

Análisis de las prácticas de sostenibilidad y gestión de recursos en minas de carbón: Caso Municipio de Sogamoso, Boyacá

*Analysis of sustainability and resource management practices in coal mines:
Case of the Municipality of Sogamoso, Boyacá*

María Isabel Rojas Triana¹

Gloria Carolaine Cárdenas González²

Paula Alejandra Gamboa Rodríguez³

¹ Licenciada en Matemáticas y Estadística, Especializada en Estadística Aplicada, Magíster en Ciencias Económicas y Doctora en Ciencias Económicas Administrativas. Docente de planta Área Cuantitativa de la Escuela de Economía de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Investigadora del grupo SOECOL adscrito a la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas de la UPTC y del Grupo de Investigación GAMMA adscrito a la Facultad de Ciencias Matemáticas y Estadística. Autora de varios artículos publicados en revistas indexadas. Evaluadora Par reconocida en SNCTel. Correo electrónico: maria.rojas03@uptc.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6931-445X>.

² Economista de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Tunja. Miembro del grupo de investigación SOECOL, participa en proyectos centrados en economía social, desarrollo territorial y análisis económico. Tiene interés en comprender las dinámicas económicas del país y en aportar desde la investigación a los retos sociales y estructurales de Colombia. Correo electrónico: gloria.cardenas03@uptc.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4754-4623>.

³ Economista en formación de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Tunja. Ha finalizado la totalidad de asignaturas del plan de estudios y actualmente se encuentra en proceso de grado. Miembro del grupo de investigación SOECOL, participa en proyectos centrados en economía social, desarrollo territorial y análisis económico. Tiene interés en comprender las dinámicas económicas del país y en aportar desde la investigación a los retos sociales y estructurales de Colombia. Correo electrónico: paula.gamboa01@uptc.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0641-8127>.

Resumen

La minería de carbón es un pilar económico en Colombia, pero su sostenibilidad está en entredicho por sus impactos, en este estudio, se busca evaluar la optimización de los recursos derivados de las minas de carbón en el municipio de Sogamoso, Boyacá, considerando aspectos ambientales, sociales y de salud pública. Mediante un enfoque mixto, combinando el análisis documental, con análisis estadístico multivariado de correspondencias múltiples, con observación directa, 23 entrevistas y 80 encuestas a actores clave. Se evidencia una profunda brecha entre el robusto marco legal colombiano y su precaria aplicación. La optimización responsable en la minería se asocia a conciencia ambiental, conocimiento legal y participación comunitaria; su ausencia refleja fallas de gobernanza; por ello urge fortalecer la fiscalización y la capacidad comunitaria para transitar hacia una minería sostenible, integrando gestión del capital, costos y valor circular.

Palabras clave: Minería del carbón, gestión ambiental, sostenibilidad, residuos mineros, gobernanza ambiental.

Clasificación JEL: Q32, Q53, Q56; Q58, L71

Abstract

Coal mining is an economic pillar in Colombia, but its sustainability is called into question due to its impacts. This study seeks to evaluate the optimization of resources derived from coal mines in the municipality of Sogamoso, Boyacá, considering environmental, social, and public health aspects. Using a mixed approach, combining documentary analysis with multivariate statistical analysis of multiple correspondence, direct observation, 23 interviews, and 80 surveys of key stakeholders, the results reveal a deep gap between Colombia's robust legal framework and its weak enforcement. Responsible optimization in mining is associated with environmental awareness, legal knowledge, and community participation; its absence reflects governance failures. Therefore, there is an urgent need to strengthen oversight and community capacity to transition toward sustainable mining, integrating capital management, costs, and circular value.

Keywords: Coal mining, Environmental management, Sustainability, Mining waste, Environmental governance.

JEL: Q32, Q53, Q56; Q58, L71

I. INTRODUCCIÓN

La gestión adecuada de los residuos mineros se ha convertido en un tema de vital importancia para alcanzar el desarrollo sostenible y la preservación del medio ambiente de cualquier comunidad, especialmente en regiones donde la actividad minera constituye una parte fundamental de la economía local. En el municipio de Sogamoso, Boyacá, la minería de carbón es un pilar económico fundamental, representando una parte significativa de las explotaciones minerales de la región. Si bien esta actividad ha impulsado el desarrollo y la generación de empleo, también ha traído consigo importantes desafíos. Investigaciones en la región han documentado la contaminación de fuentes hídricas y la afectación de ecosistemas de páramo (Leguizamo y Ruiz, 2019; Pérez-Mora, J. et al., 2021).

En el ámbito de la salud pública, se han identificado riesgos significativos para los trabajadores, como enfermedades respiratorias y alteraciones osteomusculares, a menudo en un contexto de precariedad laboral (Ospina et al., 2010). El manejo inadecuado de los residuos mineros puede provocar la contaminación del suelo, el aire y el agua con sustancias tóxicas, afectando directamente a las comunidades que dependen de estos recursos.

A esta problemática se suma la minería ilegal, un fenómeno extendido que, según informes de la Procuraduría General de la Nación (2024), afecta a 29 de los 32 departamentos del país, incluido Boyacá. Esta modalidad opera al margen de la regulación ambiental establecida en la Ley 685 de 2001 (Congreso de Colombia, 2001), conocida como el Código de Minas, intensificando los impactos negativos como la degradación del paisaje, la pérdida de biodiversidad y los riesgos para la salud de las poblaciones cercanas.

La presencia de actores mineros, especialmente en contextos de ilegalidad o poca regulación, puede debilitar las instituciones locales, generar corrupción, cooptación de autoridades y desconfianza en el gobierno. Esto desgasta el capital social y la capacidad de las comunidades para organizarse y defender sus intereses (Bebbington et al., 2018).

En un contexto más amplio, puede generar una serie de desafíos adicionales que impactan múltiples esferas, tales como el desplazamiento y conflicto social por el uso del suelo: La

expansión de la actividad minera, legal o ilegal, a menudo entra en conflicto con otros usos del suelo preexistentes, como la agricultura, la ganadería o la conservación. Esto puede llevar al desplazamiento de comunidades rurales, la pérdida de sus medios de vida y el aumento de las tensiones sociales. Los derechos sobre la tierra y el acceso a los recursos naturales se convierten en focos de disputa (Hilson, 2014).

Más allá de las enfermedades físicas, la presencia de la minería, especialmente cuando está asociada a conflictos, contaminación o incertidumbre sobre el futuro, puede generar estrés crónico, ansiedad y depresión en las comunidades. La fragmentación social, el cambio en las dinámicas comunitarias y la pérdida de identidad cultural ligada al territorio son efectos psicosociales importantes (Pinedo y Huertas, 2017; Bustamante et al., 2021).

Aunque la minería genera desarrollo económico a corto plazo, una dependencia excesiva de este sector puede llevar a una falta de diversificación económica. Cuando los precios del carbón caen o las reservas se agotan, las comunidades y regiones pueden enfrentar crisis económicas severas, lo que se conoce como la "maldición de los recursos" o "enfermedad holandesa" (Ross, 2012).

La contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero (tanto por la quema de carbón como por las emisiones de metano de las minas) es una cuestión de responsabilidad. A medida que el mundo avanza hacia la descarbonización, la presión sobre estas economías mineras aumenta, planteando desafíos significativos para una transición justa (IPCC, 2021).

Se cree que la correcta administración de los recursos mineros es clave para mitigar estos efectos y fomentar un desarrollo sostenible (Hilson y Murck, 2000). Esto implica no solo la minimización de los daños geológicos, biológicos e hídricos, sino también la atención a las consecuencias sociales, como los desplazamientos forzados de comunidades, un fenómeno donde la minería ha sido un factor determinante. En este contexto, surge la pregunta: ¿Se optimizan adecuada y responsablemente los recursos derivados de las minas de carbón en el municipio de Sogamoso, Boyacá?

Este proceso implica analizar las regulaciones existentes, las políticas, la infraestructura de manejo de residuos, los procesos de seguimiento y control, así como identificar el grado de participación de la comunidad en torno a esta problemática y presentar las posibles estrategias y

soluciones para mejorar la gestión de residuos con el fin de promover un enfoque de minería más sostenible y amigable con el medio ambiente.

La hipótesis apunta a que la correcta gestión de los residuos generados por la actividad minera se convierte en un factor imprescindible para garantizar no solo la integridad de los ecosistemas locales y la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras; que a su vez afecta la salud y la seguridad de los habitantes de cualquier lugar donde se practique esta actividad. Un manejo inapropiado de los residuos mineros puede llevar a consecuencias graves, ya que estos pueden contener sustancias tóxicas y contaminantes que, si no se gestionan de manera adecuada, pueden causar daños irreparables como la contaminación del suelo, el aire y el agua, poniendo en riesgo la salud de las comunidades que dependen directamente de estos recursos naturales (Pérez-Mora, W. et al., 2021).

Un enfoque que equilibra los objetivos económicos con la sostenibilidad y la responsabilidad social es la *optimización responsable* en la minería de carbón entendida como la aplicación de prácticas y tecnologías que buscan maximizar la eficiencia en la extracción y procesamiento del carbón, al mismo tiempo que se minimizan los impactos negativos en el medio ambiente, la salud humana y las comunidades.

De otra parte, la gestión que se realice respecto a los recursos mineros contribuye a la minimización o maximización de ingresos, inversiones, impactos ambientales y sociales derivados de la extracción de carbón para beneficiar a la comunidad y al medio ambiente de manera sostenible, permite mitigar y generar un aporte significativo en la reducción de daños geológicos, biológicos, hídricos, sociales con respecto a la existencia de empleabilidad en zonas ilegales no aptas para realizar la extracción de carbono, y por otro lado, la relación con la migración que lleva a comunidades de zonas rurales a trasladarse por el tipo de actividad productiva o el uso inadecuado de tierras fértiles destinado a la minería (Sánchez-Vázquez et al., 2021 y Sandoval et al., 2017).

Observada la problemática anterior, este estudio tiene como objetivo principal analizar las prácticas y tecnologías que maximizan la eficiencia en la extracción y procesamiento del carbón considerando los aspectos ambientales, sociales y de salud pública. Para ello, se analizan las

políticas y regulaciones vigentes en Sogamoso, la infraestructura para el manejo de residuos mineros y los procesos de seguimiento y control. Asimismo, se investiga el nivel de conocimiento y participación de la comunidad en esta problemática. A partir de este análisis, se busca proponer recomendaciones para mejorar la gestión de residuos y promover una minería más responsable y sostenible en la región.

Entre los recursos principales a optimizar por su naturaleza están los relacionados con materiales y energéticos (relaves o lodos finos, estériles o roca sin valor económico con poca porción de carbón que no son recuperados en el proceso inicial. El metano (CH₄) gas de efecto invernadero que se libera de los yacimientos de carbón durante la minería; el agua utilizada en los procesos mineros y las aguas que entran en contacto con la mina (aguas de escorrentía, subterráneas) se contaminan; la energía consumida en la mina, aunque no es un residuo, es un recurso energético. Así, como los recursos ambientales del entorno: suelos afectados por la remoción, compactación, contaminación y erosión; biodiversidad y ecosistemas (páramo y bosques); calidad del aire y agua. Sin olvidar los recursos sociales y salud pública (capital humano y bienestar comunitario).

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

A. Origen de la optimización de residuos mineros

La optimización de residuos mineros surge como una respuesta a la creciente preocupación por los impactos tanto ambientales como sociales asociados a la industria minera, y a la necesidad de renovar la efectividad en el manejo de los residuos generados por la actividad minera. La generación de desechos mineros ha provocado importantes problemas ambientales, como la contaminación del agua, el suelo, la degradación del hábitat y la pérdida de biodiversidad. Además, el manejo inapropiado de estos residuos puede poner en riesgo la salud pública, generando enfermedades respiratorias y dermatológicas. La evolución de la industria minera ha venido acompañada de grandes avances tecnológicos y metodologías que han sido empleadas para aminorar el impacto ambiental y acrecentar el aprovechamiento de los recursos. Estas prácticas y tecnologías se comenzaron a implementar en el siglo XX, con el objetivo de optimizar el tratamiento y la gestión de los residuos.

El origen de la optimización de recursos mineros está totalmente relacionada a la presión social y regulatoria, para que las empresas que se dedican a la extracción de minerales operen de manera

más sostenible (Bebbington et al., 2023). Según la Ley de minas de 1973, en España, las políticas de sostenibilidad y las regulaciones ambientales han jugado un papel clave en la adopción de prácticas de optimización. Así mismo, la evolución de dicha ley, y su posterior actualización, ha fomentado a la mayor parte de las empresas mineras a trabajar continuamente en la búsqueda de métodos más eficientes y menos contaminantes para manejar los residuos generados de la explotación de dichos recursos. La optimización de recursos mineros se ha convertido en una práctica y un campo de estudio clave para minimizar los impactos ambientales y sociales de la actividad minera.

B. Optimización de los recursos mineros

La optimización de los residuos generados por la minera se refiere a un conjunto de estrategias y técnicas que buscan optimizar la gestión de residuos mineros a lo largo de todo su ciclo, es decir, desde su generación hasta su disposición final. Su objetivo principal es aminorar el peligro y la cantidad de los residuos mineros generados a través de una serie de técnicas y prácticas diseñadas. Así mismo, promover la reutilización y asegurar un manejo ambientalmente responsable de los residuos que no pueden ser valorizados. La optimización se puede considerar como una mejora continua del proceso de gestión de residuos, enfocada en obtener mejores resultados con menores recursos y un menor impacto ambiental. De igual forma, la optimización de residuos mineros además de contribuir a la sostenibilidad ambiental fomenta la generación de beneficios económicos al reducir los costos operativos y mejorar la eficiencia de los procesos mineros.

La optimización de residuos mineros abarca una amplia gama de acciones interrelacionadas, desde la prevención de la generación de residuos hasta su disposición final segura. En la etapa inicial, esta se enfoca en la prevención, adoptando medidas para reducir la cantidad de residuos generados. Esto incluye la elección de métodos más eficientes de minería, la adopción de nuevas tecnologías que reduzcan el material extraído. Una vez generados dichos residuos, estos pasan por un mecanismo de caracterización para determinar sus propiedades fisicoquímicas, su viabilidad y su peligrosidad para la reutilización. Este proceso es clave, ya que permite tomar decisiones informadas sobre su manejo y tratamiento.

La reutilización es clave, ya que se busca dar un nuevo uso a los residuos mineros en otras aplicaciones, como materiales de construcción o enmiendas para suelos. Para el caso de los

residuos que no pueden ser reutilizados, se aplican otro tipo de técnicas de tratamiento para reducir el peligro que pueden emitir antes de su disposición final. Esto puede incluir la estabilización de metales pesados o la encapsulación de materiales peligrosos. En el último paso la disposición final, se realiza en instalaciones especialmente diseñadas con el fin de mitigar el impacto ambiental de los residuos mineros almacenados.

Lo anterior conlleva a la implementación de medidas de control ambiental rigurosas para evitar la contaminación del agua, el aire y el suelo. Tal como se argumenta en los estudios de Schwarz et al. (2012), la utilización de pigmentos en los recubrimientos en la industria principalmente los de ferrita de zinc, es un problema, pero a la vez tienen una aplicación prometedora en pinturas anticorrosivas, optimizando los procesos de preparación.

En profundidad, la optimización de los residuos mineros presenta diversos enfoques holísticos y estratégicos según la gestión de los subproductos generados durante las operaciones mineras, con el objetivo de minimizar su volumen, toxicidad y huella ambiental, y maximizar su valor potencial. Va más allá de la simple disposición de residuos, buscando la recuperación de recursos, la reutilización y el tratamiento para neutralizar o estabilizar sustancias peligrosas. Este concepto se sustenta en los principios de la economía circular y la sostenibilidad, y busca transformar los desafíos ambientales y económicos que plantean los residuos mineros en oportunidades.

Se debe tener en cuenta aspectos importantes como la Minimización en la Fuente (reducción), es el primer paso en la jerarquía de gestión de residuos. Implica el diseño de procesos mineros y metalúrgicos que generen menos residuos desde el inicio. Esto puede incluir el uso de técnicas de minería más selectivas, la optimización de los circuitos de procesamiento para aumentar la recuperación de mineral, o la implementación de tecnologías que reduzcan la cantidad de estériles y relaves.

En términos de reciclaje y reutilización o recuperación de valor, se trata de la extracción de cualquier componente valioso que aún pueda estar presente en los residuos mineros. Significa la posibilidad de utilizar los estériles o relaves como materiales de construcción, áridos, para la recuperación de tierras (Svedova, et al., 2020).

Cuando la minimización y la recuperación de valor no son posibles o suficientes, los residuos deben ser tratados para reducir su toxicidad y lixiviación de contaminantes. Esto puede incluir tratamientos químicos (para neutralizar la acidez, precipitar metales), físicos (compactación, encapsulación) o biológicos (biorremediación). El objetivo es que los residuos sean químicamente estables antes de su disposición final (Younger y Wolkersdorfer, 2004).

Para los residuos que no pueden ser valorizados o tratados completamente, se busca una disposición final que minimice los riesgos a largo plazo. Esto implica el diseño y la construcción de depósitos de relaves y escombreras que sean geoquímicamente estables, que impidan la lixiviación de contaminantes y que permitan una futura rehabilitación de la tierra. La rehabilitación progresiva y el cierre de mina planificado son componentes esenciales (International Council on Mining and Metals [ICMM], 2018).

Con un enfoque global, la optimización de los residuos mineros se enmarca en la visión de la *Minería Sostenible*, que busca integrar las consideraciones ambientales, sociales y económicas en todas las etapas del ciclo de vida de una mina (del concepto al cierre). Es un componente crucial para lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente aquellos relacionados con el agua limpia y saneamiento, la producción y consumo responsables, y la vida de ecosistemas terrestres.

En resumen, la optimización de los residuos mineros es un concepto dinámico que evoluciona con el desarrollo tecnológico y las crecientes exigencias regulatorias y sociales. Su objetivo es transformar los *desechos* en *recursos* siempre que sea posible, y cuando no, asegurar que su impacto sea mínimo y manejable a largo plazo.

C. Teorías desde la literatura económica sobre recursos ambientales

La teoría del capital natural que sostienen los clásicos sobre los recursos ambientales, como los derivados de la minería del carbón, deben considerarse como parte del stock de capital que sustenta la producción y el bienestar económico (Costanza y Daly, 1992). La sostenibilidad exige mantener el capital natural intacto o, cuando se agota, invertir en capital producido o humano como compensación (Hartwick, 1977). Desde la perspectiva de la economía de recursos naturales, la teoría de la renta ricardiana y agotamiento de recursos, aplicada a la minería indica

que los recursos más accesibles y de mejor calidad se explotan primero, generando rentas económicas que pueden destinarse a fondos de inversión sostenibles (Hotelling, 1931). Sin embargo, el agotamiento progresivo de los recursos no renovables como el carbón plantea un dilema intergeneracional que exige planificación sostenible.

En teoría del desarrollo sostenible, según el informe Brundtland (1987) de la World Commission on Environment and Development (WCED, 1987), implica satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras. Esto aplica especialmente a la minería del carbón, donde las externalidades ambientales negativas (contaminación de aguas, emisiones, residuos) deben ser gestionadas mediante prácticas sostenibles como la reutilización de subproductos, tratamiento de aguas residuales y economía circular (Pearce et al., 1989).

La teoría de externalidades y bienes públicos: la minería del carbón genera externalidades negativas, es decir, costos sociales que no son asumidos por las empresas. La teoría de Pigou (1920) plantea que se deben internalizar estos costos mediante impuestos ambientales, regulaciones o sistemas de permisos. Esto incentiva prácticas sostenibles, como la gestión eficiente del agua, el aprovechamiento de relaves o la recuperación energética de subproductos carbonosos.

Más recientemente, la economía circular ha sido integrada en el análisis económico como una estrategia para cerrar el ciclo de los recursos, promoviendo la reutilización, reciclaje y valorización de residuos mineros (Kirchherr et al., 2017). Aplicado a las minas de carbón, esto implica convertir subproductos y residuos en insumos para otros procesos productivos, reduciendo la presión sobre el medio ambiente y creando valor económico.

En la *literatura internacional* la sostenibilidad minera y gobernanza ambiental converge en cuatro pilares teóricos: i) *gobernanza participativa y las licencias sociales para operar (SLO)*, donde la participación con poder delegado mejora resultados ambientales y de cumplimiento (Newig y Koehler, 2023) y enfoques “community-centred” replantean la gobernanza desde prioridades locales (Erwin, 2022); ii) los *derechos de los pueblos indígenas/FPIC* como condición de legitimidad y distribución justa de beneficios (Klein y Davis, 2023); iii) la *gestión ESG de riesgos hídricos* con metodologías para priorizar riesgos a escala nacional (García-Zavala et al., 2023); y iv) la *capacidad estatal y arreglos policéntricos* para coordinar actores y resolver conflictos (NRGI, 2023 y Sovacool, et al., 2020).

Casos similares en gobernanza y participación comunitaria se encontraron en Perú, los de las Bambas y otros muestran que déficits de diálogo y transparencia erosionan la SLO y disparan los conflictos; se recomiendan procesos multiactor y estándares verificables (Brookings, 2022; EnvJustice, 2024; UNDP-EGP, 2022). En Chile, la Estrategia Nacional del Litio abre interrogantes sobre equilibrio entre rentas públicas, protección socioambiental y participación indígena (NRGI, 2023; Sovacool, et al., 2020). En Bolivia y el triángulo del litio, organizaciones indígenas demandan consulta efectiva ante impactos hídricos y territoriales (Bridge, 2020). En conjunto, la evidencia sugiere que la participación con poder real, transparencia y métricas ESG es determinante para una optimización responsable de recursos y reducción de conflictos.

D. Marco legal para la optimización de residuos mineros en Colombia.

La actividad minera, si bien representa un pilar fundamental de la economía colombiana, impulsando el desarrollo y generando empleo, su impacto ambiental no puede pasarse por alto (Arango-Aramburu et al., 2019). La extracción de recursos minerales conlleva una serie de consecuencias negativas para el ecosistema. La producción de residuos mineros, como escombro, relaves, lodos y sustancias peligrosas, representa un desafío significativo para la gestión ambiental del país. En este contexto, el marco legal colombiano se ha consolidado como un elemento clave para regular la optimización de estos residuos y minimizar los efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud pública. Entre las principales normas se encuentran listadas en la tabla 1.

Tabla 1.

Normas marco legal colombiano sobre optimización de residuos mineros

Norma	Descripción	Enfoque / Aporte Clave
Ley 99 de 1993	Crea el Ministerio del Medio Ambiente, establece principios para la gestión integral de residuos y define los residuos mineros como materiales sin valor comercial inmediato.	Gestión integral y sostenible de residuos; prevención y responsabilidad del generador.
Ley 685 de 2001	Código de Minas. Define obligaciones ambientales de los titulares mineros, incluyendo licencias y medidas de prevención y control de contaminación.	Gestión ambiental en minería; licencias y medidas de control.

Ley 1658 de 2013	Regula la gestión de residuos mineros y la rehabilitación de zonas mineras. Incluye lineamientos para el manejo de residuos con mercurio.	Manejo seguro de mercurio y residuos peligrosos en minería.
Decreto 1220 de 2005 y Decreto 500 de 2006	Establece marco legal integral para la gestión de residuos mineros, clasificando entre sólidos y peligrosos, y definiendo responsabilidades de actores.	Clasificación y disposición final de residuos; responsabilidades claras.
Decreto 1073 de 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Minero Energético. Consolida y actualiza la normatividad, promoviendo desarrollo sostenible y protección ambiental.	Modernización y unificación de normativa minera con enfoque sostenible.

Fuente: Elaboración propia.

E. Caracterización de la minería en la ciudad de Sogamoso

La ciudad de Sogamoso a través del DANE indica que la minería posiciona un importante lugar en su economía, al igual que la ganadería, la agricultura, y la industria. El carbón extraído se denomina térmico el cual es utilizado en procesos industriales, y de esta manera la minería sogamoseña contribuye en la industria establecida por diferentes empresas nacionales e internacionales, ubicadas dentro y alrededor de la ciudad. Cuenta con un total de 30 títulos y 250 bocaminas en funcionamiento ubicadas en las siguientes veredas: Morca, Pedregal, Ombachita, Primera chorrera, y las cintas. Concluyendo que más del 63,6% es la representación de la ciudad sobre el resto de los municipios pertenecientes a la provincia de Sugamuxi departamento de Boyacá. (Acuerdo Municipal No. 013-2012, Plan de desarrollo del Municipio de Sogamoso “unidos por el progreso” 2012-2015).

La extracción que se realiza en la ciudad de Sogamoso contempla materiales como el carbón, la arcilla, la piedra fosfórica, recebo, y arena. El proceso en la actualidad considera un crecimiento, puesto la relación que se logra realizar entre los minerales, optimizando la riqueza geológica localizada en la ciudad, donde a futuro se prevé una explotación mayor de carbón puesto las tendencias coyunturales de la economía. La actividad minera permite en medida observar si la extracción es contaminante, desde suelos, aire, y vías terrestres, debido a que la comercialización es llevada a cabo de tal modo. Por ello que se busca maximizar la importancia que posee contrarrestar todos aquellos efectos adversos a la actividad, que generan diversos daños

ambientales, y no son tratados legalmente a los lineamientos nacionales para proceder adecuadamente. Además de observar la legalidad del proceso extractivo con su respectiva normativa es sumamente relevante para la actualidad, ser garante de licencia ambiental a través del departamento y su respectiva regulación, porque controlar la ilegalidad minera es también un campo fundamental para la seguridad social y la seguridad ocupacional que requieren los trabajadores, puesto que la actividad pone en riesgo la vida de cada uno de los partícipes que se encuentra expuestos en ella (Serrano et al., 2016).

La minería que se trabaja es de índole rudimentario o artesanal se refiere a una actividad extractiva caracterizada por el uso de métodos y herramientas relativamente rudimentarios, con baja inversión de capital y una alta dependencia de la mano de obra y, a menudo, una escala de producción limitada. Tradicionalmente, está asociada a una forma de sustento de comunidades locales, que operan con conocimientos ancestrales o empíricos. Su proceder ha surgido por la facilidad de los trabajadores al desplazarse a sus lugares de trabajo, además de la migración que ocurre por las actividades primarias de la ciudad (Agricultura y ganadería).

Veiga y Hinton (2002), definen la minería artesanal y de pequeña escala (ASM) como una actividad "en gran parte de subsistencia que utiliza herramientas relativamente simples, mano de obra intensiva, y con niveles variables de mecanización. La ASM a menudo se asocia con bajos niveles de inversión de capital y una dependencia de procesos manuales o semi mecanizados" (p. 2). Ellos enfatizan que la ASM es una fuente de ingresos crítica para millones de personas en el mundo en desarrollo.

Por otra parte, la *minería informal* se refiere a cualquier actividad minera que opera sin cumplir plenamente con el marco legal, administrativo y ambiental establecido por el Estado. Esto significa que la operación carece de los permisos, licencias o concesiones necesarias para operar legalmente, o no cumple con las regulaciones de seguridad, salud ocupacional, ambientales o laborales, a pesar de poder tener algún tipo de reconocimiento o estar en proceso de formalización.

Castro (2012) señala que la minería informal se refiere a "aquella actividad minera que se desarrolla al margen de las disposiciones legales que la regulan, específicamente en cuanto a los títulos mineros, los permisos ambientales y las normas laborales y de seguridad" (p. 15). Destaca

que es un fenómeno complejo que abarca desde la subsistencia hasta operaciones con cierto nivel de tecnificación.

Desde el año 2010 Organización Internacional del Trabajo (OIT), describe la minería informal como una actividad que "carece de reconocimiento formal por parte de las autoridades y opera fuera del marco legal establecido para la minería, incluyendo aspectos de licenciamiento, fiscalización ambiental, seguridad y salud en el trabajo" (p. 7).

la informalidad en la contratación debido a las cercanas relaciones jefe- trabajador y su facilidad de acordar pagos frecuentes de manera diaria, quincenal, o mensual, lo que permite tener rápidamente la remuneración de su trabajo y disponer de él en el presente, desconociendo en varias ocasiones las previsiones a futuro de ellos y de sus familias. Sumado a ello, la falta de las licencias ambientales no permite regular la accidentalidad y tener mayor control en la prevención de riesgos y desastres, lo que ha generado que la extracción además del daño residual para el medio ambiente, "es foco de informalidad e incertidumbre frente a la previsión del riesgo", menciona Serrano et al. (2016, p.112)

Como se menciona anteriormente para la ciudad de Sogamoso es recurrente que la extracción de carbón térmico se realiza artesanalmente, donde no se cuenta con la tecnificación adecuada para maximizar la productividad. Además, los autores, Serrano et al., (2016, p.113) señalan "se realiza todo lo contrario, aceptar el nivel mínimo de subsistencia para los trabajadores, sin ninguna previsión futura, debido a que es visto como medio de subsistencia para los trabajadores, y no se presenta la iniciativa de mejorar y llevar al crecimiento la actividad por parte de sus dueños".

El proceso de extracción este sujeto a las características particulares que contenga la mina ya sea a cielo abierto o subterráneamente, lo que conlleva dos distintas metodologías. Sogamoso presenta en mayor medida una minería subterránea, donde el primer paso del proceso es la explotación por pilares, los cuales hacen referencia a una capa de carbón que es soporte para el techo de la mina, "Veta". Los pilares representan aproximadamente el 40% del carbón que contiene la mina, y su retiro es llevado a cabo mediante un trabajo de explotación en retirada. Un segundo proceso de explotación conforma la extracción por tajos, donde se requiere el uso de maquinaria mecánica en las zonas de pilares, conocidas también como vetas, es decir, secciones de carbón. Este proceso es más eficiente y recupera un mayor porcentaje de carbón que el descrito anteriormente.

Por otro lado, la metodología a cielo abierto se constituye a través de 3 grandes características: La remoción de Material Superficial, donde se utilizan explosivos para romper el material de la superficie, que se retira con dragas excavadoras y camiones. El siguiente es la Exposición de la Veta de Carbón: Una vez que se ha retirado el material superior, se expone la veta de carbón. Finalmente, la extracción: Se perfora y se extrae el carbón de manera sistemática. Este método permite recuperar hasta el 90% del carbón en la veta, siendo más eficiente que la minería subterránea (Natural Resource Governance Institute-NRGI, 2023).

Ahora bien, la minería realizada considera el siguiente proceso general, luego de establecer una metodología para minas subterráneas o de cielo abierto. Los trabajadores a cargo realizan las siguientes etapas: Exploración, Se realiza un estudio geológico para reconocer la ubicación y calidad de los yacimientos de carbón. Explotación, Esta fase abarca el desarrollo de la mina, la preparación del sitio y la extracción de carbón. El beneficio: En esta etapa, el carbón se clasifica y se somete a un proceso de lavado para optimizar su calidad antes de su transporte y uso final (purificación). Transporte: El carbón se mueve desde la mina hacia las instalaciones de beneficio o directamente a los usuarios finales mediante camiones, cintas transportadoras o ferrocarriles, y finalmente la transformación: En algunos casos, el carbón se convierte en coque u otros derivados a través de diversos procesos (Hilson y Murck, 2000).

Adicionalmente a la labor, es sumamente importante la presencia de todas aquellas herramientas que contribuyen dentro del mismo proceso, tales como: “frentero, es el encargado de abrir el sendero para la explotación cuyo trabajo requiere esfuerzo físico y manejo de explosivos; piquero, cuya función es la explotación del mineral; cochero, responsable del transporte del carbón; malacatero, encargado de la subida y bajada del coche; patiero, seleccionador de carbón en el patio; Jefe de la mina, o supervisor de producción y finalmente; el almacenista, encargado de la recepción, almacenamiento, inventario y entrega diaria de herramientas y minerales extraídos”. (González et al., 2023).

III. METODOLOGÍA

Para dar respuesta a la pregunta de investigación y cumplir con los objetivos propuestos, se adoptó un enfoque de investigación mixto (cualitativo y cuantitativo) bajo un diseño de estudio de caso, se utiliza muestreo no probabilístico contextualizado en la optimización de los recursos

derivados de la minería de carbón en el municipio de Sogamoso, Boyacá. La investigación se estructuró en las siguientes fases:

A. Fase 1: Revisión documental y análisis normativo.

Se realizó una revisión exhaustiva de fuentes secundarias para analizar el marco legal y político aplicable. Se examinaron leyes nacionales como la Ley 685 de 2001 (Código de Minas) y la Ley 99 de 1993 (Congreso de Colombia, 1993), así como decretos reglamentarios (Decreto 1073 de 2015, Decreto 1220 de 2005) y la legislación específica en la Ley 1658 de 2013 (Congreso de Colombia, 2013). A nivel local, se consultaron documentos como el Plan de Desarrollo de Sogamoso (Acuerdo Municipal No. 013-2012) e informes de la autoridad ambiental regional (Corpoboyacá) para comprender el marco regulatorio específico y su grado de aplicación en el territorio.

B. Fase 2: Población y muestra. Recolección de datos en campo.

Esta fase combinó técnicas cualitativas y cuantitativas para obtener información primaria sobre la situación real en Sogamoso. Con *población objetivo*: La comunidad minera del municipio de Sogamoso y *tamaño de la muestra* (n): 80 participantes, lo que implica que se entrevistó a residentes de áreas directamente afectadas o relacionadas con la actividad minera de carbón. La población de estudio incluyó a: (a) operadores mineros de pequeña y mediana escala en las veredas de Morca, Pedregal y Ombachita.

De acuerdo con Hinton, Veiga y Beinhoff (2003), los operadores de pequeña escala se caracterizan por: tener baja capacidad de producción; tecnología y métodos rudimentarios; menor inversión de capital, estructura organizacional sencilla: la gestión es directa y menos jerárquica; sus operaciones suelen concentrarse en un área pequeña y local; presentan frecuente precariedad laboral y mayor riesgo de informalidad o ilegalidad.

Según Banchs y Veiga (2018) y Hilson (2016), los operadores de mediana escala se sitúan en un punto intermedio entre la pequeña y la gran minería. Presentan las siguientes características: Capacidad de producción moderada; mayor nivel de tecnificación: poseen un grado más elevado de mecanización en sus procesos de extracción, transporte, utilizan maquinaria más sofisticada,

como cargadores, camiones de mayor capacidad, perforadoras mecanizadas y sistemas de ventilación más avanzados.

La inversión es más sustancial que la pequeña minería; estructura organizacional más formalizada: equipos técnicos (ingenieros, geólogos) y cumplen con requisitos regulatorios y de seguridad; generalmente operan dentro del marco legal y ambiental establecido; contribuyen de manera importante al empleo regional, con condiciones laborales más formalizadas que la pequeña minería.

(b) habitantes de comunidades aledañas a las explotaciones mineras; y (c) funcionarios de entidades gubernamentales relevantes (Secretaría de Ambiente de Sogamoso, Corpoboyacá, Agencia Nacional de Minería). Se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia y bola de nieve, adecuado para acceder a poblaciones en contextos de informalidad.

C. Instrumentos de recolección:

Observación directa no participante: Se realizaron visitas a zonas de explotación minera para evaluar visualmente la infraestructura de manejo de residuos (escombreras, sistemas de drenaje), las prácticas operativas y los impactos paisajísticos evidentes. Se utilizó una ficha de observación estandarizada para registrar los hallazgos.

Entrevistas semiestructuradas: Se llevaron a cabo entrevistas con 5 funcionarios de entidades de control, 8 operadores mineros y 10 líderes comunitarios para profundizar en los procesos de seguimiento, los desafíos de cumplimiento normativo y la percepción sobre los impactos de la minería.

Encuestas: Se aplicó un cuestionario estructurado a una muestra de 80 habitantes de las veredas mineras para cuantificar el grado de conocimiento sobre la gestión de residuos mineros, la percepción de riesgo para la salud y el medio ambiente, y el nivel de participación comunitaria en asuntos minero-ambientales.

La encuesta fue un instrumento estructurado, aplicado en el segundo semestre del año 2024, con preguntas predominantemente cerradas, diseñado para recoger datos descriptivos sobre las percepciones y experiencias de la comunidad minera de Sogamoso respecto a los impactos y la

gestión de la minería de carbón, utilizando una combinación de preguntas dicotómicas, ordinales y de opción múltiple.

Cada fila en la tabla representa una pregunta individual de la encuesta, con las siguientes características: Identificador de Pregunta: Cada pregunta está numerada (1, 2, 3, 4, 5). En el texto de la Pregunta se presenta el enunciado completo de la pregunta tal como fue formulado a los encuestados.

Se ofrecen opciones de respuesta predefinidas, lo que indica que la mayoría de las preguntas eran de tipo cerrado, clasificadas según tipo de variable para su posterior análisis y técnica estadística a aplicar:

Preguntas Dicotómicas/Nominales Simples:

Pregunta 1: "¿Considera usted que la actividad minera de carbón ha afectado la calidad del agua y/o el aire en su vereda?" (Sí / No / No sabe / No responde)

Pregunta 3: "¿Conoce usted las leyes que regulan la minería o los canales formales (ej. Corpoboyacá, Alcaldía) para presentar una queja ambiental?" (Sí / No)

Preguntas con Escala Ordinal o de Frecuencia:

Pregunta 4: "¿Ha participado usted alguna vez en reuniones, audiencias públicas o consultas sobre proyectos mineros o planes de manejo ambiental en su vereda?" (Nunca / Alguna vez / Frecuentemente)

Preguntas de Opción Múltiple (Categorías Nominales):

Pregunta 2: "¿Cree usted que los problemas de salud (respiratorios, de piel, etc.) en su comunidad están relacionados con la minería?" (Sí, directamente / No, no creo que haya relación / No sabe / No responde)

Pregunta 5: "¿Cuál considera que es el principal problema derivado de la minería en su vereda? (Respuesta única)" (Contaminación del agua / Polvo / Daño al paisaje / Ruido / Otro / No sabe)

Características Específicas Inferidas:

Enfoque Temático: Las preguntas se centran claramente en la percepción de los impactos ambientales (agua, aire, paisaje, suelos), impactos en la salud, el nivel de conocimiento sobre regulaciones y canales formales, y el grado de participación comunitaria en relación con la minería de carbón.

Nivel de Medición: Las preguntas 1, 2, 3 y 5 utilizan escalas nominales (categorías sin orden intrínseco). La pregunta 4 utiliza una escala ordinal (categorías con un orden lógico de frecuencia).

Opción "No sabe / No responde": Esta opción está presente en varias preguntas (1, 2, 5), lo cual es una buena práctica en encuestas de percepción para evitar forzar una respuesta y reflejar la incertidumbre o falta de conocimiento del encuestado.

Pregunta de Respuesta Única: La Pregunta 5 especifica "(Respuesta única)", lo que significa que a los encuestados solo se les permitió elegir una opción como el "principal" problema, lo que es común para identificar prioridades.

D. Fase 3: Análisis de datos.

Los datos cuantitativos obtenidos de las encuestas fueron procesados utilizando software STATA V17 y analizados mediante técnicas estadísticas descriptivas de frecuencias y porcentajes y de Correspondencias Múltiples (ACM). El ACM es una técnica de análisis de datos multivariante diseñada para explorar la estructura de asociación entre tres o más variables categóricas (nominales). Su objetivo principal es transformar un complejo conjunto de datos categóricos en una representación visual de baja dimensionalidad, generalmente un mapa de dos o tres ejes, en el que se proyectan simultáneamente las categorías de todas las variables. Según Greenacre (2017), esta técnica es una extensión del análisis de correspondencias simple que permite identificar patrones, perfiles y relaciones ocultas al interpretar la proximidad entre los puntos en el mapa: las categorías que aparecen juntas con frecuencia en los datos tenderán a estar cerca en la representación gráfica, mientras que las que rara vez coinciden estarán alejadas.

Los datos cualitativos provenientes de las entrevistas y las fichas de observación fueron analizados mediante un proceso de codificación y categorización temática, identificando patrones y relaciones recurrentes para interpretar los fenómenos estudiados en profundidad.

E. Consideraciones Éticas.

En todas las fases de la investigación se garantizó la confidencialidad y el anonimato de los participantes. Se obtuvo el consentimiento informado de cada persona antes de aplicar los

instrumentos de recolección de datos, explicando los objetivos del estudio y el uso que se daría a la información.

IV. RESULTADOS

A. Cumplimiento de Políticas y Regulaciones.

El análisis documental confirmó la existencia de un marco legal nacional robusto que regula la gestión ambiental en la minería. Sin embargo, los resultados de campo revelan una brecha significativa entre la normativa y su aplicación en Sogamoso. De los operadores mineros entrevistados, solo el 25% (2 de 8) afirmó poseer todas las licencias y permisos ambientales al día. La principal barrera identificada es la complejidad y el costo de los trámites para la formalización, lo cual perpetúa la ilegalidad, un hallazgo consistente con lo reportado por Serrano et al. (2016). La supervisión por parte de las autoridades ambientales es percibida como esporádica e insuficiente, especialmente en las zonas de minería artesanal y de pequeña escala.

B. Infraestructura para el Manejo de Residuos Mineros.

La observación directa evidenció que la infraestructura para la gestión de residuos es mayoritariamente precaria. El 80% de las bocaminas visitadas disponen sus residuos estériles (escombros) en botaderos a cielo abierto (escombreras) sin ningún tipo de diseño técnico, impermeabilización con geomembranas o sistemas de recolección de lixiviados. No se identificaron plantas de tratamiento para el agua de mina (aguas ácidas), la cual es frecuentemente descargada directamente a fuentes hídricas cercanas, alterando su calidad. El transporte del carbón y los estériles se realiza en volquetas sin carpa, generando material particulado en las vías y afectando la calidad del aire en las comunidades aledañas.

En general, se tuvo en cuenta el volumen y tipo de residuos generados: En mineros de pequeña escala generan volúmenes de residuos (estériles, relaves, aguas residuales) significativamente menores. Los residuos son más homogéneos en su composición, dependiendo de la geología del yacimiento, pero a menudo con menor caracterización. En comparación con las de mediana escala, producen volúmenes considerablemente mayores de residuos; generan residuos de diversa gama, aunque con una mejor caracterización química y geotécnica.

A nivel de tecnología y mecanización: la minería de pequeña escala presenta infraestructura y métodos rudimentarios, con poca o ninguna tecnología especializada para la gestión de residuos;

con alta dependencia de mano de obra para el transporte y disposición de residuos, con maquinaria básica (volquetas, palas). En comparación con la de mediana escala la infraestructura se ve más desarrollada; cuentan con sistemas de bombeo, plantas de tratamiento de aguas más sofisticadas (aunque básicas), equipos para la compactación de estériles y diseño de depósitos. Usan maquinaria pesada (excavadoras, cargadores frontales, camiones de gran capacidad) para el movimiento y disposición de residuos y sistemas de transporte más eficientes.

C. Procesos de Seguimiento y Control.

Los funcionarios entrevistados reconocieron limitaciones en la capacidad institucional para realizar un seguimiento continuo y riguroso. Mencionaron que el número de inspectores es insuficiente para cubrir la totalidad de las explotaciones mineras del municipio (más de 250 bocaminas). No se evidenció la existencia de un sistema de monitoreo público y periódico de la calidad del agua, aire y suelo en las zonas de influencia minera, lo que dificulta la evaluación objetiva del impacto ambiental y la toma de decisiones informadas (ver ficha técnica: anexo 1).

D. Participación y Conocimiento de la Comunidad.

Los resultados de la encuesta aplicada a la comunidad revelan una alta percepción de los impactos negativos, pero un bajo nivel de empoderamiento para actuar (Tabla 2).

Población de estudio: Habitantes de las veredas Morca, Pedregal y Ombachita.

Muestra: 80 encuestados.

Margen de error (teórico): +/- 10.9% para un nivel de confianza del 95%.

Tabla 2.

Resultados descriptivos encuesta comunidad minera municipio de Sogamoso

Pregunta	Opción de Respuesta	Frecuencia (n=80)	Porcentaje (100 %)
1. ¿Considera usted que la actividad minera de carbón ha afectado la calidad del agua y/o el aire en su vereda?	Sí	74	92.5%
	No	4	5.0%
	No sabe / No responde	2	2.5%
	Sí, directamente	62	77.5%

2. ¿Cree usted que los problemas de salud (respiratorios, de piel, etc.) en su comunidad están relacionados con la minería?	No, no creo que haya relación	12	15.0%
	No sabe / No responde	6	7.5%
3. ¿Conoce usted las leyes que regulan la minería o los canales formales (ej. Corpoboyacá, Alcaldía) para presentar una queja ambiental?	Sí	12	15.0%
	No	68	85.0%
4. ¿Ha participado usted alguna vez en reuniones, audiencias públicas o consultas sobre proyectos mineros o planes de manejo ambiental en su vereda?	Nunca	68	85.0%
	Alguna vez	10	12.5%
	Frecuentemente	2	2.5%
5. ¿Cuál considera que es el principal problema derivado de la minería en su vereda? (Respuesta única)	Contaminación del agua (ríos, quebradas)	35	43.75%
	Polvo en el aire y en las vías	24	30.0%
	Daño al paisaje y a los suelos	11	13.75%
	Ruido y vibraciones	5	6.25%
	Otro / No sabe	5	6.25%

Fuente: Elaboración propia. Encuesta habitantes veredas mineras carboníferas Sogamoso.

Con base en lo anterior, se infiere:

- El 92% de los encuestados considera que la minería de carbón ha afectado negativamente la calidad del agua y el aire en su vereda.
- El 78% asocia problemas de salud en la comunidad (principalmente respiratorios y dermatológicos) con la actividad minera.
- Sin embargo, solo el 15% de los encuestados afirmó conocer las leyes que regulan la minería o los canales formales para presentar quejas ambientales.
- El 85% manifestó nunca haber participado en audiencias públicas o reuniones relacionadas con la aprobación de proyectos mineros o planes de manejo ambiental. Existe un sentimiento

generalizado de resignación, donde la dependencia económica de la minería supera las preocupaciones ambientales y de salud.

E. Consistencia interna del cuestionario.

A través del coeficiente Omega, mide el conjunto de ítems (P1 a P5), propuesta como alternativa más robusta al coeficiente alfa de Cronbach. A diferencia de Cronbach's alfa, que supone tau-equivalencia (todos los ítems contribuyen de forma idéntica al constructo latente), Omega permite que los ítems tengan diferentes cargas factoriales. (se recomienda cuando los ítems presentan pesos distintos en la variable latente). Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\omega = \frac{(\sum_{i=1}^k \lambda_i)^2}{(\sum_{i=1}^k \lambda_i)^2 + \sum_{i=1}^k \psi_i}$$

Interpretación:

- Valores ≥ 0.70 : consistencia interna aceptable.
- Valores ≥ 0.80 : buena.
- Valores ≥ 0.90 : excelente.

donde:

- λ_i = carga factorial del ítem i sobre el factor común.
- ψ_i = varianza del error del ítem i .
- k = número de ítems.

McDonald (1999)

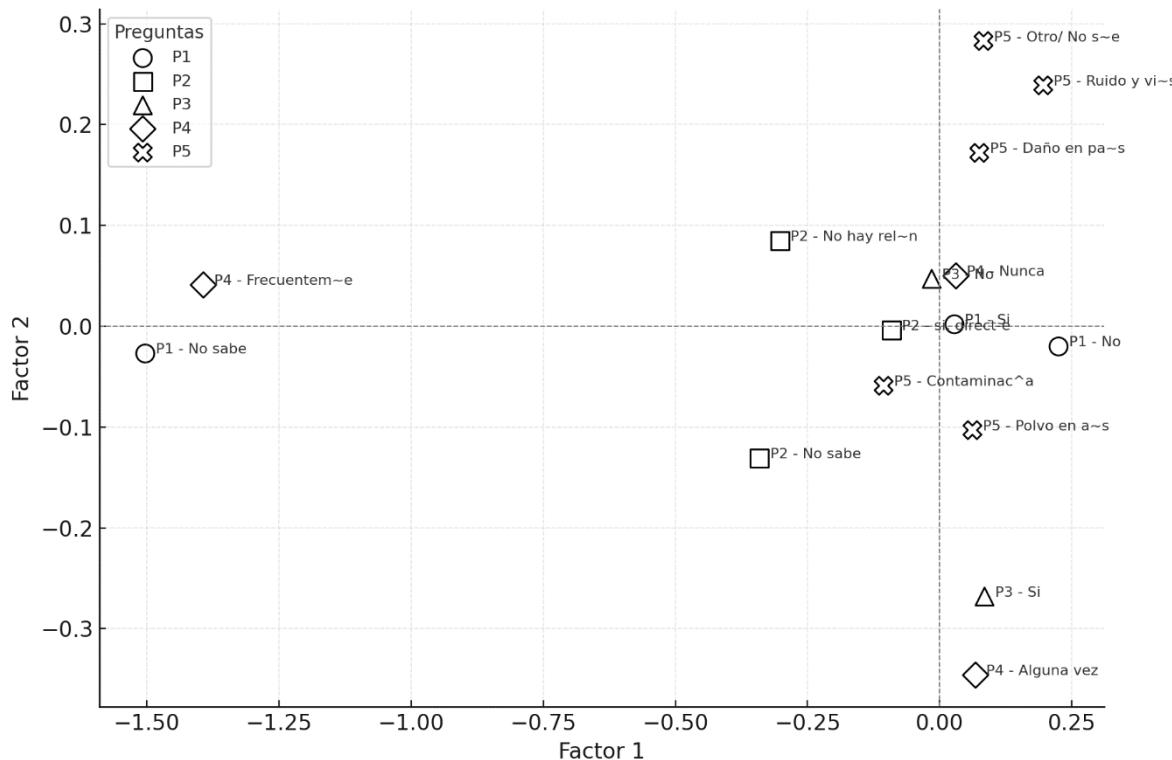
el valor de Omega fue $\Omega_t = 0.78$, lo que indica una buena consistencia interna. Según McDonald (1999), valores de $\Omega \geq 0.70$ indican una *buenas consistencia interna*, sugiere que las preguntas P1 a P5 forman una escala fiable para medir el constructo relacionado con la optimización responsable en minería.

F. Resultados del Análisis de Correspondencias Múltiples ACM.

Las respuestas de los habitantes de las veredas de Sogamoso con actividad minera en la extracción del carbón tienden a agruparse en el espacio del ACM, como se observa en el mapa perceptual, hacia coordenadas positivas en Dimensión 1 (factor 1) y Dimensión 2 (factor 2), lo que indica relación con un perfil más informado y participativo.

Figura 1.

Mapa perceptual, análisis de correspondencias múltiples



Fuente. Elaboración propia. Encuesta comunidad minera Sogamoso

Las dimensiones principales 1 y 2, representan los factores 1 y 2 (anexo 2), obtenidas por el método de Burt ajustado, explican el modelo con una variación acumulada del 59.07% (en estudios sociales, si la suma de los dos factores principales supera el 50 %, suele considerarse aceptable para interpretación visual).

El *Factor 1* explica el 44.36% de la inercia (línea horizontal) parece asociarse fuertemente con las percepciones ambientales y de salud (P1, P2, P5); y el Factor 2 explica el 14.71% de la inercia (línea vertical) se relaciona más con la participación ciudadana y conocimiento de normativas (P3, P4) y con ciertos problemas específicos percibidos (P5).

Las categorías con alta calidad de representación y alta contribución son las que sustentan el plano factorial: El modelo parece capturar bien dos ejes interpretables, representa de forma clara las asociaciones más fuertes entre categorías:

- Factor 1: *P1: no sabe, P4: frecuentemente, P2: no hay relación*: representan Intensidad/frecuencia vs. ausencia de relación.

- Factor 2: *P3: sí, P4: alguna vez, P5: otro/no sabe*: indican problemas específicos vs. diversos/no definidos

El *agrupamiento y posición* en el ACM, se observa mediante la distancia entre puntos reflejando su similitud en patrones de respuesta. Los ejes (Factor 1 y Factor 2) representan las dimensiones latentes que mejor discriminan las respuestas. Los factores pueden interpretarse como *ejes de optimización responsable vs. no responsable y enfoque ambiental/social vs. operativo*, según la naturaleza de las variables del cuestionario.

La ubicación en el plano factorial (o lista de la columna de las coordenadas anexo 2) valores positivos se enfrentan con valores negativos: En el Factor 1 (eje horizontal), separa a quienes reportan experiencias frecuentes o claras de quienes no ven relación o reportan problemas específicos: Valores positivos → *P1: no, P5: ruido y violencia, P5: otro/no sabe*. Valores negativos → *P2: no hay relación, P4: frecuentemente, P5: contaminación ambiental*.

En el *Factor 2 (eje vertical)*, diferencia *percepciones de problemas diversos* frente a experiencias concretas y repetidas. Valores positivos → *P5: otro/no sabe, P5: ruido y violencia*; y Valores negativos → *P3: sí, P4: alguna vez*.

En conjunto, los resultados son coherentes y permiten visualizar el *mapa perceptual*, diferenciando grupos de categorías y patrones de respuesta. Se interpretan las categorías relevantes *con mayor optimización responsable* en aquellos factores que tienden a reflejar mayor conciencia y, por ende, mayor potencial. En su orden se tiene:

- *P1: Sí* → Reconocimiento del impacto de la minería en el agua/aire.
- *P2: Sí, directamente* → Asociación clara entre minería y problemas de salud.
- *P3: Sí* → Conocimiento de leyes y canales para presentar quejas ambientales.
- *P4: Alguna vez / Frecuentemente* → Participación en reuniones y consultas.
- *P5: Contaminación del agua o Polvo en el aire* → Identificación de problemas específicos y relevantes.

Categorías *con menor optimización responsable* que sugieren menor vinculación con prácticas responsables: estas categorías se ubican en coordenadas negativas en las dimensiones principales, indicando menor asociación con prácticas sostenibles.

- *P1: No o No sabe* → Falta de percepción del impacto ambiental.
- *P2: No hay relación o No sabe* → Desconexión entre minería y salud pública.
- *P3: No* → Desconocimiento de normativas y canales de queja.
- *P4: Nunca* → Ausencia total de participación en procesos comunitarios.
- *P5: Otro / No sabe* → Falta de identificación de problemas concretos.

V. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman la hipótesis implícita en el planteamiento del problema: la optimización de los recursos derivados de las minas de carbón en Sogamoso es deficiente y se aleja de un modelo de sostenibilidad. La principal conclusión que emerge es la profunda desconexión entre el marco legal colombiano, que en teoría promueve una minería responsable (Ley 685 de 2001; Decreto 1073 de 2015), y la realidad operativa en el municipio. Esta brecha se explica, en gran medida, por la prevalencia de una minería informal y artesanal que opera al margen de la regulación, tal como lo describen Serrano et al. (2016).

La precariedad de la infraestructura de manejo de residuos (botaderos sin técnica, ausencia de tratamiento de aguas) es una consecuencia directa de este modelo extractivo. Dicha situación no solo incumple la normativa, sino que materializa los riesgos ambientales descritos en la literatura, como la contaminación hídrica y la degradación del paisaje (Sánchez et al., 2021).

Los hallazgos sobre la falta de seguimiento y control por parte de las entidades estatales evidencian una debilidad institucional que perpetúa el ciclo de informalidad y daño ambiental. Sin una fiscalización efectiva, no existen incentivos para que los operadores inviertan en tecnologías limpias o en planes de manejo y cierre adecuados. Esta situación es un reflejo de lo que Cely (2024) define como un modelo de gobernanza deficiente, donde la capacidad estatal para regular y controlar la actividad minera es superada por dinámicas extractivas que operan con escasa supervisión.

El factor social es igualmente crítico. La alta dependencia económica de las comunidades locales en la minería, sumada a su bajo conocimiento de los mecanismos de participación ciudadana, crea un círculo vicioso. Este escenario es característico de los conflictos socioambientales documentados en Boyacá, donde, advierte Gutiérrez y Vargas (2022), las comunidades a menudo

enfrentan la disyuntiva entre la subsistencia económica y la degradación de sus territorios, lo que limita su capacidad de acción y reclamo efectivo.

Las comunidades soportan los costos ambientales y de salud pública, pero se sienten incapaces de exigir un cambio, en parte porque la minería representa su principal medio de subsistencia (González et al., 2023). Esta situación subraya que cualquier estrategia de mejora no puede ser meramente punitiva; debe incluir componentes de desarrollo alternativo, formalización y fortalecimiento de las capacidades locales.

En síntesis, el problema en Sogamoso no es la ausencia de leyes, sino una falla sistémica en la gobernanza minero-ambiental. La optimización actual se enfoca exclusivamente en la extracción a corto plazo para la subsistencia económica, externalizando todos los costos ambientales y sociales hacia la comunidad y las generaciones futuras.

Las empresas mineras deben asumir la responsabilidad sobre el impacto en los recursos hídricos, gestionando el agua a lo largo de todo el ciclo minero, siendo ésta un aspecto clave para el desarrollo sostenible y dada la escasez de herramientas científicas para evaluar decisiones óptimas, tener en cuenta los estudios de Zhang et al. (2013), donde se recomienda aplicar un enfoque de evaluación multicriterio para identificar prácticas sostenibles en gestión hídrica en minería. El método consiste en combinar el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) y la técnica TOPSIS, estableciendo un orden de decisiones y criterios para su evaluación.

Para el caso de la contaminación, una solución innovadora para mitigar el polvo de carbón es la incorporación de la solidificación de almidón dentro de gel, tal como lo propone Ilele, et al. (2024) esto, acentúa la enorme posibilidad como estrategia de vanguardia muy considerada con el medio ambiente, al tiempo que induce a las buenas prácticas de minería sostenible.

Resultado de lo anterior, se tienen diversas implicaciones, siendo la principal en política, evidenciada la erosión de la legitimidad del Estado. Se evidencia que el gobierno tiene leyes (Ley 685, Decreto 1073) pero es incapaz de hacerlas cumplir. Esta "profunda desconexión entre el marco legal y la realidad" muestra un Estado débil, cuya autoridad es superada por dinámicas informales.

Políticamente, esto se traduce en una pérdida de confianza de los ciudadanos en las instituciones (autoridades ambientales, agencias mineras, gobiernos locales), que son percibidas como ineficaces, ausentes o incluso cómplices.

La ineficacia del marco regulatorio y la necesidad de reforma implica que las futuras políticas públicas no pueden centrarse únicamente en crear más regulaciones, sino en diseñar mecanismos realistas para su implementación, como programas de formalización, incentivos para la reconversión tecnológica y un fortalecimiento real de la fiscalización.

A nivel político, se abre un debate sobre si las leyes actuales son adecuadas para realidades como la de Sogamoso o si se necesita un enfoque diferenciado para la minería artesanal y de pequeña escala. La presión sobre las entidades de control: La "falta de seguimiento y control" pone en el centro del debate el rol de las corporaciones autónomas regionales (CARs), la Agencia Nacional de Minería (ANM) y el Ministerio de Ambiente. Políticamente, estas entidades enfrentan el escrutinio público y la presión para demostrar resultados, lo que puede derivar en conflictos interinstitucionales sobre competencias y recursos.

Se corre el riesgo de captura del estado y corrupción: aunque se menciona explícitamente, un entorno de "escasa supervisión" y "debilidad institucional" que provoca la corrupción. Las dinámicas extractivas informales pueden estar sostenidas por redes de poder local que se benefician de la falta de control, influyendo en decisiones políticas para mantener el statu quo.

Como implicaciones Sociales, se exhibe un conflicto clásico: la disyuntiva entre subsistencia económica y degradación ambiental. Esto divide a las comunidades. Por un lado, están quienes dependen directamente de la minería para vivir y, por otro, quienes sufren las consecuencias (contaminación del agua, problemas de salud, pérdida de paisaje). Esta tensión genera fracturas en el tejido social, enfrentando a vecinos y familias, y obstaculizando la construcción de una visión de desarrollo común para el territorio.

La Creación de un Círculo Vicioso de Pobreza y Vulnerabilidad observada en la "alta dependencia económica" de la minería informal crea una trampa de pobreza. Las comunidades quedan atadas a una actividad que degrada su propio entorno y su salud a largo plazo, porque no tienen alternativas económicas viables.

Socialmente, esto perpetúa la desigualdad. Los costos (salud, ambiente) son "externalizados" y asumidos por toda la comunidad y las generaciones futuras, mientras que los beneficios económicos se concentran en los operadores mineros y son de corto plazo.

El deterioro de la salud pública y la calidad de vida causa consecuencias directas de la falta de técnica en el manejo de residuos y aguas son enfermedades respiratorias (por el polvo de carbón), gastrointestinales (por el agua contaminada) y la degradación general del entorno. Esto implica una mayor carga para el sistema de salud local y una disminución significativa de la calidad de vida de los habitantes, incluso para aquellos que no trabajan en la minería.

El des empoderamiento y exclusión ciudadana: La combinación de dependencia económica y "bajo conocimiento de los mecanismos de participación ciudadana" anula la capacidad de las comunidades para exigir sus derechos. Se sienten "incapaces de exigir un cambio" porque hacerlo podría significar perder su único medio de vida. Esto genera una ciudadanía pasiva y resignada, lo cual es funcional al modelo extractivo depredador, ya que no encuentra una oposición social organizada y efectiva.

En general, las implicaciones políticas y sociales están intrínsecamente ligadas y se retroalimentan mediante: La debilidad política e institucional (falta de control) permite que la minería informal y contaminante prolifere. Esta minería genera una dependencia económica en la comunidad, lo que debilita su capacidad de protesta y organización social. Y la falta de presión social reduce los incentivos para que los políticos actúen y fortalezcan las instituciones, perpetuando así el ciclo de abandono estatal y degradación socioambiental.

VI. CONCLUSIONES

La gestión de la minería de carbón en Sogamoso es un modelo fallido de desarrollo que prioriza la extracción a corto y no en el largo plazo sobre la sostenibilidad; es un microcosmos de un problema nacional, sostenido por una gobernanza deficiente, que conlleva a las comunidades a un ciclo de pobreza y destrucción ambiental. Lo cual se evidencia en:

Una falla sistémica de gobernanza. El problema central no es la falta de leyes ambientales (Ley 685 de 2001), sino una profunda debilidad institucional. La escasa fiscalización por parte de Corpoboyacá y la ANM permite que la minería informal y el incumplimiento normativo sean la norma, no la excepción.

El modelo económico es insostenible, dado que la actividad minera opera bajo un esquema de "extracción para la subsistencia", contrario a teorías económicas fundamentales. No se reinvierten las rentas del recurso (Regla de Hartwick) para asegurar el futuro, agotando el capital natural sin crear un reemplazo sostenible.

La externalización de costos ambientales y sociales identificada en la contaminación del agua, el suelo y el aire, así como los graves impactos en la salud pública, son asumidos por la comunidad y el medio ambiente, no por los operadores mineros. Esto es un claro ejemplo de externalidades negativas no internalizadas (teoría de Pigou).

El sistema opera bajo un enfoque de modelo lineal y desaprovechamiento de recursos consistente en "extraer-usar-desechar"; se ignoran los principios de la economía circular, perdiendo la oportunidad de transformar los residuos mineros en subproductos de valor (ej. materiales cementantes), lo que podría reducir el impacto ambiental y generar nuevas fuentes de ingreso.

El análisis estadístico (ACM) confirma que una gestión responsable está directamente ligada al conocimiento de los impactos, el cumplimiento legal y la participación activa de la comunidad. La ausencia de estos elementos perpetúa el ciclo de degradación.

Dado lo anterior, algunas recomendaciones estratégicas, para transitar hacia una minería más responsable, se proponen las siguientes acciones agrupadas por actor clave:

Para las Autoridades (ANM, Corpoboyacá, Alcaldía de Sogamoso). Fortalecer la Fiscalización: Aumentar la presencia y la capacidad de control en el territorio para asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental y minera; facilitar la formalización y crear una ventanilla única o un programa de acompañamiento técnico y legal para que los pequeños mineros puedan formalizarse, reduciendo barreras burocráticas y económicas.

Actualizar el Ordenamiento Territorial (POT): Zonificar de manera estricta las áreas aptas para la minería, protegiendo ecosistemas estratégicos y fuentes hídricas, e incluyendo directrices claras sobre el cierre de minas y la gestión de pasivos ambientales.

Para el Sector Minero: Fomentar la asociatividad, promoviendo la creación de cooperativas de pequeños mineros para que puedan acceder a créditos, tecnología más limpia e invertir conjuntamente en infraestructura para el manejo de residuos (plantas de tratamiento, escombreras técnicas); e impulsar la Economía Circular: Invertir en investigación y desarrollo para la

valorización de residuos mineros, transformándolos en nuevos productos y "cerrando el ciclo" productivo.

Para la Comunidad y la Sociedad Civil: Implementar Programas de Educación Ambiental; dirigir campañas de sensibilización a las comunidades mineras sobre los riesgos para la salud, sus derechos de participación y la normativa vigente. Además, crear Comités de vigilancia Comunitaria, capacitando a líderes locales para que realicen monitoreos ambientales básicos (calidad del agua, por ejemplo) y puedan reportar irregularidades de manera efectiva a las autoridades competentes.

Para este estudio se percibieron limitaciones en el alcance Geográfico, ya que se centra exclusivamente en el municipio de Sogamoso. Sus hallazgos, aunque representativos, no pueden generalizarse a todas las regiones mineras de Colombia sin estudios comparativos.

El alcance de este se basó principalmente en los análisis de las políticas, datos estadísticos descriptivos y la percepción de la comunidad (ACM), sin incluir mediciones fisicoquímicas directas y continuas de contaminantes en fuentes de agua, aire y suelo. No se percibe en profundidad las causas socioeconómicas. Si bien identifica la informalidad como un problema, el estudio podría no haber profundizado en los factores socioeconómicos estructurales, tales como la pobreza, la falta de alternativas económicas y violencia, que obligan a las comunidades a depender de una minería de subsistencia.

Por lo anterior, se proponen investigaciones futuras para realizar estudios epidemiológicos para cuantificar la correlación entre la actividad minera en zonas específicas y la prevalencia de enfermedades respiratorias y de la piel en la población local. Acompañar esto con un monitoreo sistemático de la calidad del agua y el aire.

Otros estudios de Viabilidad Económica de la Economía Circular: Investigar la factibilidad técnica y económica de la implementación de tecnologías para transformar los residuos del carbón en materiales de construcción a escala local y regional. Así mismo, se propone analizar la informalidad en profundidad: las barreras y motivaciones de los mineros informales para comprender qué incentivos (económicos, sociales, legales) serían más efectivos para promover su transición a la formalidad.

Al diseñar las encuestas con preguntas cerradas tener en cuenta para futuros estudios, discriminar la opción de respuestas con cuatro o más opciones de respuesta (escala Likert) con fines de identificar jerarquía o prioridad.

Finalmente, realizar estudios comparativos de gobernanza: comparar el modelo de gestión de Sogamoso con el de otras regiones mineras (nacionales o internacionales) que hayan implementado con éxito modelos de minería artesanal o de pequeña escala más sostenibles, para identificar lecciones aprendidas y buenas prácticas replicables.

VII. REFERENCIAS

- Acuerdo Municipal 013 de 2012. (2012). Por medio del cual se adopta el plan de desarrollo del municipio de Sogamoso 2012-2015 "Sogamoso, tarea de todos". Concejo Municipal de Sogamoso.
- Arango-Aramburo, S., Rojas, A., & Valencia, C. (2019). Coal mining in Colombia: An economic and social perspective. *Energy Policy*, 129, 1200–1210. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.036>
- Banchs, R., & Veiga, M. (2018). Small-scale mining in Latin America: Impacts, challenges and opportunities. United Nations Environment Programme (UNEP).
- Bebbington, A., Hinojosa, L., & Bebbington, D. (2018). Extractivism, resource governance and territory in the Andes. En The Routledge Handbook of Environmental Anthropology (págs. 377-391). Routledge.
- Bebbington, A. J., Abdulai, A.-G., Hinfelaar, M., & Sanborn, C. (2023). Resource governance and conflict in mining regions. *The Extractive Industries and Society*, 10(2), 101045. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2022.101045>
- Bridge, G. (2020). The map is not the territory: A sympathetic critique of mining and sustainable development. *The Extractive Industries and Society*, 7(3), 775–785. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.05.016>
- Brookings Institution. (2022). The future of mining in Latin America. https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2022/07/GS_07072022_LTRC-Future-Mining-Latin-America.pdf
- Bustamante, P., Ortega, R., García, O., Maya, J., Rodríguez, J., & Aguilar, T. (2021). Minería de carbón en Colombia: Transformando el futuro de la industria. Minergía.
- Castro, C. (2012). Minería informal y ambiental en el Perú. Cuadernos de Investigación del IDEHPUCP, (8), 1–41. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Cely, A. (2024). Una revisión documental de los impactos socioambientales de la política minera en la Serranía de San Lucas del Sur de Bolívar y el Bajo Cauca antioqueño [Tesis de pregrado o maestría no publicada]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

Congreso de Colombia. (1993, 22 de diciembre). Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se organiza el SINA y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial, 41.146. http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html

Congreso de Colombia. (2001, 15 de agosto). Ley 685 de 2001. Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial, 44.522.

Congreso de Colombia. (2013, 15 de julio). Ley 1658 de 2013. Por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y uso de mercurio en actividades industriales. Diario Oficial, 48.852. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/ley-1658-de-2013/>

Costanza, R., & Daly, H. E. (1992). Natural capital and sustainable development. *Conservation Biology*, 6(1), 37–46. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1992.610037.x>

Decreto 1220 de 2005. (2005, 21 de abril). Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales. Diario Oficial, 45.889. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

EnvJustice. (2024). Colonial governance in the mining sector: Las Bambas' RSC and the conflicts with the communities. <https://www.envjustice.org/2024/09/new-article-colonial-governance-in-the-mining-sector-las-bambas-rsc-and-the-conflicts-with-the-communities/>

Erwin, A. (2022). Centering community voices in mining governance. *Society & Natural Resources*, 35(10), 1216–1235. <https://doi.org/10.1080/08941920.2022.2053018>

García-Zavala, C., Jaramillo, P., & Arriagada, R. (2023). An approach for prioritising environmental, social and governance water-related risks in mining. *The Extractive Industries and Society*, 10(4), 101228. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101228>

González Millán, O. U., González Millán, J. J., & Patarroyo Gutiérrez, D. F. (2023). Modus vivendi de los mineros de carbón en la provincia del Sugamuxi en Boyacá – Colombia. *Revista Gestão e Secretariado (GeSec)*, 14(4), 52–75. <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i4.1464>

Greenacre, M. J. (2017). Correspondence analysis in practice (3rd ed.). Chapman and Hall/CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315370014>

- Gutiérrez, F., & Vargas, J. F. (2022). Environmental conflicts and social resistance in Latin American mining. *World Development*, 158, 105989. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2022.105989>
- Hartwick, J. M. (1977). Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible resources. *American Economic Review*, 67(5), 972–974.
- Hilson, G. (2014). The extractive industries and society: A critical review. Routledge.
- Hilson, G. (2016). Small-scale mining, artisanal mining, and sustainable development: A literature review. En *Mining and Society* (pág. 1-27). Routledge.
- Hilson, G., & Murck, B. (2000). Sustainable development in the mining industry: Clarifying the corporate perspective. *Resources Policy*, 26(4), 227–238. [https://doi.org/10.1016/S0301-4207\(00\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4207(00)00041-6)
- Hinton, J. J., Veiga, M. M., & Beinhoff, L. C. (2003). Women and artisanal mining: A review of the literature. *Mining, Minerals and Sustainable Development*.
- Hotelling, H. (1931). The economics of exhaustible resources. *Journal of Political Economy*, 39(2), 137–175. <https://doi.org/10.1086/254195>
- Ilele, F. M., Nie, W., Akanyange, S. N., Qifan, T., & Qiu, B. (2024). Cassava starch-based copolymer gel with surfactant: An eco-friendly dust suppression solution in coal mining. *Journal of Environmental Engineering*, 150(6). <https://doi.org/10.1061/JOEEDU.EEENG-7663>
- International Council on Mining and Metals (ICMM). (2018). Tailings Management: Good Practice Guide.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

- Klein, L., Brinks, D. M., & Davis, M. (2023). A comparative account of Indigenous participation in environmental decision-making: FPIC in practice. *The Extractive Industries and Society*, 10(3), 101111. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101111>
- Leguizamo Castellanos, A. T., & Ruiz Rodríguez, J. S. (2019). Impactos ambientales de la minería de carbón sobre el recurso hídrico en el departamento de Boyacá. *Boletín Semillas Ambientales*, 13(2), 24–35.
- McDonald, R. P. (1999). Test theory: A unified treatment. Lawrence Erlbaum Associates.
- Natural Resource Governance Institute (NRGI). (2023). Chile's National Lithium Strategy: Key governance questions. <https://resourcegovernance.org/articles/chiles-national-lithium-strategy-key-governance-questions>
- Newig, J., Challies, E., & Koehler, B. (2023). Does stakeholder participation improve environmental governance? A meta-analysis. *Global Environmental Change*, 80, 102626. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102626>
- Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2010). La seguridad y la salud en la minería de pequeña escala: Guía de buenas prácticas.
- Ospina Díaz, J. M., Manrique Abril, F. G., & Guío Garzón, J. A. (2010). Salud y trabajo: Minería artesanal del carbón en Paipa, Colombia. *Revista de Salud Pública*, 12(1), 125–137.
- Pearce, D., Markandya, A., & Barbier, E. B. (1989). Blueprint for a green economy. Earthscan.
- Pérez-Mora, J., Forero-Avendaño, L. Y., & Suárez-Sánchez, L. (2021). Afectación de la calidad del agua por actividades mineras en la provincia de Sugamuxi, Boyacá. *Revista Luna Azul*, 52, 1–18.
- Pérez-Mora, W. R., Useche-de-Vega, D. S., & Triviño-Restrepo, M. D. P. (2021). Análisis ambiental de la minería de carbón en el ecosistema estratégico de páramo (Boyacá, Colombia). *Scientia et Technica*, 26(3), 398–405. <https://doi.org/10.22517/23447214.24519>
- Pigou, A. C. (1920). The economics of welfare. Macmillan.
- Pinedo, S., & Huertas, G. (2017). Impacto de la actividad minera en la salud mental de las comunidades rurales en el Caribe colombiano. *Psicología y Caribe*, 34(1), 59–71.

Procuraduría General de la Nación. (2024, 13 de diciembre). Minería ilegal afecta a 29 de los 32 departamentos de Colombia, según informe de la Procuraduría. <https://www.procuraduria.gov.co/portal/mineria-ilegal-afecta-29-departamentos-colombia-informe-procuraduria.news>

Ross, M. L. (2012). *The oil curse: How petroleum wealth shapes the development of nations*. Princeton University Press.

Sánchez-Vázquez, L., Romero, R., & García-Tenorio, R. (2021). Environmental impacts of illegal mining in Colombia: A socio-ecological analysis. *Resources Policy*, 74, 102297. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102297>

Sandoval, L. E., Marín, M., & Almanza, A. M. (2017). Explotación de recursos naturales y conflicto en Colombia. *Revista de Economía Institucional*, 19(37), 241–264. <https://doi.org/10.18601/01245996.n37.09>

Schwarz, M., Veverka, M., Michalková, E., Lalík, V., & Veverková, D. (2012). Utilización de residuos industriales para la producción de pigmentos de ferrita. *Chemical Papers*, 66(9), 861–867. <https://doi.org/10.2478/s11696-012-0154-2>

Serrano, A. M., Martínez Bernal, M., & Fonseca Páez, L. A. (2016). Diagnóstico y caracterización de la minería ilegal en el municipio de Sogamoso. *Revista Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas*, 17(1), 104–121.

Sovacool, B. K., Ali, S. H., Bazilian, M., Radley, B., Nemery, B., Okatz, J., & Mulvaney, D. (2020). Sustainable minerals and metals for a low-carbon future. *Science*, 367(6473), 30–33. <https://doi.org/10.1126/science.aaz6003>

Svedova, J., Veverka, M., Michalková, E., Lalík, V., & Veverková, D. (2020). Valorisation of mining waste in cement industry: A review. *Waste Management*, 114, 148–164.

UNDP – Environmental Governance Programme. (2022). Peru: Environmental governance and community participation. <https://www.environmentalgovernanceprogramme.org/peru>

Veiga, M. M., & Hinton, J. J. (2002). Artisanal and small-scale mining: Challenges and opportunities for sustainable development. International Institute for Environment and Development (IIED).

World Commission on Environment and Development (WCED). (1987). Our common future. Oxford University Press.

Younger, P. L., & Wolkersdorfer, C. (2004). Mining impacts on the freshwater environment: Technical and managerial guidelines. En Mining and the environment (págs. 209-247). Springer.

Zhang, X., Gao, L., Barrett, D., & Chen, Y. (2013). A multicriteria assessment of water management for sustainable mining. In MODSIM2013, 20th International Congress on Modelling and Simulation (pp. 2295–2301). Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Ficha Técnica de las Entrevistas Semi-estructuradas

Elemento Metodológico	Descripción
Título del estudio	Prácticas de sostenibilidad de los recursos derivados de las minas de carbón. Caso Municipio de Sogamoso, Boyacá.
Objetivo de las entrevistas	Profundizar en las prácticas de gestión de residuos mineros, el cumplimiento normativo, los procesos de seguimiento y control, y la percepción de los actores clave sobre la problemática minero-ambiental en Sogamoso.
Población objetivo	Operadores mineros (formales e informales), funcionarios de entidades gubernamentales con competencia ambiental y minera, y líderes comunitarios de zonas de influencia minera.
Tipo de muestreo	No probabilístico por conveniencia y bola de nieve.

Tamaño y composición de la muestra	<p>Total: 23 entrevistas. Funcionarios de entidades de control: 5 (2 de la Secretaría de Ambiente de Sogamoso, 2 de Corpoboyacá, 1 de la Agencia Nacional de Minería - seccional Boyacá) • Operadores mineros: 8 (dueños o administradores de minas de pequeña y mediana escala) • Líderes comunitarios: 10 (presidentes de Juntas de Acción Comunal y miembros de comités ambientales de las veredas).</p>
Instrumento de recolección	Guion de entrevista semi-estructurada, con preguntas abiertas agrupadas por ejes temáticos.
Período de campo	Febrero - Marzo de 2024.
Ámbito geográfico	Veredas Morca, Pedregal, Ombachita y casco urbano del municipio de Sogamoso, Boyacá.
Ejes temáticos abordados	<p>1. <i>Para operadores</i>: Proceso de extracción, manejo de estériles y aguas de mina, conocimiento y cumplimiento de la normativa, costos de formalización, relación con la comunidad.</p> <p>2. <i>Para funcionarios</i>: Procedimientos de licenciamiento y fiscalización, capacidad institucional, principales desafíos de control, relación con el sector minero.</p> <p>3. <i>Para líderes comunitarios</i>: Percepción de impactos (agua, aire, salud), canales de comunicación con empresas y gobierno, nivel de participación en decisiones, necesidades y expectativas de la comunidad.</p>
Consideraciones éticas	Se obtuvo el consentimiento informado verbal de todos los participantes. Se garantizó la confidencialidad y el anonimato de

sus identidades y las de sus organizaciones en el análisis y la publicación de resultados.

Anexo 2: Resultados Análisis de Correspondencias Múltiples

```
Multiple/Joint correspondence analysis          Number of obs      =       80
                                                Total inertia     = .06738542
Method: Burt/adjusted inertias                Number of axes    =        2
```

Dimension	principal	cumul	
	inertia	percent	percent
dim 1	.0298911	44.36	44.36
dim 2	.0099107	14.71	59.07
dim 3	.0019718	2.93	61.99
dim 4	.0014043	2.08	64.08
dim 5	.0002931	0.43	64.51
dim 6	.0001437	0.21	64.72
Total	.0673854	100.00	

Categories	overall			dimension_1			dimension_2			
	mass	quality	%inert	coord	sqcorr	contrib	coord	sqcorr	contrib	
P1	Si	0.185	0.367	0.006	0.028	0.365	0.005	0.002	0.002	0.000
	No	0.010	0.209	0.036	0.225	0.208	0.017	-0.020	0.002	0.000
	No sabe	0.005	0.651	0.257	-1.503	0.651	0.378	-0.027	0.000	0.000
P2	si, direct-e	0.155	0.762	0.025	0.091	0.761	0.043	-0.004	0.001	0.000
	No hay rel-n	0.030	0.846	0.052	-0.302	0.783	0.091	0.085	0.062	0.022
	No sabe	0.015	0.439	0.068	-0.341	0.383	0.058	-0.131	0.056	0.026
P3	Si	0.030	0.609	0.058	0.085	0.056	0.007	-0.268	0.554	0.217
	No	0.170	0.609	0.010	-0.015	0.056	0.001	0.047	0.554	0.038
P4	Nunca	0.170	0.655	0.013	0.031	0.183	0.005	0.050	0.472	0.042
	Alguna vez	0.025	0.587	0.079	0.068	0.022	0.004	-0.346	0.565	0.302
	Frecuentem-e	0.005	0.663	0.217	-1.393	0.662	0.325	0.041	0.001	0.001
P5	Contaminac-a	0.088	0.455	0.042	-0.106	0.348	0.033	-0.059	0.108	0.031
	Polvo en a-s	0.060	0.252	0.050	0.062	0.068	0.008	-0.102	0.184	0.063
	Daño en pa-s	0.027	0.517	0.028	0.075	0.082	0.005	0.173	0.435	0.083
	Ruido y vi-s	0.013	0.527	0.034	0.196	0.213	0.016	0.239	0.314	0.072
	Otro/ No s-e	0.013	0.661	0.024	0.083	0.052	0.003	0.283	0.609	0.101

Fuente: Datos obtenidos de la encuesta comunidades mineras y procesados en STATA V17