
Exposición a sílice de mineros en altitud. Dosis inhalada, método de evaluación en condición de hipobaría

Silica exposure among miners at high altitude.
Inhaled dose and evaluation methods in hypobaric environments

Margarita Zamora-Saa¹  0000-0002-7415-4569

Rodolfo Jara-Jegó²  0009-0008-9170-1262

¹Fundación Instituto Profesional Duoc UC, Santiago, Chile.

²Departamento de Medicina Física y Rehabilitación. Centro de Rehabilitación Integral Hospital San Camilo, San Felipe, Chile.

Fechas · Dates

Recibido: 06/11/2023
Aceptado: 12/01/2024
Publicado: 18/01/2024

Correspondencia · Corresponding Author

Margarita Zamora-Saa
m.zamorsa@profesor.duoc.cl

Resumen

Objetivo: Evaluar la exposición a sílice de mineros chilenos en altitud usando diferentes metodologías, con el propósito de determinar el método más seguro para controlar la exposición.

Métodos: Los 46 mineros que conforman la muestra trabajan a 3000 metros sobre el nivel del mar con sistema de turnos no convencionales, en jornadas de 12 horas diarias por 4 días consecutivos, después de los cuales se descansa por otros 4 días. Se tomaron muestras de sílice en cada uno de los puestos de trabajo de estos 46 mineros en altitud. Los resultados de las concentraciones se presentan en (mg/m^3). La exposición se evaluó usando el Threshold Limit Value y otras dos metodologías que incorporan parámetros respiratorios. Se determinó el grupo de mineros en riesgo con cada uno de estos métodos y se comparó la proporción de mineros expuestos en cada caso.

Resultados: evaluando con el Threshold Limit Value (método 1) se obtuvo un 43,48% de mineros en riesgo. Con los métodos que incluyen parámetros respiratorios se obtuvo una proporción de mineros sobre-expuestos del 82,61% con el método 2, y 73,91% con el método 3.

Conclusiones: de los tres métodos analizados, el que considera el parámetro respiratorio volumen minuto, a través de la estimación de la dosis inhalada, es el más seguro para definir el grupo de mineros en riesgo por exposición a sílice a gran altura.

Palabras clave: volumen minuto; capacidad vital; TLV-TWA; dosis inhalada; mineros en altitud.

Abstract

Objective: To evaluate silica exposure among Chilean miners at high altitude, using different methodological approaches, for the purpose of determining the safest method to control exposures.

Methods: The 46 miners in the sample worked at 3000 meters above sea level in nonstandard work shifts, consisting of four consecutive 12-hour days, followed by four consecutive days off. Silica samples were obtained in each of the jobs positions of these 46 high-altitude miners. The results of the concentrations are presented in mg/m^3 . Exposures were evaluated in comparison to the Threshold Limit Value (Method 1) and using two other methodologies that incorporate respiratory parameters (Methods 2 and 3). The proportion of miners at risk was determined with each of these methods and compared.

Results: Based on the Threshold Limit Value (Method 1), 43.48% of miners were classified as being at risk. With the other two methods that incorporate respiratory parameters, the proportion of overexposed miners was 82.61% with Method 2, and 73.91% with Method 3.

Conclusions: Of the three methods analyzed, the one that considers the respiratory parameter minute volume, through the estimation of the inhaled dose, is the safest to define the group of miners at risk due to exposure to silica at high altitude.

Keywords: minute volume; vital capacity; TLV-TWA, inhaled dose, miners at high altitude.

Introducción

Uno de los problemas que se presenta en la minería de altitud es la evaluación de la exposición a contaminantes químicos⁽¹⁾, particularmente cuando la concentración de estos es expresada en (mg/m³). Si la concentración se expresa en partes por millón, esto no constituye un problema, ya que, tanto la proporción de mili moles de contaminante por mol de oxígeno en el aire, como el número de moles de oxígeno requeridos por un trabajador, permanecen aproximadamente constantes a diferentes altitudes, a pesar de que el volumen de aire que contiene un mol de oxígeno varía⁽²⁾.

En altitud, disminuye la presión barométrica y por ende la presión parcial y la presión inspirada de oxígeno. Con esto se ponen en acto diferentes mecanismos fisiológicos compensatorios, de respuesta del organismo ante la caída de la presión, tales como: hiperventilación, policitemia, vasoconstricción pulmonar hipóxica, entre otros⁽³⁾. La hiperventilación implica un aumento del volumen minuto (VE), en consecuencia, en altitud se inhala una mayor cantidad del o los tóxicos presentes en el ambiente de trabajo⁽⁴⁾.

En la literatura técnica revisada, encontramos cuatro propuestas para evaluar la exposición a contaminantes químicos en ubicaciones distintas a las del nivel de mar^(1,5-7). En Chile, el Decreto 594 del Ministerio de Salud (D-594) que aprueba el reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo, establece la aplicación de un factor de corrección (Fa) para los límites permisibles de contaminantes químicos en altitud. Este factor se calcula dividiendo la presión del lugar en altura por 760 (mmHg)⁽⁵⁾. Otros países con minería en altitud utilizan los valores umbral establecidos por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) que propone los Threshold Limit Value (TLV-TWA) para trabajos a nivel del mar en jornadas de 8 horas diarias y 40 horas semanales⁽⁶⁾.

En este estudio, se analiza la exposición a sílice cristalizada cuarzo (SiO₂) de un grupo de 46 mineros chilenos que trabajan a 3000 metros sobre el nivel del mar (msnm), con turnos de 12 horas diarias por 4 días consecutivos, después de los cuales se descansa por otros 4 días; los 4 días de trabajo se subdividen en 2 turnos diurnos y 2 nocturnos.

La exposición ocupacional a sílice puede causar silicosis y cáncer de pulmón, entre otras^(8,9). Según el tipo de exposición y las características clínicas, radiológicas y patológicas, hay tres formas de silicosis: silicosis crónica, silicosis acelerada y silicosis aguda. También se han estudiado otras condiciones asociadas con la exposición a sílice, que resultan en un aumento considerable de la morbilidad y mortalidad, incluidas enfermedades autoinmunes y tuberculosis⁽¹⁰⁾.

Para analizar la exposición, se aplican tres métodos diferentes: en los dos primeros se comparan los resultados de las mediciones de SiO₂, primero con el TLV-TWA⁽⁶⁾, y luego con un Límite de Exposición Profesional que considera variaciones de la capacidad vital⁽⁷⁾. El tercer método, consiste en calcular la dosis inhalada como función de la concentración de SiO₂ y del VE⁽¹⁾. De los métodos que se ana-

lizan en este estudio, la dosis es el único que considera la jornada de trabajo de 12 horas. Hay diferentes propuestas para adecuar las jornadas de trabajo cuando estas son de más de 8 horas. Por ejemplo, la propuesta de la norma UNE-EN 689:2019+AC:2019 anexo G⁽¹¹⁾, o las correcciones por jornada establecidas en el D-594⁽⁵⁾. Sin embargo, el objetivo de este estudio es buscar un método o criterio que permita evaluar la exposición considerando simultáneamente el problema asociado a la baja presión y a la jornada de 12 horas.

El objetivo de este estudio es evaluar la exposición a sílice de mineros chilenos en altitud usando diferentes metodologías, con el propósito de determinar el método más seguro para controlar la exposición y el más adecuado para las condiciones de trabajo de mineros que trabajan en elevadas altitudes.

Métodos

Se evaluó la exposición a SiO₂ en una mina subterránea ubicada a 3000 msnm. Para la selección de la muestra se usó el siguiente criterio de inclusión: mineros que trabajaran con carga liviana en el área de "concentrador y plantas" con turnos de 12 horas diarias durante 4 días consecutivos. Así, se obtuvo una muestra de 46 mineros. Para evaluar la exposición, se realizó un muestreo de polvo fracción respirable con análisis de SiO₂, con trenes de muestreo previamente calibrados a 1,7 (l/min) promedio. Dichos trenes de muestreo están compuestos por bomba de muestreo portátil, portafiltro con filtro de PVC de 0,5 (µm) de poro acoplado sobre un ciclón de nylon del tipo Dorr-Oliver y mangueras de conexión. Una vez armados los trenes de muestreo, estos fueron colocados a los 46 mineros. Se aceptaron como representativas las muestras de polvo recolectadas en una jornada de trabajo con un tiempo mínimo de muestreo del 70% del turno. Las muestras fueron analizadas mediante gravimetría para conocer su contenido de polvo, y mediante espectrofotometría transformada de Fourier para determinar la cantidad de sílice de cada muestra. Luego de conocida las masas, se determinaron las concentraciones en (mg/m³) para sílice cristalizada cuarzo. Todo el muestreo se llevó a cabo según lo establecido en el protocolo de medición de sílice del Instituto de Salud Pública de Chile⁽¹²⁾, en el laboratorio del Centro de Investigación Minera y Metalúrgica chileno (CIMM).

Las concentraciones de SiO₂ en (mg/m³) se analizan para determinar la proporción de trabajadores en riesgo de acuerdo con los siguientes tres métodos:

1. Las concentraciones de SiO₂ se comparan con el TLV-TWA propuesto por la ACGIH⁽⁶⁾
2. Las concentraciones de SiO₂ se comparan con un límite conocido como "TLV altura"⁽⁷⁾ (Lcv) calculado con la siguiente fórmula:

$$TLV_{altura} = TLV_{ct} - 40\% TLV_{nm}$$

Donde:

TLV altura: TLV-TWA corregido para la altura de trabajo, expresado en (mg/m³)

TLVct: TLV-TWA corregido por tiempo para jornadas de más de 8 horas diarias, expresado en (mg/m³). No se aplica la corrección por jornada porque el valor quedaría bajo el límite de detección de la técnica analítica.

TLVnm: TLV-TWA a nivel del mar, expresado en (mg/m³)

El 40% en la fórmula se debe a que en el estudio se señala que en las grandes alturas hay un incremento de la capacidad vital forzada (CVF) de hasta un 40%⁽⁷⁾. La capacidad vital está definida como el volumen máximo de aire espirado después de una inspiración máxima⁽¹³⁾. Está influenciada por el calibre de las vías aéreas, la capacidad pulmonar total y el volumen residual⁽¹⁴⁾.

3. Con las concentraciones de SiO₂ se estima la dosis inhalada diaria (*Di*), esta da cuenta de la cantidad efectiva del contaminante inhalado en un día de trabajo, ya que se calcula como el producto de la concentración del contaminante, del tiempo de exposición y de VE. La *Di* se compara con una dosis inhalada máxima (*Dm*)⁽¹⁾, esta dosis entrega un valor de referencia para la evaluación, dado que se calcula en función del Límite de Exposición Profesional (en este caso se usó el TLV-TWA), y considerando condiciones normales de trabajo como se desglosa a continuación:

El cálculo de *Di* se hace con la siguiente fórmula:

$$Di = Cc * VE * te$$

Donde:

Di = dosis inhalada, expresada en (mg)

Cc = concentración de SiO₂, expresada en (mg/m³)

VE = volumen minuto en reposo, igual a 14,75 (l/min). Valor medio referencial medido para un grupo de mineros que aumentan VE en altitud a 3600 msnm⁽⁴⁾. En la aplicación de la fórmula se trabaja con el valor equivalente igual a 0,885 (m³/h).

te: tiempo de exposición, igual a 12 horas diarias.

Para determinar *Dm* se utilizó la misma fórmula con los siguientes valores:

Cc = concentración de sílice, se usa el valor del TLV-TWA para trabajos en condiciones normales 0,025 (mg/m³)

VE = 10 (l/min) (valor máximo de VE medido en reposo considerando 500 (ml)⁽¹⁵⁾ por 20 respiraciones minuto⁽¹⁶⁾). *VE* es una medida de la cantidad de aire que ingresa a los pulmones por minuto. Es el producto de la frecuencia respiratoria por el volumen corriente⁽¹⁷⁾.

te = 8 (h) diarias, equivalente a la duración de las jornadas normales de trabajo.

Se debe tener en cuenta que para jornadas de 8 horas diarias, como valor de la concentración (C_c) también se pueden utilizar otros valores límite, como por ejemplo: 0,05 (mg/m^3), valor estipulado por el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo de España; 0,1 (mg/m^3) valor utilizado en Reino Unido y Bélgica; 0,3 (mg/m^3) valor utilizado en Japón; o los usados en EE.UU, 0,05 (mg/m^3) propuesto por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) o 0,025 (mg/m^3) propuesto por la ACGIH⁽¹⁸⁾ y utilizado en este estudio por ser el más riguroso.

A través de cada método se determina la proporción de trabajadores expuestos. Con los resultados obtenidos aplicando los tres métodos presentados, se discute cual es más apropiado para evaluar la exposición a SiO_2 en condiciones de hipobaría debida a la altitud.

Resultados

Las concentraciones de sílice para cada minero y los resultados obtenidos aplicando los tres métodos se presentan en la tabla 1. En el método 1, el criterio TLV-TWA es de 0,025 (mg/m^3)⁽⁶⁾. Aplicando el método 2 se obtiene un $L_{cv} = 0,003$ (mg/m^3)⁽⁷⁾. Aplicando el método 3 de la dosis inhalada versus la dosis máxima⁽¹⁾, se obtiene un valor distinto para cada trabajador, ya que cambia la concentración de sílice. La dosis inhalada fue calculada con un $VE=14,75$ (l/min)⁽⁴⁾. Los resultados muestran las concentraciones de SiO_2 y los métodos aplicados a los 46 puestos de trabajo evaluados, 30 del área de chancado (CH) y 16 del área concentrador (CT). Los valores $< 0,01$ están bajo la mínima detección del sistema de muestreo (Tabla 1).

Utilizando el criterio TLV-TWA se obtiene un 43,48% de trabajadores en riesgo. Con el método L_{cv} un 82,61%, y con el Di un 73,91%. Los dos últimos métodos consideran parámetros respiratorios, como se puede apreciar son mucho más protectivos que el primero que no los considera. El grupo de riesgo determinado con el TLV-TWA subvalora en un 30% al menos, al grupo trabajadores en riesgo. Estos trabajadores se considerarían no expuestos por lo que no se incluirían en los programas de vigilancia médica. En la Tabla 2 se describen los métodos utilizados, sus fundamentos y sus resultados.

La Tabla 2 muestra los tres métodos utilizados en la evaluación de exposición a SiO_2 y los porcentajes de trabajadores expuestos aplicando cada método.

Tabla 1: Concentraciones de SiO₂ y métodos utilizados en el análisis. Muestreo de los puestos de trabajo en altitud (3000 msnm) de 46 mineros.

Área*	Concentración Sílice libre cristalina (mg/ m ³)	Método 1: TLV-TWA= 0,025 (mg/m ³) ¿La concentración de SiO ₂ es menor o igual que el TLV-TWA?	Método 2: TLV altura, Lcv= 0,003 (mg/ m ³) ¿La concentración de SiO ₂ es menor o igual que el Lcv?	Método 3: Dosis inhalada, Di (mg) Calculada con VE=14,75 (l/ min)	Método 3: Dosis máxima, Dm= 0,12 (mg) ¿Di es menor o igual que Dm?
CH	0,204	No	no	2,17	no
CH	0,023	Sí	no	0,24	no
CH	0,061	No	no	0,65	no
CH	0	Sí	sí	0,00	sí
CH	0,036	No	no	0,38	no
CH	0,04	No	no	0,42	no
CH	0,016	Sí	no	0,17	no
CH	0,202	No	no	2,15	no
CH	0,179	No	no	1,90	no
CH	0	Sí	sí	0,00	sí
CH	0	Sí	sí	0,00	sí
CH	0,009	Sí	no	0,10	sí
CH	0,049	No	no	0,52	no
CH	0,025	Sí	no	0,27	no
CH	0,098	No	no	1,04	no
CH	0,107	no	no	1,14	no
CH	0,016	sí	no	0,17	no
CH	0,024	sí	no	0,25	no
CH	0,079	no	no	0,84	no
CH	0,025	sí	no	0,27	no
CH	0,022	sí	no	0,23	no
CH	0,016	sí	no	0,17	no
CH	0,023	sí	no	0,24	no
CH	0	si	si	0,00	si
CH	0,022	si	no	0,23	no
CH	0,067	no	no	0,71	no
CH	0,036	no	no	0,38	no
CH	0,021	si	no	0,22	no
CH	0,023	si	no	0,24	no
CH	0,055	no	no	0,58	no
CT	0,06	no	no	0,64	no
CT	< 0,01	si	indeterminado	Indeterminado	indeterminado
CT	0,23	no	no	2,44	no
CT	0,05	no	no	0,53	no
CT	0,01	si	no	0,11	si
CT	0,02	si	no	0,21	no
CT	0,03	no	no	0,32	no
CT	0,03	no	no	0,32	no

Área*	Concentración Sílice libre cristalina (mg/m ³)	Método 1: TLV-TWA= 0,025 (mg/m ³) ¿La concentración de SiO ₂ es menor o igual que el TLV-TWA?	Método 2: TLV altura, Lcv= 0,003 (mg/m ³) ¿La concentración de SiO ₂ es menor o igual que el Lcv?	Método 3: Dosis inhalada, Di (mg) Calculada con VE=14,75 (l/min)	Método 3: Dosis máxima, Dm= 0,12 (mg) ¿Di es menor o igual que Dm?
CT	0,01	si	no	0,11	si
CT	< 0,01	si	no	indeterminado	indeterminado
CT	0,11	no	no	1,17	no
CT	0,04	no	no	0,42	no
CT	0,02	si	no	0,21	no
CT	< 0,01	si	indeterminado	indeterminado	indeterminado
CT	< 0,01	si	indeterminado	indeterminado	indeterminado
CT	< 0,01	si	indeterminado	indeterminado	indeterminado

* CH: área de chancado; CT: área concentrador

Tabla 2: Métodos utilizados para evaluar la exposición a SiO₂. Muestreo de los puestos de trabajo en altitud (3000 msnm) de 46 mineros.

Método/ Definición	Valor/Fórmula	Justificación	Mineros en riesgo (%)
TLV-TWA ⁽⁶⁾ Concentración media ponderada en el tiempo, para una jornada normal de 8 horas y 40 horas semanales, a la cual la mayoría de los trabajadores pueden estar expuestos repetidamente día tras día sin sufrir efectos adversos.	0,025 (mg/m ³)	Los TLV-TWA representan las condiciones en las cuales la mayoría de los trabajadores pueden estar expuestos 8 horas diarias y 40 horas semanales durante toda su vida laboral, sin sufrir efectos adversos para la salud.	43,48
TLV altura ⁽⁷⁾ Valor límite umbral de exposición de tóxicos, el cual luego de ser corregido por tiempo de trabajo se resta el 40% del TLV-TWA establecido para el nivel del mar.	$TLV_{altura} = TLV_{ct} - 40\% TLV_{nm}$	En la gran altura el organismo debe compensar la presión de oxígeno baja con mecanismos de aclimatación; de ellos, el aumento de la capacidad vital es el principal. Se ha determinado en diferentes grandes alturas que este incremento alcanza el 40% ⁽⁷⁾	82,61
Dosis Inhalada de SiO ₂ ⁽¹⁾ Es la dosis efectiva inhalada en función del volumen minuto y del tiempo exposición al contaminante en cuestión.	$Di = Cc * VE * te$	Debido a que VE es el parámetro respiratorio que cambia en altitud y que las jornadas de trabajo son de 12 horas diarias, con esta metodología obtendríamos una mejor estimación de la exposición real del trabajador	73,91

Discusión

Los resultados de nuestro estudio muestran que en mineros que trabajan en altitud (3000 msnm) y utilizando el criterio TLV-TWA, se identifica una proporción muy inferior de trabajadores en riesgo que con el método *Lcv* y el *Di*. Ello sugiere que los métodos que usan parámetros respiratorios son más rigurosos en la evaluación del riesgo, probablemente debido a que los Límites de Exposición Profesional, en este caso el TLV-TWA, no consideran las variaciones de VE producto del trabajo en altitud, ni las jornadas no convencionales.

Para trabajos en altitud con jornadas de más de 8 horas diarias desaconsejamos evaluar la exposición mediante el TLV-TWA, aun cuando este sea corregido por jornada continua el problema de la altitud. Si aplicamos por ejemplo la fórmula de Brief and Scala⁽¹⁹⁾ para corregir el TLV-TWA de la sílice nos da un valor de 0,01 (mg/m³), valor cercano al límite de detección de la técnica analítica, lo que contribuye a perder la fiabilidad de la medición, esto, sin considerar las pérdidas de carga. Las pérdidas de carga se definen como la diferencia entre la presión ambiente y la presión en la entrada de la bomba⁽²⁰⁾ para un caudal constante, si consideramos que la medición se hace en condición de hipobaría la certidumbre de esta es cuestionable. El documento de la NTP 1168 del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo de España⁽²¹⁾, fundamenta la necesidad de obtener mayores volúmenes de muestreo que los que se han venido utilizando hasta ahora, lo que implica aumentar el caudal y/o el tiempo de muestreo. Consideramos necesario contar con nuevas investigaciones para establecer un método de muestreo adecuado para condiciones de baja presión, no solo para sólidos en suspensión, sino también para contaminantes gaseosos.

Por otra parte, si se realiza la corrección para determinar la exposición diaria, propuesta por la norma UNE-EN 689:2019+AC:2019 anexo G⁽¹¹⁾, nos encontramos con dificultades para el cumplimiento del Límite de Exposición Profesional en las faenas mineras de altitud donde las concentraciones de sílice ya son altas.

En este estudio se demuestra que con el uso del TLV-TWA queda fuera de la población de riesgo un grupo significativo de mineros (más de un 30%), con los cuales no se haría vigilancia médica ni se tomarían medidas preventivas ni de control, aun estando en riesgo de desarrollar diversas enfermedades por exposición a sílice (silicosis, cáncer pulmonar, tuberculosis, entre otras patologías sistémicas)^(8,9). En múltiples estudios, encontramos que el problema de la exposición se aborda cuando ya la enfermedad existe. Nos encontramos principalmente con investigaciones que analizan sintomatología relacionada con cierta exposición, buscando relaciones dosis-respuesta⁽²²⁾ y no abordando la prevención del daño. En Chile, el protocolo de vigilancia del ambiente de trabajo y de la salud de los trabajadores con exposición a sílice⁽²³⁾ define la condición de trabajador expuesto para efectos de vigilancia de la salud, a todo trabajador que se desempeñe en un ambiente de trabajo cuya concentración promedio ponderada, producto de un muestreo de tipo personal y representativo de la jornada de trabajo habitual, alcance el 50% o más del límite permisible ponderado de la sílice cristalina establecido en el decreto supremo 594⁽⁵⁾.

Evaluar la exposición con el *Lcv* nos parece impreciso de acuerdo con la evidencia recogida, fundamentándose el valor del 40% en la ecuación por las posibles variaciones de la CVF en altitud. Sin embargo, no hay suficiente evidencia de si esta aumenta o más bien disminuye en altitud⁽²⁴⁾. La capacidad vital de los adultos normales oscila entre 3 y 5 litros. Una serie de factores fisiológicos como la estatura, el género y el origen étnico afectan los volúmenes pulmonares⁽¹³⁾. Diversos estudios mencionan variaciones de la CV debidas a la situación nutricional, a las enfermedades musculo esqueléticas (restrictivas) y a las enfermedades obstructivas^(9,13,23); el sedentarismo y el tabaquismo también podrían afectarla. Por lo tanto, en mineros expuestos a diferentes tipos de polvo, la CV podría alterarse por un posible daño en el sistema respiratorio, y no necesariamente por el trabajo en altitud. Por otra parte, la CVF como parámetro respiratorio a medir, tiene inconvenientes, ya que es una prueba invasiva, flujo-técnico y usuario dependiente, por lo que su realización en el puesto de trabajo en altitud implica dificultades a tener en cuenta^(9,25).

Evaluar la exposición mediante la *Di* nos permite estimar de modo más confiable la real inhalación de tóxicos en altitud. La dosis efectiva inhalada es función de VE, del tiempo de exposición y de la concentración del contaminante⁽²⁵⁾. En este caso específico de trabajo a baja presión por altitud con sistemas de turnos que implican jornadas de 12 horas, la estimación de la dosis nos permite considerar las variaciones del volumen de aire inhalado debido a la baja presión de oxígeno y la mayor exposición producto de la extensión de la jornada. Usando este criterio obtuvimos un 73,91% de mineros en riesgo, un 30% más que en la evaluación con el TLV-TWA. Considerar VE en la forma de determinar la exposición a SiO₂ parece ser la mejor alternativa para establecer rangos que permitan monitorear la población de trabajadores expuestos.

En este estudio no contamos con mediciones personales de VE. El valor usado proviene de una exhaustiva revisión de artículos publicados donde se mide VE en distintas personas (deportistas, estudiantes jóvenes, trabajadores, etc.). Se usó el valor que más se acerca a la realidad de los mineros estudiados, 14,75 (l/min)⁽⁴⁾ que representa la media de VE medida en reposo en mineros a 3600 msnm. La gran mayoría de los estudios donde se mide VE en altitud, muestran su variación según el tiempo de permanencia y según la actividad física. No son estudios preventivos que apunten a limitar o cuantificar la exposición a un determinado contaminante. Algunos de estos presentan valores de VE medidos a 4500 msnm después de 5 horas en altitud igual a 16,5 + - 3,6 (l/min)⁽²⁶⁾. Otro artículo donde la medición se hace a 3940 msnm indica una media de los sujetos medidos al tercer día igual a 14,25 + - 2,67 (l/min)⁽²⁷⁾. Como se puede observar los valores de VE cambian de un estudio a otro, por lo que no es recomendable trabajar con un VE fijo. Es necesario establecer un rango de variación de VE para determinar la dosis, o contar con mediciones de este para cada minero en su puesto de trabajo. VE es más simple de medir que la CVF, al no ser flujo dependiente, disminuye el error asociado al técnico y/o al usuario por lo que la medición se podría hacer en el propio puesto de trabajo. En la actualidad hay diferentes equipos de fácil uso para medir VE⁽²⁵⁾.

En conclusión, aun cuando el valor de VE usado en este estudio es una media, confirmamos que, para trabajos en altitud, de los tres métodos analizados, el método de la estimación de la dosis parece ser el más seguro para definir el grupo de mineros en riesgo por exposición a sílice, con el cual se deben tomar todas las medidas necesarias para prevenir enfermedades profesionales.

Conflicto de intereses

Declaramos que ninguno de los autores tiene conflictos de intereses.

Bibliografía

1. Zamora Saa M, Zamora-Saa J. Metodología para evaluar la exposición ocupacional a contaminantes químicos en altitud. *Arch Prev Riesgos Labor*. 2021;24(4):404-409. doi: 10.12961/apr.2021.24.04.06
2. Dümmer W. Prevención de riesgos laborales a gran altura. Prevention of occupational hazards at high altitudes [en línea]. *Encyclopaedia of occupational health & safety*. 2011. Disponible en: <https://www.iloencyclopaedia.org/part-vi-16255/barometric-pressure-reduced/item/237-prevention-of-occupational-hazards-at-high-altitudes>
3. Zamora-Saa M, Zamora-Saa J, Bacaloni A. High altitude underground mining. Acclimatization and possible toxicological risks. *G Ital Med Lav Ergon*. 2022;44(3):352-359.
4. Bacaloni A, Zamora Saà MC, Sinibaldi F, Steffanina A, Insogna S. Respiratory parameters at varied altitudes in intermittent mining work. *Int J Occup Med Environ Health*. 2018;31(2):129-138. doi: 10.13075/ijom.1896.01082.
5. Decreto Supremo N° 594. Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo 2000 [en línea]. Santiago, Chile: Ministerio de Salud, Diario Oficial de la República de Chile, 29 de abril 2000 [28 de junio 2023]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=167766>.
6. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Threshold limit values and biological exposure indices, Cincinnati, USA: Signature Publications; 2015.
7. Ramírez AV. Exposición toxicológica en las grandes alturas: ¿es necesario corregir los valores límite umbral de exposición de tóxicos?. *Anales de la Facultad de Medicina*. 2011;72(1):61-67.
8. Keramydas D, Bakakos P, Alchanatis M, Papalexis P, Konstantakopoulos I, Tavernaraki K, et al. Investigation of the health effects on workers exposed to respirable crystalline silica during outdoor and underground construction projects. *Exp Ther Med*. 2020;20(2):882-889. doi: 10.3892/etm.2020.8786
9. Mozaffari S, Heibati B, Jaakkola MS, Lajunen TK, Kalteh S, Alimoradi H, et al. Effects of occupational exposures on respiratory health in steel factory workers. *Front Public Health*. 2023;11:1082874. doi: 10.3389/fpubh.2023.1082874

- 10.** Hoy RF, Chambers DC. Silica-related diseases in the modern world. *Allergy*. 2020;75(11):2805-2817. doi: 10.1111/all.14202.
- 11.** UNE-EN 689:2019+AC:2019 [Internet]. Une.org. [citado el 28 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=norma-une-en-689-2019-ac-2019-n0062148>
- 12.** Biblioteca del Congreso Nacional. Biblioteca del Congreso Nacional [Internet]. www.bcn.cl/leychile. [cited 2023 Dec 18]. Available from: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1048619>
- 13.** Bhatti U, Rani K, Memon MQ. Variation in lung volumes and capacities among young males in relation to height. *J Ayub Med Coll Abbottabad*. 2014;26(2):200-2.
- 14.** Barros R, Raposo L, Moreira N, Rocha M, Calaç P, Spencer, I, et al. Capacidad vital lenta: diferencias entre la capacidad vital espiratoria y la capacidad vital inspiratoria. *Rev am med respir*. 2021:167-176.
- 15.** Wang L, Jiang Z. Tidal Volume Level Estimation Using Respiratory Sounds. *J Healthc Eng*. 2023;2023:4994668. doi: 10.1155/2023/4994668
- 16.** Hill B, Annesley SH. Monitoring respiratory rate in adults. *Br J Nurs*. 2020;29(1):12-16. doi: 10.12968/bjon.2020.29.1.12.
- 17.** Hallett S, Toro F, Ashurst JV. Physiology, Tidal Volume. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023.
- 18.** Rey-Brandariz J, Martínez C, Candal-Pedreira C, Pérez-Ríos M, Varela-Lema L, Ruano-Ravina A. Occupational exposure to respirable crystalline silica and lung cancer: a systematic review of cut-off points. *Environ Health*. 2023;22(1):82. doi: 10.1186/s12940-023-01036-0
- 19.** Brief RS, Scala RA. Occupational health aspects of unusual work schedules: a review of Exxon's experiences. *Am Ind Hyg Assoc J*. 1986;47(4):199-202. doi: 10.1080/15298668691389612
- 20.** UNE-EN ISO 13137:2022 [Internet]. Une.org. [citado el 28 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0070733>
- 21.** NTP (INSST) Pérdida de carga muestreo de agentes químicos - Portal INSST - INSST [Internet]. Portal INSST. [citado el 28 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://www.insst.es/el-instituto-al-dia/ntp-1168-perdida-de-carga-asociada-a-muestreadores-y-elementos-de-retencion-en-el-muestreo-de-agentes-quimicos>
- 22.** Gholami A, Tajik R, Atif K, Zarei AA, Abbaspour S, Teimori-Boghsani G, Attar M. Respiratory Symptoms and Diminished Lung Functions Associated with Occupational Dust Exposure Among Iron Ore Mine Workers in Iran. *Open Respir Med J*. 2020;14:1-7. doi: 10.2174/1874306402014010001
- 23.** Minsal.cl. [cited 2023 Dec 18]. Available from: <https://www.minsal.cl/sites/default/files/files/Protocolo%20de%20vigilancia%20del%20ambiente%20de%20>

trabajo%20y%20de%20la%20salud%20de%20los%20trabajadores%20con%20ex-
posici%C3%B3n%20a%20silice.pdf

24. Mason NP, Barry PW, Pollard AJ, Collier DJ, Taub NA, Miller MR, Milledge JS. Serial changes in spirometry during an ascent to 5,300 m in the Nepalese Himalayas. *High Alt Med Biol.* 2000;1(3):185-95. doi: 10.1089/15270290050144181

25. Alam R, Peden D, Ghaemmaghmi B, Lach J. Inferring Respiratory Minute Volume from Wrist Motion. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2019;2019:6935-6938. doi: 10.1109/EMBC.2019.8857949

26. Richard NA, Sahota IS, Widmer N, Ferguson S, Sheel AW, Koehle MS. Acute mountain sickness, chemosensitivity, and cardiorespiratory responses in humans exposed to hypobaric and normobaric hypoxia. *J Appl Physiol* (1985). 2014;116(7):945-52. doi: 10.1152/jappphysiol.00319.2013

27. Burki NK. Effects of acute exposure to high altitude on ventilatory drive and respiratory pattern. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol.* 1984;56(4):1027-31. doi: 10.1152/jappl.1984.56.4.1027. PMID: 6725050.