



Polvo Respirable en Ambientes Ocupacionales: Efectos en la Salud, Métodos de Monitoreo y Estrategias de Control

Ronald Fernando Nina Muñoz

Ingeniero de Higiene y Seguridad Industrial

CIP 121088

José Luis Mendoza Sarria

Asistente de Investigación

HSE RENT S.A.C.

Lima, Perú

Área temática: Seguridad y Salud en el Trabajo

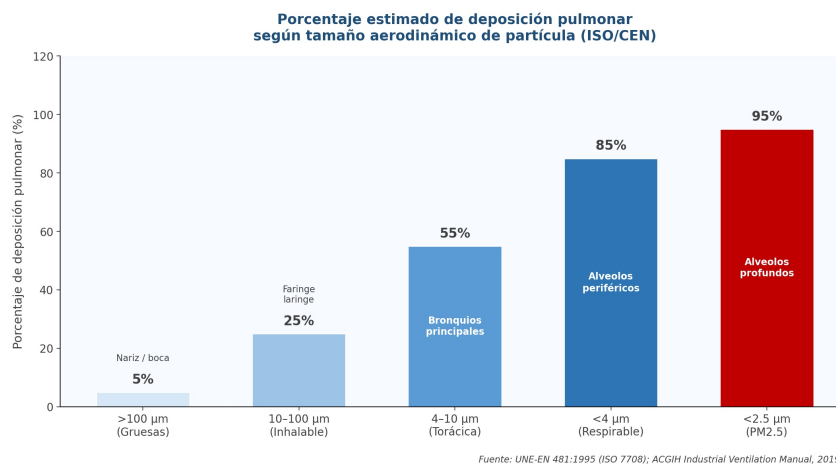
Palabras clave: polvo respirable, neumoconiosis, silicosis, monitoreo ambiental,
higiene industrial

Fecha: Marzo de 2026

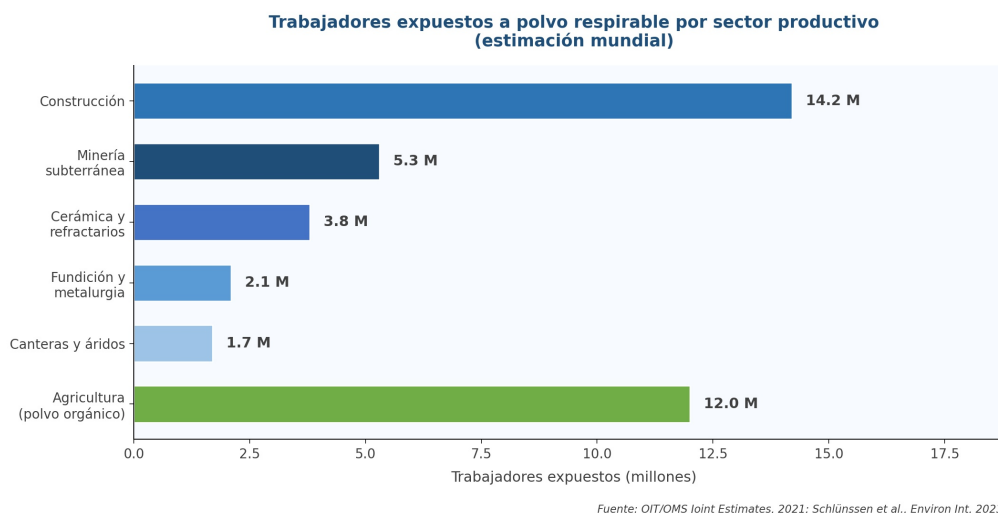
1. Introducción

El polvo respirable corresponde a la fracción del material particulado presente en el aire que, debido a su reducido tamaño, tiene la capacidad de penetrar profundamente en el sistema respiratorio humano. En términos clásicos, se define como la fracción de partículas sólidas presentes en un aerosol industrial que puede alcanzar los alvéolos pulmonares, generando potencialmente enfermedades respiratorias ocupacionales como la neumoconiosis. De acuerdo con la norma **ISO 7708:1995** y los criterios establecidos por organismos internacionales como la **ACGIH** y la **EN 481**, el polvo respirable se caracteriza por presentar una mediana de corte aerodinámica cercana a 4–5 μm , lo que significa que aproximadamente el 50 % de las partículas con ese tamaño puede penetrar hasta las regiones profundas de los pulmones. En el ámbito de la calidad del aire ambiental, el material particulado se clasifica generalmente según su diámetro aerodinámico:

- **PM10 (partículas menores de 10 μm):** incluyen polvo, polen, esporas y otros materiales suspendidos en el aire. Estas partículas pueden ingresar al sistema respiratorio superior y a los bronquios.
- **PM2.5 (partículas menores de 2.5 μm):** suelen originarse principalmente en procesos de combustión, como la quema de carbón o diésel, e incluyen metales pesados y compuestos orgánicos complejos. Debido a su menor tamaño, pueden penetrar más profundamente en los pulmones.
- **Partículas ultrafinas (<1 μm):** provienen mayoritariamente de procesos de combustión y poseen una elevada capacidad de penetración, pudiendo atravesar la barrera alveolar y alcanzar el torrente sanguíneo, lo que incrementa sus riesgos para la salud.



En el Perú, el Centro Nacional de Salud Ocupacional y Protección del Ambiente para la Salud (CENSOPAS) es el órgano rector del diagnóstico y la vigilancia de las enfermedades ocupacionales. El país cuenta con más de 197 000 trabajadores directos en minería —actividad que representa el mayor riesgo para contraer silicosis—, y se estima que el tiempo promedio entre la exposición y el diagnóstico es de 22 años, lo que dificulta significativamente la vigilancia epidemiológica. Estudios del CENSOPAS han encontrado que el 37,8 % de los mineros evaluados con sospecha de silicosis resultaron positivos.



2. Composición y fuentes de polvo respirable en ambientes ocupacionales

En los ambientes ocupacionales, el polvo respirable constituye un contaminante frecuente en diversos sectores productivos, especialmente en actividades relacionadas con la minería, la construcción, la industria manufacturera y el procesamiento de materiales. Este tipo de material particulado está compuesto por una mezcla compleja de sustancias minerales y orgánicas que, debido a su tamaño reducido, pueden penetrar profundamente en el sistema respiratorio de los trabajadores.

Desde el punto de vista químico y mineralógico, el polvo respirable presente en entornos laborales puede contener diferentes componentes, entre los que destacan:

- Sílice cristalina (cuarzo, cristobalita o tridimita), proveniente de rocas, arena, cemento y otros materiales de construcción. Este componente es particularmente común en canteras, minería subterránea, perforación de rocas y actividades de demolición.
- Metales pesados, como plomo (Pb) y cadmio (Cd), asociados a procesos metalúrgicos, fundiciones, soldadura y reciclaje de metales.
- Compuestos orgánicos, incluyendo hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), generados principalmente en procesos de combustión industrial o en la manipulación de materiales carbonosos.

- Carbono elemental o negro de carbón, presente en ambientes donde se manipula carbón mineral, combustibles fósiles o materiales derivados del petróleo.

2.1. Principales fuentes ocupacionales de polvo respirable

Las fuentes de generación de polvo respirable en el ámbito laboral están relacionadas principalmente con actividades mecánicas y procesos industriales que implican fragmentación, trituración o combustión de materiales. Entre las más relevantes se encuentran:

- Minería y explotación de canteras: procesos de perforación, voladura, trituración y transporte de minerales que liberan partículas ricas en sílice.
- Industria de la construcción: actividades de corte, lijado, demolición y manejo de cemento o concreto.
- Procesamiento de carbón y coque: generación de polvo de carbón y partículas ricas en carbono elemental.
- Fundiciones y metalurgia: emisión de partículas metálicas y compuestos asociados a altas temperaturas.
- Industrias manufactureras: manipulación de materias primas pulverizadas o materiales particulados.
- Carpintería y procesamiento de madera: generación de polvo fino durante el corte, lijado y fresado de madera, el cual puede contener compuestos orgánicos irritantes y carcinogénicos en ciertas especies de madera dura.
- Industria alimentaria: procesos como molienda de granos, manipulación de harinas o producción de alimentos en polvo generan aerosoles orgánicos respirables.
- Industria farmacéutica: manipulación de principios activos en forma de polvo durante la producción de medicamentos.

La composición del polvo respirable ocupacional varía según el tipo de actividad desarrollada. Por ejemplo, en canteras y minas, el polvo suele presentar una alta proporción de sílice cristalina, la cual puede superar el 50 % de la composición mineral en ciertas rocas, según análisis mineralógicos realizados mediante difracción de rayos X. En contraste, en industrias relacionadas con combustibles fósiles o procesamiento de carbón, predomina el carbono elemental, acompañado frecuentemente de hidrocarburos aromáticos policíclicos, compuestos que poseen potencial carcinogénico.

3. Mecanismos de exposición y toxicidad del polvo respirable en ambientes ocupacionales

En los ambientes ocupacionales, la principal vía de exposición al polvo respirable es la inhalación de partículas suspendidas en el aire generadas durante procesos industriales como perforación, trituración, corte, molienda o manipulación de materiales pulverulentos en entornos ocupacionales cerrados con ventilación limitada. Una vez inhaladas, estas partículas se distribuyen en el sistema respiratorio de acuerdo con su diámetro aerodinámico, lo que determina su capacidad de penetración y los efectos tóxicos asociados.

Las partículas con diámetro inferior a 2.5 μm (PM2.5) poseen una elevada capacidad de penetración y pueden alcanzar las regiones alveolares del pulmón. En esta zona ocurre el intercambio gaseoso, lo que facilita que algunas partículas ultrafinas atraviesen la barrera alveolo-capilar y entren al torrente sanguíneo, generando efectos tanto locales como sistémicos. En entornos laborales donde la exposición es frecuente y prolongada, esta acumulación de partículas puede desencadenar procesos inflamatorios persistentes y daño tisular progresivo.

3.1. Efectos agudos de la exposición ocupacional

La exposición a concentraciones elevadas de polvo respirable durante jornadas laborales puede producir efectos respiratorios agudos, entre los que se incluyen:

- Irritación de las vías respiratorias superiores e inferiores.
- Bronquitis aguda asociada a procesos inflamatorios inmediatos.
- Exacerbación de enfermedades respiratorias preexistentes, como el asma.
- Aumento de la susceptibilidad a infecciones respiratorias, debido a la alteración de los mecanismos de defensa pulmonar.

Estos efectos suelen manifestarse rápidamente tras exposiciones intensas en ambientes con ventilación insuficiente o sin medidas adecuadas de control del polvo.

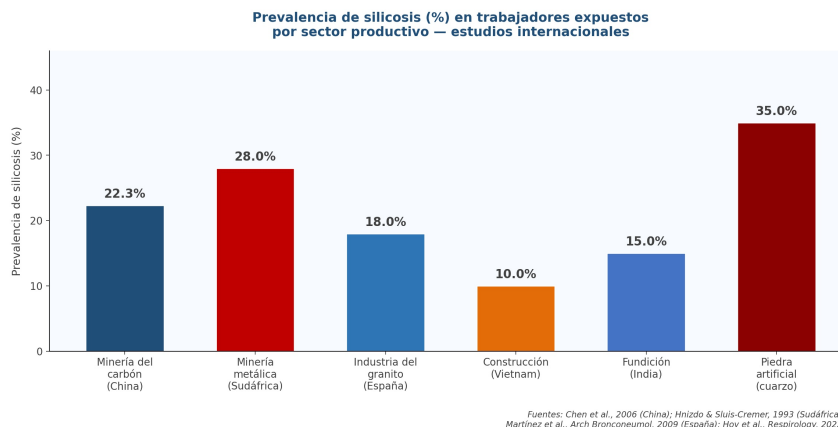
4. Efectos en la Salud y Enfermedades Asociadas

4.1. Neumoconiosis

Las neumoconiosis son enfermedades pulmonares crónicas e irreversibles producidas por la acumulación de polvo mineral en el parénquima pulmonar.

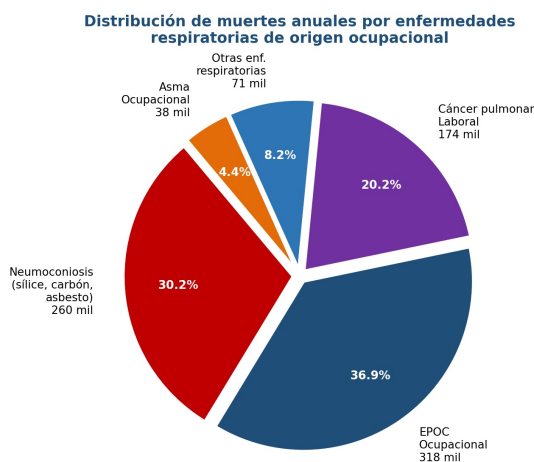
Forma	Latencia	Concentración	Progresión	Complicación
Silicosis crónica	>20 años	Baja–moderada	Lenta; asintomática	FMP, EPOC
Silicosis acelerada	5–15 años	Moderada–alta	Progresiva; FMP	Tuberculosis, cáncer
Silicosis aguda	Meses–5 años	Muy alta	Rápida; mortal	Insuf. respiratoria

Tabla 1: Características clínicas de las formas de silicosis.



4.2. Enfermedades obstructivas y neoplásicas

- **Asma ocupacional:** Enfermedad respiratoria profesional más frecuente en países industrializados. La limitación al flujo aéreo es reversible.
- **Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC):** Representa el 15–20 % de los casos de EPOC en la población trabajadora. La limitación al flujo aéreo es irreversible y progresiva.
- **Rinitis ocupacional:** Inflamación de la mucosa nasal causada por la inhalación de polvos orgánicos, como el polvo de harina, que produce congestión nasal, estornudos e irritación.
- **Bronquitis crónica:** Inflamación persistente de los bronquios asociada a la exposición prolongada a partículas como el polvo de madera, que provoca tos crónica y producción de moco.
- **Cáncer al pulmón:** La sílice cristalina (Grupo 1 IARC), el amianto (Grupo 1) y el cromo hexavalente son carcinógenos pulmonares reconocidos.
- **Mesotelina pleural:** Vinculado exclusivamente al amianto. Período de latencia de hasta 40 años.



Total estimado: ≈861 000 muertes/año | Fuente: OMS/OIT Joint Estimates, 2021; GBD 2021 Study.

5. Metodos de muestro y analisis

5.1. Muestreo de polvo respirable

En ambientes ocupacionales, el muestreo del polvo respirable se realiza generalmente mediante bombas personales de muestreo conectadas a un ciclón separador, el cual permite seleccionar únicamente las partículas con diámetro aerodinámico inferior a 4 µm, consideradas fracción respirable según la norma ISO 7708.

El aire se aspira a través de un filtro de membrana (generalmente de PVC o fibra de cuarzo), donde se depositan las partículas suspendidas. Posteriormente, el filtro se pesa antes y después del muestreo mediante balanzas analíticas de alta precisión para determinar la masa de polvo recolectada.

La concentración de polvo respirable (C) se calcula mediante el método gravimétrico utilizando la siguiente expresión:

$$C = \frac{m_f - m_i}{V} \quad (1)$$

donde:

- C = concentración de polvo respirable (mg/m³)
- m_f = masa final del filtro después del muestreo (mg)
- m_i = masa inicial del filtro después del muestreo (mg)
- V = volumen total de aire muestreado (m³)

El volumen de aire muestreado se determina a partir del caudal de la bomba de muestreo y el tiempo de exposición:

$$V = Q \times t \quad (2)$$

donde:

- V = volumen de aire (m³)
- Q = caudal de muestreo (m³/min)
- t = tiempo total de muestreo (min)

5.2. Exposición Ponderada en el Tiempo (EPT / TWA)

Para la comparación con los Valores Límite de Exposición (VLE-TWA), se calcula la Exposición Ponderada en el Tiempo para una jornada de 8 horas:

$$\text{TWA}_{8h} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i}{480 \text{ min}} \quad (3)$$

donde C_i es la concentración (mg/m³) durante el período t_i (min), y el denominador es la jornada estándar de 8 h = 480 min.

5.3. Índice de Exposición (IE) o Dosis Relativa

El índice que compara la exposición medida con el límite permisible es:

$$IE = \frac{TWA_{8h}}{VLE-TWA} \quad (4)$$

- $IE < 0,10$: exposición muy baja (acción preventiva básica)
- $0,10 \leq IE < 0,50$: exposición baja (vigilancia periódica)
- $0,50 \leq IE < 1,00$: exposición moderada (acción correctora recomendada)
- $IE \geq 1,00$: **excede el VLE** → **acción correctora inmediata obligatoria**

5.4. Mezclas de polvo con varios agentes (criterio aditivo)

Cuando el trabajador está expuesto simultáneamente a varias fracciones de polvo con distintos VLE, se aplica el criterio de aditividad de efectos:

$$IE_{mezcla} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{VLE_i} \quad (5)$$

Si $IE_{mezcla} \geq 1,00$, se considera que se supera el límite de exposición.

5.5. Corrección de VLE por jornadas extendidas (modelo de Brief & Scala)

En minería peruana, las jornadas suelen ser de 10–12 h durante guardias. El modelo de Brief & Scala ajusta el VLE para jornadas $h > 8$ h:

$$VLE_{adj} = VLE_{8h} \cdot \frac{8}{h} \cdot \frac{24 - h}{16} \quad (6)$$

Por ejemplo, para una jornada de 12 h:

$$VLE_{adj,12h} = VLE_{8h} \cdot \frac{8}{12} \cdot \frac{24 - 12}{16} = VLE_{8h} \cdot 0,500 \quad (7)$$

Es decir, el VLE para sílice cristalina en jornada de 12 h queda reducido a $0,05 \times 0,5 = 0,025$ mg/m³ (NIOSH).

Método	Agente	Técnica	Referencia normativa
NIOSH 0600	Polvo respirable total	Gravimetría	NIOSH NMAM, 4 ^a ed.
NIOSH 7500	Sílice cristalina (cuarzo, cristobalita)	XRD (difracc. RX)	ISO 11932; CEN/TR 15230
NIOSH 7602	Sílice resp. cristalina	Espectrofotometría IR	HSE MDHS 101
NIOSH 7300	Metales (Pb, Cd, As)	EAA / ICP-OES	OSHA ID-121
ISO 8518	Plomo en aerosoles	Espectrometría absorción at.	UNE-EN ISO 8518:2004

Tabla 2: Métodos analíticos para evaluación de polvo respirable. Fuente: NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), 4^a ed.

6. Normativa Internacional y Marco Legal Peruano

6.1. Marco normativo internacional

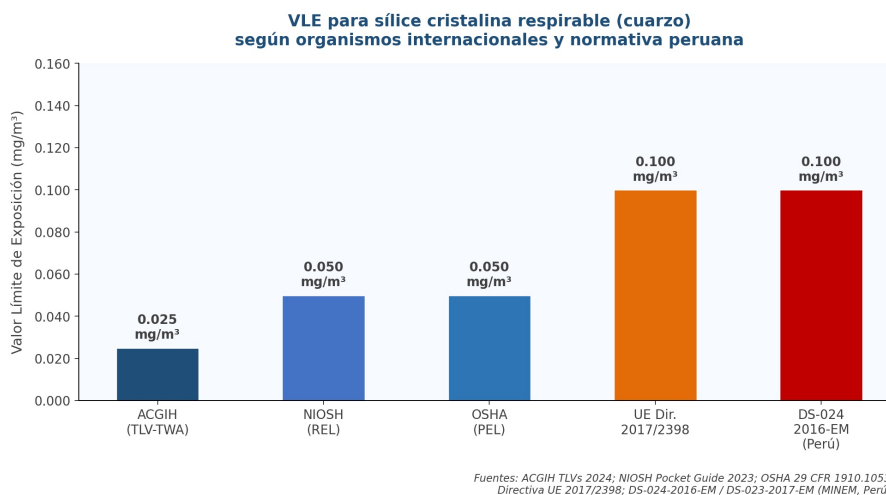
Agente	ACGIH TLV	NIOSH REL	OSHA PEL	UE VLA-ED	IARC
Sílice crist. (cuarzo)	0,025	0,050	0,050	0,100	Gr. 1
Polvo resp. total (inerte)	3,0	—	5,0	—	Gr. 3
Polvo inhalable (inerte)	10,0	—	15,0	—	—
Polvo de carbón (resp.)	0,9	0,9	—	—	Gr. 2A
Amianto (f/cm ³)	0,1	0,1	0,1	1,0	Gr. 1
Madera dura (resp.)	1,0	—	—	2,0	Gr. 1
Plomo metálico (resp.)	0,05	0,05	0,05	0,15	Gr. 2A

Tabla 3: Valores límite de exposición profesional para principales agentes pulvígenos. Fuentes: ACGIH 2024; NIOSH 2023; OSHA 29 CFR 1910.1053; Directiva UE 2017/2398; IARC Monographs Vol. 100C.

6.2. Marco legal peruano

El Perú dispone de un cuerpo normativo específico en materia de seguridad y salud ocupacional, articulado en torno a las siguientes disposiciones:

- **Ley N° 29783** (2011) — Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo y su reglamento DS-005-2012-TR: establece el derecho irrenunciable de los trabajadores a condiciones que no pongan en riesgo su vida y salud.



- **DS N° 024-2016-EM** — Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería: principal norma sectorial, que regula las CMP para polvo respirable y sílice cristalina en operaciones mineras.
- **DS N° 023-2017-EM** — Modificatoria del DS-024-2016-EM: actualiza los límites, refuerza el monitoreo de ventilación en labores subterráneas y fortalece el rol de OSINERGMIN en la fiscalización.
- **DS N° 015-2005-SA** — Reglamento sobre Valores Límite Permisibles para Agentes Químicos (DIGESA/MINSA): aplicable a sectores no mineros.
- **Resolución Ministerial N° 312-2011/MINSA.** — Protocolo de Exámenes Médico-Ocupacionales, que incluye espirometría y radiografía torácica según clasificación OIT.
- **Plan Nacional de Erradicación de la Silicosis al 2030** (MINSA/DIGESA, 2011): compromisos del Perú en el marco del PGES-OIT/OMS.

7. Medidas de Prevención y Control

- **Eliminación/sustitución:** Reemplazo de materiales silicógenos por abrasivos alternativos (granate, bicarbonato sódico). Rediseño de procesos.
- **Controles de ingeniería:** Ventilación por extracción localizada (LEV), encapsulamiento de procesos, supresión con agua/soluciones humectantes, herramientas con captación integrada.
- **Controles administrativos:** Rotación de puestos, limitación de la duración de la exposición, vigilancia de la salud periódica (espirometría, radiografía OIT), formación continua.

8. Conclusión

La exposición ocupacional al polvo respirable constituye un riesgo transversal a múltiples sectores productivos —minería, construcción, manufactura, agricultura y metalurgia—, con una carga global estimada en aproximadamente 861 000 muertes anuales por

enfermedades respiratorias de origen laboral. Las patologías asociadas, desde neumociosis y EPOC ocupacional hasta cáncer pulmonar y mesotelioma pleural, comparten una característica crítica: son irreversibles una vez instauradas, pero completamente prevenibles si se actúa sobre la exposición a tiempo. La peligrosidad del material particulado no depende únicamente de su composición química —sílice cristalina, metales pesados, carbono elemental o compuestos orgánicos— sino fundamentalmente de su tamaño aerodinámico. Las partículas PM_{2.5}, con una eficiencia de deposición alveolar del 95 %, pueden atravesar la barrera alvéolo-capilar y generar efectos sistémicos que van más allá del daño pulmonar, incluyendo respuestas inflamatorias crónicas y alteraciones cardiovasculares. Esto obliga a que cualquier estrategia de control no se limite a un solo agente, sino que adopte un enfoque integral sobre la fracción respirable en su conjunto. En el plano normativo, persisten brechas importantes entre los estándares internacionales y la regulación nacional vigente, aplicables a todos los agentes pulvúgenos. La implementación práctica del control del polvo sigue sobredependiendo del equipo de protección personal como medida de primer recurso, cuando debería ser la última línea de defensa dentro de la jerarquía de controles. Resulta prioritario invertir en controles de ingeniería —ventilación por extracción localizada, supresión húmeda, encapsulamiento de procesos—, fortalecer la vigilancia médica periódica en todos los sectores expuestos, y actualizar los valores límite nacionales hacia criterios más conservadores y coherentes con la evidencia científica actual. La prevención eficaz del daño por polvo respirable exige, en definitiva, una cultura de higiene industrial proactiva que anteceda al daño en lugar de constatarlo tardíamente.

Referencias

- [1] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). *Method 0600: Particulates Not Otherwise Regulated, Respirable. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM)*, 4th ed. Cincinnati: NIOSH; 2003.
- [2] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). *Method 7500: Silica, crystalline, by XRD. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM)*, 4th ed. Cincinnati: NIOSH; 1994.
- [3] Organización Mundial de la Salud (OMS) / Organización Internacional del Trabajo (OIT). *Estimaciones conjuntas de la carga de enfermedades y lesiones relacionada con el trabajo, 2000–2016*. Ginebra: OMS; 2021.
- [4] Occupational Safety and Health Administration (OSHA). *29 CFR 1910.1053: Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica*. Washington D.C.: U.S. Department of Labor; 2016.
- [5] Cáceres-Mejía B, Mayta-Tristán P, Pereyra-Elías R, Collantes H, Cáceres-Leturia W. Desarrollo de neumoconiosis y trabajo bajo la modalidad de tercerización en trabajadores peruanos del sector minero. *Rev Peru Med Exp Salud Publica*. 2015;32(4):673–9. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2015.324.1769>
- [6] Cáceres-Mejía B, Rojas-Cajahuanca J, Longa-Vera M. Enfermedades ocupacionales en minería en el Perú, 2011–2020. *Rev Asoc Esp Med Trab*. 2022;31(3):275–84.
- [7] Cohen RA, Go LHT, Rose CS. Global Trends in Occupational Lung Disease. *Semin Respir Crit Care Med*. 2023;44(3):317–26.
- [8] Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), Ministerio de Salud del Perú. *DS N° 015-2005-SA: Reglamento sobre Valores Límite Permisibles para Agentes Químicos en el Ambiente de Trabajo*. Lima: MINSA; 2005.
- [9] Parlamento Europeo y del Consejo. *Directiva (UE) 2017/2398, de 12 de diciembre de 2017, relativa a la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes carcinógenos o mutágenos*. DOUE L 345/87; 2017.