO
PLANTA ARIZONA	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO-COBRE- PLATA	INACTIVO
PLANTA RUIZ	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	ABANDONADO
PLANTA EMANUELA	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO-COBRE- PLATA	INACTIVO
PLANTA JOHN KENNEDY	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	ABANDONADO
LAS TAZAS - CHISPERA (EX PLANTA LA EXOTICA)	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	INACTIVO
PLANTA CENTRAL	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	INACTIVO
PLANTA IDNEY	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO-COBRE- PLATA	ABANDONADO
PLANTA JERALDO I	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	INACTIVO
PLANTA HILDA	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	INACTIVO
PLANTA LOS VALIENTES II	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	COBRE-ORO	INACTIVO
PLANTA RUBILAN	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO	ABANDONADO
SANTA TERESITA	IV	ELQUI	ANDACOLLO	TRANQUE DE RELAVE	ORO-COBRE	INACTIVO

## **Anexo 3**

### **Catastro de información meteorológica de uso público para la estimación de factores de emisión**

#### **Dirección Meteorológica de Chile – Servicios Climáticos**

En este recurso web se presenta la información correspondiente a variables meteorológicas de interés para la aplicación de los factores de emisión, tales como temperatura, precipitación, pluviometría, presión atmosférica, humedad, etc. En esta base de datos existen 677 estaciones registradas; sin embargo, al momento de consultar la información de manera online, la mayoría de estas no poseen registros de todas las variables meteorológicas de interés, presentan información discontinua y/o las mediciones dejaron de efectuarse hace años e incluso décadas.

Dentro de la totalidad de estaciones registradas existen aproximadamente 100 estaciones meteorológicas automatizadas (EMA), las cuales presentan su información cada minuto. Dada la variabilidad espacial de los depósitos de relaves y de las estaciones, en algunos casos los depósitos coinciden con estaciones que presentan información de algunas variables meteorológicas. La dificultad radica en la obtención de los datos ya que estos no se encuentran disponibles en línea y es necesario solicitarlas directamente a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

A pesar de lo anterior, existen 26 estaciones meteorológicas automatizadas distribuidas entre las regiones de Antofagasta y del Libertador General Bernardo O'Higgins, que se encuentran cercanas a depósitos de relaves. La mayoría de estas estaciones presentan información continua de precipitación, velocidad y dirección del viento, temperatura, presión atmosférica y humedad; entre los años 2017 a la actualidad. Cabe destacar que algunas de estas estaciones poseen información previa al 2017 de algunas variables meteorológicas ya mencionadas, pero estas deben solicitarse directamente a la DMC según el código de la estación en interés.

#### **Agromet**

En dicho recurso web es posible la extracción de datos correspondientes a temperatura, precipitación acumulada del día, temperatura del suelo, dirección y velocidad del viento y presión atmosférica. La obtención de la información es sencilla, puesto que basta con seleccionar la estación existente en el registro de la página, para luego exportar los datos directamente a Excel y poder efectuar el análisis de datos según se requiera. La información que se puede recopilar de esta página es complementaria a los datos recopilados a partir del sitio web de la DMC. Es importante hacer notar que en Agromet, existen estaciones meteorológicas emplazados en sectores que no son contemplados en la DMC y son cercanos a depósitos de relave. A partir de las estaciones en el recurso web y en función de la distribución espacial de los depósitos de relave, es posible destacar 18 estaciones meteorológicas entre las regiones de Antofagasta y del Libertador General Bernardo O'Higgins, que incluso poseen datos continuos online, desde hace más de 10 años.

#### **Agroclima**

Recurso web que surge a partir del convenio de distintas instituciones como la Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF), el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). En dicha página según la región y las estaciones, se puede extraer diariamente datos de temperatura, humedad relativa, precipitación diaria, precipitación acumulada, radiación solar, presión atmosférica y velocidad del viento. La principal desventaja de este sitio es que no presenta un registro de datos históricos, sino que los datos se deben ver diariamente y sin un valor exacto, debido a que los valores numéricos están aproximados a los enteros más cercanos. Cabe

destacar que también existe un número limitado de estaciones, por lo que la presente página solo puede utilizarse como complemento de recolección de datos.

### Ceaza-Met

Recurso web correspondiente al Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) dependiente de la Universidad de La Serena, la Universidad Católica del Norte y el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA-Intihuasi). Dicha página posee información detallada en cuanto a las variables meteorológica tales como temperatura, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, etc. Entre Vallenar (región de Atacama) hasta Salamanca (región de Coquimbo). No posee datos de sectores fuera de las latitudes de las comunas anteriormente mencionadas. La información meteorológica de estas estaciones está contenida en la página Agromet.

### Explorador de energía Eólica

Sito web manejado por el ministerio de energía de Chile, el cual posee un completo mapa de viento que cubre todo el territorio nacional comprendido entre Arica hasta Chiloé. Dicho mapa eólico fue elaborado en base a simulaciones numéricas usando el modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*), entregando análisis estadísticos correspondientes a dirección y velocidad estacional del viento, perfil logarítmico del viento, etc. En cualquier punto del país dentro de los límites mencionados. Si bien la página solo entrega modelaciones correspondientes al año 2010, los resultados de las modelaciones son confiables, puesto que se validaron con más de 350 sitios.

### Red Hidrométrica ArcGIS

Corresponde a una red de estaciones hidrometeorológicas de la Dirección General de Aguas de Chile; sin embargo, no presenta datos estadísticos o mediciones de las variables meteorológicas de interés, solo entrega información correspondiente a las coordenadas, cuenca sobre la cual está instalada la estación y si esta activa o no.

Imagen A3.1  
Estaciones meteorológicas región de Antofagasta



Fuente: Elaboración propia sobre la base de *Google Earth Pro*.



**Imagen A3.2**  
**Estaciones meteorológicas región de Atacama**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de *Google Earth Pro*.

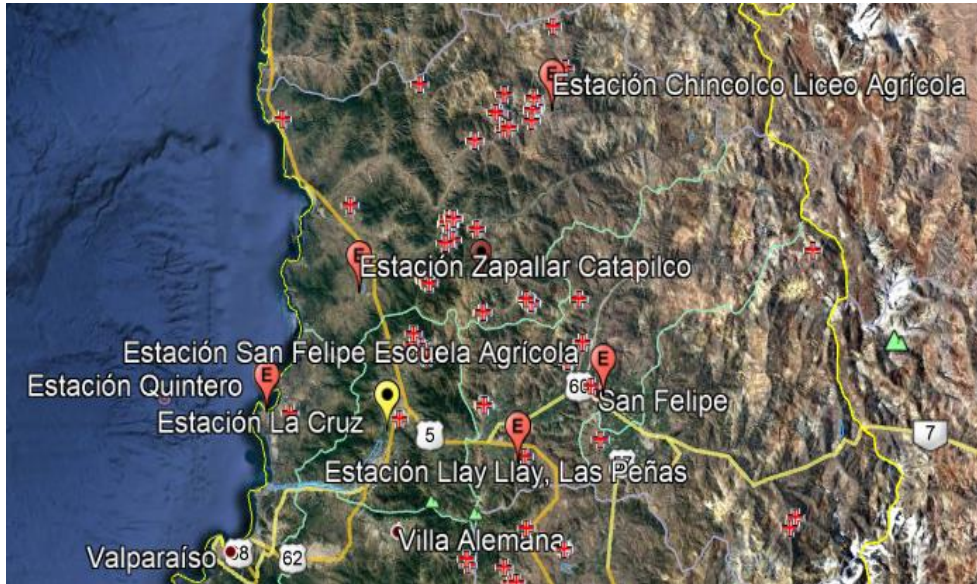
**Imagen A3.3**  
**Estaciones meteorológicas región de Coquimbo**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de *Google Earth Pro*.

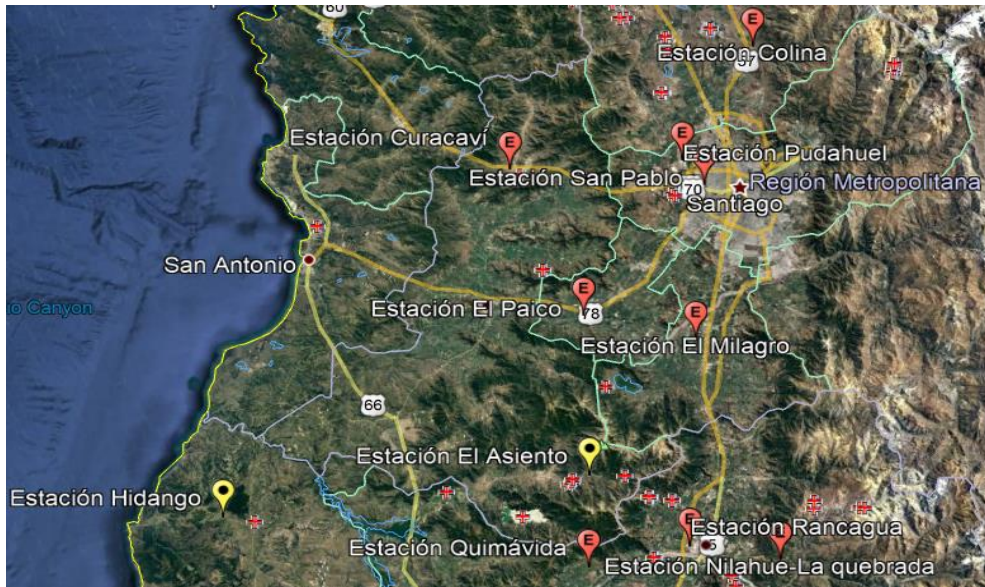


**Imagen A3.4**  
Estaciones meteorológicas región de Valparaíso



Fuente: Elaboración propia sobre la base de *Google Earth Pro*.

**Imagen A3.5**  
Estaciones meteorológicas región metropolitana y región del libertador general Bernardo O'Higgins



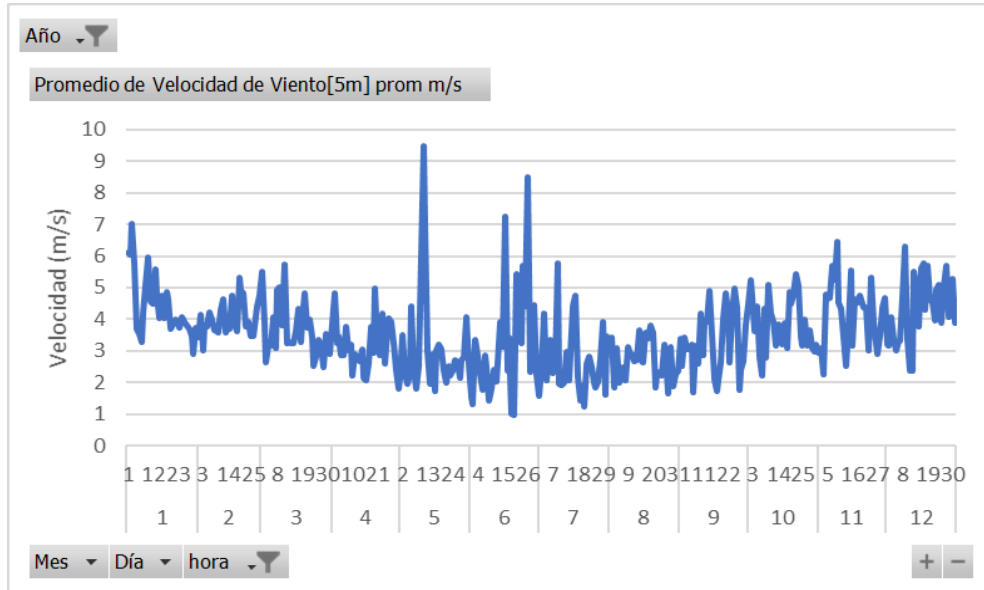
Fuente: Elaboración propia sobre la base de *Google Earth Pro*.



## Anexo 4 Información base para el cálculo de emisiones en Andacollo y Copiapó

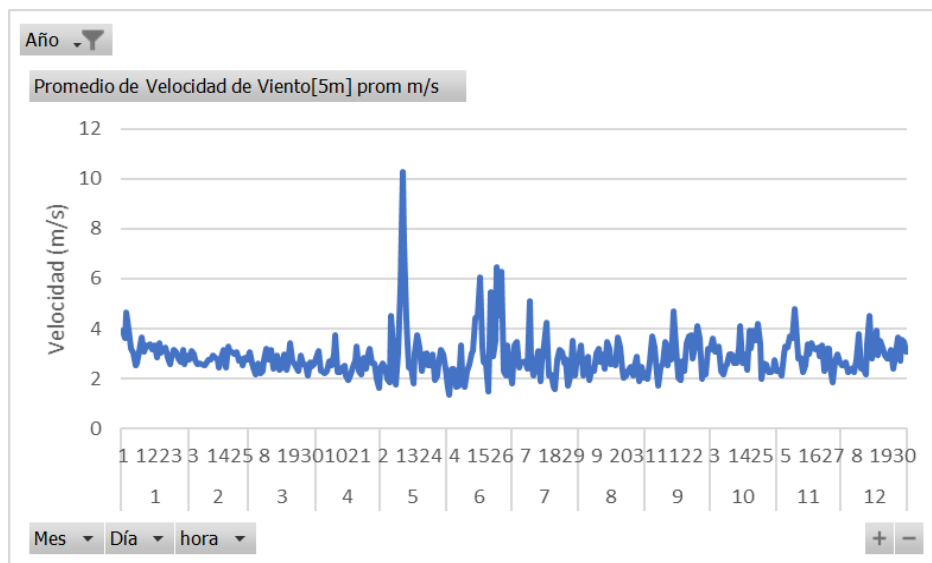
### ANDACOLLO

**Imagen A4.1**  
Velocidad promedio de vientos (m/s) en Andacollo a las 14:00 horas en 2017



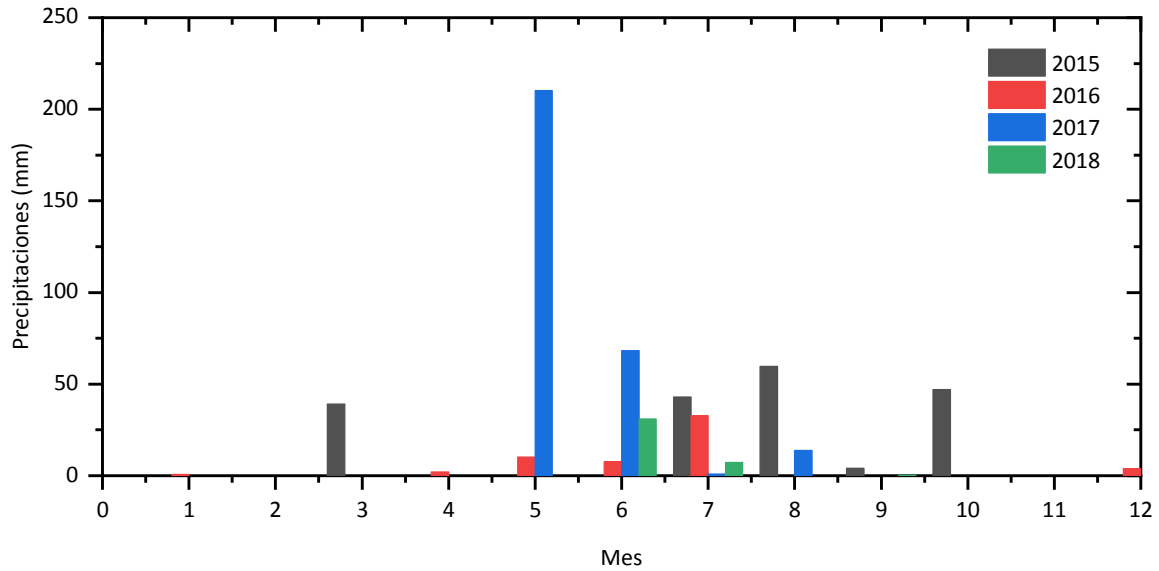
Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de estación meteorológica del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas.

**Imagen A4.2**  
Velocidad promedio de los vientos diarios en Andacollo para 2017



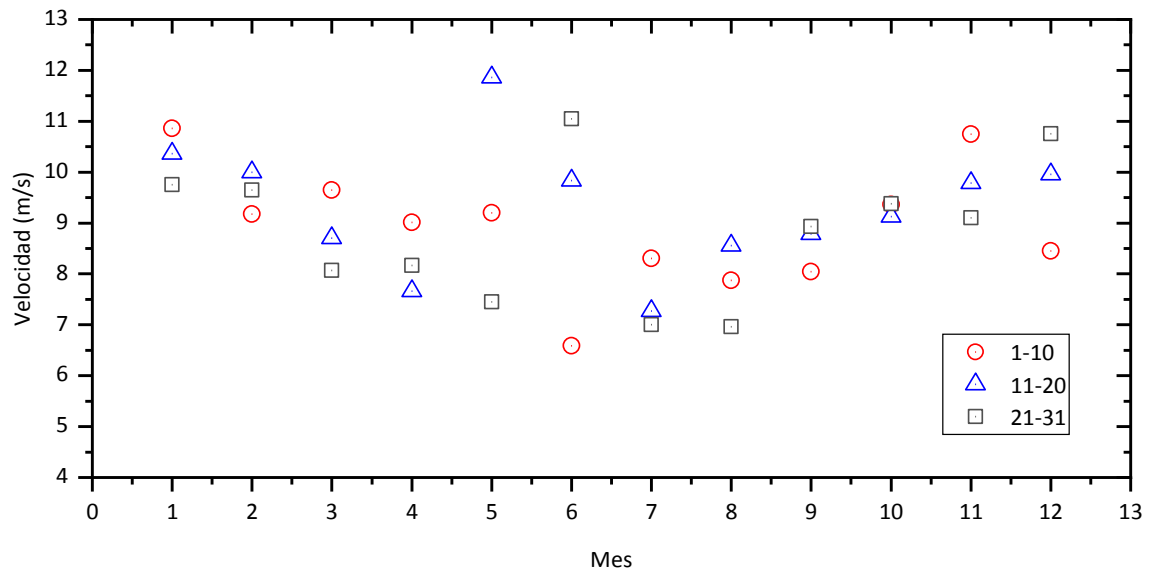
Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de estación meteorológica del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas.

**Imagen A4.3**  
**Precipitaciones mensuales ciudad de Andacollo años 2015-2018**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de estación meteorológica del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas.

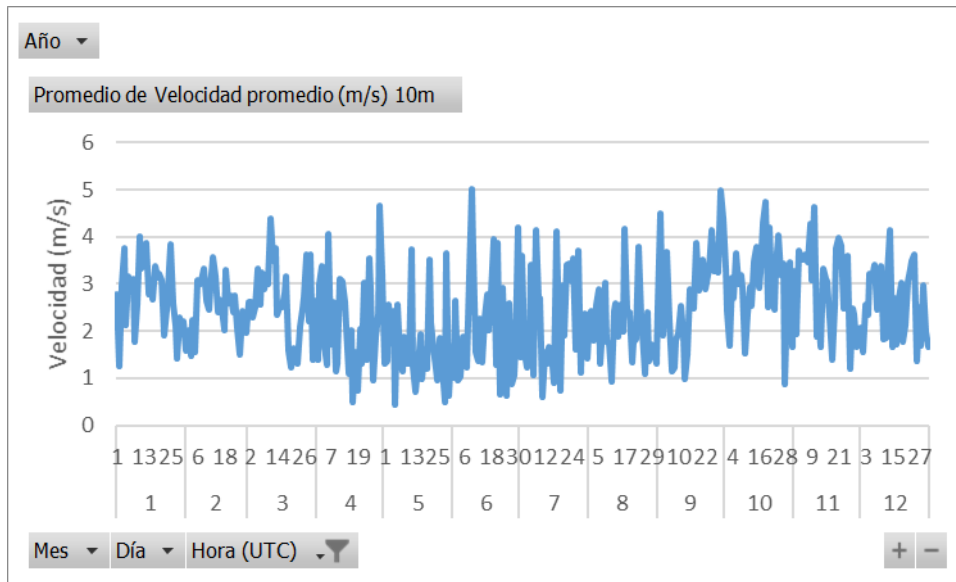
**Imagen A4.4**  
**Ráfagas usadas para FE EPA (2006b) para N=36. Círculos, triángulos y rombos representan la ráfaga máxima entre los días 1-10, 11-20 y 21-31 de cada mes**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de estación meteorológica del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas.

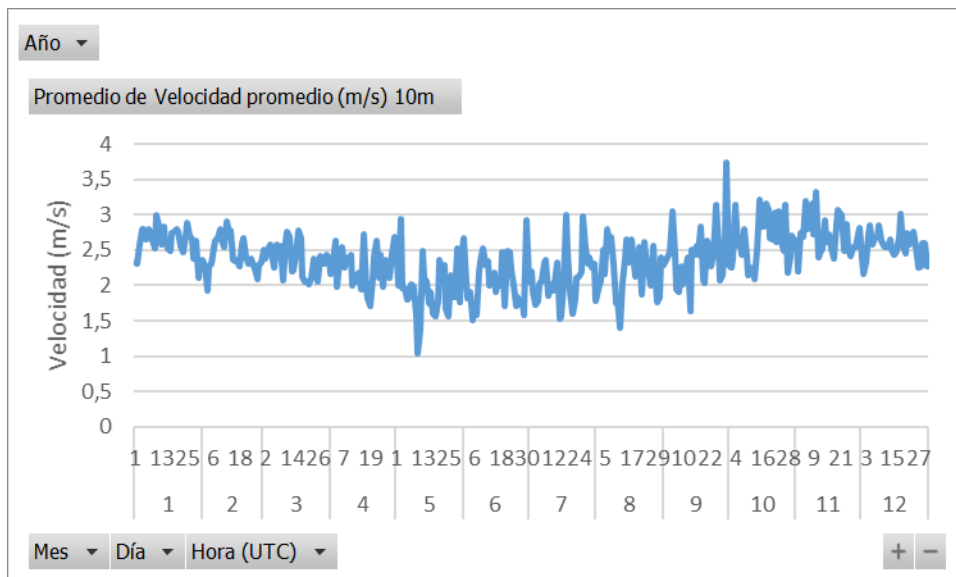
## COPIAPÓ

**Imagen A4.5**  
**Velocidad promedio de vientos (m/s) en Copiapó a las 14:00 horas en 2017**



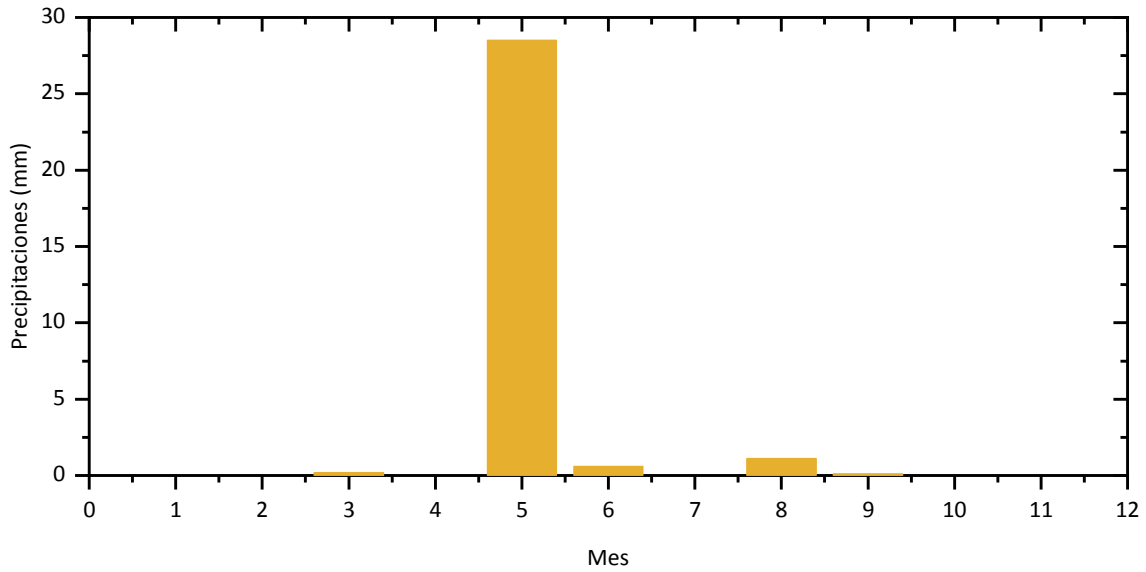
Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de estación meteorológica de la Dirección Meteorológica de Chile.

**Imagen A4.6**  
**Velocidad promedio de los vientos diarios en Copiapó para 2017**



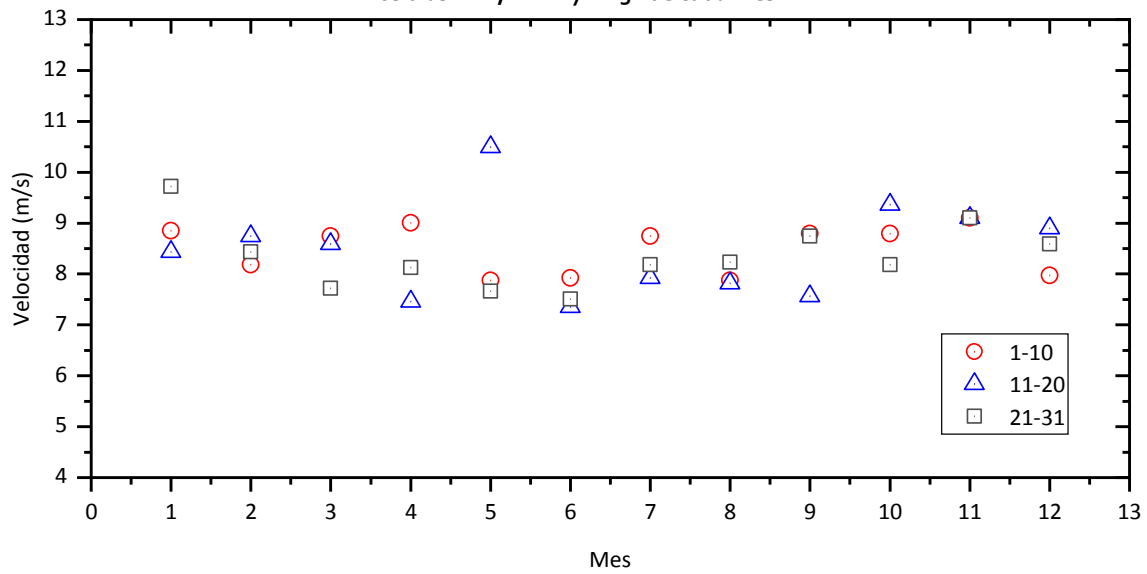
Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de estación meteorológica de la Dirección Meteorológica de Chile.

**Imagen A4.8**  
**Promedio precipitaciones mensuales ciudad de Copiapó año 2017**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de estación meteorológica de la Dirección Meteorológica de Chile.

**Imagen A4.9**  
**Ráfagas usadas para FE EPA (2006b) para N=36. Círculos, triángulos y rombos representan la ráfaga máxima entre los días 1-10, 11-20 y 21-31 de cada mes**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de estación meteorológica de la Dirección Meteorológica de Chile.



NACIONES UNIDAS

Serie

C E P A L

**Medio Ambiente y Desarrollo****Números publicados**

Un listado completo así como los archivos pdf están disponibles en  
[www.cepal.org/publicaciones](http://www.cepal.org/publicaciones)

170. Metodologías para el uso de factores de emisión: material particulado en depósitos de relaves abandonados, Matías Silva y Gonzalo Suazo (LC/TS.2020/92), 2020.
169. Iniciativas para transparentar los aspectos ambientales y sociales en las cadenas de abastecimiento de la minería: Tendencias internacionales y desafíos para los países andinos, Annie Dufey (LC/TS.2020/48), 2020.
168. Remediación y activación de pasivos ambientales mineros (PAM) en el Perú, María Chappuis (LC/TS.2019/126), 2019.
167. Compensaciones por pérdida de biodiversidad y su aplicación en la minería: los casos de la Argentina, Bolivia (Estado Plurinacional de), Chile, Colombia y el Perú, Victoria Alonso, Mariana Ayala y Paula Chamas (LC/TS.2019/125), 2019.
166. Derechos de acceso en asuntos ambientales en el Perú: hacia el desarrollo de una actividad minera respetuosa del entorno y las comunidades, Isabel Calle (LC/TS.2018/90), 2018.
165. Derechos de acceso en asuntos ambientales en el Ecuador: hacia el desarrollo de una actividad minera respetuosa del entorno y las comunidades, Daniel Barragán (LC/TS.2017/65), 2017.
164. Derechos de acceso en asuntos ambientales en Colombia: hacia el desarrollo de una actividad minera respetuosa del entorno y las comunidades, Lina Muñoz Ávila (LC/L.4280), 2016.
163. Estudio sobre lineamientos, incentivos y regulación para el manejo de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), incluyendo cierre de faenas mineras: Bolivia (Estado Plurinacional de), Chile, Colombia y el Perú, Ángela Oblasser (LC/L.4208), 2016.
162. Emisiones de gases de efecto invernadero y mitigación en el sector residuos. La economía del cambio climático en la Argentina. Ricardo Vicari, (LC/L.4090), 2015.
161. Impactos y vulnerabilidad al cambio climático de los principales ríos de Mendoza y San Juan a partir de la evolución de los glaciares cordilleranos. La economía del cambio climático en la Argentina. José Boninsegna y Armando Llop (LC/L.4089), 2015.

## MEDIOAMBIENTE Y DESARROLLO

### Números publicados:

170. Metodologías para el uso de factores de emisión  
Material particulado en depósitos de relaves abandonados  
*Matías Silva y Gonzalo Suazo*
169. Iniciativas para transparentar los aspectos ambientales y sociales en las cadenas de abastecimiento de la minería  
Tendencias internacionales y desafíos para los países andinos  
*Annie Dufey*
168. Remediación y activación de pasivos ambientales mineros (PAM) en el Perú  
*Maria Chappuis*
167. Compensaciones por pérdida de biodiversidad y su aplicación en la minería  
Los casos de la Argentina, Bolivia (Estado Plurinacional de), Chile, Colombia y el Perú  
*Victoria Alonso, Mariana Ayala y Paula Chamas*

