

Identificación de áreas con riesgo de pasivos ambientales mineros en el municipio de Zaragoza, Antioquia utilizando análisis geoespacial

Angie Johana Gómez Tovar

Fabian Hernando González Briceño

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Asesora:

M.Sc. Ana María Giraldo Patiño

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2025

Resumen

En el presente trabajo, se adaptó la metodología del Ministerio de Minas y Energía para identificar las zonas con riesgo potencial de tener pasivos ambientales mineros en el municipio de Zaragoza, Antioquia. Dicha metodología contempla tres dimensiones de vulnerabilidad: física, ambiental y social, las cuales se analizan en función de la probabilidad de ocurrencia de eventos naturales, como inundaciones, avenidas torrenciales y deslizamientos de tierra. A partir de este análisis, se elaboraron mapas específicos para cada dimensión, los cuales fueron integrados en un mapa multidimensional de riesgo, facilitando la toma de decisiones y la planificación territorial.

Además, se elaboró una matriz que relaciona las actividades mineras con sus aspectos ambientales asociados y los impactos generados, lo que permite una comprensión integral de las interacciones entre la minería y el medio ambiente. Este enfoque proporciona herramientas para una gestión más efectiva y sostenible de los PAM.

Se concluye que el uso de fuentes de información secundaria, combinado con sistemas de información geográfica (SIG), permite una identificación del riesgo en la región de las zonas más susceptibles de tener PAM, ofreciendo una alternativa a las limitaciones impuestas por la falta de información primaria. Así mismo, se destaca que la implementación de políticas efectivas es esencial para abordar los desafíos ambientales y sociales derivados de la minería. La restauración ambiental y la sostenibilidad a largo plazo son fundamentales para mejorar la calidad de vida de las comunidades afectadas. El proyecto subraya la necesidad de un enfoque proactivo en la gestión de PAM, promoviendo la colaboración entre autoridades, investigadores y comunidades

locales para garantizar un entorno más saludable y seguro para las generaciones presentes y futuras.

Palabras clave: Pasivo ambiental minero, impactos ambientales, análisis geoespacial, minería, sitios mineros abandonados.

Abstract

In this work, the methodology of the Ministry of Mines and Energy was adapted to assess the risks in areas susceptible to becoming mining environmental liabilities in the municipality of Zaragoza, Antioquia. This methodology contemplates three dimensions of vulnerability: physical, environmental and social, which are analyzed based on the probability of occurrence of natural events, such as floods, torrential floods and land sizes. Based on this analysis, specific maps were prepared for each dimension, which were integrated into a multidimensional risk map, facilitating decision-making and territorial planning.

In addition, a matrix was developed that relates mining activities with their associated environmental aspects and the impacts generated, which allows a comprehensive understanding of the interactions between mining and the environment. This approach provides tools for more effective and sustainable management of PAMs.

It is concluded that the use of secondary information sources, combined with spatial analysis tools and geographic information systems (GIS), allowed a risk assessment in the region to identify the area's most susceptible to having PAM, offering an alternative to the limitations imposed by the lack of primary information. Likewise, it is highlighted that the implementation of effective policies is essential to address the environmental and social challenges derived from mining. Environmental restoration and long-term sustainability are fundamental to improving the quality of life of the affected communities. The project underlines the need for a proactive approach in the management of PAM, promoting collaboration between authorities, researchers and local communities to ensure a healthier and safer environment for present and future generations.

Keywords: Mining environmental liabilities, environmental impacts, geospatial analysis, mining, abandoned mining sites.

Contenido

1	Planteamiento del problema de investigación y su justificación	12
1.1	Descripción Del Área Problemática.....	12
1.2	Formulación Del Problema.....	13
1.3	Justificación	13
2	Objetivos.....	15
2.1	Objetivo General.....	15
2.2	Objetivos Específicos.....	15
3	Antecedentes.....	16
4	Referente Normativo Y Legal.....	20
5	Referente teórico.....	24
5.1	Introducción a los Pasivos Ambientales Mineros (PAM).....	24
5.2	Uso de Análisis Geoespacial en la Evaluación de PAM.....	30
5.3	Contexto Regional: Zaragoza, Antioquia	33
6.	Metodología	36
6.1.	Enfoque Metodológico.....	36
6.2.	Tipo De Estudio	37
6.3.	Procedimiento	37
7.	Referente Contextual	61
7.1.	Caracterización Del Área De Estudio.....	61
7.2.	Identificación De Amenazas	72
8.	Resultados.....	75
8.1.	Fase 1: Adaptación de la metodología propuesta por el MinMinas.....	75
8.2.	Fase 2: Identificación de los principales impactos ambientales generados por las actividades mineras.	82
8.3.	Fase 3: Elaboración de un mapa de las zonas con riesgo de configurarse como pasivos ambientales mineros en el municipio de Zaragoza	87
8.4.	Fase 4: Analizar cómo la información generada puede contribuir a la toma de decisiones de las autoridades ambientales y mineras	90
9.	Discusión de Resultados	94

10. Conclusiones	99
11. Recomendaciones	102
12. Referencias.....	104

Listado de Tablas

	Pág.
Tabla 1	20
Tabla 2	32
Tabla 3	38
Tabla 4	41
Tabla 5	42
Tabla 6	43
Tabla 7	45
Tabla 8	45
Tabla 9	46
Tabla 10	46
Tabla 11	47
Tabla 12	48
Tabla 13	50
Tabla 14	51
Tabla 15	52
Tabla 16	53
Tabla 17	54
Tabla 18	55
Tabla 19	57
Tabla 20	58
Tabla 21	62
Tabla 22	64
Tabla 23	66
Tabla 24	68
Tabla 25	70
Tabla 26	76
Tabla 27	81

Tabla 28.	84
Tabla 29.	88
Tabla 30.	93

Listado de Figuras

	Pág.
Figura 1.	20
Figura 2.	27
Figura 3.	28
Figura 4.	29
Figura 5.	34
Figura 6.	37
Figura 7.	38
Figura 8.	39
Figura 9.	40
Figura 10.	41
Figura 11.	42
Figura 12.	43
Figura 13.	53
Figura 14.	57
Figura 15.	59
Figura 16.	61
Figura 17.	63
Figura 18.	64
Figura 19.	65
Figura 20.	67
Figura 21.	69
Figura 22.	70
Figura 23.	71
Figura 24.	72
Figura 25.	73
Figura 26.	74
Figura 27.	75

Figura 28	77
Figura 29	78
Figura 30	79
Figura 31	80
Figura 32	81
Figura 33	82
Figura 34	87
Figura 35	89

Listado de abreviaturas

Abreviatura	Término
ANM	Agencia Nacional de Minería
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
ANDI	Asociación Nacional de Empresarios de Colombia
ASGMI	Agencia de Servicios de Geología y Minería
ArcGIS	Software licenciado para implementación de Sistemas de Información Geográfica desarrollado por ESRI©
CEPAL	La Comisión Económica para América Latina y el Caribe
DAM	Drenajes Ácidos de Minas
DEM	Digital Elevation Model
ESRI	Environmental Systems Research Institute
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
MinAmbiente	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MinMinas	Ministerio de Minas y Energía
PAM	Pasivo Ambiental Minero
PIB	Producto Interno Bruto
RCD	Residuo de Construcción y Demolición
SAR	Synthetic Aperture Radar (Radar de apertura sintética)
SIG	Sistemas de Información Geográfica

1 Planteamiento del problema de investigación y su justificación

1.1 Descripción Del Área Problemática

Durante décadas, la minería ha sido un pilar fundamental de la economía en los países de América Latina, donde abundan los recursos naturales (CEPAL, 2023). Sin embargo, tanto la explotación minera legal como ilegal, realizada con tecnologías obsoletas y en un marco regulatorio deficiente, ha generado impactos significativos en la salud pública, la biodiversidad y el desarrollo sostenible, lo que ha desencadenado múltiples conflictos.

A lo largo del tiempo, se han generado y acumulado Pasivos Ambientales Mineros (PAM) debido al cierre no sistemático o el abandono de las minas, lo que ha provocado impactos tanto ambientales como socioeconómicos (González & Pérez, 2018). Esta situación ha deteriorado la calidad del aire, agua y el suelo, afectando directamente la salud y bienestar de las comunidades locales.

Según el *Boletín Estadístico Informativo Minería en Cifras 2024* de la Agencia Nacional de Minería (ANM), Colombia cuenta con 6.858 títulos mineros otorgados al 31 de octubre de 2024 y los materiales de construcción son los recursos más explotados, seguidos por el oro y otros metales preciosos. Además, el departamento de Antioquia lidera la ocupación laboral en el sector minero, con un 26.6% a diferencia de otros departamentos.

En el departamento de Antioquia, el municipio de Zaragoza ha sido considerado un importante distrito minero desde el siglo XIX, destacándose por la extracción de oro, plata y platino (Mollyeth, 2015). No obstante, la minería informal y la falta de control han generado, a lo

largo del tiempo, la generación de diversos PAM, aumentando el riesgo para la salud humana y alterando significativamente las condiciones naturales del entorno.

La reciente promulgación de la Ley 2327 de 2023 representa un avance en la gestión de PAM en Colombia. En su artículo 8, establece que: “Los casos en los que las autoridades ambientales identifiquen la existencia de un área en sospecha de tener pasivos ambientales, tendrán que adelantar los estudios preliminares de riesgos que sean necesarios para determinar la configuración del pasivo ambiental” (P. 3).

De acuerdo con lo anterior, esta ley establece un marco regulatorio más estricto y preciso para la identificación y gestión de los pasivos ambientales generados por la actividad minera. También, busca crear un sistema de información que registre la ubicación de estos pasivos y sus responsables, facilitando su control, seguimiento y manejo. Su implementación es fundamental para mitigar los impactos ambientales y sociales derivados de la minería y la falta de regulación en municipios como Zaragoza.

1.2 Formulación Del Problema

¿Cómo se pueden integrar herramientas SIG en el estudio de riesgo de zonas con alto potencial de configurarse como pasivos ambientales mineros (PAM) con el fin de facilitar la toma de decisiones por parte de las autoridades mineras y ambientales?

1.3 Justificación

El municipio de Zaragoza se destaca como uno de los principales distritos mineros de la región, lo que ha generado el desarrollo de actividades extractivas, muchas de ellas en condiciones de ilegalidad. Esta situación ha generado impactos ambientales significativos, lo que

a su vez ha contribuido al incremento de los pasivos ambientales mineros (PAM) deteriorando la calidad de vida de las comunidades aledañas, agravando las problemáticas sociales y económicas.

En este contexto, el presente proyecto se alinea con los lineamientos de la Ley 2327 de 2023, la cual establece en su artículo 8 que, en los casos donde las autoridades ambientales identifiquen áreas con sospecha de contener PAM, deben llevarse a cabo estudios preliminares de riesgo para su caracterización. En concordancia con esta normativa, el estudio desarrollado en Zaragoza busca aportar a la generación de conocimiento mediante el uso de los SIG, facilitando la toma de decisiones informadas y efectivas, con la posibilidad de replicarse en otros proyectos.

El uso de estas herramientas permitió realizar los estudios de riesgo adaptando la metodología propuesta por el Ministerio de Minas y Energía para identificar las zonas de alto riesgo con potencial de configurarse como PAM. Esto contribuye a que los tomadores de decisiones puedan implementar las acciones necesarias para su intervención. Al abordar los PAM de manera proactiva, se busca evitar que los problemas ambientales se agraven con el tiempo.

Es importante destacar que en Colombia aún son escasos los proyectos que integran herramientas SIG para la identificación de zonas con riesgo de configurarse como PAM, lo que resalta la relevancia de este estudio y motiva a la comunidad académica a incorporar estas tecnologías. Además, la generación de mapas temáticos permite identificar con mayor precisión las áreas de riesgo, proporcionando información clave para que las autoridades competentes fortalezcan sus procesos de toma de decisiones y gestión ambiental.

2 Objetivos

Con el objetivo de contribuir a la implementación efectiva de la Ley 2327 de 2023 y abordar los desafíos ambientales y sociales generados por la minería en Zaragoza, este estudio se propone alcanzar los siguientes objetivos:

2.1 Objetivo General

Identificar zonas de riesgo de configurarse como pasivos ambientales mineros en el municipio de Zaragoza, Antioquia, mediante el uso de herramientas SIG.

2.2 Objetivos Específicos

1. Adaptar la metodología propuesta por el Ministerio de Minas y Energía para la realización de estudios de riesgo que permitan identificar las zonas con alto potencial de configurarse como pasivos ambientales mineros en Zaragoza.
2. Identificar los principales impactos ambientales generados por las actividades mineras.
3. Elaborar un mapa de las zonas con riesgo de configurarse como pasivos ambientales mineros en el municipio de Zaragoza, mediante la combinación de mapas de vulnerabilidad y amenaza.
4. Analizar cómo la información generada puede contribuir a la toma de decisiones de las autoridades ambientales y mineras para la remediación y gestión sostenible de los PAM.

3 Antecedentes

El crecimiento económico global a lo largo de los años se ha basado en gran medida en la explotación de los recursos naturales, consolidando un modelo extractivista donde la actividad minera y la explotación de canteras son sectores claves para la economía de varios países (Bruguera et al., 2020). Sin embargo, este modelo ha generado repercusiones ambientales y sociales. En consecuencia, la primera conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente, celebrada en Estocolmo en 1972, propuso un enfoque de crecimiento económico que estuviera en armonía con la naturaleza.

Las actividades extractivas, realizadas sin controles adecuados, han dejado daños irreversibles en el medio ambiente como afectaciones a la salud, alteraciones del paisaje, pérdida de la biodiversidad, entre otros (Russi y Martínez, 2002). Adicionalmente, Cervantes y Quito (2020) destacan que la contaminación de aguas superficiales y subterráneas es uno de los mayores impactos ambientales de la minería, por lo que se deben implementar metodologías con indicadores medibles que permitan evaluar de una manera integral todos los efectos generados.

En Colombia, la minería sostenible aún no ha sido consolidada como una prioridad, y las metodologías para garantizar una minería responsable resultan insuficientes (Fuerte y Ramírez, 2021). Este vacío normativo es particularmente evidente en municipios como Zaragoza, donde las actividades mineras, realizadas, han intensificado los impactos ambientales, creando desafíos relevantes para la gestión y mitigación de estos efectos.

Estos impactos han dado lugar a la aparición de pasivos ambientales que de acuerdo con el artículo 2 de la ley 2327 de 20223 se definen como: Afectaciones ambientales originadas por

actividades antrópicas directa o indirectamente por la mano del hombre, autorizadas o no, acumulativas o no, susceptibles de ser medibles, ubicables y delimitables geográficamente, que generan un nivel de riesgo no aceptable a la vida. (Congreso de la República de Colombia, 2023, p.1)

A lo largo de las distintas etapas de la minería, se producen alteraciones significativas en el medio ambiente, las cuales pueden convertirse en PAM si no se mitigan adecuadamente desde el inicio. Por lo que, es fundamental implementar estrategias que permitan identificar y gestionar estos impactos de manera temprana. En Colombia, dichas estrategias deben adaptarse a los tres tipos de minería presentes en el país: a pequeña, mediana y gran escala (Pinto, 2020).

Es importante destacar que Colombia aun no cuenta con un inventario de los PAM ni de las minas cerradas, lo que hace más complejo el alcance de la problemática socioambiental (López et al., 2017). En este contexto, la reciente promulgación de la Ley 2327 de 2023 cobra relevancia, especialmente en su artículo 8, que establece la obligación de las autoridades ambientales competentes de realizar estudios preliminares de riesgos en áreas sospechosas de contener pasivos ambientales.

En 2023, el Ministerio de Minas y Energía propuso una metodología para realizar el análisis de riesgos en áreas con sospecha de tener PAM, mediante herramientas de análisis espacial, lo que facilita la identificación de vulnerabilidades y amenazas en las actividades mineras. Este enfoque incluye el procesamiento de datos espaciales y la elaboración de cartografía, permitiendo analizar los cambios socio-territoriales, evaluar la evolución espacial del área de estudio y comprender las repercusiones de la actividad humana sobre el medio ambiente (Rodríguez et al., 2021).

Además, el procesamiento de datos estadísticos y geográficos y la generación de cartografía digital mediante el uso de herramientas automatizadas como ArcGIS Pro, permite reproducir un riesgo minero en diferentes escenarios e integrar los resultados en mapas temáticos (Hernández et al., 2017). Esto es importante, debido a que se podrían clasificar las minas abandonadas de acuerdo con la magnitud de riesgo que presentan (Toro, 2017).

No obstante, la experiencia de otros países puede servir como referencia para proponer políticas y acciones más efectivas. Por ejemplo, Perú es pionero en Suramérica en este ámbito, ha implementado instrumentos de gestión que incluyen la obligación de los titulares de concesiones mineras de informar sobre la existencia de PAM en sus áreas concesionadas (González, 2008). En contraste con Colombia, el proceso sigue un enfoque diferente: primero, se deben identificar los PAM, y posteriormente la autoridad ambiental tomará las medidas necesarias para determinar el responsable.

Al comparar las acciones de otros países frente a la misma problemática, se puede lograr tener un instrumento valioso para la identificación de PAM con un enfoque integral, en el cual se remedien los impactos negativos que causa la explotación minera que no se prevén y que son aumentados por el abandono de las actividades mineras (Céspedes et al., 2023).

Posteriormente, al establecer e identificar los PAM, se deben proponer medidas de manejo sobre los impactos mineros significativos formulando diferentes programas relacionados con el suelo y los recursos hídricos (Bustos, 2023). Para implementar medidas de remediación, restauración, rehabilitación o aislamiento de las áreas afectadas, es esencial analizar varios aspectos como el tiempo; que daños se causaron en el pasado y se han ido acumulando, el

espacio; los daños se pueden dispersar, y la responsabilidad de la afectación (Arango y Olaya, 2012).

En consecuencia, la minería genera diversos impactos como los cambios substanciales en las formas del relieve, la destrucción de la cubierta vegetal y el suelo, lo que modifica el entorno biológico durante el tiempo que se realiza las actividades mineras y si no se implementan acciones de remediación o rehabilitación, estos impactos pueden dar lugar a los PAM (ASGMI, 2020). Por lo tanto, es fundamental que las autoridades competentes realicen un seguimiento de las áreas en sospecha de ser PAM.

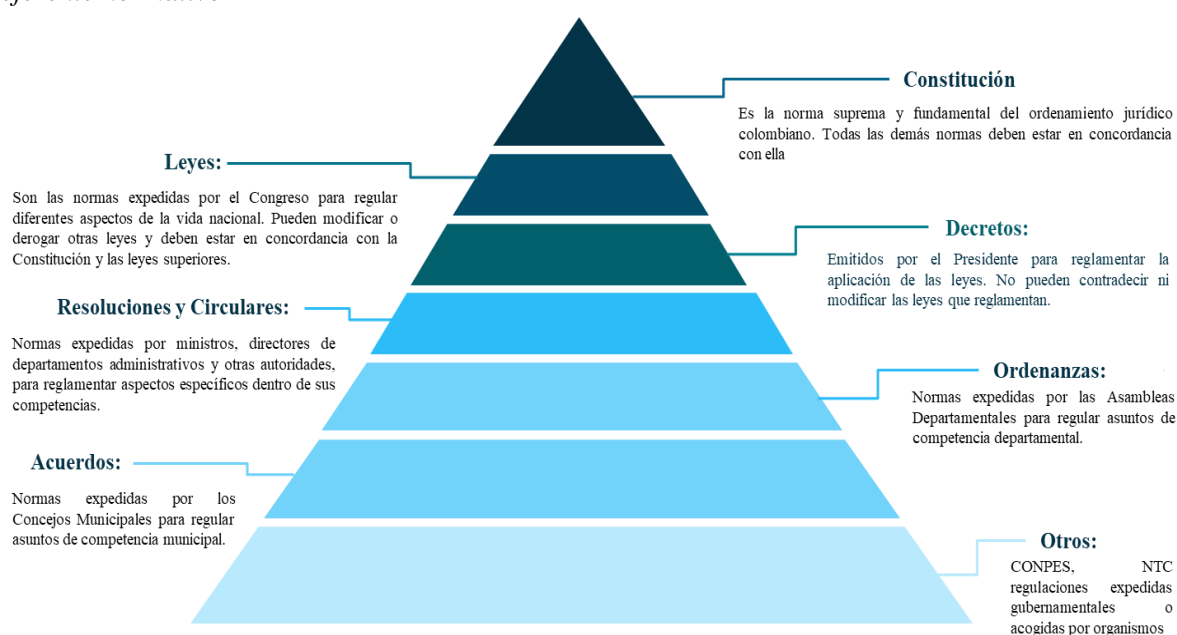
Para adelantar los estudios de riesgo de manera oportuna y al poder utilizar tecnologías geoespaciales en la configuración de estos, se pueden analizar patrones espaciales y generar mapas temáticos para obtener resultados más precisos y priorizar las zonas que requieren medidas de manejo. Esto no solo optimiza la gestión ambiental, sino que también fortalece la toma de decisiones de las autoridades competentes.

4 Referente Normativo Y Legal

El referente normativo y legal del proyecto se construyó a partir del esquema de Kelsen, el cual permite organizar jerárquicamente el orden de prevalencia entre las diferentes normas y leyes del país. A continuación, se presenta la estructura desde el nivel más alto hasta el más bajo:

Figura 1.

Referente normativo



Fuente: Autores, 2025

Esta estructura jerárquica asegura que las normas inferiores no contravengan a las superiores y permite un orden claro en la aplicación y el cumplimiento del derecho en Colombia.

En la siguiente tabla se encuentran las leyes, decretos y regulaciones en materia de pasivos ambientales y minería, y la especificidad de los artículos relevantes.

Tabla 1.

Marco normativo – Pasivos Ambientales Mineros

			NORMA			ENTE REGULADOR	CONTENIDO
TIPO	NÚMERO	AÑO	REGLAMENTACIÓN	ALCANCE	AUTORIDAD	DESCRIPCIÓN	
Ley	99	1993	“por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.”	Nacional	Congreso de la República	Licencia Ambiental como requisito para la explotación de minas, la cual incluye el Estudio de Impacto Ambiental (EIA)	
Ley	685	2001	"Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones"	Nacional	Congreso de la República	Plan de cierre y abandono como parte del programa de trabajo y Obras (PTO) y del EIA	
Ley	1333	2009	“Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones.”	Nacional	Congreso de la República	Sanciones al infractor al ejecutar obras de remediación ordenadas por la autoridad ambiental	
Decreto	2820	2010	“Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.”	Nacional	Presidencia de la República	Contenido mínimo de los estudios previos a la fase de desmantelamiento o abandono y constitución de pólizas de garantía	
Decreto	0381	2012	“por el cual se modifica la estructura del Ministerio de Minas y Energía”	Nacional	Presidencia de la República	Define la función de “Formular políticas orientadas a que las actividades que desarrollen las empresas del sector minero – energético garanticen el desarrollo sostenible los recursos naturales no renovables”	
Decreto	933	2013	“Por el cual se dictan disposiciones en materia de formalización de minería tradicional y se modifican unas definiciones del Glosario Minero.”	Nacional	Presidencia de la República	Eventos en que las autoridades ambientales pueden imponer medidas de restauración y rehabilitación del medio ambiente con el objeto de efectuar un adecuado cierre de minas.	

NORMA			ENTE REGULADOR		CONTENIDO	
TIPO	NÚMERO	AÑO	REGLAMENTACIÓN	ALCANCE	AUTORIDAD	DESCRIPCIÓN
Decreto	480	2014	“Por el cual se reglamenta las condiciones y requisitos para la celebración y ejecución de los subcontratos de formalización minera.”	Nacional	Ministerio de Minas y Energía	Regula las condiciones y requisitos para la celebración y ejecución, por parte del titular minero del "Subcontrato de Formalización Minera" con aquellos explotadores mineros de pequeña escala o pequeños mineros definidos por el Ministerio de Minas y Energía, que a la fecha de expedición de la Ley 1658 de 2013, se encuentren adelantando actividades de explotación dentro de áreas otorgadas mediante título minero en cualquiera de sus etapas.
Decreto	1076	2015	“Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible a partir de la fecha de su expedición.”	Nacional	Presidencia de la República	Planes de desmantelamiento y abandono y obligaciones del generador de residuos.
Decreto	2504	2015	"Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario No 1073 de 2015 que define los aspectos técnicos, tecnológicos, operativos y administrativos para ejercer la labor de fiscalización minera y se toman otras determinaciones"	Nacional	Presidencia de la República	Regular las actividades de fiscalización en los títulos mineros y en los subcontratos de formalización minera.
Resolución	0414	2014	“Por la cual se adopta los términos de referencia para la elaboración de los Programas de Trabajos y Obras Complementarios (PTOC) de los Subcontratos de Formalización Minera”	Nacional	Agencia Nacional de Minería	Se adopta los términos de referencia para la elaboración de los Programas de Trabajos y Obras Complementarios (PTOC) de los Subcontratos de Formalización Minera

NORMA			ENTE REGULADOR		CONTENIDO	
TIPO	NÚMERO	AÑO	REGLAMENTACIÓN	ALCANCE	AUTORIDAD	DESCRIPCIÓN
Resolución	143	2017	“Por medio de la cual se deroga la Resolución 428 de 2013, modificada por la Resolución 551 de 2013 y se adoptan los términos de referencia señalados en el literal f del artículo 271, los artículos 278, 339 y 340 del Código de Minas y se dictan otras disposiciones.”	Nacional	Agencia Nacional de Minería	Se adoptan los términos de referencia señalados en el literal f del artículo 271, los artículos 278, 339 y 340 del Código de Minas
Guía		2002				Actividades y Medidas específicas aplicables al abandono y cierre de minas

Fuente: Autores, 2025

5 Referente teórico

5.1 Introducción a los Pasivos Ambientales Mineros (PAM)

En el año 2000 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible acotó el concepto de “Pasivos Ambientales” como:

la transferencia de recursos contables (monetización) producto del ejercicio de la internalización en la contabilidad de una empresa o proyecto, de deudas ambientales no saldadas constituidas por daños ambientales ocurridos en el presente o en el pasado por actividades que afectan de manera adversa el medio ambiente.

(MinMinas, 2024, p.5)

Posteriormente, la definición de PAM en Colombia se configuro a partir de interpretaciones generales de normativas ambientales y mineras, como el Decreto 1076 de 2015 y la Ley 685 de 2001 (Código de Minas). En ese contexto, los pasivos ambientales fueron entendidos como impactos negativos acumulados asociados a actividades productivas, particularmente aquellas abandonadas o sin responsables identificados (Pérez y González, 2018). Esta perspectiva carecía de una metodología estandarizada para su identificación y priorización, lo que dificultaba la gestión efectiva de los PAM.

Es así como con la promulgación de la ley 2327 de 2023, los pasivos ambientales mineros (PAM) fueron definidos como:

las afectaciones ambientales originadas por actividades antrópicas directa o indirectamente por la mano del hombre, autorizadas o no, acumulativas o no,

susceptibles de ser medibles, ubicables y delimitables geográficamente, que generan un nivel de riesgo no aceptable a la vida, la salud humana o el ambiente. (Congreso de la República de Colombia, 2023, p.1)

Esta definición resalta la responsabilidad de identificar, priorizar y gestionar los riesgos derivados de actividades mineras históricas que han dejado huellas ambientales negativas. La implementación de la ley 2327 marca un avance significativo al establecer criterios claros y metodologías específicas para abordar los pasivos ambientales mineros, alineándose con mejores prácticas internacionales y promoviendo la remediación de áreas afectadas por la minería.

5.1.1. Clasificación de los PAM

Los pasivos ambientales mineros (PAM) representan una problemática ambiental significativa debido a los impactos que generan en suelos, aguas y ecosistemas. Su adecuada clasificación permite evaluar su riesgo, definir estrategias de mitigación y establecer responsabilidades. Se han propuesto varios sistemas de clasificación basados en distintos criterios, tales como su naturaleza física, origen, nivel de riesgo, estado actual y tipo de impacto ambiental (Ver Figura 2). A continuación, se describen los principales tipos de PAM:

1. Según su Naturaleza Física

- Residuos sólidos mineros: Incluyen escombros, pilas de lixiviación y otros desechos generados por la extracción y procesamiento de minerales

- **Relaves y jales mineros:** Son acumulaciones de material residual de procesos metalúrgicos, con potenciales contaminantes como metales pesados y arsénico.
- **Infraestructura abandonada:** Restos de instalaciones mineras como túneles, chimeneas y depósitos de desechos, que pueden representar riesgos físicos y químicos.

2. Según su Origen

- **Históricos:** Proviene de operaciones mineras cerradas antes de la implementación de regulaciones ambientales modernas.
- **Contemporáneos:** Se generan en el contexto de la minería actual y están sujetos a regulaciones ambientales.

3. Según el Nivel de Riesgo

- **Contaminación de suelos:** Se debe a la deposición de metales pesados, arsénico y otros elementos tóxicos.
- **Contaminación de aguas:** Incluye drenaje ácido de mina y lixiviación de contaminantes.
- **Degradación paisajística:** Modificaciones irreversibles en la geomorfología del terreno, afectando ecosistemas y comunidades.

4. Según su Estado Actual

- **Activos:** PAM que siguen generando contaminación de manera continua.
- **Latentes:** PAM que no generan contaminación actualmente, pero pueden activarse debido a cambios ambientales.

- **Estabilizados:** Aquellos que han sido sometidos a procesos de remediación y presentan bajo riesgo ambiental.

5. Según el Tipo de Impacto Ambiental

- **Alto riesgo:** PAM con efectos graves en ecosistemas y comunidades humanas, requiriendo intervención inmediata.
- **Moderado:** PAM con impactos localizados y manejables con medidas correctivas.
- **Riesgo bajo:** PAM que no representan un peligro inmediato o significativo.

Figura 2.

Clasificación de los PAM



Fuente: Autores, 2025.

5.1.2. Impactos ambientales asociados a los PAM

Los pasivos ambientales mineros (PAM) representan un desafío significativo para la sostenibilidad ambiental, social y económica, especialmente en países con una tradición minera extensa. Estudiar y gestionar estos pasivos es fundamental debido a los múltiples impactos negativos que generan y su relación con la salud humana, la degradación de los ecosistemas y el cumplimiento de objetivos de desarrollo sostenible (MinMinas, 2023).

Entre los principales impactos ambientales asociados a los PAM se encuentran:

- Contaminación del agua: El drenaje ácido de minas (DAM) resulta de la oxidación de minerales sulfurados, liberando metales pesados como el hierro, arsénico y mercurio, que contaminan fuentes hídricas superficiales y subterráneas (Younger et al., 2002).

Figura 3

Drenajes Ácidos de Minas (DAM)



Fuente: MinMinas, 2022

- Degradación del suelo: Las actividades mineras abandonadas dejan suelos compactados o contaminados con metales pesados, limitando su capacidad para la agricultura o la regeneración natural (Pérez & González, 2018).
- Pérdida de biodiversidad: Los ecosistemas circundantes a los sitios mineros sufren fragmentación y pérdida de hábitats, afectando especies clave y servicios ecosistémicos (Mummey et al., 2002).

Figura 4.

Fragmentación de ecosistemas por minería



Fuente: Mummey, 2002.

- Emisiones atmosféricas: Los residuos mineros pueden liberar partículas contaminantes y gases como el metano, exacerbando problemas de calidad del aire y contribuyendo al cambio climático (UNEP, 2020).

El estudio de los PAM permite priorizar acciones de remediación y mitigación, identificando las áreas de mayor riesgo mediante herramientas como el análisis geoespacial (MinAmbiente, 2020). Además, este conocimiento es crucial para garantizar la seguridad

de las comunidades cercanas y para prevenir futuros conflictos socioambientales derivados de la falta de gestión de estos pasivos.

En Colombia, la minería ha dejado un legado de impactos ambientales significativos, especialmente en regiones como Antioquia y Boyacá, donde las actividades mineras han sido históricamente intensivas. La gestión de los PAM bajo el marco de la Ley 2327 de 2023 permite avanzar hacia una minería más responsable y hacia la recuperación de territorios afectados, contribuyendo así al desarrollo sostenible del país (MinMinas, 2023).

5.2 Uso de Análisis Geoespacial en la Evaluación de PAM

El análisis geoespacial se ha convertido en una herramienta fundamental para la identificación y evaluación de pasivos ambientales mineros (PAM), gracias a su capacidad para recolectar, procesar y visualizar datos espaciales de manera eficiente. Este enfoque permite evaluar los riesgos ambientales asociados a sitios mineros abandonados o inactivos, contribuyendo a la priorización de áreas críticas para la remediación y gestión ambiental (Goodchild, 2018).

El análisis geoespacial es fundamental para la identificación de pasivos ambientales mineros (PAM) en Zaragoza, ya que permite localizar, caracterizar y evaluar el impacto de estos sitios mediante herramientas como sensores remotos, SIG y modelos de riesgo ambiental. En esta región, históricamente afectada por la minería, el uso de imágenes satelitales y datos geoespaciales facilita la detección de áreas contaminadas, la delimitación de zonas de influencia y la priorización de acciones de remediación. Además, el análisis

espacial ayuda a correlacionar la presencia de PAM con factores como el uso del suelo, cuerpos de agua cercanos y comunidades vulnerables, proporcionando una base técnica para la toma de decisiones y el diseño de estrategias de mitigación ambiental.

5.1.3. Definición y Aplicaciones del Análisis Geoespacial


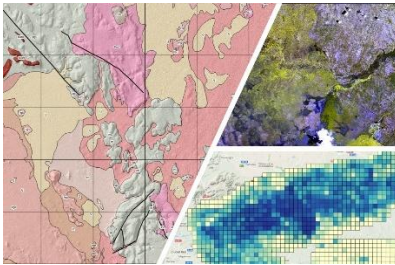
La Ley 2327 de 2023 de Colombia establece la definición de pasivo ambiental y fija lineamientos para su gestión participativa, adecuada y oportuna. Esta normativa subraya la importancia de identificar, ubicar y delimitar geográficamente las áreas con afectaciones ambientales causadas por actividades humanas. En este contexto, las aplicaciones del análisis geoespacial se vuelven fundamentales, ya que permiten localizar las áreas con sospecha de tener pasivos ambientales mineros (PAM) mediante herramientas como sistemas de información geográfica (SIG), imágenes satelitales y sensores remotos. Estas tecnologías facilitan la evaluación detallada de las áreas afectadas, apoyando la formulación de políticas públicas y estrategias de remediación alineadas con los lineamientos establecidos en la ley. Además, el análisis geoespacial contribuye a la creación de un registro actualizado de PAM, promoviendo una gestión más eficiente y transparente de estos sitios.

El análisis geoespacial se refiere al uso de herramientas y técnicas para procesar información geográfica y generar representaciones espaciales que faciliten la toma de decisiones. En el contexto de los PAM, este análisis permite identificar fuentes de contaminación, evaluar la extensión de áreas afectadas y estimar los riesgos asociados para las comunidades y ecosistemas cercanos (Chen et al., 2019).

5.1.4. Técnicas de Análisis Geoespacial empleadas en Minería

Tabla 2

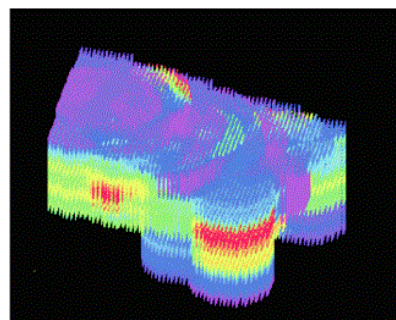
Técnicas de Análisis Geoespacial en el Contexto Minero

Técnica	Descripción	
Sistemas de Información Geográfica (SIG)	<p>Los SIG son esenciales para gestionar grandes volúmenes de datos espaciales y no espaciales, integrando información como mapas topográficos, características hidrológicas y datos sobre actividades mineras históricas. Estas plataformas permiten analizar la superposición de información para identificar áreas críticas con precisión (Burrough y McDonnell, 2015).</p>	
Herramientas de Teledetección	<p>La teledetección utiliza imágenes satelitales y datos obtenidos por drones o sensores remotos para identificar cambios en el uso del suelo, presencia de cuerpos de agua contaminados y degradación ambiental. Esta técnica es especialmente útil para monitorear áreas de difícil acceso (Lillesand et al., 2015).</p>	

Modelos Espaciales

Los modelos espaciales permiten simular la dispersión de contaminantes en suelos y cuerpos de agua, así como predecir escenarios futuros bajo diferentes condiciones.

Estos modelos son fundamentales para priorizar las intervenciones en zonas de mayor riesgo (Malczewski, 1999).



En este estudio se destaca el uso de Sistemas de Información Geográfica para el procesamiento y visualización de cartografía temática y herramientas de teledetección para la generación de Modelos Digitales de Elevación (DEM por sus siglas en Ingles) que son insumo fundamental para la identificación de áreas con riesgo de pasivos ambientales mineros.

5.3 Contexto Regional: Zaragoza, Antioquia

Zaragoza, Antioquia, se encuentra en el Bajo Cauca, una región históricamente ligada a la minería aurífera, actividad que ha moldeado su desarrollo económico, social y ambiental. Este contexto regional, aunque abundante en recursos naturales, enfrenta retos importantes producto de la actividad minera.

Desde la época colonial, Zaragoza ha sido un epicentro de la minería aurífera en Colombia. Durante el periodo colonial, el municipio fue uno de los mayores productores de oro en el país, actividad liderada por explotaciones artesanales en los lechos de los ríos. A partir del siglo XX, con la introducción de tecnologías más avanzadas, la minería pasó a

desarrollarse a mayor escala, lo que incrementó la extracción, pero también amplificó los impactos ambientales.

En las últimas décadas, la minería informal e ilegal ha cobrado protagonismo en la región, debido al auge de los precios del oro y la falta de regulación efectiva. Estas prácticas han generado un aumento en la deforestación, la contaminación hídrica por el uso de mercurio y cianuro, el desplazamiento de comunidades locales y el riesgo de generar pasivos ambientales (MinMinas, 2020).

Figura 5.

Minería aurífera Ilegal en el rio Nechí



Fuente: Agencia de Periodismo Investigativo (API), 2023

Zaragoza también ha sido escenario de conflictos socioambientales asociados a la minería, debido a disputas por el acceso y la propiedad de los recursos minerales. Estas tensiones reflejan la necesidad urgente de implementar políticas efectivas para gestionar los pasivos ambientales y promover una minería sostenible.

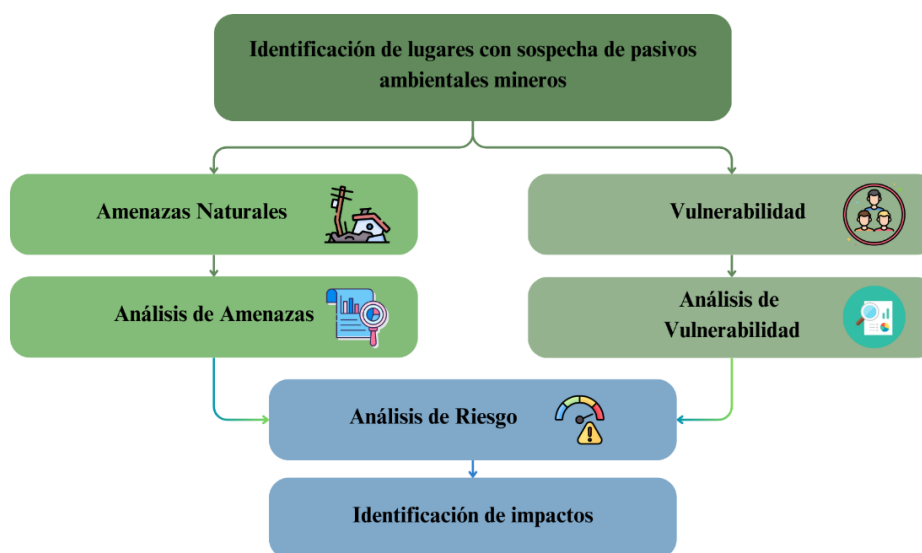
El análisis del historial minero de Zaragoza es clave para entender la magnitud de los pasivos ambientales en la región y diseñar estrategias que mitiguen sus impactos, promoviendo la restauración ambiental y la sostenibilidad a largo plazo.

6. Metodología

Se adaptó la metodología propuesta por el Ministerio de Minas y Energía para la identificación de zonas con riesgo de configurarse como pasivos ambientales mineros. Esta metodología considera tres dimensiones de vulnerabilidad: física, ambiental y social, evaluando su relación con la probabilidad de ocurrencia de eventos naturales como inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa. El propósito principal es identificar las áreas de mayor riesgo con el fin de proveer a las autoridades competentes la información necesaria para la toma de decisiones.

6.1. Enfoque Metodológico

El enfoque de este estudio es multidimensional cuantitativo y se basa en la evaluación integral de riesgos. La metodología combina el análisis de vulnerabilidad (física, ambiental y social) con la evaluación de amenazas naturales. Utiliza herramientas geospaciales para delimitar las zonas más expuestas, facilitando la toma de decisiones en gestión de desastres y remediación de pasivos ambientales (Figura 7).

Figura 6*Enfoques de la investigación*

Fuente: MinMinas, 2023.

6.2. Tipo De Estudio

Este es un estudio de riesgo ambiental que involucra la caracterización de las amenazas naturales y el análisis de los pasivos ambientales en áreas afectadas por la minería. Se trata de un estudio exploratorio y analítico, que busca identificar las relaciones entre pasivos mineros y eventos naturales para zonificar las áreas de mayor riesgo.

6.3. Procedimiento

El procedimiento se dividió en cuatro (4) fases, cada una con sus propios métodos y herramientas para garantizar un análisis riguroso y coherente (Figura 8).

Figura 7*Metodología*

Fuente: Autores, 2025.

6.3.1. Fase 1: Adaptación de la metodología propuesta por el MinMinas para la identificación de zonas de alto riesgo.

➤ **Recolección y Análisis de Información**

Se recopiló información para caracterizar la zona de estudio y elaborar los mapas de amenazas naturales por remoción en masa, avenidas torrenciales e inundación. Asimismo, se obtuvo información para generar la cartografía de vulnerabilidad física, ambiental y social. Teniendo en cuenta, la información base que se encuentra en las entidades estatales (ver tabla 3).

Tabla 3*Recopilación información*

ENTIDAD	MAPA	FECHA DE ELABORACION
---------	------	----------------------

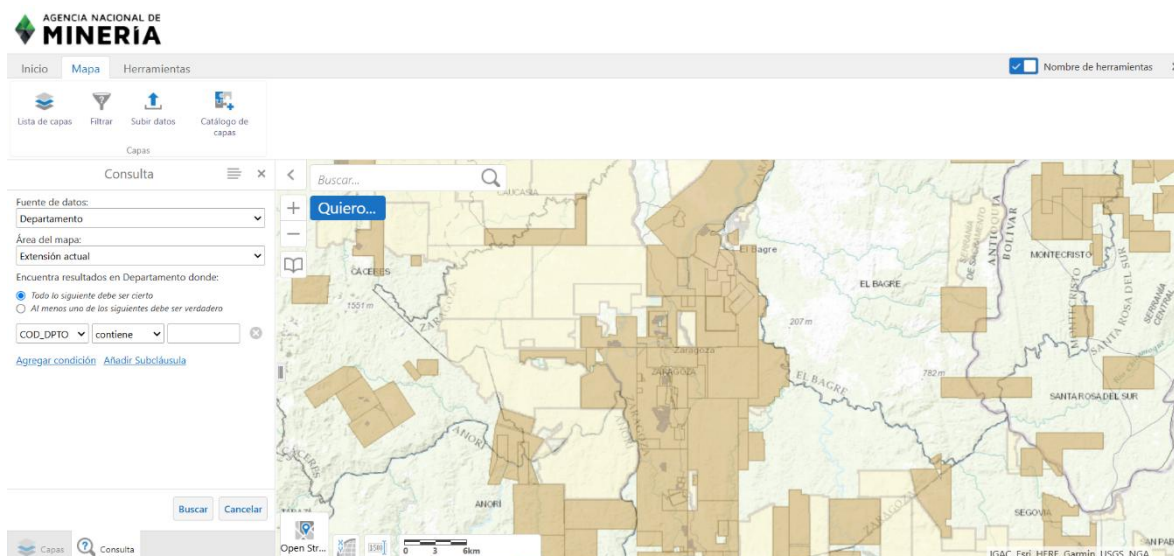
Servicio Geológico Colombiano - SGS	Geológico	2015
Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC	Geomorfológico	2007
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM	Coberturas Metodología Corine Land Cover	2018
Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC	Amenaza Remoción en Masa	2022
Agencia Nacional de Hidrocarburos - ANH	Títulos mineros	2021
Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC	Erosión	2022

Fuente: Autores, 2025.

Por otra parte, De acuerdo con la información del Geovisor del Sistema Integral de Gestión Minera de la ANM, se obtuvo la información de los títulos mineros en el municipio de Zaragoza a la fecha.

Figura 8

Geovisor de la ANM



Fuente: ANM, 2025.

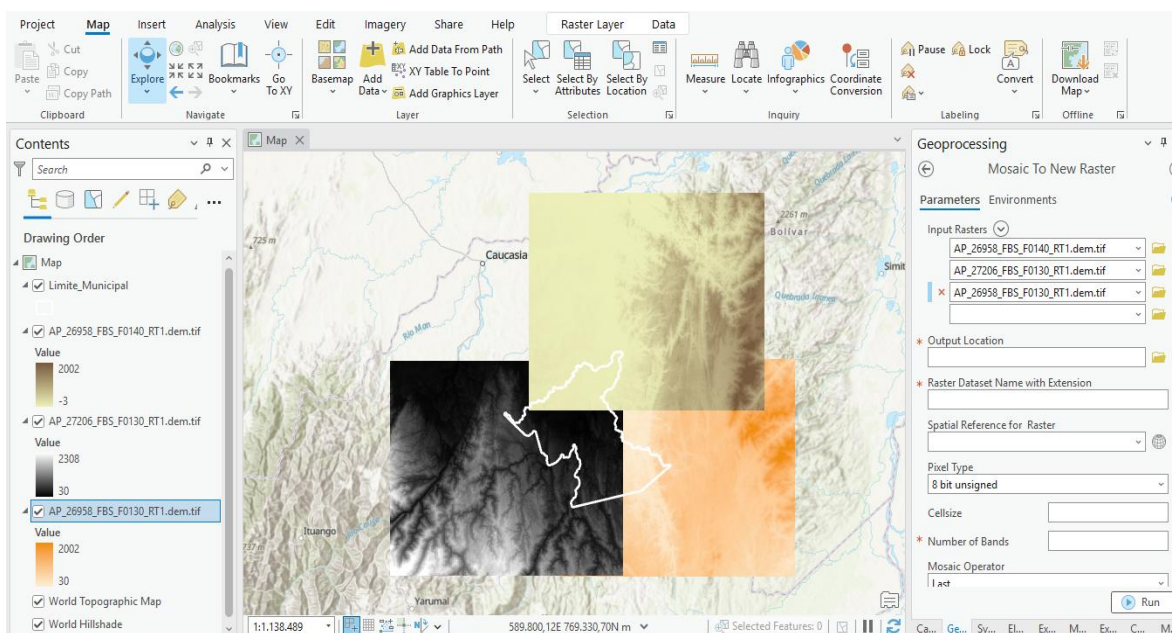
De acuerdo con la información recolectada se realizaron los siguientes mapas:

➤ Análisis de Pendientes:

Se empleó la plataforma EARTHDATA de la NASA para descargar modelos digitales de elevación (DEM) con una resolución espacial de 12,5 metros, obtenidos a partir del radar de apertura sintética ALOS PALSAR (SAR, por sus siglas en inglés), correspondientes al municipio de Zaragoza. Las imágenes fueron procesadas en ArcGIS Pro-3.4.0, donde se integraron los datos ráster descargados mediante la herramienta "Mosaico", asegurando una cobertura completa de la zona de estudio.

Figura 9.

Herramienta Mosaico - ArcGIS Pro-3.4.0



Fuente: Autores, 2025.

Posteriormente, se aplicó la herramienta "Slope" sobre el DEM para calcular la pendiente del terreno en porcentaje. En este cálculo, una superficie completamente plana corresponde al 0 %, mientras que una inclinación de 45 grados equivale al 100 %. A medida que el terreno se vuelve más vertical, el porcentaje de pendiente aumenta proporcionalmente. (ESRI, 2024).

Figura 10*Método para el cálculo de pendientes*

Fuente: ESRI, 2024

Por consiguiente, se reclasificaron las pendientes en 5 rangos y se asignó una calificación de 1 a 5 de acuerdo con la metodología adaptada del IDEAM para este proyecto tal como se muestra a continuación.

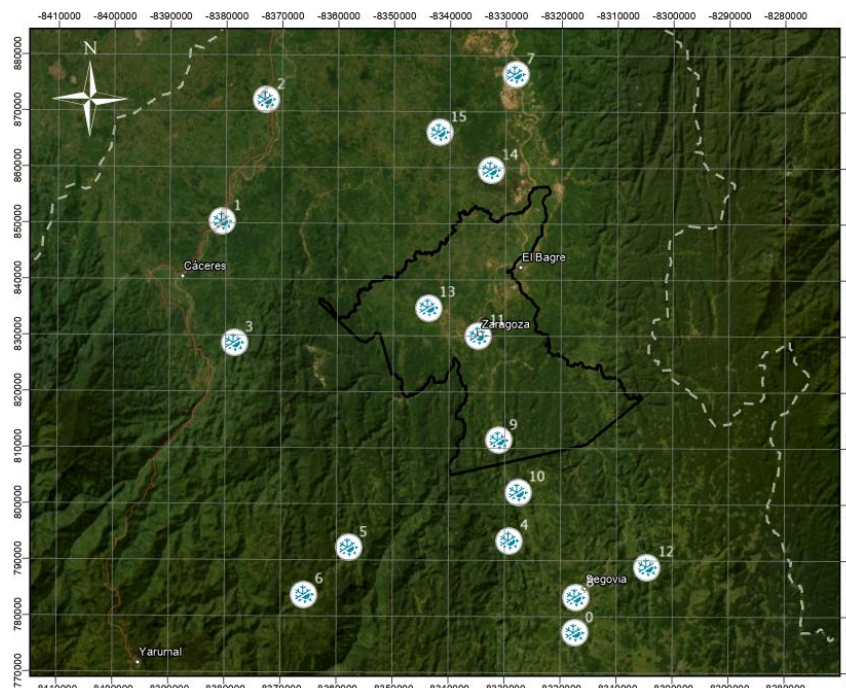
Tabla 4*Clasificación pendiente*

PENDIENTE (%)	CATEGORÍA DE AMENAZA	CALIFICACIÓN
0 - 7 %	Muy alta	5
7 - 12 %	Alta	4
12 - 25 %	Moderada	3
25 - 75 %	Baja	2
> 75 %	Muy baja	1

Fuente: Adaptado de IDEAM, 2011.

➤ **Análisis de Precipitación:**

Se utilizó el catálogo de estaciones meteorológicas del IDEAM y se escogieron las estaciones que tuvieran influencia en el municipio de Zaragoza. Estas estaciones se muestran a continuación.

Figura 11*Estaciones meteorológicas*

Fuente: IDEAM, 2018.

A continuación, se presenta la información Anual – Multianual (1991-2020) de las estaciones analizadas.

Tabla 5*Estaciones meteorológicas*

Id	Código	Nombre	Departamento	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud	Precipitación Anual - Multianual
0	23175020	Apto Otu	Antioquia	Remedios	7,01175	-74,716306	643	2906,3
1	2624009	Pto Belgica	Antioquia	Cáceres	7,668306	-75,284444	80	3081,5
2	2624010	Guarumo-la Lucha	Antioquia	Cáceres	7,862917	-75,214917	70	2955,2
3	2625011	Barro Blanco	Antioquia	Tarazá	7,474111	-75,264389	190	5399,6
4	2701110	Las Brisas	Antioquia	Segovia	7,158806	-74,821833	600	3750,2
5	2702017	Hda El Carmen	Antioquia	Anorí	7,147194	-75,079778	950	3999,2
6	2702503	Anorí	Antioquia	Anorí	7,071917	-75,150528	1,601	2838,5
7	2703004	El Guamo	Antioquia	Nechí	7,904417	-74,814	40	4305,5
8	2703008	La Cruzada	Antioquia	Remedios	7,068056	-74,715056	650	2755,2
9	2703009	El Bosque	Antioquia	Zaragoza	7,319306	-74,839333	220	4603,3
10	2703014	La Palma De Coco	Antioquia	Segovia	7,236111	-74,807944	100	3971,3

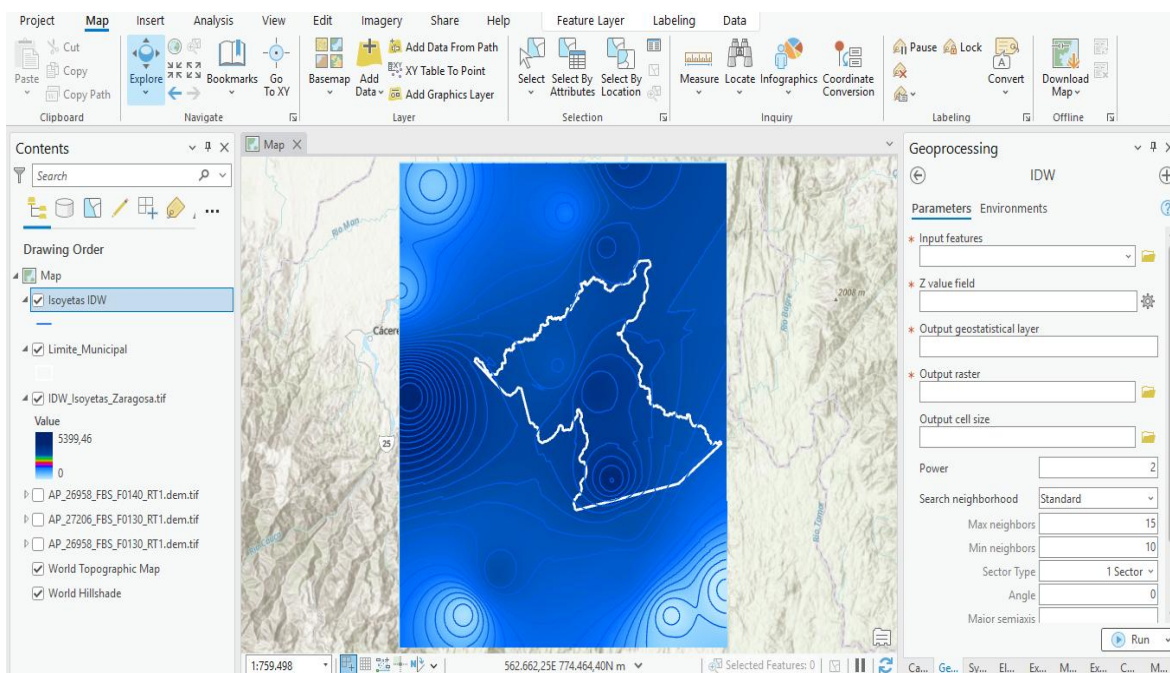
11	2703021	Zaragoza	Antioquia	Zaragoza	7,486222	-74,872389	50	4390,6
12	2703024	Pte Bagre	Antioquia	Remedios	7,116667	-74,600000	240	2660,3
13	2704002	Alto Del indio	Antioquia	Zaragoza	7,531	-74,95275	125	3888,3
14	2704003	La Esmeralda	Antioquia	Caucasia	7,751111	-74,853056	100	4231,7
15	2704502	Caseri	Antioquia	Caucasia	7,811722	-74,935972	72	3345,8

Fuente: IDEAM, 2018.

A partir de los datos de precipitación se realizó un proceso de interpolación con el método “IDW” y se determinaron las isoyetas de precipitación anual-multianual acumulada (mm) del municipio de zaragoza con la herramienta “Contour”.

Figura 12.

Isoyetas - Zaragoza, Antioquia



Finalmente, se clasificaron en 6 categorías (ver tabla 6)

Tabla 6

Categorías de precipitación

PRECIPITACIÓN	CATEGORÍA DE AMENAZA	CALIFICACIÓN
Pluvial (>7000)	Muy alta	5

Muy húmedo (3000-7000)	Alta	4
Húmedo (2000-3000)	Moderada	3
Seco (1000-2000)	Baja	2
Muy seco (500-1000)	Muy baja	1
Árido (0-500)	Muy baja	1

Fuente: Adaptado de IDEAM, 2011.

Una vez categorizada y calificada la amenaza se realizó el proceso de rasterización de los datos de precipitación, en donde se definió una resolución espacial del ráster resultante de 10 metros. Se seleccionó el atributo de precipitación previamente calificada de 1 a 5 como variable a rasterizar y se utilizó la herramienta Rasterizar (Vector a Raster) del software ArcGIS Pro. Como resultado, se generó un archivo ráster en formato GeoTIFF que representaba espacialmente los valores de la precipitación para el municipio de Zaragoza.

➤ **Análisis de Amenaza por Inundación**

La evaluación de la amenaza por inundación se hizo siguiendo una metodología adaptada del IDEAM, la cual, a partir de la zonificación y calificación de los siguientes factores propios del territorio, le confieren una mayor o menor probabilidad de ser afectados por inundaciones. (IDEAM, 2018)

A continuación, se proporciona la descripción de cada uno de los factores evaluados y los resultados que para la zona se obtuvieron.

✓ **Morfometría de las cuencas:**

Las características morfométricas de las cuencas utilizadas para el modelamiento del mapa de amenaza por inundación son el coeficiente de compacidad y la densidad de

drenaje. La Ecuación (1) es el coeficiente de compacidad (Compacidad de Gravelius), la P es el perímetro y A es el área.

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Para el proyecto se tomó como referencia los siguientes rangos propuestos por la CVC (Ver Tabla 7).

Tabla 7

Categoría según índice de compacidad

CLASE	RANGO	DESCRIPCIÓN	CATEGORÍA DE AMENAZA	CALIFICACIÓN
Kc1	1 a 1,25	Forma casi redonda a oval – redonda	Alta	5
Kc2	1,25 a 1,5	Forma oval – oblonga	Moderada	3
Kc3	> 1,5	Forma oval – oblonga a rectangular - oblonga	Baja	1

Fuente: CVC, 2015

Para el proyecto se tomaron en cuenta 4 cuencas de referencia que tienen influencia en el municipio de Zaragoza, tal como se observa en la Tabla 8.

Tabla 8

Índice de compacidad de las cuencas del municipio de Zaragoza

CUENCA	PERIMETR O (Km)	AREA (Km2)	RAIZ AREA	KC	CATEGORIA DE AMENAZA	CALIF.
Rio Porce	639,52	5230,84	72,32	2,47	Baja	1
Alto Nechí	340,37	2938,36	54,20	1,75	Baja	1
Directos al Bajo Nechí	263,94	1951,96	44,18	1,67	Baja	1
Bajo Nechí	409,65	4491,74	67,02	1,71	Baja	1

Fuente: CVC, 2015

Una vez categorizada y calificada la amenaza se realizó el proceso de rasterización, en donde se definió una resolución espacial de 10 metros. Se seleccionó el atributo de

coeficiente de compacidad previamente calificado de 1 a 5 como variable a rasterizar y se utilizó la herramienta Rasterizar (Vector a Raster) del software ArcGIS Pro. Como resultado, se generó un archivo ráster en formato GeoTIFF que representaba espacialmente los valores de coeficiente de compacidad para el municipio de Zaragoza. A continuación, se presenta la Ecuación (2) de densidad de drenaje donde L es Longitud total de las corrientes de agua en Km y A es el área total de la cuenca en Km².

$$D_d = \frac{L}{A} \quad (2)$$

Tabla 9

Categoría según densidad de drenaje

RANGO	CATEGORÍA DE AMENAZA	CALIFICACIÓN
Denso 3,7 - 5,6	Alta	5
Moderado 1,9 - 3,6	Moderada	3
Pobre 0,1 - 1,8	Baja	1

Fuente: CVC, 2015

Para las 4 cuencas de referencia se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 10

Densidad de drenajes de las cuencas del municipio de Zaragoza

CUENCA	AREA (Km2)	L (Km)	D _d	CATEGORIA DE AMENAZA	CALIF.
Rio Porce	5230,84	7586,10	1,45	Baja	1
Alto Nechi	2938,36	3997,72	1,36	Baja	1
Directos al Bajo Nechi	1951,96	1696,54	0,86	Baja	1
Bajo Nechi	4491,74	3744,27	0,83	Baja	1

Fuente: Autores, 2025

Una vez categorizada y calificada la amenaza se realizó el proceso de rasterización, en donde se definió una resolución espacial de 10 metros. Se seleccionó el atributo de densidad de drenajes previamente calificado de 1 a 5 como variable a rasterizar y se utilizó

la herramienta Rasterizar (Vector a Raster) del software ArcGIS Pro. Como resultado, se generó un archivo ráster en formato GeoTIFF que representaba espacialmente los valores de densidad de drenajes para el municipio de Zaragoza.

✓ Cobertura Vegetal

El factor cobertura es de gran relevancia en el modelamiento de las amenazas por inundación, ya que la vegetación sirve como sistema de protección a los suelos de tal manera que, estos se ven protegidos contra inundaciones, es decir, las zonas que cuentan con cobertura de tipo bosque están mejor protegida que una zona con vegetación herbácea, pastos o de cultivos, mientras que las de suelo desnudo son las zonas de mayor susceptibilidad a presentarse dicho evento, según su nivel de protección se le asigna una categoría de amenaza como se observa en la Tabla 11.

Las coberturas del municipio de Zaragoza se clasificaron según la clasificación de coberturas del IDEAM para incendios y se categorizan según su nivel de protección.

Tabla 11

Categoría de amenazas para coberturas

LEYENDA	CATEGORIA DE AMENAZA	CALIF.
3.1.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme	Muy Baja	1
3.2.3.1. Vegetación secundaria alta	Muy Baja	1
3.2.3.2. Vegetación secundaria baja	Muy Baja	1
3.3.1. Zonas arenosas naturales	Muy Baja	1
1.3.1. Zonas de extracción minera	Baja	2
1.3.1.4. Explotación de oro	Baja	2
3.1.3.1. Bosque fragmentado con pastos y cultivos	Baja	2
3.1.3.2. Bosque fragmentado con vegetación secundaria	Baja	2
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	Alta	4
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Alta	4
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	Alta	4
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	Alta	4

1.1.1. Tejido urbano continuo	Muy Alta	5
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	Muy Alta	5
2.3.1. Pastos limpios	Muy Alta	5
2.3.3. Pastos enmalezados	Muy Alta	5
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	Muy Alta	5
4.1.1. Zonas pantanosas	Muy Alta	5
5.1.1. Ríos	Muy Alta	5
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	Muy Alta	5

Fuente: Autores a partir de información del IDEAM, 2018.

Una vez categorizada y calificada la amenaza se realizó el proceso de rasterización, en donde se definió una resolución espacial de 10 metros. Se seleccionó el atributo de cobertura vegetal previamente calificado de 1 a 5 como variable a rasterizar y se utilizó la herramienta Rasterizar (Vector a Raster) del software ArcGIS Pro. Como resultado, se generó un archivo ráster en formato GeoTIFF que representaba espacialmente los valores de cobertura vegetal para el municipio de Zaragoza.

✓ Geomorfología

La geomorfología se tuvo en cuenta para el análisis de la amenaza por inundación, ya que las unidades geomorfológicas presentes en la región se encuentran profundamente relacionadas con la litología como el factor principal de formación del relieve actual y con los procesos erosivos y la meteorización diferencial como agentes modeladores del paisaje.

En este sentido, se clasificó como se muestra en la Tabla 12 para el municipio de Zaragoza se obtuvo que la geomorfología es Montañosa y Plana, lo que la posiciona en una categoría de amenaza de Baja y Alta en este factor.

Tabla 12

Categoría de amenazas para geomorfología

GEOMORFOLOGIA	CATEGORIA DE AMENAZA	CALIF.
Espinazos	Baja	2
Filas y vigas	Baja	2
Lomas y colinas	Baja	2
Terrazas	Moderada	3
Vallecitos	Moderada	3
Vallecitos coluvio-aluviales	Alta	4
Cuerpo de agua	Muy Alta	5
Plano de inundación	Muy Alta	5
Zona urbana	Muy Alta	5

Fuente: Autores, 2025

Una vez categorizada y calificada la amenaza se realizó el proceso de rasterización, en donde se definió una resolución espacial de 10 metros. Se seleccionó el atributo de geomorfología previamente calificado de 1 a 5 como variable a rasterizar y se utilizó la herramienta Rasterizar (Vector a Raster) del software ArcGIS Pro. Como resultado, se generó un archivo ráster en formato GeoTIFF que representaba espacialmente los valores de geomorfología para el municipio de Zaragoza.

Para la elaboración del mapa de amenaza por inundación también se tuvieron en cuenta las variables de precipitación y pendientes descritas anteriormente. Con la información generada anteriormente, mediante procesos de álgebra de mapas se generó una suma ponderada la cual equivale a la amenaza total por inundación (Ver Ecuación 3).

$$\begin{aligned}
 & \textbf{Amenaza Inundación} \\
 = & \text{Precipitación} * (0,35) + \text{Pendiente} * (0,15) + \left(\frac{\text{Densidad de Drenaje} + \text{Compacidad de Gravelius}}{2} \right) * (0,1) \\
 & + \text{Geomorfología} * (0,15) + \text{Cobertura} * (0,15)
 \end{aligned} \tag{3}$$

Una vez realizada la respectiva suma ponderada, se procedió a categorizar la amenaza de acuerdo con la Tabla 13

Tabla 13*Categorización de Amenaza por Inundación*

CATEGORÍA DE AMENAZA	CALIFICACIÓN
Muy alta	4-5
Alta	3-4
Moderada	2-3
Baja	1-2
Muy baja	0-1

Fuente: Autores, 2025.

Una vez categorizada y calificada la amenaza se realizó el proceso de rasterización, en donde se definió una resolución espacial de 10 metros. Se seleccionó el atributo de amenaza por inundación previamente calificado de 1 a 5 como variable a rasterizar y se utilizó la herramienta Rasterizar (Vector a Raster) del software ArcGIS Pro. Como resultado, se generó un archivo ráster en formato GeoTIFF que representaba espacialmente los valores de amenaza por inundación para el municipio de Zaragoza.

➤ **Análisis de avenidas torrenciales**

La evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales se realizó a partir de la zonificación y calificación de los siguientes factores propios del territorio, los cuales le confieren una mayor o menor probabilidad de ser afectados por avenida torrencial.

- ✓ Morfometría de las cuencas
- ✓ Pendiente del terreno
- ✓ Precipitación
- ✓ Cobertura Vegetal
- ✓ Geomorfología

Dado que algunos factores ya fueron descritos en la metodología para la determinación de la amenaza por inundación, se omite repetir dichas descripciones. Sin embargo, es importante destacar que, en los factores de pendiente y geomorfología, las categorías de amenaza presentan variaciones, por lo que serán descritas nuevamente, adaptadas específicamente para el contexto de avenidas torrenciales.

✓ **Pendiente del terreno**

Teniendo en cuenta que la pendiente del terreno es un factor muy influyente en la ocurrencia de las avenidas torrenciales, se utilizó la misma clasificación en 5 categorías de amenaza por pendientes, donde: las pendientes bajas representan una amenaza menor y las pendientes altas representan una amenaza mayor, ya que la inclinación del terreno está muy relacionada con la susceptibilidad a movimiento en masa. Como se evidencia en la Tabla 14, donde para el terreno se obtuvieron amenazas de muy baja a muy alta.

Tabla 14

Categoría de amenaza según pendiente

PENDIENTE (%)	CATEGORÍA DE AMENAZA	CALIFICACIÓN
0 - 7 %	Muy baja	1
7 - 12 %	Baja	2
12 - 25 %	Moderada	3
25 - 75 %	Alta	4
> 75 %	Muy alta	5

Fuente: Adaptado de IDEAM, 2011.

✓ **Geomorfología**

La Geomorfología del terreno influye directamente en la ocurrencia y dinámica de las avenidas torrenciales, ya que factores como la pendiente, la forma de la cuenca y la geometría del valle determinan la velocidad, energía y trayectoria del flujo. Las pendientes

pronunciadas y cuencas redondeadas favorecen flujos rápidos y destructivos, mientras que pendientes suaves y valles amplios tienden a disminuir la velocidad y facilitar la deposición de sedimentos. Además, zonas con cambios abruptos de pendiente o confluencias de cauces pueden intensificar el flujo al concentrar grandes volúmenes de agua y material. Así pues, la categorización de la amenaza según la geomorfología se clasifico de acuerdo con la Tabla 15.

Tabla 15.

Categoría según geomorfología

GEOMORFOLOGIA	CATEGORIA DE AMENAZA	CALIF.
Cuerpo de agua	Muy Baja	1
Plano de inundación	Muy Baja	1
Zona urbana	Muy Baja	1
Vallecitos coluvio-aluviales	Baja	2
Terrazas	Moderada	3
Vallecitos	Moderada	3
Espinazos	Alta	4
Filas y vigas	Alta	4
Lomas y colinas	Alta	4

Fuente: Autores, 2025.

✓ **Análisis de amenaza por avenida torrencial**

Con la información generada anteriormente, mediante procesos de álgebra de mapas se generó una suma ponderada la cual equivale a la amenaza total por avenida torrencial (Ver Ecuación 4).

$$\text{Amenaza por Avenidas Torrenciales} = \text{Precipitación} \times (0.2) + \left(\frac{\text{Densidad de drenaje} + \text{Compacidad de Gravelius}}{2} \right) \times (0.3) + \left(\frac{\text{Geomorfología} + \text{Pendiente}}{2} \right) \times (0.35) + \text{Cobertura} \times (0.15) \quad (4)$$

Una vez realizada la respectiva suma ponderada, se procedió a categorizar la amenaza de acuerdo con los rangos de la Tabla 16.

Tabla 16.

Categoría amenaza por avenida torrencial

CATEGORÍA DE AMENAZA	CALIFICACIÓN
Muy alta	4-5
Alta	3-4
Moderada	2-3
Baja	1-2
Muy baja	0-1

Fuente: Autores, 2025.

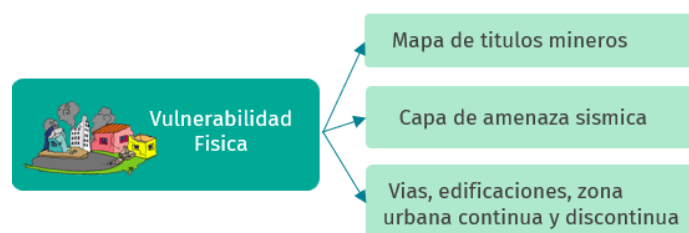
6.3.1.1. Análisis de Vulnerabilidad Multidimensional

➤ Análisis De Vulnerabilidad Física.

Consiste en una evaluación de que tan susceptible es un área, para lo cual se tuvieron en cuenta las variables que se presentan en la Figura 13.

Figura 13

Vulnerabilidad física



Fuente: MinMinas, 2023.

Para la evaluación de las variables, primero se utilizó como base el mapa de amenaza sísmica del Servicio Geológico Colombiano del año 2020, el cual clasifica al departamento de Antioquia dentro de una zona de amenaza media, después se tomaron las

vías y edificaciones ubicadas cerca de un título minero, estas fueron calificadas con una vulnerabilidad alta. Posteriormente, se integraron las diferentes variables mediante una unión espacial, tomando la mayor amenaza en cada celda para generar el mapa final.

➤ **Análisis de vulnerabilidad ambiental.**

Se realizó el análisis teniendo en cuenta los siguientes criterios ver Tabla 17.

Tabla 17

Nivel de vulnerabilidad ambiental

Nivel de Vulnerabilidad	Criterio
Muy alta (5)	<ul style="list-style-type: none"> -Erosión alta, tierras desnudas y degradadas. -Se encuentran áreas naturales protegidas que conforman el Sistema de Parques Nacionales, las Reservas Forestales creadas por la Ley 2/59, las Reservas Faunísticas y las de Pesca, el Distrito de Manejo Integrado, el Distrito de Conservación de Suelos, el Parque Natural Regional, las Reservas de la Sociedad Civil y las Reservas Municipales. -Áreas de explotación inactiva de minerales -Presencia de ríos, lagunas, lagos y ciénagas naturales
Alta (4)	<ul style="list-style-type: none"> -Erosión moderada -Presencia de humedales, bosques primarios o ecosistemas estratégicos que no están contemplados dentro de las áreas naturales protegidas -Áreas de explotación y extracción activa de minerales
Media (3)	<ul style="list-style-type: none"> -Erosión ligera -Ecosistemas forestales fragmentados y actividades de agricultura extensiva -Área de construcción minera
Baja (2)	<ul style="list-style-type: none"> -Erosión muy ligera -No se presentan humedales, bosques primarios o ecosistemas estratégicos que no están contemplados dentro de las áreas naturales protegidas -Área de exploración de minerales
Muy baja (1)	<ul style="list-style-type: none"> -No presenta erosión -No se presentan áreas de exploración, construcción y explotación minera -No se encuentran áreas naturales protegidas que conforman el Sistema de Parques Nacionales, las Reservas Forestales creadas por la Ley 2/59, las Reservas Faunísticas y

las de Pesca, el Distrito de Manejo Integrado, el Distrito de Conservación de Suelos, el Parque Natural Regional, las Reservas de la Sociedad Civil y las Reservas Municipales.
 -No se presentan humedales, bosques primarios o ecosistemas estratégicos que no están contemplados dentro de las áreas naturales protegidas.
 -No se encuentran ríos, lagunas, lagos y ciénagas naturales.

Fuente: Adaptado de NTC ISO 31000 por Autores, 2021.

Se hizo en ArcGIS la unión de los mapas de erosión, títulos mineros y áreas naturales protegidas, cada uno incluía una columna con el nivel de vulnerabilidad asignado según los criterios establecidos en la Tabla 17. A continuación, se aplicó el método de combinación por máximo de amenazas utilizando la calculadora de ArcGIS, obteniendo el mapa final de vulnerabilidad.

➤ **Análisis de vulnerabilidad social.**

Para el análisis de vulnerabilidad social se evaluaron criterios sociales basados en los datos del marco geoestadístico nacional del DANE (2023), la presencia de comunidades étnicas en el municipio y la densidad poblacional por unidad territorial administrativa.

El nivel de vulnerabilidad y los criterios tenidos en cuenta se resumen en la siguiente Tabla 18.

Tabla 18

Nivel de vulnerabilidad social

Nivel de Vulnerabilidad	Criterio
Muy alta (5)	<ul style="list-style-type: none"> - Población mayor a 1301 habitantes - Presencia de Resguardos Indígenas - Presencia de Comunidades Negras
Alta (4)	-Población entre 1001 y 1300 habitantes
Media (3)	-Población entre 501 y 1000 habitantes
Baja (2)	-Población entre 361 y 500 habitantes

**Muy baja
(1)**

- Población Inferior a 360 habitantes
- No hay presencia de Resguardos Indígenas
- No hay presencia de Comunidades Negras

Fuente: Adaptado de NTC ISO 31000 por Autores, 2021.

Luego, se realizó en ArcGIS la unión de los mapas de erosión, títulos mineros y áreas naturales protegidas, cada uno incluía una columna con el nivel de vulnerabilidad asignado según los criterios establecidos en la tabla 18. Después, se aplicó el método de combinación por máximo de amenazas utilizando la calculadora de ArcGIS, obteniendo el mapa final de vulnerabilidad.

6.3.2. Fase 2: Identificación de impactos ambientales

6.3.2.1. Identificación de Impactos Ambientales

Según la información del Geovisor del Sistema Integral de Gestión Minera de la ANM, en el municipio de Zaragoza existen títulos mineros en distintas etapas, incluyendo construcción y montaje, explotación, exploración y abandono de minas. Por esta razón, la identificación de impactos se llevó a cabo considerando estas actividades.

Es importante señalar que, si bien en el departamento de Antioquia hay personas inscritas en el Registro Único de Comercializadores de Minerales (RUCOM), no se obtuvo información específica para el municipio de Zaragoza. Además, la lista de producción de mineros de subsistencia publicada por la ANM solo incluye los nombres de las personas, sin indicar el lugar donde desarrollan la actividad. Por lo tanto, en este proyecto únicamente se consideró la información correspondiente a los títulos mineros del municipio.

Así pues, primero se identificaron las actividades que se realizan en las diferentes etapas y luego se establecieron los impactos ambientales que se generan en el medio abiótico, biótico y social.

Figura 14.

Metodología para la identificación de impactos ambientales



Fuente: Autores, 2025

Finalmente, se construyó una matriz en la que se resume las actividades mineras, los aspectos ambientales asociados y los impactos identificados. Esta herramienta facilita la visualización de las relaciones entre las actividades y sus efectos en el medio ambiente.

Tabla 19

Matriz de identificación de impactos

ACTIVIDAD	ASPECTO AMBIENTAL ASOCIADO		IMPACTO AMBIENTAL	
	Aspecto Ambiental	Descripción del Aspecto Ambiental	Recurso Afectado	Impacto Generado

Fuente: Autores, 2025

Esta matriz permite reconocer patrones y relaciones entre las actividades mineras y sus impactos, facilitando la priorización de acciones de gestión. Además, complementa el análisis

geoespacial al integrar una perspectiva cualitativa, y sirve como herramienta para establecer los criterios de identificación de áreas con indicios de constituir pasivos ambientales mineros.

6.3.3. Fase 3: Elaboración de mapa de riesgo de áreas con potencial de configurarse como pasivos ambientales mineros.

1. Cálculo del riesgo: Se integraron los análisis de vulnerabilidad y la probabilidad de ocurrencia de amenazas naturales, haciendo uso de modelos geoespaciales (SIG) para generar mapas de riesgo que combinen las diferentes dimensiones de vulnerabilidad (física, ambiental y social) y las diferentes amenazas. Se aplicaron índices de riesgo para identificar las áreas de mayor prioridad (Ver Ecuación 5).

$$\text{Riesgo} = \text{Exposición (Amenaza)} \times \text{Vulnerabilidad (5)}$$

2. Zonificación del riesgo: Se realizó una clasificación de las zonas de estudio en diferentes niveles de riesgo (Muy alto, alto, medio, bajo y Muy bajo) basándose en los resultados del análisis.

Las zonas de alto riesgo serán aquellas donde la combinación de alta vulnerabilidad física, ambiental y social coincide con una alta probabilidad de amenazas naturales.

Las zonas de menor riesgo incluirán áreas con menos vulnerabilidades y baja probabilidad de impacto de eventos naturales.

Tabla 20

Zonificación del riesgo

		VULNERABILIDAD				
		Muy Alta	Alta	Media	Baja	Muy Baja
AME NAZ A	Muy Alta	Muy Alta	Alta	Media	Baja	Muy Baja
	Alta	Alta	Alta	Media	Baja	Muy Baja



Fuente: Adaptado de Ministerio de Minas y Energía, 2023.

6.3.4. Fase 4: Analizar cómo la información generada puede contribuir a la toma de decisiones de las autoridades ambientales y mineras

Aplicando la metodología del MinMinas, se logró realizar el análisis de riesgo de las zonas con potencial para configurarse como pasivos ambientales mineros. Con esta información, la autoridad ambiental competente podrá determinar la presencia de un pasivo ambiental minero en la zona evaluada.

Para analizar si la información generada contribuye a la toma de decisiones, se siguieron los siguientes pasos:

- **Identificación de autoridades competentes:** Se establecieron las entidades ambientales responsables de la configuración de un pasivo ambiental minero.
- **Definición de la información requerida:** Se determinó qué datos, derivados del análisis de riesgo, son esenciales para la toma de decisiones sobre la configuración de un PAM.
- **Análisis del uso potencial:** Se identificaron las posibles aplicaciones de la información y las medidas de manejo que se pueden formular con esta, de acuerdo con las siguientes categorías:

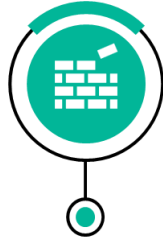
Figura 15

Categorías de medidas de manejo



Prevención

Acciones para evitar que los impactos ocurran (ej. uso de tecnologías menos contaminantes).



Mitigación

Acciones para reducir la magnitud de los impactos (ej. tratamiento de aguas residuales).



Restauración

Acciones para recuperar áreas afectadas (ej. reforestación, rehabilitación de suelos).



Compensación

Acciones para compensar los impactos que no se pueden evitar o mitigar (ej. creación de áreas protegidas).

Fuente: UPME, 2005.

7. Referente Contextual

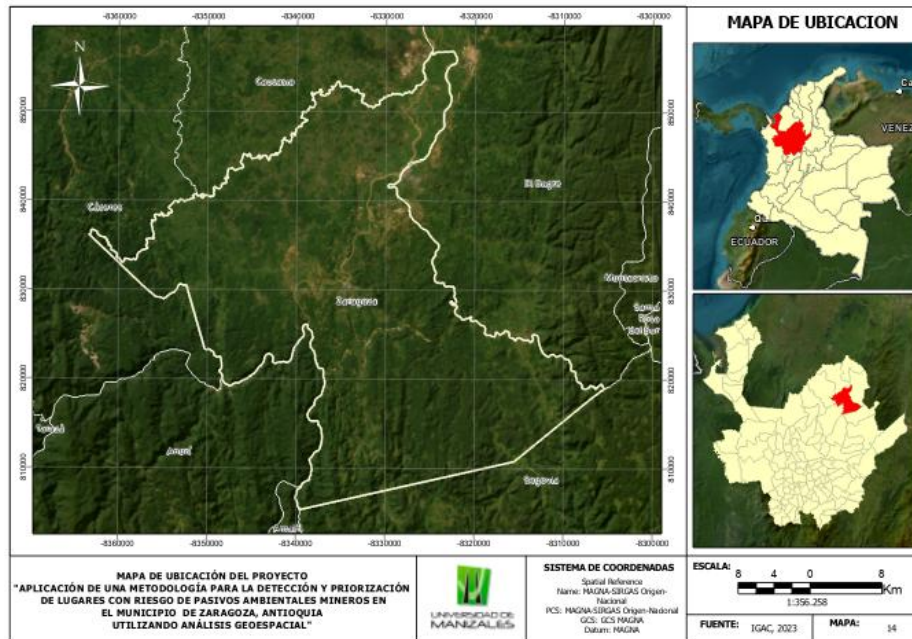
7.1. Caracterización Del Área De Estudio

7.1.1. Ubicación Del Área De Estudio:

El municipio de Zaragoza se encuentra en la región nordeste de Antioquia, limita al norte con el municipio de Caucasia, al este con El Bagre, por el sur con Segovia y a oeste con los municipios de Caceres y Anori. El municipio es reconocido porque su economía se basa en la agricultura y minería, especialmente en la producción de oro y platino.

Figura 16

Mapa de ubicación



Fuente: DANE, 2024.

7.1.2. Geología

El municipio de Zaragoza presenta una gran variedad litológica, en esta zona se presentan rocas de edades que van desde el precámbrico hasta materiales de edades recientes. En la siguiente tabla se describe la litología del municipio:

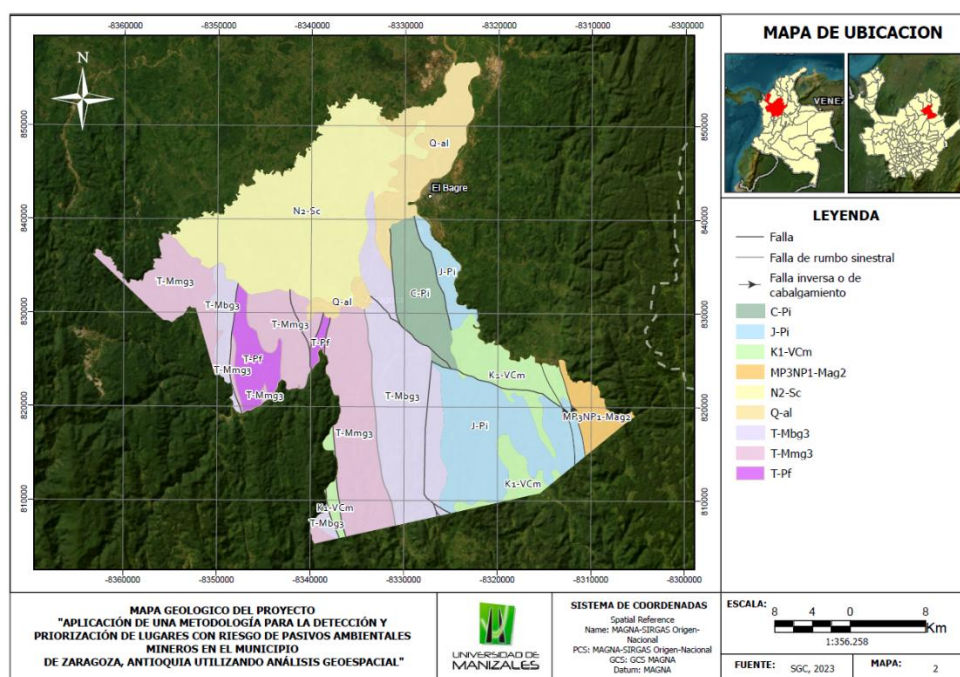
Tabla 21
Características geológicas

SÍMBOLO	ERA	PERIODO	DESCRIPCIÓN	ÁREA (HA)	PORCENTAJE
Q-al	Cenozoica	Cuaternario	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales	9.696	8,3%
N2-Sc		Plioceno	Conglomerados, y arenitas líticas conglomeráticas intercaladas con arcillolitas, limolitas y turbas.	27.702	24%
K1-VCm	Mesozoica	Cretácico Inferior	Basaltos, y lodolitas negras intercaladas con limolitas, arenitas y conglomerados.	8.843	7,6%
J-Pi		Jurásico	Granodioritas que varían de sienogranitos a tonalitas y de cuarzo monzonitas a cuarzomonzodioritas	15.789	14%
T-Mbg3		Triásico	Esquistos grafiticos, cuarzo moscovíticos, cloríticos y anfibólicos; filitas; cuarcitas; mármoles, y serpentinitas.	18.873	16%
T-Mmg3		Triásico	Gneises cuarzo feldespáticos algunos con sillimanita, cordierita y hornblenda; anfibolitas; migmatitas; esquistos, y mármoles.	22.465	19%
T-Pf	Paleozoica	Triásico	Ortogneises graníticos	4.243	3,6%
C-Pi		Carbonífero	Dioritas, granodioritas, cuarzo dioritas y tonalitas.	6.316	5,4%
MP3NP1-Mag2		Precámbrico	Esténico-Tónico	Gneises cuarzo feldespáticos, migmatitas, granulitas, anfibolitas, ortogneises, cuarcitas y mármoles.	2.720
Total				116.647	100%

Fuente: SGS, 2015.

En la Tabla 5 se observa que la unidad geológica N2-Sc se presenta en mayor proporción en el municipio y la Estenico solo está en un 2.3%. Por otra parte, se presentan fallas geológicas como la Otu, El Bagre, Nus, La Concha y Liberia (Ver Figura 17).

Figura 17
Mapa geológico



Fuente: SGS, 2015.

7.1.3. Geomorfología

El municipio de Zaragoza se divide en tres unidades de paisaje que son:

- **La Serranía de San Lucas:** posee un sistema colinado con alturas que oscilan entre 200 y 600 msnm, con un drenaje subdentrítico que limita con la falla del Bagre.
- **Las estribaciones de las Cordillera Central:** Se ubican las zonas más altas del municipio especialmente al sur y al noroccidente, las alturas promedio están entre 200 y 700 msnm.
- **las Zonas bajas:** se caracteriza por tener zonas bajas y planas en el sector norte del municipio con ligeras ondulaciones. (Alcaldía de Zaragoza, 2010)

De acuerdo con la cartografía del IGAC se evidencia que predomina el paisaje de montaña en un 45% y la zona urbana solo tiene un 0.04% seguida del plano de inundación.

Tabla 22

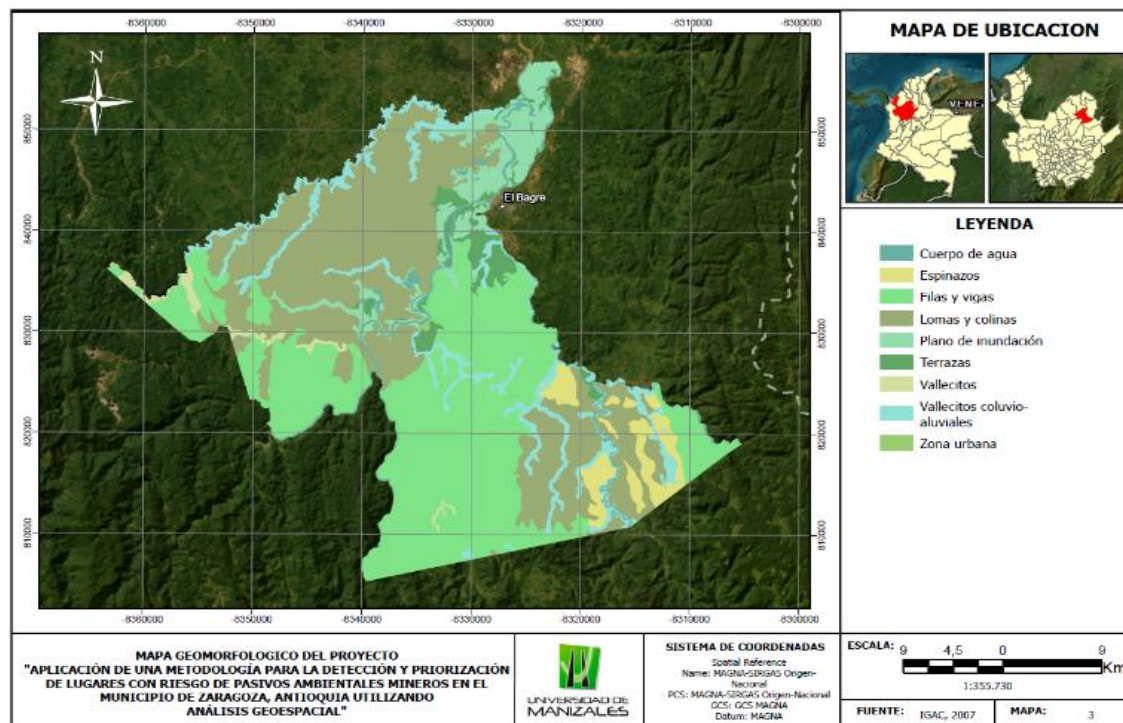
Unidades del Paisaje

LEYENDA	AREA (HA)	PORCENTAJE
Lomerío	51.076	44%
Montaña	52.180	45%
Planicie aluvial	7.469	6,40%
Plano de inundación	344	0,29%
Terrazas	5.531	4,74%
Zona urbana	45	0,04%
TOTAL	116.645	100%

Fuente: IGAC, 2007.

Figura 18

Mapa Geomorfológico



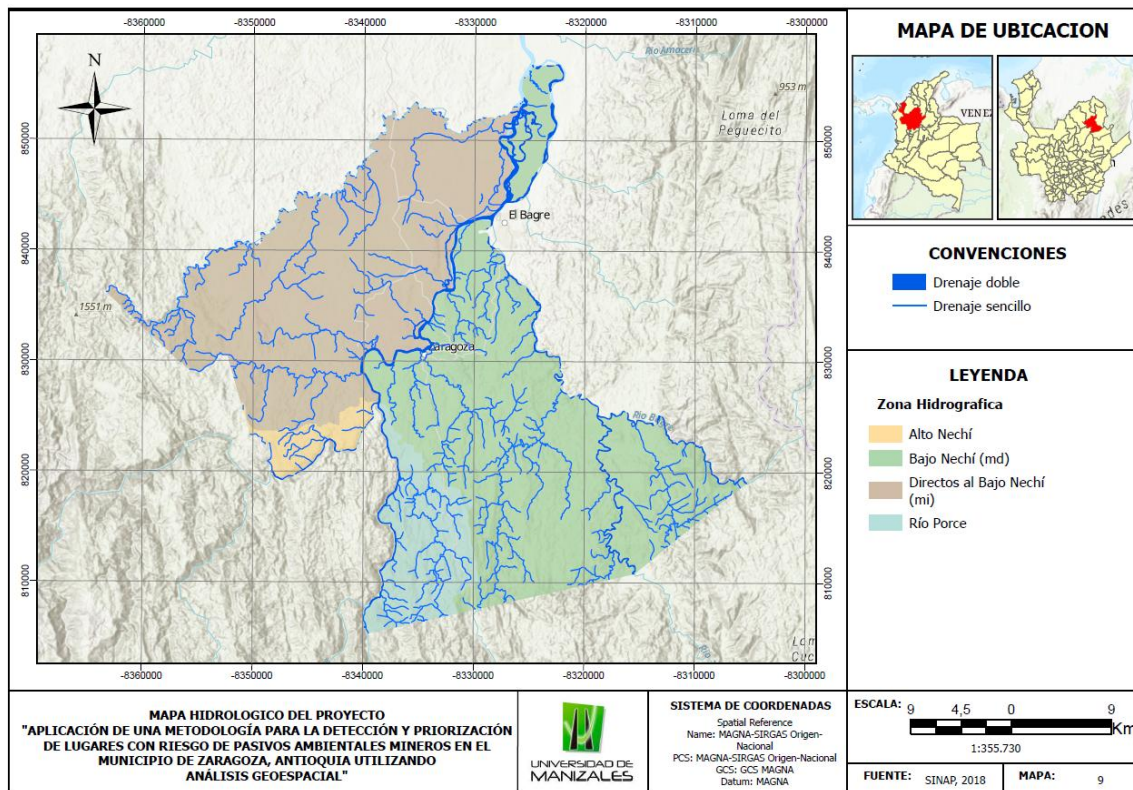
Fuente: IGAC,2007.

7.1.4. Hidrología

El sistema hidrológico del municipio forma parte de transición entre las cuencas media y baja del río Nechí que atraviesa Zaragoza en dirección oeste- noroeste, los principales afluentes son los ríos Porce y Tigui. (Ver Figura 19)

Figura 19

Mapa hidrológico



Fuente: SINAP, 2018

7.1.5. Suelos

En la siguiente tabla se especifican las características de suelos que se presentan en el municipio.

Tabla 23*Características del suelo*

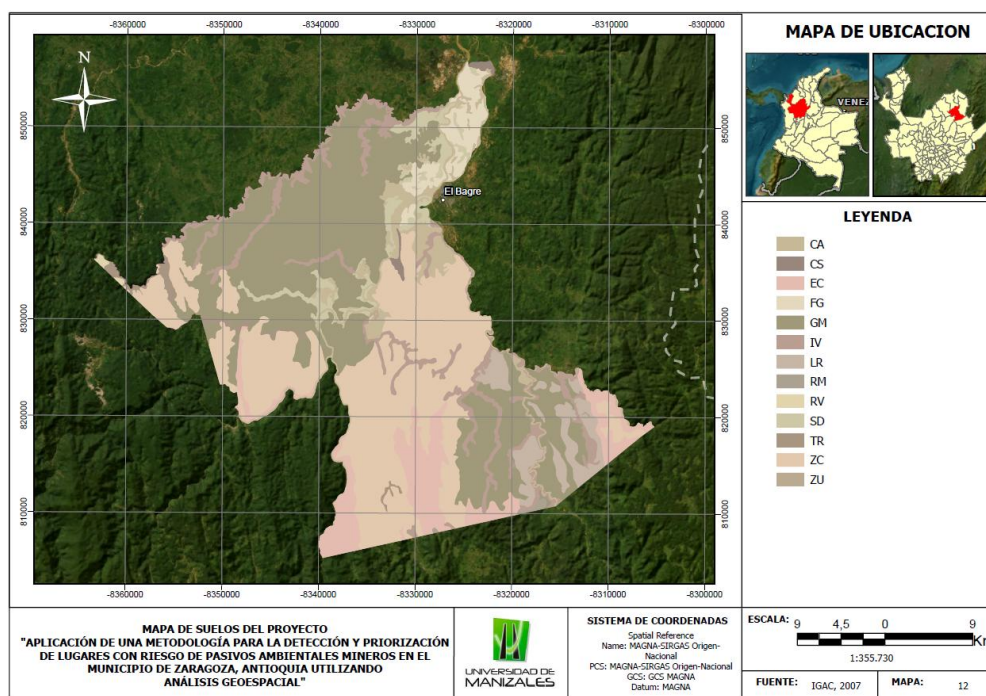
UCS	CARACTERÍSTICAS	AREA (HA)	PORCENTAJE
CA	Profundos y superficiales, bien y pobremente drenados, encharcamiento de poca duración, texturas variables finas a gruesas, erosión moderada, fertilidad baja a muy baja	5.531	4,74%
CS	Superficiales, bien y pobremente drenados, texturas medias y gruesas, reacción fuertemente ácida y neutra, fertilidad moderada a alta	344	0,29%
EC	Superficiales y profundos, bien drenados, texturas finas a moderadamente gruesas, erosión ligera a moderada, fertilidad muy baja a moderada	9.961	8,54%
FG	Profundos y superficiales, bien e imperfectamente drenados, texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, reacción moderadamente ácida a neutra, fertilidad moderada a alta	3.202	2,75%
GM	Profundos, bien drenados, texturas moderadamente finas y finas, reacción muy fuerte a fuertemente ácida, alta saturación de aluminio, fertilidad baja a muy baja	43.308	37,13%
IV	Superficiales y moderadamente profundos, el drenaje natural varía de pobre a imperfecto y moderado, inundaciones irregulares, texturas variadas finas a moderadamente gruesas, fertilidad baja a moderada	7.611	6,52%
LR	Profundos a moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, bien drenados, texturas medias a finas, erosión ligera a moderada, fertilidad muy baja a alta	4.573	3,92%
RM	Profundos y superficiales, limitados por roca, bien drenados, texturas finas y moderadamente, reacción muy fuerte a fuertemente ácida, fertilidad baja	157	0,13%
RV	Profundos y superficiales, bien drenados, texturas finas a medias, erosión ligera y moderada, fertilidad muy baja, reacción muy fuertemente ácida	118	0,10%
SD	Superficiales y muy superficiales, pobremente drenados, texturas finas y muy finas, fuerte y muy fuertemente ácidos, fertilidad moderada a alta	4.267	3,66%
TR	Superficiales y moderadamente profundos, bien a moderadamente bien drenados con inundaciones periódicas; texturas variadas, fertilidad baja a alta	1.343	1,15%
ZC	Profundos y moderadamente profundos, bien drenados, texturas finas y moderadamente finas a veces con fragmentos de roca, reacción extremada a fuertemente ácida, alta saturación de aluminio, fertilidad baja	36.185	31,02%
ZU	Zona urbana	45	0,04%
TOTAL		116.645	100%

Fuente: IGAC, 2007.

En la zona predominan el tipo de suelo GM en un 37% seguido de ZC en un 35%, por otra parte, la zona urbana solo presenta un 0.04% en todo el municipio. En la siguiente figura se puede evidenciar el mapa de suelos.

Figura 20

Mapa de suelos



Fuente: IGAC, 2007.

7.1.6. Clima

- **Precipitación**

El municipio de Zaragoza se localiza en la zona climática de la serranía de San Lucas y sus patrones climáticos pertenecen a la región Caribe. Por lo que se caracteriza en precipitaciones superiores a los 3000 mm a 4500 mm anuales.

- **Temperatura**

El territorio se extiende desde los 50 m sobre el nivel del mar hasta los 600 m. Por lo que se presentan temperaturas medias que fluctúan entre los 28 °C y los 25°C.

7.1.7. Coberturas Vegetales

De acuerdo con el mapa de coberturas generado por el Instituto SINCHI basado en la metodología de Corine Land Cover, en la zona del área de influencia se tienen las coberturas descritas en la siguiente Tabla.

Tabla 24

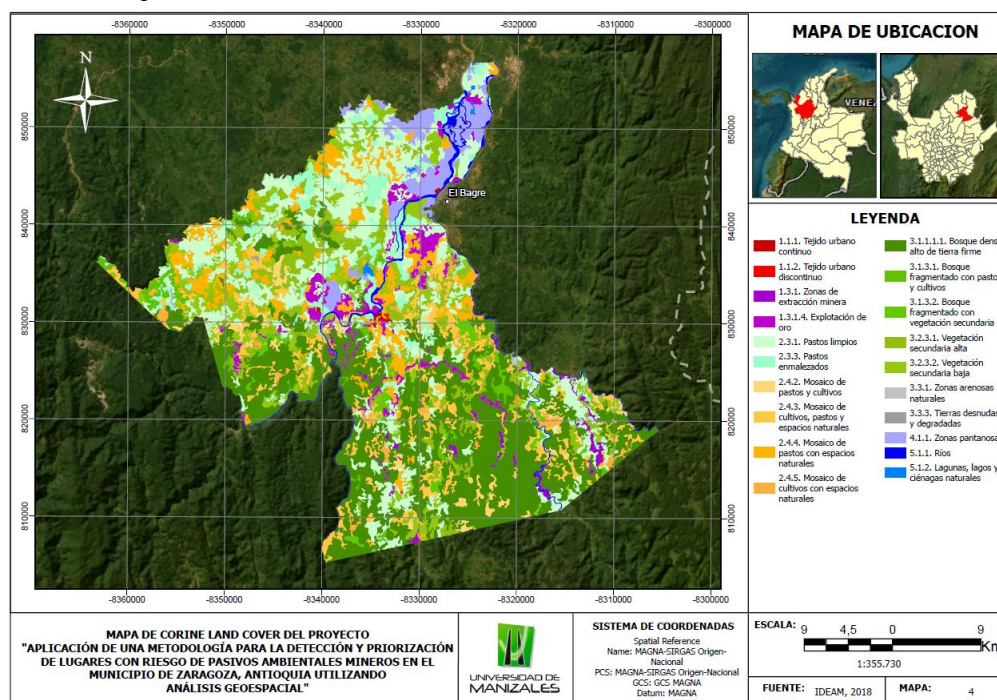
Descripción coberturas

LEYENDA	AREA (HA)	PORCENTAJE
1.1.1. Tejido urbano continuo	164	0,14%
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	25	0,02%
1.3.1. Zonas de extracción minera	1.149	0,99%
1.3.1.4. Explotación de oro	4.324	3,71%
2.3.1. Pastos limpios	21.721	19%
2.3.3. Pastos enmalezados	5.367	4,60%
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	2.514	2,16%
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	8.278	7,10%
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	8.485	7,27%
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	1.455	1,25%
3.1.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme	33.611	29%
3.1.3.1. Bosque fragmentado con pastos y cultivos	2.095	1,80%
3.1.3.2. Bosque fragmentado con vegetación secundaria	1.651	1,42%
3.2.3.1. Vegetación secundaria alta	10.094	8,65%
3.2.3.2. Vegetación secundaria baja	9.003	7,72%
3.3.1. Zonas arenosas naturales	42	0,04%
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	35	0,03%
4.1.1. Zonas pantanosas	4.668	4,00%
5.1.1. Ríos	1.770	1,52%
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	191	0,16%
TOTAL	116.642	100%

Fuente: IDEAM, 2018.

Figura 21

Mapa de coberturas



Fuente: IDEAM, 2018.

7.1.8. Economía

El municipio ha fundamentado su economía en la explotación de minería de oro, lo que ha marcado la dinámica de su territorio. Sin embargo, no se han consolidado otros sectores económicos de manera significativa, lo que ha llevado al desarrollo de actividades agrícolas, ganaderas, pecuarios, pesqueras y explotación de bosque. Además, la población no cuenta con ingresos fijos, los empleos son bajos y se presenta carencia de infraestructura vial, transporte y comunicación. (Alcaldía de Zaragoza, 2010)

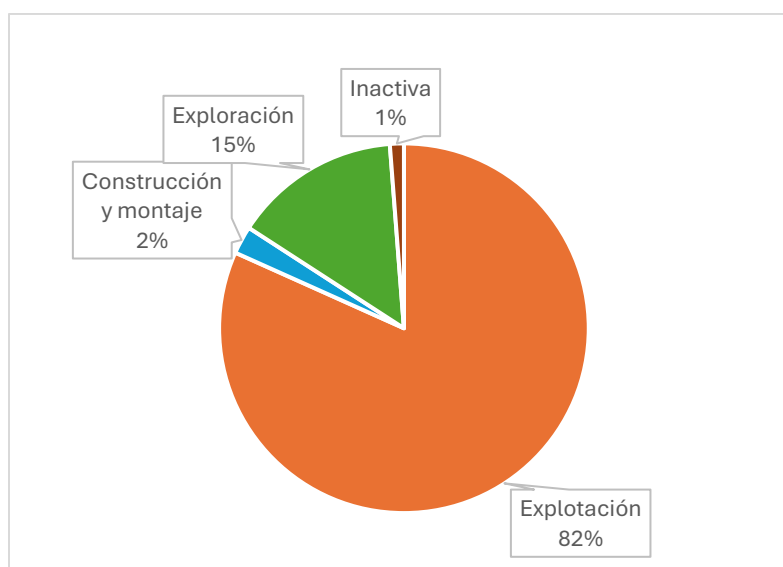
➤ Títulos mineros:

Según el Geovisor del Sistema Integral de Gestión Minera de la ANM, hasta la fecha, en el municipio de Zaragoza existen 82 títulos mineros. De estos, el 82 % se encuentra en etapa de explotación, principalmente de minerales como oro, plata y sus

concentrados, así como anhidrita, antracita, arcilla, entre otros. El 15 % está en fase de exploración, el 2 % en construcción y montaje, y el 1 % en proceso de liquidación ver (Figura 22).

Figura 22

Títulos mineros en Zaragoza



Fuente: ANM,2025.

En la siguiente tabla se presentan los títulos mineros, de acuerdo con su modalidad, estado y etapa:

Tabla 25

Títulos mineros

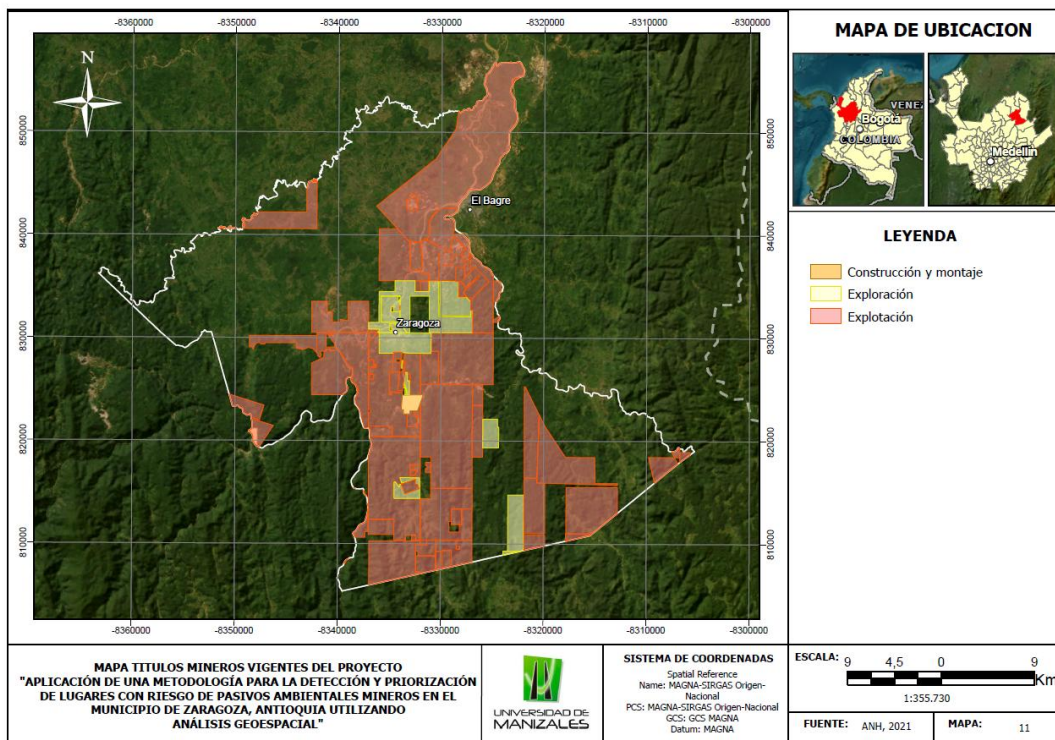
Estado	Modalidad	Etapa	No. de Títulos
Activo	Contrato De Concesión (D 2655)	Explotación	3
Activo	Autorización Temporal	Explotación	1
Activo	Licencia De Exploración	Exploración	2
Activo	Reconocimiento Propiedad Privada	Explotación	7
Activo	Reconocimiento Propiedad Privada	Construcción y montaje	1
Activo	Contrato De Concesión (L 685)	Construcción y montaje	1
Activo	Contrato De Concesión (L 685)	Exploración	10
Activo	Contrato De Concesión (L 685)	Explotación	56

Inactivo - Título terminado	Contrato De Concesión (L 685)	Inactiva	1
Total			82
Fuente: ANM,2025			

En el siguiente mapa se evidencian los títulos mineros de acuerdo con su etapa en el municipio de Zaragoza.

Figura 23

Mapa de títulos mineros en Zaragoza



Fuente: ANM, 2025.

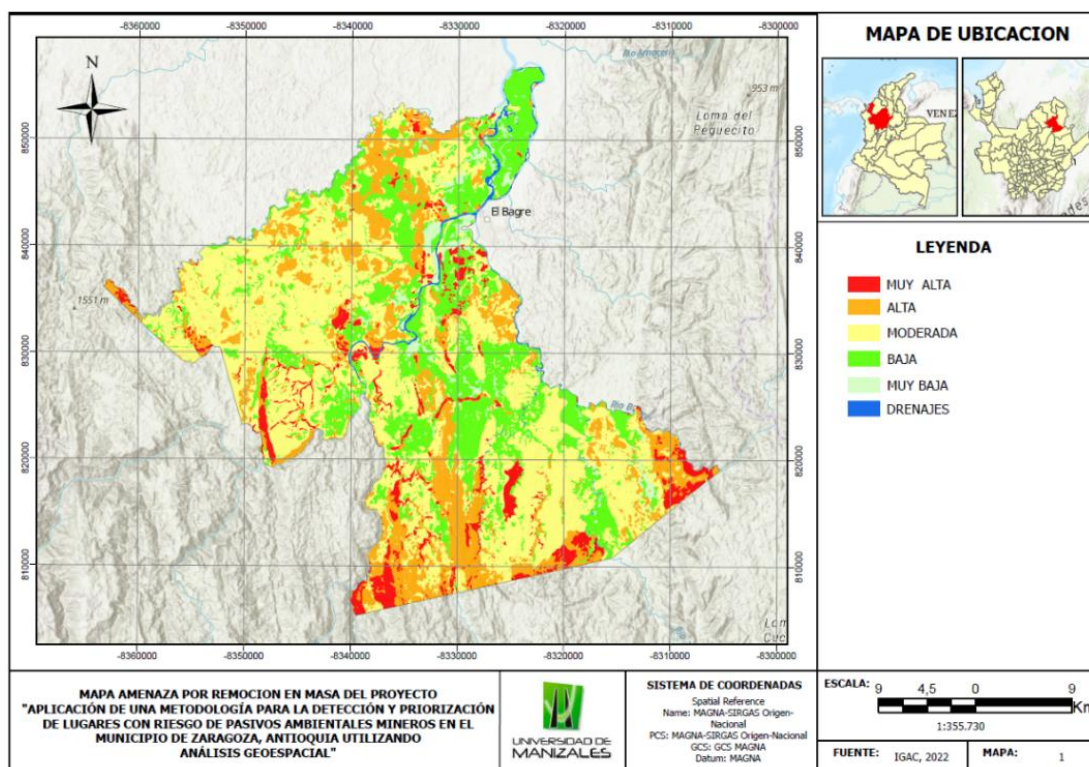
7.2. Identificación De Amenazas

7.2.1. Movimientos Por Remoción En Masa

Zaragoza está ubicada sobre el cinturón del pacifico, una región caracterizada por una alta actividad sísmica. Además, la cabecera municipal se encuentra cerca del sistema de fallas Otu-Pericos, lo que incrementa su vulnerabilidad. Por otro lado, como se muestra en la figura 21, la mayor parte del municipio tiene un riesgo moderado.

Figura 24

Mapa de amenaza por remoción en masa



Fuente: IGAC, 2022

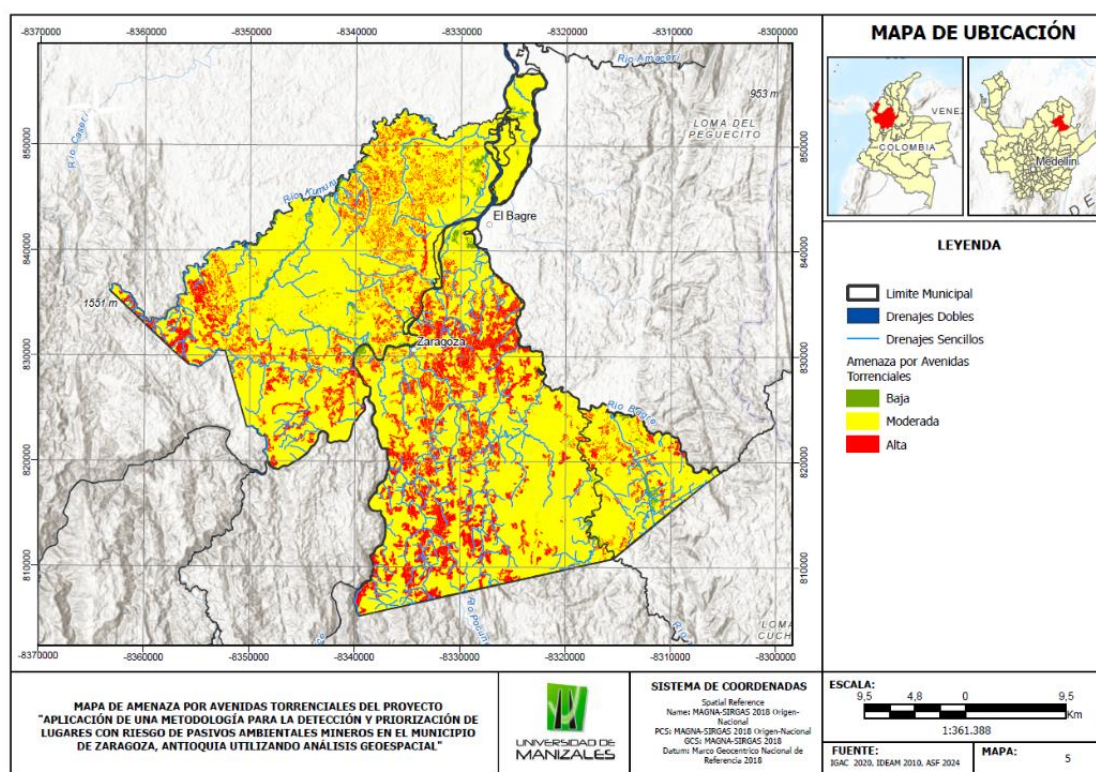
7.2.2. Análisis de Amenaza Por Avenidas Torrenciales

En el municipio, las zonas de amenaza alta se localizan en terrenos con pendientes pronunciadas, suelos altamente erosionables, cauces de ríos con elevada pendiente y áreas

expuestas a lluvias intensas. Como se evidencia en la figura 22, la mayor parte del territorio presenta una amenaza moderada.

Figura 25

Mapa amenaza por avenidas torrenciales



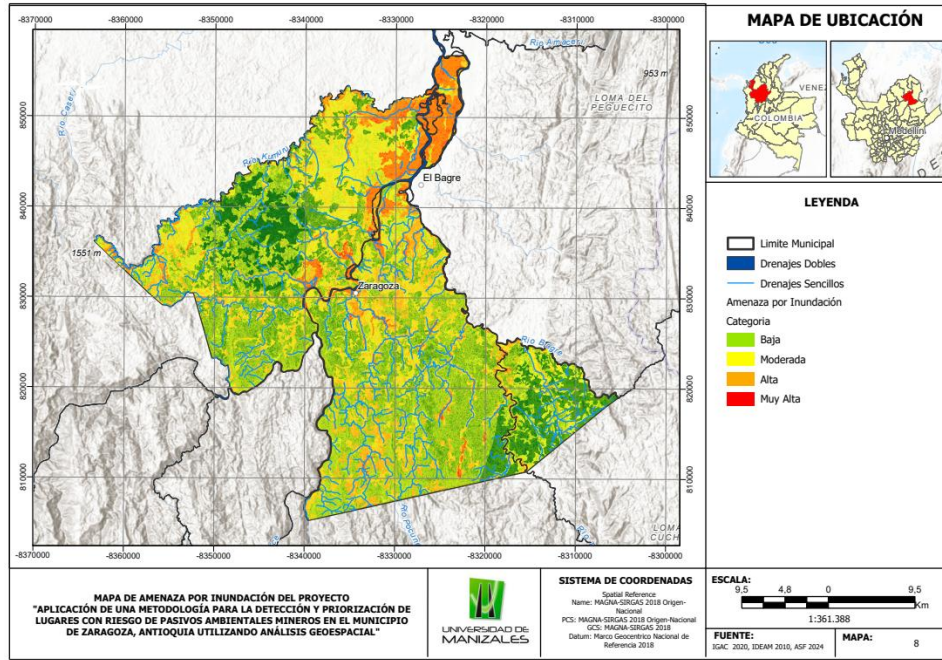
Fuente: IGAC, 2020; IDEAM, 2010 y ASF, 2024

7.2.3. Amenaza Por Inundación

En el municipio, se identifica una amenaza alta en las áreas cercanas al Rio Nechi y a las quebradas Oca y Juan Vara. Estas quebradas son propensas a inundaciones causadas por fuertes en la microcuenca o por represamientos provocadas por el aumento del caudal rio Nechi. En la figura 18 se observa que la mayor parte del municipio presenta una amenaza baja.

Figura 26

Mapa de Amenaza por inundación



Fuente: IGAC, 2020; IDEAM, 2010 y ASF, 2024

8. Resultados

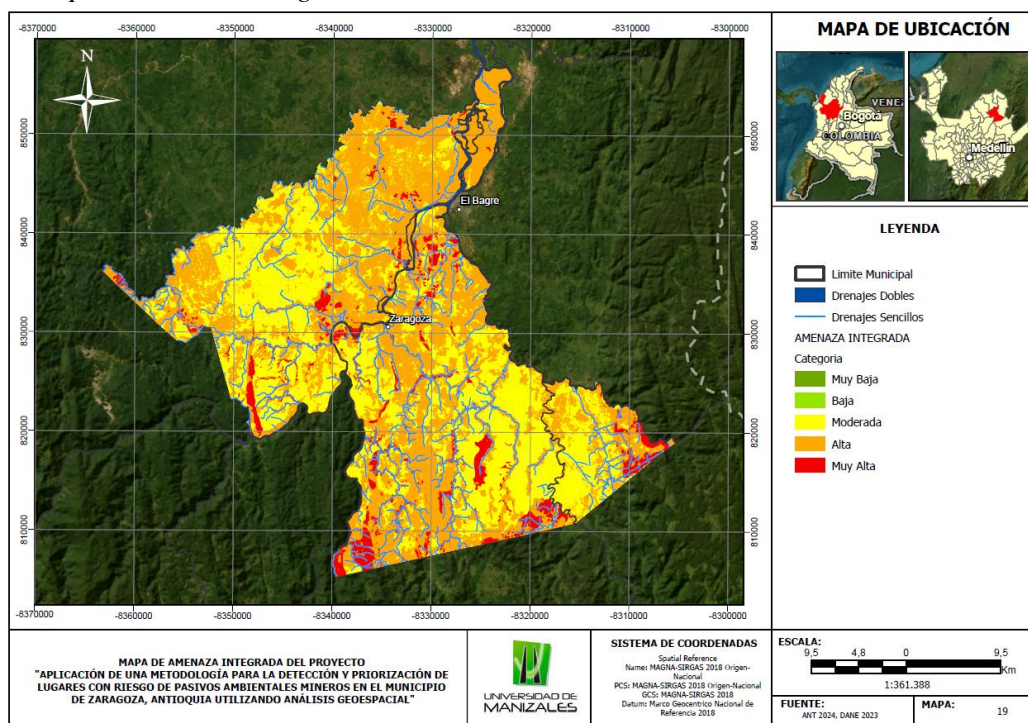
8.1. Fase 1: Adaptación de la metodología propuesta por el MinMinas.

8.1.1. Análisis de Amenaza integrada

El mapa de amenaza integrada que se observa en la Figura 27 muestra la zonificación multiamenaza del municipio de Zaragoza, Antioquia, destacando las áreas con distintos niveles de amenaza (muy baja, baja, moderada, alta y muy alta) en relación con tres fenómenos naturales: inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa.

Figura 27

Mapa de amenaza integrada



Fuente: Autores, 2025

Tal como se puede observar, las zonas de mayor riesgo (Rojo) se localizan principalmente en sectores con fuerte influencia de drenajes principales y terrenos con pendientes pronunciadas. En estas áreas, la susceptibilidad a eventos como deslizamientos y flujos torrenciales es elevada, lo que las convierte en puntos críticos para la gestión del riesgo. En contraste, las zonas de amenaza Alta (Naranja) se relacionan con áreas de menor pendiente que se encuentran asociadas a fenómenos de inundación. Posteriormente se encuentran las áreas de amenaza moderada, baja y muy baja (Amarillo y verde respectivamente) corresponden a terrenos más estables, con menor probabilidad de afectaciones por eventos naturales extremos.

La Tabla 26. y la Figura 28 presentan la distribución de las áreas según las categorías de amenaza, junto con su respectiva proporción porcentual.

Tabla 26.

Distribución porcentual de las amenazas naturales en Zaragoza, Antioquia

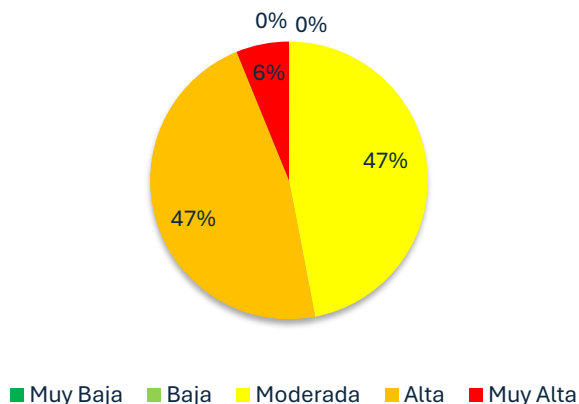
Categoría de Amenaza	Área (Ha)	Área (%)
Muy Baja	7,23	0,01
Baja	48,61	0,04
Moderada	54.722,06	46,94
Alta	54.626,45	46,85
Muy Alta	7.185,65	6,16
Total	117.261	100

Fuente: Autores, 2025

Figura 28

Grafica de amenaza integrada del municipio de Zaragoza

Categoría de Amenaza Integrada



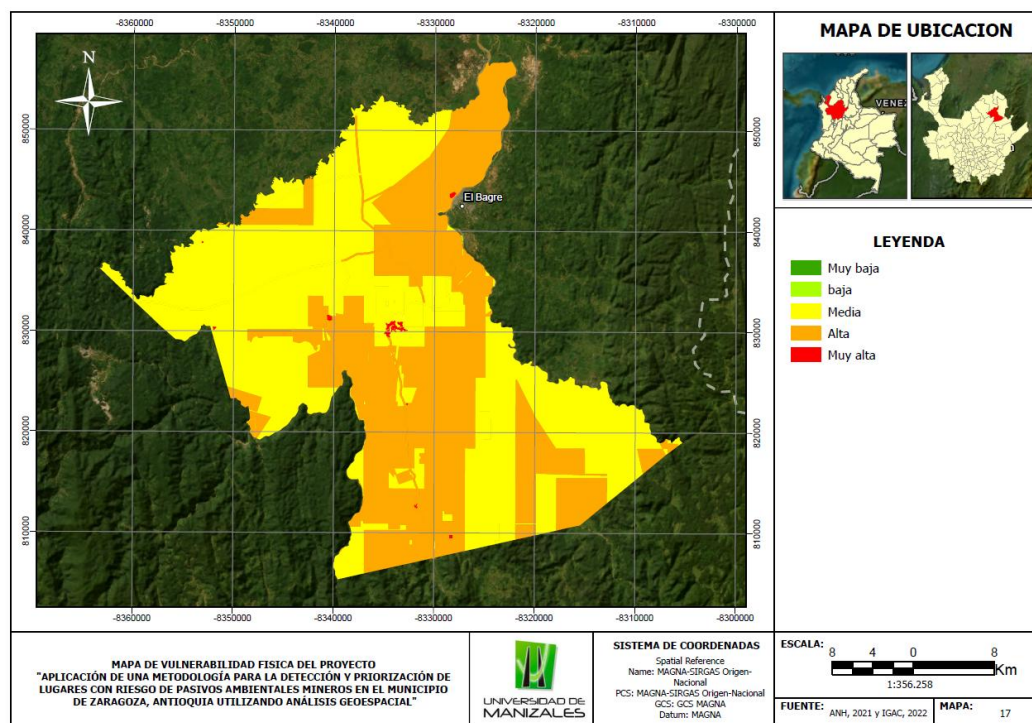
Fuente: Autores, 2025.

8.1.2. Análisis de vulnerabilidad multidimensional

8.1.2.1. Análisis vulnerabilidad física

El municipio de Zaragoza presenta una vulnerabilidad física predominantemente media a alta (Ver Figura 29), siendo las áreas más críticas aquellas ubicadas en el centro del territorio. Las zonas de alta vulnerabilidad coinciden con sitios donde se desarrollan actividades mineras, así como con terrenos de mayor pendiente y suelos erosionables, lo que incrementa los riesgos asociados.

Por otro lado, las zonas representadas en color amarillo, que abarcan gran parte del territorio, reflejan una vulnerabilidad moderada. Aunque estas áreas no presentan los niveles más altos de riesgo, requieren atención y un manejo adecuado para prevenir posibles impactos en el futuro.

Figura 29*Mapa de vulnerabilidad Física*

Fuente: ANH y IGAC, 2022

8.1.2.2. Análisis de la vulnerabilidad ambiental

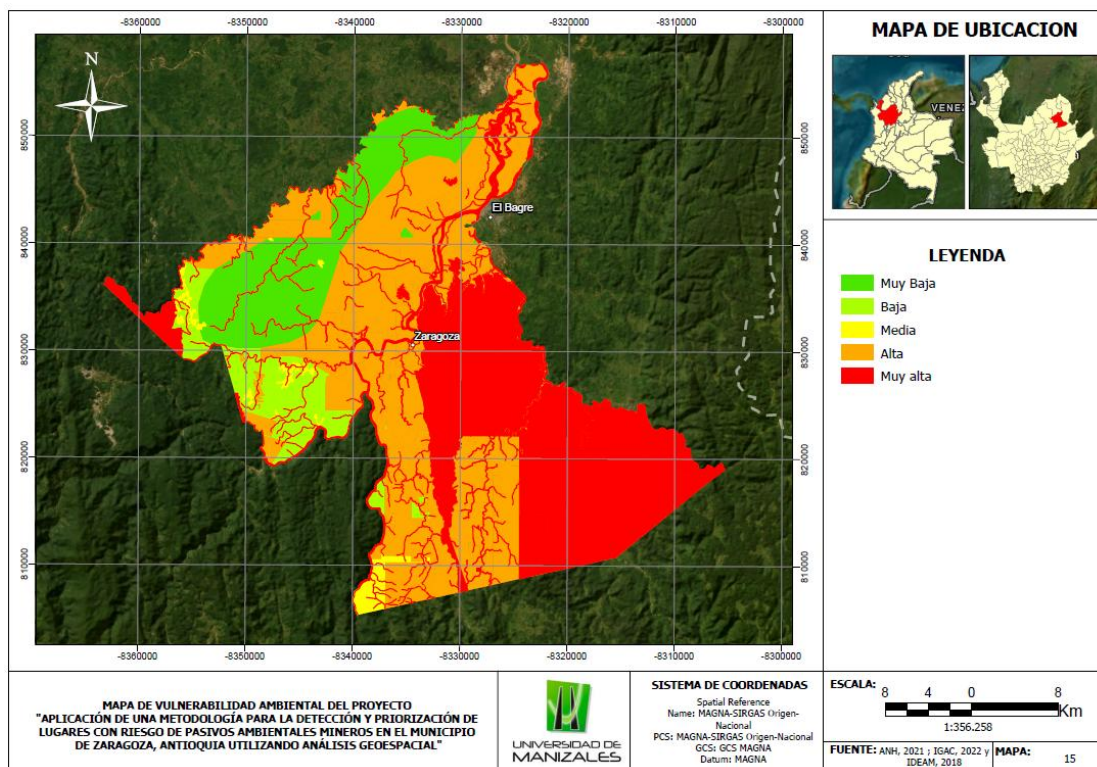
Las zonas de alta vulnerabilidad se localizan principalmente en el sector sureste del municipio y están vinculadas a las Reservas Forestales establecidas por la Ley 2 de 1959, entre ellas la reserva del río Magdalena. Además, según la información del RUNAP, en el noreste del municipio se encuentra un Distrito de Manejo Integrado.

Por otra parte, las zonas de amenaza media se localizan en el centro y sur del municipio, mientras que las áreas con baja vulnerabilidad se encuentran en el norte y noreste. Estas últimas poseen características más estables y menos intervención humana, por lo que se debe fomentar la conservación y un manejo sostenible de estas.

En la **Figura 30** se puede observar la distribución espacial de la vulnerabilidad ambiental del municipio de Zaragoza.

Figura 30

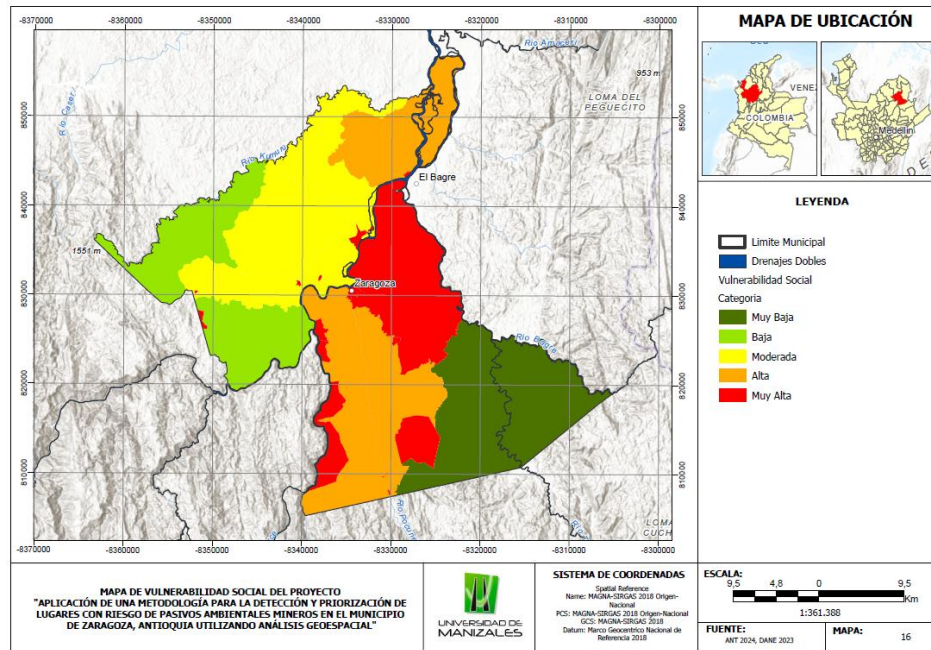
Mapa de vulnerabilidad ambiental



Fuente: ANH, 2021; IGAC, 2022 y IDEAM, 2018

8.1.2.3. Análisis de la vulnerabilidad social

El municipio presenta una notable diversidad étnica, con comunidades asentadas principalmente en las rondas de los principales ríos y en zonas de actividad minera. Estas poblaciones, junto con las veredas de menor nivel económico, enfrentan niveles de vulnerabilidad significativamente más altos. Dado que esta vulnerabilidad no se distribuye de manera homogénea en el territorio, es fundamental que los tomadores de decisiones diseñen estrategias orientadas a mejorar las condiciones de vida de la población.

Figura 31*Mapa de vulnerabilidad social*

Fuente: Autores, 2025

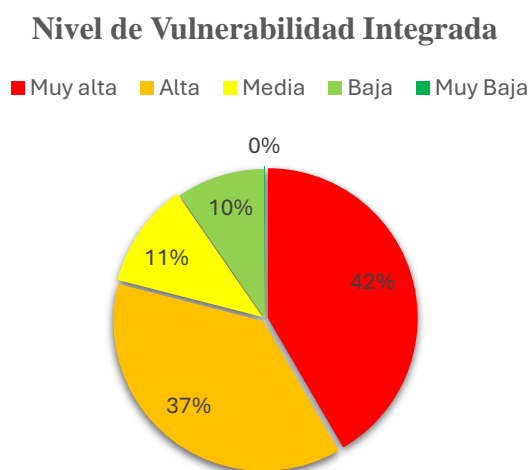
8.1.2.4. Vulnerabilidad integrada

El mapa de vulnerabilidad integrada, presentado en la Figura 33, combina la vulnerabilidad ambiental, física y social del municipio de Zaragoza, permitiendo identificar las áreas más sensibles. Además, la siguiente tabla muestra los niveles de vulnerabilidad resultantes tras el análisis espacial realizado, proporcionando una visión detallada de las zonas con mayor susceptibilidad a impactos.

Tabla 27*Nivel de vulnerabilidad integrada*

Nivel de Vulnerabilidad	Área (Ha)	Porcentaje (%)
Muy alta	48.790	42%
Alta	43.833	37%
Media	13.335	11%
Baja	11.189	10%
Muy Baja	114	0,10%
Total	117.261	100%

Fuente: Autores, 2025.

Figura 32*Grafica de la vulnerabilidad integrada*

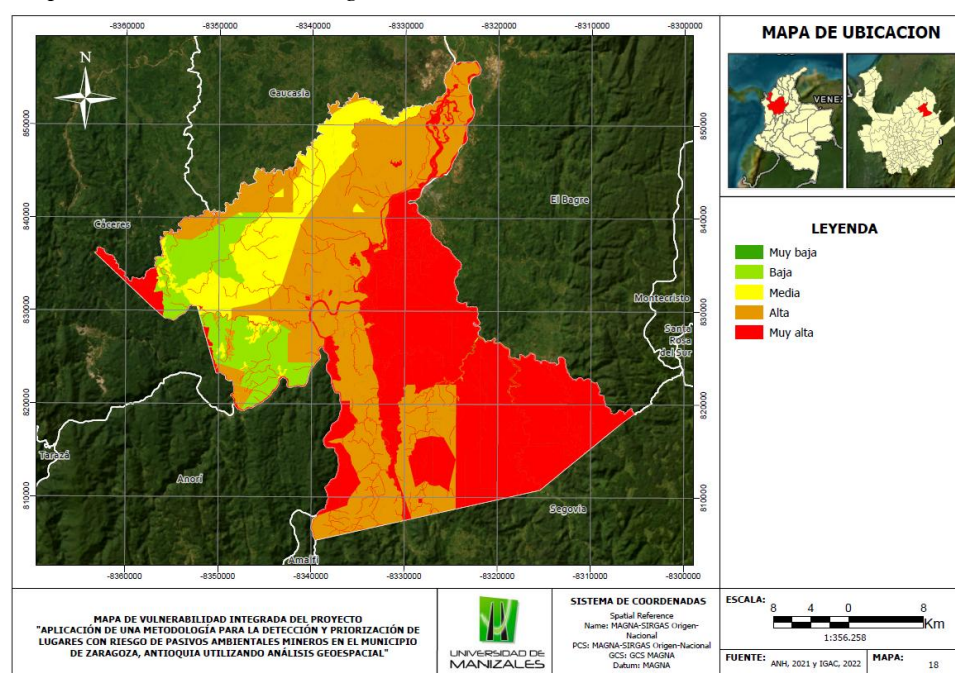
Fuente: Autores, 2025.

De acuerdo, con la información precedente el nivel de vulnerabilidad muy alta y alta, representan el 42% y 37% respectivamente. Estas zonas se ubican en el sureste del municipio, coincidiendo con áreas asociadas a actividades mineras, con comunidades expuestas, áreas de protección ambiental y cuerpos hídricos.

Por otra parte, el nivel de vulnerabilidad multidimensional bajo posee un 10% del territorio, estas áreas se encuentran en la parte norte y noroeste, caracterizándose por ser regiones menos intervenidas, con menor densidad poblacional y sin áreas de interés ambiental.

Figura 33

Mapa de vulnerabilidad integrada



Fuente: ANH, 2021 y IGAC, 2022

8.2. Fase 2: Identificación de los principales impactos ambientales generados por las actividades mineras.

El municipio de Zaragoza, Antioquia, ha sido históricamente un territorio con alta actividad minera, especialmente en la extracción de oro (Palacios, 2013). Esta práctica, aunque representa una importante fuente económica para la región, ha generado significativos impactos ambientales que afectan los recursos naturales y la calidad de vida

de las comunidades locales. También existe la posibilidad latente de que se generen pasivos ambientales a largo plazo tras el cese de las operaciones mineras, como la contaminación residual de fuentes hídricas por el uso de mercurio y cianuro, suelos degradados, deforestación sin restauración y acumulación de desechos tóxicos.

Estos efectos no solo afectan los ecosistemas locales, sino que también comprometen la calidad de vida de las comunidades, perpetuando riesgos de salud pública y limitando el uso sostenible del territorio.

En este sentido, identificar estos impactos de manera temprana es fundamental para comprender las consecuencias ecológicas y sociales de la actividad minera, así como para prevenir la formación de pasivos ambientales. Entre los principales efectos ambientales destacan la contaminación de fuentes hídricas por el uso de mercurio y cianuro, la deforestación, la pérdida de biodiversidad y la modificación drástica del paisaje.

La Tabla 28. describe las principales actividades relacionadas con la actividad minera, los recursos naturales afectados y los impactos ambientales identificados.

Tabla 28.*Matriz de Identificación de Impactos Ambientales*

ACTIVIDAD	ASPECTO AMBIENTAL ASOCIADO		IMPACTO AMBIENTAL	
	Aspecto Ambiental	Descripción del Aspecto Ambiental	Recurso Afectado	Impacto Generado
Prospección y exploración minera	Remoción de cobertura vegetal	Eliminación de vegetación superficial para facilitar la exploración geológica.	Suelo, flora, fauna	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de biodiversidad • Alteración de hábitats naturales
	Uso de explosivos y perforación	Aplicación de explosivos y maquinaria para estudios geotécnicos.	Suelo, fauna	<ul style="list-style-type: none"> • Vibraciones y daño a estructuras naturales y viviendas
Construcción de campamentos e infraestructura	Cambio de uso del suelo	Modificación del entorno natural para adecuar instalaciones mineras.	Suelo, flora, fauna, aire	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de cobertura vegetal • Fragmentación del hábitat
	Generación de residuos sólidos	Producción de desechos por actividades humanas y operativas.	Suelo, agua, aire	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación de suelos y agua por desechos mal gestionados
Extracción de materiales (cielo abierto y subterránea)	Modificación de la morfología del terreno	Alteración física del terreno por remoción de grandes volúmenes de tierra.	Suelo, paisaje	<ul style="list-style-type: none"> • Erosión • Deslizamientos • Alteración del paisaje
	Contaminación por mercurio y cianuro (en minería aurífera)	Uso de sustancias tóxicas para la extracción del oro.	Agua, fauna, suelo, flora	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación de cuerpos de agua • Bioacumulación en fauna

	Generación de material particulado	Liberación de polvo y partículas finas por voladuras y maquinaria.	Aire, salud humana	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación del aire • Afecciones respiratorias en población
Uso de maquinaria pesada y explosivos	Emisiones atmosféricas (CO ₂ , NO _x , SO _x)	Liberación de gases contaminantes por combustión de motores y explosivos.	Aire, clima, salud humana	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio en la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI)
	Vibraciones y ruido	Ondas sonoras y vibraciones generadas por maquinaria y detonaciones.	Fauna, salud humana	<ul style="list-style-type: none"> • Alteración de la fauna y molestias a comunidades locales
Procesamiento de minerales (beneficio)	Vertimiento de aguas residuales con químicos	Descarga de aguas contaminadas con reactivos químicos.	Agua, fauna, suelo	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación de cuerpos de agua • Afectación a fauna acuática
	Consumo de grandes volúmenes de agua	Uso intensivo de agua en procesos de separación de minerales.	Agua, ecosistemas acuáticos	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de disponibilidad del recurso hídrico
Almacenamiento de materiales y relaves	Formación de diques y depósitos de relaves	Acumulación de desechos minerales y lodos con químicos residuales.	Agua, suelo, fauna	<ul style="list-style-type: none"> • Posible colapso de diques • Contaminación por filtraciones
	Generación de drenaje ácido de mina (DAM)	Formación de lixiviados ácidos al contacto del agua con sulfuros.	Agua, suelo, flora, fauna	<ul style="list-style-type: none"> • Acidificación de cuerpos de agua y suelo
Transporte de materiales y residuos	Emisión de material particulado y gases	Generación de polvo y gases por el transporte de carga pesada.	Aire, salud humana	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación atmosférica y afectación a la salud humana
	Generación de derrames accidentales	Fugas de sustancias tóxicas durante el transporte de materiales.	Agua, suelo, fauna	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación de cuerpos de agua y suelos

Abandono y cierre de mina	Falta de restauración ambiental	No ejecución de acciones de rehabilitación del área intervenida.	Suelo, flora, paisaje	<ul style="list-style-type: none">• Alteración del paisaje• Erosión y falta de recuperación del ecosistema
	Pasivos ambientales no tratados	Residuos peligrosos y contaminantes dejados sin tratamiento adecuado.	Agua, suelo, flora, fauna, aire	<ul style="list-style-type: none">• Contaminación crónica y riesgos a largo plazo

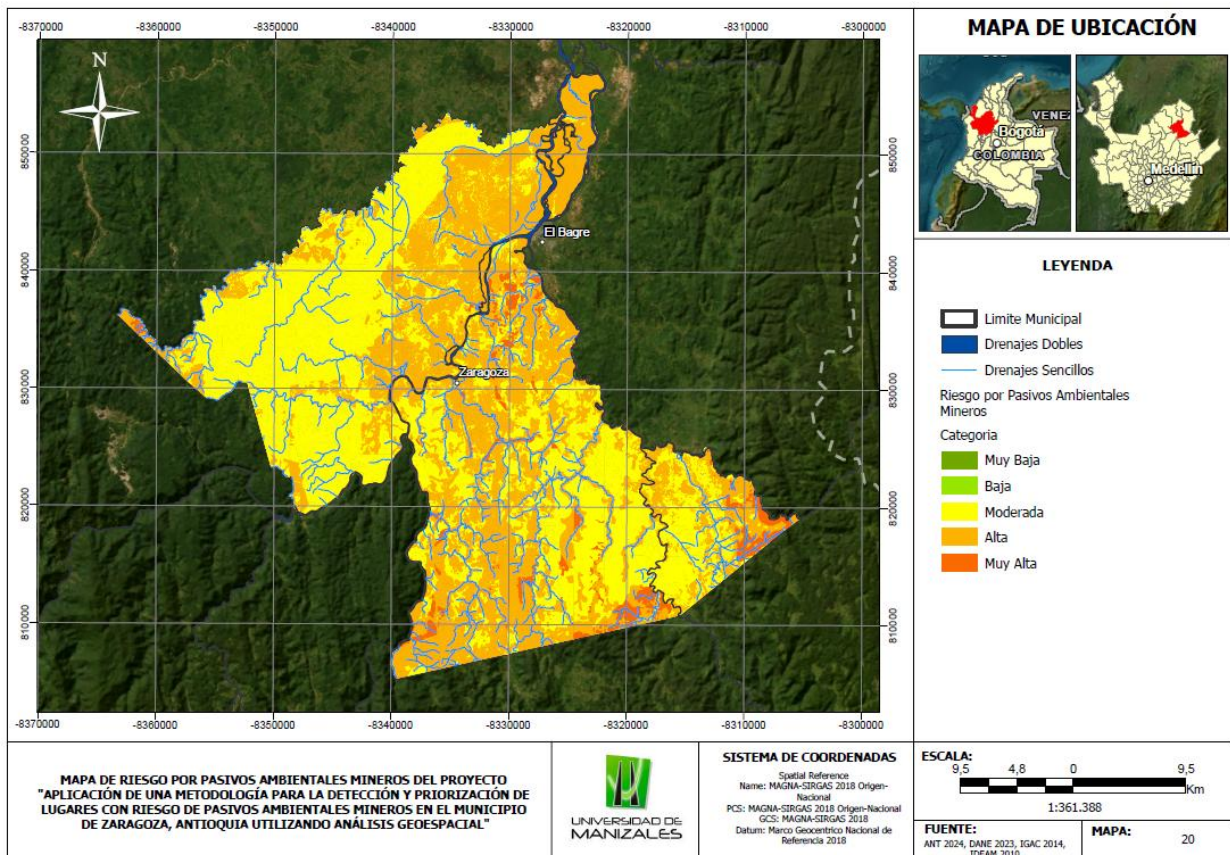
Fuente: Autores, 2025

8.3. Fase 3: Elaboración de un mapa de las zonas con riesgo de configurarse como pasivos ambientales mineros en el municipio de Zaragoza

El mapa obtenido como resultado del producto entre el mapa de amenazas y la vulnerabilidad integrada, muestra las áreas de riesgo de configurar PAM en el municipio de Zaragoza, Antioquia, clasificando las áreas en cinco categorías: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta.

Figura 34

Mapa de zonas de riesgos de configurarse como pasivos ambientales mineros



Fuente: ANT, 2024; DANE, 2023; IGAC, 2014 y IDEAM, 2010.

La figura 34 permite identificar las zonas con mayor susceptibilidad a impactos derivados de actividades extractivas abandonadas o sin manejo adecuado. Se evidencia que las áreas con riesgo alto y muy alto se concentran principalmente en el sector sureste del municipio, donde coinciden con una alta densidad de drenajes y zonas de relieve accidentado, factores que aumentan la posibilidad de procesos erosivos, contaminación de fuentes hídricas y afectaciones al ecosistema.

Las áreas categorizadas con riesgo moderado se distribuyen en zonas intermedias, donde la influencia de actividades mineras es menor. Por otro lado, las zonas con riesgo bajo o muy bajo corresponden principalmente a sectores con menor intervención antrópica, como áreas de conservación o sin antecedentes significativos de explotación minera.

La distribución espacial y porcentual del riesgo por pasivos ambientales en el municipio de Zaragoza se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 29

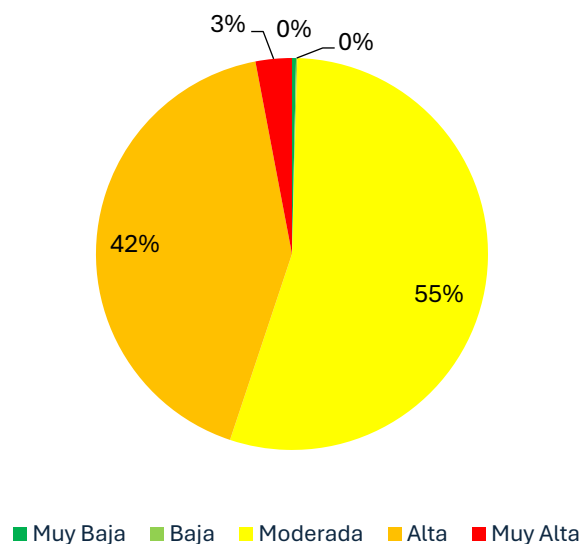
Distribución porcentual de las zonas de riesgo de configurarse como PAM

Riesgo	Área (Ha)	Área (%)
Muy Baja	389,93	0,33
Baja	115,79	0,1
Moderada	64.001,24	54,69
Alta	49.018,39	41,89
Muy Alta	3.497,20	2,99
Total	117.261	100

Fuente: Autores, 2025

Figura 35

Zonas de riesgo de configurarse como PAM del municipio de Zaragoza



Fuente: Autores, 2025

Las zonas de mayor riesgo, que representan el 2,99 % del territorio, se concentran principalmente en el sureste del municipio, donde se observa una alta densidad de drenajes, mayor vulnerabilidad ambiental debido a la presencia de reservas naturales y una elevada cantidad de títulos mineros.

Las áreas con riesgo alto, que abarcan el 41,89 % del municipio, se localizan principalmente en el centro, a lo largo del río Nechí. Esta concentración coincide con la mayor presencia de títulos mineros, lo que refuerza las dinámicas históricas de minería aluvial en la región.

Por último, las zonas con riesgo moderado, que comprenden el 54,69 % del territorio, se distribuyen de manera uniforme en el municipio, predominando en las áreas con menor densidad de drenajes.

8.4. Fase 4: Analizar cómo la información generada puede contribuir a la toma de decisiones de las autoridades ambientales y mineras

8.4.1. Identificación de autoridades competentes

Con el fin de analizar como la zonificación generada puede contribuir a la toma de decisiones de las autoridades ambientales y minera, el primer paso fue la identificación de las principales autoridades competentes a la hora de configurar un pasivo ambiental minero:

- **Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible:** Establece la metodología técnica para la realización de estudios preliminares de riesgo y define los instrumentos de control y manejo ambiental.
- **Ministerio de Minas y Energía:** Coordina acciones con otras entidades para la identificación y gestión de los PAM.
- **Agencia Nacional de Minería:** Supervisa la gestión ambiental de los títulos mineros activos y apoya en la identificación de pasivos ambientales.
- **Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA):** Encargada del control y la vigilancia ambiental de los proyectos mineros en el departamento de Antioquia.

De acuerdo con los actores identificados y los resultados del proyecto, los mapas presentados en el capítulo anterior son fundamentales para la toma de decisiones, ya que identifican las zonas con alto riesgo de configurarse como pasivos ambientales. Teniendo en cuenta las amenazas y vulnerabilidades analizadas en el municipio de Zaragoza, se

determinó que el 2,99 % del territorio presenta alto riesgo, mientras que el 41,89 % posee riesgo medio - alto.

8.4.2. Definición de la información requerida

Para la identificación de áreas con potencial de convertirse en pasivos ambientales mineros (PAM), es fundamental considerar una serie de criterios y factores que permitan evaluar su impacto y riesgo ambiental. A partir del análisis realizado, se destacan los siguientes:

1. Factores Físico-Ambientales

- Geología y geomorfología: La presencia de formaciones geológicas ricas en minerales explotables y estructuras inestables aumenta la probabilidad de generación de PAM.
- Pendiente del terreno: Zonas con alta pendiente favorecen procesos erosivos y la inestabilidad de relaves y escombros mineros.
- Disponibilidad y calidad de los recursos hídricos: La cercanía de actividades mineras a cuerpos de agua incrementa la vulnerabilidad a la contaminación por metales pesados y otros residuos.

2. Factores de Origen Minero

- Historial de explotación minera: Zonas con antecedentes de actividad minera, especialmente aquellas abandonadas sin planes de cierre adecuados, tienen mayor probabilidad de generar pasivos ambientales.

- Presencia de residuos mineros: La existencia de relaves mineros o escombreras sin manejo adecuado constituye un criterio clave.

3. Factores de Riesgo y Vulnerabilidad

- Impacto en ecosistemas sensibles: La superposición de áreas mineras con zonas de alto valor ecológico, como reservas forestales, humedales o áreas protegidas, incrementa el riesgo de degradación ambiental.
- Nivel de vulnerabilidad de las comunidades: Poblaciones cercanas a antiguas zonas mineras con alta dependencia del recurso hídrico o en condiciones de pobreza son más susceptibles a los efectos negativos de los PAM.
- Propensión a eventos naturales: Regiones con alta amenaza por inundaciones, remoción en masa o avenidas torrenciales pueden agravar los efectos de pasivos mineros.

4. Factores Normativos y de Gestión

- Regulación ambiental y minera: La ubicación de actividades mineras dentro de áreas protegidas o bajo normativas de restauración ambiental condiciona la evaluación del riesgo.
- Planes de cierre y rehabilitación: La ausencia de medidas de remediación y monitoreo de antiguas explotaciones facilita la acumulación de PAM.

8.4.3. Uso potencial de la información generada

Con base en esta información y como parte de la identificación del uso potencial de la información generada, se establecieron medias de manejo que pueden servir como

insumo para que la autoridad competente formule el un plan de intervención de pasivos ambientales para el municipio de Zaragoza de acuerdo con lo establecido en el artículo 7 de la ley 2327 del 2023 (ver tabla 30).

Tabla 30

Medidas de manejo

Medida de manejo	Descripción
Prevención:	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento periódico de las obras hidráulicas implementadas. • Implementación de sistemas de drenaje y control de aguas superficiales. • Implementación de telas de malla abierta para el control de la erosión y facilitar el arraigo de la vegetación. • Realizar monitoreos fisicoquímicos y bioquímicos periódicos de la calidad del agua. • Implementación de programas de capacitación para las comunidades sobre el cuidado y uso del agua. • Los residuos se almacenarán en un lugar que cuente con ventilación natural, suministro de agua, techado, señalización y un kit de derrames. • Fortalecimiento de la participación comunitaria en la toma de decisiones relacionadas con la actividad minera. • Implementación de campañas de salud para prevención y tratamiento de posibles enfermedades generadas por las actividades. • Desarrollar jornadas de limpieza de taludes. • Cubrimiento con textiles biodegradables los lugares afectados por escorrentía superficial.
Mitigación	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción de terrazas y muros de contención. • Reutilización de RCD en actividades de rehabilitación o construcción, si es viable.
Compensación	<ul style="list-style-type: none"> • Contratación de mano de obra local, garantizando que al menos el 70% sea de la comunidad. • Entregar los residuos a empresas legalmente constituidas con permisos ambientales. • Informe de solicitudes y PQRS resueltas durante el desarrollo de la actividad.
Restauración	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de una cubierta vegetal y reforestación con especies nativas de la zona. • Remoción de sedimentos contaminados en los cuerpos de agua.

Fuente: Autores, 2025

9. Discusión de Resultados

- **Adaptación de la metodología propuesta por el Ministerio de Minas y Energía.**

Los resultados revelaron que la adaptación de la metodología del Ministerio de Minas y Energía fue exitosa en su aplicación para el municipio de Zaragoza. Se lograron identificar zonas críticas con alto potencial para convertirse en PAM mediante la consideración de factores geoespaciales y socioeconómicos. Sin embargo, algunas limitaciones surgieron en el campo de datos, ya que la falta de información actualizada y la disponibilidad de datos precisos a menudo obstaculizaron el análisis. Esto sugiere que, aunque se ha establecido un buen marco metodológico, es esencial el levantamiento de información primaria en los territorios y es necesario un esfuerzo continuo para mejorar la calidad y accesibilidad de los datos relevantes.

Es importante que se elabore un documento exhaustivo que detalle la metodología de análisis de riesgo, facilitando su adopción. Además, es fundamental impulsar iniciativas relacionadas con los PAM, ya que, al ser un tema relativamente nuevo, existen pocas investigaciones al respecto. Teniendo en cuenta que, Colombia, como país con una sólida tradición minera, tiene la oportunidad de liderar estos estudios y fortalecer el desarrollo del sector minero.

Es fundamental mejorar la infraestructura de datos espaciales de los entes territoriales para optimizar proyectos actuales y futuros. Sería de gran utilidad que las alcaldías municipales pusieran a disposición la cartografía de los Planes de Ordenamiento Territorial en formatos editables o que pudieran ser accesibles para su visualización en geo

visores. Esto no solo facilitaría el acceso a la información contextual de manera más rápida, eficiente y actualizada, sino que también permitiría una comparación directa con los datos de las entidades estatales, brindando una base sólida para la construcción de la cartografía inicial de cualquier proyecto.

- **Identificación de impactos ambientales generados por actividades mineras.**

La identificación de impactos evidenció que las actividades mineras pueden generar una amplia gama de impactos socioambientales significativos, cuya magnitud varía según el tipo de minería y las prácticas empleadas. Por ello, resulta fundamental reconocer estos impactos de manera temprana para comprender sus implicaciones y diseñar estrategias de manejo adecuadas para minimizar las afectaciones negativas al entorno.

La identificación de los impactos ambientales mostró que las actividades mineras en Zaragoza han originado efectos significativos, incluyendo la contaminación del agua, alteraciones en la calidad del suelo y la pérdida de biodiversidad. Los resultados indicaron que los impactos son variados y, en muchos casos, intergeneracionales, afectando no solo al medio ambiente en el presente, sino también la capacidad de las futuras generaciones para acceder a estos recursos. Este objetivo también destacó la importancia de una mayor regulación de las actividades mineras y un seguimiento exhaustivo de los impactos ambientales, proponiendo la implementación de programas de monitoreo continuo.

- **Elaboración del mapa de riesgo**

El mapa de riesgo que se elaboró mostró una representación clara de las áreas identificadas como susceptibles a la configuración de PAM. Esta actividad demostró ser

valiosa, pues la combinación de diferentes capas de información permitió evidenciar zonas de alto riesgo que antes no se habían identificado. Los resultados señalaron que el 54,69% del territorio presenta un riesgo moderado y el 42% corresponde a zonas de alto riesgo, lo que exige la implementación de medidas preventivas. Sin embargo, también se identificaron desafíos en la interpretación y la utilización efectiva de estos mapas por parte de las autoridades, sugiriendo la necesidad de capacitación sobre cómo usar esta herramienta en la toma de decisiones.

- **Impacto en la toma de decisiones.**

En Colombia, según la normatividad vigente, se deben realizar estudios de riesgo para determinar la configuración de PAM. En consecuencia, la implementación de herramientas SIG representa una ventaja significativa, ya que permite integrar diversas variables de manera ágil y eficiente para evaluar el riesgo de diferentes zonas. Esto facilita a las autoridades competentes la toma de decisiones de forma oportuna, mejorando la gestión y el monitoreo de las zonas críticas.

Para futuras investigaciones, es fundamental que las autoridades ambientales tengan acceso a información completa sobre todas las actividades mineras que se desarrollan en el municipio de Zaragoza. Esto permitirá realizar un análisis de riesgo más preciso y fundamentado. Además, los resultados obtenidos en este estudio pueden contribuir a una mejor planificación territorial, considerando las amenazas y vulnerabilidades presentes en la región.

Por otra parte, si se quiere realizar nuevas investigaciones podrían realizar el uso de imágenes satelitales para realizar un seguimiento detallado y continuo de las áreas

identificadas como PAM, ya que estas permitirán obtener información en tiempo real sobre la evolución de estas zonas, lo que sería crucial para evaluar el impacto y la efectividad de las intervenciones ambientales. En particular, esto sería valioso para monitorear la implementación del programa de intervención de pasivos ambientales, garantizando así una gestión más eficiente y sostenible.

- **Comparativa de la investigación respecto a otros enfoques existentes.**

En América Latina, países como Perú y Bolivia han desarrollado metodologías establecidas para la identificación de Pasivos Ambientales Mineros (PAM). Sin embargo, en Colombia, se han realizado pocas actividades en este ámbito. Aunque se han revisado diversas metodologías, ninguna de ellas ha incorporado herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el análisis de riesgo en zonas con posible presencia de PAM.

En Perú, existe una metodología establecida que obliga a los titulares de concesiones mineras a informar sobre PAM. Este enfoque proactivo permite la identificación temprana y la consideración de los PAM en la planificación minera. Aunque no se utiliza específicamente SIG para evaluar riesgos, se han adoptado tecnologías similares para este fin.

Bolivia también ha avanzado en la implementación de políticas de gestión ambiental que incluyen una revisión exhaustiva de los impactos de las actividades mineras. Sin embargo, enfrenta desafíos en la ejecución y regulación efectiva de estas metodologías.

Aunque se reconoce la importancia de integrar datos ambientales y sociales, los esfuerzos son más fragmentados y a menudo carecen de un enfoque sistemático.

En Colombia, la promulgación de la ley 2327 es un avance significativo en la gestión de los PAM. La metodología propuesta por el Ministerio de Minas resalta la importancia de los sistemas de información geográfica como una herramienta que, sumada a la información primaria, puede obtener excelentes resultados. Esto representa una oportunidad para que Colombia avance en la gestión de los PAM y adopte enfoques innovadores para abordar este desafío.

10. Conclusiones

Con relación al objetivo específico 1. Adaptación de la metodología propuesta por MinMinas.

La adaptación de la metodología del MinMinas permitió identificar las zonas de alto riesgo de convertirse en PAM mediante el uso de herramientas SIG, lo que facilitó la integración de múltiples variables, como hidrología, geología y geomorfología, entre otras. Esto permitió definir con mayor precisión las áreas de mayor vulnerabilidad y amenaza en el municipio de Zaragoza. Además, la elaboración de los mapas posibilitó una visualización clara y accesible de los datos, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones de las autoridades competentes.

Con relación al Objetivo 2. Identificación de impactos ambientales

La actividad minera en el municipio de Zaragoza ha generado impactos ambientales significativos, incluyendo la contaminación de fuentes hídricas con mercurio y cianuro, la degradación de suelos, la deforestación y la alteración del paisaje por mencionar algunos. Desde la prospección y exploración hasta el cierre y abandono, cada fase del proceso minero está asociada con impactos ambientales específicos, evidenciando la complejidad de su interacción con los recursos naturales.

Estos impactos resaltan la importancia de una planificación adecuada y la adopción de prácticas sostenibles en el sector minero. Si no se gestionan de manera efectiva, podrían derivar en un deterioro ambiental persistente, comprometiendo la biodiversidad y la calidad de vida de las comunidades locales. Por ello, es crucial implementar estrategias de mitigación, restauración ecológica y monitoreo continuo, además de fortalecer la regulación ambiental, con el fin de prevenir la transformación de estas afectaciones en pasivos ambientales de largo plazo.

Con relación al objetivo 3. Elaboración de un mapa de las zonas con riesgo de configurarse como pasivos ambientales mineros en el municipio de Zaragoza.

El mapa de zonas con riesgo de configurarse como PAM resultante integró los mapas de amenazas y vulnerabilidad, permitiendo un análisis espacial detallado de la distribución del riesgo y su relación con las variables evaluadas. En el municipio de Zaragoza, se determinó que el 54,69 % del territorio presenta un riesgo moderado, mientras que el 42 % corresponde a zonas de alto riesgo. Los resultados evidencian que las áreas con riesgo alto y muy alto se concentran principalmente en el sector sureste del municipio, donde la alta densidad de drenajes y el relieve accidentado incrementan la probabilidad de procesos erosivos, contaminación de fuentes hídricas y afectaciones a los ecosistemas.

Estos hallazgos subrayan la necesidad de que las autoridades competentes implementen mecanismos eficaces de control y monitoreo en las áreas con títulos mineros vigentes o en proceso de liquidación. La gestión adecuada de las zonas de alto riesgo es fundamental para reducir la exposición de las comunidades y fomentar un desarrollo territorial sostenible en la región.

Con relación al objetivo 4. Analizar cómo la información generada puede contribuir a la toma de decisiones de las autoridades ambientales y mineras

El análisis de riesgo realizado en el municipio de Zaragoza constituye una herramienta fundamental para la toma de decisiones de las autoridades competentes, destacando la necesidad de una gestión articulada en la evaluación de riesgos y la configuración de los PAM.

Por otra parte, los mapas generados permiten visualizar con precisión las áreas con mayor riesgo de configurarse como PAM, proporcionando una base técnica sólida para la planificación y ejecución de estrategias de control y remediación. Estos mapas integran factores físico-ambientales, mineros, de vulnerabilidad y amenazas del territorio, lo que facilita una evaluación integral del riesgo.

11. Recomendaciones

- La metodología propuesta por el Ministerio de Minas y Energía es una herramienta valiosa para identificar las zonas potenciales de configurar PAM. Sin embargo, es fundamental promover su difusión y fomentar su aplicación en más proyectos de investigación, dado que este tema ha recibido poca atención en el ámbito académico y técnico en Colombia, y hasta ahora está empezando a tomar fuerza con la promulgación de la Ley 2327 de 2023.

Adicionalmente, es crucial que las autoridades competentes mantengan actualizada la información sobre las diferentes etapas de concesión de títulos mineros y el estado de los pasivos ambientales activos. Esto permitiría un seguimiento continuo y la identificación de áreas con sospecha de tener PAM, fortaleciendo la gestión ambiental y la prevención de impactos asociados.

- Se recomienda implementar la elaboración de cartografía en todos los proyectos relacionados con minería, ya que el uso de los SIG permite actualizar la información de manera continua y monitorear las amenazas en tiempo real. No obstante, para lograr una evaluación precisa de los impactos y garantizar la efectividad de las acciones específicas, es indispensable realizar el levantamiento de información primaria multidisciplinar en las áreas con sospecha de tener PAM.
- Se requiere un monitoreo riguroso por parte de las autoridades ambientales en la implementación de medidas de mitigación, restauración, prevención y

compensación en cada proyecto, para prevenir la generación de pasivos ambientales.

12. Referencias

Alcaldía de Zaragoza. (2010) Plan básico de ordenamiento territorial, municipio de zaragoza documento diagnóstico.

<https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/20.500.14471/22459/26650-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Arango, M y Olaya, Y. (2012). Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia. *Revista Gestión y Ambiente*, 15 (3), 125-133.

Agencia Nacional de Minería (ANM). (2024). Boletín estadístico informativo minería en cifras.

<https://mineriaencolombia.anm.gov.co/sites/default/files/docupromocion/Bolet%C3%ADn%20Miner%C3%ADa%20en%20Cifras%20-%20octubre%202024.pdf>

Agencia Nacional de Minería (2025). Visor geográfico.

<https://annamineria.anm.gov.co/Html5Viewer/index.html?viewer=SIGMExt&locale=es-CO&appAcronym=sigm>

Agencia de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos (ASGMI). (2020) Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas. <https://asgmi.org/wp-content/uploads/2020/06/Manual-Inventario-PAM-y-Anexos.pdf>

Bustos, N. (2023) Identificación y evaluación de pasivos ambientales mineros por extracción de materiales de construcción en la cantera la quebrada en Ciudad Bolívar. [Trabajo de grado de Especialización, Universidad Distrital Francisco José De Caldas].

<https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/b95a2829-71b3-4b46-b011-744e5f1af85d/content>

Bruguera, N., Gallardo, D., & Díaz, A. (2020). Los pasivos ambientales: el cambio de paradigma conceptual desde el contexto de Cuba. *Avances. Revista del Instituto de Información Científica y Tecnológica*. 22 (3), 469- 482.

<https://www.redalyc.org/journal/6378/637869117011/637869117011.pdf>

Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (2015). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.

Céspedes, Y., Díaz, L., Araujo, L., Adame, J., Ruiz, A., y Valera, J. (2023). Problemática de los pasivos ambientales mineros (PAM) producto de la extracción de materiales de construcción en el municipio de Mondoñedo, Cundinamarca. *Revista Agunkuyâa*, 13 (1).

<https://doi.org/10.33132/27114260.2212>

Congreso de la República de Colombia. (2023). *Ley 2327 de 2023*.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=219230>

Chen, N., Zhang, X., & Li, X. (2019). Geospatial analysis of environmental risk in mining areas. *Environmental Geosciences*, 26(3), 150–161.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), (2023). *Remediación y activación de pasivos ambientales mineros en el Estado pluribaccional de Bolivia*.

<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/0ce025b6-f1b0-498c-a1e0-36f3d289413b/content>

-
- ESRI, (2024). Qué es SIG?. <https://www.esri.com/es-es/what-is-gis/overview?srsId=AfmBOopJl3g9CVZtfTAalkZECsMW8qHRMV0PMathW8UdsVw1KUd2D3h3>
- ESRI, (2024). Pendiente (Spatial Analyst). <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/slope.htm>
- Fuerte, K. & Ramírez, E. (2021). *Pasivos ambientales mineros generados por actividades extractivas en Colombia: marco jurídico, conflictos socioambientales y lineamientos para una gestión sostenible*. [Trabajo de grado de Maestría, Universidad de Santo Tomas].
Repositorio institucional Universidad de Santo Tomas. <http://hdl.handle.net/11634/35141>
- Goodchild, M. F. (2018). Spatial data science: Emerging trends and future directions. *Geo-spatial Information Science*, 21(3), 135–146.
- González, A. (2008). *Diseño de metodología para la identificación de pasivos ambientales mineros en Colombia*. [Trabajo de grado de Maestría, Universidad Nacional de Colombia.].
Repositorio institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/70283>
- González, J. A., & Pérez, M. (2018). Gestión de proyectos en el sector público: un enfoque desde la teoría de redes. *Revista de Gestión*, 7(1), 15-30.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/36286/37829>
- Hernández, U. R., Barrios, P. H., & Ramírez, A. (2017). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y ciencia del agua*, 8(3), 5-25.
<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-01>

López, L., López, M., & Medina, G. (2017). La prevención y mitigación de los riesgos de los pasivos ambientales mineros (PAM) en Colombia: una propuesta metodológica.

Entramado, 13(1), 8-91. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25138>

Mesa de la sociedad civil, (2022) Diagnóstico de los pasivos ambientales en Colombia.

<https://mesatransparenciaextractivas.org/wp-content/uploads/2022/10/Diagnostico-de-los-pasivos-ambientales-en-Colombia.pdf>

Ministerio de Minas y Energía (MinMinas), (2023). Diagnóstico minero ambiental de los pasivos en el territorio nacional.

<https://www.andi.com.co/Uploads/Presentacion%20PASIVOS%20AMBIENTALES%20MINEROS-SECTORIAL.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente). (2020). *Informe de Auditoría de Desempeño sobre Pasivos Ambientales Mineros*. <https://www.minambiente.gov.co>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). *Guía ambiental para evitar, corregir y compensar los impactos de las acciones de reducción y prevención de riesgos en el nivel municipal*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

https://www1.upme.gov.co/siame/Guiasambientales/Acciones_reduccion_preencion_riesgos.pdf

Mummey, D. L., Stahl, P. D., & Buyer, J. S. (2002). Microbial biomarkers as an indicator of ecosystem recovery following surface mine reclamation. *Applied Soil Ecology*, 21(3), 251–259.

-
- Pérez, J., & González, A. (2018). Gestión de pasivos ambientales en Colombia: Retos y perspectivas. *Revista Colombiana de Gestión Ambiental*, 15(3), 45-60.
- Pinto, L. (2020) *Pasivos ambientales mineros en Colombia*. Universidad Militar Nueva Granada.
<https://repository.unimilitar.edu.co/server/api/core/bitstreams/fa1c9e46-cb5b-4fcb-bfda-b079799202b3/content>
- Rincón, F & Yépez, V. (2020) Análisis de las problemáticas asociadas a los pasivos ambientales. *Gerencia Libre*, (5), 103 – 115
- Rodriguez, U., Scherezada, S. y Flores, M. (2021). Análisis espacial para la prevención de riesgo de inundación en la colonia Encinal, Xicotepec. *Revista Arquitectura*, (12).
<https://portal.amelica.org/ameli/journal/529/5292802010/html/>
- Russi, D. y Martínez, J. (2002) Los pasivos ambientales. *Revista de Ciencias Sociales*, (15), 123-131.
- Toro, D. (2017) *Propuesta para la regulación jurídica de pasivos ambientales mineros: casos de relaves de Chañaral y Andacollo*. [Trabajo de Magister, Universidad De Chile].
[https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151082/Propuesta-para-la-regulaci% c3% b3n-jur% c3% addica-de-pasivos-ambientales-mineros.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151082/Propuesta-para-la-regulaci%c3%b3n-jur%c3%addica-de-pasivos-ambientales-mineros.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), (s.f.) Marco legal minero.
http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/politica/marco/marco.htm#MARC
[O%20LEGAL%20MINERO](http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/politica/marco/marco.htm#MARC)

(UNEP). (2020). *Mining and the Environment: Managing the Future*. United Nations Environment Programme.

Zamora, G., Lanza, J, & Arranz, J. (2018). Metodología para la identificación y evaluación de riesgos de pasivos ambientales mineros con fines de priorización para su remediación. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, (5), 31-43.

Zamora, E., Gutiérrez C. y César A. (2023) Metodología para la evaluación de riesgos aplicada al pasivo ambiental minero de Japo en la subcuenca Poopó para su priorización de remediación ambiental. *Revista de medio ambiente minero y minería*. 8 (2),36-42.
http://www.scielo.org.bo/pdf/mamym/v8n2/v8n2_a05.pdf