

# *Inventario de pasivos ambientales mineros* **del estado de Hidalgo**

## *Mining Environmental Liabilities Inventory* **of State of Hidalgo**

**Rafael Gutiérrez Aguilar, Eduardo Flores Campos, Alberto Peralta Cruz, Fernando Gayosso Pérez, Alfredo Tapia Téllez, Eliud Donaldo Vite Ortega, Rosa Elvira Acosta Ramos y Karla Salgado Becerril**

México cuenta con base de datos de minas, información de utilidad para identificar sitios con características de los pasivos ambientales mineros (PAM). El objetivo de este trabajo es elaborar un inventario de estos del estado de Hidalgo, México, con una metodología basada en experiencias de otros países, evaluando los riesgos para el ser humano, la infraestructura y los recursos naturales. Se usó información digital y cartográfica del Servicio Geológico Mexicano, así como de los sitios encontrados en los recorridos de campo. Se visitaron 1 061 sitios; se conjuntaron cuatro de ellos (debido a su cercanía a otros) y se identificaron 751 como PAM; los 306 restantes presentaron características diferentes; del listado total, 236 corresponden a minerales metálicos y 515, a no metálicos. Resultado de la evaluación, se determinaron 582 PAM con riesgo alto en relación con la salud humana; para infraestructura, 147; y para los recursos naturales, 487.

**Palabras clave:** minería; medio ambiente; mina abandonada o inactiva.

Mexico has a database of mines with useful information to identify sites with characteristics of mining environmental liabilities (PAM in Spanish). The objective of this work is to elaborate an inventory of these sites in the state of Hidalgo, Mexico, with a methodology based on experiences in other countries, evaluating the risks to humans, infrastructure, and natural resources. Digital and cartographic information from the Mexican Geological Service was used, as well as information from the sites found during field visits. A total of 1,061 sites were visited; four of them were combined (due to their proximity to others) and 751 were identified as PAM; the remaining 306 had different characteristics; of the total list, 236 correspond to metallic minerals and 515 to non-metallic minerals. As a result of the evaluation, 582 PAMs were identified with high risk in relation to human health; for infrastructure, 147; and for natural resources, 487.

**Key words:** mining; environment; orphaned/abandoned mine.

Recibido: 23 de noviembre 2020

Aceptado: 8 de abril de 2021

\* Servicio Geológico Mexicano, rafaelgutierrez@sgm.gob.mx, eduardoflores@sgm.gob.mx, albertoperalta@sgm.gob.mx, fernandogayosso@sgm.gob.mx, alfredotapia@sgm.gob.mx, eliudvite@sgm.gob.mx, rosaacosta@sgm.gob.mx y karlasalgado@sgm.gob.mx, respectivamente.



Vista al exterior/Rafael Gutiérrez-Aguilar

## Introducción

La problemática de la minería abandonada en países con una tradición minera ha tomado importancia desde la década de los 80 del siglo pasado. Como consecuencia, parece que lo más habitual en la experiencia internacional es que ciertos organismos de la administración pública emprendan planes de acción sobre este problema a nivel regional o nacional, y que la primera de las medidas sea la realización de un inventario, al que simultánea o posteriormente acompañe una evaluación de riesgos con el objetivo de tener una jerarquía de prioridades de actuación.

La historia de la minería en México se remonta a la época prehispánica, cuando se extraían metales nativos (como oro, plata, cobre y estaño) que eran

empleados para elaborar objetos de adorno personal o para el culto religioso. Además de beneficiar sal, se conocían y usaban piedras semipreciosas, como el jade, la obsidiana y el ópalo, ya fuera en forma de adornos o herramientas (Coll *et al.*, 2002). Con la llegada de los españoles y posterior colonización, la fundación de diversas ciudades se dio a partir de la actividad minera, sobre todo en sitios con presencia de metales preciosos como el oro y la plata.

A través de los años, el desarrollo de las tecnologías ha tenido impacto en el modo de extracción de los minerales, que se refiere a la movilización de materiales del yacimiento, y del proceso de beneficio de estos. Hoy en día, los procedimientos son más eficientes en la separación y obtención de los minerales de interés económico, sin embargo, esto

ha sido gracias a la utilización de sustancias con potencial de contaminación al medio ambiente y en perjuicio de la salud humana; como ejemplo, se puede mencionar el mercurio, que se usa para la amalgamación en frío y que se comenzó a utilizar en las minas de Pachuca en 1555; actualmente, se emplean otros medios, como cianuración, flotación y lixiviación.

De acuerdo con la Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos (ASGMI), los pasivos ambientales mineros (PAM) comprenden las instalaciones, edificaciones, superficies afectadas por vertidos, depósitos de residuos mineros, tramos de cauces perturbados, áreas de talleres y lotes de maquinaria o de mineral que, estando en la actualidad en entornos de minas abandonadas o inactivas, constituyen un riesgo potencial permanente para la salud y seguridad de la población, la biodiversidad y el medio ambiente (ASGMI, 2010).

Considerando que la historia minera en México se registra a partir de mediados del siglo XVI, los pasivos ambientales derivados de esta actividad se encuentran en muchos lugares del país; por ejemplo, el estado de Hidalgo, que cuenta con ciudades fundadas a partir de la minería; tal es el caso de Pachuca, Real del Monte y Zimapán, entre otras. Esta actividad sigue presente en la entidad con una participación a nivel nacional de 94.49 % en manganeso, 3.74 % en zinc, 2.83 % en plomo, 1.6 % en plata y con menos de 1 % en cobre y oro, cada uno (SGM, 2019).

México no cuenta con un registro de PAM en el que se ubique e identifique la situación en que se encuentra cada uno de ellos; asimismo, no se tiene una metodología con la cual se puedan caracterizar y determinar si corresponden a un riesgo para el medio ambiente y/o la salud humana, información que se considera necesaria a nivel nacional y que sea abierta al público.

Existen estudios específicos que proponen estrategias, tal es el caso de identificación de jales con potencial de riesgo ambiental desarrollado en el estado de Guanajuato (Ramos-Arroyo y Sie-

be-Grabach, 2006); en él se identifican las características que controlan la distribución de elementos con potencial tóxico (origen geológico y clasificación textural) y la acidificación (origen geológico y la presencia de humedad).

Osuna-Martínez *et al.* (2021) revisaron diversas investigaciones en relación con el arsénico y encontraron que, para el estado de Hidalgo, se presentan concentraciones altas en 21 sitios. Un estudio desarrollado en el municipio hidalguense de Molango concluye que la población que vive cerca de la mina y la planta de procesamiento de manganeso presentan una incipiente alteración motora (Rodríguez-Agudelo *et al.*, 2006).

El objetivo del presente trabajo fue realizar un registro de PAM abandonados e inactivos, así como evaluar las posibles afectaciones a los ecosistemas y asentamientos humanos adyacentes en Hidalgo; se basa en un formato de registro denominado *ficha de campo* y una metodología de evaluación de riesgo sustentada en las experiencias de otras naciones que sean aplicables a las condiciones del país y ayuden a categorizar las problemáticas que pudieran presentar estos pasivos ambientales.

## Metodología

Se divide en cuatro fases.

### Identificación y ubicación preliminar de las minas abandonadas e inactivas

En primera instancia, se consultó la base de datos digital de minas de Hidalgo del Servicio Geológico Mexicano (SGM); se obtuvo información del estado que estas guardan, es decir, las que se encuentran abandonadas o inactivas (de acuerdo con la definición de PAM) de interés para esta investigación.

Asimismo, se realizó una revisión exhaustiva del acervo bibliográfico del SGM, dándole prioridad a dos informes técnicos, 23 cartas geológico-mineras (CGM) escala 1:50 000 y el *Panorama minero del*

*estado de Hidalgo* que contienen información valiosa y útil referente a la identificación y ubicación de minas abandonadas e inactivas.

Finalmente, durante la verificación en campo (con datos proporcionados por las autoridades locales y los habitantes de las regiones, mediante entrevistas personales), se complementó la base de datos.

## **Recolección de datos en campo**

Con base en el listado preliminar de PAM, se realizó la verificación *in situ* donde, en cada visita, se recabó información mediante una ficha que permitió realizar la evaluación del riesgo (ver Anexo).

Considerando como base la ficha de campo del Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas de la ASGMI (2010) y del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN, 2007), se realizaron las adaptaciones correspondientes para poderla utilizar en el proyecto que ahora nos ocupa.

Para efectos de diagnóstico, la ficha considera los siguientes aspectos:

- Identificación de la mina. Nombre, ubicación geográfica y en qué carta topográfica se encuentra, así como su accesibilidad.
- Tipo de minería. Metálica o no metálica; registra tipo de mineral o roca producido.
- Características de la mina. Describe el estado en que se encuentra, si es subterránea o a cielo abierto, dimensiones, actividades al interior o exterior.
- Características de la planta. Registra instalaciones existentes y el proceso o procesos de la planta de tratamiento.
- Depósito de residuos. Ubica y describe la existencia de depósitos, tipo y dimensiones.
- Sustancias peligrosas utilizadas. Identifica sustancias mediante antecedente del proceso minero o de manera visual *in situ*.
- Situación del entorno. Registra los elementos naturales y artificiales existentes.

- Situación del agua. Describe características hídricas en el entorno cercano.
- Análisis preliminar de riesgos. Evalúa la probabilidad y severidad para 17 componentes de acuerdo con la metodología descrita en la evaluación del riesgo.
- Certeza de contaminación. Identifica contaminación existente de manera visual y con ayuda de equipos de análisis en campo para agua, suelo, jal y residuos mineros.
- Evaluación especial. De acuerdo con las características encontradas en el PAM, sugiere algún tipo de estudio específico que ayude en un futuro a determinar las acciones de intervención para disminuir o mitigar el riesgo existente.

## **Evaluación del riesgo**

Con base en lo descrito por Alberruche del Campo *et al.* (2013), el riesgo se define como la medida combinada de la probabilidad de que ocurra un suceso o evento y de sus consecuencias negativas. En el campo de la salud y del medio ambiente, se identifica como la probabilidad de que un individuo o una población presenten una mayor incidencia de efectos adversos por exposición a un peligro.

La evaluación de riesgos es un proceso formalmente estructurado que busca establecer prioridades de control o actuación y, en especial, reconocer aquellos que pudieran considerarse como puntos críticos (Alberruche del Campo *et al.*, 2013). Para el análisis de riesgos, se utilizará toda la información recabada en campo mediante las fichas.

El riesgo está en función de la probabilidad de ocurrencia del evento, suceso o proceso indeseable considerado y de la severidad que puede esperarse ante la ocurrencia del mismo.

Cuando se habla de un evento (generado por pasivos ambientales), podrá implicar efectos dañinos a la salud humana o animal y al entorno. Es por esto que se clasificarán en cuatro categorías y 17 componentes específicos con base en lo establecido por la ASGMI (2010) y el SERNAGEOMIN (2007):

a) Contaminación:

- Del agua. Se determina por medio del análisis químico de muestras de agua.
- Del suelo. Se establece a través del análisis químico de muestras de suelo.
- Generación de polvo. Se estima por huellas de erosión de la superficie de depósitos de residuos, finos y no aglomerados, adhesión de polvo en superficies *in situ*, al momento de la visita, por el viento.
- Otros.

b) Flujo masivo de residuos mineros:

- Ruptura del muro de la presa de jales. Observación de la ubicación de la presa en relación con la escorrentía superficial, existencia de erosión del muro por agua, existencia o no de drenajes de agua de lluvia, anomalía en el muro, como grieta en el talud o pendiente, filtración de agua, entre otros.
- Colapso masivo de otros residuos. Observación de depósitos de residuos mineros, presencia de derrumbes de material, la pendiente del talud, cercanía a centros de población y cuerpos de agua.
- Otros.

c) Problemas de seguridad:

- Caída en un tiro de mina. Verifica el acceso difícil o fácil para las personas, si se encuentra resguardada perimetralmente, letreros de señalización, densidad de la vegetación y visibilidad del tiro.
- Accidente en una galería abierta. Condiciones de seguridad e información al exterior, antecedentes de accidentes (como pérdidas al interior, falta de oxígeno o caídas).
- Colapso de una pared o de una ladera. Posibilidad de derrumbe en minas a tajo abierto por pendientes empinadas e inestables, grietas en paredes, desprendimientos.
- Caída desde una pared alta. Verifica el acceso difícil o fácil para las personas, si se encuentra resguardada perimetralmente, letreros de señalización, densidad de la vegetación.
- Accidente por un equipo o instalación. Revisión de instalaciones abandonadas, equi-

pos y materiales, por desgaste u oxidación.

- Accidentes por insumos abandonados. Observación de sustancias inciertas o no identificables, que deberán ser analizadas. Posibilidad de contacto con la gente o el medio ambiente.
- Accidentes en un cuerpo de agua. Verifica las condiciones de acceso al cuerpo de agua y que la gente ingrese a él, así como la posibilidad de que se presente un accidente.
- Otros.

d) Hundimiento o subsidencia del terreno:

- Hundimiento de tierra/colapso. Se hace la evaluación cuando el evento ya se ha presentado.
- Otros.

En este caso, la fórmula general que se utilizará para determinar el riesgo será la siguiente:

$$R = P * S \quad (1)$$

donde:

$R$  = riesgo.

$P$  = probabilidad.

$S$  = severidad.

En este contexto, se considera que la predicción de riesgos conlleva incertidumbre, tanto para la asignación de la probabilidad como de la severidad. En la investigación de campo se juzgarán ambas para cada evento. La probabilidad del suceso se determinará según los criterios del cuadro 1.

Por otra parte, se considerará que los impactos que ejerce un evento pueden presentar distinta severidad, según los aspectos afectados. Para ello, se determinaron los siguientes objetos de estudio: salud, infraestructura y recursos naturales, considerando sus diferentes temas (ver cuadro 2).

Una vez seleccionados los objetos de estudio, se deberá determinar la severidad sobre cada uno de ellos, de acuerdo con los criterios del cuadro 3.

Por recomendación del SERNAGEOMIN (2007), no se asigna el número 4 en el punta-

Cuadro 1

### Criterios para determinar la probabilidad en la evaluación del riesgo

Puntaje	Probabilidad	Criterio de juicio
0	Nula	Origen de un evento no existente.
1	Baja	Quizás no ocurra.
2	Mediana	Posiblemente ocurra.
3	Alta	Ya existe o posiblemente ocurra.

Fuente: SERNAGEOMIN, 2007.

Cuadro 2

### Temas que considerar para los objetos de estudio

Objeto de estudio	Tema
Salud	Salud humana.
Infraestructura	Caminos, instalaciones públicas, otras infraestructuras, bienes muebles e inmuebles.
Recursos naturales	Zona agrícola y ganadera, bosque, recursos hídricos, área natural protegida, flora y fauna.

Fuente: SERNAGEOMIN, 2007.

Cuadro 3

### Criterios para determinar la severidad en la evaluación del riesgo

Puntaje	Severidad	Salud	Infraestructura	Recursos naturales
0	Ninguna	Sin consecuencia		
1	Baja	Leve	Daño menor	
2	Regular	Grave	Daño recuperable	
3	Alta	Muerte	Daño irreparable	
5	Catastrófica	Caso masivo de <i>alta consecuencia</i>		

Fuente: SERNAGEOMIN, 2007.

je de severidad para diferenciar con el valor de riesgo 4 que se obtendría de probabilidad 2 por severidad 2, como también de probabilidad 1 por severidad 4.

Con base en lo anterior, se establece la matriz de evaluación de riesgo, a partir de la cual se obtienen los puntajes y niveles de riesgo de acuerdo con la ponderación entre la probabilidad de ocurrencia de

un evento y el grado de severidad, considerando sus respectivas escalas de valoración (ver cuadros 4 y 5).

### Inventario de PAM

Integra una base de datos general con información referenciada geográficamente, es decir, un modelo que permite almacenar la información geográfica

Cuadro 4

### Matriz de evaluación de riesgo

Clasificación de evaluación de riesgos			Grado de severidad				
	Escala de evaluación		Catastrófica	Alta	Regular	Baja	Ninguna
		Puntaje					
Probabilidad	Alta	3	15	9	6	3	0
	Media	2	10	6	4	2	0
	Baja	1	5	3	2	1	0
	Nula	0	0	0	0	0	0

Cuadro 5

### Puntaje total y nivel de riesgo

Puntaje total	15-5	4-3	2-1	0
Nivel de riesgo	Alto	Mediano	Bajo	Nulo

Fuente: SERNAGEOMIN, 2007.

en archivos incorporados a un sistema de ficheros en un sistema gestor de base de datos. En el archivo, la información se almacena de manera estructurada con el fin de formar un conjunto integrado de datos mediante la definición de reglas, relaciones y asociaciones topológicas.

Lo anterior permitirá realizar un manejo más eficiente de los PAM, pues el diseño de su estructura obliga a considerar una serie de aspectos, como: la definición de una referencia espacial, establecimiento de reglas y relaciones entre archivos, topología geométrica y atributiva, tablas, dominios y subtipos, además de anotaciones, entre otros.

## Resultados

Considerando como objeto de estudio el estado de Hidalgo y derivado de la investigación en información vectorial, se identificaron 494 minas o sitios con características de inactiva o abandonada (SGM, 2010c), consideradas así de acuerdo con la definición de PAM; con base en la consulta de 23 cartas geológico-mineras escala 1:50 000 (SGM,

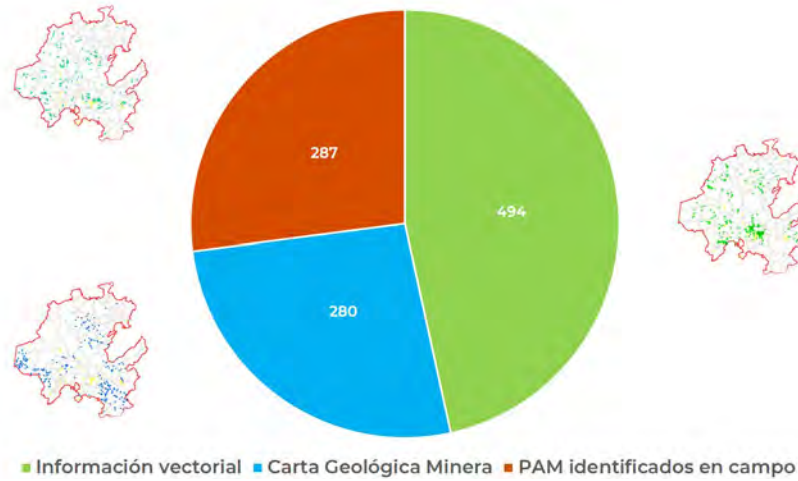
1995a, 1995b, 2001, 2002a, 2002b, 2003a, 2003b, 2004a, 2004b, 2005a, 2005b, 2007a, 2007b, 2007c, 2009a, 2009b, 2010a, 2010b, 2012, 2016, 2017a, 2017b, 2018); fueron 280 lugares identificados relacionados con las características mencionadas con anterioridad, lo que formó una base de 774 posibles PAM de manera inicial.

Como resultado de los trabajos de campo, se identificaron *in situ* 287 adicionales que, sumados a la base inicial, dan un total de 1 061 sitios diferentes (ver figura 1), mismos que fueron verificados durante la elaboración del proyecto en un tiempo programado de 24 meses y que se encuentran distribuidos casi en la totalidad del territorio de la entidad (ver mapa).

De los 1 061 sitios verificados, cuatro obras mineras inactivas se encontraban adyacentes a otras con las mismas características, por lo que se decidió levantar solo una ficha para ambas, quedando 751 lugares catalogados como PAM. De los restantes, 176 presentan estatus de activos, lo que no corresponde a las características de un PAM y 130 no fueron confirmados; de estos últimos, 82 no se

Figura 1

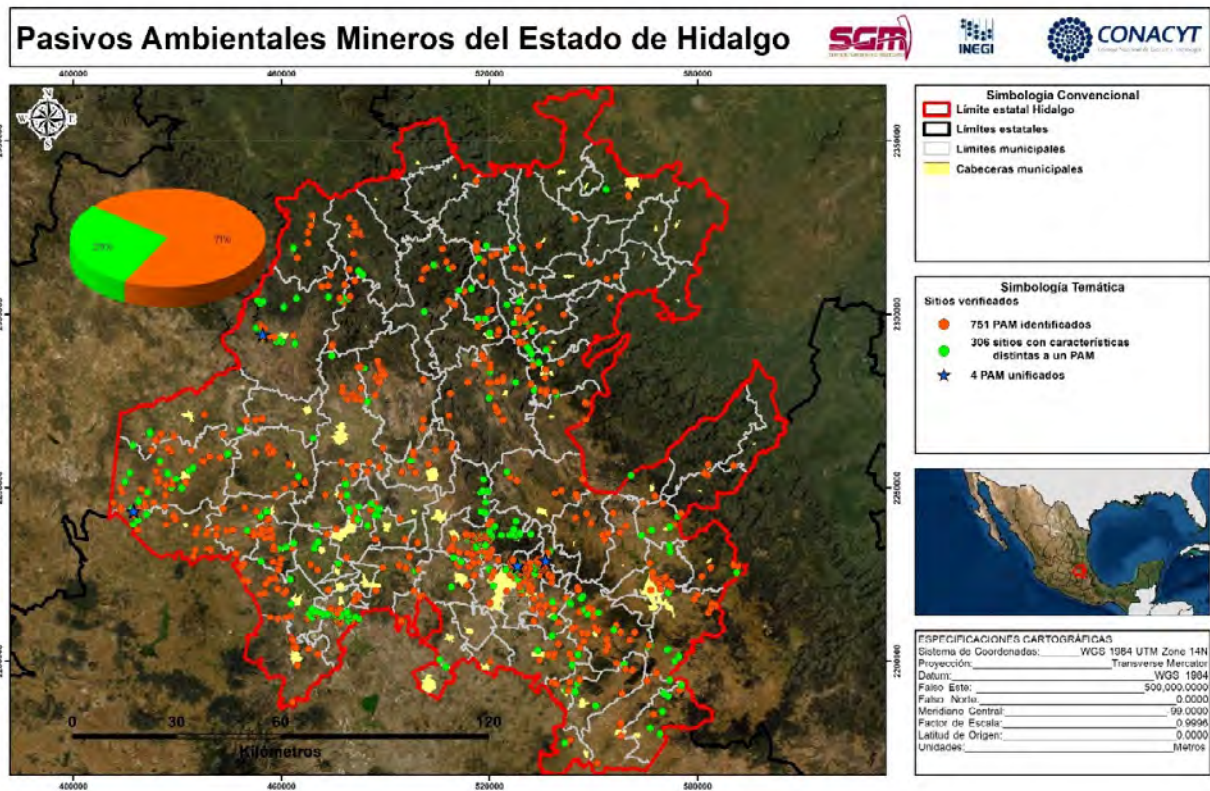
### Sitios verificados en recorridos de campo



Fuente: elaboración propia.

Mapa

### Distribución de sitios verificados en campo



Fuente: elaboración propia.



localizaron (tal vez estén cubiertos por la vegetación) y a 48 no se tuvo acceso debido a que el área para llegar al sitio estaba resguardada con cercado y letreros que prohibían la entrada y no se encontró personal para solicitar el ingreso (ver cuadro 6).

Se identificó que, del total de las obras visitadas y catalogadas como PAM, 68.58 % se asocia con minerales no metálicos y el resto corresponde a minerales metálicos (ver cuadro 7).

En relación con la evaluación de riesgo, y de acuerdo con la metodología mencionada, la probabilidad y la severidad fueron registradas en cada una de las fichas para, posteriormente, realizar con esta información la evaluación de los 17 componentes en los tres objetos de estudio de cada PAM; por lo anterior, se puede presentar más de

un componente con el mismo nivel de riesgo para cada uno de los PAM evaluados, razón por la cual, durante la presentación de los resultados, la suma de los PAM no corresponderá al total de sitios contenidos en la base de datos (751).

### Riesgo a la salud humana

Los resultados de la evaluación del riesgo obtenidos para el escenario salud humana, en relación con los 17 componentes, incluyen a cualquier tipo de población o de asentamientos humanos, incluso una casa aislada comprendida a 1 km a la redonda del PAM y cualquier tipo de interacción que pudiera tener una persona con él, los cuales pueden ser vulnerables a los riesgos potenciales producidos por el mismo.

Cuadro 6

#### Estatus de operación de los sitios verificados, por fuente de información

Estatus	Verificados con la información del shapefile de minas	Verificados con la Carta geológico-minera	Identificados en campo (nuevos)	Total
Inactivos	288	176	287	751
Activos	96	80		176
No localizados	67	15		82
Sin acceso	41	7		48
Adyacentes inactivos	2	2		4
<b>Total</b>	<b>494</b>	<b>280</b>	<b>287</b>	<b>1 061</b>

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 7

#### Pasivo ambiental minero asociado a minerales metálicos y no metálicos

Fuente de información	Total de obras inactivas	Metálicos	No metálicos
Información vectorial	288	155	133
Carta geológico-minera	176	2	174
Nuevo en campo	287	79	208
<b>Total</b>	<b>751</b>	<b>236</b>	<b>515</b>

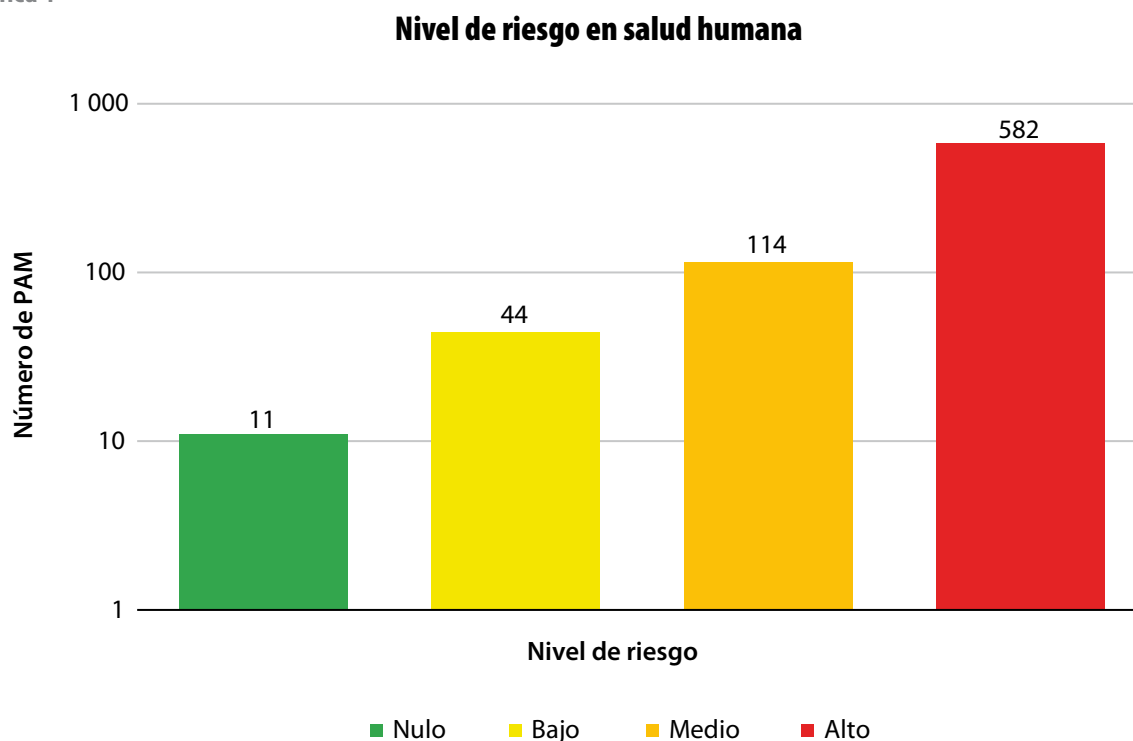
Fuente: elaboración propia

En la gráfica 1 se puede observar la cantidad de PAM ordenados en los distintos niveles de riesgo asociados a la salud humana, considerando el nivel de riesgo más alto que presentan. Con base en el análisis de la gráfica se puede determinar que la mayoría de los PAM presentan un nivel alto, con un total de 582 sitios, seguido del medio con 114, en contraste con los niveles bajo y nulo con 44 y 11, respectivamente.

Por otra parte, además de analizar el número de PAM por nivel de riesgo, se identificó lo correspondiente al valor de este, es decir, de cada PAM se tiene el evento con la mayor cifra alcanzada. Con base en lo anterior, se establece que, para el riesgo en salud humana, el valor más alto corresponde a colapso de una pared o ladera y caída desde una pared alta en 440 y 438 PAM, respectivamente (ver gráfica 2), ambos eventos en la categoría de problemas de seguridad. Por el contrario, con la menor ponderación alcanzada se encuentran el flujo masivo de residuos mineros y hundimiento, así como la subsidencia del suelo.

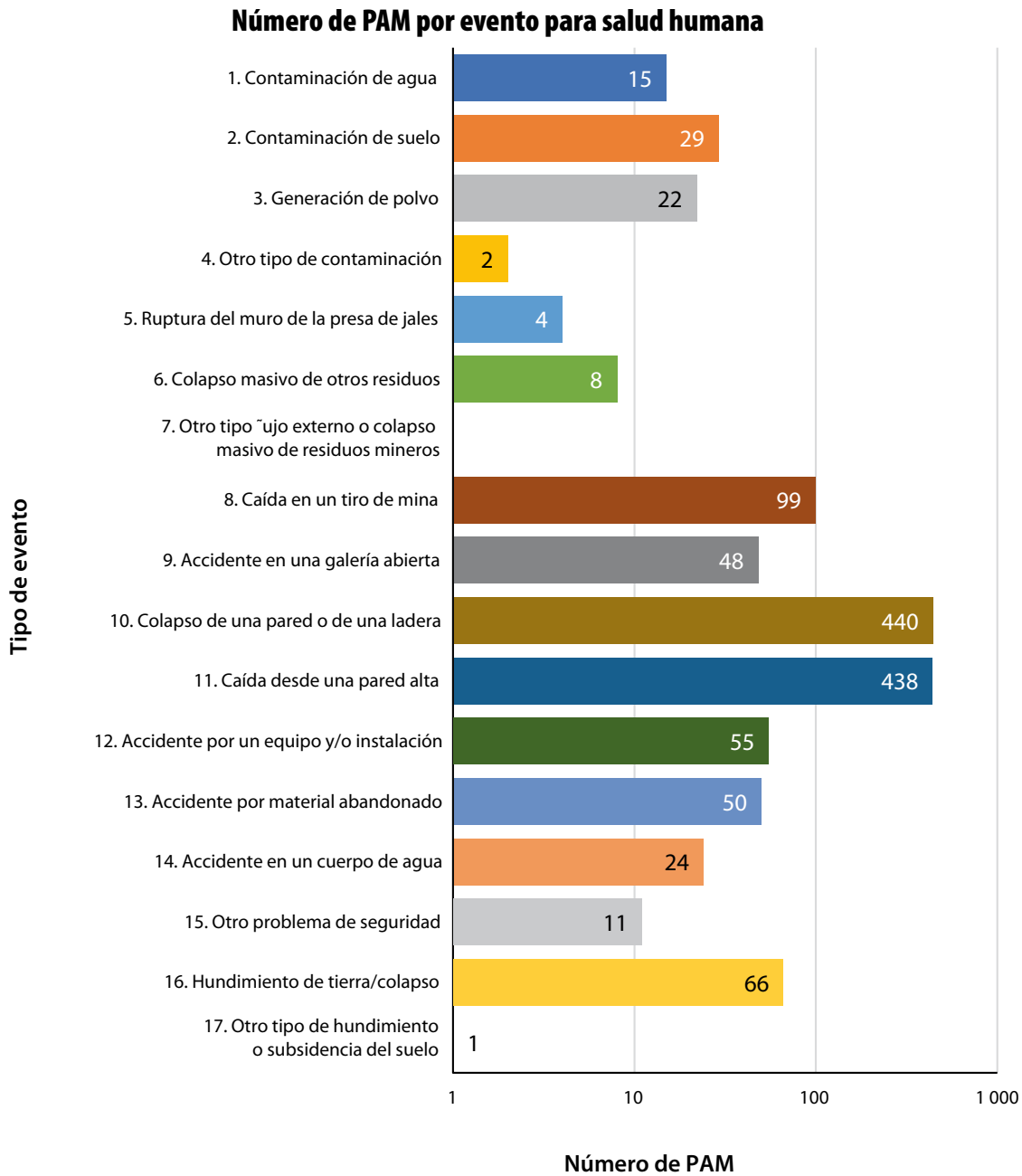
De los eventos que pueden provocar daños a la salud humana (ver cuadro 8), en primera instancia se consideran a los de la categoría de problemas de seguridad presentes en la mayoría de los PAM asociados, posiblemente, a la legislación ambiental que, en su momento, no obligaba a realizar actividades al finalizar la vida útil del sitio y, posterior a ello, a las malas prácticas de cierre de la actividad minera. Se posiciona a las poblaciones cercanas en un nivel alto de riesgo debido a que las afectaciones pudiesen producir daños severos o letales a sus habitantes cercanos y/o con interacción con estos sitios. En segundo lugar, se identifican aquellos relacionados con el derrumbe del suelo (hundimiento de tierra/colapso), seguido de los riesgos producto de la contaminación (sobre todo la del suelo) y la generación de polvo. Es importante señalar que estos —al igual que los problemas de seguridad— van íntimamente relacionados con las medidas preventivas o de mitigación utilizadas en las etapas de cierre o abandono en la mayoría de los sitios con actividades mineras.

Gráfica 1



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 2



Fuente: elaboración propia.

### Riesgo a la infraestructura

El número de PAM que representa un riesgo a la infraestructura se muestra en la gráfica 3, donde 147 están en nivel alto, 138 corresponden a uno medio, así como 153 y 313 son catalogados con bajo y nulo, respectivamente.

De manera adicional a la identificación del número de PAM por nivel de peligro, también se determinó el tipo de evento de mayor riesgo asociado a la infraestructura. En este contexto, en la gráfica 4 se muestran los 17 componentes, donde destaca el colapso de una pared o una ladera en 285 PAM, seguido por la generación de polvo y el hundimiento

Cuadro 8

### Orden jerárquico de los eventos más sobresalientes en los 751 PAM analizados para salud humana

Núm. jerárquico	Categoría	Evento	Nivel de riesgo				
			Nulo	Bajo	Medio	Alto	Total
1	Problemas de seguridad	Colapso de una pared o de una ladera	0	18	38	384	440
2	Problemas de seguridad	Caída desde una pared alta	0	34	81	323	438
3	Problemas de seguridad	Caída en un tiro de mina	0	0	11	88	99
4	Hundimiento y subsidencia del suelo	Hundimiento de tierra/colapso	0	1	3	62	66
5	Problemas de seguridad	Accidente por un equipo y/o instalación	0	2	6	47	55
6	Problemas de seguridad	Accidente por material abandonado	0	8	10	32	50
7	Problemas de seguridad	Accidente en una galería abierta	0	1	3	44	48
8	Contaminación	Contaminación de suelo	0	1	5	23	29
9	Problemas de seguridad	Accidente en un cuerpo de agua	0	3	5	16	24
10	Contaminación	Generación de polvo	0	8	4	10	22
11	Contaminación	Contaminación de agua	0	2	2	11	15
12	Problemas de seguridad	Otro problema de seguridad	0	1	1	9	11
13	Flujo masivo de residuos mineros	Colapso masivo de otros residuos	0	0	2	6	8
14	Flujo masivo de residuos mineros	Ruptura del muro de la presa de jales	0	0	0	4	4
15	Contaminación	Otro tipo de contaminación	0	0	0	2	2
16	Hundimiento y subsidencia del suelo	Otro tipo de hundimiento o subsidencia del suelo	0	0	0	1	1
17	Flujo masivo de residuos mineros	Otro tipo de flujo externo o colapso masivo de residuos mineros	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

de tierra/colapso presentes en 79 y 50 sitios, respectivamente; en contraste, con menor incidencia, se asociaron con otro tipo de problema de seguridad tres PAM, así como cinco con la ruptura del muro de la presa de jales y seis con el colapso masivo de otros residuos; por último, también se identificaron 28 asociados a la contaminación del suelo; 27, a accidente por un equipo y/o instalación; y 17, a contaminación del agua.

En el cuadro 9 se ordenan jerárquicamente todos los eventos en función de su incidencia en los PAM con el valor más alto de riesgo; se ha identificado que el colapso de una pared o una ladera es el de mayor recurrencia en las obras mineras abandonadas asociadas al tema de infraestructura, destacando este tipo en cada uno de los tres niveles de riesgo con el mayor número de PAM; en segunda instancia se encuentra la generación de polvo, donde la mayoría de los sitios se encuentra en un nivel bajo; por otra parte, el hundimiento de tierra/colapso es el tercer evento con mayor presencia en

los sitios verificados que, en contraste con el anterior, el riesgo alto predomina en la mayoría de los PAM con esta condición.

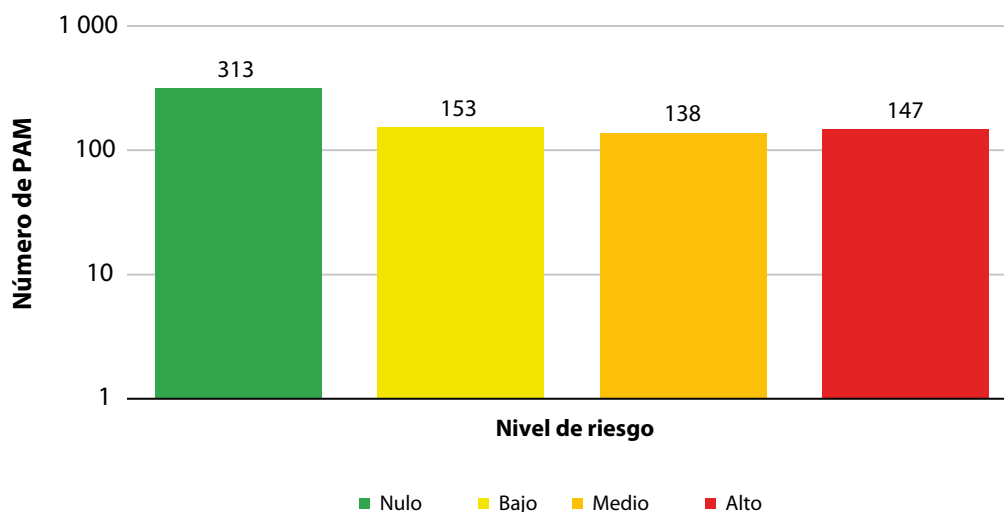
### Riesgo a los recursos naturales

La gráfica 5 representa una clasificación del número de PAM en función del nivel más alto de riesgo que presentan. Como se puede observar, la mayor cantidad de PAM se ubica en el nivel alto (487), decreciendo en el medio (178), el bajo (57) y el nulo (29).

Se trabajó con los datos para identificar el número de PAM por eventos para poder resaltar los más frecuentes con base en el valor más alto que se obtuvo de los 17 considerados (ver gráfica 6). Los que presentan concentración de valores altos son: colapso de una pared o ladera y caída desde una pared alta con 408 PAM, en ambos casos, debido a lo mencionado de las pocas o nulas acciones

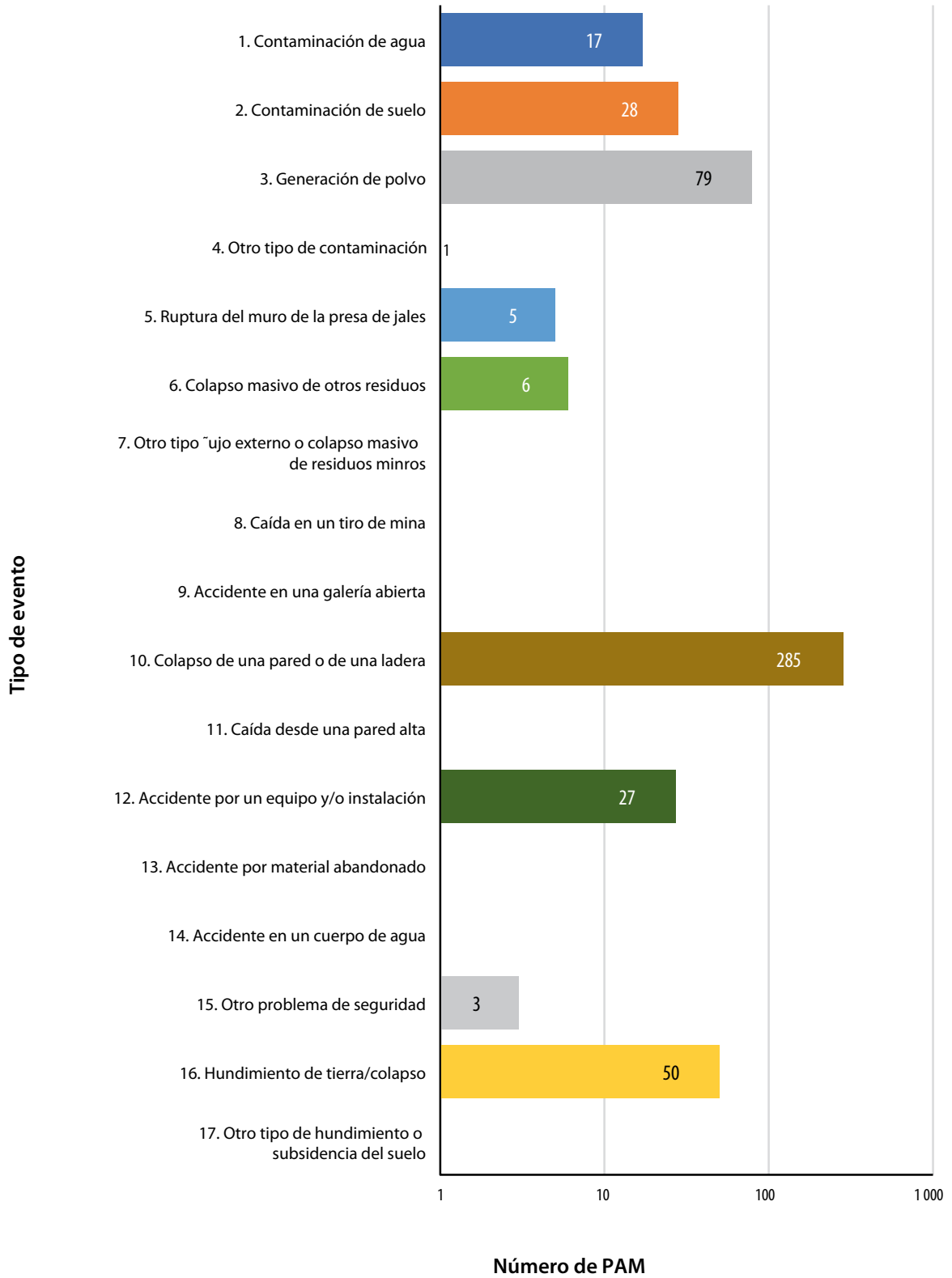
Gráfica 3

### Nivel de riesgo en infraestructura



Fuente: elaboración propia.

### Número de PAM por evento para infraestructura



Fuente: elaboración propia.

**Orden jerárquico de los eventos más sobresalientes en los 751 PAM analizados para infraestructura**

Núm. jerárquico	Categoría	Evento	Nivel de riesgo				
			Nulo	Bajo	Medio	Alto	Total
1	Problemas de seguridad	Colapso de una pared o de una ladera	0	77	94	114	285
2	Contaminación	Generación de polvo	0	61	13	5	79
3	Hundimiento y subsidencia del suelo	Hundimiento de tierra/colapso	0	5	10	35	50
4	Contaminación	Contaminación de suelo	0	11	11	6	28
5	Problemas de seguridad	Accidente por un equipo y/o instalación	0	11	13	3	27
6	Contaminación	Contaminación de agua	0	10	5	2	17
7	Flujo masivo de residuos mineros	Colapso masivo de otros residuos	0	0	4	2	6
8	Flujo masivo de residuos mineros	Ruptura del muro de la presa de jales	0	1	1	3	5
9	Problemas de seguridad	Otro problema de seguridad	0	2	1	0	3
10	Contaminación	Otro tipo de contaminación	0	0	0	1	1
11	Flujo masivo de residuos mineros	Otro tipo de flujo externo o colapso masivo de residuos mineros	0	0	0	0	0
12	Problemas de seguridad	Caída en un tiro de mina	0	0	0	0	0
13	Problemas de seguridad	Accidente en una galería abierta	0	0	0	0	0
14	Problemas de seguridad	Caída desde una pared alta	0	0	0	0	0
15	Problemas de seguridad	Accidente por material abandonado	0	0	0	0	0
16	Problemas de seguridad	Accidente en un cuerpo de agua	0	0	0	0	0

**Orden jerárquico de los eventos más sobresalientes en los 751 PAM analizados para infraestructura**

Núm. jerárquico	Categoría	Evento	Nivel de riesgo				
			Nulo	Bajo	Medio	Alto	Total
17	Hundimiento y subsidencia del suelo	Otro tipo de hundimiento o subsidencia del suelo	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

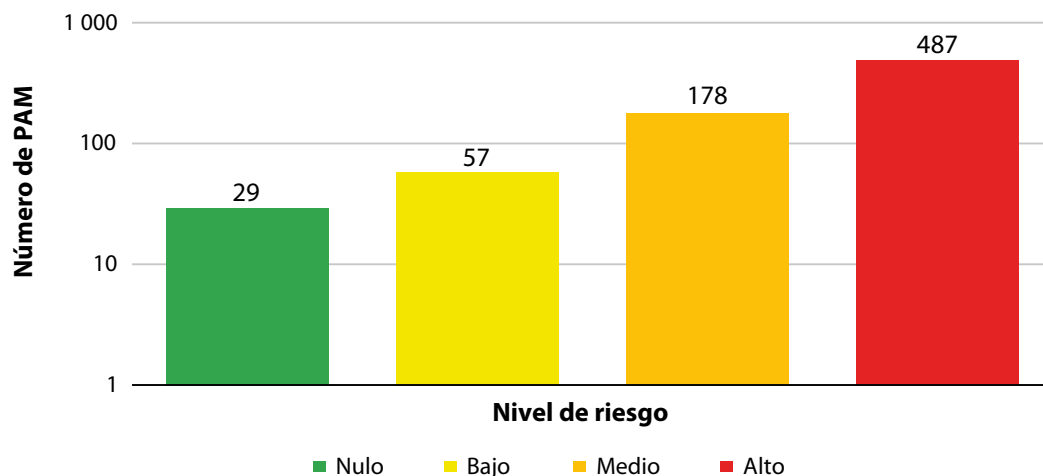
de cierre de la actividad minera; por el contrario, con menos frecuencia de afectación a los recursos naturales son: otro tipo de flujo externo o colapso masivo de residuos mineros y otro tipo de hundimiento o subsidencia del suelo.

En el cuadro 10 se ordenan de manera jerárquica todos los eventos en función de su ocurrencia en los PAM con el valor más alto de riesgo. Se identifica cuál es el nivel de riesgo predominante en cada uno, siendo el alto el más recurrente, con excep-

ción de otro tipo de hundimiento o subsidencia del suelo, en el cual su nivel de riesgo es medio en su totalidad.

Por último, se considera que el proyecto representa un primer ejercicio que propone establecer las bases para futuros inventarios de pasivos ambientales mineros. Resultado de lo anterior, se obtuvo un listado de PAM (ubicados geográficamente y verificados de manera física) con información general del estado en que se encuentran, una

Gráfica 5

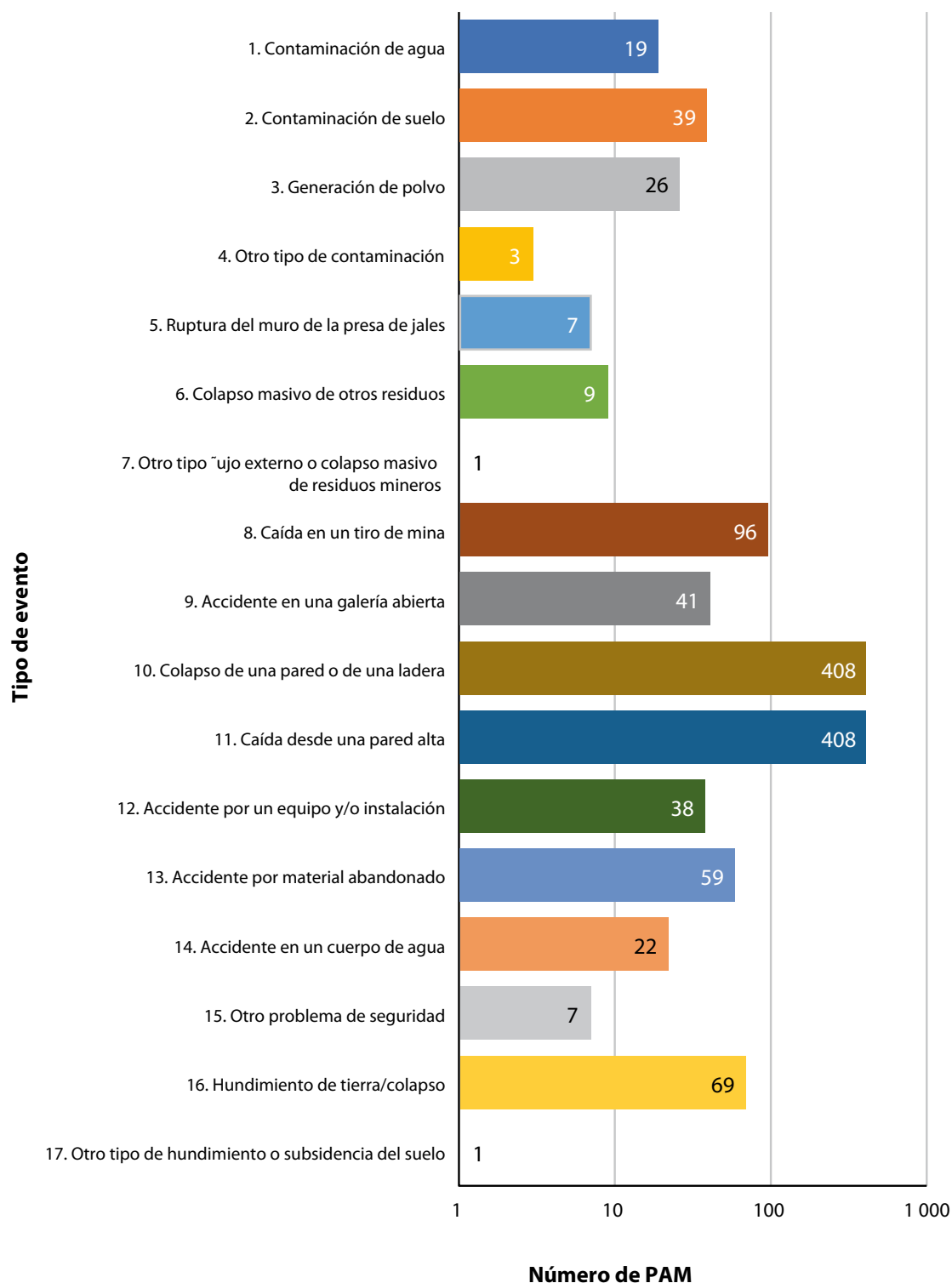
**Nivel de riesgo en recursos naturales**

Fuente: elaboración propia.



Gráfica 6

### Número de PAM por evento para recursos naturales



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 10

### Orden jerárquico de los eventos más sobresalientes en los 751 PAM analizados para el escenario de recursos naturales

Núm. jerárquico	Categoría	Evento	Nivel de riesgo				
			Nulo	Bajo	Medio	Alto	Total
1	Problemas de seguridad	Caída desde una pared alta	0	39	125	244	408
2	Problemas de seguridad	Colapso de una pared o de una ladera	0	22	80	306	408
3	Problemas de seguridad	Caída en un tiro de mina	0	0	16	80	96
4	Hundimiento y subsidencia del suelo	Hundimiento de tierra/colapso	0	1	6	62	69
5	Problemas de seguridad	Accidente por material abandonado	0	11	19	29	59
6	Problemas de seguridad	Accidente en una galería abierta	0	3	4	34	41
7	Contaminación	Contaminación de suelo	0	0	6	33	39
8	Problemas de seguridad	Accidente por un equipo y/o instalación	0	1	12	25	38
9	Contaminación	Generación de polvo	0	12	6	8	26
10	Problemas de seguridad	Accidente en un cuerpo de agua	0	3	6	13	22
11	Contaminación	Contaminación de agua	0	3	5	11	19
12	Flujo masivo de residuos mineros	Colapso masivo de otros residuos	0	1	2	6	9
13	Flujo masivo de residuos mineros	Ruptura del muro de la presa de jales	0	0	0	7	7
14	Problemas de seguridad	Otro problema de seguridad	0	2	0	5	7
15	Contaminación	Otro tipo de contaminación	0	0	1	2	3
16	Flujo masivo de residuos mineros	Otro tipo de flujo externo o colapso masivo de residuos mineros	0	0	0	1	1
17	Hundimiento y subsidencia del suelo	Otro tipo de hundimiento o subsidencia del suelo	0	0	1	0	1

Fuente: elaboración propia.

base de datos en Excel, así como un visualizador geoespacial, información con la que no se contaba para Hidalgo. La evaluación de riesgo nos dará la oportunidad de poder realizar futuras acciones de mitigación o prevención, de acuerdo con la jerarquización del nivel de riesgo obtenido, las cuales se definirán con base en una carac-

terización detallada de cada uno de los PAM que sean considerados para ello.

## Conclusiones

Se adaptó una metodología para registrar y evaluar los PAM que ha mostrado ser útil para el estado de

Hidalgo y, probablemente, pueda ser utilizable en el resto del país; esta se irá mejorando con aportaciones de los sectores minero, académico y de investigación. Con ello, se sienta un precedente para elaborar una base de datos nacional de pasivos ambientales mineros que permitirá tener información preliminar del riesgo y de su ubicación precisa, ya que puede estar afectando a la población.

La metodología nos permite jerarquizar los PAM para, en un futuro, elaborar un plan de actuación que disminuya o elimine el riesgo que representan, en el cual se determinarían los estudios específicos a considerar de acuerdo con las características de cada uno. Se verificaron 1 061 sitios en Hidalgo; con características de PAM se identificaron 751, mismos que fueron registrados en una base de datos, con información actualizada. De ellos, 31.42 % se encuentran asociados a minerales metálicos y 68.58 %, a minerales no metálicos. Los riesgos asociados a la categoría de seguridad fueron los de mayor incidencia para los tres factores: salud humana, infraestructura y recursos naturales.

El almacenamiento de información en una base de datos referenciada geográficamente puede facilitar la toma de decisiones y acciones entre los diferentes órganos de gobierno y particulares.

## Fuentes

- Alberruche del Campo, E., J. C. Arranz González, R. Rodríguez Pacheco, L. Vadillo Fernández, V. Rodríguez Gómez y F. J. Fernández Naranjo. *Manual para la evaluación de riesgos de instalaciones de residuos de industrias extractivas cerradas o abandonadas*. España, Instituto Geológico y Minero de España-Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013, pp. 4-7.
- Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos (ASGMI). *Pasivos ambientales mineros. Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas*. Documento de la Asociación aprobado en su XVI Asamblea General Ordinaria, celebrada en Barquisimeto, Venezuela, 2010, pp. 4-15.
- Coll, A., M. T. Sánchez y J. Morales. *La minería en México*. México, Instituto de Geografía, UNAM, 2002, pp. 22, 25, 26, 29, 105.
- Osuna-Martínez, C. Cristina, María Aurora Armienta, Magdalena Bergés-Tiznado y Federico Páez-Osuna. "Arsenic in waters, soils, sediments, and biota from México: An environmental review", en: *Science of the Total Environment*. Volume 752, 15 January 2021, 142062.
- Ramos-Arroyo, Yann René y Christina Desirée Siebe-Grabach. "Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental, caso de estudio del distrito de Guanajuato", en: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 23, núm. 1. 2006, pp. 54-74.
- Rodríguez-Agudelo, Yanet, Horacio Riojas-Rodríguez, Camilo Ríos, Irma Rosas, Eva Sabido Pedraza, Javier Miranda, Christina Siebe, José Luis Texcalac y Carlos Santos-Burgoa. "Motor alterations associated with exposure to manganese in the environmental in Mexico", en: *Science of the Total Environment*. Volume 368, 2-3. 2006, pp. 542-556.
- Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN). *Catastro de faenas mineras abandonadas o paralizadas y análisis de riesgo preliminar*. Chile, 2007, pp. 12-23.
- SGM. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-C79. Ixmiquilpan, Hidalgo*. Pachuca, Hidalgo, 1995a.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-D71. Actopan, Hidalgo*. Pachuca, Hidalgo, 1995b.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-C59. San Nicolás, Hidalgo*. Pachuca, Hidalgo, 2001.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-C68. Tecozautla, Querétaro e Hidalgo*. Pachuca, Hidalgo, 2002a.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-D51. Molango, Hidalgo*. Pachuca, Hidalgo, 2002b.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-C49. Jacala, Hidalgo y Querétaro*. Pachuca, Hidalgo, 2003a.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-D61. Metztlán, Hidalgo*. Pachuca, Hidalgo, 2003b.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-D41. Chapulhuacán, Hidalgo*. Pachuca, Hidalgo, 2004a.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-D73. Pahuatlán, Hidalgo, Veracruz y Puebla*. Pachuca, Hidalgo, 2004b.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-D52. Calnali, Hidalgo y Veracruz*. Pachuca, Hidalgo, 2005a.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-D83. Huauchinango, Hidalgo y Puebla*. Pachuca, Hidalgo, 2005b.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-C67. Tequisquiapan, Querétaro e Hidalgo*. Pachuca, Hidalgo, 2007a.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-C58. San Joaquín, Querétaro e Hidalgo*. Pachuca, Hidalgo, 2007b.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-D81. Pachuca, Hidalgo y México*. Pachuca, Hidalgo, 2007c.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-C78. Huichapan, Hidalgo*. Pachuca, Hidalgo, 2009a.
- \_\_\_\_\_. *Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-C89. Mixquiahuala, Hidalgo y México*. Pachuca, Hidalgo, 2009b.

\_\_\_\_\_ Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-C88. Tula de Allende, Hidalgo y México. Pachuca, Hidalgo, 2010a.

\_\_\_\_\_ Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-C69. Tasquillo, Hidalgo. Pachuca, Hidalgo, 2010b.

\_\_\_\_\_ Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-C77. San Juan del Río, Querétaro, Hidalgo y México. Pachuca, Hidalgo, 2012.

\_\_\_\_\_ Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-D82. Tulancingo, Hidalgo. Pachuca, Hidalgo, 2016.

\_\_\_\_\_ Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-C39. Ahuacatlán, San Luis Potosí, Querétaro e Hidalgo. Pachuca, Hidalgo, 2017a.


\_\_\_\_\_ Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-D62. Zacualtipán, Hidalgo y Veracruz. Pachuca, Hidalgo, 2017b.

\_\_\_\_\_ Carta geológico-minera escala 1:50 000. F14-D72. Carbonero Jacales, Hidalgo y Veracruz. Pachuca, Hidalgo, 2018.

\_\_\_\_\_ Panorama minero del estado de Hidalgo. 2019 (DE) consultado el 4 de marzo de 2021, <https://www.gob.mx/sgm/articulos/consulta-los-panoramas-mineros-estatales>

\_\_\_\_\_ Shapefile de minas escala 1:50 000 de la República Mexicana. México, 2010c.

## Anexos



FICHA DE INVENTARIO DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS	
Lugar y fecha	Clave de la ficha
<b>1. Localización</b>	
Nombre del pasivo ambiental minero:	
Ubicación (referencia):	
Coordenadas: UTM WGS-84 <input type="checkbox"/> NAD-27 <input type="checkbox"/> X: Y: Zona:	
Estado: Municipio: Altitud: <small>m.snm</small>	
Carta topográfica No.: Nombre: Escala:	
Accesibilidad: Carretera <input type="checkbox"/> Terracería <input type="checkbox"/> Vereda <input type="checkbox"/> Brecha <input type="checkbox"/> Sin acceso <input type="checkbox"/>	
<b>2. Minerales</b>	
Tipo: Metálicos <input type="checkbox"/> No metálicos <input type="checkbox"/>	
Sustancia (s):	
<b>3. Características de la mina</b>	
Estado: Activa <input type="checkbox"/> Inactiva <input type="checkbox"/> Año:	
Tipo de obra: Subterránea <input type="checkbox"/> A cielo abierto <input type="checkbox"/>	
Obra minera: Socavón <input type="checkbox"/> Rebaje <input type="checkbox"/> Tiro <input type="checkbox"/> Tajo <input type="checkbox"/> Otro:	
Ancho: m Largo: m Profundidad: m Volumen: m <sup>3</sup>	
Inundado: No <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> Color del agua: pH:	
Efuentes: No <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> Color del agua: pH:	
Concesión minera: No <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No. Título: Vigencia: / /	
Observaciones:	
<b>4. Características de planta</b>	
Método de beneficio: Flotación <input type="checkbox"/> Cianuración <input type="checkbox"/> Lixiviación en pilas <input type="checkbox"/> Lixiviación en tanques <input type="checkbox"/>	
Mixto (flotación/cianuración) <input type="checkbox"/> Otro:	
Proceso: Cribado <input type="checkbox"/> Amalgamación <input type="checkbox"/> Precipitación <input type="checkbox"/> Trituración/molienda <input type="checkbox"/>	
Otro:	
Observaciones:	

**6. Depósito de residuos**

Tipo: Desmunte/terreno  Jales  Residuos de lavación  Residuos industriales   
 Residuos de evaporación/precipitación  Escorias  Otros acopios   
 Tamaño del depósito: Ancho  m Largo  m Altura  m  
 Volumen estimado  m<sup>3</sup> Color

Observaciones:

**6. Sustancias peligrosas utilizadas**

Mercurio  Cianuro  Ácidos  Otras

Observaciones:

**7. Situación del entorno (1 km a la redonda)**

Salud humana  1. Población  2. Vial  3. Urbana  4. Otras

Infraestructura  5. Áreas agrícolas y ganaderas  6. Bosques y áreas verdes

Recursos naturales  7. Especie y ecosistema  8. Otros

Tipo:  Indique nombre o comentario:  Distancia aproximada  m


**11. Análisis preliminar de riesgos (Parte II)**

	Severidad				Comentarios
	Probabilidad	Salud humana	Infraestructura	Recursos naturales	
<b>a) Contaminación</b>					
Contaminación de aguas					
Contaminación de suelo					
Generación de polvo					
Otro ( )					
<b>b) Flujo externo o colapso masivo de residuos mineros</b>					
Ruptura del muro de la presa de jales					
Colapso masivo de otros residuos					
Otro ( )					
<b>c) Problemas de seguridad</b>					
Caída en un tiro de mina					
Accidente en una galería abierta					
Colapso de una pared o de una ladera					
Caída desde una pared alta					
Accidente por un equipo y/o instalación					
Accidente por un material abandonado					
Accidente en un cuerpo de agua					
Otro ( )					
<b>d) Hundimiento o subsistencia del suelo</b>					
Hundimiento de tierra / colapso					
Otro ( )					
<b>e) Otros (Comentarios):</b>					

**8. Situación del agua**

Epoca de inspección: De estiaje  De lluvias

Cauce cercano: No  Si  → Río  Arroyo  Canal   
 Otro  Distancia aproximada  m  
 Nombre  Orden de contenido

Cuerpo de agua cercano: No  Si  → Lago  Prosa  Jagüey   
 Otro  Distancia aproximada  m  
 Nombre

Uso de agua cercana: Sin uso  Potable  Agrícola / industrial

Información agua subterránea: No  Si  Especifique

Datos multiparámetro: pH  Temperatura  °C Conductividad eléctrica  µS/cm  
 Oxígeno disuelto  ppm Potencial oxidoreducción  ppm Sólidos totales disueltos  ppm

Muestra: No  Si  Clave  Tipo

Observaciones:

**9. Situación del suelo**

Textura: Limosa  Arcillosa  Arenosa

Color:

Fluoración de Rhyss x:

Elemento	Concentración
<input type="text"/>	<input type="text"/> ppm
<input type="text"/>	<input type="text"/> ppm
<input type="text"/>	<input type="text"/> ppm

Muestra: No  Si  Clave  Tipo

Observaciones:

**10. Análisis preliminar de riesgos (Parte I)**

Criterio de evaluación de riesgo

Probabilidad	Severidad
0: Nulo: Origen de riesgo inexistente o 0% de ocurrencia	0: Nulo: Sin consecuencias
1: Bajo: Quizás no ocurra	1: Baja: Estado leve o daño menor
2: Media: Posiblemente ocurre	2: Media: Estado grave o daño recuperables
3: Alta: Ya existe o 100% de que ocurra	3: Alta: Muerte o daño irreparable
	5: Catastrófica: Caso masivo de alta consecuencia

**12. Certeza de contaminación**

¿Existe certeza de contaminación? No  Si

Explique:

**13. Evaluación especial**

¿Se requiere evaluación geológica especial? No  Si

Explique:

¿Se requiere de otro tipo de evaluación especial? No  Si  ¿Cuál?

Explique:

**14. Muestras colectadas**

Muestra de agua: No  Si  (Ver hoja de muestras colectadas) Referencia

Muestra de suelo: No  Si  (Ver hoja de muestras colectadas) Referencia

Otro: No  Si  (Ver hoja de muestras colectadas) Referencia

**15. Comentarios finales**

**16. Datos de inspección**

Fecha de inspección:

Inspección realizada por:

Firma



HOJA DE MUESTRAS COLECTADAS PARA LA FICHA DE INVENTARIO DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS

Lugar y fecha:

Clave de la ficha:

No.	Clave de la muestra	Tipo de muestra	Ubicación			Parámetros tomados en campo			Observaciones
			Coordenadas		Altitud (msnm)	Temperatura de agua (°C)	Volumen de muestra (ml o gr)	Conductividad (µS/cm)	
			X	Y					
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									