



Universidad del
Rosario

**EMERGENCIAS MINERAS MORTALES EN COLOMBIA (2005-2020): INVESTIGACION CON MODELO
JERARQUICO DE CAUSALIDAD DE 100 EVENTOS**

Investigador principal

Gloria Catalina Gheorghe

**Trabajo presentado como requisito para optar por el título de
Magíster en Seguridad y Salud en el Trabajo
Universidad del Rosario**

Bogotá, diciembre del año 2020

**EMERGENCIAS MINERAS MORTALES EN COLOMBIA (2005-2020): INVESTIGACION CON MODELO
JERARQUICO DE CAUSALIDAD DE 100 EVENTOS**

Estudiante:
Gloria Catalina Gheorghe

Asesor temático:
Alvaro Javier Idrovo

Asesor metodológico:
Dra Gilma Hernandez

**Maestría en Seguridad y Salud en el Trabajo
Universidad del Rosario**

Bogotá D.C., 31 de diciembre del 2020

EMERGENCIAS MINERAS MORTALES EN COLOMBIA (2005-2020): INVESTIGACION CON MODELO JERARQUICO DE CAUSALIDAD DE 100 EVENTOS

Investigador:

GLORIA CATALINA GHEORGHE
Ingeniera de Minas y Metalurgia

Tutores:

Temático Dr Alvaro Javier Idrovo
Metodológico: Dra Gilma Hernandez

Resumen

Introducción: En las 1473 emergencias mineras registradas en Colombia entre los años 2005 y 2020, murieron 1653 personas y 2590 resultaron heridas, lo que representa una alta severidad. En el 95% de las emergencias mineras murieron hasta tres personas. Las emergencias por fallas geomecánicas son las más frecuentes, 509 emergencias y 465 personas fallecidas; y las explosiones el suceso más catastrófico, solo en cinco explosiones murieron 149 trabajadores. Explosiones y fallas geomecánicas representan 52.8% de las muertes.

Objetivo: Construir un modelo jerárquico de causalidad de emergencias mineras mortales en Colombia, a partir de 100 investigaciones de emergencias mineras conducidas por la Agencia Nacional de Minería en el periodo 2014 a agosto del año 2020.

Materiales y Métodos: se construyó un modelo jerárquico de causalidad de sucesos mineros mortales en Colombia mediante el uso del *ISM- Interpretative Structural Modeling*. De 183 factores de riesgo identificados, se seleccionaron 31 que representaron el 60.6% del total de frecuencias de 1460.

Resultados: Se obtuvo un modelo jerárquico de ocho niveles, dos de los factores de riesgo están en la raíz de la causalidad, cuatro son causas inmediatas y 25 causas indirectas. La secuencia de los factores de riesgo en el árbol muestra como las decisiones incorrectas y las condiciones ambientales desfavorables están influenciadas por el conjunto de las reglas de juego del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo. Los riesgos nos son inherentes, ni el error humano la causa en la cual debe concluir una investigación, es el inicio

Conclusión: Las lecciones y las muertes en la minería si pueden prevenirse, al leer el modelo jerárquico en un sentido positivo se encontró que si sobre la base del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo y el liderazgo y responsabilidad del empleador minero se identifican y evalúan los peligros y riesgos, se implementan planes de ventilación y sostenimiento, se gestionan los riesgos de tareas críticas, se capacita continuamente a los trabajadores que los lleven a adquirir habilidades en su trabajo, con una adecuada percepción de riesgos, la realización de procedimientos adecuados y se establece supervisión adecuada, los riesgos ambientales como derrumbes o atmosferas explosivas o irrespirables estarán controlados y los trabajadores tomarán decisiones correctas que evitara lecciones y muertes.

Palabras claves: Modelo Estructural Interpretativo -*Interpretative structural modeling (ISM)*, modelos de causalidad, *causation model*; factores de riesgo - *risk factors*; minería; *mining*; mortalidad; *mortality*

1. INTRODUCCIÓN

Según el Censo Minero Departamental de 2011, en Colombia existen 14357 Unidades de Producción Minera, de las cuales el 63% no posee título minero y predominan las que tienen menos de seis empleados, con una participación de 72% dentro de la totalidad de unidades censadas. La implementación de estándares de seguridad industrial y salud minera es muy baja, siendo este problema más evidente en las minas que no tienen título. Para este tipo de minas se encontró que el 84% de las unidades de producción minera no tiene medidas de seguridad, higiene y salud, mientras tanto, para las minas que cuentan con un título este porcentaje es del 50% de las minas. El país tampoco ha construido el conocimiento suficiente para controlar los riesgos mineros como corresponde, es muy escasa la investigación que se ha realizado en temas de seguridad minera. Por estas razones la mortalidad en el sector minero en Colombia es muy alta, en el período comprendido entre el año 2005 al 2020 se registraron en el país 1473 emergencias mineras en las cuales perdieron la vida 1653 personas, 2590 resultaron heridas de gravedad o la infraestructura minera resulto significativamente afectada. De las 1473 emergencias, 1044 fueron mortales, de acuerdo con las estadísticas oficiales de la Agencia Nacional de Minería- ANM. [ANM, 2020]

Algunas cifras relevantes de mortalidad minera de la base de datos oficiales de la ANM en ese período muestran lo siguiente: las víctimas mortales en minas legales han sido 1120, (67.8%) y 533 en minas ilegales. Pese a ser explotaciones que están en el marco de la legalidad, el 93% de las minas son explotaciones de pequeña o mediana minería de carbón y oro, con escasa capacidad de gestionar adecuadamente sus riesgos; la “legalidad” por sí misma no mejora un proyecto minero. De acuerdo con el tipo de explotación y mineral explotado se tiene que en minas de carbón subterráneas han muerto 1193 personas (72.2%) y en minas de oro subterráneas murieron 219 personas (13.3%); en explotaciones de oro de aluvión 141 (8.5%) perdieron la vida, de las cuales 111 de las muertes ocurrieron en explotaciones ilícitas en las que no se realiza un diseño de los taludes y control de las aguas.

Por tipo de evento asociado a fallas geomecánicas (como derrumbes, caída de roca, colapso del frente) han muerto 465 personas y debido a explosiones 407 personas. Fallas geomecánicas y explosiones suman el 52.8% de las muertes. Las fallas geomecánicas, es la emergencia minera más frecuente en la minería en Colombia, 509 registros que equivalen al 34.6% y las explosiones el suceso más catastrófico, solo en cinco explosiones asociadas a metano y/o polvo de carbón han muerto 149 personas.

Si bien las anteriores cifras permiten tener un panorama sobre la siniestralidad en el sector minero en el país y en función de ello tomar algunas decisiones, no existe un análisis que presente las relaciones que hay en diferentes factores de riesgo. Si se parte de la base que todos los sucesos son multicausales, no solo es necesario determinar los factores implicados en la ocurrencia de estos sino las relaciones de interdependencia. Previo a la expedición del Decreto 1886 del 2015 solo fueron investigados en el país catástrofes como las de Amaga-Antioquia en el 2010 en el que producto de una explosión murieron 73 personas o el de la Sardinata- Santander en el que fallecen 21 trabajadores también por una explosión, o la inundación en una mina de Amaga en el 2014 en la que murieron 12 personas. Sin embargo, a partir del año 2017 y con corte a agosto del año 2020 la ANM había investigado 118 sucesos mortales y amerita en consecuencia analizar lo que se ha encontrado en estas investigaciones.

La evolución de los métodos de investigación de sucesos con heridos o muertos en el tiempo revela un cambio gradual de buscar una única causa inmediata al reconocimiento de múltiples causas. [Katsakiori et al, 2009]

En décadas pasadas diferentes metodologías de causalidad de sucesos han sido propuestas: Modelo del Queso Suizo – (SCM) [Reason, 1990, 1997], ACCIMAP [Rasmussen, 1997]; Sistema de clasificación y análisis de factores humanos [Shappell and Wiegmann, 2001] y un Sistema teórico de modelamiento y procesamiento de sucesos [Leveson, 2004]. A través del análisis de 508 sucesos en minas de carbón en Queensland Australia, Patterson and Shappell (2010) usaron una versión modificada de HFACS (Sistema de clasificación y análisis de factores humanos) y encontraron que el error humano basado en las competencias son los más comunes de comportamientos inseguros [Song et al. 2011] y consideraron que la ausencia de un sistema de gestión de seguridad fue la causa fundamental de la ocurrencia de conductas inseguras.

De acuerdo con Katsakiori et al. (2009) los modelos de causalidad de sucesos pueden ser agrupados en tres grupos:

1. Modelos secuenciales que describen los sucesos como el resultado de una secuencia de eventos en un orden específico, como el modelo domino.
2. Modelos de información humano: describe los sucesos en función de errores humanos y comportamientos inseguros como el método de análisis del error y la confiabilidad cognitiva del error [Hollnagel, 1998]
3. Análisis sistemático de sucesos que establece que un dinámico y complejo sistema de conductas y procedimientos contribuye a los sucesos. (Como SCM, Accimap, HCFACS y STAMP)

Los modelos de análisis de causalidad pueden explicar la causa de los sucesos y jugar un rol esencial en analizar la prevención de sucesos. [Ouyan et al 2010].

El enfoque sistemático entiende el suceso como una propiedad emergente que se desprende de una interacción no lineal entre las partes de un sistema. [Leveson, 2004; Salmon et al., 2014]. Con respecto a la causalidad de los sucesos se reconoce ampliamente que los sucesos son producto de las interacciones entre numerosos componentes a través de un complejo sistema socio técnico [Dekker, 2012; Hollnagel, 2008; Salmon et al. 2012, 2013]. Los sucesos no son comúnmente causados por una sola falla o error, si no por la confluencia de toda una serie o cadena de errores. [Ren et al, 2008]

A través del análisis de 320 eventos de minería de carbón con víctimas mortales y heridos en Shandong, Zhang et al. (2016) usaron el modelo de ecuación estructural -SEM *Structural Equation Modeling* y encontraron que las condiciones inseguras de las reglas y regulaciones de una organización (Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo) influyen en los comportamientos inseguros del operario (conciencia de seguridad, competencias de operación, a aptitud del trabajo), en las condiciones inseguras de los equipos (seguridad de los equipos causada por la instalación impropia, configuración y operación) y en las condiciones inseguras del ambiente de trabajo (ventilación, iluminación, temperatura y humedad, cantidad de polvo y condiciones geológicas).

Por ejemplo, Zhang J, et al 2019, encontraron que el análisis causal de una explosión de gas no solo debe centrarse en los aspectos del error humano, subjetivos, o en las fallas en los equipos o en las condiciones ambientales; estos dos últimos aspectos objetivos. El análisis debe tomar en consideración las relaciones interactivas entre los factores de riesgo. Las explosiones de gas no deben ser atribuidas al error humano o a fallas en los equipos solamente, las explosiones son el resultado de la interacción entre factores de riesgo.

Los sucesos en los que se registran víctimas son consecuencia de factores organizaciones y cultura de prevención, del liderazgo y responsabilidad, del entrenamiento y competencias, de códigos, reglas y procedimientos y del ambiente del trabajo que predisponen que se cometan errores humanos y la relación maquina persona se altere. El error humano no es la causa de estos eventos, es la consecuencia [Geoff et al, 2009].

Un accidente es asociado frecuentemente con algo impredecible e inevitable, sin embargo, la mayoría de las lecciones o muertes y los eventos precipitantes son predecibles y prevenibles. [BMJ, 2001]. Con el objeto de no transmitir con el lenguaje la idea de que las lecciones y muertes en la minería son súbitos, aleatorios, sino que hay causas que los explican, en este estudio se reemplaza el término accidente por el termino suceso, evento o emergencia minera.

Visualizar jerárquicamente cuales son los factores que más contribuyen para que se desencadene un evento minero con lesionados y muertos, identificar cuales factores están en la base o raíz del problema y entender como los diferentes factores están acoplados y como interactúan entre ellos; puede ayudar a identificar las medidas preventivas inmediatas y abordar soluciones de mayor jerarquía que involucren medidas para prevenir que el suceso se materialice de nuevo. Si la solución se centra solo en controles de las causas inmediatas, o en controlar solo algunos factores de riesgo, los sucesos continuaran materializándose. Se utilizará por lo tanto como modelo de análisis el ISM- *Interperative structural modeling*- modelo estructural interpretativo para analizar las relaciones entre los diferentes factores de riesgo de 100 investigaciones de sucesos mineros en Colombia.

2. METODOLOGIA

El estudio contempla dos etapas, primero el análisis de la información de la base de datos de emergencias e investigaciones mineras a través de estadísticos descriptivos y segundo la construcción de un modelo jerárquico de acoplamiento de los factores de riesgo de las emergencias mineras.

2.1 Análisis de la base de datos oficiales de las emergencias mineras y de las investigaciones

1) *Depuración de la base de datos de emergencias mineras:* La ANM coordina en Colombia el Sistema Nacional de Salvamento Minero, por lo cual cuenta con una base de datos oficial de emergencias mineras del año 2005 al año 2020, que recoge 1473 registros. De la totalidad de emergencias registradas, 1044 han sido mortales, 293 solo con heridos y 138 emergencias en los que no hubo víctimas, pero sí daños significativos a la infraestructura. La base de datos es oficial y pública. Una vez se accedió a la base de datos se identificaron todas las variables de interés para el estudio y se estandarizó. Las emergencias mineras corresponden a eventos que por su gravedad dan lugar a pérdidas de vidas humanas, heridos graves y/o significativos daños a la infraestructura minera o al medio ambiente y que requieren en la mayoría de los casos la intervención del cuerpo Nacional de salvamento minero para realizar los rescates.

2) *Identificación de los informes de investigación de las emergencias mineras:* En el marco de lo que establece el artículo 34 de Decreto 1886 del 2015 (Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas), la ANM investiga los eventos mortales, en explotaciones subterráneas y legales. Del año 2014 a agosto del año 2020, la actual autoridad minera - la ANM, había liderado 118 investigaciones de sucesos mineros mortales de los cuales fueron seleccionadas 100 investigaciones. Si se tiene en cuenta que el registro oficial es de 1044 sucesos mineros mortales, un total de 100 investigaciones corresponde al 9.6% del total de los eventos. La distribución de los sucesos mortales por mineral explotado es la siguiente: carbón (89), oro (8) y esmeralda (2), cobre (1). Todos en explotaciones legales y subterráneas. El criterio para seleccionar las 100 investigaciones de las 118 lideradas, fue la disponibilidad del informe completo y del árbol de causas de la investigación.

3) *Revisión de los informes de investigación de sucesos, diseño y alimentación de la base de datos de causalidad:* Fueron revisadas cada una de las 100 investigaciones seleccionadas; de cada investigación la descripción del evento, el resumen, línea de tiempo, árbol de causas y medidas de control propuestas. Se alimentó la base de datos con la información de la causalidad, el agente y el mecanismo. Solo la información básica del suceso se encontraba sistematizada, más no la de la causalidad de las investigaciones de los sucesos. La ANM utiliza como metodología de investigación de los sucesos el árbol de causas y clasifica las causas de acuerdo con la NTC 3701. Sin embargo, este sistema de clasificación no identifica muchos de los factores de riesgo propios de la actividad minera, como "Inertización de polvo de carbón". Por lo tanto, como sistema de clasificación se utilizó una adaptación de la metodología ICAM, la cual agrupa los factores de riesgo en cinco categorías.

1. JERARQUIA DE DEFENSA /AUSENTE (Categoría de defensa)
2. ACCIONES INDIVIDUALES O DE GRUPO
3. CONDICIONES DE LA TAREA O DEL ENTORNO (factores del trabajo)
4. CONDICIONES DE LA TAREA O DEL ENTORNO (factores humanos)
5. FACTORES ORGANIZACIONALES

4) *Estadísticos descriptivos:* De la base de datos de emergencias mineras y la base de datos construida de investigaciones, se analizaron a través de estadísticos descriptivos algunas variables de interés.

2.2 Aplicación del enfoque de ISM- Interpretative Structural Modeling

El estudio buscó analizar un modelo jerárquico de acoplamiento de los factores de riesgo de los sucesos mineros. Un modelo de acoplamiento del riesgo se refiere al proceso por el cual los factores de riesgo internos y externos de las compañías mineras se propagan en el sistema de producción por ciertos portadores debido a el sistema de defensa de seguridad defectuoso, lo cual incrementa el riesgo, lo que en últimas desencadena sucesos mortales. [Zhanj J et al, 2019]. Las relaciones de acoplamiento se exploraron a través del modelo interpretativo estructural del ISM (*interpretative structural modeling*, y del análisis de otras variables estadísticas.

ISM es un aprendizaje interactivo asistido por un computador. Es un medio por el cual se puede imponer orden a las complejas relaciones entre los elementos de un sistema. El método es interpretativo porque el grupo de juzgamiento decide donde y como los elementos están relacionados, estructural porque una estructura completa es extraída de las relaciones bases de un set de elementos y modelada porque representa en un diagrama las relaciones del sistema. [Sushil, 2012.]

Para la aplicación del modelo se surtieron los siguientes pasos:

1) *Identificación de los factores de riesgo representativos*: De acuerdo con la frecuencia de los factores de riesgo, se identificaron los factores de riesgo más representativos de cada una de las cinco categorías.

2) *Construcción de la matriz de adyacencia de factores de riesgo para los sucesos mineros mortales (A)*: La matriz (A), es una matriz binaria basada en el enfoque de ISM. Se construye contestando la pregunta: ¿usted cree que el factor de riesgo *a* directamente influye en el factor de riesgo *b*? y asignando un valor de 1 ó 0 de acuerdo con las siguientes tres reglas:

- (1) Si el factor de riesgo F_i directamente afecta el factor de riesgo F_j , entonces $A(F_i, F_j) = 1$ en la matriz de adyacencia, de lo contrario $A(F_i, F_j) = 0$ ($1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq n$).
- (2) Si el factor de riesgo F_j directamente afecta el factor de riesgo F_i , entonces $A(F_j, F_i) = 1$ en la matriz de adyacencia, de lo contrario $A(F_j, F_i) = 0$ ($1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq n$).
- (3) Si el factor de riesgo F_i directamente afecta el factor de riesgo F_j , entretanto, el factor de riesgo F_j directamente afecta el factor de riesgo F_i , entonces ambos $A(F_j, F_i) = 1$ y $A(F_i, F_j) = 1$ en la matriz de adyacencia.

La matriz fue juzgada por un grupo de seis expertos y la investigadora, la matriz final es la moda de cada una de las celdas de la matriz. Seis de los siete evaluadores son ingenieros de minas con posgrados en temas afines a la salud ocupacional y con mínimo 10 años de experiencia en la industria minera.

3) *Desarrolló de la matriz de accesibilidad de factores de riesgo (R)*: Se construyó utilizando la regla de interacción transitiva basada en matriz de adyacencia. La regla transitiva indica que, si el factor de riesgo F_i puede vincularse con el factor de riesgo F_j y F_j puede vincularse con el factor de riesgo F_k , entonces el factor de riesgo F_i puede inevitablemente vincularse con F_k [Shen y Zhan, 2016].

4) *Determinación de los niveles de partición del modelo jerárquico de los factores de riesgo y construcción del diagrama ISM*: Calcular la matriz *R* requiere el uso de un programa de computador, por la cantidad de interacciones que deben realizarse, así mismo la determinación de los niveles de partición del modelo jerárquico. Para estos dos pasos se utilizará el ISM software, creado por los doctores Benjamin Broome y Michael Hogan.

3. RESULTADOS

3.1 Estadísticas relevantes de las emergencias mineras y de la investigación de sucesos mineros

Las emergencias mineras son eventos en los cuales, por su complejidad, en la mayoría de los casos se ha requerido la intervención del Servicio Nacional de Salvamento Minero. Sin embargo, no comprende la totalidad de los sucesos con lesionados en las minas que se registran en el país, pero si casi todos los sucesos mortales. De los 1473 registros de emergencias mineras, comprendidas entre los años 2005 y 2020, en 1336 emergencias al menos una persona afectada, muerto o herido, y en 1044 emergencias hubo al menos una víctima mortal. (Ver tabla 1).

Tabla 1. Medidas de tendencia central y desviación de siniestralidad minera en Colombia (2005 al año 2020)

Emergencias <i>n</i> = 1473	Frecuencia (<i>f</i>)	Media	Mediana	Desviación estándar (s)	Coefficiente de variación	Máximo	Tercer Cuartil (Q ₃)	Percentil (P ₉₅)
Fallecidos	1653	1	1	2,5	225%	73	1	3
Heridos	2590	2	0	8,4	479%	150	1	6
Total de afectados	4243	3	1	8,9	308%	155	2	9

Fuente: [ANM, 2020]

En la tabla 2 se relacionan las frecuencias en las emergencias y muertes registradas por tipo de emergencia (explosión, atmosfera contaminada, falla geomecánica etc) y por el tipo de mineral explotado, así como por el estado jurídico de la explotación en la cual ocurrió la emergencia, legal o ilícita. Las fallas geomecánicas se refieren a las diferentes formas de inestabilidad que puede presentar el terreno, entre las que están incluidas: Derrumbes, caída de bloques de roca, estallido de roca, deformaciones excesivas y colapso de los elementos de soporte. Los incendios registrados en la mayoría corresponden a incendios endógenos en minas subterráneas de carbón, los cuales tienen lugar por autocombustión de los mantos de carbón. Las explosiones en minas de carbón corresponden a explosiones originadas por la deflagración de gas metano y las más catastróficas han sido explosiones híbridas, una explosión inicial de metano que ha sido enriquecida con polvo de carbón. Las emergencias por atmosferas contaminadas se refieren a eventos en los que en minas subterráneas los mineros entran en contacto con zonas que tienen deficiencia de oxígeno o concentraciones altas de gases como monóxido de carbono o vapores nitrosos, ello debido a ausencia de ventilación.

Tabla 2. Las frecuencias y las muertes por tipo de mineral explotado y tipo de emergencia minera (2005 al año 2020)

Tipo de suceso	Mineral	Total	Carbón	Oro filón	Oro Aluvión	Esmeralda	Grava o Arena	Cobre	Caliza, sales, otro
Falla geomecánica	<i>f</i>	509	382	96	9	15	2	4	1
	Muertes	465	333	82	33	11	1	4	1
Explosión	<i>f</i>	188	149	37		1		1	
	Muertes	407	377	27		1		2	
Atmosferas contaminadas	<i>f</i>	233	188	35	1	9			
	Muertes	278	216	45	3	14			
Inestabilidad de taludes	<i>f</i>	56	6	10	26	3	9	2	
	Muertes	134	3	17	85	3	24	2	
Tipo mecánico	<i>f</i>	141	124	13	1	1	2		
	Muertes	132	116	13	0	1	2		
Inundación	<i>f</i>	35	25	8	2				
	Muertes	77	50	10	17				
Caída a diferente nivel	<i>f</i>	62	39	17	1	1	1	2	1
	Muertes	56	36	13	1	1	1	3	1

Otros	<i>f</i>	70	57	5	2	2	2	1	1
	Muertes	54	46	2	2	1	1	1	1
Tipo eléctrico	<i>f</i>	44	32	11			1		
	Muertes	39	29	9			1		
Incendio	<i>f</i>	130	124	4				2	
	Muertes	6	4	0				2	
Maquinaria pesada	<i>f</i>	5	3	1			1		
	Muertes	5	3	1			1		
Total	<i>f</i>	1473	1129	237	42	32	18	12	3
	Muertes	1653	1213	219	141	32	31	14	3
Estado jurídico	Muertes legal	1120	958	79	30	12	31	8	2
	Muertes ilícita	533	255	140	111	20		6	1

Fuente: [ANM, 2020]

El municipio de Colombia en el cual se ha registrado el mayor número de emergencias es Cucunuba (Cundinamarca) (n= 84) con 106 muertos, en Amaga (Antioquia) (n=54) siendo este el municipio en el cual se han registrado más muertes en el sector minero con un total de 129.

En la figura 1 se relacionan las víctimas mortales en emergencias mineras distribuidas por año desde el 2005 al 2020.



Figura 1. Víctimas mortales en emergencias mineras por año (2005 al 2020)

. Fuente: [ANM, 2020]

En la figura 2 se relaciona la frecuencia de emergencias asociadas a explosiones y atmosferas contaminadas (con deficiencia de oxígeno o concentraciones altas de gases tóxicos) que han tenido lugar por meses del año, desde el año 2005 hasta el año 2020.

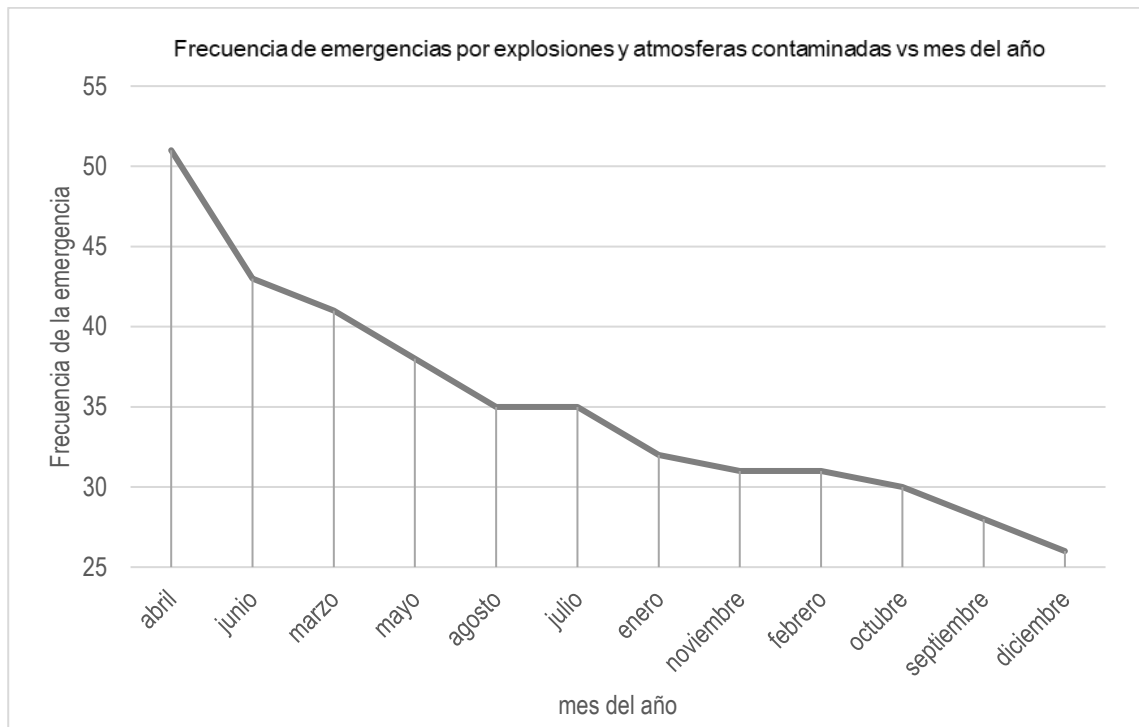


Figura 2. Frecuencia de las explosiones y los eventos por atmosferas contaminadas versus mes del año (2005 al 2020). Fuente: [ANM, 2020]

En la tabla 3 se relacionan los agentes y mecanismos identificados por tipo de emergencia en 100 de las investigaciones conducidas por la ANM entre los años 2014 a agosto del año 2020.

Tabla 3. Agentes y mecanismos que han desencadenados los 100 sucesos investigados. Fuente [ANM, 2020]

MECANISMO	Atmosfera contaminada	Caída a diferente nivel	Explosión	Falla geomecánica	Inundación	Maquinaria pesada	Tipo eléctrico	Tipo mecánico	Otros	Total
Caída de objetos		1		32				1	1	35
Exposición con sustancias nocivas	14		9	2			1		1	27
Atrapamientos				4	3			2	4	13
Pisadas, choques o golpes			2			1		9		12
Caída de personas		5		1				1	1	8
Exposición con temperatura extrema	1		3							4
Exposición con la electricidad							1			1
AGENTE										
Ambiente de trabajo	10	3	4	29	3			1	2	51
Materiales o sustancias	5	1	10	10			1		5	32
Medios de transporte		2						9		11
Máquinas y/o equipos						1		3		4
Aparatos							1			1
Total	15	6	14	39	3	1	2	13	6	100

3.2 Modelo jerárquico de causalidad de sucesos mineros mortales

Los resultados de cada una de las etapas identificadas en la metodología del ISM fueron los siguientes:

1) *Identificación los factores de riesgo representativos*: De 183 factores de riesgo identificados, se seleccionaron 31 que representaron el 60.6% del total de frecuencias de 1460. En la tabla 4 se presenta los factores de riesgo (causas) que fueron priorizados por tener las frecuencias más altas.

2) *Matriz de adyacencia de factores de riesgo para los sucesos mineros mortales (A)*: fue el resultado de la moda de la valoración de los seis expertos.

3) *Matriz de accesibilidad de factores de riesgo (R)*: Fue la generada por el software y fue construida utilizando la regla de interacción transitiva basada en matriz de adyacencia

4) *Niveles de partición del modelo jerárquico de los factores de riesgo y diagrama del ISM*: Se obtuvo un modelo jerárquico de ocho niveles, el cual se muestra en la figura 3.

Tabla 4. Factores de Riesgo con las frecuencias más altas de las 100 investigaciones de los sucesos mineros mortales.

Categoría	Subcategoría	Factor de Riesgo	Código	f
<i>Jerarquía de defensa /Ausente (Categoría de defensa)</i>	Conocimiento y entrenamiento	Entrenamiento inicial inadecuado	F1	16
		Entrenamiento continuo	F2	24
		Evaluación de riesgos deficiente	F3	59
	Detección (alarmas)	Monitoreo de gases permanente	F4	19
	Control y recuperación provisional	Protocolos de seguridad	F5	25
<i>Acciones individuales o de grupo (Acciones Individuales/ equipo)</i>	Liderazgo y Supervisión	Supervisión inadecuada	F6	41
		Identificación deficiente de peligros y riesgos	F7	35
		Instrucción, orientación y/o entrenamiento insuficiente	F8	15
	Cumplimiento de procedimientos	No se cuenta con procedimiento para tareas críticas	F9	20
		No se siguen las reglas de seguridad	F10	16
	Reconocimiento / percepción del riesgo	Trabajador realiza actividad sin conocer los riesgos a los que está expuesto	F11	32
Percepción equivocada de los peligros		F12	23	
<i>Condiciones de la tarea o del entorno (Factores del Trabajo)</i>	Planificación de la tarea	No hubo supervisión para esta tarea	F13	30
	Herramientas/ Equipos	Uso inapropiado de herramientas o equipos	F14	12
	Análisis de Trabajo Seguro	Evaluación de riesgos inadecuado	F15	33
	Disponibilidad y pertinencia del procedimiento de trabajo	No existe procedimientos o protocolo para la tarea	F16	25
		Procedimiento inadecuado o no práctico	F17	12
	Riesgo de explosión, incendio o atm. irrespirable	Porcentaje elevado de gases peligrosos	F18	13
	Ventilación	No se cuenta con un plan de ventilación o inapropiado	F19	13
Sostenimiento	No se cuenta con un plan de sostenimiento	F20	19	
	No se cuenta con condiciones de seguridad en techos, paredes y pisos	F21	27	
<i>Condiciones de la tarea o del entorno (Factores humanos)</i>	Problemas personales	Estado emocional, sobre confianza	F22	53
		Creencia de comportamiento (ganar-riesgos)	F23	22
	Competencia/ experiencia/ habilidad para la tarea	Conocimiento incompleto sobre los riesgos de la tarea	F24	53
<i>Factores organizacionales</i>	Liderazgo y responsabilidad	F25	26	
	Sistema de Gestión en SST	F26	57	
	Capacitación	F27	64	
	Procedimientos de Trabajo Seguro	F28	31	
	Gestión del riesgo en plan de Sostenimiento	F29	34	
	Gestión del riesgo en plan de Ventilación	F30	24	
	Gestión del riesgo en Tareas de Alto Riesgo	F31	17	

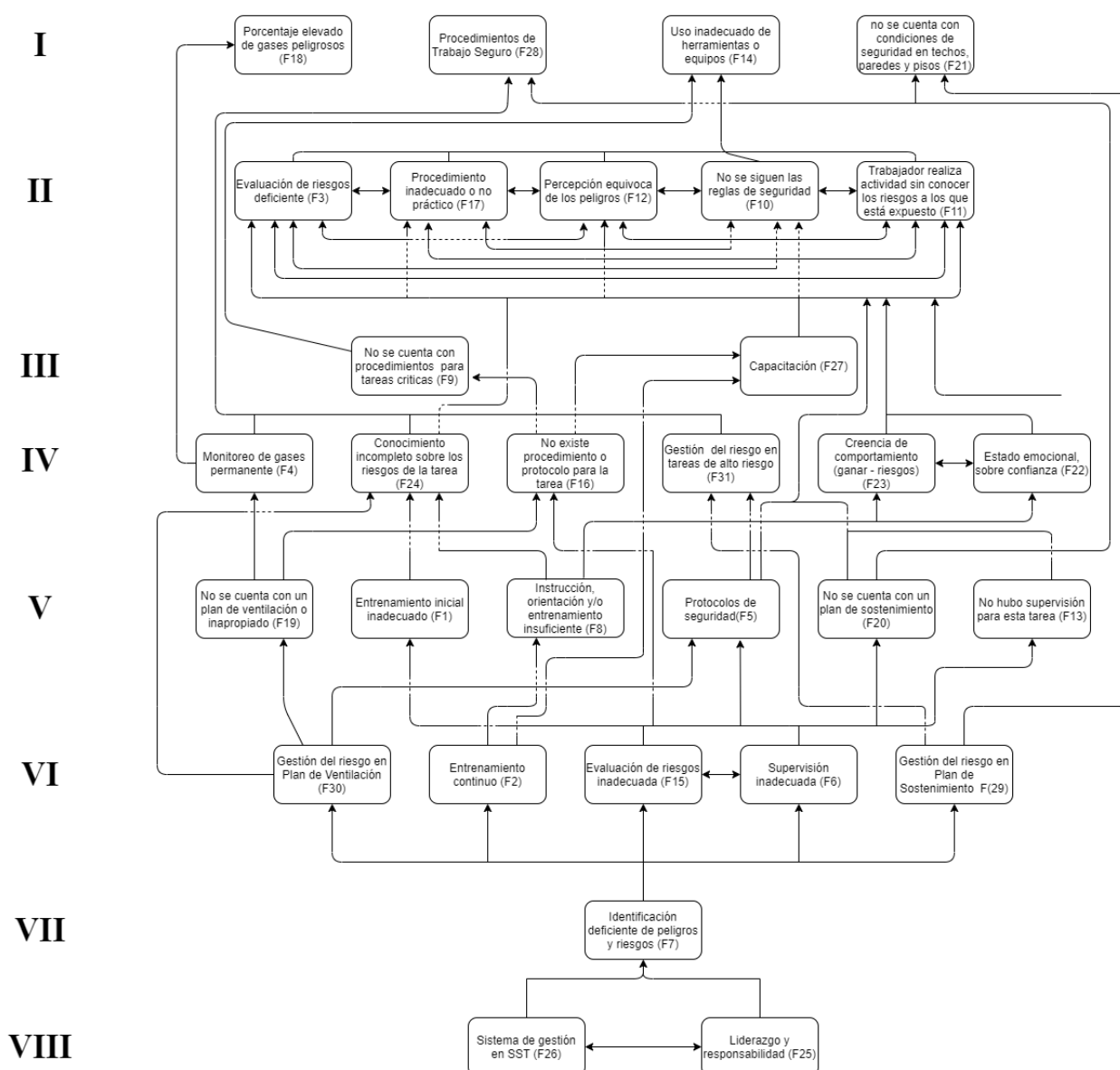


Figura 2. Modelo jerárquico de emergencias mineras mortales

4. DISCUSIÓN

4.1 Emergencias mineras

En minería las emergencias que se presentan tienen una alta severidad, por lo menos una persona muere y dos resultan heridas. En el 95% de las emergencias mineras murieron hasta tres personas y seis resultaron heridas.

Las explosiones pueden resultar catastróficas, el máximo número de víctimas mortales en un evento minero se registró en una explosión de metano y polvo de carbón en el 2010 en el que murieron 73 personas. El máximo número de heridos se registró en un incendio en el año 2008 con 150 personas afectadas. En ambos eventos, explosiones e

incendios, una vez ocurridos se generan altas concentraciones de monóxido de carbono lo que ha causado la muerte por intoxicación a la mayoría de los trabajadores involucrados en explosiones o intoxicaciones agudas a los afectados por incendios. Es muy importante en consecuencia tomar todas las medidas para prevenir este tipo de emergencias, como la implementación de una ventilación forzada y un plan de control de polvo de carbón. Toda mina debe hacer un análisis de vulnerabilidad de los principales riesgos, entre ellos explosiones, atmósferas irrespirables, incendios, y en consecuencia, se debe diseñar un plan de emergencias y asignar los recursos para su implementación, capacitar a todos sus trabajadores en los protocolos de evacuación y respuesta a emergencias, contar y entrenar regularmente a la brigada de emergencias y socorredores mineros; contar con los equipos mínimos que permitan una respuesta segura y oportuna por parte de la organización cuando se materialice una explosión, así como contar con rutas de evacuación y refugios mineros.

Los eventos como explosiones y atmosferas contaminadas, ambos relacionados con el control de una atmosfera bajo tierra respirable y no explosiva, se han traducido en 685 muertes que representan el 41.4% del total. Las explosiones, casi todas de metano y/o polvo de carbón, son eventos muy severos, con una media de más de dos muertes por cada explosión. Las fallas geomecánicas, con n= 509, es el evento más frecuente en nuestra minería. La severidad de un evento por inestabilidad de taludes también es muy alta, en cada emergencia mueren aproximadamente cuatro personas. El 80% de las emergencias por inestabilidad de taludes se ha registrado en explotaciones ilícitas, que corresponden a excavaciones de oro diseminado con maquinaria en la cual no se realiza ni control de agua, ni diseño de los taludes.

De acuerdo con el mineral explotado, tres de cada cuatro mineros mueren en explotaciones de carbón (de las cuales el 98% son subterráneas) y uno de cada cinco minero muere en explotaciones de oro. La minería subterránea de carbón en el interior del país, más específicamente en los departamentos de Boyaca, Cundinamarca, Antioquia, Norte de Santander, Santander y Valle del Cauca, ha tenido una producción histórica que no supera los 10 millones de toneladas de carbón al año, [MME, 2012] si tomamos en consideración una media de 70 muertes por año en la minería subterránea de carbón, estamos hablando de siete muertes por cada millón de toneladas de carbón. El tamaño de las unidades de producción minera y el desbalance en el precio del carbón tienen un alto impacto en la pobre implementación de protocolos de seguridad minera, pero adicionalmente un bajo compromiso muchos empleadores mineros en adoptar prácticas mineras más seguras. Se han sacrificado muchas vidas humanas en fusión de sostener una actividad que en algunos casos no es rentable.

De la figura 1, en la cual se muestra la distribución de muertes en emergencias mineras por año desde el 2005 al 2020, es decir un período de 16 años, se encuentra que la media de muertes por año es de 103. En los años en los cuales se tienen los picos más altos 2019 (173 muertos), 2020 (171 muertes) y 2017 (136 muertes), se registraron emergencias catastróficas relacionados con explosiones asociadas a metano y polvo de carbón, si se restaran las muertes ocasionadas por estos eventos estaríamos muy cerca de la media de 103 muertes por año. No se ha logrado reducir de manera significativa y sostenible en el tiempo las muertes en la minería, la seguridad minera no es una de las prioridades, y no se ha avanzado lo suficiente en el conocimiento de la gestión de los riesgos, en la cultura de prevención, en el seguimiento y control y en el apoyo a mejorar la practicas mineras. Un análisis especial merece el año 2020, en el año 2019 se había registrado el número de muertes en minería más bajo de los últimos 10 años (82) muertes, en el año 2020 se dobló esa cifra al doble. En el año 2020 debido a la pandemia desencadenada por el COVID 19, la actividad minera continuó desarrollándose con “normalidad”, sin embargo, las entidades como la ANM, centros de capacitación, Ministerio de Trabajo y aseguradoras de Riesgos laborales debieron suspender sus actividades regulares de capacitación y seguimiento y control o limitarla a actividades virtuales. En la actividad minera en general se relajaron las medidas de seguridad, ello refleja que sigue siendo muy pobre la cultura de prevención en nuestro sector y que la presencialidad y continuidad en el seguimiento y control y procesos sancionatorios son necesarios para prevenir que los riesgos mineros se materialicen.

Las emergencias debido a explosiones y atmosferas contaminadas ocurren especialmente por una deficiente ventilación que no garantiza la dilución de gases explosivos o una adecuada atmósfera minera. En Colombia es una práctica recurrente suspender la ventilación los fines de semana o en días de vacaciones, sin ningún criterio técnico e

iniciar labores sin hacer una verificación previa de las concentraciones de gases. Por esta razón los meses de marzo y abril que tiene lugar semana santa y de junio con varios festivos, es la época en la cual se han registrado más explosiones y emergencias por atmosferas irrespirables, como se aprecia en la figura 2. Se debe eliminar esta desafortunada práctica de nuestra minería, la suspensión de la ventilación no debe realizarse sin ningún criterio técnico.

En los sucesos por fallas geomecánicas el agente más frecuente es el *ambiente de trabajo* (29%), dado que por falta de controles en explotaciones y el mecanismo presente, el (32%) de estos eventos es *caída de roca*. En las explosiones subterráneas se producen altas temperaturas, una onda de presión que puede causar derrumbes y proyectar los trabajadores, y altas concentraciones de gases tóxicos como monóxido de carbono, encontrando que en nueve de las explosiones (14 explosiones investigadas), el mecanismo presente fue la *Exposición con sustancias nocivas*; es decir que la principal causa de las muertes no ha estado asociada a las quemaduras o golpes por el impacto de la onda explosiva sino a la intoxicación aguda por monóxido de carbono.

Los eventos de tipo mecánico el agente más frecuente son *medios de transporte*, (en casi todos los casos coches para el transporte de mineral). *El ambiente de trabajo* es el agente precursor del 51% de los eventos analizados, lo que es indicador de que los controles de ingeniería como ventilación forzada y sostenimiento en las labores mineras son indispensables para garantizar la seguridad en las operaciones mineras, difícilmente solo el uso de elementos de protección personal como un casco o un autorescatador, podría salvar a un trabajador de la muerte o una lección grave si le cae una roca de varias toneladas o si ocurre una explosión híbrida de metano y polvo de carbón.

Este último hallazgo también está en línea con lo identificado por [Zhang et al. (2016)], quienes encontraron que la probabilidad de una explosión de gas se incrementa con el aumento de los factores de riesgo y la combinación de factores objetivos (Ej: factores de maquinaria y factores ambientales) teniendo una más alta probabilidad de causar una explosión. Concluyeron los investigadores que ese hallazgo sugiere que la industria de carbón debería poner más énfasis en direccionar las fallas de los equipos y en la adaptación a los cambios ambientales (Ej: acumulaciones locales de gas, emisiones de gas anormales) durante el curso de la operación minera.

4.2 Modelo jerárquico de causalidad

Se obtuvo un modelo jerárquico de ocho niveles; dos de los factores de riesgo están en la raíz de la causalidad; cuatro son causas inmediatas y 25 causas indirectas. Los niveles del modelo son una evidencia de la relación de interdependencia entre las causas de los eventos.

Las cuatro causas inmediatas encontradas fueron: 1. (F21) *No se cuentan con condiciones de seguridad en techos, paredes y pisos*, 2. (F28) *porcentaje elevado de gases peligrosos* (ambos factores del ambiente de trabajo), 3. (F14) *Uso inadecuado de herramientas o equipos* (es un factor de trabajo relacionado con el análisis de trabajo seguro, con una adecuada evaluación de riesgos y peligros) y 4. (F28) *Procedimientos de trabajo seguro*, causas que están precedidas de otros factores de riesgo, no producto del azar. De lo anterior se evidencia que condiciones inseguras del ambiente de trabajo, como *porcentaje elevado de gases peligrosos*, están presentes en la mina no porque sean riesgos inherentes a la explotación que no pueden prevenirse, si no porque controles operacionales no han sido implementados. Por ejemplo al hacer la lectura en el modelo jerárquico se encontró que *porcentaje elevado de gases peligrosos* (F18), estuvo precedida de ausencia de *monitoreo de gases permanente* (F4), que a su vez estaba precedido por *no se cuenta con un plan de ventilación o inapropiado* (F19) y esta causa estuvo precedida de la ausencia de *Gestión del Riesgo de Ventilación* (F30) (la gestión incluye actividades como controles de ingeniería y capacitación, revisión de indicadores ambientales), que viene precedido de la *identificación de peligros y riesgos* y en la causas raíces está el SG-SST de la organización y el *liderazgo y compromiso*.

En el modelo jerárquico de explosiones de gas construido por [Zhang et al. (2016)], se encontró que dos los 28 factores de riesgo (políticas de estado y leyes y regulaciones, están en la raíz de las causas de las explosiones de gas, nueve

de los 28 factores de riesgo (ej: chispa eléctrica, acumulaciones locales de gas, llama de voladura) son causas directas para una explosión y 17 factores de riesgo (Ej sistemas de ventilación, gestión de seguridad) son causas indirectas. Concluye el estudio que la industria del carbón debe fortalecer la gestión de equipos mineros (ventiladores, perforadoras y cables), estandarizar procedimientos de operación y mejorar sistemas de gestión de seguridad.

La capacitación y el entrenamiento intervienen en muchas de las causas de los eventos, es fundamental que el trabajador sea entrenado regularmente, porque el conocimiento adecuado de la tarea le permitirá tener la capacidad de identificar los riesgos en su puesto de trabajo y tener una percepción correcta de los riesgos. La capacitación y el entrenamiento continuo influye en el procedimiento, ya que este no corresponde simplemente a un documento, el procedimiento es la forma en la cual el trabajador ejecuta la tarea, proceso; un procedimiento no se impone sin el adecuado entrenamiento.

5. CONCLUSIONES

- 1) Dos de los factores de riesgo están en la raíz de la causalidad, el *Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo* y el *liderazgo y responsabilidad*. El compromiso y responsabilidad de todos los niveles, especialmente de los operadores mineros es necesario para la prevención de sucesos que generen lecciones o muertes. Se debe garantizar que exista además un representante técnico competente en cada operación minera.
- 2) En el período del año 2005 al 2020, debido a fallas geomecánicas (como derrumbes, caída de roca, colapso del frente) han muerto 465 personas y debido a explosiones 407 personas. Fallas geomecánicas y explosiones suman el 52.8% de las muertes. Las fallas geomecánicas son el suceso más frecuente en la minería en Colombia, 509 registros que equivalen al 34.6% y las explosiones el suceso más catastrófico, solo en cinco explosiones han muerto 149 personas.
- 3) En los sucesos por fallas geomecánicas el agente más frecuente es el *ambiente de trabajo* (29%), se encuentra que en nueve de las explosiones (14 explosiones analizadas) el mecanismo presente es *Exposición con sustancias nocivas*. En las emergencias de tipo mecánico el agente más frecuente son *medios de transporte*. El *ambiente de trabajo* es el agente precursor del 51% de los eventos analizados, lo que es indicador de que los controles de ingeniería y otros controles en la fuente son indispensables para garantizar la seguridad en las operaciones mineras, solo el uso de elementos de protección personal es insuficiente para evitar las lecciones o las muertes.
- 4) La secuencia de los factores de riesgo en el árbol muestra como las decisiones incorrectas y las condiciones ambientales desfavorables están condicionadas, influenciadas por el conjunto de las reglas de juego del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo. Los riesgos no son inherentes, ni el error humano la causa en la cual debe concluir una investigación, es el inicio.
- 5) Se obtuvo un modelo jerárquico de ocho niveles; dos de los factores de riesgo están en la raíz de la causalidad; cuatro son causas inmediatas y 25 causas indirectas. Las lecciones y las muertes en la minería si pueden prevenirse, al leer el modelo jerárquico en un sentido positivo encontramos que si sobre la base del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo y el liderazgo y responsabilidad del empleador minero se identifican y evalúan los peligros y riesgos, implementan planes de ventilación y sostenimiento, gestionan los riesgos de tareas críticas, capacita continuamente a los trabajadores que los lleven a adquirir habilidades en su trabajo, una adecuada percepción de riesgos y la realización de procedimientos adecuados; se establece supervisión adecuada, los riesgos ambientales como derrumbes o atmosferas explosivas o irrespirables estarán controlados y los trabajadores tomarán decisiones correctas que evitara lecciones y muertes.

- 6) El ISM es un modelo que representa con claridad la estructura y las relaciones entre los componentes de un sistema. Sin embargo, es pobre para identificar el nivel de influencia y sentido positivo o negativo de un factor de riesgo sobre otro, por lo tanto, siempre es importante complementar el análisis con otros modelos.
- 7) La pandemia y restricciones desencadenadas por la COVID 19 en el año 2020 también agravaron los problemas de seguridad minera que ya tenía el sector. En el año 2020 se registraron 153 emergencias mineras la cifra más alta y 171 víctimas mortales. La actividad minera fue excluida en Colombia de suspender, y las emergencias que se registraron develaron que se incumplieron los más básicos y esenciales controles de seguridad. Las entidades encargadas del seguimiento y control y la capacitación redujeron su actividad o la limitaron solo a algunas virtuales, lo cual tuvo un efecto negativo en la prevención de riesgos mineros. En consecuencia, la capacitación de calidad y una adecuada vigilancia si contribuyen a evitar pérdidas de vidas.

6. RECOMENDACIONES

- 1) Son indispensables en la gestión de los riesgos mineros los controles asociados a garantizar una atmosfera minera no explosiva y respirable, el control de polvo de carbón y la prevención de sucesos por fallas geomecánicas. Todo lo cual debe tener una base de diseño ingenieril, seguimiento permanente y la capacitación de los trabajadores.
- 2) Los sucesos mineros y las muertes si pueden prevenirse, si se asume la responsabilidad de los operadores mineros, se realiza una adecuada y acertada identificación de riesgos y peligros, se implementan controles de ingeniería como plan de ventilación y sostenimiento, programas de mantenimiento de equipos y herramientas, se realizan supervisión entendida como un seguimiento para la toma de decisiones y se imparte entrenamiento continuo a los trabajadores que los lleven a adquirir habilidades para su trabajo y una adecuada percepción de riesgos y se establecen procedimientos adecuados.
- 3) El rol de todas las partes interesadas es fundamental para un sector minero con una fuerte cultura de prevención de los sucesos que generan lecciones y muertes. Los profesionales del sector deben actuar con rectitud y aportar desde la ingeniería a la solución de problemas. La construcción de conocimiento a través la investigación es fundamental para controlar lo riesgos mineros y Colombia debe avanzar en tener investigación continua; una política de formalización minera que tenga como uno de sus pilares la seguridad minera, una autoridad minera muy técnica, diligente y anticipada a las situaciones que puedan generar sucesos y control del mercado para evitar que se comercialice mineral que proviene de explotaciones ilícitas en las que no se cumplen normas de seguridad y crean un desbalance en los precios.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los siguientes ingenieros quienes participaron en la evaluación de la matriz de adyacencia. Todos son ingenieros de Minas o ingenieros de Minas y Metalurgia con significativa experiencia en el sector minero y la gestión de riesgos.

<i>Nombre</i>	<i>Institución</i>	<i>Nombre</i>	<i>Institución</i>
Juan Eugenio Monsalve	Universidad Nacional de Colombia	Sindy Lorena Herrera	Agencia Nacional de Minería
Yuver Dario Ramirez	Sector minero productivo	Aura Yomaira Castro	Agencia Nacional de Minería
Juan Camilo Rojas	Universidad Nacional de Colombia	Snider Javier Molina	Consultor

8. BIBLIOGRAFÍA

Agencia Nacional de Minería, "Cuadro de Control de Emergencias Mineras", 2020.

Aven, T. (n.d). On how to define, understand and describe risk. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(6), 623-631.

Chen, H., Qi, H., & Feng, Q. (2013). Characteristics of direct causes and human factors in major gas explosion accidents in Chinese coal mines: Case study spanning the years 1980–2010. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(1), 38–44.

Davis, R. M., & Pless, B. (2001). BMJ bans "accidents". *BMJ (Clinical research ed.)*, 322(7298), 1320–1321. <https://doi.org/10.1136/bmj.322.7298.1320>

Feyer, A., & Williamson, A. (1991). A classification system for causes of occupational accidents for use in preventive strategies. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 17(5), 302-311. Retrieved March 29, 2020, from www.jstor.org/stable/40965909

Heyman, B., & Brown, P. (2013). Perspectives on 'the lens of risk' interview series: interviews with Tom Horlick-Jones, Paul Slovic and Andy Alaszewski. *Health, Risk & Society*, 15(6/7), 494-510.

Katsakiori, P., Sakellaropoulos, G., & Manatakis, E. (2009). *Towards an evaluation of accident investigation methods in terms of their alignment with accident causation models*.

Kauffman, S.A. (1993). *The origins of order: Self-organization and selection in evolution*. Oxford: Oxford University Press.

Kong, B., Li, Z., Yang, Y., Liu, Z., & Yan, D. (2017). A review on the mechanism, risk evaluation, and prevention of coal spontaneous combustion in China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 24(30), 23453–23470.

Ministerio de Minas y Energía. Reglamento de seguridad en las labores subterráneas, Decreto 1886 (2015).

Ministerio de Minas y Energía; 2012. Censo Minero Departamental 2010-2011. Colombia: Disponible en: <https://www.minenergía.gov.co/documents/10180/698204/CensoMinero.pdf/093cec57-05e8-416b-8e0c-5e4f7c1d6820>

Mullen, J. (2004). Investigating factors that influence individual safety behavior at work. *Journal Of Safety Research*, 35(3), 275-285. doi:10.1016/j.jsr.2004.03.011

Shen, L. Y., Song, X. N., Wu, Y., Liao, S. J., & Zhang, X. L. (2016). Interpretive structural modeling-based factor analysis on the implementation of emission trading system in the Chinese building sector. *Journal of Cleaner Production*, 127, 214–227.

Simpson, G., Horberry, T. & Joy, J. (2009). *Understanding human error in mine safety*. Farnham: Ashgate.

Tong, R., Yang, Y., Ma, X., Zhang, Y., Li, S., & Yang, H. (2019). Risk Assessment of Miners' Unsafe Behaviors: A Case Study of Gas Explosion Accidents in Coal Mine, China. *International journal of environmental research and public health*, 16(10), 1765. <https://doi.org/10.3390/ijerph16101765>

Wang, J., & Yan, M. (2019). Application of an Improved Model for Accident Analysis: A Case Study. *International journal of environmental research and public health*, 16(15), 2756. <https://doi.org/10.3390/ijerph16152756>

Wang, X.M., Fu, G., Zhu, K., Yin, W. T., Liu, X. Y., Shao, P. C., & Li, R. F. (2015). Causes analysis of gas explosion accident from perspective of equipment and facilities classification. *Safety in Coal Mines*, 46(11), 241–244 (in Chinese).

Xue, Y., Liu, Y. L., & Zhang, T. T. (2013). Research on formation mechanism of coupled disaster risk. *Journal of Natural Disasters*, 22(2), 44–50 (in Chinese).

Yin, W. T., Fu, G., Yang, C., Jiang, Z. N., Zhu, K., & Gao, Y. (2017). Fatal gas explosion accidents on Chinese coal mines and the characteristics of unsafe behaviors: 2000–2014. *Safety Science*, 92, 173–179.

Zhang, J., Xu, K., You, G., Wang, B. and Zhao, L. (2019), Causation Analysis of Risk Coupling of Gas Explosion Accident in Chinese Underground Coal Mines. *Risk Analysis*, 39: 1634-1646. doi:[10.1111/risa.13311](https://doi.org/10.1111/risa.13311)