



Emergencias y fatalidades mineras subterráneas en Colombia

Yuly Tatiana Galvis-Ocampo, Nicolás Enrique Oviedo-Rubiano & Giovanni Franco-Sepúlveda

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Medellín, Colombia. ytgalviso@unal.edu.co, neoviedor@unal.edu.co, gfranco@unal.edu.co

Received: May 24th, 2021. Received in revised form: June 15st, 2021. Accepted: July 15th, 2021

Resumen

Durante 2019 en Colombia, el 1,9% de los títulos mineros correspondientes a gran minera, aportaron el 91% de las regalías; en contraste con esta cifra económica, el 90,4% de los títulos mineros clasificados como mediana y pequeña minería, aportaron el 63% de las fatalidades (el 37% restante fue aportado por minería ilegal). Desde 2005 la autoridad minera se encuentra recopilando información sobre emergencias y fatalidades mineras, lideró la actualización al reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas, fortaleció la fiscalización minera, entre otros aspectos y la tendencia al aumento de este fenómeno no ha disminuido. Por lo tanto, se realiza un análisis descriptivo de esta base de datos (emergencias y fatalidades mineras) en R, un software para el procesamiento y análisis estadístico, con el fin de identificar las variables de mayor incidencia. Para finalmente proponer tres modelos estadísticos que nos permitan predecir el fenómeno de estudio en un periodo de tiempo, generando insumos para enriquecer la discusión en torno a la seguridad minera del país.

Palabras clave: minería; emergencias; fatalidades; R; estadística.

Underground mining emergencies and fatalities in Colombia

Abstract

During 2019 in Colombia, 1.9% of the mining titles corresponding to large mining companies contributed 91% of the royalties; In contrast to this economic data, 90.4% of the mining titles classified as medium and small mining, contributed 63% of the fatalities (the remaining 37% was contributed by illegal mining). Since 2005, the mining authority has been collecting information on mining emergencies and fatalities, led the update of the safety regulations in underground mining operations, strengthened mining control, among other aspects, and the increasing trend of this phenomenon has not diminished. Therefore, a descriptive analysis of this database (mining emergencies and fatalities) is carried out in R, a software for statistical processing and analysis, in order to identify the variables with the highest incidence. For the end mind to propose three statistical models that allow us to predict the phenomenon under study in a period of time, generating inputs to enrich the discussion around the country's mining safety.

Keywords: mining; emergencies; fatalities; R; statistics.

1. Introducción

La minería en Colombia para el 2019 representó el 2% del PIB total, aportando en regalías 2,25 billones de pesos producto de la explotación de los recursos naturales no renovables, contraprestación económica pagada al estado y derivada de esta explotación. De este dinero ingresado a las arcas del estado, el 91% correspondió a proyectos de gran minería, siendo este tipo de clasificación el 1,9% del total de títulos mineros, mientras que el 9% del dinero restante fue aportado por títulos clasificados en mediana y pequeña minería, los cuales corresponden al 90,4% del total de títulos mineros en Colombia.

No obstante, en contraste con el aporte de estas cifras a la economía del país y lo que representa en materia de seguridad minera, el 90,4% de los títulos mineros del país, clasificados como pequeña y mediana minera, reportaron 114 emergencias, con un resultado de 20 trabajadores ilesos, 89 heridos y 82 fallecidos, de los cuales 75 fatalidades correspondieron a minería subterránea; en otras palabras,

se presentaron 1,5 fatalidades por cada millón de horas hombre trabajadas durante el 2019 en la minería en Colombia (ANM, 2020), muy por encima de otros países de la región como Perú, Chile y Estados Unidos donde este valor se situó en 0,06, 0,03 y 0,03 respectivamente.

Un informe de la OIT reveló que la probabilidad de accidentes es de seis a siete veces más común en la industria de la MAPE (minería artesanal y de pequeña escala) en comparación con las operaciones mineras a gran escala. (Bansah et al., 2016), (Tsang et al., 2021).

Muchos estudios coinciden en que el comportamiento humano inseguro es responsable del 60 al 90% de los accidentes ocurridos (Zhang et al., 2019)

Es por esto, que en el presente artículo se pretende realizar un análisis de las emergencias y fatalidades mineras ocurridas desde 2005 hasta el 17 de octubre de 2020, con el fin de identificar las causas, el departamento de ocurrencia, el mineral asociado y demás aspectos que permitan comprender la realidad a la que se enfrenta la minería en

Colombia, con el fin de generar insumos que aporten a la discusión de cómo revertir el comportamiento evidenciado a lo largo de estos años.

Finalmente, luego de identificar los aspectos de mayor incidencia en la tasa de emergencias y fatalidades ocurridas en la minería subterránea en Colombia, se planteará un modelo estadístico que permita predecir las emergencias y fatalidades en minería subterránea en Colombia.

2. Metodología

El presente artículo fue desarrollado en tres momentos, el primero de ellos abarco una búsqueda bibliográfica que nos permitiera identificar el marco jurídico para el desarrollo de la minería subterránea en Colombia, específicamente para el ejercicio de labores subterráneas: Código de minas y reglamento de seguridad; así mismo se buscó el reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas aplicado en Perú y finalmente se solicitó a la autoridad minera (ANM) una base de datos desde 2005 hasta el 17 de octubre de 2020 de emergencias y fatalidades mineras ocurridas en el país.

En el segundo momento se sintetizó, analizó la información anteriormente mencionada, con el fin de identificar las variables de mayor incidencia en las estadísticas de emergencias y fatalidades mineras subterráneas, teniendo dos aspectos a analizar, por un lado, el tema normativo y para esto se comparó el reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas actual, el decreto 1886 del 21 de septiembre de 2015, con el anterior el decreto 1335 del 15 de julio de 1987, posteriormente, se comparó el reglamento de seguridad en la labores mineras subterráneas Colombiano con su similar Peruano; y por el otro lado se depuró la base de datos obtenida de emergencias y fatalidades mineras en Colombia y que nos permitiera identificar y responder ¿Qué?, ¿Cuánto?, ¿Donde?, ¿Cómo? y ¿Por qué?

El tercer momento, consistió en correlacionar la información presente en la base de datos de las emergencias y fatalidades ocurridas en el país: fecha de ocurrencia del evento (día/mes/año), N° emergencias/fatalidades, mineral, municipio-departamento, causa del evento, entre otros.

El anterior ejercicio se realizó a través del software R. Posteriormente, se propusieron algunos modelos estadísticos, entre estos usamos: modelo lineal, modelo lineal generalizado y árboles de regresión; modelos que nos permitirían establecer el número de emergencias y fatalidades ocurridas en un periodo de tiempo (ya transcurrido), para finalmente evaluar el grado de predicción de los modelos usados.

Para realizar este proceso se siguieron los siguientes pasos, tal como se pueden apreciar en la Fig. 1:

3. Marco jurídico

Para el desarrollo de la minería en Colombia, el Ministerio de Minas y Energía como autoridad minera nacional (hoy delegada con la Agencia Nacional de Minería y la Secretaría de Minas de la Gobernación de Antioquia), el ministerio de Trabajo y el congreso de la república, han expedido una serie de normas que regulan el ejercicio de las actividades mineras en el país, entre ellas el reglamento de seguridad en la labores mineras subterráneas, que define los aspectos en seguridad minera y seguridad y salud en el trabajo que deben aplicar los titulares mineros, explotadores y empleadores mineros en el desarrollo de la minería subterránea.

Solicitud de base de datos	• Se realizó derecho de petición a la autoridad minera (ANM) para obtener información.
Limpieza de información	• No consideración de datos atípicos, ajuste de formato (DD/MM/AAAA), NA...
Lectura de base de datos en R	• Se considera la naturaleza intrínseca del tipo de variable, donde se destacan variables de tipo numérico, tipo fecha y categóricas
Análisis descriptivo	• Entender el fenómeno • Identificar las variables de mayor incidencia
Propuesta de los modelos de regresión	• Modelo lineal, modelos lineal generalizado y modelo árboles de regresión
Entrenamiento de los modelos	• Validar y/o probar con un subconjunto de datos (2005- 2018)
Ajuste, comparación y selección modelo	• Ajuste del modelo y comparación de los modelos para escoger el de menor error
Prueba modelo	• Se realizan predicciones en un periodo ya transcurrido (abril y mayo de 2018)
Reporte del Modelo	• Ecuación y/o descripción del modelo

Figura 1. Metodología para realización de modelo. Elaboración propia

Actualmente, el reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas se encuentra establecido a través del decreto 1886 del 21 de septiembre de 2015, el cual derogó el decreto 1335 del 15 de julio de 1987, reglamentos que fueron comparados con el fin de identificar la posible incidencia en las emergencias y fatalidades; este análisis se realizó desde 01 de enero de 2005 hasta el 17 de octubre de 2020 (última actualización de base de datos), teniendo como referencia la fecha de entrada en vigencia del nuevo decreto (21/09/2015).

De esta manera, con la actualización del reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas dado a través del decreto 1886, no ocurrieron cambios sustanciales en cuanto a su contenido, por lo cual este nuevo decreto podría considerarse continuista ya que no proporciona cambios

Tabla 1. Principales de normas de aplicación de la minería subterránea en Colombia.

Norma (Ley, decreto, resolución)	Descripción	Observaciones
Decreto 2655 del 23 diciembre de 1988	Por medio del cual se expide el código de minas.	Derogado, sin embargo, están vigentes títulos otorgados bajo esta norma
Ley 685 de 2001	Por medio del cual se expide el código de minas.	Código de minas actual
Decreto 1072 del 26 de mayo de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto único reglamentario del sector trabajo	Decreto compilatorio de normas reglamentarias preexistentes
Decreto 1886 del 21 de septiembre de 2015	Reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas	Derogó el decreto 1335 del 15 de julio de 1987

Fuente: Elaboración propia a partir de (ANM, 2020).

considerables con respecto a su predecesor, el decreto 1335, pues se evidencia que las modificaciones fueron más una actualización de la terminología, la redacción y algunos complementos a lineamientos ya establecidos como la ejecución segura de las labores, la medición y control de gases contaminantes (VLP's), el salvamento minero y las exigencias de los equipos de protección personal (EPP) y no una respuesta a los avances en ciencia y tecnología que ha tenido la industria a nivel mundial/nacional y a las estadísticas en emergencias y fatalidades presentadas en el desarrollo de la actividad minera en Colombia.

A continuación, en la Tabla 1, se presentan las normas más relevantes para el desarrollo de la minería en Colombia.

4. Resultados, análisis y discusión

4.1. Estadísticas de emergencias y fatalidades

En la Figura 42, se realiza una recopilación de las fatalidades mineras ocurridas desde 2005 hasta el 2020 en minería subterránea y en la cual se puede evidenciar valores muy altos para algunos años, por lo cual es pertinente suprimir estos datos para evitar que las estimaciones de los parámetros de los modelos a implementar se vean influenciados.

Los valores atípicos pueden ser indicativos de datos que pertenecen a una población diferente del resto de las muestras establecidas, aunque no se duda de la naturaleza de estas, con el propósito de encontrar estimaciones robustas es preferible prescindir de estos datos muy altos para proceder con la etapa de modelación.

Para identificar los datos atípicos se utilizó el test de Tukey, que toma como referencia la diferencia entre el primer cuartil Q_1 y el tercer cuartil Q_3 , o rango intercuartílico. En un diagrama de caja de bigotes, se considera un valor atípico el que se encuentra 1,5 veces esa distancia de uno de esos cuartiles.

De esta manera, en el siguiente diagrama de caja de bigotes (boxplots) se exhibe el comportamiento de las variables sin considerar los datos extremos. Ver Fig. 3.

De esta manera, se evidencia en el diagrama de caja de bigotes anterior, que la mayoría de los valores de la distribución se encuentran entre 0 y 5, existen muchos datos en la cola superior de la distribución por la naturaleza misma del fenómeno (conteos), algunos valores no se muestran en la gráfica pues son muy altos y por facilitar su apreciación.

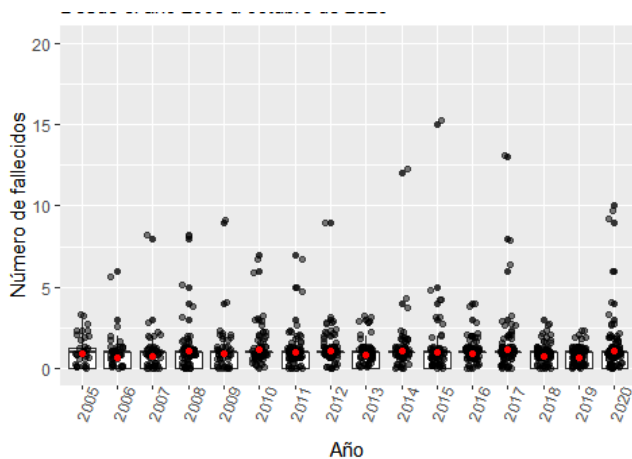


Figura 2. Distribución de fatalidades mineras subterráneas ocurridas entre los años 2005-2020.

Fuente: Elaboración propia utilizando software R a partir de (ANM, 2020).

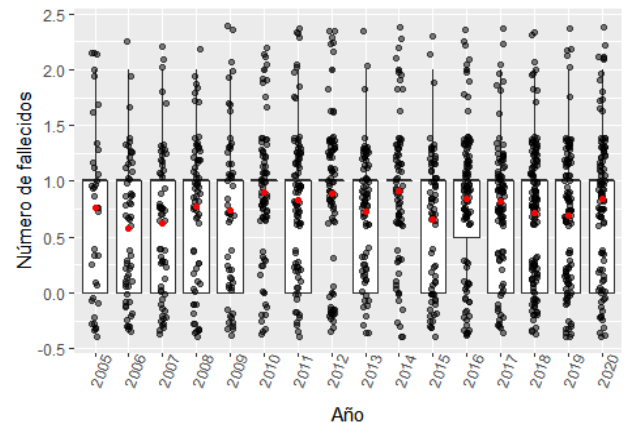


Figura 3. Diagrama de caja de bigotes (boxplots) fatalidades mineras subterráneas ocurridas entre los años 2005-2020.

Fuente: Elaboración propia utilizando software R a partir de (ANM, 2020).

En la Fig. 4, se puede evidenciar como a pesar de realizarse la actualización del reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas en el año 2015, el comportamiento estadístico se mantiene, incluso con tendencia al alza, yendo en contravía de la filosofía con que se planteó el decreto 1886 de 2015 que pretendía reducir las emergencias y fatalidades ocurridas en minería subterránea.

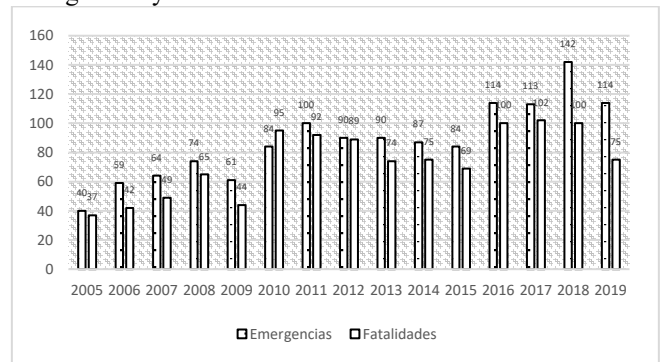


Figura 4. Emergencias y fatalidades mineras subterráneas ocurridas entre los años 2005-2019.

Fuente: Elaboración propia a partir de (ANM, 2019).

Al continuar analizando estas estadísticas, a la luz del tipo de mineral/material otorgado mediante un título minero y/o llevado a cabo mediante explotación ilícita, en el cual el 32% de las fatalidades es aportado por este último, se evidencia que la ocurrencia de estas cifras está directamente relacionada con la explotación subterránea, siendo carbón y oro de filón las de mayor incidencia, tal como se evidencia en la Fig. 5.

Adicionalmente, un dato que complementa este análisis es que el mineral con mayor cantidad de títulos mineros otorgados no es el que mayor cantidad de cifras en emergencias y fatalidades aporta, son los títulos mineros asociados a la minería subterránea los que encabezan estas estadísticas. Para explicar esta situación, el 57% de los títulos mineros en Colombia fueron otorgados para materiales de construcción, el cual aportó 12 emergencias y 26 fatalidades (quinto lugar), en comparación con el 17% de los títulos mineros otorgado para carbón, que aportó 1020 emergencias y 1077 fatalidades (primer lugar). Aspecto que evidencia finalmente, que los riesgos y probabilidad de ocurrencia son mayores en el desarrollo de la minería subterránea en comparación con la minería a cielo abierto.

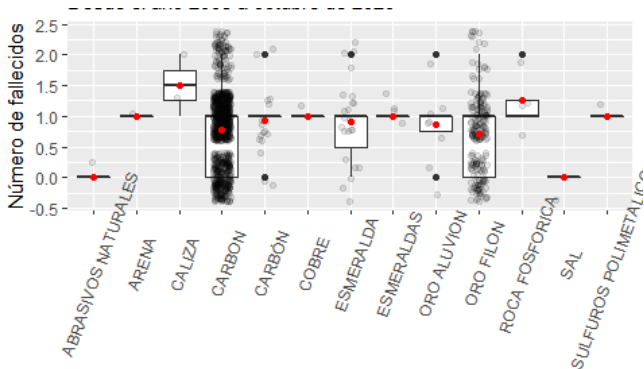


Figura 5. Fatalidades mineras ocurridas por mineral entre los años 2005-2020. Fuente: Elaboración propia utilizando software R a partir de (ANM, 2020).

Al identificar la ubicación de los títulos mineros en Colombia, teniendo en cuenta los dos principales minerales que aportan los casos de emergencias y fatalidades, caso del carbón (subterráneo) y oro de filón, se encuentra una relación directa de los departamentos productores con los departamentos de ocurrencia de emergencias y fatalidades, de estos dos minerales.

En Colombia, el carbón por explotación subterránea es realizado principalmente en los departamentos de Boyacá, Norte de Santander, Cundinamarca y Antioquia (UPME, 2020), representando con el total de departamentos productores el 8,86% de la producción nacional (ANM, 2020); por otro lado, el oro por explotación subterránea es explotado en los departamentos de Antioquia, Chocó, Bolívar, Córdoba, Caldas, Tolima, Cauca y Nariño (UPME, 2020). Destacándose Antioquia como departamento productor subterránea.

De esta manera, en la Fig. 6, se evidencia que los departamentos productores de carbón y/o oro son los departamentos que encabezan el listado de emergencias y fatalidades, caso de Boyacá, Antioquia, Cundinamarca y Norte de Santander.

Manteniendo la tendencia, de ser la minería subterránea la principal variable de incidencia en las estadísticas de emergencias y fatalidades, en la Fig. 7 se evidencia que las tres principales causas, derrumbe, atmosfera viciada y explosión son generadas únicamente en un contexto subterráneo.

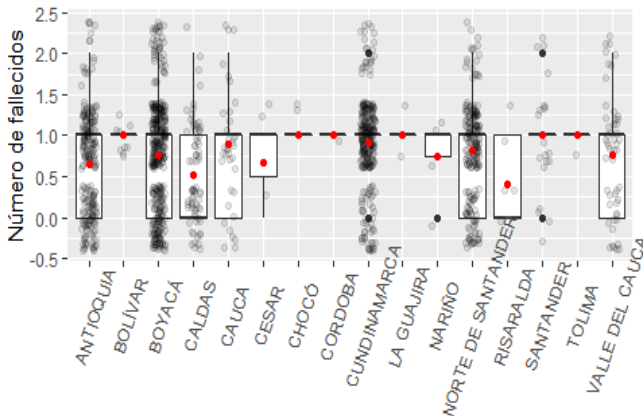


Figura 6. Emergencia y Fatalidades mineras ocurridas por departamentos entre los años 2005-2019. Fuente: Elaboración propia utilizando software R a partir de (ANM, 2020).

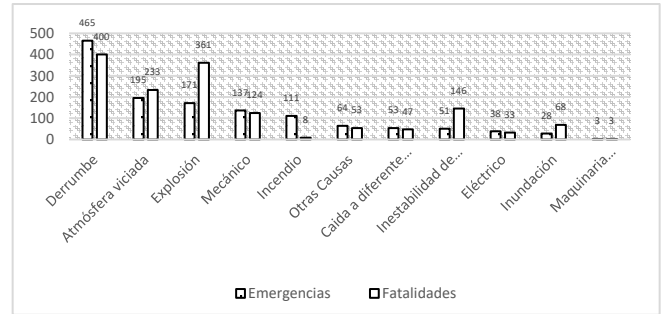


Figura 7. Causas de Emergencia y Fatalidades mineras ocurridas entre los años 2005-2019. Fuente: Elaboración propia a partir de (ANM, 2019).

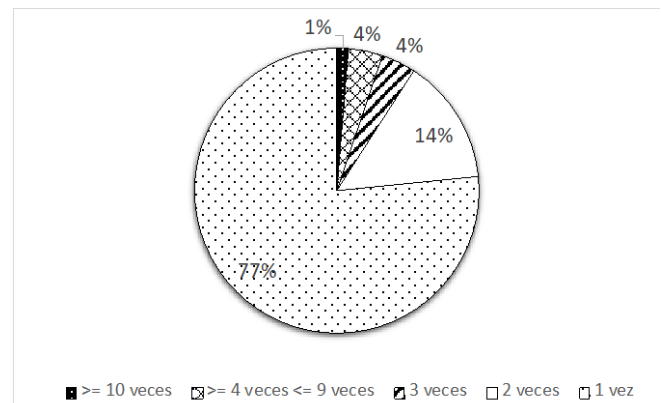


Figura 8. N° repetición evento por título durante los años 2005-2019. Fuente: Elaboración propia a partir de (ANM, 2019).

En cuanto al número de repeticiones de una emergencia minera en un mismo título minero a lo largo de 14 años en que se analizó esta información, no se tienen los elementos, ni la información suficiente que nos permitan identificar las razones por las cuales se está ocasionando que un evento se repita, lo que si queda claro, es que la autoridad minera deberá realizar un trato diferencial, en cuanto a priorización de visitas de fiscalización, apoyo técnico, capacitaciones y demás estrategias que permitan evitar una nueva ocurrencia de una emergencia minera. En la Fig. 8, se evidencia que el 77% de los eventos ocurridos durante 2005 a 2019 ocurrieron en una única vez para un mismo título minero, mientras que el 23% restante se encuentra distribuido en 2 veces, 3 veces, mayor e igual a 4 veces y menor e igual a 9 veces y mayor 10 veces, la ocurrencia de una emergencia minera.

En la Fig. 9, se compara el precio del carbón [COP/Tonelada] con el número de fatalidades en el mismo periodo de tiempo, de acuerdo con esto, no es tan evidente la relación de estas variables, por ejemplo, mientras en 2019 se aumenta el número de fatalidades el precio de carbón disminuye.

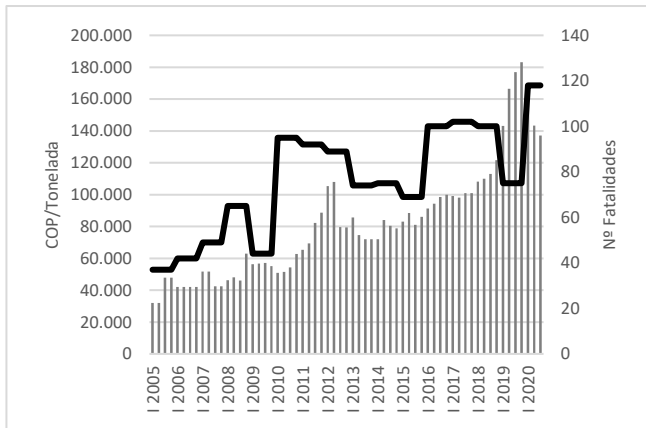


Figura 9. Precio del carbón VS fatalidades.

Fuente: Elaboración propia a partir de (ANM, 2019).

4.2 Modelo de emergencias y fatalidades

En este punto, se seleccionan las variables que bajo un punto de vista intuitivo tienen relación con el fenómeno de estudio y que, de acuerdo con el análisis anterior, resultan de mayor trascendencia:

- Fecha del accidente
- Mineral
- Departamento
- Estado jurídico
- Número de emergencias
- Precio del carbón
- Número de fallecidos

Es preciso dividir los datos en dos conjuntos, un conjunto de entrenamiento para entrenar los modelos y uno de validación para comprobar el rendimiento de los mismos.

De esta manera, se selecciona las observaciones desde el año 2005 hasta 2018 y se valida el modelo con los meses de abril y mayo de 2018.

4.2.1 Modelo Lineal

El modelo lineal, definido mediante la Ecuación 1, relaciona la variable dependiente Y con K variables explícitas X_k ($k = 1, \dots, K$), o cualquier transformación de éstas que generen un hiperplano de parámetros β_k desconocidos:

$$Y = \sum \beta_k X_k + \varepsilon \quad (1)$$

Tabla 2.

Conjunto de datos para entrenamiento 2005-2018, modelo lineal.

Dato	Año	Fatalidades	Predicción
1	2005	18	24
2	2006	28	40
3	2007	28	41
4	2008	32	55
5	2009	26	39
6	2010	37	59
7	2011	40	69
8	2012	40	65
9	2013	37	58
10	2014	35	57
11	2015	35	55
12	2016	51	90
13	2017	45	82
14	2018	12	21

Fuente: Elaboración propia utilizando software R a partir de (ANM, 2020).

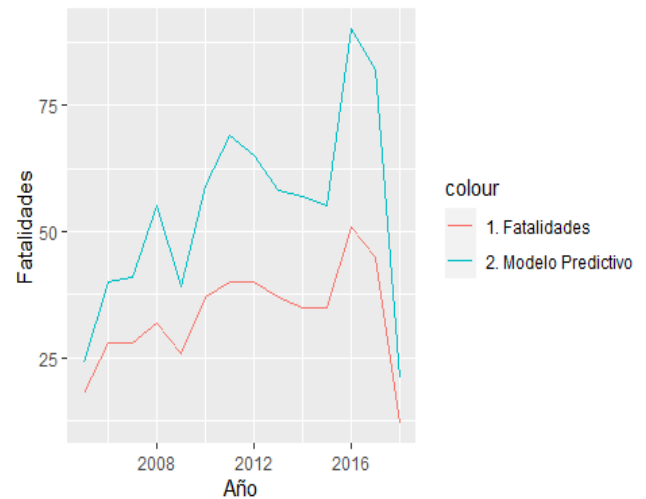


Figura 10. Modelo lineal y fatalidades ocurridas 2005-2018.

Fuente: Elaboración propia utilizando software R a partir de (ANM, 2020).

Tabla 3.

Predicción de datos abril y mayo de 2018, modelo lineal.

Dato	Mes	Fatalidades	Predicción
1	Apr	7	7
2	May	4	7

Fuente: Elaboración propia utilizando software R a partir de (ANM, 2020).

Donde ε es la perturbación aleatoria, X_k Covariables explicativas y β_k la estimación que acompaña dichas variables. En la Tabla 2, se muestra el conjunto de datos para el entrenamiento del modelo, con información histórica para el periodo de tiempo del año 2005 al 2018.

En la Fig. 10 se evidencia el modelo lineal (predictivo) y las fatalidades ocurridas; como se evidencia en esta gráfica, el modelo captura bien la tendencia, pero este tiende a sobreestimar el fenómeno.

De igual manera, al momento de validar el fenómeno se evidencia una sobreestimación, aunque es una buena aproximación, tal como se muestra en la Tabla 3.

4.2.2 Modelo Lineal generalizado (GLM)

Los modelos lineales generalizados (GLM), son una generalización flexible de la regresión lineal ordinaria y que permite variables de respuesta que tienen modelos de distribución de errores distintos de una distribución normal, en este caso particular donde nuestra variable representa conteos, se propone un modelo Poisson (Harrell, 2001), tal como se evidencia en la Ecuación 2.

$$\mathbb{E}(Y) = \mu = g^{-1}(X\beta) \quad (2)$$

Donde,

$\mathbb{E}(Y)$ es el valor esperado de Y

$X\beta$ es el predictor lineal

g es la función de enlace.

Donde nuestro g^{-1} es la función exponencial, puesto, que la función de enlace es \log .

Al igual que en el modelo lineal, al momento de validar el fenómeno se evidencia una sobreestimación, aunque es una buena aproximación. Tal como se evidencia en la Tabla 4.

Tabla 4.

Predicción de datos abril y mayo de 2018, modelo lineal generalizado.

Dato	Mes	Fatalidades	Predicción
1	Apr	7	7
2	May	4	7

Fuente: Elaboración propia utilizando software R a partir de (ANM, 2020).

4.2.3 Árboles de regresión

Un árbol de decisión (clasificación/regresión) es un modelo de predicción utilizado en diversos ámbitos que van desde la inteligencia artificial hasta la Economía fueron propuestos por Leo Breiman en el libro (Breiman et al. 1984), los árboles de decisión tienen como objetivo predecir la variable respuesta Y en función de covariables y esto se logra mediante un diagrama de construcciones lógicas de si o no.

En la Fig. 11, se puede evidenciar un ejemplo de las iteraciones que tiene el modelo. Inicialmente el modelo considera el 100% de la información, posterior a ellos se presenta la primera regla lógica la cual es el departamento, donde se evidencia que el 24% de los datos pertenecen a Antioquia otorgando un valor de 0.63; en la siguiente regla lógica se establece el estado jurídico del título donde se presentó la emergencia, esta vez con el 24% de los datos como si este fuera el nodo raíz (un nuevo 100%) y así sucesivamente hasta finalizar todas las reglas lógicas.

De esta manera, podríamos concluir que del 100% de los datos, el 24% de las fatalidades se presentaron en el departamento de Antioquia, de las cuales el 11% correspondió a títulos mineros legales y que el 76% de estos eventos ocurrieron en noviembre.

A continuación en la Tabla 5, se presenta el conjunto de datos a partir del cual se realizó el entrenamiento del modelo.

Finalmente, en la Fig. 12 y en la Tabla 6, se presenta el modelo predictivo de árboles de regresión y donde se puede apreciar que al igual que los modelos anteriores se sobrestima la predicción, aunque si mantiene la tendencia.

4.3 Errores cuadráticos

A partir de la Ecuación 3, se calcula los errores cuadráticos medios de cada uno de los tres modelos utilizados. Lo anterior con el fin de escoger el mejor modelo.

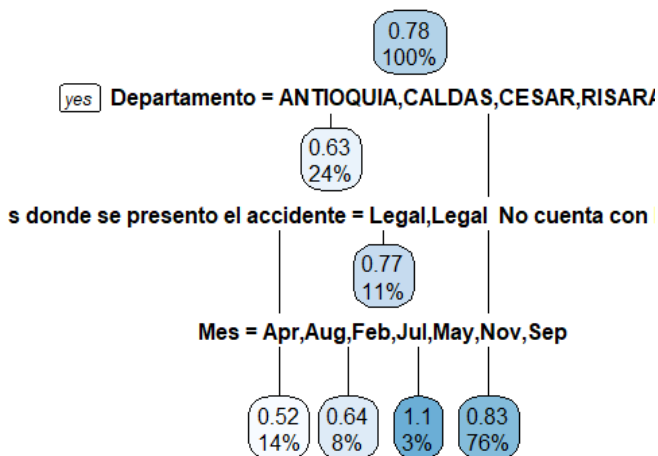


Figura 11. Árboles de regresión.

Fuente: Elaboración propia utilizando software R a partir de (ANM, 2020)

Tabla 5.

Conjunto de datos para entrenamiento 2005-2018, modelo arboles de regresión.

Dato	Año	Fatalidades	Predicción
1	2005	18	28
2	2006	28	45
3	2007	28	46
4	2008	32	55
5	2009	26	43
6	2010	37	58
7	2011	40	68
8	2012	40	64
9	2013	37	59
10	2014	35	55
11	2015	35	55
12	2016	51	82
13	2017	45	75
14	2018	12	19

Fuente: Elaboración propia utilizando software R a partir de (ANM, 2020).

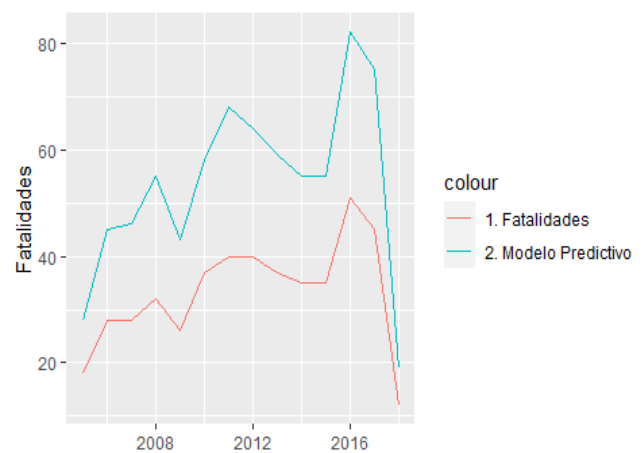


Figura 12. Modelo arboles de regresión y fatalidades ocurridas 2005-2018.

Fuente: Elaboración propia utilizando software R a partir de (ANM, 2020).

Tabla 6.

Predicción de datos abril y mayo de 2018, Modelo arboles de regresión.

Dato	Mes	Fatalidades	Predicción
1	Apr	7	9
2	May	4	7

Fuente: Elaboración propia utilizando software R a partir de (ANM, 2020).

Tabla 7.

Errores cuadráticos medios de cada uno de los modelos.

Dato	m0	m1	m2
Valor	0.8873967	0.8791322	0.9493802

Fuente: Elaboración propia

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (3)$$

Donde:

 \hat{Y}_i El el valor estimado del número de fatalidades. Y_i El valor real del número de fatalidades.

A partir de Tabla 7, el modelo de árboles de regresión cuenta con el menor error, es decir, es el modelo que mejor se ajustó a los datos de entrenamiento (etapa donde se validó el grado de predicción de un subconjunto de datos tomados entre 2005-2018), no obstante, las diferencias no son tan significativas entre estos, para considerar un modelo con un rendimiento más destacable.

5. Conclusiones y recomendaciones

- a) Se recomienda a la autoridad minera (ANM/secretaría de minas de la gobernación de Antioquia) tomar acciones frente a las conclusiones obtenidas de la recopilación estadística de emergencias y fatalidades mineras y los modelos estadísticos aplicados, con el fin de desarrollar estrategias que permitan reducir la tendencia al aumento presentada a lo largo de 15 años y medio. Mineral, causa y departamento son las principales variables para considerar.
- b) Creación de un grupo multidisciplinario adscrito a la autoridad minera (Agencia Nacional de Minería y secretaria de minas de la gobernación de Antioquia), que constantemente este realizando capacitaciones teórico-prácticas a mineros con bajo nivel de formación en la gestión de riesgos de minería subterránea, en especial minería de carbón y oro. Importante mantener políticas de formalización minera e involucrarlos dentro de este proceso formación.
- c) Fortalecimiento y establecimiento de programas técnicos y tecnológicos en minería y gestión de riesgos en zonas mineras del país. Antioquia, Boyacá, Cundinamarca y Norte de Santander, son los departamentos donde necesariamente se deberán establecer este tipo de instituciones y/o programas de formación.
- d) Se propone a la autoridad minera, que lidere la capacitación en seguridad minera a estudiantes de últimos semestres de ingeniería de minas, ingeniería de minas y metalurgia, con el fin de que estos estudiantes apoyen proyectos mineros que requieran fortalecer o establecer programas de prevención de riesgos.
- e) Se recomienda emplear modelos de regresión más potentes, tales como redes neuronales, con el fin de mejorar el rendimiento de las predicciones obtenidas en el presente artículo.

6. Conclusiones

- a) La situación de seguridad minera en el país resulta alarmante, mientras en el 2019 el índice de fatalidades se situó en 1,5, en países como Perú, Chile y Estados Unidos este valor se ubicó en 0,06, 0,03 y 0,03 respectivamente.
- b) Minerales como el carbón y oro de filón, presentan mayor riesgo y probabilidad de ocurrencia de emergencias y fatalidades mineras subterráneas en Colombia. Por lo tanto, la implementación de estrategias para contrarrestar su ocurrencia deberá focalizarse inicialmente en estos dos minerales.
- c) Antioquia, Boyacá, Cundinamarca y Norte de Santander, por ser productores de carbón y/o oro de filón, requieren una política diferencial en materia de seguridad minera, que permita hacer frente a las emergencias y fatalidades mineras.
- d) Se deberá tener en cuenta el análisis de información estadística (Tipo de minería, mineral, ubicación y/o causa) para desarrollar una política diferencial y no enfrentar el problema de igual manera para todo el sector.
- e) En cuanto al rendimiento de los modelos, no se presenta una diferencia significativa entre cada uno de estos, por lo tanto, no se podría concluir cual se ajusta mejor al fenómeno. Se propone, involucrar más variables explicativas, sobre todo las asociadas a carbón y oro de

filón, con el fin de encontrar un modelo (incluso los utilizados) que se ajuste mejor al fenómeno.

- f) No es suficiente continuar recolectando información, si a partir de esta no se toman acciones que permitan contrarrestar las emergencias y fatalidades mineras presentadas en el país. Es necesario replantear la política de seguridad minera en el país.
- g) No es suficiente actualizar el reglamento de seguridad en labores mineras subterráneas si no se garantiza su aplicación y no se apoya su puesta en marcha. Es necesario generar estrategias que permitan su conocimiento, involucrando la minería ilegal a través de programas de formalización minera.
- h) Las visitas de fiscalización y de seguridad e Higiene Minera, no deberá ser la única estratégica para reducir las estadísticas de emergencias y fatalidades mineras en el país.

Referencias

- [1] Agencia Nacional de Minería-ANM. Estadísticas de emergencias y fatalidades mineras durante los años 2005-2019, acumulado de Agencia Nacional de Minería. [en línea]. 31 de diciembre de 2019. Agencia Nacional de Minería-ANM: Disponible en: https://www.anm.gov.co/?q=emergencias_mineras
- [2] Agencia Nacional de Minería-ANM. Así es nuestra Colombia minera. Obtenido de Agencia Nacional de Minería-ANM. [en línea]. 04 de octubre de 2020. Disponible en: <https://www.anm.gov.co/?q=Asi-es-nuestra-Colombia-minera>
- [3] Unidad de Planeación minero Energética-UPME. Información estadística minera. Unidad de Planeación minero Energética-UPME [en línea]. 04 de octubre de 2020. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/carbon.aspx>
- [4] Unidad de Planeación minero Energética-UPME. Información estadística minera. Unidad de Planeación minero Energética-UPME [en línea]. 04 de octubre de 2020. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/oro.aspx>
- [5] Unidad de Planeación minero Energética-UPME. Resoluciones para liquidación de regalías. Unidad de Planeación minero Energética-UPME. [en línea]. 04 de octubre de 2020. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/simco/PromocionSector/Normatividad/Paginas/Resoluciones-de-Liquidacion-de-regalias.aspx>
- [6] Agencia Nacional de Minería-ANM. Ficha carbón. [en línea]. 04 de octubre de 2020. Disponible en: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ficha_carbon_es.pdf
- [7] Agencia Nacional de Minería-ANM. Lecciones aprendidas. [en línea]. 04 de octubre de 2020. Disponible en: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/leccion_aprendida_derrumbe_socha_boyaca_2020.pdf
- [8] Agencia Nacional de Minería-ANM. (04 de octubre de 2020). Lecciones aprendidas. [en línea]. 04 de octubre de 2020. Disponible en: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/leccion_aprendida_explo_sub_carbon_cucunuba_cundinamarca_2020.pdf
- [9] Gryska, A., Memorias IMRB Colombia. Agencia Nacional de Minería-ANM. [en línea]. 2019. [consultado: septiembre de 2019]. Disponible en: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/1-espanol_vision_cero_alex_gryska_canada.pdf
- [10] Agencia Nacional de Minería-ANM. Marco Normativo fiscalización minera. Obtenido de Agencia Nacional de Minería-ANM. [en línea]. [consultado: 07 de noviembre de 2020]. Disponible en: <https://www.anm.gov.co/?q=marconormativofiscalizacionminera>
- [11] Ministerio de Minas y Energía, Universidad Nacional de Colombia. Webinar: Seguridad, la Prevención: un aspecto fundamental en la actividad minera. [en línea]. [consultado: 26 de noviembre de 2020]. Disponible en: Finance and Sustainability- UNAL <https://www.youtube.com/watch?v=bKykGFGZiU>
- [12] Harrell, F.E.Jr., Regression Modeling Strategies. Springer, USA, 2001

- [13] Michael, M. and Ajith, A.K., A mixed-method investigations of work, government and social factors associated with severe injuries in artisanal and small-scale mining (ASM) operations. 2021. [en línea]. [consultado: 26 de noviembre de 2020]. Disponible en: ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105244>
- [14] Doss, K., Hanshaw, A.S. and Mauro, J.C., Signatures of criticality in mining accidents and recurrent neural network forecasting model. ScienceDirect, 2020. DOI: 10.1016/j.physa.2019.122656
- [15] Kumar, P., Gupta, S. and Raju-Gunda, Y., Estimation of human error rate in underground coal mines through retrospective analysis of mining accident reports and some error reduction strategies. ScienceDirect, 2020. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.104555
- [16] Löw, J. and Nygren, M., Initiatives for increased safety in the Swedish mining industry: studying 30 years of improved accident rates. 2019. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.04.043

Y. Galvis-Ocampo, es Ing. de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente, es estudiante de la Maestría en Ingeniería – Recursos Minerales en la Facultad de Minas, de la Universidad Nacional de Colombia. Hace parte del Grupo de Investigación en Planeamiento Minero GIPLAMIN de la misma institución desde agosto de 2020.

ORCID: 0000-0002-0291-5242

N. Oviedo-Rubiano, es Ing. de Minas y Metalurgia de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Hace parte del grupo de Investigación en Planeamiento Minero GIPLAMIN de la misma institución desde agosto de 2020.

ORCID: 0000-0002-0539-6468

G Franco-Sepúlveda, graduado como Ing. de Minas y Metalurgia en 1998 de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. MSc. en Ciencias Económicas en 2006 y PhD. en Ingeniería en 2017 de la misma universidad. Actualmente profesor en dedicación exclusiva adscrito al Departamento de Materiales y Minerales de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Director del Grupo de Investigación en Planeamiento Minero-GIPLAMIN, grupo Reconocido – Colciencias ORCID: 0000-0003-4579-8389