

Control del Polvo y Posibilidad de Erradicar la Silicosis en Minería Subterránea con Transporte Mecanizado

Efraín Bozo Godoy¹, Gonzalo Bozo Nallí²

1. Especialista en Control de Polvo, Proconm, Santiago, Chile. Efrain.Bozo@proconm.com
Ingeniero Civil Mecánico de la Universidad de Santiago de Chile.
2. Ingeniero en Control de Polvo, Proconm, Santiago, Chile, Gonzalo.bozo@proconm.com
Ingeniero Civil Mecánico de la Universidad Técnico Federico Santa María de Chile.

RESUMEN

Existe un compromiso mundial para disminuir silicosis y erradicarla definitivamente el año 2030. La realidad indica que nada se ha avanzado en nuestro continente y las muertes han aumentado y difícilmente se va a cumplir con el compromiso. Además, hay que tener presente que el número de trabajadores expuestos a ambientes propensos a la silicosis ha crecido globalmente. La minería subterránea es la que tiene un mayor número de trabajadores afectados por silicosis, enfermedad que se puede adquirir en meses si la concentración de sílice es muy alta, manifestándose varios años después.

Los mecanismos usados en la actualidad tienen baja eficiencia para controlar el polvo visible y esto no necesariamente implica una disminución de la fracción que afecta la salud, especialmente en el transporte mecanizado de mineral por túneles o en la minería subterránea.

El polvo visible que se va al ambiente representa una pérdida económica significativa. La minería subterránea emite menos polvo visible al ambiente, lo cual no contamina la agricultura ni afecta a glaciares ni poblaciones cercanas. Sin embargo, el polvo silicógeno no sedimenta y se queda en los túneles, afectando la salud de los trabajadores o es transportado por la ventilación al nivel de extracción y de allí al medio ambiente.

La estrategia aquí presentada difiere de lo que se hace habitualmente, enfocándose en el análisis físico y en la eficiencia esperada a nivel local y global de los diferentes sistemas para el control de polvo, destacando como relevante e imprescindible el control pasivo y/o activo del polvo. Esta estrategia propone una importante innovación para la eliminación definitiva del particulado que afecta la salud y para mantener en el sistema el particulado que requiere el proceso.

Palabras clave: silicosis, sílice, minería, PM10, manejo de material, control de polvo, granulación.

INTRODUCCIÓN

Para combatir la silicosis, la OIT y la OMS han lanzado el Programa Global de Eliminación de la Silicosis (GPES) con el objetivo de que se haga efectivo en el año 2030 [1]. Considerando las muertes por año por cada 100.000 habitantes [2] [3], se puede observar que a nivel mundial se está cumpliendo con este compromiso. Sin embargo, en América y en África nada se ha avanzado y en nuestro continente ha aumentado el número de fallecidos por esta enfermedad.

Muchas regiones con importante producción minera se encuentran actualmente en una situación de saturación técnica de material particulado inhalable (PM10). Los sistemas actuales implementados para el control de polvo en las diferentes compañías minera no logran alcanzar la eficiencia comprometida con las autoridades ambientales.

El PM10 contiene la fracción respirable PM5 que llega a los pulmones y puede provocar silicosis. Este tamaño de partícula no sedimenta (ver Figura 1), y es imposible de abatir o suprimir. Por consiguiente, la supresión con neblina seca es inocua para su control global (en la zona) y local (en el lugar).

En la minería, el polvo silicógeno es liberado en los diferentes procesos de conminución, como lo son la tronadura, el hundimiento, la trituración y la molienda. En cada uno de ellos, el PM5 se fuga al ambiente o se queda atrapado en el mineral o adherido a partículas de mayor tamaño, especialmente cuando existe cierta humedad que facilita esta cohesión. Este último fenómeno es muy importante para el control local y aguas abajo del polvo en sus diferentes tamaños.

Extraer y descargar el polvo sobre el transportador es un proceso que tiene bajo o ningún impacto positivo en el control de polvo. Puede resultar un proceso contaminador cuando la extracción suelta las partículas adheridas a otras de mayor tamaño o provocan cierto vacío al interior de la gualdera. Muy diferente es si transformamos este polvo en gránulos, proceso inverso a la conminución, y en esa condición lo devolvemos al transportador.

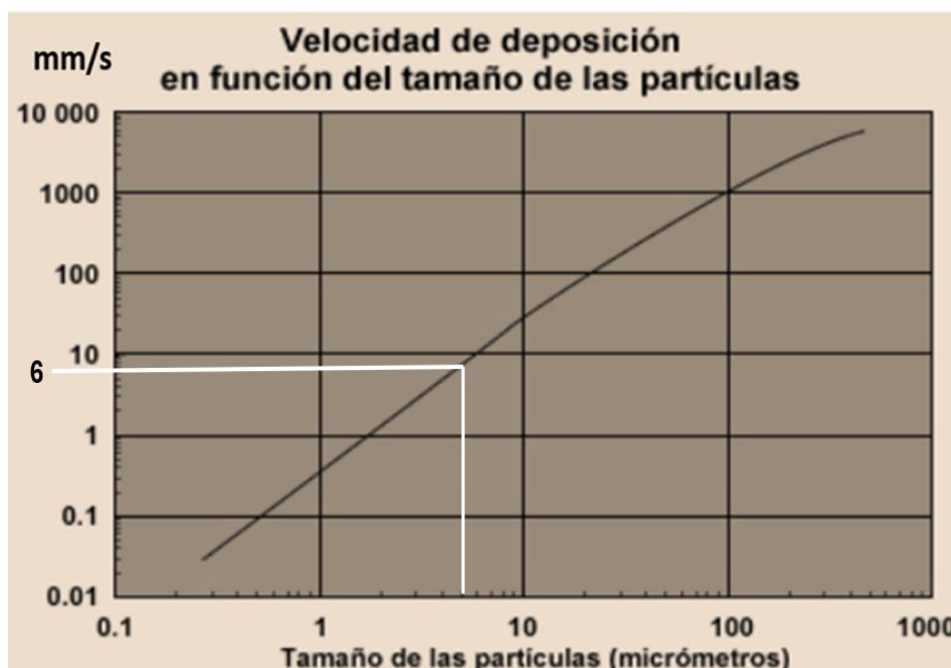


Figura 1: Partícula de 5 μm necesita una velocidad inferior a 6 mm/s (0,02 km/h) para caer [4]

FUENTES LIBERADORAS DE SÍLICE

Sílice. La sílice cristalina o dióxido de silicio, SiO_2 , es uno de los compuestos más comunes en la corteza terrestre cristalizado y en un tamaño sedimentable. Cuando este mineral es sometido a un proceso de conminución o pulido libera partículas muy pequeñas inferiores a 5 micrones que forman la fracción de sílice cristalina respirable (sílice).

Minería subterránea. En la Figura 2 se muestran algunos procesos liberadores de sílice en minería subterránea, como los son, la perforación, el hundimiento y el chancado primario. La ventilación de la mina permite enviar gran parte de la sílice al nivel de extracción y desde allí al ambiente afectando poblados aledaños. Pero, una parte no menor se concentra en puntos muertos de la minería subterránea o circula por túneles y piques, incluso es transportado en la ropa de los trabajadores hasta oficinas y comedores.

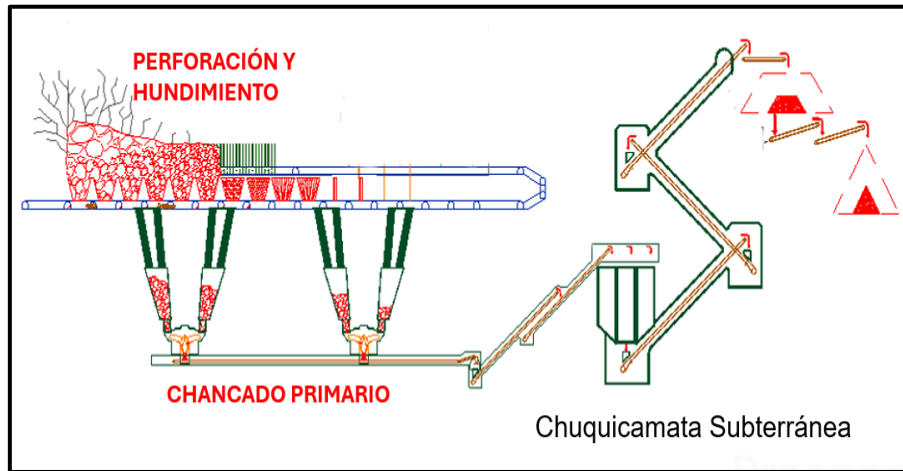


Figura 2: Fuentes liberadoras de sílice en minería subterránea

Minería rajo abierto. El proceso que libera más sílice al ambiente es la tronadura. Según el ISP de Chile, el operador de pala es el profesional más expuesto a contraer silicosis [5]. La sílice que no va al ambiente permanece atrapada en el mineral o adherida a colpas o partículas mayores. En la Figura 3 se muestran los procesos de conminución que liberan sílice en la minería a rajo abierto, la mayoría de ellos son comunes con la minería subterránea.



Figura 3: Fuentes liberadoras de sílice en minería a rajo abierto

SILICOSIS

Ambiente silicógeno es aquel que tiene el 1% o más de sílice. En este ambiente existe riesgo de que las personas expuestas adquieran las siguientes enfermedades [6] [7] [8]:

- Cáncer al pulmón
- Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC)
- Bronquitis y enfisema

- Tuberculosis o acentuar esta enfermedad
- Aumenta el riesgo de enfermedades renales y autoinmunes

La silicosis es una enfermedad fibrótica-pulmonar, una neumoconiosis, de carácter irreversible y progresiva, considerada enfermedad profesional incapacitante. Según el tiempo de exposición y la concentración de sílice, existen los siguientes tipos de silicosis [9]:

- Silicosis aguda. Ocurre cuando las concentraciones de exposición están en su nivel más alto y se puede adquirir en pocas semanas hasta 4 años
- Silicosis acelerada. Resulta de la exposición a altas concentraciones de sílice y se desarrolla de 5 a 10 años después de la exposición inicial.
- Silicosis crónica. Ocurre de ordinario después de 10 o más años de exposición a la sílice en concentraciones relativamente bajas

Cabe destacar que, a menor tamaño de partícula, mayor es el riesgo de adquirir silicosis. El PM10 no llega a los pulmones, el MP5 si lo hace y el PM2.5 llega a los alveolos, los conductos más pequeños de los pulmones, como se grafica en la Figura 4.

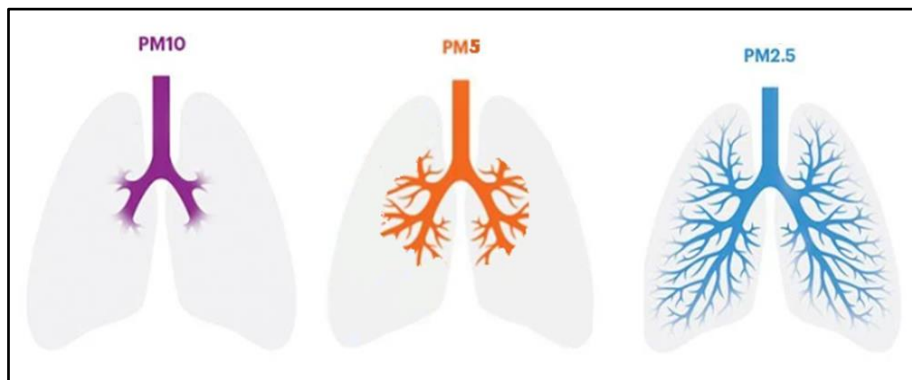


Figura 4: A menor tamaño de partícula mayor es el riesgo de silicosis

ESTADO DEL ARTE: SUPRESIÓN CON NEBLINA SECA

La supresión o abatimiento [11] es un proceso de granulación húmeda que consiste en una colisión de gotas con partículas de polvo de tamaño similar para aglomerarlas haciéndolas caer para adherirse al mineral. Está compuesto de las siguientes etapas:

1. Unión o colisión. Una gota de agua colisiona con una partícula de polvo de tamaño similar. Es un choque aleatorio tipo browniano de difícil ocurrencia.
2. Aglomeración. Decenas o centenas de estas uniones se deben aglomerar para ganar peso y caer según lo permita la velocidad de sedimentación del lugar.
3. Recepción. Al caer el aglomerado se tiene que encontrar con una superficie receptora para adherirse a las colpas superficiales.
4. Mantenimiento. La adherencia de un aglomerado a una colpa puede ser efímera si no logra mantenerse en el tiempo. Especialmente, cuando las 3 etapas anteriores deben ocurrir en 2 o 3 segundos.

La supresión más utilizada es la neblina seca que en base a la mezcla de agua aire permite arrojar partículas finas cuyo tamaño promedio es del orden de 9 a 10 micrones [10] [11].

En la Figura 5 se grafican estas 4 etapas, cada una con su eficiencia. La eficiencia total de la supresión es la multiplicación de estas 4 eficiencias. Esto es: $E_t = E_u \cdot E_a \cdot E_r \cdot E_m$. Estudios internos realizados para la gran minería concluyen que esta eficiencia total no alcanza el 10%.

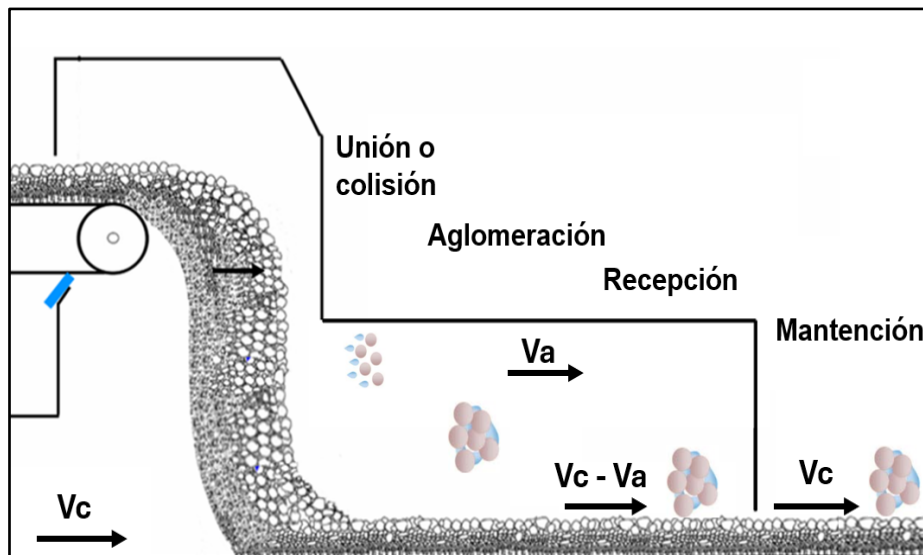


Figura 5: Etapas del abatimiento en una transferencia entre correas transportadoras

ESTADO DEL ARTE: EXTRACCIÓN CON ALTA VELOCIDAD

El sistema de captura y extracción de amplia aplicación en minería es el método de alta velocidad. Esto es, captación entre 200 y 300 fpm y un transporte con velocidad similar del orden de 4.000 fpm según se muestra en la Figura 6. Existen sistemas de extracción con velocidades de transporte mayores a 4.000 fpm, inclusive uno proyectado para la gran minería de 5.500 fpm.

Colapso por roturas. Velocidades de 4.000 fpm permite transportar partículas mayores a 2 mm altamente abrasivas. Esta realidad provoca rotura de codos, inclusive ductos, que hacen colapsar el sistema.

Colapso por obstrucción. El flujo al interior de una gualdera es muy turbulento y la baja velocidad considerada en la campana de extracción no define el tamaño máximo de transporte, sino que la velocidad del ducto solidario a la campana, diseñado para una velocidad de 4.000 fpm, que permite lleguen partículas no transportables o difícil de transportar en tramos horizontales que sedimentan y obstruyen el ducto.

Desprendimiento de partículas. Uno de los métodos más importantes para el control del polvo es favorecer la adhesión de los finos sobre las colpas o partículas de mayor tamaño. Una captación a gran velocidad y flujo provocan cierto vacío al interior de la gualdera y desprenden el fino adherido a las colpas perjudicando el control del polvo local y aguas abajo.

Descarga del polvo sobre el transportador. Si el polvo proveniente del filtro se descarga sobre la correa transportadora, gran parte de este polvo se vuelve a levantar, especialmente el polvo silicógeno. Por consiguiente, un sistema de extracción con este tipo de descarga del polvo es inocuo para el control real del polvo.

El diagrama de la Figura 6 muestra un circuito típico diseñado con sistema de captación y transporte a alta velocidad con descarga del polvo sobre la correa transportadora.

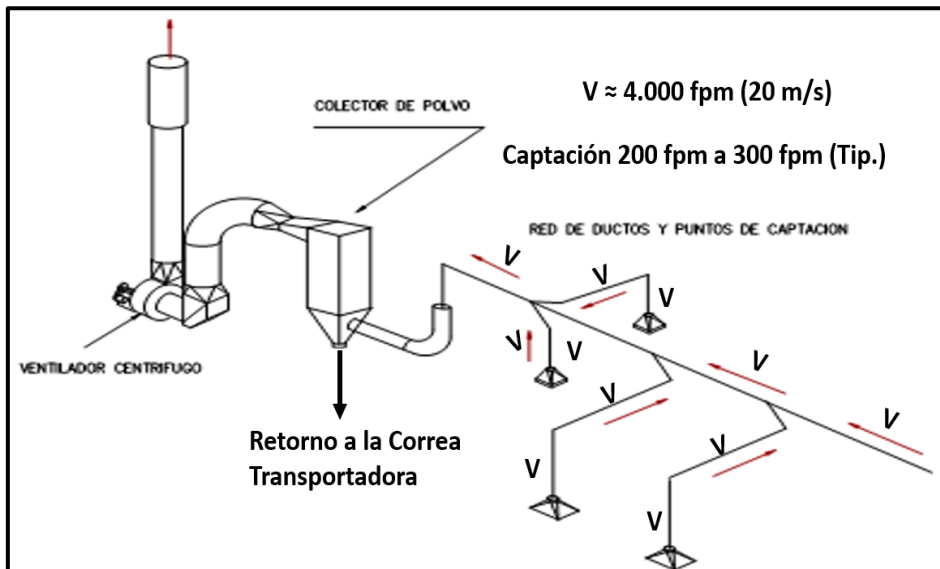


Figura 6: Método de extracción de alta velocidad

PROPUESTA PARA EL CONTROL DE POLVO CON AGUA

En una transferencia entre correas con un confinamiento eficiente, el flujo que se va por la gualdera es menor y, por tanto, ya se tiene un buen sistema de control pasivo del polvo que se puede complementar con boquillas de agua ubicadas según recomendación de la NIOSH [9], que cumplan las siguientes 3 funciones:

- Humectación superficial para aumentar la adhesión de los finos sobre las colpas.
- Cortina de agua para aumentar la recirculación del aire inducido.
- Abatimiento más eficiente en un ambiente de recirculación

En la Figura 7 se grafican estas tres importantes funciones con aplicación de agua que en combinación con el confinamiento logran un control eficiente del polvo

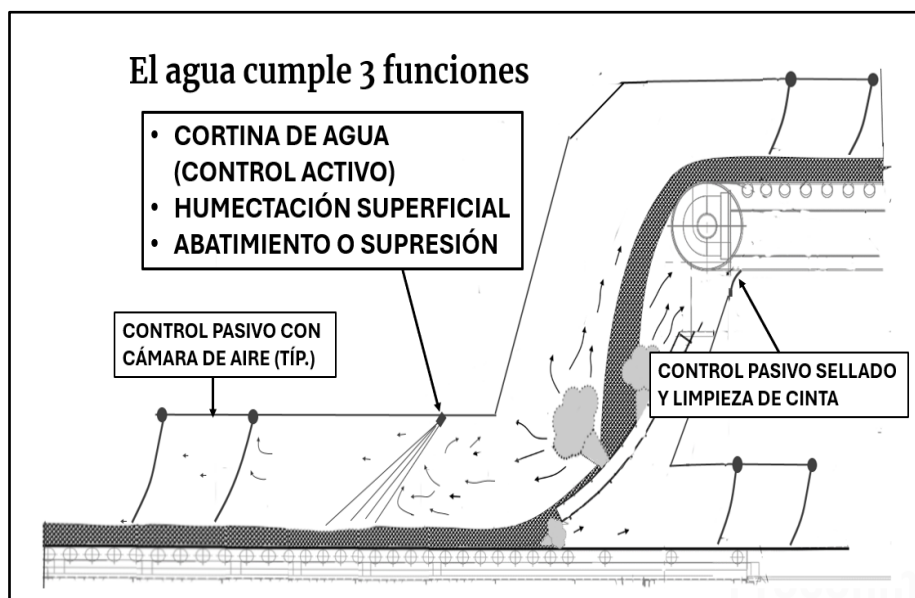


Figura 7: El agua cumpliendo 3 funciones

:

EXTRACCIÓN A BAJA VELOCIDAD MODIFICADA (MLV)

La norma NIOSH [9] define tres métodos para la captura y transporte del polvo. Estos son:

- Método de alta velocidad (uso habitual). Riesgo de colapso
- Método de baja velocidad (poco utilizado). No considera transporte horizontal
- Método de baja velocidad modificada, MLV (rara vez utilizado).

Este último método no tiene riesgo alguno de colapso y considera transporte en ductos horizontales con una velocidad mayor que los ductos de captación verticales. En la Figura 8 se muestra imagen de la NIOSH, con ejemplo de captación y transporte. La idea es transportar sólo polvo respirable, pero eso es imposible. Ya que con 5 m/s se puede captar y transportar partículas de hasta 300 micrones. Un problema típico para aplicar este método es que no se dispone de los 2 o 3 m para el ducto vertical. En este caso es necesario aplicar lo siguiente:

1. Disminuir la turbulencia al interior de la gualdera
2. Considerar un ducto de mayor diámetro o un cajón
3. En captaciones horizontales, considerar una trampa de polvo

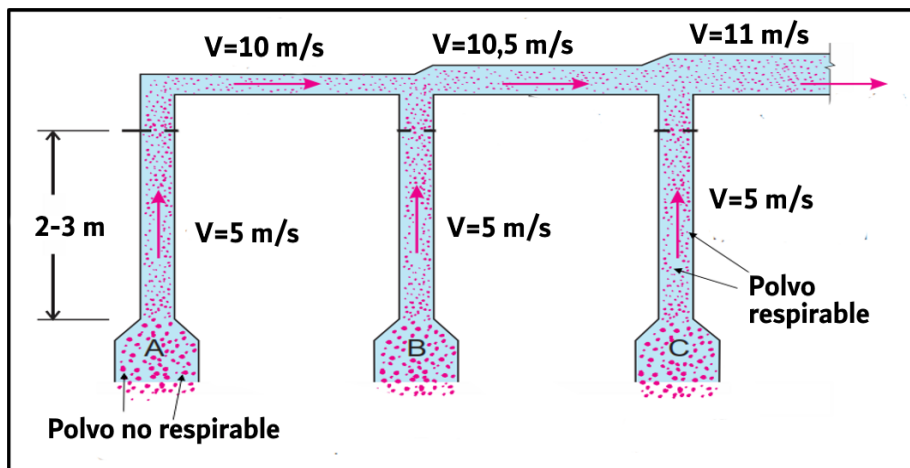


Figura 8: Esquema del método MLV de la NIOSH [9]

Ventajas. Se recomienda la aplicación de este método (MLV) ya que y tiene las siguientes ventajas:

- Capta menos polvo y partículas de menor tamaño
- No desprende finos desde las colpas que van en la superficie del mineral durante la captación
- Elimina riesgo de colapso por rotura de codos y/o ductos
- Elimina riesgo de colapso por sedimentación y acumulación de polvo en tramos horizontales
- Consume menos energía

INNOVACIÓN: GRANULACIÓN DEL POLVO

Estado del arte. El gran problema que tiene un sistema de extracción es ¿qué se hace con el polvo proveniente del filtro?. Existen 3 respuestas ya aplicadas:

- Retorna el polvo seco a la correa transportadora. En este caso, es mejor nada colocar ya que la contaminación no disminuirá. Por el contrario, puede aumentar.

- Retorno del polvo húmedo a la correa transportadora. Es importante para el polvo visible. Sin embargo, la superficie se va secando y desprendiendo partículas, especialmente las respirables.
- Transportar el polvo a un botadero. Esta solución es aplicable si el botadero no está en una zona saturada. Teniendo presente que, durante el manejo y transporte del polvo parte importante del PM10 se fugará al ambiente.

Innovación. La propuesta innovadora consiste en granular el polvo antes de retornarlo al sistema o a la correa transportadora [12] según se muestra en el diagrama de la Figura 9.

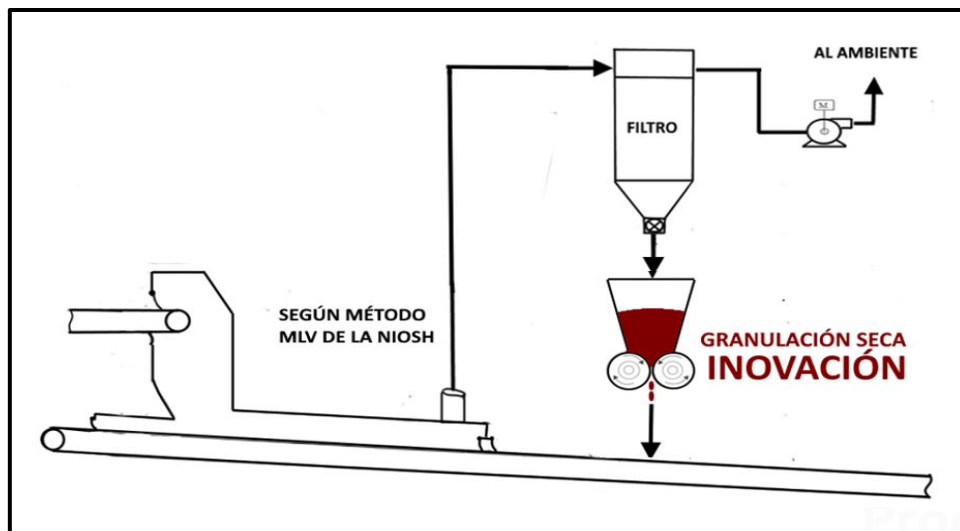


Figura 9: Esquema granulación seca del polvo

Otros rubros. La granulación seca es un proceso normal en otros rubros según se muestra en la Figura 10. Estos son:

- 1-Fertilizantes
- 2-Alimentos
- 3-Farmacos
- 4-Polvo EAF (industria del acero)
- 5-Escoria granulada
- 6-Briquetas de carbón



Figura 10: Granulación seca en otro rubros

Avance. El profesor Francisco Cabrejos de Jenike and Johanson (J&J) ha realizado pruebas de laboratorio [13] con buen resultado como se muestra en la Figura 9.



Figura 9: Granulación con polvo minero real por J&J [12]

Se recomienda que este proceso innovador se aplique tempranamente, de preferencia en el chancado primario, ya que favorece el proceso y el control de polvo aguas abajo.

VENTAJAS DE LA GRANULACIÓN O INNOVACIÓN

La granulación del polvo tiene ventajas, a la fecha se han analizado las siguientes:

1. Evita la volatilidad del polvo aumentando la eficiencia en su control.
2. Elimina definitivamente parte del PM10, PM5 y de la sílice.
3. Mejora la fluidez en tolvas y acopios.
4. Disminuye la segregación en tolvas y acopios
5. Aumenta la recuperación en la flotación al eliminar los ultrafinos (\approx PM15)
6. Mejora la percolación en la lixiviación.
7. Disminuye la contaminación aguas abajo, al disminuir el polvo y aumentar los gránulos.

REFERENCIAS

[1] Organización Internacional del Trabajo y Organización Mundial de la Salud. 2024. ILO/WHO Global Programme for the Elimination of Silicosis (GPES). Disponible en:

<https://climahealth.info/expert-groups/ilo-who-global-programme-for-the-elimination-of-silicosis-gpes/>

[2] Wang, L., Li, J., Zhang, H., Liu, Y., Wang, S., Liu, X. y Xu, X. 2023. Association between exposure to silica dust and risk of COPD: a systematic review and meta-analysis. BMC Public Health [en línea], 23(16295). Disponible en:

<https://bmcpublihealth.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12889-023-16295-2>.

[3] Bozo Godoy, Efrain. "PLANESI ¿Meta Real o Utopía?". Proconm, 2024. Exposición realizada en Viña de Mar, en el III Congreso de Feria de Correas Transportadoras, año 2021, organizado por Mentoris. [PLANESI ¿Meta Real o Utopía?](#)

[4] EUMETSAT. 2003. Imagen de polvo atmosférico. Disponible creando cuenta en:

https://www.meted.ucar.edu/EUMETSAT/at_dust_es/media_gallery.php

[5] Instituto de Salud Pública de Chile. Marzo 2008. "Situación de Exposición Laboral a Sílice en Chile". Disponible en: https://www.ispch.cl/sites/default/files/Silice_en_chile.pdf

[6] CDC - "Health Effects of Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica." Disponible en: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2002-129/pdfs/2002-129.pdf>

[7] American Lung Association - "Learn About Silicosis." Disponible en:

<https://www.lung.org/lung-health-diseases/lung-disease-lookup/silicosis/learn-about-silicosis>

[8] CDC - "Major Occupational Lung Diseases, Silicosis." Disponible en:

[Silica and Worker Health | Silica | CDC](#)

[9] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). 2019. "Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing". Disponible en: [Dust Control Handbook NIOSH](#)

[10] Industry System. 2023. Catálogo Supresión de Polvo. Disponible en:

<https://www.industrysystem.cl/new/wp-content/uploads/2023/03/CatalogoSupresionDePolvo.pdf>

[11] Spraying System Co. "Air Atomizing & Automatic Spray Nozzles". Disponible en:

[cat76b-aa-auto_us.pdf \(spray.com\)](#)

[12] Bozo Godoy, Efrain y Bozo Nalli, Gonzalo. "Granulación del MP10 = Calidad de Vida". Proconm, 2024. Exposición realizada en Viña de Mar, en el V Congreso de Feria de Correas Transportadoras, año 2023, organizado por Mentoris. Disponible en: [Granulación de MP10 = Calidad de Vida](#)

[13] Cabrejos, Francisco. 2023. "Alternativas para Controlar y Mitigar la Generación de Polvo en Chutes de Traspaso y Stock Piles". En: II Congreso Internacional de Chancado y Correas, Transbelt 2023, Viña del Mar, Chile, 8-9 de junio de 2023. Disponible en: [Alternativas para Mitigación de Polvo](#)