



Artículo de Investigación

Métodos para la Mitigación Temprana de Impactos por Deslizamientos de Rocas en Corredores Viales, mediante Técnicas de Voladura

Methods for the Early Mitigation of Rockfall Impacts on Road Corridors through Blasting Techniques

John Alexander Leon Castillo¹  , German Vargas Cuervo¹  

¹ Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo

Recibido: 02/04/2025

Aceptado: 08/05/2025

Publicado: 28/05/2025

Palabras clave:

deslizamiento, fragmentación, método, protocolo, voladura

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 04/02/2025

Accepted: 05/08/2025

Published: 05/28/2025

Keywords:

sliding, fragmentation, method, protocol, blasting

INFORMAÇÕES DO ARTIGO

Histórico do artigo:

Recebido: 02/04/2025

Aceito: 08/05/2025

Publicado: 28/05/2025

Palavras-chave:

deslizamento, fragmentação, método, protocolo, detonação

RESUMEN

Los deslizamientos de rocas en corredores viales afectan la movilidad de personas, mercancías y recursos que se desplazan por las diferentes vías, lo que obliga al cierre parcial o total del corredor por largos periodos de tiempo, por lo que el desarrollo de un método para la mitigación temprana de impactos por deslizamientos de rocas en corredores viales, mediante técnicas de voladura, contribuye en dar una solución a la problemática de la movilidad, dando respuesta rápida, ya que dada la ubicación del territorio colombiano el mantener del flujo vial es estratégico en los procesos socioeconómicos del país. Desde la perspectiva técnica relacionada a los explosivos y agentes de voladura, el aprovechar propiedades usadas en labores de minería como su capacidad energética y generación de gases en fracturamiento de roca y desplazamiento de grandes volúmenes de material, permite dar otra perspectiva en el aprovechamiento de sus propiedades en la atención de eventos que afecten la infraestructura vial, donde se analizaron 40 casos de voladura de tipo secundaria (Air cushion pop blasting), desarrolladas en los departamentos del Tolima, Caquetá, Meta y Antioquia, cuyo análisis de variables relacionadas al material, entorno y agente explosivo, dan como resultado la validación de un método, con el que se propone un protocolo para el uso de agentes explosivos en procesos de atención a deslizamientos por caída de rocas en corredores viales.

ABSTRACT

Rockslides in road corridors affect the mobility of people, goods and resources that move along the different roads, which forces the partial or total closure of the corridor for long periods of time, so the development of a method for the early mitigation of impacts from rock slides in road corridors, through blasting techniques, contributes to providing a solution to the problem of mobility, providing a rapid response, since given the location of the Colombian territory, maintaining road flow is strategic in the socioeconomic processes of the country. From the technical perspective related to explosives and blasting agents, taking advantage of properties used in mining works such as their energy capacity and gas generation in rock fracturing and movement of large volumes of material, allows to give another perspective in the use of their properties in the attention of events that affect the road infrastructure, where 40 cases of secondary blasting (Air cushion pop blasting) were analyzed, developed in the departments of Tolima, Caquetá, Meta and Antioquia, whose analysis of variables related to the material, environment and explosive agent, result in the validation of a method, with which a protocol is proposed for the use of explosive agents in response processes to gradual rockfall events in road corridors.

RESUMO

Os deslizamentos de rochas em corredores viários afetam a mobilidade de pessoas, mercadorias e recursos que se deslocam pelas diversas vias, o que obriga ao fechamento parcial ou total do corredor por longos períodos de tempo. Nesse sentido, o desenvolvimento de um método para a mitigação precoce de impactos por deslizamentos de rochas em corredores viários, por meio de técnicas de detonação, contribui para oferecer uma solução à problemática da mobilidade, proporcionando uma resposta rápida. Dada a localização geográfica do território colombiano, manter o fluxo viário é estratégico para os processos socioeconômicos do país. Sob a perspectiva técnica relacionada aos explosivos e agentes de detonação, o aproveitamento de propriedades utilizadas em atividades de mineração – como a capacidade energética e a geração de gases para o fraturamento da rocha e o deslocamento de grandes volumes de material – permite uma nova abordagem no uso dessas propriedades na resposta a eventos que afetam a infraestrutura viária. Foram analisados 40 casos de detonações secundárias (do tipo Air Cushion Pop Blasting), realizadas nos departamentos de Tolima, Caquetá, Meta e Antioquia. A análise das variáveis relacionadas ao material, ao ambiente e ao agente explosivo resultou na validação de um método, a partir do qual se propõe um protocolo para o uso de agentes explosivos em processos de resposta a deslizamentos por queda de rochas em corredores viários.

Cómo citar

Leon Castillo, J. A., & Vargas Cuervo, G. (2025). Métodos para la Mitigación Temprana de Impactos por Deslizamientos de Rocas en Corredores Viales, mediante Técnicas de Voladura. *SAGA: Revista Científica Multidisciplinar*, 2(2), 614-631. <https://doi.org/10.63415/saga.v2i2.109>



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons de Atribución No Comercial 4.0

INTRODUCCIÓN

Los métodos tradicionales de despeje vial, desarrollados con maquinaria amarilla presentan amplias desventajas, dados los altos costos, logística, disponibilidad de maquinaria y equipos, altos requerimientos de tiempo y personal; lo que hace que la propuesta por medio de este insumo presente grandes ventajas respecto al proceso de despeje tradicional. Las técnicas de voladura y propiedades de los agentes de voladura y explosivos que permiten desarrollar procesos de fragmentación de material con altos niveles de seguridad, rápidos y efectivos, aplicables en procesos de despeje vial en caída de rocas, técnica que, por desconocimiento de sus

ventajas y forma de aplicación, aspectos técnicos y científicos, no es de uso común en mantenimiento vial.

Ante esta problemática, la investigación consistió en el análisis de resultados de diferentes procesos de voladura de tipo secundario, comparando características del material deslizado y propiedades del terreno, como geomorfología, geología y estructuras, características del talud, las que a partir del control la velocidad de la onda explosiva, mediante funciones físico-matemáticas, permiten predecir de manera realista el comportamiento y respuesta del bloque de roca.



Imagen 1. Muestra procesos de caída de rocas: (a) Bloque sobre la vía Barichara – Guane (Santander). (b) Bloque sobre la vía Susacon – Soata (Boyacá). (c) Bloque sobre la vía Bogotá Villavicencio. (d) Bloque sobre la vía Medellín Bogotá.

El desarrollo del método busca solución a problemáticas de movilidad generados por deslizamientos de rocas en corredores viales, aprovechando las características intrínsecas a nivel fisicoquímico de los agentes de voladura y/o explosivos convencionales, los que presentan propiedades que los diferencian y caracterizan, las que pueden ser aprovechadas para fragmentar los bloques de roca y responder de manera eficiente a la problemática, desde las descripciones y pruebas realizadas para el contexto minero por autores como: Ashby (1977), Lilly (1986), Wong, Pang (1992), López Jimeno (2017 y 2003), García Bermúdez (2003), Leon (2020), entre otros.

La metodología hace énfasis en la evaluación y análisis del componente geológico, estructural, edafología y la vegetación, para definir zonas que presenten materiales con comportamientos geomecánicos similares y que permitan la agrupación en zonas homogéneas para el desarrollo de fragmentación del bloque de roca

por medio de la manipulación de las características fisicoquímico del agente de voladura y/o explosivo.

METODOLOGÍA

El método implementado, busca la representación de áreas individuales o del conjunto de estas, cuando presentan rasgos similares, en relación al comportamiento y respuesta de la litología, a fin de desarrollar la fragmentación, estimando parámetros a partir de las características de los materiales y las variables controlables del explosivo. La metodología hace énfasis en la evaluación y análisis de las características geológicas, estructurales, edafológicas y vegetación, relacionando materiales que presenten comportamientos geomecánicos similares, permitiendo agrupar zonas de acuerdo a las condiciones de deflagración del explosivo. El desarrollo del levantamiento, procesamiento y análisis de la información, en el desarrollo de la investigación, se dividió en cinco etapas:

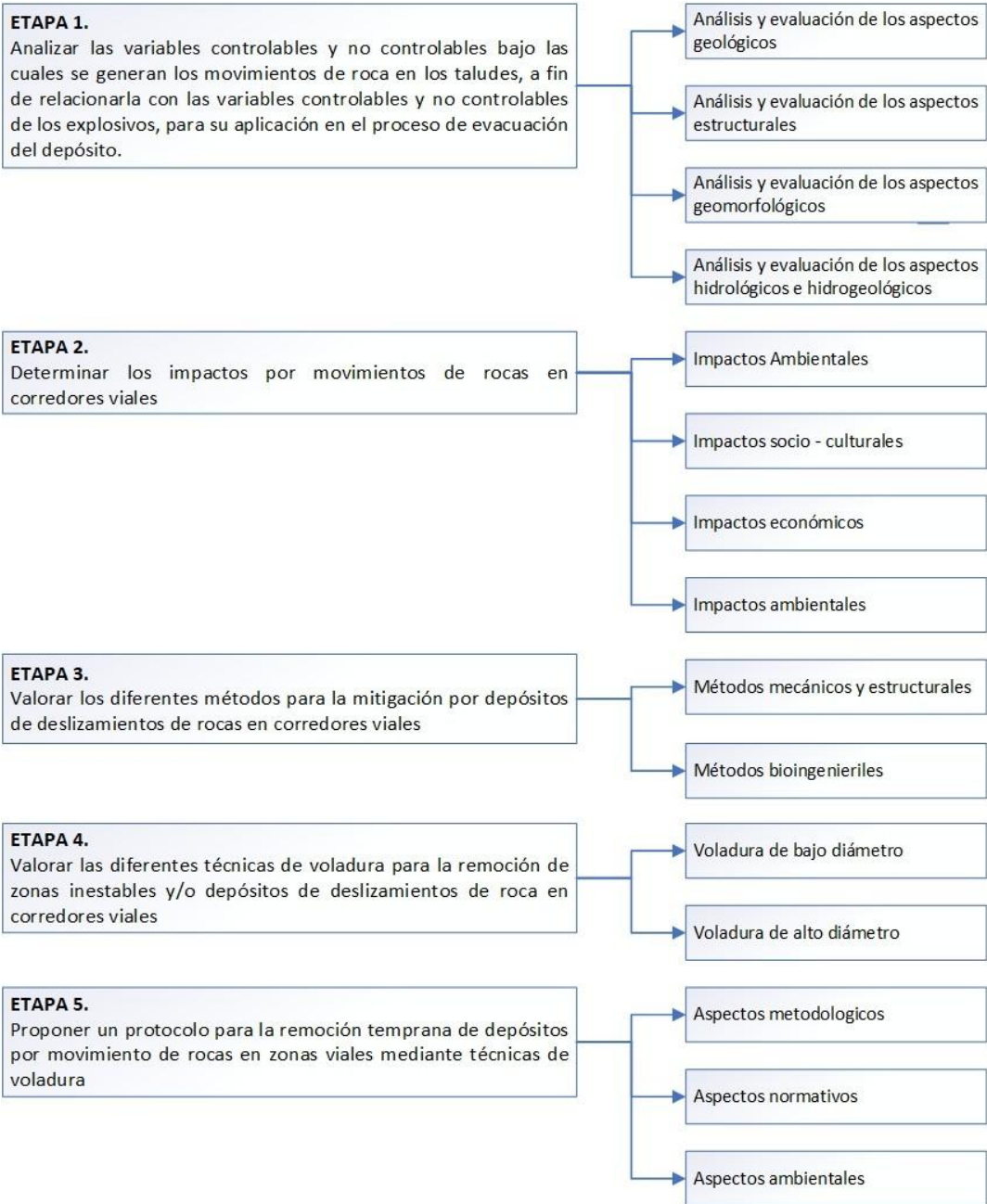


Diagrama 1. Etapas propuestas en el desarrollo de la investigación “Métodos para la mitigación temprana de impactos por deslizamientos de rocas en corredores viales, mediante técnicas de voladura”

En el proceso de verificación y validación del método se incorporan datos de variables del material, entorno y agente de voladura y/o explosivo, a fin de analizar el comportamiento de estos, en diferentes materiales geológicos donde el factor común la resistencia a la compresión, valor cuya correlación permite el cálculo de la carga requerida para el fracturamiento del bloque, en el proceso de fragmentación, desplazamiento, remoción y evacuación de materiales en vías afectadas, el método se validó con el análisis de 40 casos de

voladura, desarrollados en diferentes partes del país.

Posteriormente, se realizó el análisis de escenarios y registro de datos de las voladuras, realizadas, las que sirvieron de insumo en la validación de la propuesta de protocolo denominado “Métodos para la mitigación temprana de impactos por deslizamientos de rocas en corredores viales, mediante técnicas de voladura”

Finalmente, se hace revisión de manuales y la normatividad vigente fijada por el

Ministerio de Defensa, referente a las normas, reglamentos, disposiciones, directrices y recomendaciones establecidas para el trámite del permiso, referentes a adquisición de material explosivo, transporte, almacenamiento, uso permitido, manipulación, manejo de excedentes, seguridad industrial, salud e higiene ocupacional y la disposición final de este insumo a fin de realizar la propuesta de protocolo.

RESULTADOS

Los resultados de la investigación incorporan datos del desarrollo de 40 casos de voladura, que hacen parte del registro de información correspondiente a procesos de atención prioritaria, realizado por el Ejército Nacional de Colombia, entre los años 2017 a 2023, para dar solución a diferentes problemáticas como:

- Problemas de movilidad en vías de tipo secundario y terciario, a causa de deslizamiento de rocas.
- Obstrucción de cuces en río, para el abastecimiento y suministro de agua a planta de abastecimiento y potabilización domiciliaria, a causa caída de rocas en el lecho del río.
- Obstrucción en excavación de zanjas para emplazamiento de tubería en procesos de ampliación de la red de alcantarillado municipal.

El aprovechamiento de las propiedades fisicoquímicas de los explosivos y agentes explosivos, se asocia a la exploración y explotación minera y de hidrocarburos, estas características técnicas presentan utilidad práctica en la búsqueda de soluciones en contextos diferentes, donde sea requerido el potencial fragmentador del explosivo, permitiendo apreciar el uso potencial de esta técnica en nuevos contextos y campos, donde se obtuvo como resultado:

Las voladuras son sistemas en que el explosivo actúa y la roca reacciona, donde el desarrollo de fracturación se debe a la interacción entre la energía de tensión y la energía de burbuja, donde las propiedades y resistencia de la roca determinan la fragmentación, destacando que las rocas con

mayor densidad requieren una mayor cantidad de explosivo para desarrollar la fragmentación.

En los casos de voladura realizados, se aplicó voladura de tipo secundaria, catalogada como cachorro amortiguado (Air cushion pop blasting), este tipo de voladura proporciona un control total en el número de fragmentos y la dirección de proyección. Consiste en el desarrollo de perforaciones a 2/3 o 3/4 del espesor del bloque de roca, se introduce la carga explosiva, la que se encuentra calculada entre 50 a 60 g/m³ y se tapona con arcilla, la carga se ubica en el barreno centrada de modo que amortigüe con el aire, se tapona con arcilla, dada su adhesión, se fija la arcilla en la boca de la perforación asegurando la permanencia del colchón de aire, el tapón de arcilla proporciona un ligero retraso en los tiempos de presurización de la explosión y el instante de eyección del tapón, permitiendo la regulación y generando el efecto fragmentador.

Para bloques de roca con volumen aproximado a 1 m³ el taco mínimo debería ser de aproximadamente 30 cm (12”), ya que, si es menor, la carga podrá soplar limitando su efecto rompedor. Según la experiencia práctica con diferentes materiales, se podrá regular el grado de fragmentación, teniendo en cuenta que: a menor longitud de taco aumenta el colchón de aire en el área de perforación, fragmentando el bloque rocoso en pocas piezas grandes y, por el contrario, si se incrementa su longitud, crece el confinamiento de la carga explosiva, fragmentando en múltiples fragmentos pequeños y se generan proyecciones.

En el desarrollo de operaciones de voladura en lugares con alta probabilidad de accidente a la población y/o deterioro, como calles, dentro de zonas urbanas, los bloques de roca a intervenir deben ser cubiertos con malla de voladura (Blasting mat), la que debe contar con el grosor y peso suficiente para mitigar el impacto generado por el escape de gas a alta velocidad producto de la detonación del explosivo en la actividad de fragmentación.

El uso de agentes de voladura y/o explosivos, en el despeje y apertura de corredores viales al ser un proceso poco explorado en el país, ofrece múltiples

oportunidades al sector público y privado, dados los beneficios, brinda una oportunidad en diferentes campos, a nivel técnico, ingenieril, económico y social, lo que deben ser debidamente analizado desde el comportamiento de la sustancia explosiva en procesos de despeje a obstrucciones en corredores viales, demostrando que cuando el material está asociado a rocas consolidadas, la eficiencia de la fragmentación es alta, esta característica brinda múltiples beneficios desde la perspectiva ingenieril, en relación costo – beneficio, dado el bajo costo del explosivo y su capacidad de fragmentación y de remover grandes volúmenes de roca, la facilidad operativa, las condiciones de seguridad en su manejo y manipulación, condiciones de eficiencia y rapidez en el trabajo realizado, condiciones de seguridad, hacen que este insumo presente grandes ventajas respecto a los procesos de despeje tradicionalmente implementados y desarrollados con maquinaria amarilla.

Debido a ubicación geográfica el territorio colombiano, presenta un clima tropical, isotérmico y variado, con una diversidad climática debida a condiciones de ubicación, altitud, relieve, vientos, precipitaciones y humedad. De forma general prevalecen dos temporadas, secas (de diciembre a enero y de julio a agosto) y temporadas de lluvias (de abril a mayo y de octubre a noviembre). Las épocas secas y de lluvias puede variar según la región. Esta diversidad climática trae como consecuencia se desarrollen diversos fenómenos a nivel de estabilidad del terreno y constante deterioro de la malla vial, resultado de estas condiciones se ha dificultado el desarrollo y fortalecimiento del sistema de transporte vial terrestre, sin embargo, con la ayuda de técnicas de voladura adecuadas y uso pertinente de agentes de voladura y explosivos, se ha hecho grandes avances en los procesos de despeje en las vías colombianas, donde para lograr el óptimo rendimiento de las cargas

explosivas, se requiere el desarrollo de un análisis geológico rápido de las características de resistencia de la roca y características estructurales, las que al ser relacionadas con características del agente de voladura y/o explosivo como la velocidad de la onda generada por la detonación, se obtiene el poder de fragmentación, permitiendo diseñar cargas acorde a las características propias de cada material, lo que se traduce en el desarrollo de procesos rápidos para el acople de cargas, fracturamiento de bloques de roca en procesos de despeje vial, permitiendo controlar vibraciones ruido y proyecciones.

Es recurrente que múltiples zonas de corredores viales del territorio nacional presenten reporte de cierre vial durante los periodos de alta precipitación, los que se encuentran asociados a las zonas montañosas, vías que durante cada periodo invernal presentan problemas de inestabilidad, reuniendo en un mismo lugar características litológicas, topográficas y condiciones climáticas, entre otras que con el aumento de las lluvias genera condiciones adecuadas para la detonación de deslizamientos y propicia cierres viales de tipo temporal y/o permanentes.

En Colombia el Servicio Geológico Colombiano – SGC, ha identificado múltiples zonas con procesos de inestabilidad activos, reportando para el año 2020, un total de 6826 áreas con afectación por movimientos en masa

Según el Instituto Nacional de Vías – INVIAS, a cargo de la asignación, regulación y supervisión de los contratos para la construcción de autopistas y carreteras y el mantenimiento de las vías nacionales, en el territorio nacional hay 41 puntos de atención prioritaria, los que durante décadas se han caracterizado por presentar cierre vial durante las temporadas de lluvia, asociado a problemas de inestabilidad.

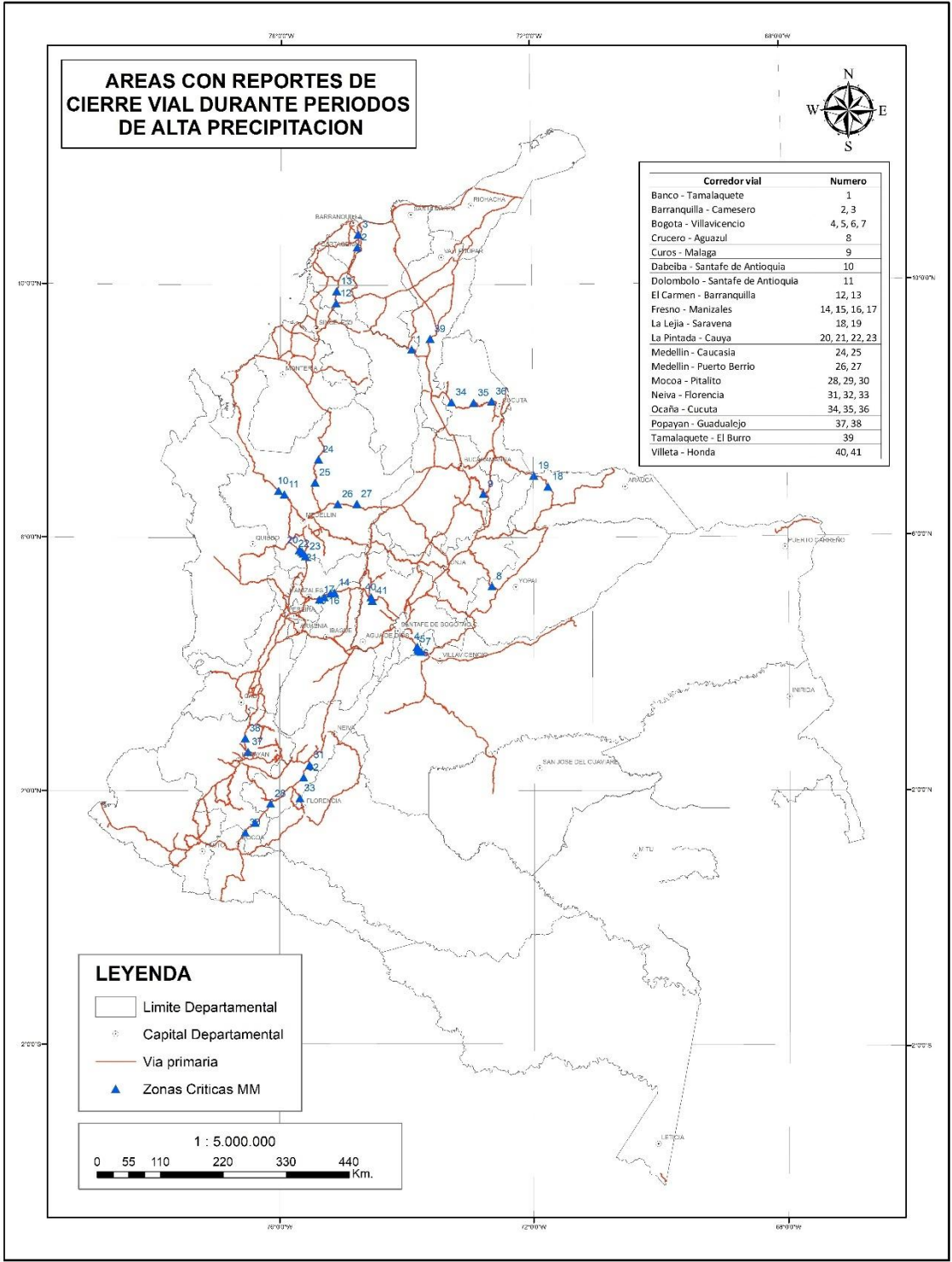


Imagen 2. Zonas con reporte de cierre vial durante periodos de lluvia.

Fuente: INVIAS 2022. Elaborado: autores 2025.

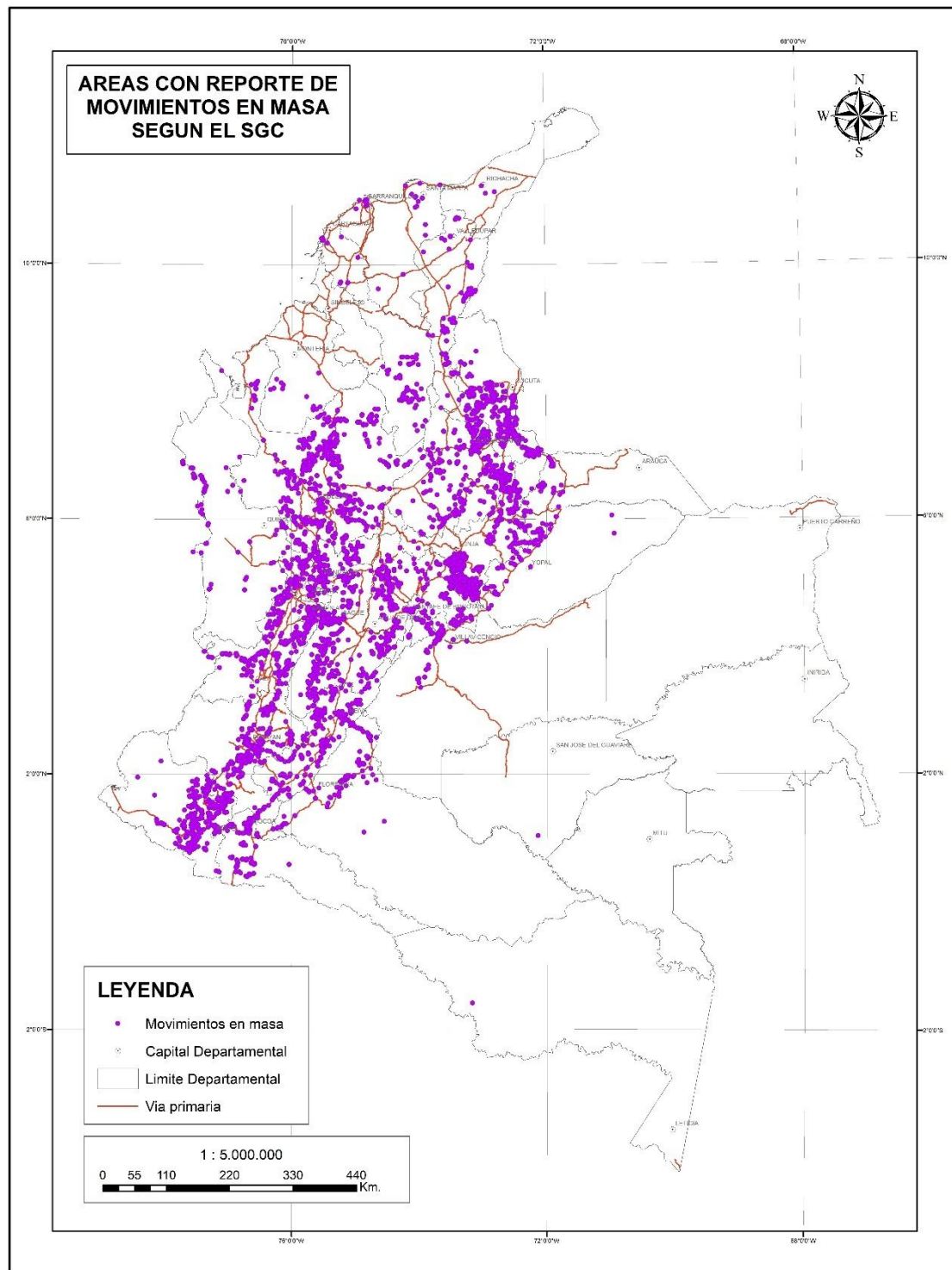


Imagen 3. Zonas identificadas con procesos de inestabilidad según el SGC a 2020

Fuente: Servicio Geológico Colombiano – SGC 2020. Elaborado: autores 2025

El Servicio Geológico Colombiano – SGC, para el año 2020, ha identificado un total de 539 áreas afectadas con procesos activos de caída de rocas, este proceso afecta corredores

viales pertenecientes a la red primaria, secundaria y terciaria del país, este proceso es el objeto de estudio de esta investigación.

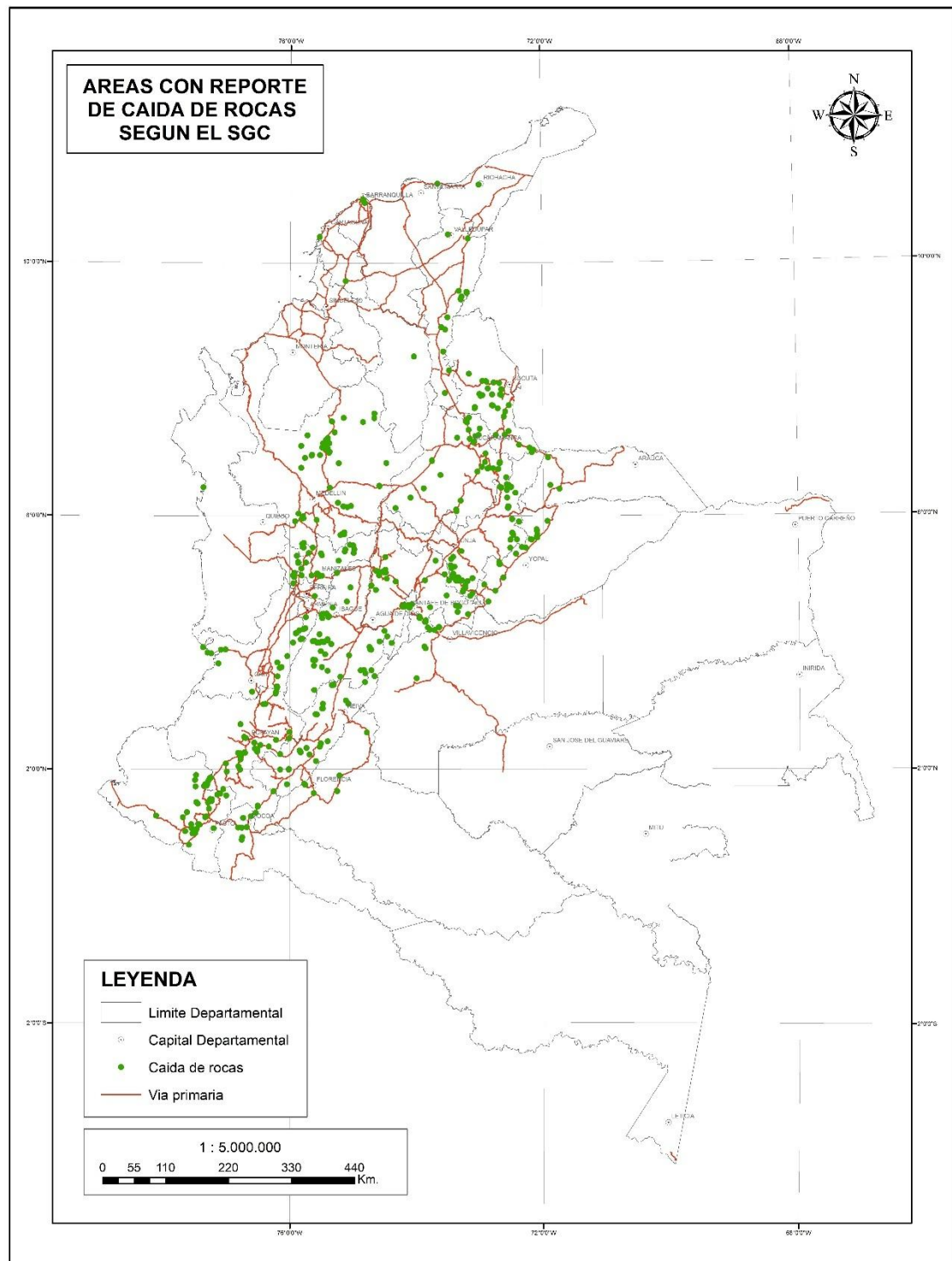


Imagen 4. Zonas identificadas con procesos de caída de rocas según el SGC a 2022

Fuente: Servicio Geológico Colombiano – SGC 2022. Elaborado: autores 2025

En el desarrollo del registro de datos y el proceso de validación del método, se realizó un total de 40 voladuras, en los departamentos del

Tolima, Caquetá, Meta y Antioquia, entre los años 2017 a 2023.

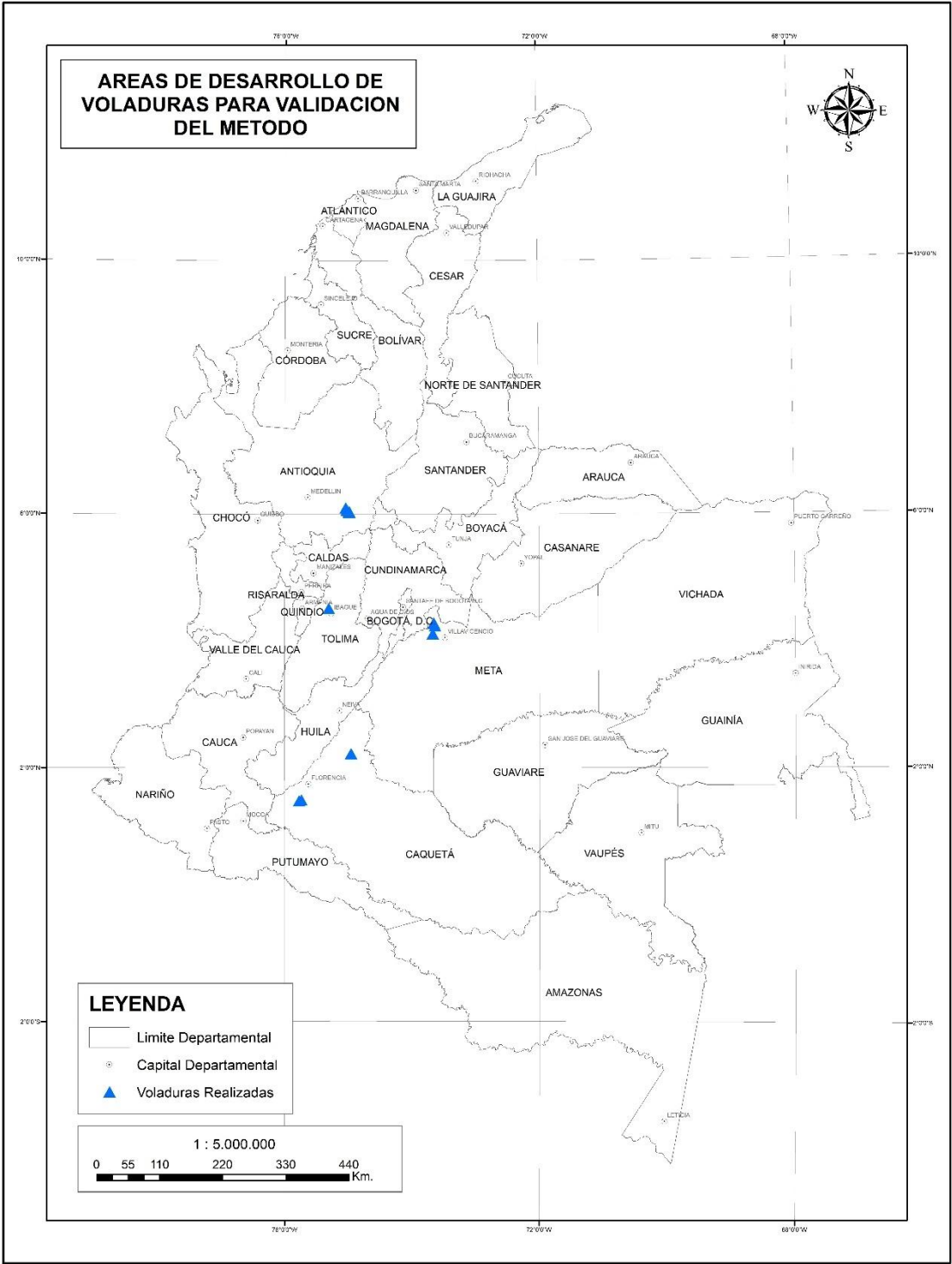


Imagen 5. Ubicación de voladuras en zonas de procesos de caída de rocas realizadas entre 2021 a 2023.

Fuente: autores 2025. Elaborado: autores 2025

El desarrollo de estos procesos de voladura de fragmentación de bloques, estuvo asociado a técnicas de evaluación de las condiciones de estabilidad de la zona afectada y alrededores del área a intervenir, donde se valoraron las características y propiedades litológicas y estructurales requeridas para correlacionar con

el agente de voladura y/o explosivo, posteriormente se realiza la perforación determinada por las características litológicas y tamaño del bloque, se realiza las labores complementarias al proceso de fragmentación del bloque.



Imagen 6. Muestra el proceso seguido en la fragmentación de bloques de rocas, en corredores viales. (a) Presencia de 3 bloques de roca que obstruyen vía que comunica la ciudad de Ibagué con los municipios de Combeima y Villa Restrepo (Tolima). (b) Proceso de perforación de barreno en bloques de roca. (c) Proceso de carga y tacado de explosivo en bloque. (d) Línea de tiro para ejecución de la detonación de fragmentación. (e) Momento de la detonación para fragmentar el 1er bloque de roca. (f) Resultado de la detonación para la fragmentación del 1er bloque de roca

La primera zona de evaluación corresponde a las voladuras desarrolladas en el departamento de Antioquia, el municipio de San Luis, donde a causa de las fuertes lluvias, presentadas entre el 17 al 21 de marzo de 2022, se generaron deslizamientos de bloques de roca en cinco (5) tramos de la vía, las que causaron el bloqueo y cierre de la vía, dejando incomunicado el municipio de San Luis y el municipio de Marinilla, generando interrupción a la comunicación con la ciudad de Medellín, capital del departamento de

Antioquia, donde los bloques inspeccionados corresponde a roca Ígnea, clasificada como una Tonalita, clasificación establecida a partir muestra de mano e inspección visual del bloque, con un peso específico de 2,7 (t/m³) y una resistencia a la compresión de 300 Mpa., en este mismo municipio se requirió de uso de explosivo en las obras asociadas a la ampliación del sistema de alcantarillado rural, al encontrarse durante el proceso de excavación de las zanjas para el emplazamiento de la tubería, correspondiente

al sistema de Alcantarillado para el manejo y disposición de aguas residuales del casco urbano del municipio, la obra se ve detenida y afectada, dado que el trazado se ve interrumpido por la presencia de grandes bloques de roca, en las zanjas, lo que

imposibilita, el avance de las obras y la ubicación respectiva de la tubería, ante la imposibilidad de extracción de los bloques de roca por medio de maquinaria amarilla, es necesario el proceso de fragmentación, el que se realiza por medio de explosivo tipo ANFO.



Imagen 7. Ubicación de voladuras en el departamento de Antioquia.

La segunda zona de evaluación de voladura, corresponde al departamento del Tolima, donde un deslizamiento de rocas ubicó 3 bloques sobre la vía que comunica la ciudad de Ibagué con los municipios de Combeima y Villa Restrepo (Tolima), sobre el kilómetro 9, obstruyendo la vía durante 5 días, dejando incomunicado el sector del Cañón del río Combeima, una importante zona turística del departamento, este caso se presentó en víspera de la celebración de las fiestas de San Pedro y San Pablo, donde fue necesaria la intervención

por medio de voladura de corte y fragmentación para dar solución a esta problemática en la movilidad para la temporada de vacaciones de mitad de año de 2023, donde los bloques inspeccionados corresponden a roca Ígneas, clasificados como bloques de Esquisto, clasificación establecida a partir muestra de mano e inspección visual del bloque, con un peso específico de 2,7 (t/m³) y una resistencia a la compresión de 210 Mpa., el proceso de fragmentación, se realizó por medio de explosivo tipo ANFO.



Imagen 8. Ubicación de voladuras en el departamento del Tolima.

La tercera zona de validación corresponde a voladuras realizadas en el departamento del Meta, en donde se realizaron un total de 29 voladura, ubicadas en la vereda la Argentina (Meta) y en las cercanías de la ciudad de Villavicencio capital del departamento del Meta, en donde la temporada invernal correspondiente al primer semestre de 2022, durante el mes de abril, se generó una avalancha de lodo, junto con caídas y deslizamiento de rocas; estos materiales dejaron completamente afectada, sepultando en diferentes sectores de la zona de piedemonte sobre la quebrada Caño Grande, estructuras de la Planta de Potabilización Caño Grande - E.A.A.V. ESP, plantas de tratamiento de agua potable, que surte de este líquido, la ciudad de Villavicencio, dónde los bloques de roca que se desprendieron afectaron varios puntos de

captación, taponado y obstruyendo las rejillas y rejillas de la bocatoma de la planta en mención. Los bloques inspeccionados, que afectaron la Planta de Potabilización, en la quebrada Caño Grande, corresponden a rocas sedimentarias, clasificados a partir muestra de mano e inspección visual como 8 bloques de Arenisca, con un peso específico de 2,5 (t/m³) y una resistencia a la compresión de 220 Mpa.; 9 bloques de Arenisca Calcárea, con un peso específico de 2,6 (t/m³) y una resistencia a la compresión de 200 Mpa.; 4 bloques de Caliza, con un peso específico de 2,7 (t/m³) y una resistencia a la compresión de 190 Mpa, y 7 bloques de Cuarzo arenita, con un peso específico de 2,5 (t/m³) y una resistencia a la compresión de 240 Mpa., el proceso de fragmentación se realizó por medio de explosivo tipo ANFO.

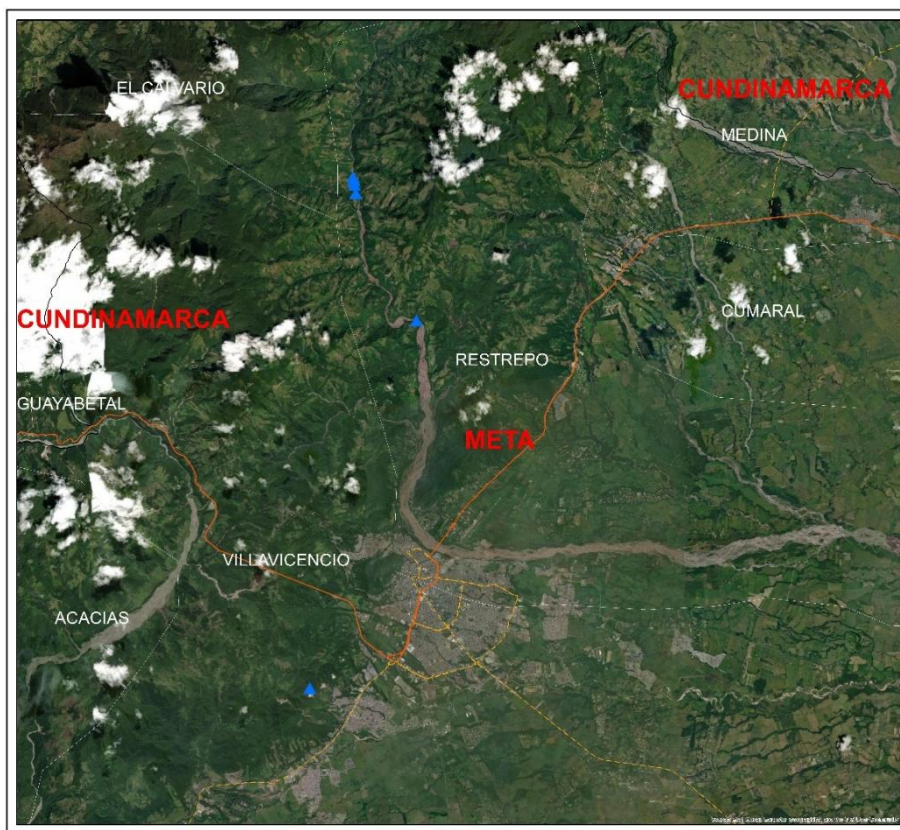


Imagen 9. Ubicación de voladuras en el departamento del Meta.

La cuarta zona de validación de voladura, corresponde al departamento del Caquetá, donde se realizaron 4 voladuras, en el municipio de San Vicente del Caguán, sobre una vía de carácter terciario, la que comunica el municipio de San Vicente del Caguán con la vereda de Bélgica, la vereda Buenos Aires, la vereda La Danta, la vereda La Barriosa, la vereda La Cabaña, la vereda La Media, la vereda Nuevo Horizonte, la vereda La Granada, la vereda Las Lajas y la vereda La Quiebra, vía sobre la cual cayeron dos bloques de roca, correspondientes a rocas Metamórficas, clasificados a partir muestra de mano e inspección visual como bloques de Cuarzita, con un peso específico de 2,7 (t/m³) y una resistencia a la compresión de 180 Mpa., el proceso de fragmentación se realizó por medio de explosivo tipo ANFO.

En este departamento se desarrolló otro caso de voladura en el municipio de Florencia, en la variante Troncal del Hacha específicamente en el kilómetro 4 de la vereda Caldas, ubicada en el municipio de Florencia – Caquetá, esta vía de carácter terciario, es una de las más importantes para el municipio, ya

que rodea el perímetro del casco urbano de Florencia y es la vía que comunica con todos los municipios del departamento y es utilizada para el tránsito de vehículos livianos y pesados, así como para el transporte de mercancías y productos agrícolas de los municipios del sur del Caquetá. La vía se vio afectada debido a la fuerte temporada invernal que afectó la zona durante el primer periodo del año en donde a mediados del mes de marzo de 2022, se la cual generó un desprendimiento de suelos y en donde dos grandes bloques de roca rodaron hacia la vía y la obstruyeron, generando afectaciones a la movilidad e imposibilitaron el tránsito de insumos y la comunicación por vía terrestre con los municipios del sur del Caquetá con la capital departamental Florencia y desde acá con los municipios del interior del país, por un periodo de casi tres (3) meses, los bloques de roca, correspondientes a rocas Sedimentaria, clasificados a partir muestra de mano e inspección visual como bloques de Arenisca, con un peso específico de 2,5 (t/m³) y una resistencia a la compresión de 195 Mpa., el proceso de fragmentación se realizó por medio de explosivo tipo ANFO.

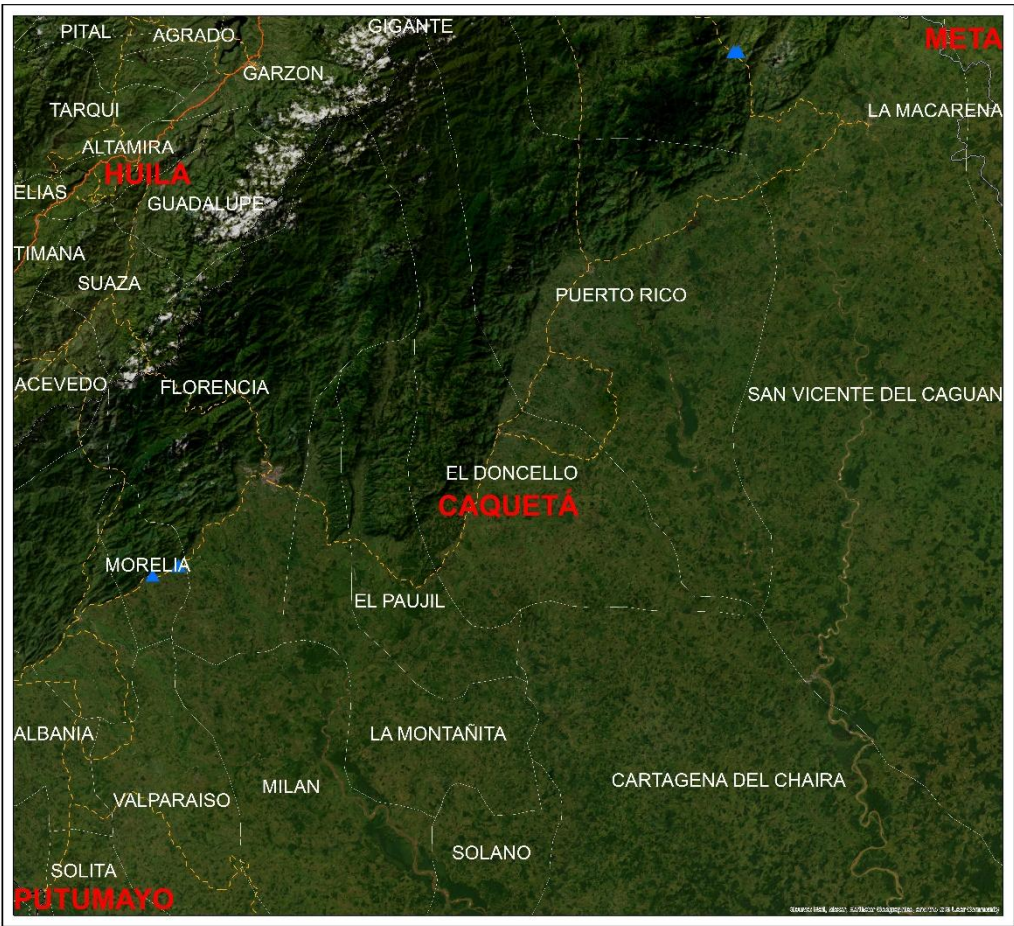


Imagen 10. Ubicación de voladuras en el departamento del Caquetá.

La Tabla 1. Departamentos y municipios de desarrollo de voladuras, muestra cuantas voladuras fueron realizadas en cada departamento, así como el tipo de roca, clasificación de la misma y numero de bloques fragmentados.

Tabla 1
Distribución de Bloques Fragmentados por Tipo y Clasificación de Roca en Diferentes Departamentos y Municipios

Departamento	Municipio	Tipo de roca	Clasificación de la Roca	# de Bloques fragmentados
Tolima	Ibagué	Ígnea	Esquisto	3
Caquetá	San Vicente del Caguán	Metamórfica	Cuarcita	2
Caquetá	Florencia	Sedimentaria	Arenisca	2
Meta	Villavicencio	Sedimentaria	Arenisca	8
Meta	Villavicencio	Sedimentaria	Arenisca calcárea	9
Meta	Villavicencio	Sedimentaria	Cuarzoarenitas	7
Meta	Villavicencio	Sedimentaria	Calizas	5
Antioquia	San Luis	Ígnea	Tonalita	5

Fuente: Autores (2025)

El desarrollo de las voladuras permitió comprobar que la identificación y control total de las variables controlables que intervienen en el proceso como: agente explosivo, diámetro de la perforación, dimensión de la carga, nivel

de confinamiento, permite obtener los resultados deseados en la fragmentación, destacando que el barreno y su diámetro, determinan los niveles de ruido y vibraciones, además influye en el grado de fragmentación

deseado, se resalta que la selección y ubicación de la perforación es la decisión más importante en voladura secundaria, dado que la mala ubicación de la perforación podría generar: (a) que no se desarrolle un corte sino que se fragmente y que la roca al ser detonada pueda ser expulsada a grandes distancias, generando rocas voladoras (Fly Rock), (b) que se generen producto de la detonación altos niveles de golpe de aire, (c) una fragmentación que genera gran cantidad de material fino y altos niveles de ruido, (d) soplado del barreno generando la pérdida de energía por la boca del barreno, (e) un golpe de aire alto que genera niveles de ruido altos, (f) pérdida del control de la energía de detonación del explosivo formando cráteres por la liberación de energía desde el barreno, que se generan en la parte superior, lo que trae como consecuencia altos niveles de vibración.

Con el fin de evitar estos inconvenientes en el desarrollo de voladuras de fragmentación, además de los cálculos asociados al barreno, este debe ser taponado únicamente con arcilla, otros materiales como arena o detritos generan la fuga parcial de gases o generando procesos de succión rápida del barreno seguida de una sobre presión que producirá la proyección de fragmentos, con altos niveles de ruido y vibraciones.

En todos los casos de voladura, cómo primer criterio de análisis se determina el tamaño medio del bloque, resultado de esta evaluación se establece que tipo de la voladura se implementara, en el caso de las voladuras de fragmentación tipo plasteo normalmente las cargas se encuentra cargadas entre 0.3 a 0.6 Kg de explosivo por metro cúbico de roca, lo que guarda relación con la función de la capa protectora, que genera el confinamiento del gas, optimando la fragmentación, además, en la voladura de cachorro se evidencia que al realizar perforaciones de pequeño diámetro, usualmente de 20 mm a 50 mm (7/8" a 2" de diámetro), en el centro de gravedad del bloque, los que se perforan a una profundidad de 1/2 a 2/3 de su espesor y son disparados con cargas pequeñas de explosivo, se genera un plano de corte y fractura adecuado.

En consecuencia, a la baja cantidad en los requerimientos de explosivo necesario en las

voladuras de tipo secundario, la precisión de los resultados del corte o la fragmentación, recae en una correcta relación de las propiedades y factores intrínsecos a la roca, con un análisis de las variables del explosivo, donde resulta fundamental que el cálculo incorpore la evaluación la densidad del agente de voladura y/o explosivo, la velocidad de detonación y la presión de detonación a fin de evitar impactos y efectos adversos a la voladura.

Como resultado del análisis de vibraciones aplicado a cargas explosivas durante el proceso de fragmentación de bloques, en diferentes materiales de origen ígneo (Esquistos y Tonalitas), metamórfico (Cuarcita) y sedimentario (Arenisca, Arenisca calcárea, Cuarzoarenitas y Calizas), se logra evidenciar que no se presentó registro de ningún tipo de vibración en el campo lejano, donde el control de vibraciones generadas se realizó por medio del cálculo de las relaciones de las características del bloque vs las características del agente de voladura y/o explosivo, implementado para su verificación durante la fase operativa el test de la moneda, el que consistió en ubicar una moneda posición de canto en cada esquina de la estructura de interés (una moneda en posición de canto, es un método visual con el que se demuestra la presencia o ausencia de vibraciones dentro un área de interés a analizar por potenciales efectos pots - voladura, si la moneda permanece en su posición posteriormente a la detonación del explosivo se establece de forma general que no se produjeron vibraciones en el área de interés, en el caso de que la moneda caiga posteriormente al desarrollo de la detonación se establece que se generaron vibraciones en el área de interés) y por medio del registro y medición de vibraciones con el acelerómetro de dispositivo móvil, los que se ubicaron sobre la línea de control respecto a la ubicación y detonación de la carga.

El desarrollo y aplicación de técnicas de voladuras para fragmentación de bloques, en los procesos de despeje y remoción de material de caída de rocas, demostró ser la opción más rápida para procesos de remoción de materiales, dada la capacidad de trabajo del explosivo; rentabilidad dado los bajos costos

del explosivo respecto al costo de las operaciones con maquinaria amarilla, la que implican una mayor temporalidad y costos más altos; sostenibilidad dadas sus características fisicoquímicas este no genera efectos adversos a los recursos suelo, agua o aire, donde el desarrollo de voladuras con agente explosivos permite realizar los trabajos con altos estándares de seguridad adecuados, dada la diversidad de agentes de voladura y/o explosivos en el mercado, que cuentan con propiedades y características particulares permitiendo mantener altos niveles de seguridad tanto en la zona de voladura como en el entorno.

Los procesos de movimiento en masa, generan múltiples impactos, los que no solo afectan el área donde se genera el fenómeno, sino que sus impactos pueden extenderse a zonas con las que no tienen contacto, dada la red de comercio que existe entre los municipios, los que se interconectan por la red vial, donde un evento tiene consecuencias no solo en la movilidad sino de tipo ambiental, social y económica, donde su incidencia en las comunidades y la sociedad en general, se ven reflejada en el aumento de costo en bienes y servicios, el uso técnico de agentes de voladura y/o explosivos, enfocado a dar solución a problemas de obstrucción de infraestructura vial en Colombia, en particular el manejo de bloques de roca producto de caídas o deslizamientos, con el desarrollo y ejecución de los diferentes casos de voladura se demostró que el uso de este insumo permite dar otra solución técnicamente viable a los problemas de movilidad de forma rápida eficaz y ambientalmente poco impactante.

El territorio colombiano dadas sus características climatológicas y topográficas, dificulta la estabilidad y permanencia del sistema vial terrestre en total funcionamiento, donde los deslizamientos son el principal causante de cierres viales, sin embargo, el uso de agentes de voladura y/o explosivos permite dar solución a esta problemática en las vías colombianas, dada su efectividad, precio asequible, facilidad operativa, seguridad en el manejo y manipulación, representa la mayor ventaja para operaciones rápidas de despeje vial en casos de bloqueo vial por bloques de

rocas, en donde los casos de aplicación demostraron que contar con este insumo facilitó el trabajo de corte y fragmentación de bloques de gran tamaño y permitió acortar los tiempos en la ejecución de obras de despeje, incluso en más del 90% respecto al uso de técnicas tradicionales como maquinaria amarilla y procesos manuales.

El principal resultado de la revisión de la normatividad es la notable falta de normas específicas, que rijan las actividades asociadas al uso de explosivos, donde de manera generalizada se toman criterios de expertos, la aplicación de guías desarrolladas por las industrias fabricantes del agente de voladura y/o explosivo o la implementación de normas internacionales, resaltando que la industria minera colombiana fundamenta en la aplicación de procesos de control ambiental y seguridad industrial, fomenta en sus actividades la aplicación de diferentes guías de operación con estándares internacionales, los que se fundamentan un desarrollo y uso del explosivos en el sector minero, donde se resalta que los estándares internacionales que rigen el uso de explosivos, están enfocados a establecer procesos continuos de producción, aunque se fundamente y promuevan la protección ambiental, lo que lleva a evaluar que en el territorio nacional se requiere una política que direcciona y regule de forma específica el uso de explosivos, que involucre, no solo aspectos técnicos, sino procesos de responsabilidad, sustentabilidad y sostenibilidad del proceso, además de las sanciones y penalizaciones por su mal uso, fundamentados en principios de protección ambiental, dada la fragilidad y variabilidad de los ecosistemas existentes en el entorno nacional, lo que se debe desarrollar desde una nueva perspectiva política, económica y estratégica, que responda a una visión con proyección a futuro, que no solo de respuesta a los problemas del entorno vial, sino que contemple los principios de protección ambiental.

El país requiere en este aspecto el desarrollo e implementación de mesas de trabajo intersectorial, donde se establezcan las directrices con enfoques de calidad constructiva, donde no solamente se deben

desarrollar las propuestas para trabajo de campo, sino que se dicten las directrices que permitan integrar las entidades administradoras de las vías, los entes gubernamentales, la empresa minera y de hidrocarburos, la empresa privada relacionada e Industria Militar Colombiana - INDUMIL, por medio de mecanismos y estructuras organizativas que permitan el desarrollo de acciones en la atención de eventos de forma inmediata.

Del análisis comparativo de datos y los resultados de la voladura, con diferentes criterios teóricos y empíricos se establece como resultado que en el desarrollo de un diseño o la ejecución de una voladura, es esencial realizar una caracterización detallada a nivel geológico y geotécnico del área a volar, es fundamental tener en cuenta criterios y clasificación de Lilly, método que aunque presenta limitaciones, da la posibilidad de ser modificado y adecuado a las diferentes condiciones del entorno, permitiendo el incorporar variables ya consideradas como: estado y condición de las discontinuidades, alteración del macizo rocoso, presencia de agua, relleno, entre otras y ajustando este parámetro de clasificación en la zona a intervenir, lo que permite en terreno analizar los criterios bajo los que se establece las predicciones y la obtención de resultados óptimos en la voladura, desde esta condición se realiza una caracterización geológica, estructural y geotécnica en tiempo real, antes de la detonación a fin de predecir o al menos informar sobre los posibles efectos generados por parámetros no considerados.

En la planificación de voladura es fundamental el control y minimización de daños en el campo cercano, desde el tipo y velocidad del agente de voladura y/o explosivo, donde, los daños en campo lejano, presentaron un control total, desde el dominio de la energía generada al momento de la detonación, la cual está en función del agente de voladura y/o explosivo usado, el diseño y los parámetros aquí contemplados, el desarrollo de esquemas simples de voladura permiten el desarrollo de modificaciones a criterio del explosivista, quien ejerce el control total, sobre el tipo y cantidad de explosivo,

bajo este criterio, se presentaron puntos críticos en los alrededores de la zona de voladura, como macizos rocosos altamente alterados, con el potencial desarrollo de zonas de inestabilidades, producto de la detonación, por lo que poder modificar los diseños permitió integrar estas condiciones y variar la voladura, permitiendo modificar los frentes de onda, acorde a las características geológicas y geotécnicas del entorno de la voladura, atenuando las vibraciones y reduciendo a cero el impacto.

Resultado de la voladura, no se evidencio registro de vibraciones en el campo lejano, en donde para la el control total de estas, se tuvo en cuenta las relaciones del agente explosivo con las características del material, lo que se reflejó en los nulos niveles de vibración presentados, en los alrededores a la zona de fragmentación y nulas vibraciones generadas en zonas de interés, estas fueron registradas además por los residentes de la zona quienes, implementaron el test de la moneda, a quienes se les realizo una descripción de este resultado y se comparó con los resultados del acelerómetro de dispositivos móviles, los que se ubicaron en los alrededores a la zona de interés, teniendo en cuenta las características del agente explosivo, dimensión y ubicación de la carga, heterogeneidad del bloque y ubicación de zonas de inestabilidad potencial, viviendas y obras civiles, para relacionar su registro con posibles mecanismos de daño, de lo que se logró establecer que los pobladores confiaron más en los resultados del test de la moneda, que en los datos reportados por el acelerómetro.

Diversas actividades relacionadas a obras civiles y mineras requieren de agentes de voladura y/o explosivos, siendo un elemento fundamental para el desarrollo de sus objetivos, dadas las características físico-químicas, de este insumo que permiten la rápida fragmentación de roca, controlando la energía distribución en tiempo y espacio, se relaciona la actividad a impactos como vibraciones, ruido y proyecciones, los que presuntamente afecta las zonas cercanas a la voladura, en donde se asume esta relación causa – efecto, desde el desconocimiento de las técnicas de voladura, propiedades del insumo

y los procedimientos de control asociados a esta temática, el desarrollo de múltiples actividades de voladura en diferentes partes del país permite desmentir este mito, asociado a esta técnica, demostrando que es una actividad segura, con excelentes resultados y beneficios económicos y temporales, si se realiza de forma adecuada.

La revisión del aspecto normativo dio como resultado, que acorde a la directriz, reglamentos y disposiciones establecidos para el trámite de permisos, referentes a la adquisición de material explosivo, fijada por el Ministerio de Defensa Nacional, este se debe realizar por medio del Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE, dependencia de las fuerzas militares - Ejército Nacional de Colombia, organismo que es una dependencia de la Industria Militar Colombiana - INDUMIL y ejerce función de vigilancia el asociación con el Ministerio de transporte, en cuanto al uso y comercialización que es permitido de sustancias y accesorios explosivos, resaltando que en Colombia existe un monopolio y el control total sobre los agentes de voladura, explosivos e insumo para su fabricación así como sus accesorios, es ejercido por el Ministerio de Defensa Nacional.

La revisión del aspecto de normativo, evidencio que respecto a medidas de seguridad industrial e higiene laboral, existe una notoria ausencia de normatividad específica en el país, la fabricación, comercialización, transporte de los agentes explosivos también es controlado y supervisado por el Ejército Nacional de Colombia, y en cuanto a la aplicación de pautas para su adecuado uso, se ha establecido de manera generalizada la aplicación de recomendaciones y normas internacionales por parte de las empresas, que hacen uso de este insumo, en donde la elección de la norma adoptada, recae de la evaluación de las características de la actividad desarrollada, uso de agentes de voladura y/o explosivo, dependen de la experticia del explosivista.

La revisión de la normativa, demuestra que en la actualidad, la legislación colombiana, se fundamenta en la norma de sismo resistencia, que establece los efectos de la voladura en

términos de vibraciones, las que deben ser controlados para minimizar daño a estructuras u obras civiles, pero no existen ningún criterio que establezca cual es el nivel de vibración permisible, razón de que los estudios de control de vibraciones se basen en las normas internacionales (USBM, Normal Española, Norma, Alemana, Normal Canadiense, Normal Australiana, etc.)

Se analizaron las necesidades presentadas en cada una de las etapas y los procesos requeridos en la operación de voladura de tipo secundario, lo que corresponde a procesos de corte y/o fragmentación de bloques de roca y sobretamaños, dando como resultado un protocolo que incorpora aspectos normativos y las necesidad de control y vigilar el uso de explosivos en actividades de mitigación temprana de impactos por deslizamientos de rocas en corredores viales, mediante técnicas de voladura, en aspectos como el control de vibraciones, ruido y la generación de proyectiles, aspectos controlables desde la selección del agente de voladura y/o explosivo, el detalle de la información geológica y estructural.

El protocolo resultado de la investigación se fundamenta y valida con operaciones de campo y sus datos extrapolados desde las operaciones registradas, con lo que se busca plantear criterios de discusión, utilizando como punto de partida para futuras propuestas de investigación y generación de nuevas propuestas de modelos de fragmentación, respecto a los criterios y/o método de medición, procesos de evaluación geométrica y/o geotécnica, donde se consideren otros factores geológicos, geotécnicos y ambientales, donde de consideren los criterios de evaluación de daño por vibraciones por la voladura acorde a las características de nuestro entorno y no que sean solo una adaptación de los aportes de Lilly (1986) o la aplicación de voladuras secundarias, en donde la propuesta y desarrollo de un método que pueda convertirse en un criterio general de análisis y evaluación válido.

En los procesos de voladura realizados, ninguno contempló desde la etapa inicial de la operación el manejo y/o disposición técnica de los fragmentos resultado de la voladura,

resaltando que aunque no estaba contemplado en el proceso, se realizó disposición de dicho material, en donde la empresa y/o la comunidad, posterior a la voladura realizan operaciones de fragmentación manual del material, para ajustarlo a sus requerimientos, el que es dispuesto en la vía como material de recebo, relleno de huecos, para afirmado en la vía, ingresos a viviendas y en otros casos se disponía estos materiales ubicándolos al lado de la vía, evidenciando el interés en la disposición y manejo de subproductos de la voladura, generando ahorro en costos de operación.

El protocolo propuesto, parte de la premisa que la forma de atención para desarrollar el despeje vial, e la implementación de agentes de voladura y/o explosivos, definido previamente mediante la identificación y caracterización de los materiales litológicos involucrados en el evento, por parte del experto de la administradora vial, con posterior verificación del operador de voladuras, como resultado se involucran en el protocolo resultado de la investigación los diferentes aspectos y consideraciones, que brindan orientación precisa al desarrollo de la operación durante las actividades de voladura y/o fragmentación, en cada una de las etapas y componentes, que hacen parte de la operación, así como la designación de responsabilidades de cada uno de los ítems que hacen parte de la operación.

En el aspecto normativo se contemplan las directrices, reglamentos y disposiciones establecidos para las operaciones con agentes de voladura y/o explosivos, en el territorio colombiano son fijadas por el Ministerio de Defensa Nacional, por medio del Departamento de Control Comercio de Armas, Municiones y Explosivos – DCCAE, dependencia de las fuerzas militares - Ejército Nacional de Colombia, organismo que a su vez

es una dependencia de la Industria Militar Colombiana - INDUMIL y que ejerce función de vigilancia, el Ministerio de transporte, en cuanto al uso y comercialización que es permitido de sustancias y accesorios explosivos, en donde el protocolo se articuló acorde la normatividad vigente establecida por los diferentes Ministerios y organismos de control Nacional y es flexible a ser implementado con los diferentes agentes de voladura y/o explosivos disponibles en el mercado.

Entendiendo una operación de voladura como la fragmentación, corte y/o voladura de bloques de roca, la que se a dividido en 6 etapas, el protocolo contempla las directrices, rutas y responsabilidades de cada uno de miembros partícipes de la operación, en referencia al Transporte en el que se destacan el transporte externo desarrollado por medio de vehículos, el transporte interno manual; los procesos de Almacenamiento para material explosivo y accesorios; las operaciones a realizar mediante el uso de explosivos antes de la voladura, durante la voladura y después de la voladura; los procesos de señalamiento y señales de alarma en los alrededores de la zona de fragmentación, corte y/o voladura, antes de la voladura, durante la voladura, después de la voladura y el manejo de material post voladura y/o fragmentación; se incorporan aspectos de seguridad industrial e higiene ocupacional establecidos por la normatividad colombiana, en referencia a que dada la inexistencia de normatividad específica en el área de voladuras en el territorio nacional, esta normatividad no es de carácter vinculante a estas operaciones, por lo que desde las empresas que operan con explosivos implementan recomendaciones diseñadas por el fabricante del insumo o estándares internacionales en sus operaciones.

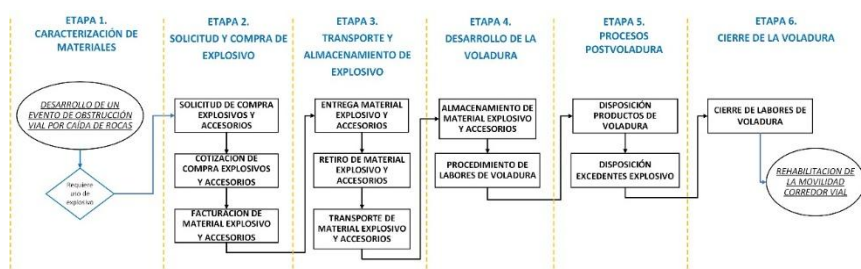


Imagen 11. Diagrama de etapas del proceso de voladura y manejo de productos postvoladura.

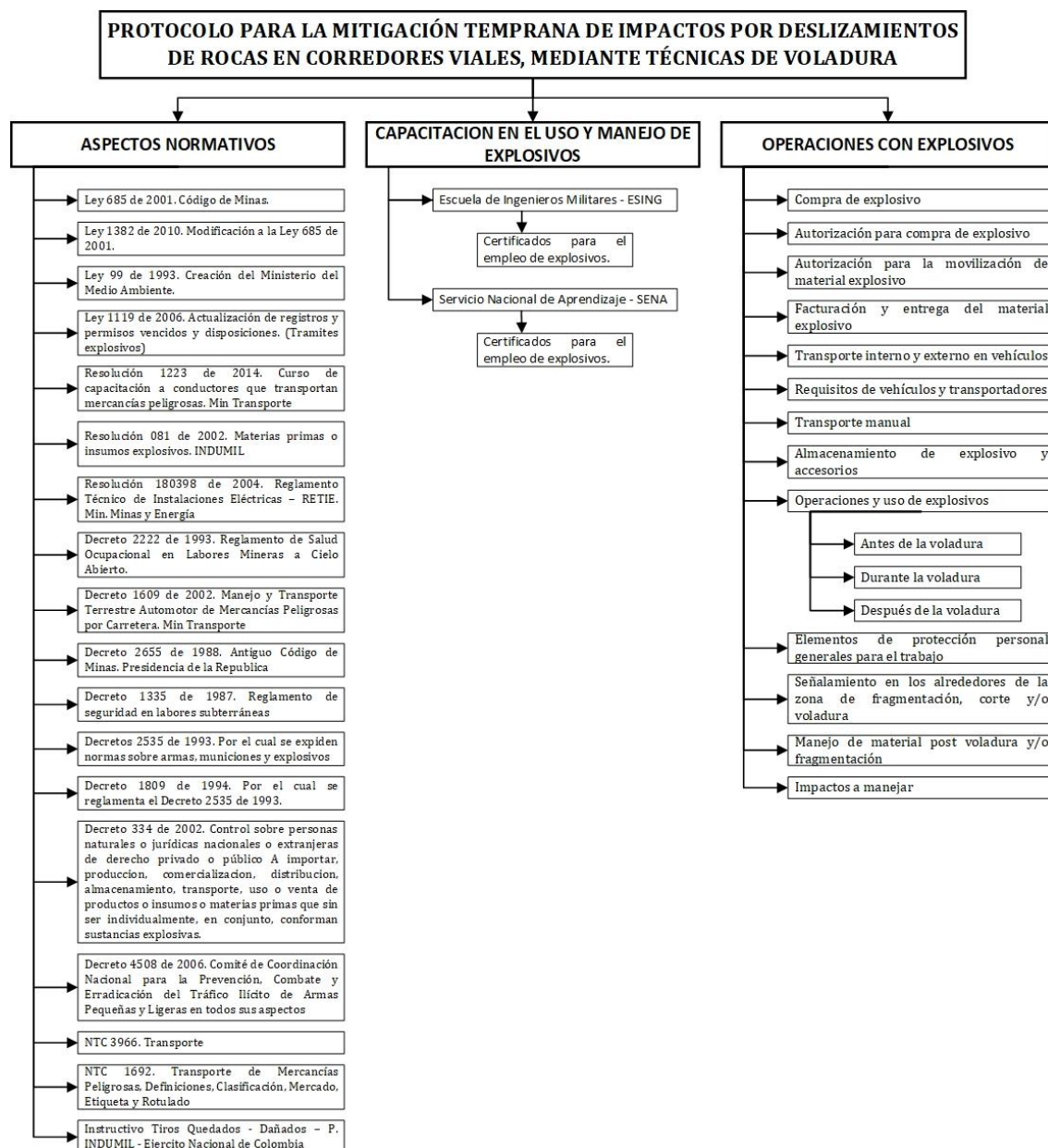


Imagen 12. Diagrama de aspectos normativos, capacitación y procesos operacionales contemplados en el desarrollo del protocolo

DISCUSIÓN

Se debe realizar investigación en este campo desde diferentes áreas del conocimiento puesto que el desarrollo teórico de la fragmentación por medio de agentes de voladura es un tema activo, discutido y controversial, en la actualidad, aclarando que no existe hoy en día un concepto que defina la fragmentación y que considere todas las variables implicadas en el proceso, sin embargo, de manera recurrente se define por los autores como un estado de choque producto del impacto violento asociado a la repentina aplicación de presión de detonación de la columna explosiva y la consecuente presión

sobre el pozo, y un estado de explosión el cual es generado por el efecto retardado de los empujes asociados a la expansión de los gases a alta presión y temperatura, aspecto citando desde las primeras teorías que explica la fragmentación, la Teoría de la Onda de Choque de Hino año 1956, donde se establece que la detonación de la carga explosiva crea una onda de choque de tipo compresivo que es transferida a la roca o bloque, producto del impacto violento, este impacto la fracciona y provoca una onda de compresión que es propaga por el medio sólido hasta alcanzar una superficie libre, donde se verá reflejada como una onda de tracción, que actualmente es lo

que se asume en la mayoría de los modelos de mecanismos de fractura por tracción, además de la expansión y abertura de fracturas preexistentes debido a la penetración rápida de gases.

Tomando como referencia el análisis y resultado de las voladuras desarrolladas, se evidencia la necesidad de articular esta metodología como una alternativa que permita dar solución rápida a problemas de movilidad vial, articulada de forma directa con la dirección municipal, con el fin de brindar mayor garantía al desarrollo económico y productivo del país, es decir, desde la garantía de los procesos de movilidad, por medio de despejes viales rápidos y oportunos, dado que al presentarse un evento los impactos sociales y económicos son amplios, por lo que mantener la conectividad de las áreas de producción con los centros de consumo a diferentes escalas, evitando el represamiento de productos, ofreciendo a la sociedad la oportunidad de mantener los procesos económicos en un estado operativo que garantice el abasto, así como el ingreso acceso a bienes y servicios a la comunidad sin sobre costos, razón de que las mesas de reunión asociadas a esta temática se debe discutir métodos alternos que hayan demostrado ser rápidos y efectivos para atender los procesos de deslizamientos de rocas en corredores viales.

En la actualidad las empresas mineras, han implementado de forma autónoma criterios internacionales en la evaluación de daño por vibraciones o daño en campo lejano y campo cercano producto de una voladura, los que se han desarrollado para garantizar la protección del proceso productivo a fin de no inestabilizar los taludes, no generar deterioro a las obras civiles cercanas y cumplir con procesos de protección al ambiente, estableciendo niveles permisibles de vibraciones, se cuenta con suficientes datos para dar inicio al desarrollo de una normatividad nacional, que regule los impactos del uso de agentes de voladura, en donde se incorpore y se ajuste acorde a las características y necesidades del entorno colombiano, en donde se contemple las particularidades de los diferentes macizos rocosos, características ambiental, diseños

viales, obras civiles y procesos mineros presentes en el territorio nacional.

Se evidencia como resultado de la revisión bibliográfica que en la actualidad este es el primer protocolo propuesto en Colombia y Latinoamérica, desarrollado con el fin de enfocar el uso de explosivos con fines civiles, aplicado al despejes de corredores viales, por lo que el “Método para la mitigación temprana de impactos por deslizamientos de rocas en corredores viales, mediante técnicas de voladura”, es una propuesta pertinente que se sustenta en necesidades actuales del país, incorporando aspectos técnicos, el desarrollo proyectos de casos de voladuras exitosos, cuenta con datos, se incorporan aspectos de la legislación colombiana, se analizan los efectos de la voladura diseñada bajo parámetros técnicos adecuados, demostrando que no genera impactos en términos de vibraciones, las que se controlan de manera estricta para minimizar daño en los alrededores, garantizando la protección de las obras civiles, la protección del ambiente y la población.

El diagnóstico de la situación actual colombiana en aspectos de normatividad, higiene y seguridad industrial, en el área de explosivos, revela que se debe prestar atención a este aspecto, dado que al no existir un sustento normativo, los vacíos jurídicos no permiten un proceso de seguimiento y procesos legales en caso de afectaciones al entorno o la sociedad, destacando que a pesar de no existir una norma nacional, se cuenta cuentan con recomendaciones y las herramientas necesarias para realizar un trabajo seguro, dada la experiencias del Ejército Nacional de Colombia y la industria minera, donde está última aplica de manera reiterativa normas internacionales, permitiendo condiciones adecuadas de seguridad en el trabajo, por lo que esta experiencia da un valor agregado lo que permitiría un avance y desarrollo de una normatividad adecuada para la industria minera, sector civil y vial, adaptado a las condiciones y características del país.

En el territorio colombiano, en la actualidad la formación técnica, tecnológica y profesional, en manipulación de explosivos es limitada, vigilada y controlada por las

autoridades, debido a los antecedentes históricos de violencia, conflicto armado y problemas de orden público, han generado que el acceso y adquisición de agentes de voladura y productos explosivos, sea restrictiva en Colombia, lo que con lleva a las empresas deban tener procedimientos minucioso de seguridad respecto al uso, manipulación y transporte, de forma conjunta con las autoridades, con el fin de asegurar que este insumo no sea utilizado en otros fines, esto genera que el personal que está a cargo del insumo y los procesos, estén relacionados con las fuerzas militares para garantizar la seguridad de los procesos y la ciudadanía, reflejando que en las facultades de ingeniería, geología, minas y afines, no se cuente, con formación, información y metodologías actualizadas, en la formación profesional en este campo y procesos, causando falencias en la capacitación en temas de seguridad de la operación, adquisición del explosivo, reglamentación en Colombia, uso e impactos generados, conllevando a que los docente no cuenten con conocimientos específicos en el uso de explosivos, diseños y modelos, aspectos fundamentales en el desarrollo de operaciones de voladura, fragmentación y corte. Al ser muchos de los profesionales en este campo activos de las fuerzas militares, su enfoque no es constructivo u son empíricos y no aportan en aspectos académicos y de docencia, lo que lleva a que el las facultades relacionadas a esta temática en el país requiera procesos de actualización e implementación de asignaturas actualizadas que respondan a los requerimientos de voladura en obras civiles, rendimientos, mejoramiento de los diseños y modelos y fortalecer los procesos de investigación en particular en los procesos de dimensión de riesgos de las malas prácticas en la manipulación de estos, y la importancia de su uso adecuado en el desarrollo de las facultades de ingeniería y afines en el país, en donde la academia junto con las fuerzas militares de manera conjunta puedan transformar las actuales limitaciones, debilidades y dificultades, en fortalezas que se reflejen en el desarrollo de profesionales capacitados en esta área que contribuyan al desarrollo del país.

CONCLUSIONES

Se concluye de desarrollo del proyecto que las condiciones climáticas y de relieve del territorio colombiano hacen que se deba dar un nuevo enfoque a la atención de los procesos de despeje vial, en un país con alto nivel de atraso y limitada infraestructura vial, en donde los bloqueos por desastres naturales generan grandes perjuicios a la movilidad, la sociedad y la economía, en donde desde el sector público y privado se debe evaluar el comportamiento de los explosivos desde diferentes ámbitos y aplicaciones, considerando no solo los beneficios sociales y de conectividad, asociados a su uso, así como su incidencia directa e indirecta a las comunidades, aspectos temporales, las mínimas afectación al medio, estas condiciones hacen que se pueda articular en los diferentes campos de la ingeniería, desde donde se pueden plantear soluciones rápidas y efectivas que promuevan el desarrollo en procesos de despeje vial.

El desarrollo de actividades de despeje vial con agentes de voladura, desde el análisis de las relaciones costo – beneficio, dado su costo asequible, la facilidad operativa, las condiciones de seguridad en el manejo y manipulación, condiciones de eficiencia y rapidez en el trabajo realizado, condiciones de facilidad en el transporte, son algunas de las ventajas que ofrecen los explosivos comerciales modernos, dando una considerable ventaja sobre los procesos desarrollados con maquinaria amarilla.

El desarrollo de proyectos en este campo derivará en proyección de nuevos desarrollos de conocimiento en el aspecto de técnicas para mitigación de amenazas naturales, impactos por cierres viales, caídas de rocas y/o otros fenómenos de remoción en masa, movilidad entre otros en los que se pueda aplicar esta técnica, beneficiando la movilidad vial, así como al sector económico y productivo del país, es decir, a través de este proceso se pueden emprender el desarrollo de posteriores investigaciones que lleven a la innovación de las aplicaciones y desarrollo tecnológico, que ofrecen los nuevos desarrollo permitiendo nuevas oportunidades en la gestión ingenieril y operativa acorde a los estándares y desarrollo

de nuevas técnicas de voladura y desarrollo de explosivos.

Se concluye que en la decisión realizar una voladura de calidad, se incorpora el análisis integral de variables controlables en cada caso en particular, además de la responsabilidad de las entidades partícipes de los departamentos involucrados, en muchas ocasiones las razones de no lograr buenos resultados, no está en el tipo de técnica usada, el diámetro de perforación, el explosivo y ni siquiera en el tipo de roca, sino en el poder disponer de los datos adecuados para obtener los resultados correctos.

El uso de tecnologías de explosivos, tiene inmersa una alta noción de responsabilidad sustentable y sostenibilidad, en donde los avances están enfocados a la optimización de la fragmentación con el mínimo de vibraciones, bajo esta perspectiva se debe generar una nueva cultura política y estrategias técnicas, que responda no solo a los procesos mineros, sino a fenómenos alternos como los despejes viales por de caídas de rocas, además de las otras necesidades y proyecciones presentes y a futuro de nuestra sociedad.

Al trabajar con agentes de voladura desde un enfoque de calidad, fundamentado en los beneficios sociales asociados al mantenimiento permanente de la movilidad y estado funcional de infraestructura vial, donde los entes territoriales participan activamente y puedan abordar esta problemática de manera rápida, es evidente que los beneficios generados son mayores que los efectos de medidas alternas como las vías de comunicación alterna, lo que genera amplios impactos económicos negativos a la sociedad, por lo que brindar otra alternativa de solución al bloqueo vial, brinda beneficios no solo al ente territorial y las comunidades sino que es una oportunidad de contribuir al desarrollo y crecimiento económico, así como el empoderamiento y mantenimiento sostenible en el tiempo de la red vial nacional.

Se concluye de las operaciones realizadas que el proceso de perforación y taponamiento, garantizan un control de los impactos generados, por vibraciones, ruido y proyecciones, dado que de esta operación

depende el proceso de amortiguamiento generado por la cámara de aire, en donde se debe garantizar un control total en la ubicación y diámetros de perforación, los que deben estar en relacionados al centro de gravedad del bloque de roca y el proceso de taponamiento que al garantizar la cámara de aire genera el retardo adecuado para el proceso de fragmentación del bloque de roca.

De las operaciones realizadas se concluye que el desarrollo de voladuras de tipo secundario, para operaciones de voladura, fragmentación y/o corte de grandes bloques de roca, es una operación completamente segura, que brinda condiciones de impactos tendientes a cero en vibraciones, ruido y proyecciones, si se realiza dentro de las especificaciones técnicas establecidas, garantizando la seguridad del entorno y población en los alrededores de la operación.

El análisis de las voladuras realizadas permite el desarrollo y validación de un protocolo, que no debe ser visto solo como un conjunto de reglas, sino como una directriz que incorpora aspectos técnicos y experiencia, no solo deja valiosas contribuciones en conocimientos, sino que permite el mantenimiento de estándares de control y calidad en cada una de las etapas de las operaciones de voladura, sino que permite el mantener niveles de calidad en las directrices de control y mitigación de impactos al entorno.

Se concluye del reporte de los datos registrados y evaluados que en la ejecución de operaciones de voladura, corte o fragmentación de bloques de roca, por condiciones de seguridad, se debe garantizar el no volar bloques de roca inferiores a un 0,5 m³, para garantizar la seguridad del entorno en cuanto a la generación de proyección de roca, a causa de una sobre presión en el barreno, mediante la perforación o pruebas de penetración, se debe determinar un aproximado de la dureza de roca para establecer la carga a implementar en el bloque.

Se concluye que las condiciones de resistencia a la compresión y heterogeneidad de la estructura rocosa y de las unidades geológicas, condicionan, la carga del barreno, estableciendo que las rocas que se caracterizan

por ser blandas y poco consolidadas, el uso de maquinaria pesada para el arranque mecánico, es suficiente, para su manejo, las rocas con gran resistencia, alta dureza, masivas y densas, es necesario el proceso de perforación y voladura, corte o fragmentación por medio de agentes de voladura y/o uso de explosivos que faciliten el manejo de dicho material.

Se concluye que el desarrollo tecnológico de agentes de voladura y/o explosivos, tiene incorporado un inmerso proceso de responsabilidad, sustentable y sostenibilidad, en donde los avances están direccionados a optimizar la fragmentación con el mínimo de vibraciones, bajo esta perspectiva se debe generar una nueva cultura política y estrategias, que responda no solo a los procesos de caídas de rocas sino a las necesidades y proyección presentes y a futuro de esta técnica en nuestra sociedad.

Se concluye que el desarrollo del país en aspectos viales, túneles, ferroviario, minero, urbano, entre otros, se vería beneficiado si se contara con un mayor número de profesionales en este campo, donde los requerimientos en el uso de técnicas de voladura actualizadas y que respondan a las necesidades del mundo moderno, por lo que es importante que las facultades de ingeniería empiecen a formar profesionales con conocimientos en el uso de agentes de voladura y/o explosivos, que son fundamentales en el desarrollo del país, en donde es primordial la ejecución de operaciones de voladura, en obras de gran magnitud y megaproyectos, por lo que este campo abre oportunidades no solo en el país sino en el exterior, por lo que la capacitación y formación desde las entidades educativas es fundamental en el desarrollo académico, ofreciendo un valor agregado en el desarrollo de nuevos profesionales quienes en su portafolio de conocimientos pueden ofrecer el desarrollo de actividades, con conocimientos prácticos y científicos en la temática.

Se concluye que el desarrollo del protocolo, relacionado a un proceso de paz, que garantice el fin del conflicto en el país, permitirá que las autoridades den paso a que la comunidad, por medio de la academia pueda adquirir conocimientos actualizados en explosivos, favoreciendo procesos de participación en los

procesos productivos con la aplicación de metodologías adecuadas, vinculando la minería, obras civiles y explosivos; con el fin de establecer nuevas metodologías de trabajo que fomenten la investigación, que lleven al desarrollo de mayores rendimientos en las actividades de voladura disminuyendo los tiempos de entrega de insumos lo que se traduce en la reducción de tiempos de entrega en los proyectos, disminuyendo costos operativos, aumentando los beneficios de las operaciones asociadas a esta temática.

En Colombia, solo dos entidades, están autorizadas y son las encargadas de formar, capacitar, acreditar y certificar, recurso humano en las labores relacionadas con el uso y manejo de agentes de voladura y/o explosivos, para el sector de la minería e infraestructura. La Escuela de Ingenieros Militares - ESING, perteneciente al Comando General de las Fuerzas Militares, entidad que expide los certificados de empleo básico y elemental de explosivos comerciales en minería y obras civiles., de otro lado, el SENA se encargará de formar y acreditar la idoneidad y las competencias de las personas que ejecutan estas labores, mediante el programa de Actualización en Manipulación de Sustancias Explosivas – AMSE, que se creó bajo el convenio marco entre el Ministerio de Defensa Nacional y el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), para contribuir en el desarrollo técnico del personal en las diferentes empresas legalmente constituidas que utilicen material explosivo dentro de sus procesos, capacitando personal a nivel operativo y técnico en la Manipulación de Sustancias Explosivas, así como en procesos de actualización continua acorde a los desarrollos y requerimientos técnicos y tecnológicos del país, lo que corrobora se debe fomentar la investigación en este campo, dado que se está dejando de lado y se queda desactualizado el desarrollo científico e investigativo de este campo, dando viabilidad solo al desarrollo operativo del campo, lo que genera condiciones de dependencia a los procesos de desarrollo e innovación técnica, tecnológica y científica del sector.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160921001829>

Journal article:

- [1] Esma K., Shahab H., Blessing O., Yewuhalashet F., Afolabi J., Adams A., & Tsuyoshi A. Fostering sustainable mining practices in rock blasting: Assessment of blast toe volume prediction using comparative analysis of hybrid ensemble machine learning techniques. *Journal of Safety and Sustainability*. Volume 1, Numero 2, Junio 2024. Pages 75-88. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949926724000179>
- [2] Hao Z., Xueyang X., Yiteng D., Tingchun L., Jianxin Y., An approach of rock blasting simulation of equivalent blasting dynamic-static action. *ScienceDirect. Underground Space. Intelligent Construction College - Shandong University of Aeronautics – Binzhou. China*. Enero 2025. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2025.01.004>. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1365160925000309>
- [3] Mohammad F., Jafar H., Mohammad T., Minhaj U., Aliur R., Tania S., Faysal A., Shaik M. Ground vibration effect evaluation due to blasting operations. *ScienceDirect. Department of Petroleum and Mining Engineering - Energy Conversion Laboratory - University of Science and Technology. Bangladesh. Heliyon*. Volumen 11, Numero 30. Enero 2025. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844025001392>
- [4] Yu L., Ben-Guo H., Hong-Pu L., Qi L., Chong R. Theoretical and numerical investigation of damage zones in deep tunnels within a layered rock mass under full-face blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Volume 188. Abril 2025.
- [5] Zong-Xian Zhang, Yang Q., Li Yuan C., & De-Feng H. Experimental study of rock fragmentation under different stemming conditions in model blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Volume 143, Julio 2021. 104797. Disponible en:

Libros:

- [6] Acosta Ariza, M., & Alarcon Romero, P. A. (2017). *Análisis de la cantidad y el estado de las vías terciarias en Colombia y la oportunidad de la ingeniería civil para su construcción y mantenimiento*. Bogota, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- [7] Ames Lara, V. A. (2012). *Diseño de las mallas de perforación y voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas*. (U. N. Ingeniería, Ed.) Lima, Peru. doi:oai:cybertesis.uni.edu.pe:uni/635
- [8] Bernaola Alonso, J., Castilla Gómez, J., & Herrera Herbert, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. (J. Herrera Herbert, & J. Castilla Gómez, Edits.) Madrid, Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- [9] Cárdenas Grisales, J. (2014). *Diseño Geometrico de Carreteras*. En J. C. Grisales, *Diseño Geometrico de Carreteras* (Vol. Segunda Edicion, pág. 520). Cartagena, Colombia: ECOE - Ecoediciones.
- [10] Carrillo León, W. J. (2003). *Uso de explosivos en demoliciones para voladuras controladas*. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 109 - 118.
- [11] Garrido Rojas, C. (2020). *Aplicación de cámaras de aire en tronadura de produccion de una mina de hierro*. Concepcion: Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
- [12] Gonzales Troncoso, A. M., & Alba Acero, C. A. (2006). *Infraestructura vial en Colombia: un análisis económico como aporte al desarrollo de las regiones 1994 - 2004*. Bogota: Universidad de la Salle.
- [13] Lopez Jimeno , C., Lopez Jimeno , E., Javier Ayala , C. F., & Visser de, R. Y. (2017). *Drilling and Blasting of Rocks*. Londres, Inglaterra. doi:<https://doi.org/10.1201/9781315141435>
- [14] Leon Castillo, J. A. (2020). *Mitos y realidades de la minería aurífera en Colombia*. Bogota D.C., Colombia: Editores Academicos. doi:<https://doi.org/10.12804/tj9789587844887>

- [15] Lopez Jimeno, C., Lopez Jimeno, E., & Garcia Bermudez, P. (2003). Manual de perforación y voladura de rocas. (Mostoles, Ed.) Madrid: Graficas arias Montano.
- [16] Marshall, M., & Oxley, J. (2008). Aspects of Explosives Detection. Kingston, Estados Unidos: Elsevier Science.
- [17] Montenegro Rivas, J. F. (2018). Procedimiento técnico para la elaboración de voladuras en proyectos de infraestructura. Medellin, Colombia.
- [18] Ospina Ovalle, G. (2016). El papel de las vías secundarias y los caminos vecinales en el desarrollo de Colombia. (U. d. Andes, Ed.) Revista de Ingenieria(44), 9. doi:http://dx.doi.org/10.16924%2Friua.v0i44.911
- [19] Perez, G. J. (2005). Economia regional La infraestructura del transporte vial y la movilización de carga en Colombia. Bogota: Banco de la Republica.
- [20] Rojas Linares, L. (2018). Un nuevo enfoque predictivo de la fragmentación en la Voladura de Rocas. (L. R. Linares, Ed.) Revista Industrial Data, 17 - 26. doi:DOI: http://dx.doi.org/10.15381/idata.v21i1.14907
- [21] Servicio Nacional de Geología y Minería - SNGM. (2014). Guía de Operación para el Manejo de Explosivos. Guías de operación para la pequeña minería.
- [22] Wong H., & Pang P. L. (1992). Assessment of stability of slopes subjected to blasting vibration. (C. E. Department, Ed.) Hong Kong, Hong Kong: Geotechnical Engineering Office.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.



DERECHOS DE AUTOR

Leon Castillo, J. A., & Vargas Cuervo, G. (2025)



Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons de Atribución No Comercial 4.0, que permite su uso sin restricciones, su distribución y reproducción por cualquier medio, siempre que no se haga con fines comerciales y el trabajo original sea fielmente citado.



El texto final, datos, expresiones, opiniones y apreciaciones contenidas en esta publicación es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la revista.