



EFECTOS DE LA EXPOSICIÓN AL
SÍLICE CRISTALINA EN LA SALUD DE
LOS TRABAJADORES DE LA
CONSTRUCCIÓN Y ESTRATEGIAS DE
PREVENCIÓN

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA
OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN
MEDICINA OCUPACIONAL Y DEL MEDIO
AMBIENTE

STEFANNI MILAGROS VIVANCO QUISPE

LIMA- PERÚ

2025

ASESORA

Mg. Angie Kimberly Borjas Felix

CO ASESORA

Med. Esp. Maria del Carmen Gastañaga Ruiz

JURADO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

MG. HENRY ALEXANDER CUEVA VASQUEZ

PRESIDENTE

MG. BRUNELLA YSABEL LIZARDO OTERO

VOCAL

SECRETARIO

MG. MIRKO ROGERS PEZOA VILLANUEVA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis queridos padres, por su amor,
guía y apoyo incondicional, que siempre me
impulsan a seguir avanzando.

AGRADECIMIENTOS

A mis maestros por su dedicación,
orientación y constante apoyo, que han contribuido a mi
formación y crecimiento académico.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Trabajo de investigación Autofinanciado



DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Los egresados:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES
1.	VIVANCO-QUISPE STEFANNI MILAGROS

Pertenecientes al programa de la **MAESTRÍA EN MEDICINA OCUPACIONAL Y DEL MEDIO AMBIENTE**, autores del trabajo titulado: **EFFECTOS DE LA EXPOSICIÓN AL SÍLICE CRISTALINA EN LA SALUD DE LOS TRABAJADORES DE LA CONSTRUCCIÓN Y ESTRATEGIAS DE PREVENCIÓN**, el cual ha sido elaborado, sustentado y aprobado, según corresponda, para optar por el grado de **MAESTRO EN MEDICINA OCUPACIONAL Y DEL MEDIO AMBIENTE** bajo la modalidad de **TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**.

En calidad de docentes asesores de la Universidad Peruana Cayetano Heredia:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES DEL DOCENTE	FACULTAD	NIVEL DE ASESORÍA
1.	BORJAS FELIX ANGIE KIMBERLY	FAMED	ASESOR
2.	GASTAÑAGA RUIZ MARIA DEL CARMEN	FAMED	CO ASESOR

Declaramos que el contenido del presente documento es original y que las citas y referencias a otros autores cumplen con las normas académicas establecidas. En ese sentido, hacemos constar que:

- El documento presenta un porcentaje de similitud de **19%**, según el reporte emitido por el software **Turnitin®** (identificador de entrega: **3002845295**; fecha de entrega: **24-07-2026**).
- Tras una revisión detallada del reporte y del contenido del trabajo en cuestión, no se han identificado indicios de plagio.
- Se certifica que el documento respeta los principios de integridad académica y cumple con los requisitos institucionales de originalidad.

Lugar y fecha: **Lima, 24 de julio de 2026**

Firma del asesor
Nº DNI: 42738630
ORCID: 0000-0002-7208-558X

Firma del Co-asesor
Nº DNI: 07782548
ORCID: 0009-0009-7621-0745

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.	7
III. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.....	8
IV. DESARROLLO DEL ESTUDIO.....	11
V. CONCLUSIONES.....	54
VI. RECOMENDACIONES.....	56
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

RESUMEN

Introducción: La sílice cristalina respirable (SCR) es un agente inhalatorio presente en actividades de construcción y asociado con silicosis, cáncer de pulmón y silicotuberculosis. La mayoría de revisiones previas se han enfocado en minería u otras industrias, dejando un vacío sobre la exposición y sus efectos en construcción. Este estudio describe los efectos de la exposición a SCR en la salud de los trabajadores y las estrategias de prevención identificadas. El objetivo del estudio busca describir los efectos de la exposición a la sílice cristalina en la salud de los trabajadores de la construcción y las estrategias de prevención, considerando sus características, los efectos oncológicos y no oncológicos, y las medidas para reducir el riesgo.

Metodología: Se realizó una revisión narrativa con enfoque cualitativo de la literatura científica publicada entre 2020 y 2025, siguiendo el método PRISMA adaptado. Se buscaron artículos en revistas indexadas, así como informes y normativas de entidades reguladoras nacionales e internacionales. Se incluyeron estudios en español e inglés sobre exposición a SCR en trabajadores de la construcción que evaluaron efectos en salud y estrategias de prevención.

Resultados: La evidencia muestra que la SCR continúa siendo una causa relevante de silicosis a nivel global, con alta prevalencia en minería y construcción, y casos emergentes de silicosis acelerada en trabajadores expuestos a piedra artificial con alto contenido de cuarzo. Los estudios describen una clara relación dosis–respuesta entre exposición acumulada a SCR y cáncer de pulmón, potenciada por el tabaquismo. Se documentan además EPOC, fibrosis pulmonar y silicotuberculosis como enfermedades de gran impacto funcional. Las actividades de corte,

perforación, demolición, arenado y acabado de concreto superan con frecuencia los límites de exposición recomendados (0,025–0,05 mg/m³). Las estrategias más efectivas combinan controles de ingeniería, programas de vigilancia médica y capacitación continua.

Conclusiones: La exposición a SCR en el sector construcción mantiene una alta relevancia sanitaria, por su asociación con el desarrollo enfermedades crónicas, progresivas y prevenibles. Se recomienda priorizar la vigilancia e inspección laboral en actividades de construcción, optimizar los controles de ingeniería antes del equipo de protección personal, mejorar los sistemas de notificación y promover estudios locales de exposición y efectividad de las intervenciones preventivas.

PALABRAS CLAVES

occupational disease, crystalline silica, occupational exposure

ABSTRACT

Respirable crystalline silica (RCS) is an inhaled agent widely present in construction activities and is associated with silicosis, lung cancer, and silicotuberculosis. Despite its well-recognized hazardous nature and both international and national regulatory advances, a high burden of disease persists among construction workers, especially in tasks with intense dust generation. A qualitative narrative review of the scientific literature published between 2020 and 2025 was conducted, following an adapted PRISMA method. Articles were searched in MEDLINE, Scopus and ScienceDirect, as well as reports from WHO, ILO and national and international regulations. Studies in Spanish and English on RCS exposure in construction workers that evaluated health effects and prevention strategies were included. The evidence shows that RCS continues to be a major cause of silicosis worldwide, with high prevalence in mining and construction, and emerging cases of accelerated silicosis in workers exposed to engineered stone with high quartz content. The studies describe a clear dose–response relationship between cumulative RCS exposure and lung cancer, further enhanced by smoking. COPD, pulmonary fibrosis and silicotuberculosis are also documented as conditions with major functional impact. Cutting, drilling, demolition, sandblasting and concrete finishing activities frequently exceed the recommended exposure limits (0.025–0.05 mg/m³). The most effective strategies combine engineering controls, the hierarchy of risk control, medical surveillance programs and continuous training. RCS exposure in the construction sector remains a major public health concern, with chronic, progressive and preventable diseases. It is recommended that

construction be prioritized in occupational surveillance and inspection, that engineering controls be optimized before relying on PPE, that notification systems be improved, and that local studies on exposure and the effectiveness of preventive interventions be promoted.

KEYWORDS

occupational disease, crystalline silica, occupational disease, occupational exposure

I.INTRODUCCIÓN

I.1 Situación del problema:

La sílice, también conocida como dióxido de silicio (SiO_2), es el mineral más abundante en la corteza terrestre y se presenta en dos formas estructurales principales: cristalina y amorfa (1). Entre las formas cristalinas se incluyen el cuarzo, la más prevalente y peligrosa para la salud humana, presente en el granito y la arenisca, así como la cristobalita y la tridimita, que se encuentran en rocas de origen volcánico (1,2).

Aunque la sílice en su estado natural no representa un riesgo significativo, las actividades de procesamiento como el corte, perforación, trituración, molienda o pulido de materiales que la contienen pueden generar partículas finas de sílice cristalina respirable (SCR). La exposición a estas partículas se asocia con toxicidad en el pulmón y en otros órganos tras su inhalación (3).

Los trabajadores pueden estar expuestos a SCR en una amplia variedad de contextos ocupacionales (4). Actividades tradicionales como la minería, la cantería, el corte y procesamiento de piedra, el trabajo en fundiciones, la fabricación de cerámica o el *sandblasting* han sido históricamente reconocidas como fuentes de exposición (5). Sin embargo, la evolución de los métodos y materiales de construcción han generado fuentes modernas de exposición, como el corte e instalación de piedra artificial con alto contenido de cuarzo, la fracturación hidráulica, el *sandblasting* de mezclilla y otros procesos industriales que liberan concentraciones elevadas de polvo de sílice (6,7).

Las afecciones respiratorias asociadas a la inhalación de partículas minerales representan un problema persistente en la salud ocupacional. La exposición a polvo de sílice puede desencadenar una respuesta inflamatoria progresiva que deriva en fibrosis pulmonar, pérdida de función respiratoria y otras patologías crónicas (4).

Diversos estudios han demostrado una relación dosis-respuesta entre la exposición a SCR y el desarrollo de enfermedades como el cáncer de pulmón (8). Por esta razón, la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) clasificó la sílice cristalina como carcinógeno para los seres humanos, incorporándolo en el Grupo 1(9). Además del potencial carcinogénico, la exposición se asocia con silicosis, fibrosis pulmonar, tuberculosis (TBC) y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), patologías que pueden ser progresivas, irreversibles y potencialmente mortales.

Dentro de los grupos de riesgo, los trabajadores de la construcción son especialmente vulnerables. Las actividades de corte, trituración, perforación, procesamiento de piedra natural, así como la fabricación e instalación de encimeras de piedra artificial o ingenierizada generan altos niveles de polvo que pueden contener SCR, incrementando significativamente la posibilidad de exposición cuando no se aplican controles efectivos. Aunque estas exposiciones suelen ser intermitentes, pueden alcanzar picos de alta intensidad que incrementan significativamente el riesgo de enfermedad (10).

En los últimos años se ha observado un aumento alarmante de casos de silicosis acelerada en trabajadores dedicados a la fabricación e instalación de superficies de piedra artificial o aglomerados de cuarzo, los cuales pueden contener más del 90 %

de sílice (7). La manipulación de estos materiales produce concentraciones extremadamente elevadas de partículas finas, y se han registrado casos de fibrosis masiva progresiva incluso en trabajadores jóvenes con periodos relativamente cortos de exposición.

A pesar de que la relación entre la sílice y la silicosis se conoce desde principios del siglo XX, la enfermedad persiste en múltiples países. Muchos límites permisibles de exposición resultan insuficientes o no se cumplen, lo que favorece la aparición de nuevos brotes; incluso sectores donde la exposición es ampliamente reconocida, como la construcción, continúan mostrando deficiencias en la protección efectiva de los trabajadores (11).

En 1995, la Organización Internacional del Trabajo (OIT) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) lanzaron el Programa Global para la Eliminación de la Silicosis con la meta de erradicar la enfermedad para el 2030(12). Sin embargo, obstáculos como el subregistro de casos, la falta de vigilancia epidemiológica y la persistencia de exposiciones peligrosas en sectores formales e informales han impedido un progreso significativo. La reaparición de brotes de silicosis, especialmente vinculados a industrias emergentes como la manipulación de piedra artificial, evidencia que el problema está lejos de resolverse.

Aunque existen revisiones previas sobre exposición a sílice, muchas se han centrado en minería u otras actividades industriales, dejando un vacío respecto a la exposición real en el sector de la construcción (13). A pesar de que este sector emplea a millones de trabajadores en todo el mundo, la literatura muestra pocos estudios que cuantifiquen adecuadamente los niveles de exposición a SCR en

actividades propias de la construcción, caracterizadas por picos intermitentes de alta intensidad que aún no se comprenden del todo (10).

Por ello, resulta necesario actualizar y sintetizar la evidencia disponible sobre los efectos en la salud asociados con la exposición a SCR en los trabajadores de la construcción, así como evaluar las estrategias de prevención implementadas. Esta investigación busca llenar ese vacío de conocimiento, diferenciándose de revisiones anteriores al centrarse específicamente en el sector construcción y en las nuevas formas de exposición que han surgido en los últimos años.

I.2 Pregunta de investigación:

¿Cuáles son los efectos de la exposición a la sílice cristalina en la salud de los trabajadores de la construcción y las estrategias de prevención?

I.3 Justificación

I.3.1 Justificación Teórica

La presente investigación aporta a la comprensión integral de los efectos de la exposición a la sílice cristalino respirable en el contexto específico del sector construcción, un ámbito que ha sido menos estudiado en comparación con la minería u otras actividades industriales. Al realizar una revisión narrativa de la literatura reciente, este estudio integra evidencia epidemiológica, toxicológica y clínica sobre las enfermedades oncológicas y no oncológicas asociadas a la sílice cristalina. Asimismo, contrasta los valores del límite de exposición propuestos por organismos internacionales con la normativa peruana vigente, generando un marco conceptual actualizado sobre riesgo, exposición y regulación. De este modo, el

trabajo contribuye a consolidar el conocimiento científico disponible y a identificar vacíos en la literatura respecto a la exposición intermitente, pero de alta intensidad, propia de las actividades constructivas modernas, proporcionando bases teóricas para futuras investigaciones en salud ocupacional.

I.3.2 Justificación Práctica

Desde la perspectiva de la salud ocupacional, esta investigación tiene como propósito ofrecer información útil para los profesionales de salud ocupacional. Al describir los efectos en la salud de la exposición a la sílice cristalina y sistematizar las principales estrategias de prevención, el estudio provee insumos para el diseño, actualización y fortalecimiento de programas de salud ocupacional en el sector construcción. Además, el análisis del marco normativo y de las experiencias internacionales permite orientar la implementación práctica de la RM N.º 733-2024-MINSA y del Plan Nacional para la Prevención y Erradicación de la Silicosis, facilitando la toma de decisiones en materia de monitoreo ambiental, vigilancia epidemiológica y fiscalización de la exposición a sílice en obras de construcción.

I.3.3 Justificación Social

El estudio se justifica por el impacto que las enfermedades asociadas a la exposición a la sílice cristalino respirable generan en la calidad de vida de los trabajadores de la construcción y sus familias, especialmente en contextos de empleo informal o precario. La silicosis, el cáncer de pulmón, la TBC y la silicotuberculosis son patologías crónicas, discapacitantes y potencialmente mortales, que conllevan pérdida de capacidad laboral, incremento de gastos en salud y repercusiones económicas y emocionales a nivel familiar y comunitario. En un país donde la

construcción emplea a un porcentaje importante de la población, mejorar la prevención y el control de la exposición a sílice contribuye a proteger el derecho a un trabajo seguro y saludable, a reducir la carga de enfermedad y a fortalecer la equidad en salud. En este sentido, los resultados de la investigación pueden apoyar la formulación de políticas públicas y acciones intersectoriales orientadas a disminuir la morbilidad y mortalidad por neumoconiosis y otras enfermedades relacionadas, alineándose con los objetivos nacionales e internacionales de desarrollo sostenible y protección de la salud de los trabajadores.

II. OBJETIVOS

II .1 Objetivo general: Describir los efectos de la exposición al sílice cristalina en la salud de los trabajadores de la construcción y las estrategias de prevención.

II.2 Objetivos específicos:

- Describir las características generales de la sílice cristalina.
- Identificar los efectos oncológicos y no oncológicos de la exposición al sílice cristalina en la salud de los trabajadores de la construcción
- Describir las estrategias de prevención para reducir la exposición al sílice cristalina en los trabajadores de la construcción.

III. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

III.1 Tipo de estudio

El presente trabajo de investigación tiene un enfoque cualitativo de tipo revisión narrativa, cuyo objetivo es sintetizar, organizar y analizar la evidencia científica existente sobre la exposición a sílice cristalina en el ámbito laboral de la construcción.

La revisión se desarrolló siguiendo el método PRISMA, adaptado para análisis narrativos, a fin de garantizar una búsqueda y selección sistemática de la información.

III.2 Criterios de elegibilidad

Criterios de inclusión

- Estudios publicados entre 2020 y 2025 en revistas científicas indexadas.
- Artículos publicados en español o inglés.
- Estudios que analicen los efectos sobre la salud y/o las estrategias de prevención implementadas en el entorno laboral de la construcción.

Criterios de exclusión

- Artículos sin acceso al texto completo de forma gratuita, cartas al editor, resúmenes de congreso.
- Publicaciones con información incompleta, o falta de aspectos éticos claros.

III.3 Fuentes de información

La búsqueda se realizará en diversas bases de datos científicas relevantes, tales como:

- MEDLINE

- Scopus
- Science Direct
- Google académico
- Informes técnicos de la OMS y la OIT
- Regulaciones o normativas internas de países sobre la exposición a la sílice cristalina.

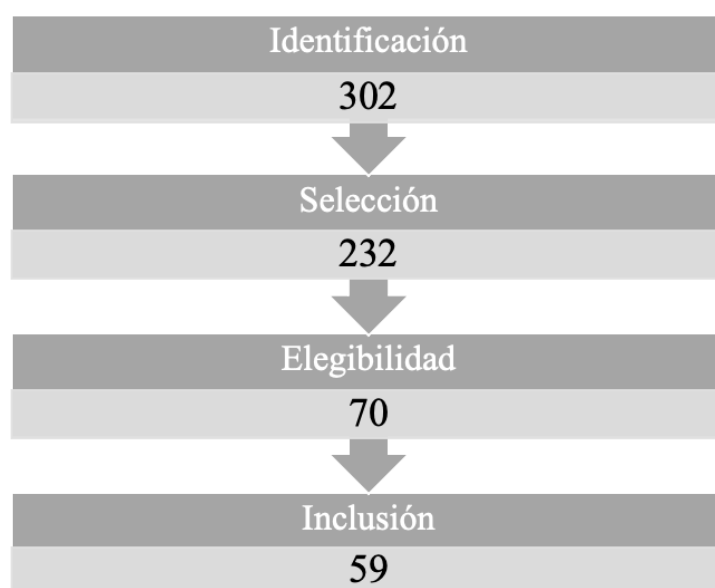
III.4 Estrategias de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó utilizando operadores booleanos y términos MeSH relevantes como “sílice cristalina respirable”, “exposición ocupacional” y “construcción”. Con estos términos se realizaron búsquedas aplicando la metodología PICO en las fuentes de información seleccionadas. Por ejemplo, para las búsquedas en Google Académico, ScienceDirect y Scopus se empleó la combinación de "(crystalline silica) AND (construction workers)", mientras que en PUBMED se utilizó "(crystalline silica OR respirable crystalline silica) AND (construction workers) AND (occupational exposure)". Se implementaron filtros de búsqueda como idioma, rango de fechas y tipo de documento, además de revisar títulos y resúmenes para preseleccionar aquellos considerados relevantes.

III.5 Selección de Estudios

La selección de los artículos fue realizada de manera individual por el autor. Inicialmente, se revisaron los títulos y resúmenes de los estudios identificados para determinar su relevancia y verificar el cumplimiento de los criterios de inclusión. Aquellos que cumplieron con los criterios establecidos se revisaron a texto completo para extraer la información pertinente. El flujo para la selección de los artículos incluidos en la revisión se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Diagrama de flujo con método PRISMA modificado.



IV. DESARROLLO DEL ESTUDIO

IV.1 Características y propiedades físico-químicas de la sílice

IV.1.1 Características de la sílice

La sílice (SiO_2) es uno de los compuestos más abundantes en la corteza terrestre, constituyendo más del 59% de la composición mineral de la tierra (1,3), y puede encontrarse en forma no cristalina (amorfa) y cristalina. Está presente en una gran variedad de minerales, principalmente en las formas cristalinas de cuarzo, cristobalita y tridimita (1,2). Estas formas cristalinas se diferencian en la organización estructural de los átomos de silicio (Si) y oxígeno (O), lo que influye en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, y determina su toxicidad para los seres humanos. La forma más prevalente y tóxica es el cuarzo, que se encuentra en rocas comunes como granitos, areniscas y cuarcitas (5).

IV.1.1.1 Formas cristalinas de la sílice:

- Cuarzo (α -quartz): Es la forma más estable y prevalente de sílice cristalina, con una estructura ordenada de tetraedros de silicio y oxígeno. El cuarzo es el polimorfo más común en la naturaleza y la forma más tóxica debido a su resistencia a la degradación en el pulmón humano. La inhalación de partículas de cuarzo respirables, que miden menos de 5 micrómetros, puede generar silicosis y otras enfermedades pulmonares crónicas (3).
- Cristobalita y tridimita: Son formas menos comunes que se encuentran en rocas volcánicas. Aunque ambas tienen una estructura similar a la del cuarzo, su alta temperatura de transición las hace más inestables en

condiciones ambientales a temperaturas más bajas. Sin embargo, la cristobalita es particularmente peligrosa en su forma respirable, ya que tiene un mayor potencial para inducir daño pulmonar (3).

IV.1.1.2. Formas no cristalinas de la sílice: Sílice amorfo y nanopartículas de sílice

- Si bien la sílice amorfa tiene una estructura menos organizada, lo que le confiere una menor toxicidad comparado con las formas cristalinas, algunas formas de sílice amorfo, como las nanopartículas de sílice, también pueden presentar riesgos para la salud. Las nanopartículas tienen una gran área superficial y pueden penetrar más fácilmente en los tejidos humanos, lo que aumenta su potencial de toxicidad al promover estrés oxidativo e inflamación celular (2).

IV.1.1.3. Sílice cristalino respirable: La sílice respirable cristalino es el término utilizado para describir las partículas de sílice que tienen un diámetro aerodinámico de menos de 5 micrómetros. Este tamaño de partícula permite que la sílice cristalina llegue a las vías respiratorias más profundas, es decir, a los alvéolos pulmonares, lo que puede generar efectos graves. Al ser inhalado, el SCR no solo se alojará en los pulmones, sino que también desencadenará una serie de respuestas inmunológicas (3).

IV.1.2 Propiedades físico-químicas de la sílice cristalina

IV.1.2.1 Estado físico: La sílice cristalina se presenta principalmente como cristales incoloros o blancos, aunque puede adoptar tonos distintos dependiendo de

las impurezas presentes en su estructura, como el hierro. Estos cristales son densos y duros, lo que les otorga una notable resistencia mecánica. Esta dureza es una característica clave que hace que la sílice cristalina sea ampliamente utilizado en la fabricación de materiales refractarios y en procesos industriales que requieren alta resistencia al desgaste, como en la fabricación de vidrio y abrasivos. La estructura interna de la sílice cristalina está compuesta por tetraedros de silicio (SiO_4) que se unen formando una red tridimensional. Esta organización en la que cada átomo de silicio está rodeado por cuatro átomos de oxígeno le da al sílice una gran estabilidad estructural, permitiéndole resistir temperaturas elevadas y condiciones mecánicas adversas (3,14).

IV.1.2.2 Punto de fusión: El punto de fusión del sílice cristalino varía según su forma cristalina. Para el cuarzo, el punto de fusión se encuentra alrededor de 1713°C , lo que lo convierte en un material con excelentes propiedades refractarias. Esto lo hace adecuado para su uso en industrias a altas temperaturas, como la fabricación de vidrio y en la producción de materiales cerámicos y refractarios. Las formas de cristobalita y tridimita tienen puntos de fusión más bajos, lo que las hace más reactivas a temperaturas elevadas y menos estables bajo ciertas condiciones térmicas (3,14).

IV.1.2.3 Solubilidad: La sílice cristalina es prácticamente insoluble en agua a temperatura ambiente, lo que le otorga una gran estabilidad química en ambientes naturales. Sin embargo, su solubilidad aumenta significativamente en condiciones de pH elevado o en presencia de ácidos fuertes. La sílice cristalina es especialmente soluble en ácido fluorhídrico (HF), donde reacciona para formar compuestos como el tetrafluoruro de silicio (SiF_4). Esta alta reactividad química en ciertos medios es

utilizada en aplicaciones industriales, como en la producción de vidrio y en el tratamiento de superficies metálicas (3,14).

IV.2. Usos de la sílice cristalina

IV.2.1. Industria de la construcción: El sílice cristalina se utiliza en la fabricación de materiales de construcción, debido a su alta resistencia mecánica y estabilidad térmica. Algunos de sus usos más comunes incluyen:

- **Fabricación de concreto y morteros:** Es un componente esencial en la producción de concreto, como agregado que mejora la resistencia y durabilidad del material.
- **Fabricación de vidrio y cerámica:** El cuarzo es el principal componente en la producción de vidrio. Su alta pureza lo hace ideal para producir vidrio de alta calidad, especialmente en la fabricación de envases y ventanas. Asimismo, en la industria de la cerámica, la sílice mejora las propiedades mecánicas y la estabilidad térmica de los productos.
- **Materiales refractarios:** Debido a su capacidad para soportar altas temperaturas, se utiliza en la fabricación de materiales refractarios, como ladrillos y arcillas refractarias, esenciales en la industria metalúrgica para la fusión de metales y otros procesos que requieren alta resistencia térmica(6,13).

IV.2.2. Industria de los abrasivos: El sílice cristalino se utiliza en la fabricación de abrasivos, debido a su dureza y resistencia al desgaste. Entre sus principales aplicaciones se incluyen:

- Papel de lija y herramientas abrasivas: El cuarzo se utiliza para la fabricación de papel de lija, discos de corte y otras herramientas abrasivas, esenciales para el pulido y acabado de metales, piedras y otros materiales duros.
- Arenado(*sandblasting*): Técnica en la que la sílice se proyecta a alta velocidad sobre superficies para limpiar, suavizar o eliminar impurezas, óxidos, pinturas u otros recubrimientos. Esta práctica conlleva riesgos por la inhalación de partículas respirables de sílice (11).

IV.2.3. Industria electrónica y telecomunicaciones: La sílice cristalina se utiliza en aplicaciones avanzadas dentro de la industria electrónica debido a su alta pureza, estabilidad térmica, y propiedades semiconductoras. Entre sus principales aplicaciones se encuentran:

- Fabricación de semiconductores: La sílice es un componente esencial en la producción de semiconductores y componentes electrónicos de alta tecnología, como microchips. El silicio extraído de la sílice cristalina se utiliza en la creación de circuitos integrados y paneles solares, debido a sus propiedades semiconductoras.
- Fibra óptica: La sílice de alta pureza se emplea en la fabricación de fibras ópticas utilizadas para comunicaciones de alta velocidad. La transparencia y resistencia térmica de la sílice lo hacen ideal para transmitir señales de luz a través de largas distancias sin pérdida significativa de calidad (11).

IV.2.4. Industria de los hidrocarburos y fracturación hidráulica: En la industria del petróleo y gas, la sílice cristalina se utiliza principalmente en la fracturación

hidráulica, debido a su alta resistencia mecánica, lo que le permite mantener abiertas las fracturas en las formaciones rocosas durante el proceso de extracción de hidrocarburos de formaciones profundas.

- **Fracturación hidráulica (*fracking*):** La sílice se emplea como arena de *fracking* para sostener las fracturas mientras los fluidos inyectados a presión llegan a todas las grietas, aumentando la permeabilidad de los reservorios y facilitando que el petróleo y gas fluyan hacia los pozos (11).

IV.2.5. Industria química y farmacéutica: La sílice se utiliza en la industria química y farmacéutica gracias a sus propiedades: resistencia y estabilidad química en la sílice cristalina y alta superficie y capacidad de adsorción en las formas amorfas o nanopartículas. Algunos de sus usos más comunes incluyen:

- **Catalizadores (sílice cristalina):** Se emplea como soporte en diversas reacciones químicas, como en la industria petroquímica, ya que su estabilidad química permite que los catalizadores funcionen sin degradarse.
- **Adsorbentes y aplicaciones farmacéuticas (nanopartículas de sílice/sílice amorfa):** Se utilizan en la fabricación de medicamentos, en sistemas de liberación controlada de fármacos y en aplicaciones de diagnósticos y tratamientos dirigidos (11).

IV.2.6. Agricultura y fertilización: La sílice cristalina se utiliza en la agricultura gracias a su resistencia y estabilidad química, lo que le permite mejorar la estructura del suelo y actuar como suplemento mineral en fertilizantes. Algunos de sus usos más comunes incluyen:

- Mejoramiento del suelo: Se utiliza como un suplemento mineral en algunos fertilizantes para mejorar la estructura del suelo, favorecer el drenaje y retención de nutrientes.
- Control de plagas: Los polvos de sílice se utilizan como insecticida natural, dañando el exoesqueleto de los insectos y provocando su deshidratación y muerte (11).

IV.3 Marco normativo en Perú y su comparación con las normativas internacionales sobre los niveles de exposición

La SCR, principalmente en su forma de cuarzo, constituye un agente inhalatorio de alta relevancia en higiene ocupacional, dado su efecto patogénico directo sobre el parénquima pulmonar. La exposición prolongada y sin control eficaz se asocia a enfermedades como la silicosis, TBC, cáncer de pulmón y EPOC. Por este motivo, diversos organismos internacionales han establecido valores límites de exposición ocupacional para garantizar la protección respiratoria de los trabajadores.

Dado que la neumoconiosis es una enfermedad prevenible, la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) establece un límite de exposición permisible de 0,05 mg/m³ para la SCR, expresado como promedio ponderado en el tiempo (TWA) durante una jornada laboral de 8 horas (15).

De manera complementaria, el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) sugiere el mismo valor 0,05 mg/m³ como límite de exposición recomendado, basado en la evidencia científica disponible (16).

Por su parte, la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH) propone un valor límite umbral (TLV–TWA) más estricto, de 0,025 mg/m³, considerado el nivel de exposición más seguro para prevenir el desarrollo de enfermedades pulmonares asociadas a la inhalación de sílice cristalina (17).

En el caso del Perú, la Resolución Ministerial N.º 733-2024-MINSA, publicada el 28 de octubre de 2024, actualiza el Decreto Supremo N.º 015-2005-SA(18), estableciendo nuevos límites máximos permisibles (TLV-TWA y TLV-STEL) para agentes químicos en los ambientes laborales. Esta normativa alinea la legislación peruana con los últimos estándares internacionales. Un cambio destacado es la inclusión de la sílice cristalino respirable (cuarzo, cristobalita y mezclas) en el Anexo II, junto con sustancias como formaldehído, cromo hexavalente y ácido arsénico (19).

La resolución establece un nuevo TLV-TWA de 0,025 mg/m³ para la SCR, lo que representa una mejora significativa en la protección de la salud de los trabajadores, al reducir la exposición a sustancias peligrosas que pueden causar enfermedades graves como el cáncer de pulmón y enfermedades respiratorias como silicosis (19).

Esta actualización obliga a los empleadores a realizar evaluaciones de riesgos más exhaustivas y a adoptar medidas de control rigurosas, como mejorar los sistemas de ventilación, proporcionar equipos de protección personal (EPP) adecuados para cumplir con los nuevos valores.

Asimismo, representa un desafío para los profesionales de seguridad y salud ocupacional, quienes deberán actualizar sus conocimientos y prácticas para

asegurar que los trabajadores estén protegidos y las empresas cumplan con las regulaciones actuales.

En conclusión, la Resolución Ministerial N.º 733-2024-MINSA promueve un entorno laboral más seguro y saludable para los trabajadores. En ese sentido, resulta fundamental que tanto los profesionales como las empresas adopten estos cambios para garantizar una gestión de seguridad y salud ocupacional alineada con los mejores estándares internacionales (18). A continuación, se presenta una tabla (Tabla 2) comparativa con los principales valores de referencia adoptados por organismos internacionales y el estándar vigente en el Perú:

Tabla 2. Comparación de límites de exposición ocupacional para sílice cristalina respirable

Agencia / País	Límite de exposición (mg/m ³ , TWA)	Parámetro de medición
OSHA (EE. UU.)	0,05	PEL – Permissible Exposure Limit
ACGIH (EE. UU.)	0,025	TLV-TWA – Threshold Limit Value – Time-Weighted Average
NIOSH (EE. UU.)	0,05	REL – Recommended Exposure Limit
Perú (RM N.º 733-2024-MINSA)	0,025	TLV-TWA adoptado (ACGIH)

Fuente: *Elaboración propia*

IV.4. Situación de la exposición a sílice cristalina: población general y trabajadores

Las enfermedades respiratorias adquiridas en el entorno laboral se consideran patologías ocupacionales de creciente relevancia, siendo la neumoconiosis provocada por la inhalación de polvos inorgánicos fibrosantes como la sílice cristalina, la primera enfermedad reconocida formalmente como profesional.

En 1950, la OIT desarrolló la Clasificación de Radiografías de Neumoconiosis, con el objetivo de estandarizar la evaluación de enfermedades pulmonares ocupacionales. Esta clasificación ha sido actualizada periódicamente, incluyendo la versión de 2011 y la revisión más reciente de 2022, que incorpora imágenes digitales estándar. La metodología permite codificar de manera clara y reproducible las alteraciones radiográficas asociadas a la inhalación de polvo, asegurando uniformidad en estudios clínicos, epidemiológicos y programas de vigilancia de trabajadores expuestos. Su guía técnica y conjunto de radiografías estándar facilitan la comparación internacional de diagnósticos y estadísticas sobre neumoconiosis

IV.4.1 En la población general

La exposición al SCR constituye un riesgo reconocido para la salud humana, especialmente en trabajadores que mantienen contacto directo con este material en su entorno laboral. Sin embargo, en la población general también puede producirse exposición, aunque a niveles significativamente más bajos. El grado de exposición depende de factores como la ubicación geográfica, las condiciones ambientales y la proximidad a actividades industriales.

IV.4.1.1 Factores geográficos y ambientales: En regiones donde existen canteras, minas o actividad volcánica, las personas pueden estar expuestas a partículas de SCR suspendidas en el aire. Esto es particularmente relevante en zonas cercanas a yacimientos de sílice o áreas volcánicas, donde las cenizas pueden contener altos niveles de sílice cristalina. En tales condiciones, la concentración ambiental puede incrementarse y favorecer la aparición de enfermedades respiratorias crónicas a largo plazo, como la silicosis (21).

IV.4.1.2. Exposición secundaria en zonas industriales: En áreas urbanas o rurales próximas a plantas procesadoras de sílice o a industrias que utilizan materiales como el cemento, el vidrio o la cerámica, los residentes pueden estar expuestos a niveles bajos de sílice respirable. Las partículas se liberan al aire durante procesos de corte, molienda, trituración o manipulación de rocas y minerales que contienen sílice. Aunque esta exposición es menor que la que ocurre en entornos ocupacionales, puede generar efectos perjudiciales en individuos vulnerables, como personas con enfermedades pulmonares preexistentes o sistemas inmunitarios comprometidos (21).

IV.4.1.3. Efectos y riesgos por exposición prolongada: Las enfermedades respiratorias graves asociadas a la exposición a la sílice cristalina como la silicosis o el cáncer de pulmón son poco frecuentes en la población no ocupacionalmente expuesta. No obstante, en comunidades ubicadas cerca de zonas mineras o industriales, estos casos pueden presentarse con mayor frecuencia debido a la exposición continua, incluso a bajas concentraciones. En áreas rurales próximas a canteras, se han documentado casos de bronquitis crónica y EPOC, e incluso

cuadros leves de silicosis derivados de la exposición ambiental prolongada. La inhalación continua de sílice cristalino, aunque sea a bajas concentraciones, puede ocasionar efectos crónicos y una progresiva disminución de la función pulmonar, especialmente cuando no se aplican medidas adecuadas de control ambiental y protección respiratoria (21).

IV.4.2. En trabajadores de construcción

Los trabajadores de construcción constituyen uno de los grupos más vulnerables a la exposición al SCR, debido a la naturaleza de las tareas que realizan, muchas de las cuales implican el manejo directo de materiales que contienen sílice o el uso de equipos que generan polvo. A pesar de que la exposición ocupacional a la sílice ha sido ampliamente reconocida, las enfermedades respiratorias derivadas de esta exposición continúan representando un problema de salud significativo en este grupo laboral (13).

IV.4.2.1. Tareas de construcción que implican exposición a la sílice: Las principales actividades que generan exposición a la sílice cristalina son:

- Corte y perforación de concreto: Generan grandes cantidades de polvo de sílice respirable, especialmente en espacios cerrados y con ventilación deficiente.
- Arenado: El uso de arena para limpiar o dar acabado a superficies constituye una de las fuentes más relevantes de exposición ocupacional.
- Demolición de edificios: La destrucción de edificaciones que contienen sílice libera altas concentraciones de polvo.

- Mezcla y aplicación de cemento: El manejo de cemento, ladrillos, cerámica y otros materiales de construcción favorece la dispersión de partículas en el aire (22).

IV.4.2.2. Impacto en la salud respiratoria de los trabajadores: La silicosis sigue siendo la enfermedad pulmonar más frecuente asociada a este tipo de exposición, cuya aparición depende directamente de la intensidad y duración del contacto con el polvo de sílice.

En entornos laborales donde no se emplean medidas adecuadas de protección, se han reportado tasas elevadas de silicosis y otras patologías respiratorias graves, como EPOC y la fibrosis pulmonar (1).

IV.4.2.3. Factores de riesgo en el ámbito de la construcción:

- Duración e intensidad de la exposición: periodos prolongados de trabajo en ambientes con polvo no controlado incrementan considerablemente el riesgo de enfermedad.
- Falta de equipos de protección respiratoria: El uso inadecuado o la ausencia de mascarillas y respiradores es un factor determinante en la incidencia de enfermedades pulmonares.
- Condiciones ambientales: La falta de ventilación o de sistemas de control de polvo agrava la concentración de sílice en el aire (1).

IV.4.2.4. Estrategias para reducir la exposición: La implementación de medidas preventivas, como una ventilación adecuada, la instalación de sistemas de succión

de polvo y el uso de respiradores de alta eficiencia, contribuye significativamente a disminuir la incidencia de enfermedades respiratorias.

Asimismo, la capacitación y la educación continua sobre los riesgos del polvo de sílice resultan esenciales para garantizar una protección efectiva y sostenida de los trabajadores (1).

IV.5. Efectos en la salud por exposición a la sílice cristalina

IV.5.1. Epidemiología de las enfermedades

A nivel mundial, las enfermedades respiratorias ocupacionales relacionadas con la exposición a la sílice cristalina continúan representando una carga significativa para la salud pública. Según el estudio Carga Global de Enfermedades realizado en 2021, se registraron 62 866 nuevos casos de neumoconiosis, de los cuales 35 482 correspondieron a silicosis, lo que representa aproximadamente el 59 % de todos los casos reportados. La prevalencia total alcanzó 396 608 trabajadores afectados, reflejando que, a pesar de las regulaciones y medidas preventivas implementadas en distintos países, la incidencia y la prevalencia de la silicosis siguen en aumento a nivel global (23).

En Estados Unidos, la neumoconiosis causó más de 30,000 muertes entre 1990 y 1999, con una tasa de mortalidad ajustada por edad de 13,2 por millón de habitantes. Una proporción importante de estos fallecimientos se atribuyó a la silicosis, especialmente en trabajadores de la minería y la construcción, sectores donde la exposición a polvo de SCR es elevada (24).

En México, se identificaron 14,827 casos de neumoconiosis en trabajadores afiliados al Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) durante el período 1994–

2004, de los cuales la mayoría presentaba incapacidad permanente. Los sectores más afectados fueron la minería y la construcción, lo que evidencia la persistencia del riesgo asociado a la exposición ocupacional a polvos minerales, en especial a la sílice (24).

Por otro lado, la exposición global estimada a sílice muestra que 23 millones de trabajadores en China, 11,5 millones en India, 3,2 millones en la Unión Europea y 2 millones en Brasil están en riesgo constante debido a la exposición a la sílice cristalina. Además, se ha observado un aumento del riesgo en industrias emergentes, como la producción de piedra artificial o aglomerados de cuarzo, y en actividades asociadas a la construcción e instalación de encimeras, donde se reportan casos de silicosis acelerada incluso en trabajadores jóvenes (25).

Estos datos reflejan que, aunque existen avances normativos y preventivos, la exposición ocupacional a sílice cristalina sigue siendo un problema relevante, particularmente en el sector construcción, donde las actividades de corte, perforación, demolición o pulido de materiales como concreto, ladrillo y piedra continúan siendo fuentes críticas de exposición.

Estudios adicionales respaldan esta preocupación, Un estudio de la exposición al polvo de SCR durante el acabado (molienda) del hormigón utilizando amoladoras manuales observó que la concentración promedio ponderada en el tiempo de polvo de sílice en el 69% de las muestras excedía el valor límite umbral recomendado actual de 0,05 mg/m³, lo que indica la imperiosa necesidad de desarrollar métodos más efectivos para controlar la exposición de los trabajadores al polvo de sílice cristalina durante estas actividades de construcción(26).

Asimismo, un estudio australiano sobre exposiciones laborales encontró que los mineros y los trabajadores de la construcción eran los que tenían más probabilidades de estar altamente expuestos a SCR al realizar tareas con hormigón o cemento o al trabajar cerca de trituradoras que generan polvo que contiene sílice respirable (27).

Estos estudios refuerzan la urgente necesidad de mejorar las estrategias de prevención y control de la exposición ocupacional al polvo de sílice, particularmente en la construcción, donde las condiciones laborales siguen siendo peligrosas para la salud respiratoria de los trabajadores.

IV.5.2. Enfermedades de origen oncológico

IV.5.2.1 Cáncer de pulmón

Según varios estudios epidemiológicos en poblaciones ocupacionalmente expuestas, existe una relación entre el cáncer de pulmón y la exposición al polvo respirable de sílice cristalina bajo ciertas circunstancias.

En 1997, la IARC concluyó que la SCR es carcinogénica para los humanos, aunque su carcinogenicidad puede variar según las características de la sílice y factores externos que afectan su actividad biológica. En 2011, la IARC confirmó que el polvo de sílice cristalina (cuarzo y cristobalita) es un agente carcinogénico (grupo 1) y que el riesgo variable de los diferentes tipos de sílice está relacionado con sus propiedades superficiales (9).

Desde entonces, ha crecido la evidencia de que a mayor exposición a la SCR, mayor es el riesgo de desarrollar enfermedades, como el cáncer de pulmón, lo que se conoce como relación dosis-respuesta (28).

En junio de 2003, el Comité Científico de Límites de Exposición Ocupacional de la UE (SCOEL) adoptó una recomendación en la que concluyó que la inhalación de polvo respirable de sílice causa silicosis en los seres humanos. Existe suficiente evidencia para concluir que el riesgo de cáncer de pulmón aumenta en personas con silicosis, aunque no parece ser el caso en trabajadores sin silicosis expuestos al polvo de sílice en canteras y en la industria cerámica. Prevenir la silicosis también ayuda a reducir el riesgo de cáncer. No se ha identificado un umbral claro para el desarrollo de la enfermedad, por lo que cualquier reducción en la exposición disminuirá el riesgo (29).

Un análisis de estudios de cohortes, que incluyó a 65 980 trabajadores, encontró que la exposición acumulada a la SCR, incluso con un retraso de 15 años, es un fuerte predictor de cáncer de pulmón. El riesgo estimado de cáncer de pulmón para un trabajador expuesto a 0.1 mg/m³ de SCR, desde los 20 hasta los 65 años, aumentó entre un 1.1% y un 1.7%, por encima del riesgo general de la población, que es de entre un 3% y un 6% (30).

Otro análisis de cohorte retrospectiva de 7 665 trabajadores de una mina en China, con una mediana de tiempo de seguimiento de 42.8 años, encontró que la combinación de exposición al sílice y tabaquismo aumentó la mortalidad por cáncer de pulmón, representando el 81.4% de las muertes por esta causa(31). Además, se observó importantes efectos conjuntos aditivos de la exposición a la sílice y el tabaquismo sobre la mortalidad por cáncer de pulmón y neumoconiosis, junto con un importante efecto conjunto multiplicativo por todas las causas(31).

Desde 2011, se han evaluado diferentes modos de acción de la genotoxicidad inducida por SCR en estudios toxicológicos. Se ha confirmado que la inflamación provocada por la superficie del cuarzo tras la inhalación juega un papel importante, y los hallazgos apoyan un umbral práctico para sus efectos secundarios. Además, se ha destacado el papel de las partículas de sílice recién fracturadas en estudios y evaluaciones regulatorias. Sin embargo, aún no se comprende completamente cómo las características químicas y la configuración de la superficie de la sílice pueden desencadenar respuestas tóxicas. Actualmente, se están llevando a cabo investigaciones interdisciplinarias para entender los mecanismos de la patogenicidad de la sílice y posiblemente reducir su reactividad superficial (31).

IV.5.3. Enfermedades de origen no oncológico

IV.5.3.1. Silicosis

- **Importancia de la silicosis como enfermedad ocupacional**

La silicosis es una neumoconiosis fibrótica, irreversible y progresiva, causada por la inhalación crónica de partículas respirables de sílice cristalina. Su relevancia en la salud ocupacional ha aumentado debido a la expansión de actividades industriales como la minería, la construcción civil y la manufactura, especialmente en países en desarrollo, donde las condiciones laborales suelen implicar altas cargas de exposición y una implementación limitada de medidas de protección respiratoria (4). Aunque históricamente la silicosis ha sido considerada una enfermedad de los mineros, la falta de control del riesgo asociado con la exposición a la sílice en diversas prácticas laborales ha permitido su resurgimiento en sectores como la construcción. Actividades como el corte y pulido de materiales, el *sandblasting* y

la fabricación de superficies de piedra artificial, ha llevado al resurgimiento de la silicosis en todo el mundo (5).

Si bien la silicosis es una enfermedad completamente prevenible, sigue afectando a trabajadores de todo el mundo, resultando en enfermedades progresivas o incluso mortales.

Entre 1999 y 2018, las muertes por neumoconiosis disminuyeron en un 40,4 %, según datos de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC); sin embargo, la silicosis mantuvo una carga significativa, representando el 18,9 % de las muertes en trabajadores del sector construcción y el 12,3 % en minería (32). Durante ese mismo período, en Estados Unidos, las muertes por silicosis disminuyeron un 53 %, gracias a las medidas implementadas por la OSHA desde 2016, que redujeron el valor máximo permisible a 0,05 mg/m³ e incluyeron controles ambientales, vigilancia médica y capacitación laboral (32).

Sin embargo, a pesar de estos avances, la silicosis sigue siendo una causa importante de morbilidad y mortalidad, particularmente en la construcción y minería, donde las actividades como el corte, perforación, demolición y pulido de materiales continúan siendo fuentes importantes de exposición a SCR. En el caso del sector construcción, las actividades de corte, perforación, demolición o pulido de materiales como concreto, ladrillo y piedra constituyen las principales fuentes de exposición. En este contexto, organismos como la OSHA y los CDC resaltan la necesidad de fortalecer la vigilancia epidemiológica y las estrategias de prevención primaria y secundaria, dado que la exposición tanto al polvo de sílice como a materiales con asbesto continúa representando una amenaza significativa para la salud respiratoria de los trabajadores (32).

Además, en los últimos años ha surgido un nuevo riesgo asociado con la manipulación de piedra artificial o encimeras de cuarzo, materiales compuestos por más del 90 % de sílice junto con resinas y pigmentos (4). El corte, pulido e instalación de estas superficies en cocinas y baños exponen a los trabajadores a concentraciones elevadas de SCR, lo que ha dado lugar a casos de silicosis de aparición rápida y formas agresivas, como fibrosis masiva progresiva, incluso en trabajadores jóvenes con períodos de exposición relativamente cortos (13).

Este fenómeno resalta la necesidad de ampliar las estrategias de prevención y vigilancia, no solo en la construcción tradicional, sino también en industrias que trabajan con materiales de alto contenido de sílice. La silicosis ha sido reconocida por la OMS y la OIT como una enfermedad ocupacional prioritaria, con el objetivo de eliminarla como problema de salud pública antes del año 2030(12). Muchos países han revisado los valores límite permisibles (LMP/TLV-TWA) para la sílice cristalina y han implementado tecnologías de control de polvo, como la captación local y la ventilación por extracción, para reducir la exposición en los lugares de trabajo (12).

- **Fisiopatología**

La silicosis es una enfermedad pulmonar causada por la inhalación de partículas de sílice cristalina, que resulta incapacitante, progresiva, incurable y potencialmente letal. La sílice respirable, debido a su tamaño ($<5 \mu\text{m}$), puede penetrar profundamente en los alvéolos, donde se realiza el intercambio gaseoso. Este polvo se genera principalmente en actividades industriales como corte, trituración y molienda de materiales con sílice, especialmente cuarzo, y es inhalado por

trabajadores en minería, construcción, fabricación de cerámicos y procesamiento de piedras artificiales (33).

Las partículas respirables son invisibles, inodoras y no provocan una respuesta inmediata, dificultando su detección y retrasando la implementación de medidas preventivas. Una vez depositadas, los macrófagos alveolares intentan fagocitarlas; sin embargo, debido a la biopersistencia de la sílice, no logran eliminarlas completamente. Esto provoca la liberación de citoquinas inflamatorias (TNF- α , IL-1 β), factores de crecimiento (TGF- β) y especies reactivas de oxígeno, induciendo inflamación crónica, estrés oxidativo y daño tisular (33).

El tamaño, concentración y densidad de las partículas determinan la cantidad inhalada y la duración de la exposición. Cuando los macrófagos mueren, liberan sílice en el intersticio, promoviendo la activación de linfocitos T y fibroblastos, lo que aumenta la producción de colágeno. Los nódulos se transforman en estructuras fibrosas densas, reduciendo progresivamente el volumen pulmonar y la función respiratoria. La exposición crónica puede conducir a fibrosis pulmonar difusa, insuficiencia respiratoria y, en casos graves, compromiso letal de la función pulmonar (11).

- **Presentación clínica**

Desde el punto de vista clínico y anatomopatológico, la silicosis se clasifica en tres formas principales, según la intensidad y duración de la exposición, el período de latencia y la evolución clínica.

- Silicosis aguda o silicoproteínosis: se presenta tras exposiciones recientes e intensas, típicamente en ambientes cerrados o mal ventilados sin protección respiratoria, con una latencia menor a cinco años. Se caracteriza por un inicio abrupto de tos, disnea progresiva que puede evolucionar a reposo, pérdida de peso, astenia, cianosis central e insuficiencia respiratoria aguda en casos graves. La radiografía muestra una consolidación alveolar bilateral difusa, compatible con infiltrados extensos que pueden simular edema pulmonar o neumonía, y la función pulmonar evidencia patrón restrictivo severo con marcada disminución de DLCO. Histológicamente, los nódulos y alvéolos pueden llenarse de proteínas surfactantes, similar a la proteinosis alveolar. La enfermedad progresa rápidamente y con frecuencia es fatal en menos de dos años (33).
- Silicosis acelerada o subaguda: requiere de 1 a 8 años de exposición intensa y presenta una latencia de hasta 10 años. Los síntomas incluyen tos y disnea de aparición más rápida que la silicosis crónica, pero menos fulminante que la forma aguda. La radiografía revela un patrón alveolar bilateral con nódulos pulmonares, y la función pulmonar evidencia un déficit restrictivo. La gravedad de la enfermedad suele ser proporcional a la rapidez de aparición de los síntomas tras la exposición (33,34).
- Silicosis crónica: se desarrolla tras exposiciones prolongadas, usualmente superiores a 5 años, con período de latencia de 10 a 20 años. La forma simple cursa con tos seca y disnea progresiva, mientras que la forma complicada o fibrosis masiva progresiva puede aparecer incluso después de cesar la exposición. Esta última se caracteriza por tos productiva, disnea intensa,

EPOC, cor pulmonale y hemoptisis de baja cuantía. La radiografía muestra opacidades redondeadas “p”, “q” o “r” en lóbulos superiores, y en etapas avanzadas aparecen masas irregulares de fibrosis masiva progresiva, clasificadas en categorías A, B y C según la OIT (20). La tomografía computarizada de alta resolución (TCAR) permite visualizar nódulos de 2–5 mm, masas de fibrosis, adenopatías hiliares y mediastínicas, y cavitación por necrosis. Funcionalmente, se observa un patrón mixto restrictivo y obstructivo, reflejando el impacto de la enfermedad sobre la ventilación y el intercambio gaseoso (33).

- **Avances en el diagnóstico de silicosis**

El diagnóstico de silicosis y otras neumoconiosis se basa en la correlación entre la historia ocupacional del paciente y los hallazgos radiológicos. Es indispensable contar con un antecedente documentado de exposición laboral a SCR, junto con imágenes de tórax compatibles, evaluadas preferentemente según la Clasificación Internacional de Radiografías de Neumoconiosis de la OIT (20). En la práctica clínica, no se requiere de manera rutinaria de la confirmación histopatológica ni el uso de TCAR, salvo en casos complejos o atípicos. La sintomatología respiratoria puede ser ausente o inespecífica, por lo que no constituye criterio diagnóstico definitivo; la historia laboral y la evaluación radiológica son los pilares del diagnóstico (11).

Aunque esta clasificación no fue diseñada originalmente con fines diagnósticos, tanto la OIT como la normativa legal peruana la emplean para este propósito. La clasificación se centra en la identificación de opacidades pulmonares pequeñas,

consideradas hallazgos característicos de neumoconiosis, subdivididas en opacidades redondas (“p” <1.5 mm, “q” 1.5–3 mm, “r” >3 mm) y opacidades irregulares (“s” <1.5 mm, “t” 1.5–3 mm, “u” >3 mm). La profusión se refiere a la densidad de opacidades pequeñas distribuidas en los campos pulmonares y se clasifica en cuatro grados (0 a 3), donde “0” indica ausencia de opacidades y “3” representa la mayor densidad. Cada categoría principal puede subdividirse en subcategorías representadas en forma de fracción (por ejemplo: 1/0, 1/1, 1/2), permitiendo así una valoración semicuantitativa más precisa del compromiso pulmonar. La lectura debe realizarse con radiografías estándar de la OIT por profesionales entrenados, garantizando interpretación homogénea y reproducible(20). En Perú, el diagnóstico radiológico oficial se establece cuando la profusión alcanza al menos la categoría 1, subcategoría 1/1.

La TCAR ha demostrado ser más sensible y específica que la radiografía convencional, permitiendo detectar alteraciones pulmonares tempranas y detallando la arquitectura parenquimatosa y pleural. Para su interpretación se utilizan criterios adaptados de la OIT, como los propuestos por la ICOERD. La TCAR permite identificar nódulos bien definidos de 2 a 5 mm, distribuidos bilateralmente con predominio en los lóbulos superiores, con disposición centrolobulillar, subpleural o aleatoria. En algunos casos, estos nódulos pueden presentar calcificación. En fases avanzadas, se observan masas irregulares de fibrosis masiva progresiva, adenopatías hiliares y mediastínicas, algunas con calcificación en “cáscara de huevo”, y cavitación secundaria a necrosis isquémica(11).

La evaluación funcional incluye capacidad vital forzada (FVC), volumen espiratorio forzado en el primer segundo (FEV1) y capacidad de difusión de monóxido de carbono (DLCO). Estas pruebas pueden permanecer normales en etapas iniciales, deteriorándose progresivamente con el avance de la enfermedad, por lo que no son criterios diagnósticos definitivos por sí solas (11).

Desde el punto de vista histopatológico, la confirmación no es necesaria de rutina, pero puede ser útil en casos atípicos o con discrepancias entre hallazgos clínicos y radiológicos. Los nódulos silicóticos, firmes y de color gris pizarra, varían entre milímetros y 1 cm, y pueden fusionarse en fibrosis confluyente o silicosis conglomerada (>2 cm). Microscópicamente presentan colágeno hialinizado en espiral, macrófagos rodeando el centro fibrótico, calcificación u osificación en lesiones antiguas y acumulación intraalveolar de material eosinofílico en exposiciones extremas, simulando proteinosis alveolar (11,33).

- **Normativa Peruana sobre Silicosis**

En el Perú, la silicosis se considera una enfermedad profesional y su diagnóstico se realiza siguiendo un conjunto de normas que establecen criterios específicos para su identificación y manejo.

- **Marco Normativo**

La silicosis se encuentra regulada dentro de un marco legal específico. La Resolución Ministerial N.º 480-2008/MINSA aprueba la “Norma Técnica de Salud que incluye el Listado de Enfermedades Profesionales”, incorporando la silicosis en el Grupo 4, correspondiente a las enfermedades

causadas por la inhalación de sustancias o agentes no comprendidos en otros apartados (35).

Asimismo, la Resolución Suprema N.º 014-93-TR establece los lineamientos técnicos y administrativos para la evaluación y diagnóstico de las neumoconiosis, adoptando la Clasificación Radiográfica Internacional de la OIT (36). Esta norma constituye el marco regulador para la detección, registro y vigilancia epidemiológica de la silicosis, y es aplicable tanto a los trabajadores expuestos a SCR, como a aquellos del sector construcción, minería y manufactura (20).

- **Criterios diagnósticos**

En el contexto peruano, el diagnóstico de la silicosis se basa en una evaluación integral que incluye tres componentes principales: la historia ocupacional detallada, que documenta la exposición del trabajador a polvo que contenga sílice libre cristalina, especialmente en actividades de minería, construcción, cantería y manufactura; la evaluación radiológica, mediante radiografía de tórax interpretada conforme a los criterios de la OIT, que permite identificar las opacidades nodulares características de la enfermedad, y en casos donde la radiografía no es concluyente, puede emplearse TCAR para una evaluación más precisa; y las pruebas funcionales respiratorias, utilizadas para valorar la capacidad pulmonar y detectar alteraciones ventilatorias asociadas a la exposición crónica a sílice (36).

- **Procedimiento de Diagnóstico**

Las radiografías deben ser evaluadas por médicos con formación especializada en la interpretación de placas de tórax siguiendo los criterios de la OIT. En ese sentido, el Instituto Nacional de Salud (INS) lleva un registro de los profesionales capacitados para este propósito (37). Asimismo, los casos confirmados de silicosis deben ser notificados al Registro Único de Neumoconiosis de origen profesional, con el objetivo de elaborar estadísticas nacionales y realizar la vigilancia epidemiológica de la enfermedad (38).

- **Vigilancia epidemiológica**

El MINSA, a través de la Dirección de Salud Ocupacional de la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) y en coordinación con el Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo (MTPE), implementó el “Plan Nacional para la Prevención y Erradicación de la Silicosis en el Perú desde el Sector Salud” (39).

Este plan tiene como objetivo general reducir y, posteriormente, erradicar la morbilidad y mortalidad por silicosis mediante la disminución de la exposición ocupacional a sílice cristalina y el fortalecimiento de las acciones preventivas y de vigilancia sanitaria.

Entre sus principales líneas de acción se incluyen la implementación de un sistema de vigilancia sanitaria específica de la silicosis, el diagnóstico médico precoz con lectura radiográfica estandarizada, el monitoreo ambiental de los niveles de sílice en los lugares de trabajo, la aplicación de

programas de protección respiratoria y el seguimiento clínico de los casos diagnosticados (39).

Asimismo, el plan promueve la educación, difusión y capacitación interinstitucional, con el fin de sensibilizar a los sectores involucrados estatales, laborales y académicos sobre la importancia de la prevención y erradicación de la silicosis como problema de salud pública (39).

Este esfuerzo nacional se enmarca dentro de las metas internacionales del Programa Global de Eliminación de la Silicosis (OIT/OMS), que busca erradicar esta enfermedad como problema de salud ocupacional antes del año 2030(12).

IV.5.3.2. Silicotuberculosis

La silicotuberculosis (silico-TB) es una grave combinación de silicosis y TBC, causadas por la inhalación de polvo de sílice cristalina, lo que representa un serio riesgo ocupacional global. Los pacientes con silicosis a menudo desarrollan complicaciones clínicas adicionales, siendo la más significativa la TBC. La silicosis es el segundo factor de riesgo más importante para la enfermedad tuberculosa, después de la infección por VIH (40).

La TBC es una enfermedad infecciosa causada por *Mycobacterium tuberculosis* (MTB), que generalmente afecta los pulmones, pero también puede extenderse a otros órganos (41). La incidencia de TBC en pacientes con silicosis es 21.8 veces mayor que en individuos sanos. La silico-TB está en aumento en áreas endémicas, como India, y se ve agravada por la falta de recursos médicos, educación y medidas preventivas en países de ingresos bajos y medios (40).

Agencias como la OMS y la OIT están trabajando en programas de concientización y prevención para eliminar la silicosis para el 2030 (20). Sin embargo, estos esfuerzos han sido limitados debido a la dificultad del diagnóstico diferencial entre la silicosis y la TBC(41). Los síntomas comunes, como tos, disnea, expectoración excesiva y dolor en el pecho, a menudo dificultan el diagnóstico de TBC en pacientes con silicosis (40). Por lo tanto, es fundamental un conocimiento integral de los síntomas clínicos, la prevención, el tratamiento y el diagnóstico para reducir la carga de la silico-TB.

- **Fisiopatología**

El mecanismo fisiopatológico de la silicotuberculosis (silico-TB) aún no se comprende completamente. Sin embargo, se sabe que la presencia de partículas de sílice en los pulmones afecta gravemente la capacidad del sistema inmunológico, ya que desencadena la respuesta inmune tipo 2. Esta exposición reduce la activación de las células dendríticas e interrumpe la respuesta inflamatoria, debilitando los sistemas antibacterianos (40).

La sílice también aumenta la respuesta inmune de las células Th2 y los macrófagos M2, pero suprime la respuesta inmune tipo 1, que es crucial para prevenir la TBC. Además, regula a la baja el receptor tipo Toll 2, lo que incrementa la susceptibilidad a la TBC(40).

El daño pulmonar causado por el sílice estimula la liberación de ADN extracelular y activa el factor de transcripción STING. Este factor aumenta la producción de interferón y potencia el ADN en las bacterias de la TBC, lo que agrava la infección al incrementar las reacciones inmunológicas tipo 2 y reducir las reacciones tipo 1(40).

La respuesta a la exposición a la sílice y a la TBC también está influenciada por polimorfismos genéticos del factor de necrosis tumoral alfa, la proteína macrófaga asociada a la resistencia natural 1 (NRAMP1) y la sintasa de óxido nítrico inducible (iNOS) en los macrófagos. Estos tres genes están vinculados con la patogénesis de la enfermedad.

Por lo tanto, cuando se está expuesto a partículas de sílice, *Mycobacterium tuberculosis* (MTB) se reproduce más rápidamente dentro de las células del huésped y escapa de los macrófagos (40).

- **Epidemiología**

Las personas con silicosis tienen mayor riesgo de TBC, pero los estudios sobre silico-TB son limitados, especialmente en países con recursos limitados o en áreas endémicas. La falta de vigilancia y recursos dificulta conocer su verdadera incidencia, especialmente en países en desarrollo, donde el incumplimiento de normas de seguridad y la falta de educación contribuyen a su alta prevalencia (40). Los pacientes con silicosis tienen 2.8 veces más probabilidades de desarrollar TBC pulmonar y 3.7 veces más probabilidades de desarrollar TBC extrapulmonar en comparación con aquellos sin silicosis (40). Se cree que la exposición a la sílice está asociada con un riesgo elevado de TBC pulmonar y extrapulmonar. Este riesgo persiste durante años después de que termina la exposición, se intensifica a medida que progresa la silicosis y es mayor en individuos con formas agudas y aceleradas de la enfermedad.

Un estudio transversal realizado en 15 minas de arenisca en Jodhpur, India, encontró que el 3.7% de los trabajadores tenían silicosis y el 7.4% silico-TB. La edad promedio de los mineros fue de 39.13 ± 11.09 años. Se observó que el 89.2%

de los individuos presentó una espirometría anormal; el 42%, radiografías de tórax anormales; el 10%, TBC junto con enfisema; y el 4.3%, derrame pleural. Es importante destacar que el 30% de los mineros que trabajaron más de diez años desarrollaron TBC (42).

Tanto la silicosis como la TBC pulmonar están claramente asociadas con la exposición a la sílice cristalina, como lo han verificado estudios adicionales. Un estudio realizado en los Estados Unidos mostró que un mayor riesgo de silico-TB estaba relacionado con una mayor duración de la exposición a la sílice. Las personas expuestas durante más tiempo tenían 1.47 veces más probabilidades de desarrollar TBC que aquellas no expuestas (42)

- **Indicaciones clínicas**

Aunque la tos persistente, fiebre, pérdida de peso o hemoptisis son síntomas característicos de la TBC pulmonar, a menudo es muy difícil detectar la TBC activa cuando coincide con la silicosis, especialmente en las primeras etapas, ya que los síntomas no son sugestivos y los cambios radiológicos pueden ser indistinguibles de los causados por la silicosis preexistente. La aparición rápida de nuevas opacidades radiográficas, derrame pleural o excavaciones debe alertar sobre la posible TBC (42).

La TBC extrapulmonar afecta principalmente la pleura, el pericardio y los ganglios linfáticos, siendo menos común en el cerebro, la columna y los tejidos blandos. La TBC pleural puede ser asintomática y solo se detecta en radiografías rutinarias (42). La silico-TB afecta no solo al parénquima pulmonar, sino también a las arterias y venas. La circulación sanguínea se ve alterada por degeneraciones de la íntima y la hialina, así como por un aumento de la fibrosis en los vasos sanguíneos. Además,

se suelen observar cavidades tuberculosas dentro de los ganglios linfáticos silicificados, los cuales son difíciles de alcanzar por los agentes quimioterapéuticos. El daño fibroso puede evitar que las cavidades se colapsen y cicatricen (40).

- **Indicaciones diagnósticas**

Los pilares diagnósticos de la TBC pulmonar en pacientes con silicosis incluyen radiografías de tórax y pruebas de esputo, siendo las radiografías útiles para detectar TBC antes de los síntomas clínicos. Si ambos son negativos, una tomografía computarizada (TC) puede ser útil (42). El cribado radiográfico rutinario es más eficiente que el examen de esputo para la detección temprana de la TBC (43). La cavitación es un signo importante de silico-TB, aunque también puede ser causada por alteraciones isquémicas debido a la silicosis (43). En caso de fibrosis severa, se recomienda realizar broncoscopia con lavado broncoalveolar cuando no es posible realizar una biopsia transbronquial.

El deterioro de la función pulmonar, especialmente la obstrucción de las vías respiratorias, está asociado con silico-TB y se evalúa mediante espirometría, tanto al diagnóstico como durante el seguimiento. Los inmunodiagnósticos incluyen la detección de un aumento de IgE, IgG, fibronectina, marcadores CD4+ y CD20+, y una disminución en la concentración del antígeno mucinoso 3EG5(42).

IV.6. Estrategias de prevención

Las enfermedades respiratorias laborales, como la silicosis, siguen siendo un desafío en diversas industrias, especialmente debido a la falta de supervisión y el incumplimiento de normativas. En 1995, la OIT y la OMS lanzaron el "Programa Global para la Eliminación de la Silicosis", con el objetivo de reducir la exposición al polvo de sílice y mejorar las condiciones laborales. Sin embargo, a pesar de las

políticas de salud pública implementadas, los casos de silicosis siguen siendo elevados, debido en gran parte a la falta de un control adecuado y a la resistencia a adoptar las mejores prácticas preventivas (12).

Es fundamental analizar las tendencias temporales y la incidencia de la silicosis para desarrollar estrategias más efectivas. Esto permitirá optimizar la distribución de los recursos y enfocar los esfuerzos preventivos en las zonas más susceptibles. Un ejemplo de éxito es el Sistema de Notificación Directa de Enfermedades Ocupacionales, implementado en China en 2006. Este sistema ha permitido una detección temprana de enfermedades como la silicosis y la adopción de medidas preventivas oportunas, reduciendo la exposición prolongada y previniendo nuevos casos (45).

Además, modelos internacionales como el de Australia, enfocado en la vigilancia, diagnóstico y tratamiento de enfermedades respiratorias relacionadas con el uso de asbesto, ofrecen un enfoque efectivo que puede adaptarse a otros países con alta exposición al polvo de sílice y otros polvos nocivos (45). En 2023, el Observatorio Internacional de Neumoconiosis se formó para aumentar la conciencia sobre los efectos del polvo neumoconiógeno, particularmente el polvo de sílice, en los trabajadores, y para generar datos que respalden políticas y estrategias preventivas a nivel global (46).

IV.6.1 Protocolos de Prevención

Los protocolos de salud ocupacional para la prevención de la silicosis incluyen medidas de control ambiental, monitoreo médico y capacitación del personal. Entre los principales protocolos, se destacan los siguientes:

IV.6.1.1. Evaluación y control de la exposición

- **Identificación de fuentes de exposición a polvos neumoconiógenos**

Para prevenir la silicosis, es esencial realizar una evaluación exhaustiva de las fuentes de exposición al polvo de sílice en los ambientes laborales. Esto implica estudios ambientales detallados y la toma de muestras de aire en diversas zonas del lugar de trabajo, las cuales deben ser analizadas en laboratorios especializados. Además, se utilizan dispositivos de monitoreo continuo como gravímetros de filtro y contadores de partículas en tiempo real para garantizar que los sistemas de ventilación y extracción sean efectivos (46).

Según las normativas internacionales (OSHA, NIOSH), el límite máximo permisible de exposición para la sílice respirable es de 0.025 mg/m³, calculado como promedio ponderado en una jornada laboral de 8 horas (15,16).

Estos límites, definidos por organizaciones como la ACGIH, se usan como referencia global para regular la exposición ocupacional y asegurar la protección respiratoria de los trabajadores frente al polvo de sílice (17).

- **Implementación de medidas de control de polvo de sílice**

Dado que la producción de polvo de sílice es inevitable en actividades como el corte o trituración de rocas, las estrategias preventivas se enfocan en minimizar la exposición. Por ejemplo, en sectores industriales de gran escala, como la minería o la construcción de túneles, se implementan

cabinas cerradas con aire filtrado que permiten a los trabajadores operar remotamente y reducir su exposición directa.

Para aquellos que deben trabajar cerca de fuentes de polvo, como en el corte de piedra, arenado localizado o la remoción de sílice (por ejemplo, en la minería y construcción), se recomienda utilizar técnicas húmedas y EPP adecuados. No obstante, el uso de respiradores debe ser un complemento a la reducción de la concentración de polvo de sílice en el aire, no un reemplazo (47).

El control de la contaminación ambiental en los lugares de trabajo se basa en la instalación de sistemas de ventilación adecuados, tanto locales como generales, y de sistemas de extracción de polvo. Es fundamental realizar un mantenimiento constante de los conductos de ventilación en máquinas de molienda, pulido y bandas de acabado, asegurando su eficacia en la eliminación de las partículas suspendidas (47).

La instalación de sistemas de ventilación mecánica con filtros de alta eficiencia y sistemas de extracción localizada ayuda a disminuir la concentración de partículas de sílice en el aire. Además, se emplean métodos de control del polvo, como la aplicación de agua o productos químicos, para evitar la dispersión de partículas en el ambiente (47).

Adicionalmente se deben sellar las fuentes de polvo y establecer áreas restringidas en zonas de alto riesgo para minimizar la exposición a la sílice.

- **Jerarquía de Control de Riesgos para la Silicosis**

Al controlar los polvos, se utiliza la jerarquía de control de riesgos:

- Eliminación del uso de material peligroso: En la construcción y manufactura, una de las medidas más efectivas es eliminar completamente el uso de materiales que contienen sílice. Esto implica dejar de usar estos productos peligrosos para prevenir la exposición al polvo y reducir los riesgos de silicosis.
- Sustitución por una forma más segura del producto: Cuando no es posible eliminar completamente el material con sílice, se debe optar por versiones más seguras, como pastas, líquidos o granulados, en lugar de polvos secos. Esta sustitución reduce la cantidad de partículas en el aire y minimiza la inhalación de sílice por parte de los trabajadores. Entre las alternativas disponibles se encuentran materiales como espumas de poliuretano, fibras de celulosa, harinas de relleno, y ciertos plásticos y telas de sílice amorfa, que no conllevan riesgos respiratorios (47).
- Modificación del proceso para reducir la emisión de polvo: Ajustar los procedimientos de trabajo para minimizar la generación de polvo es una estrategia clave. Esto incluye el uso de técnicas húmedas en actividades como corte y perforación, la automatización de procesos para reducir la manipulación manual de materiales, y la mejora de los métodos de limpieza, como el uso de aspiradoras con filtros HEPA en lugar de barrer en seco, lo cual ayuda a evitar la dispersión de partículas de sílice en el aire (48).

- Encerramiento del proceso o extracción localizada de polvo: Aislar las fuentes de emisión de polvo mediante cabinas selladas o sistemas de ventilación con extracción localizada es fundamental. Estos sistemas capturan el polvo en su origen, antes de que se disperse en el aire, lo que evita que los trabajadores inhalen partículas peligrosas.
- Reducción del número de trabajadores expuestos: Disminuir la exposición de los trabajadores mediante la reducción de su número en zonas de alto riesgo. Esto se puede lograr a través de rotaciones laborales, la instalación de barreras físicas y la automatización de tareas peligrosas, lo que reduce la exposición prolongada al polvo de sílice y contribuye a prevenir enfermedades pulmonares ocupacionales, como la silicosis (47).
- Brindar EPP

- **Uso obligatorio de EPP**

Para prevenir la silicosis, es fundamental el uso adecuado de EPP. Los trabajadores deben contar con guantes, ropa resistente al polvo, gafas de seguridad y, en entornos con alta concentración de sílice, protección respiratoria especializada. Es esencial mantener buenas prácticas de higiene personal, como evitar consumir alimentos o bebidas en áreas de trabajo contaminadas y asegurarse de utilizar instalaciones adecuadas para el lavado de manos y rostro antes de comer o al finalizar la jornada laboral (47).

Los respiradores o mascarillas, aprobados por organismos internacionales de salud ocupacional como el NIOSH, son necesarios para los trabajadores expuestos al polvo de sílice. Estos respiradores deben estar equipados con filtros N95, P100 u otros equivalentes, capaces de retener partículas finas de sílice. Su función principal es filtrar las partículas dañinas presentes en el aire antes de que ingresen al sistema respiratorio. Para asegurar su eficacia, es crucial que el aire contenga al menos un 17 % de oxígeno, que las sustancias peligrosas sean conocidas y detectables, y que los trabajadores sean capacitados en el ajuste y mantenimiento correcto de sus equipos (49).

Además, deben realizarse auditorías y revisiones periódicas para asegurar que el personal utilice de forma constante y adecuada su EPP, asegurando así una barrera efectiva contra la exposición al polvo de sílice.

IV.6.1.2. Vigilancia médica y monitoreo de la salud para la silicosis

El monitoreo de la salud de los trabajadores expuestos al polvo de sílice es esencial para la prevención y detección temprana de enfermedades pulmonares, como la silicosis. La vigilancia médica incluye un seguimiento continuo de los trabajadores, que implica evaluaciones clínicas y pruebas adicionales para identificar alteraciones en la función respiratoria antes de que la enfermedad avance (50).

Antes de que un trabajador inicie labores en un entorno con exposición al polvo de sílice, es crucial realizar un examen médico preocupacional. Este debe incluir una evaluación detallada de la historia clínica, pruebas de función pulmonar y radiografías de tórax, lo que establece un punto de referencia para monitorear la salud respiratoria del trabajador durante su exposición (51).

A lo largo del tiempo, se deben realizar evaluaciones periódicas para monitorear la evolución de la salud pulmonar. Estas evaluaciones incluyen pruebas de espirometría, radiografías de tórax y análisis de gases en sangre. La frecuencia de estos controles debe ajustarse según el nivel de exposición y el tiempo que el trabajador haya pasado en condiciones de riesgo. Los cuestionarios de salud ocupacional también son herramientas útiles para identificar síntomas tempranos que podrían pasar desapercibidos en exámenes médicos generales (52).

Es fundamental contar con un sistema centralizado para almacenar los historiales médicos de los trabajadores expuestos al polvo de sílice. Esto permite analizar las tendencias y patrones de enfermedad de manera continua. La detección temprana de cambios en la función pulmonar facilita la implementación de medidas preventivas, la aplicación de ajustes en las condiciones laborales y, si es necesario, la reubicación de los trabajadores para evitar el avance de la enfermedad (53,54).

La vacunación también juega un papel clave en la vigilancia médica. Para prevenir complicaciones respiratorias secundarias, se recomienda la vacunación contra la influenza y el neumococo, especialmente en trabajadores con exposición crónica al polvo de sílice. En sectores donde exista exposición a agentes biológicos, se pueden considerar inmunizaciones adicionales, dependiendo de los riesgos específicos del sector (55).

El acceso a tratamiento y rehabilitación es fundamental para los trabajadores que desarrollan enfermedades respiratorias debido a la exposición al polvo de sílice. La detección temprana permite iniciar estrategias de rehabilitación, como fisioterapia pulmonar, entrenamiento en técnicas de respiración y programas de ejercicio

adaptado para mejorar la capacidad funcional del trabajador. Además, el apoyo psicológico y la orientación laboral son esenciales para ayudar a los trabajadores a adaptarse a nuevas condiciones de vida y trabajo tras desarrollar enfermedades pulmonares (56).

IV.6.1.3. Capacitación y Concienciación

La capacitación y concienciación de los trabajadores son esenciales para prevenir la silicosis y otras enfermedades respiratorias laborales. Estas estrategias ayudan a reducir los riesgos de exposición al polvo de sílice y fomentan una cultura de seguridad en los lugares de trabajo. La implementación de programas educativos, el uso adecuado de EPP y la participación activa de los trabajadores en la identificación de riesgos son fundamentales para disminuir la incidencia de la silicosis.

Es crucial crear programas educativos que aborden los riesgos derivados de la exposición al polvo de sílice y las acciones preventivas necesarias. Estos programas deben incluir contenido teórico y práctico, adaptado a las necesidades de cada sector. Las capacitaciones deben ser dirigidas por profesionales en salud ocupacional y actualizadas periódicamente para reflejar los avances en la prevención de enfermedades respiratorias (57).

Es esencial instruir a los trabajadores sobre cómo seleccionar, usar y mantener adecuadamente las mascarillas y respiradores. Además, estos deben comprender la importancia de ajustar los respiradores y reemplazar los filtros según las recomendaciones del fabricante.

Fomentar una cultura de seguridad requiere la participación activa de los trabajadores en la identificación y reporte de riesgos. Establecer canales de

comunicación, como reuniones periódicas de seguridad o buzones de sugerencias, facilita la participación de los empleados en la mejora del entorno laboral. Asimismo, los empleadores deben motivar a los trabajadores a seguir las normativas y participar en actividades preventivas. Desarrollar material educativo claro y accesible, como manuales, carteles informativos y videos, es clave para sensibilizar sobre la prevención de la silicosis. Este material debe estar disponible en diversos formatos y en el idioma principal de los trabajadores. En este contexto, los empleadores deben motivar a los trabajadores a seguir las normativas y participar en las actividades que contribuyan a prevenir la silicosis.

Para evaluar la efectividad de los programas, se debe recopilar información sobre la asistencia y participación en las capacitaciones, además de realizar pruebas de conocimientos antes y después de las sesiones. Esto permitirá medir el nivel de aprendizaje y asegurar que los trabajadores comprendan las medidas preventivas (58).

IV.6.2. Programas de Salud Ocupacional

Los programas de salud ocupacional destinados a la prevención de la silicosis deben ser integrales y sostenibles. La implementación de normas y regulaciones en salud ocupacional es clave para prevenir la silicosis, ya que estas regulaciones establecen los requisitos mínimos que las empresas deben seguir para proteger la seguridad y la salud de los trabajadores expuestos al polvo de sílice. Es esencial adoptar estándares internacionales, como los de la OIT, que ofrecen directrices basadas en la evidencia científica más actual. Cada país debe desarrollar regulaciones locales

adaptadas a sus condiciones laborales, asegurando que sean de cumplimiento obligatorio (59).

Para garantizar el cumplimiento de las normativas, se deben realizar inspecciones y auditorías periódicas, tanto programadas como aleatorias. Si se detecta algún incumplimiento, las empresas deben ser sancionadas y deben implementarse planes de corrección inmediata. Las empresas también deben desarrollar políticas internas para minimizar la exposición al polvo de sílice, garantizar el suministro adecuado de EPP y asegurar el acceso a monitoreos médicos. Además, es fundamental capacitar a empleadores y trabajadores sobre sus derechos y responsabilidades en salud ocupacional, así como sobre los procedimientos de seguridad y las consecuencias de incumplir las normativas (59).

El seguimiento del impacto de las normativas es esencial para evaluar su efectividad. Se deben establecer indicadores de salud ocupacional que midan la reducción de la exposición al polvo de sílice y la disminución de casos de silicosis. Estos datos permitirán ajustar las normativas y fortalecer las estrategias de prevención.

IV.6.2.1 Implementación de normas y regulaciones

El Plan Nacional para la Erradicación de la Silicosis en Perú al 2030 tiene como objetivo reducir y prevenir la exposición a la sílice cristalina en trabajadores, especialmente en sectores como minería y construcción. La metodología se basa en la implementación de medidas preventivas, monitoreo ambiental y vigilancia de la salud. Se propone establecer regulaciones más estrictas, mejorar la educación y capacitación de los trabajadores para minimizar los riesgos de silicosis. Se espera

reducir significativamente los casos de esta enfermedad mediante un control efectivo y la prevención en los entornos laborales (39).

V. CONCLUSIONES

1. La exposición a sílice cristalina continúa siendo un problema de salud pública. A pesar de los avances normativos, la silicosis y otras enfermedades asociadas siguen en aumento, especialmente en construcción.
2. La carga epidemiológica evidencia un riesgo elevado en actividades breves pero de alta intensidad, como corte, perforación, demolición y manipulación de piedra artificial, donde las concentraciones suelen superar los límites permisibles.
3. La sílice cristalina produce efectos oncológicos y no oncológicos. Se confirma su relación con cáncer de pulmón (IARC Grupo 1), silicosis y silicotuberculosis, esta última como la complicación más grave.
4. El diagnóstico temprano requiere sistemas de vigilancia médica estructurados basados en historia ocupacional y radiografía OIT.
5. Las estrategias de prevención deben fundamentarse en la jerarquía de controles. Los controles de ingeniería son los más eficaces (60–95 % de reducción), mientras que el EPP constituye una medida complementaria. La prevención integral incluye evaluación ambiental, controles administrativos y programas formales de protección respiratoria.
6. La gestión institucional es determinante para reducir el riesgo. El cumplimiento de la normativa demanda supervisión, auditorías, políticas internas y programas de salud ocupacional alineados con estándares OIT–OMS.

7. La vigilancia epidemiológica debe fortalecerse para focalizar intervenciones. El análisis de tendencias e incidencia permite priorizar sectores vulnerables y reforzar controles en actividades críticas.

VI. RECOMENDACIONES

1. Priorizar controles de ingeniería como medida principal

Implementar VEL, técnicas de supresión húmeda, sistemas de filtración HEPA y cabinas presurizadas; evitar el uso del EPP como único mecanismo de control.

2. Fortalecer la evaluación higiénica y la vigilancia médica ocupacional

Realizar muestreos periódicos de SCR, monitoreo en operaciones de alta generación de polvo y aplicar espirometría, radiografía bajo clasificación OIT y TCAR para detección temprana de daño pulmonar.

3. Fortalecer los sistemas de supervisión y el cumplimiento normativo

Incrementar inspecciones, auditorías de seguridad y fiscalización en procesos críticos (corte, perforación, demolición y manipulación de piedra artificial) para garantizar el cumplimiento de los límites de exposición.

4. Implementar programas continuos de capacitación

Capacitar de manera sostenida a trabajadores y supervisores en identificación de peligros, control del polvo, uso correcto de respiradores y procedimientos operativos seguros.

5. Consolidar la vigilancia epidemiológica y la gestión institucional del riesgo

Optimizar el registro y análisis de casos, y garantizar que las empresas incorporen y cumplan las metas del Programa Global de Eliminación de la Silicosis al 2030 dentro de sus sistemas de Seguridad y Salud Ocupacional.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pavan C, Delle P, et al. The puzzling issue of silica toxicity: are silanols bridging the gaps between surface states and pathogenicity? Part Fibre Toxicol. 2019 Aug 16;16(1):32. doi: 10.1186/s12989-019-0315-3.
2. Merget R, Bauer T, et al. Health hazards due to the inhalation of amorphous silica. Health hazards due to the inhalation of amorphous silica. Arch Toxicol. 2002 Jan;75(11-12):625-34. doi: 10.1007/s002040100266.
3. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Arsenic, Metals, Fibres and Dusts. Lyon (FR): International Agency for Research on Cancer; 2012. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK304370/>
4. Michael K, Chanidapa W. Managing Silicosis in the United States: How I Do It. CHEST Pulmonary, Volume 2, Issue 4. 2024. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949789224000692>
5. Hoy RF, Chambers DC. Silica-related diseases in the modern world. Allergy. 2020 Nov;75(11):2805-2817. doi: 10.1111/all.14202. Epub 2020 Feb 15. PMID: 31989662
6. McLean D, Glass B, et al. Exposure to respirable crystalline silica in the construction industry-do we have a problem? N Z Med J. 2017 Dec 1;130(1466):78-82. PMID: 29197904.
7. Crawford J, Sanyal S, et al. Accelerated silicosis in sandblasters: Pathology, mineralogy, and clinical correlates. Am J Ind Med. 2024 Mar;67(3):179-199. doi: 10.1002/ajim.23561.

8. Rey J, Martínez C, et al. Occupational exposure to respirable crystalline silica and lung cancer: a systematic review of cut-off points. *Environ Health*. 2023 Nov 30;22(1):82. doi: 10.1186/s12940-023-01036-0.
9. International Agency for Research on Cancer. Silica dust, crystalline, in the form of quartz or cristobalite. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 100C.IARC; 2012. Available from: <https://www.iarc.who.int/>
10. Jacobs N, E Zisook R, et al. Reported exposures to respirable crystalline silica during construction tasks and guidance for harmonizing future research. *J Occup Environ Hyg*. 2024 Aug;21(8):602-622. doi: 10.1080/15459624.2024.2357715.
11. Churg A, Muller N. Update on Silicosis. *Surg Pathol Clin*. 2024 Jun;17(2):193-202. doi: 10.1016/j.path.2023.11.005.
12. World Health Organization; International Labour Organization. Global Programme for the Elimination of Silicosis (GPES) [Internet]. Geneva: WHO/ILO; 2006. Available from: <https://www.ilo.org/es/resource/salud-en-el-trabajo-silicosis>
13. León A, Manuel J, et al. Compositional and structural analysis of engineered stones and inorganic particles in silicotic nodules of exposed workers. Part Fibre Toxicol. 2021 Nov 22;18(1):41. doi: 10.1186/s12989-021-00434-x.
14. Centers for Disease Control and Prevention. Silica, crystalline (as respirable dust). NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards. Atlanta (GA): CDC/NIOSH; 2019 Oct 30. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0684.html>

15. Occupational Safety and Health Administration. Silica, Crystalline – Health Effects [Internet]. Washington: OSHA; [cited 2025 Mar 15]. Available from: <https://www.osha.gov/silica-crystalline/health-effects>
16. Centers for Disease Control and Prevention. Silica, crystalline (as respirable dust). NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards [Internet]. Atlanta: NIOSH/CDC; 2019 Oct 30 [cited 2025 Mar 10]. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0684.html>
17. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Silica, crystalline — α -Quartz and Cristobalite [Internet]. Cincinnati: ACGIH; 2025 [cited 2025 Mar 10]. Available from: <https://www.acgih.org/silica-crystalline-a-quartz-and-cristobalite/>
18. Decreto Supremo N.º 015-2005-SA. Reglamento sobre Valores Límite Permisibles para Agentes Químicos en el Ambiente de Trabajo [Internet]. Lima: Ministerio de Salud; 4 Jul 2005 [cited 2025 Apr 19]. Available from: <https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/252380-015-2005-sa>
19. Resolución Ministerial N.º 733-2024-MINSA. Actualización de los Anexos I, II y III del Reglamento sobre Valores Límite Permisibles para Agentes Químicos en el Ambiente de Trabajo [Internet]. Lima: Ministerio de Salud; 28 oct 2024 [cited 2025 Aug 15]. Available from: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/7141990/6130172-resolucion-ministerial-n-733-2024-minsa.pdf?v=1730152429> Gobierno del Perú
20. International Labour Organization. *Guidelines for the use of the ILO International*

- Classification of Radiographs of Pneumoconioses* [Internet]. Geneva: ILO; 2022 [cited 2025 Sep 15]. Available from: https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@ed_dialogue/@lab_admin/documents/publication/wcms_867859.pdf
21. Nowak J, Lipińska A, et al. Silicosis after short-term exposure. *Occup Med (Lond)*. 2023 Feb 14;73(1):33-35. doi: 10.1093/occmed/kqac113.
 22. Requena M, Alarcón R, et al. Association between Crystalline Silica Dust Exposure and Silicosis Development in Artificial Stone Workers. *Int J Environ Res Public Health*. 2021 May 25;18(11):5625. doi: 10.3390/ijerph18115625.
 23. Guillén A, León A, et al. La necesidad de un Observatorio Internacional de Neumoconiosis en 2025. *Arch Prev Riesgos Laborales*. el 15 de enero de 2025;28(1):89–98.
 24. Gobierno de la Nación Argentina. Guía de actuación y diagnóstico de enfermedades profesionales: Neumoconiosis laboral 07 [Internet]. Buenos Aires: Superintendencia de Riesgos del Trabajo; 2018 [cited 2025 Nov 15]. Available from: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/guia_de_actuacion_y_diagnostico_-_neumoconiosis_laboral_0.pdf
 25. Cardona A, Palacio M, et al. Silicoproteinosis en paciente minero en Colombia. Reporte de caso. *Med Lab*. el 5 de mayo de 2023;27(2):123–9.
 26. Akbar F, Brillhart L. Respirable crystalline silica dust exposure during concrete finishing (grinding) using hand-held grinders in the construction

- industry. *Ann Occup Hyg.* 2002 Apr;46(3):341-6. doi: 10.1093/annhyg/mef043.
27. Si S, Carey N , et al. The Australian Work Exposures Study: Prevalence of Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica. *Ann Occup Hyg.* 2016 Jun;60(5):631-7. doi: 10.1093/annhyg/mew007.
28. Rey J, Martínez C, et al. Occupational exposure to respirable crystalline silica and lung cancer: a systematic review of cut-off points. *Environ Health.* 2023 Nov 30;22(1):82. doi: 10.1186/s12940-023-01036-0.
29. Mundt K, Thompson W, et al. Systematic review of the epidemiological evidence of associations between quantified occupational exposure to respirable crystalline silica and the risk of silicosis and lung cancer. *Front Public Health.* 2025 Feb 28;13:1554006. doi: 10.3389/fpubh.2025.1554006.
30. Steenland K, Mannetje A, et al. International Agency for Research on Cancer. Pooled exposure-response analyses and risk assessment for lung cancer in 10 cohorts of silica-exposed workers: an IARC multicentre study. *Cancer Causes Control.* 2001 Nov;12(9):773-84. doi: 10.1023/a:1012214102061.
31. Lai H, Liu Y, et al. Combined effect of silica dust exposure and cigarette smoking on total and cause-specific mortality in iron miners: a cohort study. *Environ Health.* 2018 May 9;17(1):46. doi: 10.1186/s12940-018-0391-0.
- 32.
32. Bell L, Mazurek J. Trends in Pneumoconiosis Deaths. United States, 1999–2018. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep* 2020;69:693–698. DOI: <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm6923a1>.

33. Krefft S, Wolff J, et al. Silicosis: An Update and Guide for Clinicians. *Clin Chest Med.* 2020 Dec;41(4):709-722. doi: 10.1016/j.ccm.2020.08.012. PMID: 33153689.
34. Smith J, Doe A, et al. Long-term exposure to crystalline silica and respiratory health in occupational settings. *Lancet Respir Med.* 2019;7(9):786-95. Available from: [https://www.thelancet.com/journals/lanres/article/PIIS2213-2600\(19\)30078-5/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanres/article/PIIS2213-2600(19)30078-5/fulltext)
35. Resolución Ministerial N.º 425-2008-MINSA. Norma Técnica de Salud NTS N° 068-MINSA/DGSP-V.1: Listado de Enfermedades Profesionales [Internet]. Lima: MINSA; 14 Jul 2008. Available from: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueba-norma-tecnica-salud-que-establece-listado-enfermedades>
36. Ministerio de Salud. Guía técnica para la toma de radiografías de tórax según técnica OIT de la Clasificación Internacional de Radiografías de Neumoconiosis (OIT-2000) [Internet]. Lima: MINSA; Available from: <https://www.gob.pe/institucion/minsa/informes-publicaciones/314097-guia-tecnica-para-toma-de-radiografias-de-torax-segun-tecnica-oit-de-la-clasificacion-internacional-de-radiografias-de-neumoconiosis-oit-2000>
37. Instituto Nacional de Salud. Registro de médicos con entrenamiento en la lectura de placas de tórax con criterio OIT para el diagnóstico de neumoconiosis [Internet]. Lima: INS; Available from: <https://www.gob.pe/institucion/ins/colecciones/36584-registro-de->

medicos-con-entrenamiento-en-la-lectura-de-placas-de-torax-con-criterio-
oit-para-el-diagnostico-de-neumoconiosis

38. Salinas EO. Problema de la silicosis en el Perú: Marco jurídico: 2021
39. Ministerio de Salud. Plan Nacional para la Prevención y Erradicación de la Silicosis en el Perú [Internet]. Lima: MINSA; Available from: <https://www.digesa.minsa.gob.pe/DSO/informes/PLAN%20NACIONAL%20PARA%20LA%20PREVENCION%20Y%20ERRADICACION%20DE%20LA%20%20SILICOSIS%20EN%20EL%20PERU.pdf>
40. Ehrlich R, Murray J, et al. Silicotuberculosis: a critical narrative review. *Eur Respir Rev.* 2024 Dec 18;33(174):240168. doi: 10.1183/16000617.0168-2024.
41. Elango R, Kailash A, et al. Silico-Tuberculosis Mimicking Malignancy. *Cureus.* 2024 Jul 26;16(7):e65411. doi: 10.7759/cureus.65411.
42. Jamshidi P, Danaei B, et al. Silicosis and tuberculosis: A systematic review and meta-analysis. *Pulmonology.* 2025 Dec 31;31(1):2416791. doi: 10.1016/j.pulmoe.2023.05.001.
43. Ranjan A, Panneerselvam A, et al. Silicotuberculosis: Newer trends. *Indian J Tuberc.* 2025 Oct;72(4):521-526. doi: 10.1016/j.ijtb.2025.01.010.
44. Shi P, Xing X, et al. Trends in global, regional and national incidence of pneumoconiosis caused by different aetiologies: an analysis from the Global Burden of Disease Study 2017. *Occup Environ Med.* junio de 2020;77(6):407–14.

45. Delgado D, Cohen RA, et al. Origen y avances del Observatorio Internacional de Neumoconiosis. *Rev Asoc Esp Espec En Med Trab.* 2024;33(1):128–31.
46. Patel P, Aggarwal SG. On the techniques and standards of particulate matter sampling. *J Air Waste Manag Assoc.* 2022;72(8):791–814.
47. Abú- Shams K, Fanlo P, Lorente MP. Silicosis. *An Sist Sanit Navar.* 2005;28:83–9.
48. Tripathi A, Aruna M, et al. Integrated smart dust monitoring and prediction system for surface mine sites using IoT and machine learning techniques. *Sci Rep.* 2024;14(1):7587.
49. Zaccagnini M, West A, et al. Exploring knowledge gaps and research needs in respiratory therapy: a qualitative description study. *Can J Respir Ther.* 2024 Jan 3;60:1-12. doi: 10.29390/001c.91184.
50. McElvenny D, Wiggans R, et al. Updated systematic review of respiratory health surveillance: what is the evidence and what are the knowledge gaps? *Occup Med.* 2024;74(9):623–4.
51. Huang X, Liu W, et al. Trends in the Disease Burden, Incidence, and Prevention of Pneumoconiosis. *China CDC Wkly.* 2023;5(38):856. National Institute for Occupational Safety. Health Coal Workers' Health Surveillance Program. [Internet]. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health; 2023. Disponible en: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2019-130/>.

52. Matteis S, Heederik D, et al. Current and new challenges in occupational lung diseases. European Respiratory Society Environment and Health Committee. Eur Respir Rev. 2017 Nov 15;26(146):170080. doi: 10.1183/16000617.0080-2017.
53. Lewis L, Fishwick D. Health surveillance for occupational respiratory disease. Occup Med (Lond). 2013 Jul;63(5):322-34. doi: 10.1093/occmed/kqt048.
54. Alonso E, Huerta I, et al. Panorama actual de las vacunaciones laborales en España: “perfil de la vacunación en los Servicios de Prevención de Riesgos Laborales”. Med Segur Trab. 2023;69(271):77–99.
55. Weissman D. Medical surveillance for the emerging occupational and environmental respiratory diseases. Curr Opin Allergy Clin Immunol. 2014;14(2):119.
56. Occupational Safety and Health Administration. Training Requirements in OSHA Standards. 2015.
57. Rodríguez J, et al. Estrategias para implementar sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo en empresas del sector industrial. Revisión narrativa de la literatura. Rev Investig En Salud Univ Boyacá. 2023;10(1):145–64.
58. International Labour Organization. Instrument ID: 312300 [Internet]. Geneva: ILO; [cited 2025 May 15]. Available from: https://normlex.ilo.org/dyn/nrmlx_es/f?p=NORMLEXPUB:12100:0::P12100_INSTRUMENT_ID:312300