Escuelas de Calama presentan altas concentraciones de metales potencialmente tóxicos

Las salas de clases no están aisladas de la contaminación ambiental que caracteriza al entorno minero de Calama. **Así lo revela un estudio liderado por investigadores de las universidades de Chile, de Heidelberg, de Tarapacá y del Desarrollo** que examinó el polvo acumulado dentro y fuera de 38 establecimientos educativos de esta ciudad. El trabajo, publicado en la revista Environment International, detectó concentraciones de cobre, arsénico, plomo y molibdeno hasta 10 veces superiores a los niveles de referencia para la zona, similares a los encontrados en exteriores. Experimentos con peces cebra, además, mostraron un aumento de la frecuencia cardíaca tras la exposición a estos materiales.

En Calama, cerrar la puerta de una sala de clases no necesariamente significa dejar afuera el polvo del desierto y de la actividad minera. Las partículas suspendidas por el viento pueden atravesar las aberturas de los edificios, ingresar adheridas al calzado y la ropa, y depositarse sobre las superficies interiores. Lo que hasta ahora no estaba claro era cuánto se diferenciaba ese polvo del que se encuentra en el exterior, ni qué sustancias podía transportar. Esta interrogante surgió de investigaciones anteriores que detectaron una huella creciente de metales vinculados con el auge de la minería desde la década de 1990, que alcanzaba a comunidades situadas hasta 70 kilómetros de las principales faenas y relaves de Alto El Loa.

La inquietud por conocer qué pasaba en espacios interiores

llevó al equipo que lideró dichas investigaciones a los espacios donde niños y adolescentes pasan gran parte del día: salas cunas, jardines infantiles, escuelas básicas y liceos. Si la huella química de la minería podía viajar decenas de kilómetros, **¿eran las salas de clases capaces de aislar a estudiantes, docentes y trabajadores del polvo exterior y de los metales potencialmente tóxicos detectados?** Este fue el foco de un nuevo estudio liderado por **Nicolás Zanetta-Colombo**, investigador del Centro de Medio Ambiente de la Universidad de Heidelberg; **Carlos Manzano**, académico de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile; **Zoë Fleming**, investigadora del Centro C+ de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Desarrollo; y **Manuel Prieto**, investigador de la Universidad de Tarapacá.

El trabajo, publicado en la revista científica Environment International, demuestra que las concentraciones interiores de cuatro de los principales elementos estudiados –cobre, arsénico, plomo y molibdeno– siguieron estrechamente los niveles encontrados fuera de los establecimientos. Nicolás Zanetta-Colombo, primer autor de la publicación, comenta que la investigación tuvo como punto de partida conversaciones con integrantes del Colegio Médico de Calama y destaca sobre las conclusiones del estudio que ***“la contaminación no necesariamente se detiene en la puerta de una escuela. Puede ingresar, acumularse y formar parte del ambiente cotidiano donde los niños aprenden y se desarrollan****. Y eso nos obliga a repensar cómo evaluamos los impactos ambientales de la minería y, sobre todo, cómo protegemos a las comunidades que viven en estos territorios*”.

La huella de la minería en el aula

“La protección de la infancia debe formar parte de la planificación, la regulación ambiental y las responsabilidades de quienes desarrollan y fiscalizan la actividad extractiva”, concluye Nicolás Zanetta-Colombo, investigador de la

Universidad de Heidelberg.
El equipo examinó **muestras de polvo sedimentado recolectadas tanto en espacios interiores como exteriores de 38 escuelas de Calama**. La comparación permitió evaluar si las construcciones reducían efectivamente el ingreso de elementos presentes en el ambiente urbano. Las muestras fueron sometidas a análisis químicos, mineralógicos e isotópicos en distintos laboratorios de Chile, Italia, Canadá, Alemania y Sudáfrica para identificar los elementos contenidos en el polvo y buscar señales sobre su procedencia. Carlos Manzano señala que también se midió su potencial oxidativo, un indicador de la capacidad para promover la formación de especies reactivas, lo que *"permite evaluar los potenciales efectos de la mezcla compleja de sustancias químicas presentes en el material particulado o cualquier muestra ambiental, en lugar de enfocarse en un número limitado de especies químicas a evaluar. Representa una aproximación más holística al riesgo químico asociado a las muestras ambientales"*.

Los resultados mostraron que **las concentraciones de cobre, arsénico, plomo y molibdeno encontradas dentro de las escuelas podían ser hasta diez veces superiores a los niveles estimados para las características geológicas naturales del desierto en esta zona**. El análisis isotópico mostró que la composición del polvo no era consistente con emisiones recientes del tránsito vehicular o de procesos de combustión. Las firmas mineralógicas, en tanto, apuntaron a una mezcla de material natural de la corteza terrestre y partículas vinculadas con la industria minera.

El estudio detectó, además, un enriquecimiento de partículas mineras envejecidas (oxidadas) dentro de los establecimientos. El académico de la Universidad de Chile explica que este hallazgo significa que *"las partículas no fueron necesariamente depositadas en tiempos recientes. Esto podría indicar que las **áreas intradomiciliarias, incluidas las salas***

de clase, pueden funcionar como un reservorio de contaminación *al que antes no le prestábamos mucha atención*”. Es decir, los espacios interiores no solo reciben el polvo exterior, sino que también permiten que se acumule y permanezca sobre sus superficies, desde donde puede volver a levantarse por el movimiento cotidiano de las personas.

La zona reúne faenas de extracción y procesamiento, depósitos de relaves, caminos industriales, transporte de materiales y distintas fuentes de resuspensión, pero los investigadores advierten que el trabajo no permite atribuir el polvo a una empresa, instalación u operación en particular. En este sentido, plantean que se requerirá de monitoreos continuos, información operacional y una caracterización química más detallada de cada fuente para determinar orígenes y contribuciones específicas. El hallazgo central, sin embargo, permanece. En este paisaje minero, **el límite físico entre exterior e interior resultó mucho más permeable de lo que habitualmente asumen las evaluaciones ambientales.**

¿Un riesgo sanitario?

Carlos Manzano sostiene que el equipo busca “cambiar la forma de pensar en la contaminación. No se trata de una amenaza lejana que solo existe en el radio de alcance de la ‘nube tóxica’, sino que también puede transportarse largas distancias, depositarse y acumularse en sitios inesperados”.
El trabajo aporta evidencia sobre la presencia ambiental de cobre, arsénico, plomo y molibdeno, así como del potencial reactivo del polvo. La detección dentro de las escuelas no prueba la ocurrencia de enfermedades o intoxicaciones, pero es un hallazgo que amerita especial atención sanitaria por **los potenciales riesgos ambientales y sanitarios relacionados con la exposición a estos metales**, entre los que destacan problemas respiratorios, enfermedades cardiovasculares e incluso cáncer. Al respecto, Carlos Manzano destaca que *“existen metales para los que la evidencia de los efectos es*

tan grande y clara que no existen límites 'seguros' de exposición. ***Metales como plomo y arsénico tienen amplia evidencia en la literatura sobre sus efectos tóxicos y en el neurodesarrollo de niños y niñas***".

Respecto a los resultados y las medidas de política pública, Nicolás Zanetta-Colombo plantea que "la primera medida es reconocer que el ambiente interior de las escuelas también debe ser parte del monitoreo ambiental".
La investigadora Zoë Fleming enfatiza, asimismo, el foco del estudio en las escuelas, *"un* ***espacio donde los niños juegan y mantienen un contacto permanente con superficies dentro y fuera de las aulas, y -por lo mismo- son más propensos que los adultos a ingerir el polvo de su entorno***". Otra señal de alerta relevante, en esta línea, tiene relación con las mediciones del potencial oxidativo del polvo en las aulas. Las muestras interiores conservaron una capacidad considerable para participar en reacciones que, dentro de un organismo, podrían favorecer procesos de estrés oxidativo.

Parte del estudio también contempló ensayos con **embriones de peces cebra**, un organismo ampliamente utilizado para estudiar respuestas biológicas durante el desarrollo. *"No queríamos limitarnos a saber cuánto metal había en el polvo. También queríamos investigar si ese material podía provocar respuestas biológicas en un organismo vivo. Porque una cosa es identificar contaminantes y otra es comprender qué ocurre cuando un organismo entra en contacto con ellos"*, explica Nicolás Zanetta-Colombo sobre el sentido de estos experimentos. Respecto a los resultados, agrega: ***"observamos que la exposición a extractos del polvo escolar produjo un aumento significativo de la frecuencia cardíaca y otras alteraciones en indicadores del desarrollo embrionario"***.

El investigador chileno de la Universidad de Heidelberg enfatiza, no obstante, que la respuesta fisiológica identificada en estos animales *"no significa que hayamos*

demostrado enfermedades o alteraciones cardíacas en los niños de Calama. No estudiamos directamente su salud en este experimento. Lo que encontramos es que ***el material acumulado en las escuelas puede generar respuestas biológicas medibles bajo condiciones experimentales****”*. Afirma, de todas formas, que estos hallazgos abren preguntas relevantes para “comprender mejor a qué están expuestos realmente los escolares y cuáles podrían ser las implicancias para su salud y desarrollo. Ese es uno de los pasos que queremos abordar en las siguientes etapas de nuestra investigación”.

Prevención, mitigación y remediación

Frente a los resultados de esta nueva investigación, el equipo advierte sobre la necesidad de realizar estudios que permitan evaluar los impactos ambientales y sanitarios de la exposición a contaminantes relacionados con la minería en ambientes interiores. Carlos Manzano sostiene que el equipo busca, en primer lugar, *“cambiar la forma de pensar en la contaminación. No se trata de una amenaza lejana que solo existe en el radio de alcance de la ‘nube tóxica’, sino que también puede transportarse largas distancias, depositarse y acumularse en sitios inesperados. Y, al final, todo ese balance de contaminantes puede afectar nuestra salud.* ***Es necesario que consideremos nuevos reservorios y nuevas formas de preservar y mejorar la salud de las poblaciones vulnerables a estos sitios*** *tan relevantes para la producción e industria nacional”.*

Nicolás Zanetta-Colombo, en tanto, destaca que *“la primera medida* ***es reconocer que el ambiente interior de las escuelas también debe ser parte del monitoreo ambiental****. No basta con medir la contaminación exterior y asumir que las salas de clases están protegidas. Necesitamos sistemas de vigilancia que permitan conocer qué contaminantes se acumulan dentro de los establecimientos, cómo varían en el tiempo y de dónde provienen”*. Esta medida implicará pasar de una vigilancia concentrada casi exclusivamente en el aire exterior a un sistema capaz de seguir el recorrido completo del polvo, desde

su fuente y transporte atmosférico hasta su entrada y acumulación en espacios habitados, así como la proporción que puede ser absorbida por el organismo.

La preocupación preventiva es especialmente relevante en el caso del plomo. La Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que no se conoce un nivel de exposición a este metal que carezca de efectos perjudiciales y que los niños son particularmente vulnerables. Además de encontrarse en una etapa crítica del desarrollo neurológico, pueden absorber una mayor proporción de una dosis ingerida y sus conductas frecuentes de llevarse las manos y objetos a la boca aumentan el contacto con polvo y suelo contaminados. La misma entidad advierte también que el arsénico es altamente tóxico en su forma inorgánica y que la exposición prolongada puede causar lesiones cutáneas y distintos tipos de cáncer, además de asociarse con enfermedades cardiovasculares, diabetes y efectos sobre el desarrollo. Cabe destacar, sin embargo, que el estudio realizado en las escuelas de Calama no determinó cuánto plomo o arsénico ingresó al organismo de estudiantes y trabajadores, ni evaluó consecuencias sobre su salud.

Respecto a las medidas de prevención, mitigación y remediación, proponen **acciones dirigidas a las fuentes contaminantes**, incluidas las emisiones industriales y los depósitos de residuos mineros que puedan estar contribuyendo a la exposición, tanto durante la operación como después del cierre de las faenas. El investigador de la Universidad de Heidelberg señala que **“también podemos evaluar medidas concretas para reducir el ingreso y la acumulación de polvo**, como mejorar el sellado de las instalaciones, implementar sistemas adecuados de filtración del aire y establecer protocolos de limpieza que eviten volver a suspender las partículas. Pero estas medidas deben adaptarse a cada escuela y no pueden sustituir el control de las emisiones en su origen”.

Actualmente, Calama está declarada como zona saturada por la

concentración anual de material particulado grueso (MP10). Después de que el anterior Plan de Descontaminación Atmosférica fuera anulado, en 2024 comenzó la elaboración de un nuevo instrumento, pero su anteproyecto continúa en preparación. Este proceso, plantean los investigadores, ofrece una **oportunidad para incorporar en la política pública la composición química del material particulado, la contaminación de interiores y una atención prioritaria a establecimientos educacionales**. La masa total de MP10 es un indicador fundamental, pero no informa por sí solo qué sustancias contienen las partículas. El estudio, por lo mismo, sugiere complementar el monitoreo convencional con análisis periódicos de metales y los efectos de las mezclas complejas.

Este desafío cobra especial relevancia ante el crecimiento mundial de la demanda de cobre para redes eléctricas, energías renovables y electromovilidad. Chile puede desempeñar un papel central en esa transición, pero su contribución no será verdaderamente sustentable si los costos ambientales permanecen concentrados en las comunidades que viven junto a las zonas de extracción. Nicolás Zanetta-Colombo sostiene, asimismo, que las comunidades deben participar en estas decisiones y tener acceso a la información ambiental, y subraya que *"no podemos responsabilizar solamente a las escuelas de protegerse frente a un problema que tiene una escala territorial mucho mayor.* ***La protección de la infancia debe formar parte de la planificación, la regulación ambiental y las responsabilidades de quienes desarrollan y fiscalizan la actividad extractiva***".