

# Minería y enfermedades hematológicas: una revisión narrativa de la literatura

Mining and hematological diseases: a narrative literature review

Jaramillo-Aguilar SX<sup>1</sup>, Jaramillo-Aguilar LA<sup>2</sup>, Feijó-Erazo M<sup>3</sup>,  
Jaramillo-Cabrera MG<sup>3</sup>, Domínguez-Ortega S<sup>1</sup>, Abad-Cruz CR<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Escuela de Medicina, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad de Cuenca.  
Cuenca, Ecuador.

<sup>2</sup> Laboratorio Clínico "NeoLab". Machala, Ecuador.

<sup>3</sup> Centro de Salud "27 de Febrero", Distrito 14D01, Ministerio de Salud Pública.  
Morona Santiago, Ecuador.

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Estatal de Milagro, Milagro,  
Ecuador.

md.selena.jaramillo99@gmail.com

Fecha recepción: 28/5/2026

Fecha aprobación: 6/8/2026



ARTÍCULO  
DE REVISIÓN

HEMATOLOGÍA  
Volumen 30 n° 1: 72-76  
Mayo - Agosto 2026

**Palabras claves:** minería,  
hematototoxicidad,  
metales pesados,  
enfermedades hematológicas,  
salud ocupacional.

**Keywords:** mining,  
hematototoxicity,  
heavy metals,  
hematologic diseases,  
occupational health.

## Resumen

**Introducción.** La actividad minera representa una fuente importante de exposición ocupacional y ambiental a contaminantes con potencial hematotóxico, incluyendo metales pesados, compuestos orgánicos volátiles y polvos minerales. Sin embargo, las alteraciones hematológicas asociadas a la minería han recibido menor atención en comparación con otros efectos sistémicos. El objetivo de esta revisión fue sintetizar la evidencia disponible sobre la asociación entre exposición a la actividad minera y enfermedades hematológicas, considerando contaminantes implicados, mecanismos fisiopatológicos y principales alteraciones hematológicas descritas.

**Material y métodos.** Se realizó una revisión narrativa de la literatura mediante búsqueda en PubMed/MEDLINE, Scopus y Web of Science hasta el 30 de abril de 2026. Se incluyeron estudios

observacionales, experimentales, revisiones sistemáticas y metaanálisis publicados en inglés y español relacionados con minería, exposición a contaminantes y hematotoxicidad.

**Resultados.** La evidencia muestra que la exposición minera se asocia con alteraciones en múltiples líneas celulares sanguíneas. En la serie eritrocitaria, se describen disminuciones de hemoglobina, hematocrito y eritrocitos, compatibles con anemia. También se reportan alteraciones leucocitarias, incluyendo linfopenia relativa, neutrofilia y cambios en la relación neutrófilos/linfocitos, así como modificaciones en parámetros plaquetarios y hemorreológicos. Los principales mecanismos implicados incluyen estrés oxidativo, inflamación sistémica crónica, inmunotoxicidad, interferencia con la síntesis del hemo y daño genético sobre células hematopoyéticas. La exposición prolongada a contaminantes como plomo,

mercurio, arsénico y benceno se relaciona además con mayor riesgo de citopenias persistentes y neoplasias hematológicas.

**Discusión.** La minería constituye un problema de salud pública por su potencial impacto sobre el sistema hematopoyético. Se requieren estrategias integradas de vigilancia ocupacional y ambiental, así como estudios longitudinales que permitan comprender mejor los efectos acumulativos y las exposiciones combinadas.

## Abstract

**Introduction.** Mining activities are an important source of occupational and environmental exposure to hematotoxic contaminants, including heavy metals, volatile organic compounds, and mineral dusts. However, mining-related hematological disorders have received less attention compared with other systemic effects. This review aimed to synthesize the available evidence on the association between exposure to mining activities and hematological diseases, focusing on implicated contaminants, pathophysiological mechanisms, and reported hematological alterations.

**Materials and methods.** A narrative literature review was conducted using PubMed/MEDLINE, Scopus, and Web of Science up to April 30, 2026. Observational studies, experimental studies, systematic reviews, and meta-analyses published in English and Spanish addressing mining exposure and hematotoxicity were included.

**Results.** Evidence indicates that mining exposure is associated with alterations in multiple blood cell lines. Erythrocyte abnormalities include reductions in hemoglobin, hematocrit, and red blood cell counts, consistent with anemia. Leukocyte alterations, including relative lymphopenia, neutrophilia, and changes in the neutrophil-to-lymphocyte ratio, have also been described, together with platelet and hemorheological disturbances. Main mechanisms involve oxidative stress, chronic systemic inflammation, immunotoxicity, disruption of heme synthesis, and genetic damage to hematopoietic cells. Prolonged exposure to contaminants such as lead, mercury, arsenic and benzene has additionally been associated with persistent cytopenias and hematological malignancies.

**Discussion.** Mining represents a public health concern due to its potential impact on the hematopoietic

system. Integrated occupational and environmental surveillance strategies, as well as longitudinal studies addressing cumulative and mixed exposures, are needed to improve understanding of these effects.

## Introducción

La actividad minera constituye uno de los pilares del desarrollo económico en numerosos países, particularmente en regiones ricas en recursos naturales, donde contribuye de forma significativa al empleo, la inversión y la generación de divisas<sup>(1,2)</sup>. Sin embargo, este sector también representa una fuente importante de impactos ambientales y riesgos para la salud pública, derivados de la liberación de contaminantes químicos y físicos durante las etapas de extracción, procesamiento y disposición de residuos<sup>(3)</sup>. La exposición a metales pesados, compuestos orgánicos volátiles y polvos minerales puede ocurrir tanto en el ámbito ocupacional como en comunidades cercanas a las zonas de influencia minera, configurando escenarios de riesgo que trascienden el entorno laboral, especialmente en países de ingresos bajos y medianos en África, Asia y las Américas<sup>(1,4)</sup>.

Desde la perspectiva de la salud pública y epidemiología, gran parte de la evidencia disponible se ha concentrado en enfermedades respiratorias, cardiovasculares y neoplásicas asociadas a la minería, mientras que otros efectos sistémicos han recibido menor atención<sup>(4,5)</sup>. En particular, las alteraciones y enfermedades hematológicas han sido sub-exploradas, a pesar de la afinidad toxicológica de numerosos contaminantes mineros por el sistema hematopoyético. Los cambios en parámetros sanguíneos suelen manifestarse de forma subclínica en etapas tempranas, lo que contribuye a su subregistro y dificulta su reconocimiento como indicadores relevantes de daño asociado a la exposición minera. En este contexto, resulta necesario consolidar la información existente y analizarla críticamente.

Por tanto, el objetivo esta revisión de la literatura fue sintetizar la evidencia disponible sobre la asociación entre la exposición a la actividad minera y las enfermedades hematológicas, abordando (a) los principales contaminantes y sus características, (b) mecanismos fisiopatológicos implicados, y (c) alteraciones y enfermedades hematológicas reportadas, con el fin de contribuir a una comprensión más amplia de este problema problema ambiental y ocupacional para la salud.

## Material y métodos

Se realizó una revisión narrativa de la literatura sobre la asociación entre la exposición a la actividad minera y las enfermedades hematológicas en poblaciones ocupacionales y no ocupacionales. La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo en las bases de datos electrónicas PubMed/MEDLINE, Scopus y Web of Science, sin restricción temporal inicial y con fecha de cierre el 30 de abril de 2026. La estrategia de búsqueda incluyó las palabras clave minería (mining), exposición (exposure), “metales pesados” (“heavy metals”), “compuestos orgánicos volátiles” (“volatile organic compounds”), “polvos minerales” (“mineral dust”), hematotoxicidad (hematotoxicity), y “enfermedades hematológicas” (hematological diseases), tanto en español como en inglés. Se incluyeron publicaciones en inglés y español correspondientes a estudios observacionales, estudios experimentales, revisiones sistemáticas y metaanálisis. Se excluyeron otros tipos documentales, como editoriales, cartas al editor, reportes de caso y literatura gris. La selección de estudios se realizó mediante una revisión secuencial de títulos, resúmenes y textos completos. Finalmente, se incluyeron 28 estudios para la síntesis narrativa.

## Minería y enfermedades hematológicas

### Caracterización de contaminantes con efecto hematotóxico derivados de la minería

La actividad minera constituye una fuente relevante de liberación ambiental de sustancias químicas con reconocida toxicidad sistémica, entre las cuales destacan determinados metales pesados, metaloides y compuestos orgánicos volátiles (COVs)<sup>(6,7)</sup>. Estos contaminantes pueden encontrarse en matrices ambientales como aire, agua, suelo y polvo sedimentable, lo que condiciona exposiciones ocupacionales y ambientales de diversa intensidad y duración<sup>(7)</sup>.

### Plomo (Pb)

Es uno de los contaminantes más representativos de la minería metálica y polimetálica. Se libera durante la extracción, trituración, fundición y disposición de relaves<sup>(6)</sup>. Desde el punto de vista toxicológico, es un metal no esencial, bioacumulable y persistente, con elevada afinidad por eritrocitos y tejidos mineralizados<sup>(8)</sup>. La principal vía de exposición en contextos mineros es la inhalación de partículas finas y la

ingestión secundaria de polvo contaminado. El Pb circula predominantemente unido a glóbulos rojos y su medición en sangre total constituye el biomarcador estándar de exposición reciente, mientras que su acumulación ósea refleja exposiciones crónicas<sup>(9)</sup>.

### Arsénico (As)

Presente en numerosos yacimientos auríferos y de cobre (Cu), se encuentra en diferentes estados de oxidación e importantes formas químicas inorgánicas<sup>(6)</sup>. Su liberación ocurre tanto en minería industrial como artesanal, particularmente por lixiviación de minerales sulfurados. Es altamente móvil en agua y suelo, lo que amplía el espectro de exposición poblacional<sup>(10)</sup>. Desde el punto de vista toxicocinético el As se absorbe eficientemente por vía oral e inhalatoria, se distribuye ampliamente y se elimina principalmente por orina, siendo ésta el biomarcador de elección para evaluar exposición reciente, con especiación química para diferenciar formas tóxicas<sup>(11)</sup>.

### Mercurio (Hg)

Reviste especial relevancia en minería aurífera artesanal y de pequeña escala debido al uso de Hg elemental para la amalgamación del oro<sup>(6)</sup>. Desde una perspectiva toxicológica, existen tres formas principales: elemental, inorgánica y orgánica, cada una con comportamiento ambiental y biológico distinto<sup>(12)</sup>. En minería, la exposición ocurre principalmente por inhalación de vapores de Hg elemental<sup>(13)</sup>. Este compuesto presenta alta volatilidad y rápida absorción pulmonar, con capacidad de atravesar membranas biológicas y distribuirse sistémicamente. La medición de Hg en sangre y orina se utiliza para evaluar exposición reciente y crónica, respectivamente.

### COVs

El benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) es el agente de mayor relevancia hematotóxica en entornos mineros. Se origina en combustibles, explosivos, emisiones de maquinaria pesada y procesos de combustión incompleta<sup>(6)</sup>. Es un hidrocarburo aromático monocíclico, altamente volátil y lipofílico, con absorción predominante por inhalación. Su rápida distribución sistémica y metabolismo generan metabolitos medibles en orina, como el ácido trans,trans-mucónico y el S-fenilmercaptúrico, utilizados como biomarcadores de exposición ocupacional<sup>(14,15)</sup>.

### Polvos minerales

Generados durante perforación, voladura y transporte contienen mezclas complejas de sílice cristalina y metales adsorbidos<sup>(6)</sup>. Estos polvos se consideran vehículos de exposición inhalatoria crónica, con tamaño de partícula respirable y capacidad de transportar contaminantes hematotóxicos hacia el organismo<sup>(16)</sup>. La caracterización fisicoquímica del polvo es clave para evaluar el riesgo asociado.

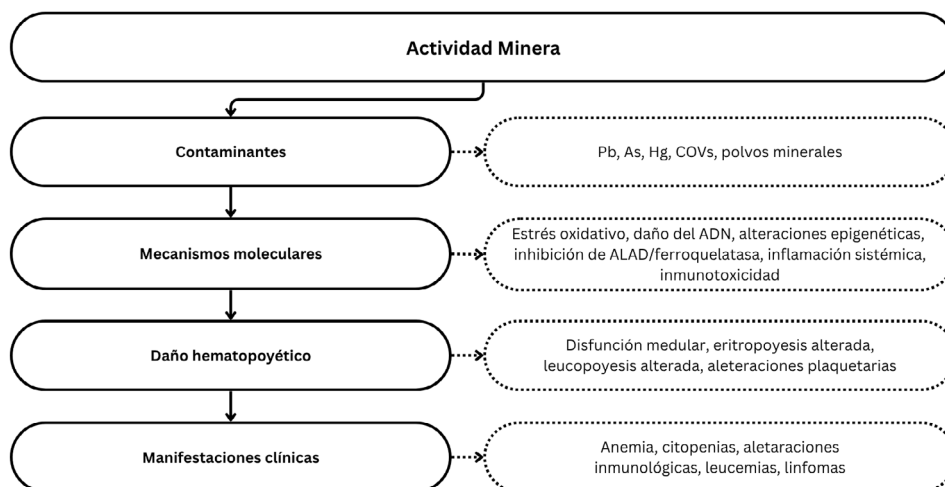
Por último, la actividad minera genera exposiciones crónicas a mezclas de contaminantes con relevancia carcinogénica<sup>(17)</sup>. Entre ellos, el As inorgánico, el C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> y la sílice cristalina respirable se clasifican en el Grupo 1 de la *International Agency for Research on Cancer* (IARC), con evidencia suficiente de carcinogenicidad en humanos. Los compuestos inorgánicos de Pb se incluyen en el Grupo 2A o “probablemente carcinogénicos para los humanos,” mientras que el Pb metálico se ubica en el Grupo 2B o “posiblemente carcinogénico.” El Hg y sus compuestos, clasificados en el Grupo 3 o “no clasificables respecto a su carcinogenicidad en humanos,” conservan importancia sanitaria por su toxicidad sistémica y bioacumulación.

### Mecanismos de daño hematológico asociados a la minería

Los efectos hematológicos asociados a la exposición a la actividad minera se explican por la concurren-

cia de múltiples mecanismos biológicos interrelacionados que comprometen tanto la integridad de la médula ósea como la funcionalidad y viabilidad de las células sanguíneas maduras (Figura 1)<sup>(18)</sup>. Uno de los mecanismos mejor caracterizados es la toxicidad directa sobre las células madre y progenitoras hematopoyéticas, particularmente documentada para el C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> y ciertos metales pesados. En el caso del C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, su biotransformación metabólica genera intermediarios altamente reactivos que interactúan con el ácido desoxirribonucleico (ADN) y proteínas nucleares, induciendo daño genético, alteraciones epigenéticas e inestabilidad cromosómica<sup>(17,19)</sup>. Estas alteraciones afectan procesos claves de autorrenovación, diferenciación y control del ciclo celular, lo que incrementa el riesgo de falla medular y de neoplasias hematológicas, especialmente leucemias mieloides. El Pb ejerce su efecto hematológico principalmente a través de la interferencia con la biosíntesis del hemo. Este metal inhibe de manera competitiva enzimas esenciales como la  $\delta$ -aminolevulinato deshidratasa y la ferroquelatasa, generando una reducción en la producción de hemoglobina y la acumulación de precursores porfirínicos con potencial toxicidad sistémica<sup>(8,20)</sup>. Este mecanismo contribuye de forma directa al desarrollo de anemias hipocrómicas y microcíticas en individuos expuestos de manera crónica. Por su parte, metales como el As y el Hg inducen un estado de estrés oxidativo persistente, caracte-

**Figura 1.** Mecanismos fisiopatológicos de las alteraciones hematológicas asociadas a la exposición a la actividad minera.



**Abreviaturas:** ADN: ácido desoxirribonucleico; ALAD:  $\delta$ -aminolevulinato deshidratasa; As: arsénico; COVs: compuestos orgánicos volátiles; Hg: mercurio; Pb: plomo. **Elaborado por:** los autores. **Fuente:** bibliografía consultada.

rizado por un aumento en la generación de especies reactivas de oxígeno que superan la capacidad antioxidante celular<sup>(21)</sup>. Este desequilibrio redox ocasiona daño estructural en lípidos de membrana, proteínas y material genético de las células hematopoyéticas, activando vías de señalización asociadas a apoptosis y senescencia celular. Como consecuencia, se observa una disminución progresiva de la capacidad funcional del sistema hematopoyético y una mayor susceptibilidad a alteraciones inmunológicas. De manera complementaria, la inhalación crónica de polvos minerales que contienen sílice cristalina y metales adsorbidos genera inflamación sistémica de bajo grado<sup>(16)</sup>. La liberación sostenida de citocinas proinflamatorias y mediadores inmunes altera la regulación de la eritropoyesis, la leucopoyesis y la homeostasis inmunitaria, contribuyendo a cambios persistentes en los parámetros hematológicos.

### Enfermedades hematológicas asociadas a la minería

La exposición a la actividad minera se relaciona con alteraciones hematológicas que comprometen múltiples líneas celulares y reflejan un efecto sistémico sobre la hematopoyesis. Estas alteraciones han sido descritas tanto en trabajadores ocupacionalmente expuestos como en poblaciones residentes en áreas mineras, incluyendo minería aurífera, metálica y carbonífera, tanto en operaciones subterráneas como a cielo abierto.

En la serie eritrocitaria, se han documentado reducciones en la hemoglobina, hematocrito y recuento eritrocitario, configurando patrones compatibles con anemia. La magnitud y gravedad de estas alteraciones muestra una relación dependiente de la intensidad y duración de la exposición, así como del tipo de contaminante predominante y la carga corporal de contaminantes metálicos. Se han descrito asociaciones entre concentraciones elevadas de Hg en sangre y modificaciones en la hemoglobina, hematocrito y volumen corpuscular medio, con patrones diferenciales según sexo y grupo etario<sup>(21-23)</sup>. Asimismo, la exposición simultánea a mezclas de metales, incluyendo Pb, Hg, Cd, As, potencia el deterioro de los parámetros eritrocitarios e incrementa el riesgo de anemia y alteraciones morfológicas celulares<sup>(20)</sup>. La exposición a Pb constituye un modelo clásico de toxicidad hematológica, evidenciado por disminuciones progresivas de parámetros eritrocitarios y aumento de zinc-protoporfirina, en una rela-

ción dependiente de dosis y tiempo<sup>(24)</sup>.

El compromiso hematológico también se extiende a la serie leucocitaria. Se han observado alteraciones en el recuento total de leucocitos y en la distribución de subpoblaciones celulares, incluyendo linfopenia relativa, neutrofilia y alteraciones en la relación neutrófilos/linfocitos; hallazgos compatibles con un estado de inflamación sistémica crónica e inmunotoxicidad inducida por exposición prolongada. Asimismo, la exposición a Hg se ha asociado con variaciones en neutrófilos, monocitos, basófilos y linfocitos, junto con correlaciones entre biomarcadores hematológicos y niveles corporales de exposición, sugiriendo una modulación diferencial de la respuesta inmune<sup>(21,25)</sup>.

También se han descrito alteraciones en la serie plaquetaria y parámetros hemorreológicos, incluyendo variaciones en el recuento plaquetario, agregación eritrocitaria y concentraciones de fibrinógeno, lo que indica un impacto sobre la regulación de la hematopoyesis y la hemostasia, particularmente en contextos de exposición acumulativa y condiciones de gran altitud<sup>(26)</sup>. Estos hallazgos sugieren una interacción compleja entre inflamación sistémica, estrés oxidativo, activación endotelial y disfunción hematopoyética crónica<sup>(27)</sup>.

Por último, la exposición sostenida a contaminantes mineros se ha relacionado con un incremento de marcadores de estrés oxidativo, inflamación y apoptosis celular, asociados con disfunción de la médula ósea y alteraciones hematológicas persistentes<sup>(18)</sup>. La activación continua de vías oxidativas e inflamatorias favorece la progresión desde alteraciones subclínicas hasta citopenias sostenidas y deterioro funcional del sistema hematopoyético. En particular, la exposición a C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> se asocia con mayor riesgo de neoplasias hematológicas, especialmente leucemias mieloides. Adicionalmente, en zonas con pasivos mineros, como relaves con uranio (U), se ha sugerido una asociación entre exposición ambiental crónica e incremento de linfomas no Hodgkin y leucemias en poblaciones cercanas, ampliando el riesgo más allá del ámbito ocupacional<sup>(28)</sup>.

### Discusión

La evidencia disponible indica que la actividad minera constituye una fuente relevante de exposición a agentes hematotóxicos capaces de alterar de forma sostenida la homeostasis del sistema hemato-

poyético<sup>(2-7)</sup>. Más allá de los efectos individuales de determinados contaminantes, los hallazgos revisados sugieren que el daño hematológico en contextos mineros responde a escenarios de exposición compleja y multifactorial, donde coexisten metales pesados, COVs, polvos minerales y otros contaminantes derivados de los procesos extractivos y metalúrgicos<sup>(6,7,14-16)</sup>. Esta interacción dificulta establecer límites claros entre exposiciones ocupacionales y ambientales, especialmente en regiones donde las comunidades residen próximas a zonas de extracción, procesamiento o disposición de residuos mineros<sup>(1-4)</sup>.

La consistencia de las enfermedades hematológicas observadas en diferentes contextos geográficos y tipos de minería refuerza la plausibilidad biológica de la asociación entre exposición minera y disfunción hematológica<sup>(5,18,20)</sup>. En este sentido, la convergencia entre biomarcadores de exposición, alteraciones hematológicas y mecanismos fisiopatológicos descritos en estudios experimentales y epidemiológicos aporta solidez a la hipótesis de una afectación sistémica mediada por estrés oxidativo, inflamación crónica e interferencia directa con la hematopoyesis<sup>(8-16,18-20)</sup>. Asimismo, el predominio de alteraciones subclínicas evidencia que una proporción importante del daño podría permanecer sin diagnóstico en ausencia de vigilancia específica, particularmente en poblaciones con acceso limitado a servicios de salud ocupacional y ambiental<sup>(3,4,18)</sup>.

Otro aspecto relevante corresponde a la heterogeneidad en la susceptibilidad biológica. Factores como edad, estado nutricional, carga acumulativa de exposición, coexistencia de comorbilidades y condiciones ambientales, incluyendo la exposición simultánea a múltiples contaminantes y la residencia en zonas de gran altitud, pueden modular la magnitud del efecto hematológico<sup>(20,26)</sup>. Esto adquiere especial relevancia en niños y adolescentes, quienes presentan mayor vulnerabilidad debido a la inmadurez de los sistemas detoxificadores y a la elevada tasa proliferativa de los tejidos hematopoyéticos<sup>(21-23,25)</sup>. De igual manera, la minería artesanal y de pequeña escala representa un escenario crítico, dado que suele desarrollarse bajo condiciones precarias de control ambiental y protección ocupacional<sup>(3,5)</sup>.

Desde una perspectiva mecanística, la evidencia respalda múltiples vías biológicas interrelacionadas. El Pb altera la biosíntesis del hemo mediante

inhibición enzimática, mientras que el Hg y el As favorecen estados persistentes de estrés oxidativo e inmunotoxicidad<sup>(8-12,20,24)</sup>. Paralelamente, la exposición a C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> y otros COVs se asocia con daño genético, inestabilidad cromosómica y mayor riesgo de neoplasias hematológicas, particularmente leucemias mieloides<sup>(14,15,17,19)</sup>. Adicionalmente, la inhalación crónica de polvos minerales y sílice cristalina puede inducir inflamación sistémica de bajo grado y disfunción inmunológica persistente, contribuyendo al deterioro progresivo de la función hematopoyética<sup>(16-18)</sup>. La posible asociación entre exposición minera crónica y neoplasias hematológicas en poblaciones cercanas a relaves y residuos mineros amplía además el impacto potencial más allá del ámbito estrictamente ocupacional<sup>(17,28)</sup>.

### Limitaciones

Existe una marcada heterogeneidad metodológica entre estudios en la evaluación de la exposición, ya que con frecuencia se utilizan clasificaciones ocupacionales generales sin una caracterización precisa de los contaminantes, sus concentraciones y vías de exposición, lo que limita la identificación de relaciones exposición-respuesta y la comparabilidad entre contextos mineros. Asimismo, existe una subrepresentación de poblaciones vulnerables, como comunidades cercanas a zonas mineras y trabajadores de la minería artesanal e informal, expuestos de forma prolongada y poco regulada. De manera similar, la evidencia se centra principalmente en adultos en edad laboral, con escasa atención a niños, mujeres embarazadas y adultos mayores, pese a su mayor susceptibilidad a los efectos hematotóxicos. Finalmente, los hallazgos de la presente revisión de la literatura no deben interpretarse como un efecto uniforme de la actividad minera, sino como evidencia de riesgos asociados a exposiciones específicas, buscando fortalecer las estrategias de prevención, vigilancia y gestión del riesgo en el sector minero.

### Vacíos en la literatura

En cuanto a los vacíos de conocimiento, destaca la limitada integración de biomarcadores hematológicos con biomarcadores de exposición y de efecto temprano, lo que restringe la capacidad de identificar trayectorias de daño subclínico y su progresión a enfermedades manifiestas. Existe también un vacío relevante en la evaluación de exposiciones combina-

das, ya que los entornos mineros suelen implicar la coexistencia de múltiples metales, polvos minerales y compuestos orgánicos, cuyos efectos sinérgicos o aditivos sobre el sistema hematopoyético no se encuentran suficientemente caracterizados. Hay además una escasa diferenciación entre exposiciones ocupacionales y ambientales, así como entre minería artesanal y de pequeña escala y minería industrial, lo que dificulta identificar perfiles específicos de riesgo y establecer estrategias de vigilancia acordes con cada contexto. Por último, el predominio de estudios transversales limita la comprensión de los efectos acumulativos y de largo plazo, incluyendo la transición hacia trastornos hematológicos crónicos y neoplásicos.

### **Líneas de investigación futuras**

Con base a esto, futuros estudios deberían priorizar cohortes longitudinales que permitan caracterizar la progresión temporal de las alteraciones hematológicas desde fases subclínicas hasta enfermedades establecidas, así como evaluar su reversibilidad tras la reducción o eliminación de la exposición y la implementación de medidas de control ambiental y ocupacional. Asimismo, resulta prioritario validar biomarcadores tempranos de daño hematopoyético, integrar biomarcadores de exposición, efecto y susceptibilidad individual, y caracterizar las relaciones dosis-respuesta derivadas de exposiciones múltiples a metales pesados, COVs y polvos minerales. Se requieren también investigaciones sobre mecanismos que profundicen en las interacciones entre estrés oxidativo, inflamación crónica, alteraciones epigenéticas y disfunción de las células madre hematopoyéticas, con el fin de comprender los mecanismos que favorecen la progresión hacia citopenias persistentes y neoplasias hematológicas. Finalmente, son necesarios estudios comparativos entre minería artesanal y de pequeña escala e industrial, así como investigaciones que diferencien la exposición ocupacional de la exposición ambiental en comunidades cercanas a explotaciones y pasivos mineros. Lo anterior permitirá identificar determinantes específicos del riesgo, optimizar las estrategias de biomonitorización y generar evidencia útil para orientar intervenciones preventivas y políticas públicas basadas en el riesgo.

### **Recomendaciones con enfoque en salud pública**

Se recomienda la incorporación sistemática de parámetros hematológicos en los programas de vigilancia en salud ocupacional y ambiental, no sólo como herramientas diagnósticas, sino como indicadores tempranos de efecto biológico. Esta vigilancia debería integrarse con la biomonitorización de metales y otros contaminantes prioritarios, permitiendo una evaluación más completa del riesgo. Dado que los perfiles de exposición difieren entre trabajadores mineros y poblaciones residentes en áreas de influencia minera, las estrategias de vigilancia deberían adaptarse al contexto de exposición, diferenciando los escenarios ocupacionales de los ambientales. Del mismo modo, las intervenciones preventivas y los programas de monitoreo deberían considerar las particularidades de la minería artesanal y de pequeña escala frente a la minería industrial, debido a las diferencias en los contaminantes predominantes, las condiciones laborales y las medidas de control disponibles. Asimismo, resulta prioritario ampliar las estrategias de vigilancia hacia poblaciones ambientalmente expuestas, incluyendo comunidades cercanas a zonas de extracción, procesamiento y disposición de residuos mineros. La implementación de estudios poblacionales con enfoque territorial permitiría identificar desigualdades en la exposición y en los efectos en salud, aportando evidencia para intervenciones focalizadas. Finalmente, se recomienda promover enfoques interdisciplinarios, alineados con el paradigma *One Health*, que integren salud humana, ambiente y condiciones laborales, así como fortalecer las políticas de regulación ambiental, control de emisiones y educación sanitaria. Estas acciones son esenciales para reducir la carga de enfermedad hematológica asociada a la minería y para avanzar hacia modelos de desarrollo más protectores de la salud pública.

### **Conclusión**

La exposición derivada de la actividad minera puede afectar el sistema hematopoyético y producir enfermedades significativas. Esto ocurre principalmente a través de la exposición a COVs, metales pesados y otras sustancias químicas liberadas o presentes en el entorno minero. Sin embargo, se identifican aún algunas importantes en la evidencia que requieren estudios más específicos y de diseño longitudinal para profundizar la comprensión de estas asociaciones.

**Declaración de conflictos de interés:** los autores declaran no poseer conflictos.

### Bibliografía

1. von der Goltz J, Barnwal P. Mines: The local wealth and health effects of mineral mining in developing countries. *J Dev Econ*. 2019; 139:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2018.05.005>.
2. dos Reis VC, Oliveira Cubi GM, Oliveira Cubi GJ y col. Mining Impacts on Communities: A Systematic Review of Social, Economic, Environmental, Territorial, and Health Dimensions. *Sustainability*. 2026; 18:4208. <https://doi.org/10.3390/su18094208>.
3. World Health Organization (WHO). Environmental and occupational health hazards associated with artisanal and small-scale gold mining. 2016, 36 p. Switzerland: WHO Library Cataloguing-in-Publication Data.
4. Pieters JN, Ndaba NS, Ngcobo S. Exploring prioritization of wellbeing and health impacts for mining communities during the mining life cycle within the sub-Saharan Africa context: a systematic review. *BMC Public Health*. 2025; 25:1432. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-22691-7>.
5. Eisler R. Health risks of gold miners: a synoptic review. *Environ Geochem Health*. 2003; 25:325–345. <https://doi.org/10.1023/a:1024573701073>.
6. Weiss F, Leuzinger M, Zurbrugg C, Eggen R. “Mining Industry Pollutants,” *Chemical Pollution in Low and Middle Income Countries*. 2016, p. 67–101. Suiza: Eawag; Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
7. Martins FP, Junior ABB, Batalhão ACS, Paschoalotto MAC, Veras MM. Mining Chemical Exposures on Health & Environment Impact: A Global Scoping Review. *J Sustain*. 2025; 1(2). <https://doi.org/10.55845/jos-2025-1211>.
8. Wani AL, Ara A, Usmani JA. Lead toxicity: a review. *Interdiscip Toxicol*. 2015; 8:55–64. <https://doi.org/10.1515/intox-2015-0009>.
9. Gonzalez-Villalva A, Marcela RL, Nelly LV y col. Lead systemic toxicity: A persistent problem for health. *Toxicology*. 2025; 515:154163. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2025.154163>.
10. Mohammed Abdul KS, Jayasinghe SS, Chandana EPS, Jayasumana C, De Silva PMCS. Arsenic and human health effects: A review. *Environ Toxicol Pharmacol*. 2015; 40:828–846. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2015.09.016>.
11. Kuivenhoven M, Mason K. “Arsenic Toxicity,” *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. 2025. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK541125/>. [Accessed January 5, 2026]
12. Björklund G, Dadar M, Mutter J, Aaseth J. The toxicology of mercury: Current research and emerging trends. *Environ Res*. 2017; 159:545–554. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.051>.
13. Charkiewicz AE, Omeljaniuk WJ, Garley M, Nikliński J. Mercury Exposure and Health Effects: What Do We Really Know? *Int J Mol Sci*. 2025; 26:2326. <https://doi.org/10.3390/ijms26052326>.
14. Zhou X, Zhou X, Wang C, Zhou H. Environmental and human health impacts of volatile organic compounds: A perspective review. *Chemosphere*. 2023; 313:137489. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137489>.
15. Yang S, Shao Z, Jin LN y col. Distinct baseline toxicity of volatile organic compounds (VOCs) in gaseous and liquid phases: Mixture effects and potential molecular mechanisms. *J Hazard Mater*. 2025; 485:136890. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136890>.
16. Fubini B, Areán CO. Chemical aspects of the toxicity of inhaled mineral dusts. *Chem Soc Rev*. 1999; 28:373–381. <https://doi.org/10.1039/A805639K>.
17. International Agency for Research on Cancer (IARC) Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Overall Evaluations of Carcinogenicity: An Updating of IARC Monographs. 1987. Francia: IARC.
18. Grari O, Kharmach A, Douzi N y col. Hematological impacts of environmental toxicants and sustainable strategies for prevention. *Discov Environ*. 2026; 4:80. <https://doi.org/10.1007/s44274-026-00594-7>.
19. Snyder R. Leukemia and Benzene. *Int J Environ Res Public Health*. 2012; 9:2875–2893. <https://doi.org/10.3390/ijerph9082875>.
20. Živančević K, Živanović J, Baralić K y col. Integrative investigation of hematotoxic effects induced by low doses of lead, cadmium, mercury and arsenic mixture: In vivo and in silico approach. *Sci Total Environ*. 2024; 930:172608. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172608>.
21. Robledo-Moreno M, Molina-Castaño C, Salazar-Camacho C y col. Hematological alterations by

- gender and age linked to mercury exposure in residents of the Colombian Atrato River artisanal gold mining region. *J Hazard Mater.* 2025; 499:140211. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140211>.
22. Cruz-Gonzales G, Hurtado-Concha A, Bejarano-Benites H y col. Distribution of Hematologic Parameters of Complete Blood Count in Anemic and Nonanemic Children in a Mining-Exposed Highland Peruvian Community. *Int J Environ Res Public Health.* 2025; 22:1637. <https://doi.org/10.3390/ijerph22111637>.
  23. Vianna A dos S, Santos A de SE, Fróes Asmus CIR y col. Anemia in Indigenous youth from an Amazonian community in Brazil exposed to mercury during a major environmental impact from gold mining activities. *Cad Saúde Coletiva.* 2024; 32:e32040101. <https://doi.org/10.1590/1414-462X202432040101>.
  24. Pumallanqui-Ramirez B, Li J, Rueda-Torres L, Rosales-Rimache J. Relationship between Blood Lead Levels and Anemia: A Cross-Sectional Study on Mining Workers from Peru. *Adv Public Health.* 2024; 2024:5517405. <https://doi.org/10.1155/2024/5517405>.
  25. Palomares-Bolaños J, Caballero-Gallardo K, Olivero-Verbel J. Hematological Parameters and Mercury Exposure in Children Living Along Gold-Mining-Impacted Rivers in the Mojana Region, Colombia. *Biol Trace Elem Res.* 2025; 203:5041–5056. <https://doi.org/10.1007/s12011-025-04557-6>.
  26. Vearrier D, Greenberg MI. Occupational health of miners at altitude: adverse health effects, toxic exposures, pre-placement screening, acclimatization, and worker surveillance. *Clin Toxicol Phila Pa.* 2011; 49:629–640. <https://doi.org/10.3109/15563650.2011.607169>.
  27. Maluf CB, Brito F de A, Simões TC, Peixoto SV, Vidigal PG. Laboratory profile after mining dam breach: Brumadinho Health Project results. *Rev Bras Epidemiol.* 2022; 25:e220013. <https://doi.org/10.1590/1980-549720220013.supl.2>.
  28. Inamasu T, Patel M, Espina C, Pentz A, Joffe M, Winde F, Schüz J. Retrospective case-series analysis of haematological malignancies in goldmining areas of South Africa. *SAMJ South Afr Med J.* 2018; 108:858–864. <https://doi.org/10.7196/samj.2018.v108i10.13175>.



**Atribución – No Comercial – Compartir Igual (by-nc-sa):** No se permite un uso comercial de la obra original ni de las posibles obras derivadas, la distribución de las cuales se debe hacer con una licencia igual a la que regula la obra original. Esta licencia no es una licencia libre.