



Identificación y Análisis de unidades de producción minera utilizando técnicas multicriterio para el abastecimiento de carbón térmico en Termopaipa, Boyacá, mediante herramientas SIG.

Laura Aristizábal Hernández

Daniela Monroy Ramírez

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Manizales, Caldas, Colombia
2026

Cita	(Aristizábal Hernández & Monroy Ramírez, 2026)
Referencia	Aristizábal Hernández L. & Monroy Ramírez.D. (2026). <i>Identificación y Análisis de unidades de producción minera utilizando técnicas multicriterio para el abastecimiento de carbón térmico en Termopaipa, Boyacá, mediante herramientas SIG</i> . [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , XXXII

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Línea de Investigación Territorios Inteligentes y Sostenibles.

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [mencionar herramientas utilizadas, por ejemplo, ChatGPT, Grammarly, Turnitin, Copilot, Gemini, entre otras], de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: biblioteca.umanizales.edu.co

Repositorio Institucional: ridum.umanizales.edu.co

Universidad de Manizales: umanizales.edu.co

Revistas: revistasum.umanizales.edu.co

Fondo Editorial: editorialum.umanizales.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a nuestros familiares, quienes con su esfuerzo, apoyo y ejemplo constante nos inculcaron la importancia del estudio, la disciplina y la perseverancia, así como la satisfacción de alcanzar los objetivos que nos proponemos.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad de Manizales por la formación académica brindada durante el desarrollo del programa. Agradezco a mi familia y a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron con su apoyo y motivación para la culminación exitosa de este trabajo.

Finalmente, expreso mi sincero agradecimiento no solo al asesor sino también a aquellos profesionales que nos acompañaron y orientaron con aportes valiosos a lo largo del proceso de investigación.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1. Planteamiento del problema de investigación.....	12
1.1. Pregunta de investigación:	13
1.2. Antecedentes	13
2. Justificación	17
3. Objetivos.....	19
3.1. Objetivo general	19
3.2. Objetivos específicos.....	19
4. Marco teórico	20
4.1. Referente Teórico	20
4.1.1. Contexto y desafíos del carbón térmico	20
4.1.2. Evaluación multicriterio (EMC) en la minería de carbón.	21
4.1.3. Fundamentos de la Evaluación Multicriterio (EMC).....	22
4.2. Referente Normativo	26
5. Metodología	29
5.1. Enfoque Metodológico	29
5.2. Procedimiento.....	30
5.2.1. Fase 1: Recolección y sistematización de los datos	31
5.2.1.1. Bases de datos y capas geográficas - ANM	31
5.2.1.2. Bases de datos y capas geográficas – GENSA.....	38
5.2.2. Fase 2: Análisis multicriterio y procesamiento espacial	39
5.2.2.1. Calidad de Carbón - Índice de calidad Técnica (IQC):	40

5.2.2.2.	Metodología análisis multicriterio – AHP	45
5.2.2.3.	Construcción de la Matriz de Comparación por Pares (Criterios)	46
5.2.2.4.	Construcción del Índice Ambiental-Social (IAS) en ArcGIS Pro:	50
5.2.2.5.	Cálculo del Índice Ambiental-social (IAS).....	51
5.2.3.	Fase 3: Construcción del modelo Python3 para la integración y automatización del proceso de evaluación multicriterio.	53
6.	Resultados	59
7.	Discusión.....	77
8.	Conclusiones	80
9.	Recomendaciones	82
	Referencias	84
	Anexos.....	89

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Escala de análisis multicriterio propuesta por Saaty y Vargas</i>	24
Tabla 2. <i>Referente Normativo.</i>	27
Tabla 3. <i>Número de títulos con carbón en Colombia identificados en el Visor Geográfico ANM; sin depurar</i>	32
Tabla 4. <i>Número de subcontratos en Colombia con carbón identificadas en el Visor Geográfico ANM; sin depuración</i>	33
Tabla 5. <i>Capas Ambientales. Fuente: visor ANM</i>	36
Tabla 6. <i>Capas sociales; Fuente: visor ANM</i>	36
Tabla 7. <i>Registros totales de Unidades de Producción Minera (UPM); fuente ANM</i>	37
Tabla 8. <i>Asignación de pesos por variable técnica</i>	43
Tabla 9. <i>Categorización del Índice IQC – Calidad de carbón</i>	45
Tabla 10. <i>Matriz de comparación por pares – AHP</i>	47
Tabla 11. <i>Normalización de la matriz AHP</i>	48
Tabla 12. <i>Pesos (W) finales de la matriz multicriterio – AHP</i>	49
Tabla 13. <i>Estandarización de los porcentajes de traslape</i>	51
Tabla 14. <i>Estandarización de los porcentajes de traslape</i>	51
Tabla 15. <i>Categorización del rango IAS según metodología AHP</i>	52

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama Metodológico	30
Figura 2. Ubicación títulos y subcontratos de carbón en Boyacá.	35
Figura 3. <i>Distribución estadística mineral de títulos y subcontratos de formalización a nivel Nacional.</i>	60
Figura 4. Distribución estadística mineral de títulos y subcontratos de formalización a nivel Boyacá	61
Figura 5. Mapa de distribución de los títulos de carbón Térmico , Boyacá.....	62
Figura 6. Mapa de distribución de los títulos de carbón Metalúrgico , Boyacá	63
Figura 7. Mapa de distribución de los títulos de carbón Mixto , Boyacá	64
Figura 8. <i>Mapa de localización de la Unidades de producción Minera (UPM); Boyacá</i>	66
Figura 9. <i>Mapa de poder calorífico; Boyacá</i>	67
Figura 10. <i>Mapa de porcentaje de humedad; Boyacá</i>	68
Figura 11. <i>Mapa de porcentaje de cenizas; Boyacá.</i>	69
Figura 12. <i>Mapa de Materias Volátiles; Boyacá.</i>	70
Figura 13. <i>Mapa de calidad de carbón (IQC); Boyacá</i>	72
Figura 14. <i>Mapa de Aptitud ambiental (IAS); Boyacá</i>	73
Figura 15. <i>Mapa de Aptitud ambiental (IAS); Boyacá</i>	74
Figura 16. <i>Mapa de Aptitud mineral por veredas; Boyacá.</i>	76

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AHP	Analytic Hierarchy Process
ANM	Agencia Nacional de Minería
APA	American Psychological Association
GIS / SIG	Geographic Information Systems / Sistemas de Información Geográfica
IAS	Índice Ambiental Social
IAG	Índice Ambiental Social Global
IQC	Índice de Calidad del Carbón
UPM	Unidad de Producción Minera
CTM	CTM – Coordenadas Transversas de Mercator
AMC	Análisis multicriterio

Resumen

La Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa), ubicada en Boyacá, enfrenta riesgo de desabastecimiento de carbón térmico por la reducción de unidades de producción minera activas, lo que ha disminuido la disponibilidad de proveedores confiables. Esta situación se agrava por la variabilidad climática y la volatilidad del mercado energético.

En este contexto, el proyecto buscó identificar y valorar unidades de producción minera y títulos mineros en Boyacá mediante análisis multicriterio de variables técnicas, ambientales y sociales. El propósito fue fortalecer la red de abastecimiento para contribuir al suministro mínimo de 40.000 toneladas mensuales en el patio de almacenamiento, requerido para garantizar 20 días continuos de operación de las tres unidades generadoras de Termopaipa.

La metodología consideró la calidad del mineral, a partir de fichas de muestreo (poder calorífico, material volátil, cenizas y humedad) y su clasificación como carbón térmico; traslapes con áreas de restricción o exclusión ambiental según la normativa vigente; y traslapes con comunidades locales o territorios étnicos. La valoración se desarrolló con fuentes oficiales, incluyendo bases internas de Termopaipa y registros de la Agencia Nacional de Minería (ANM).

Como eje metodológico se emplearon herramientas SIG para el análisis espacial, la categorización y la visualización de información georreferenciada, apoyadas por automatización en Python (Notebook). Esto facilitará la selección estratégica de nuevos proveedores y aportará a la seguridad energética al mejorar la continuidad operativa ante eventos climáticos extremos y fluctuaciones del mercado.

Palabras clave: carbón térmico, abastecimiento, unidades de producción minera, SIG, seguridad energética, Python, títulos mineros.

Abstract

The Paipa Thermal Power Plant (Termopaipa), located in Boyacá, faced a risk of thermal coal supply shortages due to the reduction in active mining production units, which reduced the availability of reliable suppliers. This situation was exacerbated by climate variability and volatility in the energy market.

In this context, the project sought to identify and assess mining production units and mining titles in Boyacá through a multicriteria analysis of technical, environmental, and social variables. The purpose was to strengthen the supply network in order to contribute to the minimum monthly supply of 40,000 tons to the storage yard, required to ensure 20 continuous days of operation of Termopaipa's three generating units.

The methodology considered mineral quality based on sampling records (calorific value, volatile matter, ash content, and moisture) and its classification as thermal coal; overlaps with environmentally restricted or excluded areas in accordance with current regulations; and overlaps with local communities or ethnic territories. The assessment was developed using official sources, including internal databases from Termopaipa and records from the National Mining Agency (ANM).

As the methodological framework, GIS tools were employed for spatial analysis, categorization, and visualization of georeferenced information, supported by automation using Python (Notebook). This facilitated the strategic selection of new suppliers and contributed to energy security by improving operational continuity in the face of extreme climate events and market fluctuations.

Keywords: thermal coal, supply, mining production units, Geographic Information Systems (GIS), energy security, Python, mining titles

Introducción

La creciente demanda energética en Colombia, junto con la vulnerabilidad de los sistemas eléctricos frente a fenómenos climáticos extremos como El Niño, ha puesto de manifiesto la necesidad de garantizar la estabilidad en el suministro de carbón térmico, un recurso estratégico para la operación de las plantas termoeléctricas. En este contexto, la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa), ubicada en el departamento de Boyacá, enfrenta el desafío de asegurar un abastecimiento continuo y confiable de este mineral, especialmente durante periodos de anomalías climáticas.

A este reto se suman factores como la alta volatilidad del mercado, la rigurosidad de las regulaciones ambientales y los impactos adversos del cambio climático, los cuales afectan significativamente la disponibilidad de carbón térmico en la región. Aunque actualmente Termopaipa cuenta con proveedores establecidos, su capacidad para garantizar un suministro estable de 40.000 toneladas mensuales; volumen requerido para mantener la operación continua de sus tres unidades generadoras, no es constante, lo que representa un riesgo para la seguridad operativa de la planta y del país.

Además, la información existente sobre los títulos mineros y las unidades de producción activas en Boyacá es dispersa y carece de una integración geoespacial que permita identificar de forma eficiente nuevas fuentes de suministro. En este sentido, la presente investigación tiene como objetivo identificar y valorar las unidades de producción minera y los títulos mineros del departamento de Boyacá mediante el análisis de variables técnicas (calidad del carbón), ambientales (traslapes con áreas excluibles y restringidas) y sociales (cercanía y/o traslapes con comunidades), utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para automatizar y facilitar la selección estratégica de nuevos proveedores.

Este estudio adquiere relevancia al contribuir al fortalecimiento de la seguridad energética nacional, mediante la optimización de la red de proveedores disponibles en el departamento de Boyacá, a partir de la evaluación de las unidades de producción minera y títulos mineros que cumplan con los criterios técnicos, ambientales y sociales establecidos en el presente análisis.

1. Planteamiento del problema de investigación.

En el contexto internacional, la seguridad energética se ha convertido en un desafío prioritario para los sistemas eléctricos, especialmente frente a la creciente variabilidad climática asociada a fenómenos como El Niño y La Niña. Estos eventos han alterado los patrones de disponibilidad de recursos energéticos a nivel global, afectando de manera directa las cadenas de suministro de minerales energéticos, entre ellos el carbón térmico. Aunque la transición energética avanza hacia fuentes renovables, diversos estudios coinciden en que, a corto y mediano plazo, las fuentes convencionales continúan siendo fundamentales para garantizar la estabilidad y confiabilidad del suministro eléctrico, particularmente en escenarios de estrés climático y alta demanda energética.

A nivel nacional, Colombia presenta una alta dependencia de la generación hidroeléctrica, lo que la hace especialmente vulnerable durante periodos de sequía prolongada. En estos escenarios, la generación termoeléctrica adquiere un papel estratégico para respaldar el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y garantizar la continuidad del servicio eléctrico. No obstante, el abastecimiento de carbón térmico enfrenta múltiples dificultades, asociadas a factores climáticos, económicos y normativos. La disminución en el otorgamiento de nuevos títulos mineros, el agotamiento progresivo de algunos yacimientos y el endurecimiento de la normativa ambiental han reducido la disponibilidad de proveedores confiables, obligando al país a replantear estrategias de contingencia para sostener la seguridad energética.

En este contexto, la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa) constituye un activo estratégico del sistema eléctrico colombiano, al aportar energía firme tanto en condiciones normales como en situaciones críticas. Sin embargo, su operación depende directamente de un suministro constante y suficiente de carbón térmico, estimado en aproximadamente 40.000 toneladas mensuales para garantizar la operación continua de sus unidades generadoras. Actualmente, la red de proveedores con la que cuenta la central presenta limitaciones para asegurar de manera sostenida dicho volumen, lo que incrementa el riesgo de desabastecimiento y compromete la confiabilidad operativa de la planta.

A nivel regional, el departamento de Boyacá, tradicional productor de carbón se caracteriza por una alta fragmentación de las unidades de producción minera. Gran parte de los productores operan a pequeña escala, con capacidades variables tanto en volumen de extracción como en

cumplimiento de estándares técnicos, ambientales, sociales y legales. Si bien existe información oficial sobre títulos mineros, subcontratos de formalización y unidades de producción minera proveniente de la Agencia Nacional de Minería (ANM), esta información se encuentra dispersa y no ha sido integrada mediante un análisis geoespacial que permita evaluar de manera conjunta y sistemática su viabilidad como posibles proveedores para una central termoeléctrica.

La ausencia de un análisis geoespacial integral dificulta la identificación, clasificación y priorización de unidades de producción minera y títulos mineros que cumplan simultáneamente con los criterios técnicos de calidad del carbón, restricciones ambientales vigentes y las condiciones sociales del territorio. Esta situación limita la capacidad de Termopaipa para ampliar estratégicamente su red de abastecimiento y responder de forma oportuna a escenarios de riesgo asociados a la variabilidad climática, las fluctuaciones del mercado del carbón y las restricciones normativas.

En síntesis, el problema central de esta investigación radica en que la Central Termoeléctrica de Paipa no cuenta actualmente con una herramienta de análisis geoespacial multicriterio que permita identificar y clasificar unidades de producción minera y títulos mineros de carbón térmico en el departamento de Boyacá, integrando variables técnicas, ambientales y sociales, que faciliten la selección estratégica de nuevos proveedores y reduzcan el riesgo de desabastecimiento energético.

1.1.Pregunta de investigación:

¿Cómo puede un análisis geoespacial multicriterio, basado en variables técnicas, ambientales y sociales, contribuir a identificar y clasificar unidades de producción minera de carbón térmico en Boyacá, para apoyar la selección de nuevos proveedores de la Central Termoeléctrica de Paipa?

1.2.Antecedentes

En los últimos años, el sistema energético colombiano ha evidenciado vulnerabilidades frente a fenómenos climáticos extremos, particularmente durante eventos asociados al fenómeno de El Niño, en los cuales la generación hidroeléctrica (principal fuente del país) disminuye

significativamente, aumentando la dependencia de las plantas termoeléctricas (Rocha, 2018, UPME, 2025). En Colombia y el mundo se determinó que en septiembre del año 2024 fue el mes más cálido de los últimos 175 años y para garantizar la recuperación de los embalses, Colombia priorizó el uso de su parque termoeléctrico; incluyendo la termoeléctrica de Boyacá y redujo las exportaciones de energía eléctrica a Ecuador, generando energía consecutivamente por más de un año (CIIFEN, 2024; Ministerio de Minas y Energía, 2025a).

Esta situación ha puesto de relieve la importancia de garantizar un suministro constante y legal de carbón térmico como insumo crítico para la operación continua de estas plantas. En este contexto, varios estudios y reportes institucionales han identificado riesgos relacionados con la fragmentación del mercado minero, la informalidad de algunos productores y la limitada capacidad logística de ciertos proveedores para responder a escenarios de alta demanda (Agencia Nacional de Minería, 2022).

Investigaciones realizadas sobre el uso de herramientas geoespaciales para el análisis de cadenas de suministro han demostrado que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten optimizar la gestión logística y operativa en sectores estratégicos.

Particularmente, en el sector minero energético, el SIG se ha utilizado para mapear y evaluar la distribución de recursos, rutas de transporte, accesibilidad y cumplimiento normativo, lo que contribuye a una planificación más eficiente y adaptativa (Agencia Nacional de Minería, 2024). Estos análisis espaciales son fundamentales en regiones como Boyacá, donde existen múltiples unidades de producción minera de pequeña escala, cuya dispersión geográfica y capacidad operativa varía considerablemente.

A nivel regional, la producción de carbón térmico en Boyacá ha enfrentado retos crecientes debido a restricciones ambientales, cambios normativos y agotamiento de recursos, lo que ha reducido el número de unidades productivas activas y confiables (Gobernación de Boyacá, 2023). Sin embargo, no se han aprovechado de forma sistemática las bases de datos disponibles (como el Catastro Minero Colombiano, ANM y la plataforma RUCOM) para integrar variables técnicas, legales, ambientales, sociales y espaciales que faciliten la selección estratégica de proveedores.

El caso de la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa) representa una muestra crítica de esta problemática. Aunque cuenta con proveedores actuales, su red de abastecimiento está requiriendo una expansión con base en análisis integrales y espaciales, que le disminuya los riesgos de abastecimiento en contextos de variabilidad climática o de inestabilidad en el mercado. En línea

con lo anterior, estudios previos de la interventoría y la proveeduría de carbón han planteado la necesidad de construir modelos de abastecimiento dinámicos, actualizados y estratégicos, especialmente en sistemas eléctricos interconectados, donde fallas logísticas pueden comprometer la confiabilidad del suministro nacional (UPME, 2025).

En este contexto, el análisis multicriterio (AMC) es una herramienta metodológica que permite integrar múltiples variables (técnicas, sociales, ambientales, legales etc.) de forma estructurada y jerarquizada para apoyar decisiones complejas. Su combinación con entornos SIG facilita la representación espacial de los resultados y la construcción y automatización de mapas de aptitud, priorizando zonas según criterios heterogéneos (Koull et al., 2022; Yetkin & Özfirat, 2019).

Dentro de las aplicaciones del método AHP (Analytic Hierarchy Process); análisis multicriterio (AMC) se destaca la tesis de (Ortiz, 2021) desarrollada en la Universidad de Manizales Colombia, en la cual se identificaron áreas idóneas para el desarrollo urbano mediante uso de análisis multicriterio AHP, integrando criterios técnicos, ambientales y sociales dentro de un entorno SIG.

De manera similar, el estudio de (Buitrago & Torres, 2025) aplicó el AHP tradicional para seleccionar el mejor sitio para construir un relleno sanitario en planadas, Tolima.

Asimismo, en la propuesta de trabajo de grado de (Ramírez et al., 2025) desarrolló un análisis multicriterio orientado a la identificación de áreas óptimas para la instalación de sistemas fotovoltaicos en el municipio de Neiva (Huila), utilizando herramientas SIG para la ponderación espacial de factores técnicos, económicos y ambientales. (Santacruz & Ferrer, 2024) en su propuesta de grado desarrolló un análisis geoespacial y multicriterio para la localización de apiarios en el distrito de Barrancabermeja.

De igual manera (UPME, 2025b) desarrolló un análisis general de la minería de carbón en Boyacá y los impactos ambientales asociados producto de esta actividad y (Fonseca, 2021) siguiendo el tema de impactos y sostenibilidad ambiental desarrolló una medición en temas de sostenibilidad en la gestión de proyectos de minería de carbón subterráneo en la provincia de Somagoso del departamento de Boyacá.

Por otro lado, la propuesta de trabajo de grado de (Calderón et al., 2025) empleó tecnologías SIG para realizar la valoración de factores modificadores mineros, ambientales y sociales, con el

objetivo de estimar de manera más precisa el potencial de recursos mineros en el municipio de Yumbo.

Con base en estos antecedentes, se evidencia que, aunque existe una base normativa y técnica consolidada, aún no se ha implementado una estrategia práctica que integre de forma sistemática estos insumos mediante herramientas geoespaciales avanzadas como el AMC y el AHP tradicional dentro del sector carbonífero enfocado en generación eléctrica. La incorporación de dichas metodologías en el contexto de la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa), apoyada en fuentes oficiales como ANM, UPME, RUCOM, e IDEAM, permitiría una toma de decisiones más precisa, transparente y adaptativa, mejorando sustancialmente la planificación del abastecimiento de carbón térmico frente a escenarios de riesgo climático, operativo o logístico.

2. Justificación

La presente investigación se justifica desde una perspectiva técnica, operativa y estratégica, dado que la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa) depende de manera crítica del suministro constante de carbón térmico para garantizar la generación de energía firme y el cumplimiento de su cargo por confiabilidad dentro del Sistema Interconectado Nacional. No obstante, la creciente exposición del sistema eléctrico colombiano a eventos climáticos extremos, particularmente asociados al fenómeno de El Niño, así como a las fluctuaciones económicas y logísticas regionales, ha incrementado el riesgo de desabastecimiento del mineral, afectando potencialmente la continuidad y eficiencia operativa de la planta.

Frente a este contexto, surgió la necesidad de analizar y categorizar de manera integral la información asociada a la minería de carbón térmico disponible en el departamento de Boyacá, con el fin de fortalecer la capacidad de respuesta de Termopaipa ante escenarios de escasez de suministro. La identificación y priorización de unidades de producción minera con potencial de abastecimiento permitirá optimizar la gestión del suministro, reducir la dependencia de una red limitada de proveedores y mitigar los riesgos asociados a la falta de materia prima para la generación eléctrica.

Desde el punto de vista técnico, resultó indispensable evaluar de forma objetiva la calidad del carbón disponible, considerando parámetros como el poder calorífico, el contenido de cenizas, la humedad y las materias volátiles, los cuales inciden directamente en la eficiencia del proceso de generación termoeléctrica. La incorporación de estos criterios técnicos en la selección de proveedores permite mejorar el desempeño operativo de la central y reducir costos asociados a ajustes operativos, mezclas de carbón o mantenimientos no programados.

En el ámbito ambiental y social, la investigación adquiere relevancia al integrar explícitamente las restricciones y/o exclusiones ambientales vigentes y los componentes sociales del territorio en el proceso de evaluación de las unidades de producción minera y títulos mineros. Este enfoque contribuye a minimizar riesgos legales, ambientales y sociales, asegurando que el abastecimiento de carbón se realice conforme a la normatividad colombiana y a los principios de sostenibilidad y responsabilidad social empresarial, aspectos cada vez más determinantes en la operación de proyectos minero-energéticos.

Desde una perspectiva metodológica, la aplicación de técnicas de análisis multicriterio integradas a Sistemas de Información Geográfica (SIG) representa una ventaja significativa frente a metodologías convencionales de selección de proveedores o localización de recursos. A diferencia de enfoques basados en criterios aislados o análisis tabulares, el análisis multicriterio espacial permite integrar simultáneamente variables técnicas, ambientales y sociales en un entorno georreferenciado, facilitando una evaluación holística de cada unidad de producción minera y título según su ubicación, calidad del recurso, restricciones normativas y contexto socioambiental. La incorporación de herramientas de automatización mediante Python en el entorno SIG fortalece la trazabilidad, reproducibilidad y eficiencia del análisis, reduciendo la subjetividad en la toma de decisiones.

Finalmente, este proyecto de investigación tiene un carácter aplicado y tecnológico, al generar una solución concreta a una problemática real de la industria minero-energética. El modelo desarrollado constituye una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para Termopaipa, que puede ser replicada y adaptada a otros contextos territoriales, minerales o proyectos energéticos. Asimismo, suma como aporte académico al demostrar la aplicabilidad de los SIG y el análisis multicriterio en la planificación estratégica del abastecimiento energético y la gestión sostenible de los recursos minerales.

3. Objetivos

3.1.Objetivo general

Desarrollar un análisis geoespacial multicriterio en ArcGIS Pro que permita identificar y categorizar unidades de producción minera y títulos mineros de carbón térmico en el departamento de Boyacá, para apoyar la selección de posibles proveedores estratégicos para la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa).

3.2.Objetivos específicos

Construir una base de datos geoespacial que integre la información técnica, ambiental y social, para realizar un análisis integrado de las Unidades de producción y títulos mineros de Boyacá a través de ArcGIS Pro.

Implementar un modelo con código Python en ArcGIS Pro que integre y automatice todo el proceso de análisis multicriterio y generación de mapas temáticos que permitan evaluar la aptitud de las unidades de producción minera y títulos mineros del departamento de Boyacá en función de 3 criterios seleccionados; ambientales, sociales y técnicos.

Generar mapas temáticos de categorización de los títulos, subcontratos de formalización y unidades de producción minera, a partir del análisis multicriterio que permitan representar espacialmente el potencial de cada área como posible proveedor de carbón térmico para Termopaipa.

4. Marco teórico

El marco teórico de la presente investigación integró los principales fundamentos conceptuales y normativos que sustentan el análisis del abastecimiento de carbón térmico para la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa). En este apartado se abordaron, por un lado, los referentes teóricos asociados a la seguridad energética, la planificación del suministro, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la aplicación de metodologías de análisis multicriterio para la toma de decisiones; y, por otro, el marco normativo minero-ambiental vigente en Colombia, el cual regula la exploración, explotación, comercialización y uso del carbón térmico, así como las restricciones ambientales, sociales y técnicas aplicables. La articulación de ambos enfoques permitió contextualizar el estudio dentro de los lineamientos legales y conceptuales actuales, proporcionando una base sólida para el desarrollo metodológico y la interpretación de los resultados.

4.1.Referente Teórico

4.1.1. Contexto y desafíos del carbón térmico

El suministro de carbón térmico para plantas termoeléctricas constituye un eslabón crítico dentro de la seguridad energética de Colombia, especialmente en contextos de variabilidad climática y transiciones en la matriz energética. A nivel global, el sector eléctrico enfrenta el reto de garantizar abastecimientos estables frente a fenómenos meteorológicos extremos, tensiones geopolíticas y políticas de descarbonización que redefinen los patrones de producción y consumo (International Energy Agency [IEA], 2023). Este escenario se refleja en el ámbito nacional, donde la dependencia histórica de la generación hidroeléctrica; que aporta en promedio el 70 % de la electricidad, deja al sistema vulnerable a sequías prolongadas asociadas al fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO).

Durante el evento ENSO 2023–2024, la precipitación en varias cuencas colombianas disminuyó hasta un 40 % respecto a los promedios históricos, obligando a programar cortes de energía pese a la capacidad instalada (ANDEG, 2020). Ante la reducción del aporte hidroeléctrico, plantas termoeléctricas como Termopaipa asumieron cargas críticas para sostener la demanda

nacional, evidenciando la necesidad de asegurar un suministro continuo de carbón térmico incluso en escenarios extremos (World Energy Council, 2019).

El diagnóstico de la cadena de suministro del carbón térmico en Colombia revela vulnerabilidades relacionadas con la concentración de la producción en regiones específicas y las disputas territoriales en zonas como La Guajira, donde factores logísticos y sociales afectan la continuidad del suministro (Angarita et al., 2024; Natural Resource Governance Institute, 2021). Esta dependencia geográfica genera riesgos potenciales para departamentos como Boyacá si no se diversifica la red de proveedores.

En el caso particular de Boyacá, la red de abastecimiento se compone de múltiples unidades de producción de pequeña escala, con capacidades técnicas y productivas heterogéneas y niveles variables de cumplimiento normativo. Si bien existen bases de datos oficiales con información georreferenciada de títulos y unidades mineras (ANM, 2024), no se ha implementado un análisis geoespacial integral que permita identificar, clasificar y priorizar fuentes con potencial de suministro alineadas con los requerimientos técnicos, ambientales y sociales de plantas como Termopaipa.

4.1.2. Evaluación multicriterio (EMC) en la minería de carbón.

Con respecto al estado actual del conocimiento y brechas identificadas en el plano internacional, la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con metodologías de análisis multicriterio (AMC) se ha consolidado como una herramienta eficaz para la planificación minera y la gestión de recursos energéticos. Estudios como el de (Choi et al., 2020) han demostrado que la combinación de datos espaciales y atributos técnicos permite optimizar la localización de proveedores y evaluar su idoneidad con base en criterios como capacidad de producción, accesibilidad, cercanía a infraestructura crítica y cumplimiento normativo. En Colombia, sin embargo, la aplicación de AMC en minería ha estado más orientada a ordenamiento territorial y gestión ambiental (Calderón et al., 2025; Ortiz, 2021) que a la identificación de proveedores estratégicos de carbón térmico. Esta brecha metodológica representa una oportunidad para desarrollar un modelo que incorpore simultáneamente criterios técnicos (poder calorífico, contenido de cenizas e índice de hinchamiento), ambientales (zonas de exclusión, áreas protegidas) y sociales (condiciones laborales, impactos comunitarios).

Uno de los marcos conceptuales relevantes para el caso de estudio es la teoría de la resiliencia de la cadena de suministro propuesta por (Christopher & Peck, 2004), que define la resiliencia como “la capacidad de una cadena para anticipar, adaptarse y responder” a disrupciones externas. Este enfoque destaca la importancia de diversificar proveedores, rediseñar procesos y fomentar la cooperación entre actores para reducir la vulnerabilidad frente a riesgos como fenómenos climáticos o fluctuaciones del mercado (Angarita et al., 2024). Aplicado al caso de Termopaipa, implica establecer criterios que garanticen continuidad operativa en distintos escenarios de riesgo.

4.1.3. Fundamentos de la Evaluación Multicriterio (EMC)

La Evaluación Multicriterio (EMC) es una técnica que permite tomar decisiones considerando múltiples criterios que pueden ser conflictivos entre sí. En el contexto de los SIG, la EMC se utiliza para integrar y analizar diversos factores espaciales y no espaciales (Communities and Local Government, 2009).

Autores como (Yajure, 2015) destacan que las metodologías multicriterio aplicadas en SIG son especialmente útiles en problemas de localización de actividades, donde la decisión depende de múltiples variables de difícil evaluación aislada. En estos entornos, los SIG permiten representar los criterios como capas temáticas y combinarlos mediante técnicas multicriterio para obtener un modelo de idoneidad, el cual muestra espacialmente qué áreas son más adecuadas para determinada actividad. Entre las metodologías que soportan esta evaluación se encuentra el Análisis Multicriterio (AMC).

En el plano metodológico, el AMC constituyó una herramienta central en este proyecto. Uno de sus métodos más reconocidos es el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) desarrollado por (T. L. Saaty, 2008; T. Saaty & Vargas, 2012). El AHP descompone el problema de decisión en una estructura jerárquica que parte del objetivo general, continúa con los criterios y subcriterios y culmina con las alternativas. La comparación por pares entre elementos permite estimar su importancia relativa mediante la escala fundamental de Saaty, que asigna valores entre 1 (igual importancia) y 9 (importancia extrema). Estas comparaciones forman matrices de juicio a partir de las cuales se calculan los pesos relativos de cada criterio, verificando además la consistencia de las valoraciones emitidas.

El AHP presenta la ventaja de integrar tanto factores tangibles como intangibles, al transformar valoraciones cualitativas en escalas cuantitativas que pueden sintetizarse para generar un ranking final de alternativas (T. L. Saaty, 2008; T. Saaty & Vargas, 2012). Esta característica lo convierte en un método idóneo para abordar problemáticas relacionadas con la minería. A nivel internacional, se ha aplicado en India para la selección de sitios adecuados de disposición de cenizas de carbón, considerando criterios como geología, uso del suelo y proximidad a zonas pobladas mediante herramientas SIG (Ríos, 2024), en Irán, para determinar el método óptimo de explotación subterránea (Jamshidi et al., 2008), y en Turquía, para la evaluación de impactos ambientales asociados a la minería de carbón. En el contexto colombiano, ha sido utilizado en Boyacá, en procesos de ordenamiento territorial con enfoque minero, y en Santander, en la identificación de áreas potenciales para minería de carbón bajo criterios ambientales. También en la identificación de áreas idóneas para la instalación fotovoltaicas en el municipio de Neiva (Calderón et al., 2025) en valoraciones geoestadísticas de los valores modificadores de las variables técnicas, ambientales y sociales para la estimación de los recursos mineros de arenas y gravas en el municipio de Yumbo y en trabajos con aplicaciones de SIG y técnicas multivariantes para la selección de un relleno sanitario en Tolima, entre otras. Estas experiencias demuestran que el AHP constituye una herramienta robusta y versátil para este tipo de análisis.

Adicionalmente, este autor; Saaty, plantea que, para tomar una decisión de una manera organizada, se debe descomponer el problema sobre el que se va a tomar una decisión en una serie de pasos:

- 1) Definir el problema y determinar el tipo de conocimiento que se genera.
- 2) Construir la jerarquía de decisión desde la meta general hasta los criterios y alternativas.
- 3) Elaborar matrices de comparaciones pareadas, evaluando la importancia relativa de los elementos respecto al criterio superior.
- 4) Calcular los pesos mediante autovectores y sintetizar los resultados hasta obtener las prioridades finales.

Posteriormente, se debe continuar con el proceso de asignación de pesos y sumas hasta que se obtengan las prioridades finales de las alternativas en el nivel más bajo de la jerarquización.

Para realizar las comparaciones de pares mencionada en el punto 3 se requiere aplicar una escala numérica que indique cuantas veces es más importante un elemento sobre otro elemento,

con respecto al criterio o propiedad con el cual están siendo comparados. En la siguiente tabla se muestra la escala propuesta por (T. L. Saaty, 2008; T. Saaty & Vargas, 2012)

Tabla 1.

Escala de análisis multicriterio propuesta por Saaty y Vargas

Intensidad de Importancia	Definición
1*	Ambos criterios con Igual Importancia; Igual importancia
3*	Uno es moderadamente más importante que el otro; Importancia moderada
5*	Uno es fuertemente más importante que el otro; Fuerte Importancia
7*	Uno es muy fuerte en comparación con el otro; Muy fuerte o importancia demostrada
9*	Uno es extremadamente más importante que el otro; Importancia extrema
2,4,6,8	Valores intermedios; permiten matizar la comparación cuando no encajan en los impares.
Valores Recíprocos	Si al comparar A con B le das un valor X, la comparación inversa de B con A será $1/X$; esto asegura que la matriz de comparación sea consistente.

*Valores principales.

Una vez obtenida la matriz de comparaciones pareadas, el autor sugiere proceder con la obtención de los pesos de importancia relativa de cada uno de los criterios utilizando la técnica de los autovectores. Finalmente, los pesos derivados se multiplican por los valores de las alternativas para generar una puntuación final que orienta la decisión (T. L. Saaty, 2008; Yajure, 2015).

En este proyecto, el AHP se desarrolló en ArcGIS Pro, utilizando herramientas de automatización como **Notebook con código Python** en la generación de mapas que permitieron la visualización de las categorizaciones obtenidas. Las capas correspondientes a los criterios técnicos, ambientales y sociales fueron estandarizadas, y ponderadas con base en los pesos del AHP y posteriormente combinadas para generar mapas de aptitud y mapas temáticos individuales por criterio (Esri, 2023).

Dentro del enfoque de análisis multicriterio, se incorporaron mapas intermedios con el fin de apoyar la interpretación territorial de las variables técnicas y facilitar la validación espacial de la información utilizada en el modelo. Estos mapas intermedios no constituyeron resultados finales

del análisis, sino que cumplieron una función metodológica complementaria, orientada a la comprensión de patrones espaciales y a la coherencia de los datos de entrada.

En este contexto, se emplearon técnicas de interpolación espacial para transformar información originalmente discreta en superficies continuas, permitiendo una lectura regional del comportamiento de la variable técnica analizada. La interpolación se utilizó como una herramienta de apoyo visual y analítico, sin alterar los valores originales asignados a las unidades de análisis empleadas en la priorización final.

La interpolación corresponde al método de distancia inversa ponderada (Inverse Distance Weighting, **IDW**), el cual estima el valor de una variable en una ubicación no muestreada a partir de un promedio ponderado de los valores conocidos circundantes, donde el peso asignado a cada punto es inversamente proporcional a la distancia. Matemáticamente, el método IDW se expresa como (Esri, 2023):

$$Z(x_0) = [\sum (Z(x_i) / d_i^p)] / [\sum (1 / d_i^p)]$$

Donde:

$Z(x_0)$: corresponde al valor estimado en la ubicación de interés

$Z(x_i)$: representa los valores conocidos de la variable en los puntos de entrada

d_i : es la distancia entre el punto i y la ubicación a interpolar

p : es el parámetro de potencia que controla la influencia de la distancia sobre la estimación.

El resultado de este proceso de interpolación es una superficie continua que permite identificar tendencias espaciales generales y zonas con comportamientos técnicos similares. Este producto se utilizó exclusivamente como un mapa intermedio de apoyo, orientado a la interpretación y validación espacial de la información técnica, sin ser incorporado directamente en el cálculo de los índices de aptitud ni en el proceso de priorización final del modelo multicriterio.

Además, la representación cartográfica final permitirá a los tomadores de decisiones identificar visualmente áreas prioritarias, analizar patrones de distribución geográfica y planificar acciones estratégicas de abastecimiento con base en evidencia geoespacial (Esri, 2023).

Parte de la importancia de este estudio radicó en que va de la mano con las políticas nacionales de seguridad energética, transición energética y uso sostenible de los recursos minerales,

alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles). La identificación de nuevas unidades de producción minera de carbón térmico en Boyacá no solo contribuirá a la estabilidad del suministro de Termopaipa, sino que también servirá como insumo para la planificación minera regional y la toma de decisiones estratégicas en el sector energético.

4.2.Referente Normativo

El marco legal que regula la minería del carbón en Colombia es el resultado de un proceso evolutivo en el que se pasó de una explotación sin mayores controles a un esquema regulado que busca equilibrar la producción minera con la protección del medio ambiente, la seguridad laboral y el desarrollo sostenible. Durante gran parte del siglo XX, la minería generó extensos impactos sobre suelos, aguas y ecosistemas sin que existieran obligaciones claras de restauración o compensación. Sin embargo, a partir de la presión social y de la creciente conciencia ambiental, el Estado colombiano fortaleció la normativa minero-ambiental, incorporando disposiciones que hoy son determinantes en la legalidad de la explotación y en la trazabilidad del carbón.

En este contexto, la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa) depende de un marco normativo robusto para garantizar que el abastecimiento de carbón térmico se realice conforme a la ley, minimizando riesgos ambientales, sociales y económicos. Así, el marco legal aplicable se puede entender en dos dimensiones complementarias: Uno respecto a la normativa general minero-ambiental que rige a nivel nacional, y dos respecto a la normativa específica que regula la operación y los procesos contractuales de Termopaipa y sus proveedores.

Durante décadas, la minería en Colombia se desarrolló sin suficientes controles ambientales ni planificación, lo que ocasionó graves impactos en los ecosistemas. Según la ANM, 2025 fue la presión de comunidades campesinas y ambientales la que impulsó al Estado a establecer normas sobre uso del agua, límites de explotación y abandono de explotaciones. Este proceso dio origen a una amplia legislación minera y ambiental que hoy constituye la base de la actividad extractiva.

Tabla 2.*Referente Normativo.*

Norma	Año	Tipo	Alcance principal	Vigencia	Aplicabilidad al caso Termopaipa
Ley 685 – Código de Minas (Congreso de Colombia, 2001)	2001	Minera	Regula la exploración, explotación y aprovechamiento de los recursos minerales. Define requisitos de legalidad de títulos mineros y obligaciones del titular.	Vigente	Base legal para validar títulos mineros y proveedores de carbón térmico.
Ley 99	1993	Ambiental	Crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y establece la obligatoriedad de licencias ambientales y protección de recursos naturales.	Vigente	Marco general para evaluar restricciones ambientales asociadas a títulos mineros.
Resolución 40599	2015	Minera	Por medio de la cual se adopta el Glosario Técnico Minero	Vigente	Base Técnica de vocabulario minero.
Decreto 1076 (Decreto Único Ambiental)	2015	Ambiental	Compila la normativa ambiental, regula licencias, permisos y áreas protegidas.	Vigente	Determina zonas excluidas o restringidas consideradas en el análisis IAS.
Decreto 2041	2014	Ambiental	Regula el procedimiento para la obtención de licencias ambientales.	Vigente	Condiciona la viabilidad ambiental de las unidades de producción minera.
Ley 141	1994	Económica / Minera	Regula el pago de regalías por la explotación de recursos naturales no renovables.	Vigente	Aplica a la recepción de carbón por parte de Termopaipa.
Resolución ANM 000299	2025	Minera / Económica	Fija precios base para la liquidación de regalías del carbón.	Vigente	Incide en costos del carbón térmico adquirido.
Decreto 276	2015	Comercialización	Regula el Registro Único de Comercializadores de Minerales (RUCOM).	Vigente	Permite verificar la legalidad del origen del carbón suministrado.

Norma	Año	Tipo	Alcance principal	Vigencia	Aplicabilidad al caso Termopaipa
Resolución ANM 396	2015	Comercialización	Establece criterios y excepciones para inscripción en RUCOM.	Vigente	Complementa la validación de proveedores legales.
Decreto 1886	2015	Seguridad Minera	Reglamento de seguridad en labores mineras subterráneas.	Vigente	Aplica a unidades de producción minera subterráneas proveedoras.
Decreto 539	2022	Seguridad Minera	Reglamento de seguridad en minería a cielo abierto.	Vigente	Aplica a proveedores de carbón en explotaciones a cielo abierto.
Resolución 0312	2019	Seguridad y Salud en el Trabajo	Define estándares mínimos del SG-SST.	Vigente	Condiciona la formalidad y continuidad de los proveedores.
Resolución CREG 044	2020	Energética	Establece metodología de cálculo de costos del carbón como combustible en generación eléctrica.	Vigente	Directamente relacionada con la operación y costos de Termopaipa.
Ley 769 – Código Nacional de Tránsito	2002	Transporte	Regula el transporte de carga, incluida la movilización de carbón.	Vigente	Incide en la logística del suministro de carbón térmico.
Ordenanza 030 (Boyacá)	2017	Tributaria departamental	Regula impuestos y estampillas departamentales.	Vigente	Afecta costos asociados a proveedores locales de Boyacá.

5. Metodología

La metodología de este proyecto inició con la búsqueda de información proveniente de diversas fuentes, con el fin de realizar una recopilación bibliográfica que permitiera llevar a cabo un análisis documental e identificar investigaciones relevantes para este caso de estudio. Para ello, se consultaron fuentes como bases de datos corporativas (GENSA) y de instituciones públicas (ANM), investigaciones académicas, artículos científicos, documentos gubernamentales, instituciones en línea, fuentes cartográficas, entre otras.

La investigación se centró en el análisis de las características técnicas, ambientales y sociales del territorio del departamento de Boyacá. En el componente técnico se consideraron variables asociadas a los resultados de muestreo, tales como, el porcentaje de cenizas, el poder calorífico (PCI), el contenido de humedad y el porcentaje de materias volátiles. En el componente ambiental se evaluaron los traslapes con zonas excluidas y/o restringidas para la actividad minera, mientras que en el componente social se analizaron los traslapes con comunidades indígenas y campesinas, en los casos en que aplicara.

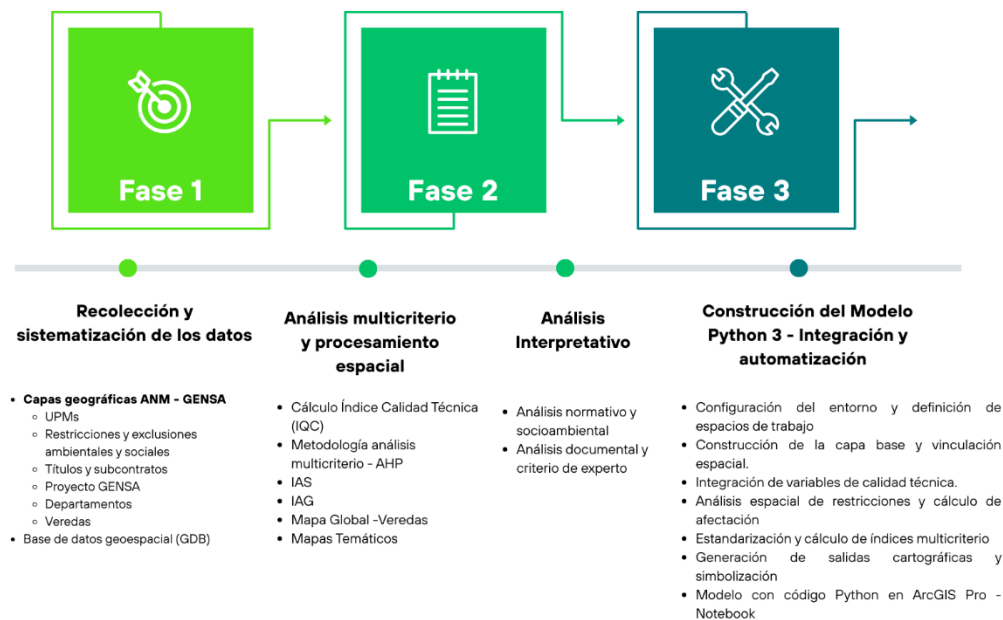
Posteriormente, se llevó a cabo la categorización de los tres grupos principales de criterios de evaluación; técnico, ambiental y social, mediante la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) propuesto por Saaty. Estos criterios fueron integrados en el software ArcGIS Pro, a partir del cual se generaron mapas temáticos y se ejecutaron distintos procesos de análisis geoespacial. Dichos análisis permitieron identificar y priorizar las unidades de producción minera del departamento de Boyacá con mayor interés para la compañía Termopaipa, con el fin de fortalecer y optimizar la toma de decisiones asociadas al abastecimiento de carbón térmico para la Central Termoeléctrica.

5.1. Enfoque Metodológico

De acuerdo con (Fetters & Tajima, 2022), la investigación científica puede desarrollarse bajo enfoques cuantitativo, cualitativo o mixto. En este proyecto se adoptó un enfoque mixto con alcance descriptivo y analítico, dado que combina la recolección y análisis de datos numéricos con la interpretación de factores sociales y ambientales mediante herramientas SIG y análisis multicriterio.

Se combinó análisis de información secundaria con herramientas SIG donde se identificó, clasificó y priorizó unidades de producción minera (UPM) y títulos mineros de carbón térmico en el departamento de Boyacá, como insumo para la ampliación estratégica de la red de abastecimiento de la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa).

Figura 1.
Diagrama Metodológico



5.2.Procedimiento

La implementación de la metodología se estructuró en tres fases orientadas al cumplimiento de los objetivos específicos, integrando el uso de Microsoft Excel para el tratamiento inicial de los datos y ArcGIS Pro para el análisis geoespacial. En este último se aplicaron geoprocесamientos, y procesos automatizados mediante la herramienta Notebook utilizando lenguaje Python. Cada una de las fases incluyó las siguientes actividades:

5.2.1. Fase 1: Recolección y sistematización de los datos

Todas las capas utilizadas en el presente trabajo se encuentran en el sistema de coordenadas proyectado Origen Único Nacional – CTM12, adoptado como el sistema oficial de referencia espacial para Colombia.

Esta fase comprendió la recolección, depuración y estructuración de la información proveniente, principalmente de las bases de datos institucionales de la compañía GENSA y de la Agencia Nacional de Minería (ANM). La información recopilada incluyó variables técnicas, ambientales y sociales, las cuales fueron integradas y estandarizadas en múltiples bases de datos geoespaciales, garantizando su compatibilidad y consistencia para los posteriores procesos de análisis dentro de ArcGIS Pro.

5.2.1.1. Bases de datos y capas geográficas - ANM

Se recopilaron las bases de datos oficiales en formato .xls de la Agencia Nacional de Minería (ANM), correspondientes a los títulos y subcontratos vigentes en el territorio nacional, clasificados según el tipo de carbón asociado (térmico, metalúrgico o mixto).

Desde el visor geográfico de la ANM se descargaron, para cada archivo .xls de títulos y subcontratos, las capas geográficas en formato shapefile, junto con las capas de departamentos y municipios de Colombia. Esta funcionalidad de la plataforma permitió incorporar la información directamente en ArcGIS Pro, optimizando su visualización espacial; dicha descarga se realizó en el segundo semestre del año 2025.

Cabe mencionar que la información disponible en el visor de la ANM se presenta de forma desagregada; por lo tanto, para obtener todas las capas shapefile correspondientes a títulos mineros con presencia de carbón, fue necesario aplicar filtros específicos y realizar las descargas de manera individual, ya que la plataforma no permite una descarga unificada. Esta situación se origina por variaciones en la forma en que los datos fueron almacenados en el sistema (por ejemplo, registros con “carbón” y “carbon” sin tilde), lo que genera capas separadas. Por esta razón, se efectuó una consulta a nivel nacional con el fin de garantizar la mayor cobertura y completitud posible de la información y poder realizar un análisis más global del comportamiento del carbón a nivel nacional y posteriormente visualizarlo a un nivel local con más detalle.

La estrategia de búsqueda que mejor se ajustó por su facilidad para la extracción de la información consistió en aplicar el filtro por tipo de mineral, seleccionando la opción “carbón”. Durante este proceso, se identificó que la información se encontraba distribuida en diversas combinaciones de minerales asociados, lo cual hizo necesario aplicar diez filtros diferentes para abarcar la totalidad de títulos mineros y subcontratos con presencia de carbón mineral en Colombia. A pesar de la multiplicidad de filtros requeridos, este procedimiento resultó ser la alternativa más eficiente para la descarga de la información desde la plataforma AnnA Minería.

Tabla 3.

Número de títulos con carbón en Colombia identificados en el Visor Geográfico ANM; sin depurar

ID_Filtro	Filtro - Capa	# Títulos
1	Carbón	1073
2	Carbón metalúrgico	887
3	Carbón metalúrgico, carbón térmico	792
4	Carbón, carbón térmico, magnesita	1
5	Carbón, carbón térmico, mineral de oro, mineral de plata, mineral de platino, níquel	1
6	Carbón, demás concesibles	21
7	Carbón, demás concesibles esmeralda	3
8	Carbón, demás concesibles, grafito	1
9	Carbón, esmeralda	3
10	Carbón, minerales de níquel y sus concentrados, minerales de oro y sus concentrados, minerales de plata y sus concentrados, minerales de platino (incluye platino, paladio, rutenio, rodio, osmio) y sus concentrados	1
Total		2.783

Tabla 4.

Número de subcontratos en Colombia con carbón identificadas en el Visor Geográfico ANM; sin depuración

ID_Filtro	Filtro	# Subcontratos
1	Carbón	62
2	Carbón metalúrgico	28
3	Carbón metalúrgico, carbón térmico	19
4	Carbón térmico	27
5	Carbón térmico, mineral de oro, mineral de plata, mineral de platino, minerales de oro y sus concentrados, minerales de plata y sus concentrados, minerales de platino (incluye platino, paladio, rutenio, rodio, osmio) y sus concentrados, níquel	1
6	Carbón térmico, mineral de oro, mineral de plata, mineral de platino, níquel	1
7	Carbón térmico, mineral de platino, níquel	1
8	Carbón, carbón térmico	3
9	Carbón, gravas (de río)	1
10	Carbón, mineral de oro, níquel	1
Total		144

Dada la forma en que la plataforma de la ANM presenta la información, fue necesario realizar un proceso de integración de los datos utilizando el software ArcGIS Pro:

➤ Integración general - Capas geográficas a nivel nacional

En ArcGIS Pro se unificaron las 10 capas descargadas de títulos y las 10 capas de subcontratos, mediante el geoprocesamiento “Merge”.

Previo a su integración, las 20 capas fueron convertidas a feature class utilizando la herramienta “Feature Class to Feature Class”, lo que permitió superar las limitaciones propias del formato .shp y garantizar que el resultado del Merge fuera limpio, coherente y técnicamente consistente.

La validación de los resultados se realizó comparando las tablas de atributos obtenidas en el geoprocesamiento con las bases de datos consolidadas en Excel descargadas directamente desde el geovisor de la ANM.

Toda la información procesada se almacenó en un File Geodatabase (GDB), con el propósito de asegurar una estructura de datos sólida y un mejor rendimiento en los geoprocesamientos. Este formato elimina las limitaciones de otros, como el shapefile, permitiendo manejar mayores volúmenes de datos, optimizar los tiempos de procesamiento y conservar estructuras avanzadas que garantizan información más completa, consistente y organizada.

Finalmente, fue necesario realizar un ajuste topológico en ArcGIS Pro, debido a que los títulos mineros presentaban duplicidades a nivel topológico. Como resultado de este proceso, se obtuvo un total depurado de 457 títulos mineros y 59 subcontratos de carbón en el departamento de Boyacá.

La información obtenida en esta etapa permitió formular preguntas de análisis a nivel nacional, orientadas a comprender la distribución del carbón mineral en Colombia. Dichas preguntas facilitaron una visión general del contexto minero nacional, que posteriormente se delimitó al caso de estudio; Boyacá y que se abarcaron dentro del capítulo de resultados. Entre las principales se destacaron:

- ¿Cuántos títulos y subcontratos vigentes de carbón existen en Colombia?
- ¿Qué porcentaje representan estos títulos respecto al total de títulos del país?
- ¿Cuántos y qué porcentaje de títulos corresponden a carbón metalúrgico, carbón térmico y/o mixtos?

➤ **Integración capas geográficas a nivel Boyacá**

Posteriormente, se realizó el geoprocesamiento orientado a visualizar la distribución de los títulos y subcontratos de carbón, pero esta vez a nivel del departamento de Boyacá.

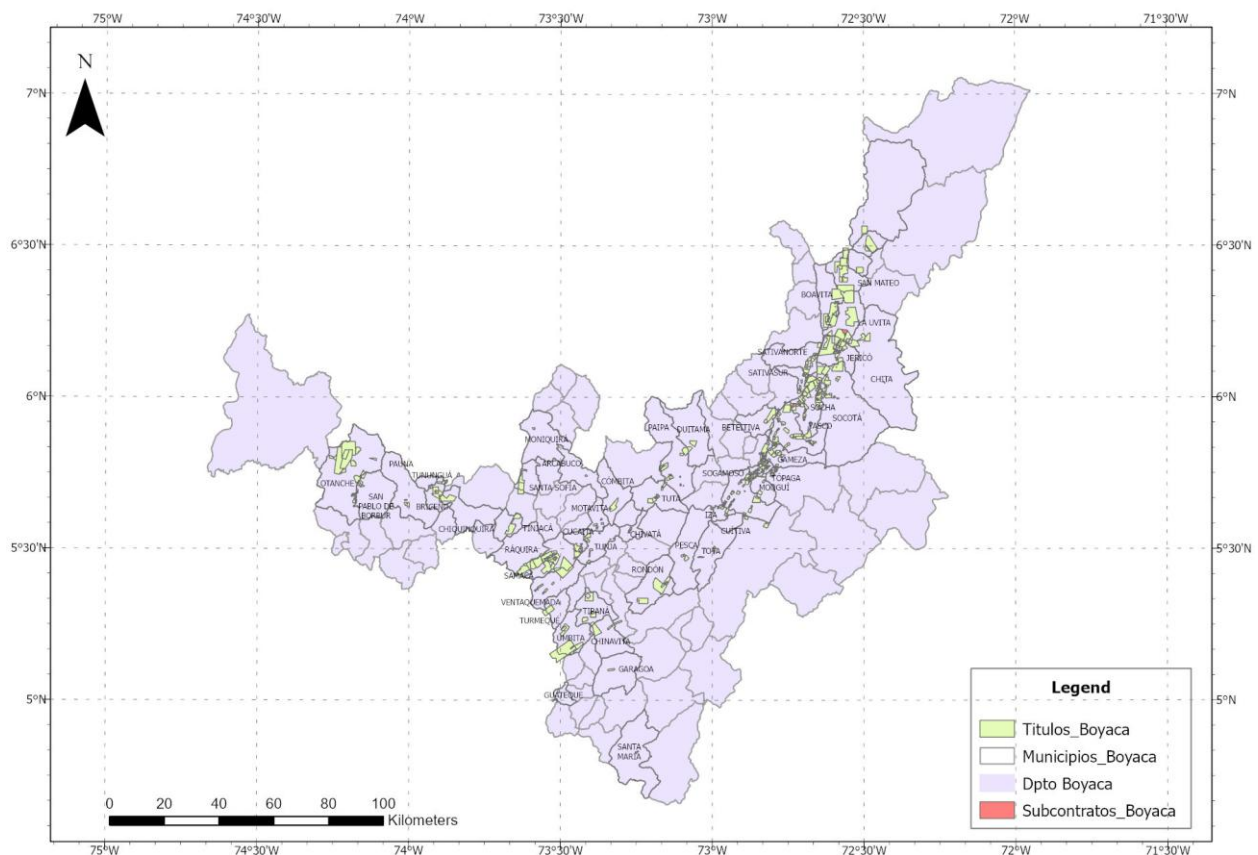
Aplicando el filtro por departamento dentro de la plataforma de AnnA Minería se extrajo el departamento de Boyacá como una capa individual, la cual se incorporó en la geodatabase (GDB).

Posteriormente, de la capa de “Títulos carbón Colombia” se extrajeron aquellos títulos localizados dentro del departamento de Boyacá. En este caso, se empleó la herramienta “Select By

Location”, utilizando la relación espacial “Intersect”. Esta opción resultó idónea, ya que existían títulos cuyas áreas se extendían parcialmente fuera del límite departamental, y la condición “Intersect” garantizó conservar la totalidad del polígono de cada título. Este mismo proceso se aplicó para los subcontratos de formalización (Figura 2).

Figura 2.

Ubicación títulos y subcontratos de carbón en Boyacá.



De esta manera, se consolidaron las capas correspondientes a los títulos y subcontratos de carbón del departamento de Boyacá.

Con base en esta información más detallada, fue posible formular una nueva serie de preguntas a nivel departamental, orientadas a identificar y analizar la distribución del carbón mineral en Boyacá, y posteriormente desagregarla a nivel municipal y/o veredal. Entre las principales preguntas planteadas se destacan:

- ¿Cuántos títulos de carbón se localizan en el departamento de Boyacá?
- ¿Cuál es el municipio de Boyacá con mayor número de títulos y/o subcontratos de carbón?
- ¿Es Boyacá el departamento con la mayor cantidad de títulos y/o subcontratos de carbón en Colombia?

➤ **Descarga e integración - Otras capas geográficas de Boyacá (ANM):**

Dentro de las capas geográficas obtenidas de la Agencia Nacional de Minería (ANM) se incluyeron las capas ambientales (zonas excluibles y zonas restringidas para la minería), capas sociales (Reservas campesinas y Resguardos Indígenas), capas especiales (zonas mineras especiales; áreas susceptibles para minería que se traslapaban con el departamento) y otras capas como los límites departamentales, municipales y veredales.

Tabla 5.

Capas Ambientales. Fuente: visor ANM

Capas Ambientales			
No. Capas - Zonas Excluibles		No. Capas - Zonas Restringidas	No. Capas - Otras Excluibles
7		3	Áreas protegidas del SINAP
			14
			Reserva Forestal Ley 2da
			Zonas protección y Dllo de los recursos naturales
			1

Tabla 6.

Capas sociales; Fuente: visor ANM

Capas sociales					
Comunidades				No. Capas - Zonas Restringidas	Áreas susceptibles para minería
No. Capas Reserva Campesina	2	No. Capas Resguardos Indígenas	1	9	51

Estas capas presentaban traslape con el departamento de Boyacá; no obstante, al momento de su descarga, la información se obtenía con cobertura a nivel nacional. En consecuencia, fue

necesario aplicar las herramientas de geoprocésamiento descritas en el apartado anterior, con el fin de extraer y conservar únicamente los elementos correspondientes al departamento de Boyacá.

➤ **Creación de capas geográficas de las Unidades de producción-ANM:**

La información suministrada por la Agencia Nacional de Minería (ANM), correspondiente a las unidades de producción de carbón existentes en el departamento de Boyacá, fue solicitada mediante derecho de petición, toda vez que ésta no se encontraba disponible de manera libre en la plataforma. La información fue entregada en formato Excel, sin embargo, el archivo presentaba una estructura no apta para ser procesada directamente en ArcGIS Pro, ya que contenía celdas combinadas, espacios entre palabras y tildes, lo que hizo necesario organizar y estructurar la información previamente en Excel.

En total, se depuraron y estandarizaron 1.630 registros, lo que evidencia la no disposición de la información en un formato fácilmente procesable para su uso a nivel geoespacial.

Con la depuración de la base de datos anterior y quitando las unidades de producción que no registraban coordenadas porque no contaban con permisos ambientales, y/o con estado inactivos, quedaron los siguientes datos finales:

Tabla 7.

Registros totales de Unidades de Producción Minera (UPM); fuente ANM

Total registros UPM - ANM	Total de títulos con UPM asociada
1.461	452*

*se quitaron duplicados de los expedientes relacionados a las UPM.

Posteriormente, con la información final consolidada, se generó el archivo geográfico en formato shapefile correspondiente a las Unidades de Producción Minera (UPM) registradas en las bases de datos de la ANM, utilizando el software ArcGIS Pro y la herramienta “XY Point Data”. Dicho archivo fue convertido mediante procesos de geoprocésamiento a Feature Class, y se efectuó la reproyección de coordenadas al sistema Magna-Sirgas/ Origen Único Nacional (CTM12), almacenando el resultado en la geodatabase (GDB) del proyecto (Figura 8).

Adicionalmente, se recalcularon las coordenadas originales; WGS 84 al nuevo sistema CTM12 mediante la herramienta “Calculate Geometry”, con el fin de garantizar la coherencia espacial y la compatibilidad con las demás capas geográficas empleadas.

5.2.1.2. Bases de datos y capas geográficas – GENSA

La compañía GENSA, operadora de la Central Termoeléctrica Termopaipa, suministró las capas geográficas (.shp) correspondientes a la ubicación de la central, las Unidades de Producción Minera (UPM) registradas en sus bases de datos y área de influencia del proyecto.

Dado que la capa de GENSA de las UPM no contenía el nombre de la unidad asociado en su tabla de atributos, no fue posible realizar una comparación directa con la capa de UPM proporcionada por la Agencia Nacional de Minería (ANM). Por esta razón, la comparación se efectuó directamente en ArcGIS Pro, aplicando un análisis espacial punto a punto mediante la herramienta “Spatial Join”, configurada con la operación “Join one to many”, para poder relacionar cada UPM de GENSA con cada UPM de ANM.

Como resultado, se generó en ArcGIS Pro una nueva capa donde cada punto de GENSA heredó los atributos de las UPM de la ANM que se encontraban en la misma ubicación o dentro del rango establecido. Los registros que presentaron datos de la ANM corresponden a coincidencias espaciales, mientras que aquellos con campos vacíos no registraron correspondencia.

Posteriormente, se aplicó una selección por atributos “Select by Attributes” para filtrar únicamente las UPM con coincidencias registradas, determinándose un total de 45 UPM comunes entre ambas fuentes. Esto indica que, de las 76 UPM inicialmente reportadas por GENSA, 45 coinciden con las actualmente activas y registradas oficialmente ante la ANM. Dicho análisis se realizó con el fin de no tener duplicidad en los datos y poder adoptar como base la información oficial y actualizada de registro de las Unidades de Producción Minera del departamento, que en este caso era la que suministró la ANM.

➤ Información fichas Técnicas suministradas por la compañía GENSA:

GENSA suministró información relacionada con las características técnicas de diversas muestras de carbón obtenidas en algunos de los títulos mineros con los cuales, en algún momento,

mantuvo contratos de compra. En total, se consideraron 45 registros de muestras asociadas cada una a un título, es decir que también se consideraron 45 títulos, correspondientes únicamente a aquellos que contaban con fichas técnicas completas y que además se encontraban registrados en la base de datos de la Agencia Nacional de Minería (ANM) como placas activas y/o vigentes.

Estos títulos fueron objeto de un análisis técnico orientado a su categorización según la calidad del carbón, con el propósito de identificar cómo se distribuye espacialmente la calidad del recurso en el departamento de Boyacá.

Las variables técnicas organizadas y estructuradas dentro de la base de datos de los títulos seleccionados fueron: poder calorífico, humedad, contenido de cenizas y material volátil.

5.2.2. Fase 2: Análisis multicriterio y procesamiento espacial

Esta fase comprendió el desarrollo del análisis multicriterio orientado a evaluar la aptitud de las unidades de producción minera y los títulos mineros del departamento de Boyacá. En una primera etapa, se efectuó un análisis multicriterio para las variables técnicas: poder calorífico, humedad, materias volátiles y contenido de cenizas, con el fin de determinar la calidad del carbón disponible en el departamento; esto teniendo en cuenta los 45 muestreos que se tenían registrados por GENSA. Posteriormente, se aplicó el Análisis Jerárquico de Saaty (AHP) para integrar y ponderar las variables técnicas, ambientales y sociales, incorporando los resultados obtenidos en la etapa previa. Finalmente, mediante el procesamiento espacial en ArcGIS Pro, se generaron mapas temáticos que permitieron representar y categorizar visualmente la aptitud de las unidades de producción minera y títulos mineros a nivel departamental.

Antes de iniciar con las categorizaciones, hay que mencionar que fue fundamental analizar la distribución espacial del carbón en el departamento de Boyacá según el tipo de recurso otorgado (térmico, metalúrgico y/o mixto). Los mapas temáticos de las Figuras 5, 6 y 7 se elaboraron a partir de los minerales asociados a los títulos y subcontratos del departamento, permitiendo visualizarlos por municipios y generar estadísticas sobre la distribución del carbón a nivel territorial que se analizaron en el capítulo de Resultados.

En el caso de la central termoeléctrica, el interés se concentra específicamente en las zonas donde se tiene otorgado carbón térmico.

A partir de la información obtenida en los mapas anteriores, fue posible analizar dentro del capítulo de resultados, cosas claves como:

- ¿Cuántos títulos del departamento de Boyacá cuentan con carbón térmico, metalúrgico o mixto?
- ¿Cuántos y Cuáles son los municipios y/o veredas donde se localiza el carbón térmico y/o mixto en Boyacá?

5.2.2.1. Calidad de Carbón - Índice de calidad Técnica (IQC):

El análisis se fundamentó en la tabla suministrada por GENSA, la cual contenía las características técnicas de 45 muestras de carbón obtenidas en los 45 títulos mineros seleccionados. Para la construcción del Índice de Calidad Técnica (IQC) se consideraron cuatro criterios técnicos registrados en las fichas de análisis de las muestras de la compañía: poder calorífico, contenido de cenizas, humedad y materias volátiles.

A cada parámetro se le asignó una ponderación según su relevancia en el proceso de generación térmica, con base en la revisión bibliográfica y la importancia de cada factor determinado por GENSA, estableciendo los siguientes pesos: 50 % para el poder calorífico, 25 % para el contenido de cenizas, 15 % para la humedad y 10 % para las materias volátiles.

Posteriormente, los valores fueron normalizados en una escala de 0 a 1, y el IQC se calculó mediante un promedio ponderado, clasificando los títulos mineros en tres categorías de calidad:

- Alta ($\text{IQC} \geq 0.75$)
- Media ($0.50 \leq \text{IQC} < 0.75$)
- Baja ($\text{IQC} < 0.50$).

Si bien la estructura conceptual de la ponderación se inspiró en el método Analytic Hierarchy Process (AHP) propuesto por (T. L. Saaty, 2008; T. Saaty & Vargas, 2012), el cual establece comparaciones por pares y análisis de consistencia para derivar pesos relativos entre criterios, en este caso no se aplicó el procedimiento formal del AHP. La elección de una ponderación directa respondió a las condiciones particulares de la base de datos: la disponibilidad limitada de muestras, la naturaleza cuantitativa y homogénea de los indicadores técnicos, y la recomendación metodológica de emplear este enfoque cuando se analizan menos de cinco criterios (Wu et al., 2018), siendo de análisis en el caso de estudio 4 subcriterios dentro de la variable

técnica, adicionalmente de poder comparar diferentes metodologías de análisis de comparación multivariable.

Finalmente, se tuvieron en cuenta las siguientes recomendaciones implementadas por la compañía GENSA, para asignar la relevancia de cada indicador técnico en el proceso de generación térmica. A continuación, se presenta las fichas técnicas de cada variable:

1. Poder Calorífico (Kilocalorías/kg)

Es el indicador más importante en cuanto a calidad del carbón térmico. Refleja directamente la cantidad de energía que se obtiene al quemarlo. Cuanto mayor sea el valor calorífico, más eficiente será el carbón para la generación eléctrica, con base en esto, el poder calorífico se categorizó de la siguiente manera:

- Alta calidad: > 6.000 kcal/kg
- Media calidad: 5.000–6.000 kcal/kg
- Baja calidad: < 5.000 kcal/kg

En el caso de estudio, este parámetro fue al que mayor peso se le asignó en la matriz, siendo del 50 % (Figura 9).

2. Humedad (%):

El contenido de humedad reduce el poder calorífico útil, porque parte de la energía se gasta evaporando el agua contenida. Por eso, aunque está correlacionado con el poder calorífico, debe considerarse como un factor correctivo negativo de ésta. Se le asignó un peso del 15% (Figura 10).

- Ideal: < 10 %
- Aceptable: 10 – 15 %
- Crítico: > 15 %

3. Cenizas (%)

Las cenizas son el residuo incombustible. Un contenido alto genera problemas de escoria, incrustaciones y mantenimiento en las calderas. En plantas como Termopaipa, este valor suele tener límites estrictos (máximo 22 %).

- Excelente: < 15 %

- Aceptable: 15 – 22 %
- Deficiente: > 22 %

Se le asignó un peso del 25 %, dada su influencia directa en la eficiencia y mantenimiento del sistema térmico (Figura 11).

4. Materias Volátiles (%)

Las volátiles determinan qué tan fácil se inflama el carbón. Un valor ideal (entre 25 – 35 %) indica un carbón térmico con buena combustión. Si es muy bajo, el carbón es más difícil de encender; si es muy alto, arde demasiado rápido (Figura 12).

- Encendido rápido – No ideal: >35%
- Ideal - para térmico: 25 – 35 %
- Medio: 10-25%
- Dificultad encendida – Deficiente: <10%

Un quinto parámetro que se pudo haber considerado fue el azufre, el cual, aunque no se incluyó en el análisis por la insuficiente disponibilidad de datos, se reconoce su alta relevancia ambiental. Elevados contenidos de azufre incrementan las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) durante la combustión, lo que puede afectar la operación de plantas termoeléctricas sujetas a límites estrictos de emisiones.

Este parámetro podría incorporarse en futuras investigaciones con un enfoque ambiental más amplio, constituyendo un valor agregado a la metodología implementada en este proyecto. De esta forma, el modelo podría ser replicado o adaptado en estudios orientados a la evaluación ambiental de unidades de producción minera, siempre que exista mayor disponibilidad de información técnica sobre el contenido de azufre.

➤ La metodología para el cálculo del IQC fue el siguiente:

- ✓ Se usaron las cuatro variables técnicas más relevantes que se tenían disponibles dentro de los muestreos de GENSA:

Tabla 8.*Asignación de pesos por variable técnica*

Variable	Tipo	Peso (%)	Interpretación
Poder calorífico (kcal/kg)	Directa	50	A mayor valor, mejor calidad, mayor rendimiento térmico y menor consumo por MWh generado.
Cenizas (%)	Inversa	25	A menor valor, mejor calidad
Humedad (%)	Inversa	15	A menor valor, mejor calidad
Volátiles (%)	Directa	10	Valor medio-alto es favorable; Ideal entre 25–35%.

✓ **Normalización de los datos** (escala 0–1)

Para hacer comparables los parámetros con distintas unidades y magnitudes, los valores fueron normalizados entre 0 y 1 de acuerdo con lo planteado por (Wu et al., 2018), de manera que 1 representó la mejor calidad.

Los parámetros de poder calorífico y volátiles se normalizaron de forma directa, mientras que la humedad y las cenizas se trataron como factores inversos debido a su efecto negativo sobre la eficiencia térmica del carbón. Estos se evaluaron con base en las siguientes fórmulas:

- Variables **directas** (Kcal, Volátiles):

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

- Variables **inversas** (Cenizas, Humedad):

$$X_{norm} = 1 - \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Donde:

X_{norm} : Variable a normalizar

X : El valor de la variable evaluada

X_{min} : Valor mínimo de la variable evaluada

X_{max} : Valor máximo de la variable evaluada

Esto asegura que **1** siempre represente mejor calidad.

Posteriormente, se tomaron los datos de poder calorífico y volátiles, se calcularon los mínimos y máximos de cada variable, y se normalizaron todos los datos con base en las fórmulas anteriores.

En el caso de las cenizas y la humedad, aunque está correlacionado con el poder calorífico, debieron considerarse como un factor correctivo negativo.

✓ **Cálculo del Índice de Calidad Técnica (IQC)**

Se calculó utilizando el promedio ponderado directo, teniendo en cuenta los pesos definidos anteriormente, para cada parámetro técnico (Saaty, 2012):

$$IQC = 0.50(Kcal_{norm}) + 0.25(Cenizas_{norm}) + 0.15(Humedad_{norm}) + 0.10(Volátiles_{norm})$$

Donde:

$Kcal_{norm}$: Valor de Poder calorífico normalizado

$Cenizas_{norm}$: Valor de Cenizas normalizada

$Humedad_{norm}$: Valor de Humedad normalizada

$Volátiles_{norm}$: Valor de Volátiles normalizado

El resultado varía entre **0 (muy baja calidad)** y **1 (excelente calidad)**.

✓ **Clasificación Final de los datos – Calidad de carbón:**

Con base en los valores obtenidos del IQC se definieron tres categorías; siguiendo las recomendaciones de la compañía GENSA:

Tabla 9.*Categorización del Índice IQC – Calidad de carbón*

Rango	Categoría	Interpretación	Color sugerido
0.75 – 1.00	Alta calidad	Carbón ideal para generación	 Verde
0.50 – 0.74	Media calidad	Aceptable con ajustes	 Amarillo
0.00 – 0.49	Baja calidad	Menor eficiencia térmica	 Rojo

El Índice IQC se representó como mapa intermedio utilizando la herramienta de interpolación IDW en los datos de los muestreos de GENSA. Para este proceso se emplearon todos los registros disponibles en la tabla base, sin aplicar filtros ni exclusiones, garantizando la representación completa de la información técnica existente en el área de estudio.

El resultado de la interpolación corresponde a una superficie continua de IQC, la cual permitió identificar tendencias espaciales generales y zonas con comportamientos técnicos similares (Figura 13). Este producto fue utilizado para apoyar la interpretación espacial de la calidad técnica del recurso y para verificar la coherencia territorial de los valores asignados a los títulos mineros.

Es importante destacar que el raster generado mediante IDW no fue incorporado directamente en el cálculo de los índices de aptitud ni en el proceso de priorización, sino que se integró al flujo de trabajo SIG como un insumo metodológico auxiliar, fortaleciendo el análisis multicriterio sin introducir ponderaciones adicionales ni modificar la estructura del modelo.

5.2.2.2. Metodología análisis multicriterio – AHP

La metodología de AHP, inicia con la organización del problema de decisión en tres niveles:

➤ Nivel 1: Objetivo general de la categorización

Evaluar la aptitud de las UPM y de los títulos mineros que se encuentran en cada municipio del departamento de Boyacá para suministrar carbón térmico a Termopaipa.

➤ Nivel 2: Selección de Criterios

- Criterio Técnico
- Criterio Ambiental

- Criterio Social

➤ **Nivel 3: Selección de Subcriterios**

Aquí se ubican todos los subcriterios de los tres grandes grupos de variables a evaluar en el proyecto:

- Poder calorífico, humedad, cenizas y materiales volátiles (ya evaluados con el índice IQC)
- Zonas excluibles + Zonas restringidas
- Comunidades + Zonas restringidas sociales (comunidades indígenas y campesinas).

5.2.2.3.Construcción de la Matriz de Comparación por Pares (Criterios)

La matriz de comparación por pares de la metodología AHP siempre compara los criterios del Nivel 2 entre sí: Técnico, Ambiental y Social.

Lo primero fue definir el orden de importancia de las variables, este se definió con base a la normatividad colombiana. De esta manera lo clasificado dentro del criterio ambiental como excluible fue de mayor importancia, ya que allí la normatividad prohíbe realizar actividades de minería, posteriormente se pusieron las zonas ambientales restringidas y por último las comunidades; que incluyen también resguardos indígenas y comunidades campesinas, que vendrían siendo un tipo de clasificación restringida, ya que, sin permisos de las comunidades o las alcaldías, no se podrían realizar actividades mineras. Las áreas susceptibles para la minería no entran en la matriz como tal, estas son de carácter informativo. A continuación, se resume como quedó el orden de importancia:

- Zonas excluibles ambientales (ZE_A – C1): Importancia Alta
- Zonas restringidas ambientales (ZR_A – C2): Importancia media
- Comunidades (COM – C3): Importancia media
- Áreas susceptibles para minería: no entran en la matriz (solo informativas)

Se asignaron los valores AHP según la definición de importancia, usando la escala de Saaty (1, 3, 5, 7, 9) mostrada a continuación:

- 1 → igual importancia
- 3 → importancia moderada
- 5 → importancia fuerte

En consecuencia, los valores AHP de los subcriterios quedaron:

- ZE_A es 3 veces más importante que ZR_A → valor 3
- ZE_A es 3 veces más importante que COM → valor 3
- ZR_A y COM tienen igual importancia → valor 1

Con eso, la matriz de comparación por pares final quedó de la siguiente manera:

Tabla 10.

Matriz de comparación por pares – AHP

	ZE_A	ZR_A	SOC
ZE_A	1	3	3
ZR_A	1/3	1	1
SOC	1/3	1	1

La tabla anterior también refleja el comportamiento de los valores recíprocos establecidos en la escala de Saaty (1/3, 1/5, 1/3, entre otros). Según esta regla, si un criterio A es tres veces más importante que un criterio B, entonces B tendrá una importancia equivalente a 1/3 respecto a A. Por ejemplo, en este caso, ZE_A se considera tres veces más importante que ZR_A y COM, por lo que ZR_A y COM adquieren un valor recíproco de 1/3 frente a ZE_A.

Una vez se estableció la matriz de comparación por pares, se procedió a sumar cada columna de la matriz para poder normalizar los datos, de la siguiente manera:

- Columna ZE_A:

$$1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} \approx 1,6667$$

- Columna ZR_A:

$$3 + 1 + 1 \approx 5$$

- Columna COM:

$$3 + 1 + 1 = 5$$

Posteriormente, se normalizó la matriz para poner todo en las mismas proporciones, realizando la división de cada elemento de la matriz por la suma de su columna, haciendo que, en cada columna, la suma sea 1 (100 % de importancia repartida).

Por ejemplo:

- ZE_A vs ZE_A: La relación entre ambas variables dio 1 y el total de la sumatoria 1,6667

$$\frac{1}{1,6667} \approx 0,60$$

- ZR_A vs ZE_A: La relación entre ambas variables dio 3 y el total de la sumatoria 5

$$\frac{3}{5} \approx 0,20$$

- COM vs ZE_A: La relación entre ambas variables dio 3 y el total de la sumatoria 5

$$\frac{3}{5} \approx 0,20$$

Este procedimiento de normalización se realizó con todas las columnas de la matriz anterior, lo que dio como resultado los siguientes valores; la sumatoria de todas las columnas dan aproximadamente 1:

Tabla 11.

Normalización de la matriz AHP

	ZE_A	ZR_A	COM
ZE_A	0,60	0,60	0,60
ZR_A	0,20	0,20	0,20
COM	0,20	0,20	0,20

Posteriormente para cada criterio se sacaron los promedios de cada fila, siendo los promedios, el **peso AHP (W)** de los subcriterios, tal y como se muestra a continuación (Saaty, 2012):

- **Peso de ZE_A:** $w_{ZE_A} = \frac{0,60+0,60+0,60}{3} \approx \frac{1,8}{3} \approx 0,6$
- **Peso de ZR_A:** $w_{ZR_A} = \frac{0,20+0,20+0,20}{3} \approx \frac{0,6}{3} \approx 0,2$
- **Peso de Comunidades (COM):** $w_{COM} = \frac{0,20+0,20+0,20}{3} \approx \frac{0,6}{3} \approx 0,2$
- Se realiza la verificación de los pesos, donde la suma efectivamente dio ≈ 1

$$0,60 + 0,20 + 0,20 \approx 1,00$$

Lo anterior, confirma que la distribución de importancia está bien normalizada (100 % repartido entre los 3 subcriterios).

Se verifica la matriz por medio de “**La consistencia de la matriz CR**”:

- El valor propio máximo $\lambda_{\max} = 3$
- $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (3 - 3) / (3 - 1) = 0$
- Para $n = 3$, $RI = 0,58$ (pero da igual porque $CI = 0$)

$$CR = CI/RI = 0/0,58 = 0$$

La Razón de Consistencia (CR) fue igual a 0, por lo que los juicios emitidos se consideran perfectamente consistentes según el criterio de Saaty, 2008, 2012.

Tabla 12.

Pesos (W) finales de la matriz multicriterio – AHP

Criterio	Peso AHP
ZE_A	0,60
ZR_A	0,20
COM	0,20

Con la tabla anterior, se refleja el orden de importancia asignado a las variables, siendo la primera (ZE_A) la de mayor importancia; con asignación del 60% del peso. El componente ambiental restringido y el social combinado se reparten el 40 % restante de forma equitativa (20 % y 20 %).

Una vez calculados los pesos de cada variable se construyó el **índice ambiental-social**, que es el que facilitará la realización de mapas temáticos en ArcGIS Pro para analizar de manera espacial el comportamiento de estas dos variables, el Índice es el siguiente:

$$IAS = 0,60(ZE_A) + 0,20(ZR_A) + 0,20(COM)$$

5.2.2.4. Construcción del Índice Ambiental-Social (IAS) en ArcGIS Pro:

➤ Cálculo de porcentajes de traslapes con las variables sociales/ambientales:

Primero, cada variable fue transformada a un rango entre 0 y 1. Para lograrlo, fue necesario calcular previamente el **porcentaje de traslape** entre cada título minero y los subcontratos con respecto a las capas ambientales y/o sociales correspondientes, esto se realizó utilizando la herramienta “Notebook” código Python en ArcGIS Pro.

Antes de obtener estos porcentajes, se consolidaron todas las capas asociadas a cada categoría en una sola utilizando la herramienta de automatización anterior. Es decir, todas las capas clasificadas como “ambiental excluible” se integraron en una única feature class, y el mismo procedimiento se aplicó para “ambiental restringido” y “comunidades”.

Para ello se utilizó el código Python de la herramienta “notebook” realizando un análisis espacial de restricciones y cálculo de afectación. Este análisis constituyó el núcleo del geoprocesamiento, donde primero, se calculó el área geométrica total de cada título. Luego, mediante una función iterativa personalizada, el script ejecutó intersecciones topológicas entre los títulos y las capas con restricción (Zonas Excluibles, Zonas Restringidas y Componente Social), luego el algoritmo sumó las áreas fragmentadas resultantes de cada intersección y calculó el porcentaje de afectación mediante la fórmula: **$(\text{Área Intersectada} / \text{Área Total del Título}) \times 100$** . Los resultados se almacenaron en los campos correspondientes (PCT_ZE_A, PCT_ZR_A, PCT_COM).

➤ Estandarización (0-1) de los porcentajes calculados:

Posteriormente, dentro del código Python, se realizó la estandarización y cálculo de índices multicriterio con los porcentajes de afectación calculados, se aplicó un proceso de estandarización utilizando funciones lógicas condicionales que transforman los valores continuos (0-100%) en factores de aptitud discretos (0, 0.5, 1) según los umbrales de tolerancia definidos.

Esta estandarización reclasifica cada variable en un rango entre 0 y 1, con el fin de facilitar su visualización espacial, de acuerdo con la presencia, ausencia o grado parcial de traslape con zonas excluibles y/o restringidas. Para ello, cada variable contó con su propia tabla de reclasificación, definida con base en los porcentajes de traslape.

✓ **Zonas Excluibles (ZE_A)**

Estas son las más estrictas porque son áreas donde la minería está prohibida.

Tabla 13.

Estandarización de los porcentajes de traslape

% Traslape	Valor Estándar	Interpretación
0 %	1	Alta aptitud (no tiene traslape con área excluible)
>0 % y ≤ 5 %	0.5	Aptitud media (Traslape parcial)
>5 %	0	Baja aptitud (Traslape total)

✓ **Zonas Restringidas Ambientales y sociales (ZR_A y COM)**

Estas son zonas con restricción para desarrollar actividades mineras, se deben contar con permisos de las comunidades y/o instituciones presentes sobre esas zonas con la que se tengan traslapes.

Tabla 14.

Estandarización de los porcentajes de traslape

% Traslape	Valor Estándar	Interpretación
0 %	1	Alta aptitud (no tiene traslape con área restringida)
>0 % y ≤ 10 %	0.5	Media (Traslape parcial)
>10 %	0	Baja aptitud (Traslape total)

5.2.2.5.Cálculo del Índice Ambiental-social (IAS)

El cálculo del Índice IAS, representó el comportamiento de la integración de ambas variables; las sociales y las ambientales y se hizo con base en los pesos AHP definidos para cada variable y los valores estandarizados calculados anteriormente (los que se pusieron en los rangos de 0, 0.5 y 1), el código para el cálculo de la variable fue el siguiente (elaboración propia):

$$(!ZE_A_std! * 0.60) + (!ZR_A_std! * 0.20) + (!COM_std! * 0.20)$$

Tabla 15.*Categorización del rango IAS según metodología AHP*

Rango IAS	Categoría
0.75 – 1.00	ALTA (Zonas sin traslape)
0.50 – 0.74	MEDIA (Zonas con traslape parcial)
0.00 – 0.49	BAJA (Zonas con Total traslape)

Para esta clasificación del Índice Ambiental-Social (IAS) se establecieron tres rangos de aptitud (alta, media y baja), definidos dentro del intervalo 0–1 que caracteriza los modelos de evaluación multicriterio con criterios normalizados. La clasificación se estructuró siguiendo las recomendaciones metodológicas revisadas en la bibliografía de análisis multicriterio – AHP como por ejemplo (Buitrago & Torres, 2025; Calderón et al., 2025; Yajure, 2015) quienes sugieren la división de índices de idoneidad en intervalos equivalentes que permitan diferenciar niveles de preferencia o pertinencia en el análisis, trayendo casos de estudio aplicados en algunos municipios de Colombia.

En este sentido, valores superiores a 0.75 denominados categoría alta, corresponden a alternativas en donde no hay porcentajes de traslape con elementos restrictivos y/o excluibles. Los valores entre 0.50 y 0.74 representan condiciones de aptitud media, en donde existen traslapes parciales con elementos restrictivos y/o excluibles. Finalmente, valores inferiores a 0.50 corresponden a la categoría baja los cuales reflejan un total traslape con restricciones ambientales o sociales. Esta clasificación permite representar espacialmente el grado de idoneidad de cada título y facilitar su interpretación cartográfica.

Todo lo anterior, se calculó mediante la parametrización dentro del código Python, después de estandarizar y calcular los traslapes de los índices multicriterio, se implementó mediante álgebra de campos la ecuación ponderada del Índice Ambiental-Social (IAS); mostrado anteriormente, basada en los pesos del método AHP, y se calcula el Índice de Aptitud Global (IAG) integrando el componente técnico y el ambiental-social (IAS). Cada índice es clasificado automáticamente en categorías de aptitud (Alta, Media, Baja) (Figura 14).

5.2.3. Fase 3: Construcción del modelo Python3 para la integración y automatización del proceso de evaluación multicriterio.

El código desarrollado se estructura en seis bloques lógicos secuenciales que transforman los datos de entrada en productos cartográficos finales. A continuación, se describe el funcionamiento técnico de cada etapa:

➤ Configuración del entorno y definición de espacios de trabajo.

El script inicia importando las librerías necesarias (arcpy, os) y estableciendo la propiedad `overwriteOutput` como verdadera, lo que permite la reescritura automática de archivos en caso de múltiples ejecuciones. Se definen las rutas absolutas a la Geodatabase de insumos y se instruye al sistema para crear una nueva Geodatabase de salida si esta no existe, garantizando así un entorno de trabajo limpio y organizado para almacenar los resultados.

En esta parte el código decide dónde leer y dónde escribir, asegurando que no se dañen los datos originales y que el procesamiento sea rápido.

Ejemplo del Código Python:

```
import arcpy # Importa el motor de geoprocésamiento de Esri.
import os # Permite manipular rutas y carpetas del sistema.
from datetime import datetime # Para poner estampas de tiempo en el log.
arcpy.env.overwriteOutput = True # Permite que el script borre y reemplace archivos si ya existen.
arcpy.env.parallelProcessingFactor = "100%" # Ordena al procesador usar todos sus núcleos para ir más rápido.
```

class PriorizacionApp:

```
def __init__(self):
    # Define la ubicación de la GDB original (donde están tus datos base).
    self.gdb_entrada = r"G:\Mi unidad\...\Modelo_Priorizacion_Zonas_Base.gdb"

    # Crea las rutas automáticas a cada capa dentro de la GDB base.
    self.titulos = os.path.join(self.gdb_entrada, "FD_01_Tecnico_Minero", "Titulos_Boyaca")
```

```
self.info_tec = os.path.join(self.gdb_entrada, "FD_01_Tecnico_Minero",
"ICQ_Info_titulos")
```

```
# Define la GDB de SALIDA en tu disco local C: para que sea veloz.
self.gdb_salida =
r"C:\GIS_TEMP\Priorizacion_Termopaipa\Resultados_Priorizacion_Final.gdb"
```

```
# AUTOMATIZACIÓN: Si la carpeta local no existe, el código la crea solo.
if not arcpy.Exists(self.gdb_salida):
    os.makedirs(os.path.dirname(self.gdb_salida), exist_ok=True)
    arcpy.management.CreateFileGDB(os.path.dirname(self.gdb_salida),
os.path.basename(self.gdb_salida))
```

➤ **Construcción de la capa base y vinculación espacial.**

Para preservar la integridad de los datos originales, el proceso comienza generando una copia de la capa de títulos mineros denominada ANM_Titulos. Posteriormente, se ejecuta una operación de intersección espacial (Intersect) entre esta capa y las Unidades de Producción Minera (UPM). Este proceso intermedio se realiza en la memoria RAM del sistema (in_memory) para optimizar el rendimiento computacional. Mediante el uso de cursores de búsqueda y diccionarios de Python, se asocia el código de la UPM (CODIGO_RMN) al título correspondiente (CODIGO_EXP), consolidando una capa base que integra la geometría del título con la identificación de la unidad productiva.

➤ **Integración de variables de calidad técnica.**

El algoritmo procede a leer la tabla de información técnica externa (ICQ_Info_titulos). utilizando una estructura de datos tipo diccionario hash, se almacenan en memoria los atributos de calidad (poder calorífico, humedad, cenizas, volátiles) asociados a cada ID de título. A través de un cursor de actualización (UpdateCursor), estos valores se transfieren de manera persistente a la capa espacial ANM_Titulos. Adicionalmente, se generan y pueblan dos campos diferenciados para el Índice de Calidad de Carbón: uno numérico (IQC_Valor) para operaciones matemáticas y uno de texto (IQC_Clasif) para la categorización cualitativa.

Ejemplo Código Python:**def paso1_integracion(self):**

```
# Une los polígonos de los títulos con su información técnica (IQC).
arcpy.analysis.SpatialJoin(self.titulos, self.info_tec, self.maestra, "JOIN_ONE_TO_ONE",
"KEEP_ALL")

# Calcula el área exacta en Hectáreas para cada predio.
arcpy.management.AddField(self.maestra, "AREA_HA", "DOUBLE")
arcpy.management.CalculateGeometryAttributes(self.maestra, [{"AREA_HA", "AREA"}],
area_unit="HECTARES")

# LÓGICA DE BLINDAJE (Python Code Block):
# Esta función dice: "Si el valor es Nulo, ponle 0.0 para que la matemática no se rompa".
code = """
def clean_val(v): return 0.0 if v is None else float(v)
def clean_sem(s): return 'Baja' if s is None or s.strip() == " else s
"""

# Aplica la limpieza masivamente a los campos técnicos.
arcpy.management.CalculateField(self.maestra, "IQC_Valor", "clean_val(!IQC!)",
"PYTHON3", code)
```

➤ Análisis espacial de restricciones y cálculo de afectación.

Esta etapa constituye el núcleo del geoprocesamiento. Primero, se calcula el área geométrica total de cada título. Luego, mediante una función iterativa personalizada, el script ejecuta intersecciones topológicas entre los títulos y las capas de restricción (Zonas Excluibles, Zonas Restringidas y Componente Social). El algoritmo suma las áreas fragmentadas resultantes de cada intersección y calcula el porcentaje de afectación mediante la fórmula: $(\text{Área Intersectada} / \text{Área Total del Título}) \times 100$. Los resultados se almacenan en los campos correspondientes (PCT_ZE_A, PCT_ZR_A, PCT_COM).

Ejemplo Código Python:**def paso2_traslapes(self):**

```
# Itera sobre las capas de exclusión, restricción y social.
for fc, tipo in [(self.ze_restr, "ZE"), (self.zr_restr, "ZR"), (self.com_restr, "COM")]:
    # DISSOLVE: Une todas las restricciones para que no se cuente dos veces el mismo sitio.
    out_d = os.path.join(self.tmp, f"D_{tipo}")
    arcpy.management.Dissolve(fc, out_d)
    restr_list.append(out_d)

# INTERSECT: Corta los títulos con las zonas de restricción.
int_fc = os.path.join(self.tmp, "Int_Restr")
arcpy.analysis.PairwiseIntersect([self.maestra, merge_r], int_fc)

# STATISTICS: Suma todas las áreas cortadas por cada ID único de título.
arcpy.analysis.Statistics(int_fc, stats, [{"AREA_INT", "SUM"}], ["ID_Unico", "R_TIPO"])

# UPDATE CURSOR: Calcula el porcentaje de afectación (Área cortada / Área total * 100).
with arcpy.da.UpdateCursor(self.maestra, ["ID_Unico", "AREA_HA", "PCT_ZE_A", ...]) as ucur:
    for row in ucur:
        row[2] = (acc[idu].get("ZE", 0.0) / a_tot * 100) # Porcentaje ZE.
        ucur.updateRow(row)
```

➤ Estandarización y cálculo de índices multicriterio

Con los porcentajes de afectación calculados, se aplica un proceso de estandarización utilizando funciones lógicas condicionales que transforman los valores continuos (0-100%) en factores de aptitud discretos (0, 0.5, 1) según los umbrales de tolerancia definidos. Posteriormente, se implementa mediante álgebra de campos la ecuación ponderada del Índice Ambiental-Social (IAS) basada en los pesos del método AHP, y se calcula el Índice de Aptitud Global (IAG) integrando el componente técnico y el ambiental-social. Cada índice es clasificado automáticamente en categorías de aptitud (Alta, Media, Baja).

Ejemplo Código Python:**def paso3_indices(self):**

```
# IAS: 60% Exclusiones + 20% Restricciones + 20% Social.
```

```
arcpy.management.CalculateField(self.maestra, "IAS_Valor", "0.6*!ZE_A_STD! +  
0.2*!ZR_A_STD! + 0.2*!COM_STD!", "PYTHON3")
```

```
# IAG (Puntaje Final): 40% Técnico + 60% Socio-Ambiental.
```

```
arcpy.management.CalculateField(self.maestra, "IAG_Valor", "0.4*!IQC_Valor! +  
0.6*!IAS_Valor!", "PYTHON3")
```

def paso4_limpieza_y_salida(self):

```
# Exporta solo los resultados finales a la GDB limpia.
```

```
for nombre, campo in finales:
```

```
    arcpy.management.CopyFeatures(self.maestra, out_path)
```

```
# BORRADO AUTOMÁTICO: Elimina la capa maestra y temporales para que tu GDB no pese  
GB innecesarios.
```

```
arcpy.management.Delete(self.maestra)
```

Este bloque escala el análisis de "predio" a "vereda" de forma automática usando Pandas.

def generar_estadisticas_veredas():

```
# 1. Spatial Join: Identifica qué títulos caen en qué vereda.
```

```
arcpy.analysis.SpatialJoin(VEREDAS_FC, mapa_path, temp_sj, "JOIN_ONE_TO_MANY")
```

```
# 2. Lógica Pandas: Si hay al menos 1 título 'Alta', la vereda es Potencial Alto.
```

def definir_apitud(group):

```
    if 'Alta' in group.tolist(): return 'Aptitud Alta'
```

```
    return 'Aptitud Baja'
```

```
# 3. JoinField: Pega los resultados estadísticos de nuevo a la capa geográfica de veredas.
```

```
arcpy.management.JoinField(out_fc, F_VER, temp_csv, F_VER, ["Estado_Territorio]).
```

➤ **Generación de salidas cartográficas y simbolización.**

En la fase final, el script genera tres capas temáticas independientes (Mapa_IQC, Mapa_IAS, Mapa_IAG). A cada una se le aplica la herramienta de reparación geométrica (RepairGeometry) para corregir posibles errores topológicos derivados de los cortes espaciales. Finalmente, el código accede al proyecto actual de ArcGIS Pro (.aprx), carga las capas resultantes y modifica sus propiedades de simbología mediante la clase UniqueValueRenderer, asignando automáticamente una paleta de colores tipo semáforo (Verde, Amarillo, Rojo) acorde a la clasificación de aptitud de cada título, dejando los productos listos para su exportación y análisis.

6. Resultados

Con base en la información desarrollada en la metodología y en los procesos de análisis multicriterio aplicados, se generaron los mapas temáticos y mapas de aptitud utilizando la herramienta **Notebook** con código Python y el Método de distancia inversa ponderada (**IDW**) de ArcGIS Pro, que permitieron categorizar el carbón del departamento de Boyacá, considerando las áreas tituladas y la integración de las tres variables analizadas: técnicas, ambientales y sociales.

Los resultados obtenidos a partir de estas variables permitieron realizar un análisis integral de la distribución del carbón según su tipo, inicialmente a escala nacional, posteriormente a nivel departamental (Boyacá) y finalmente a nivel municipal y/o veredal. Este análisis se realizó teniendo en cuenta tanto el área titulada como las zonas de restricción y exclusión ambiental/social, lo que permitió una interpretación espacial más completa y coherente del contexto minero del territorio de Boyacá.

➤ Distribución de carbón “A nivel Colombia”:

De acuerdo con la información obtenida del Visor Geográfico de la Agencia Nacional de Minería (ANM), con corte a diciembre de 2025, se obtuvieron **6.617 títulos** mineros a nivel nacional, de los cuales **2.783** corresponden a títulos con minerales de carbón, lo que representa aproximadamente el **42,1 %** del área titulada en el país.

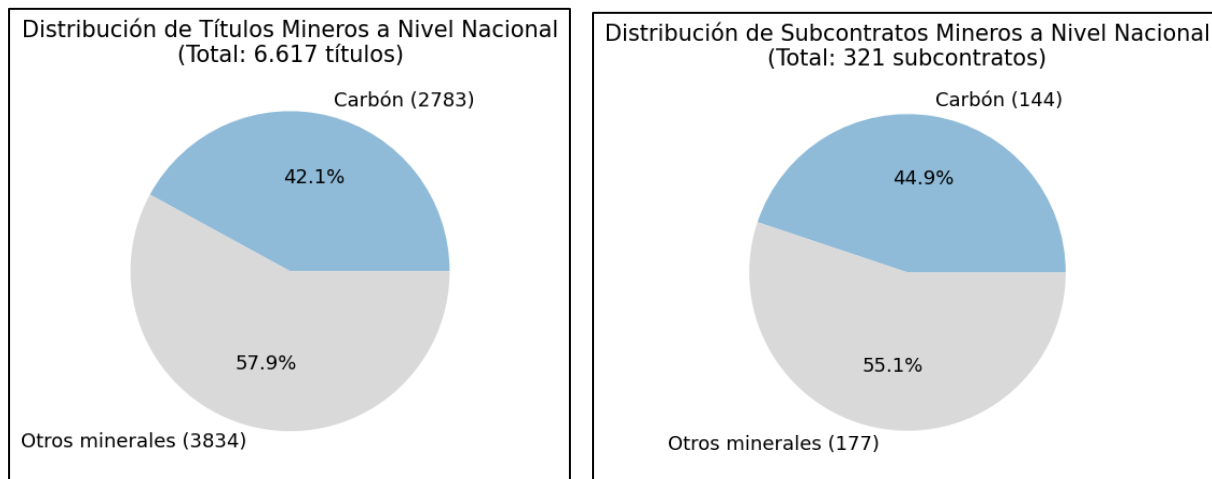
Desde el punto de vista espacial, estos títulos asociados al carbón se concentran principalmente en los departamentos de Cesar, La Guajira y Córdoba, los cuales han sido históricamente los principales centros de la minería carbonífera en Colombia. No obstante, departamentos como Antioquia, **Boyacá** y Valle del Cauca también presentan una participación relevante en la distribución nacional de este mineral, reflejando la diversidad geográfica y productiva de la actividad carbonífera en el territorio nacional.

En relación con los subcontratos de formalización minera, se identificaron 321 registros a nivel nacional, de los cuales **144** corresponden a actividades asociadas a la explotación de carbón, lo que equivale al **44,9 %** del área total destinada a este tipo de subcontratos en el territorio nacional.

Desde el punto de vista espacial, la distribución de los subcontratos de formalización de carbón se concentra principalmente en los departamentos de Cundinamarca y **Boyacá**, lo que evidencia la relevancia de estos territorios en los procesos de formalización minera asociados a este mineral.

Figura 3.

Distribución estadística mineral de títulos y subcontratos de formalización a nivel Nacional.



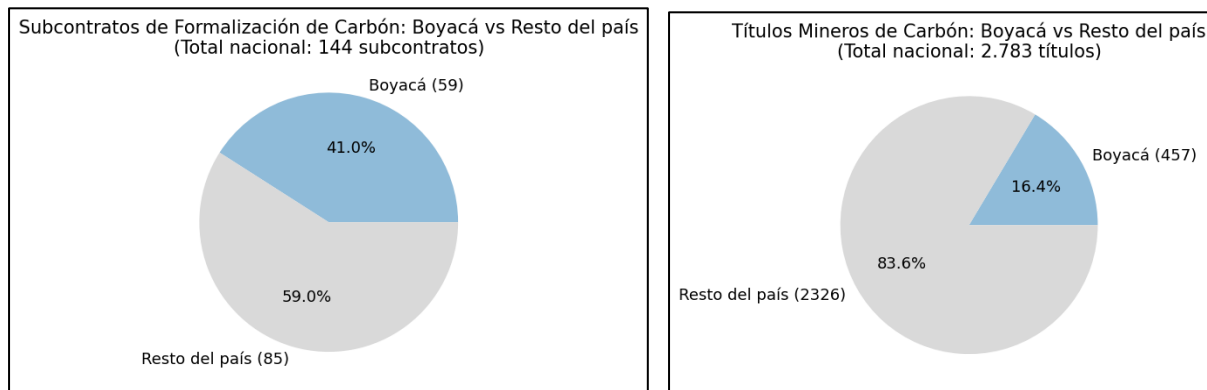
➤ **Distribución de carbón “A nivel departamental – Boyacá”**

De acuerdo con la información obtenida del Visor Geográfico de la Agencia Nacional de Minería (ANM), con corte a diciembre de 2025, del total de **2.783 títulos** mineros asociados al carbón a nivel nacional, el departamento de Boyacá concentró **457 títulos**, además de **59 subcontratos** de formalización minera relacionados con este mineral.

Considerando que los títulos de carbón representan el **42,1 %** del área total titulada en Colombia, los **457 títulos** localizados en Boyacá equivalen aproximadamente al **6,9 %** del total nacional, lo que evidencia que, Boyacá comparado con otros departamentos como el Cesar o La guajira, tiene menor representatividad dentro de la actividad carbonífera del país, sin embargo, es significativa si se mira en términos de distribución departamental.

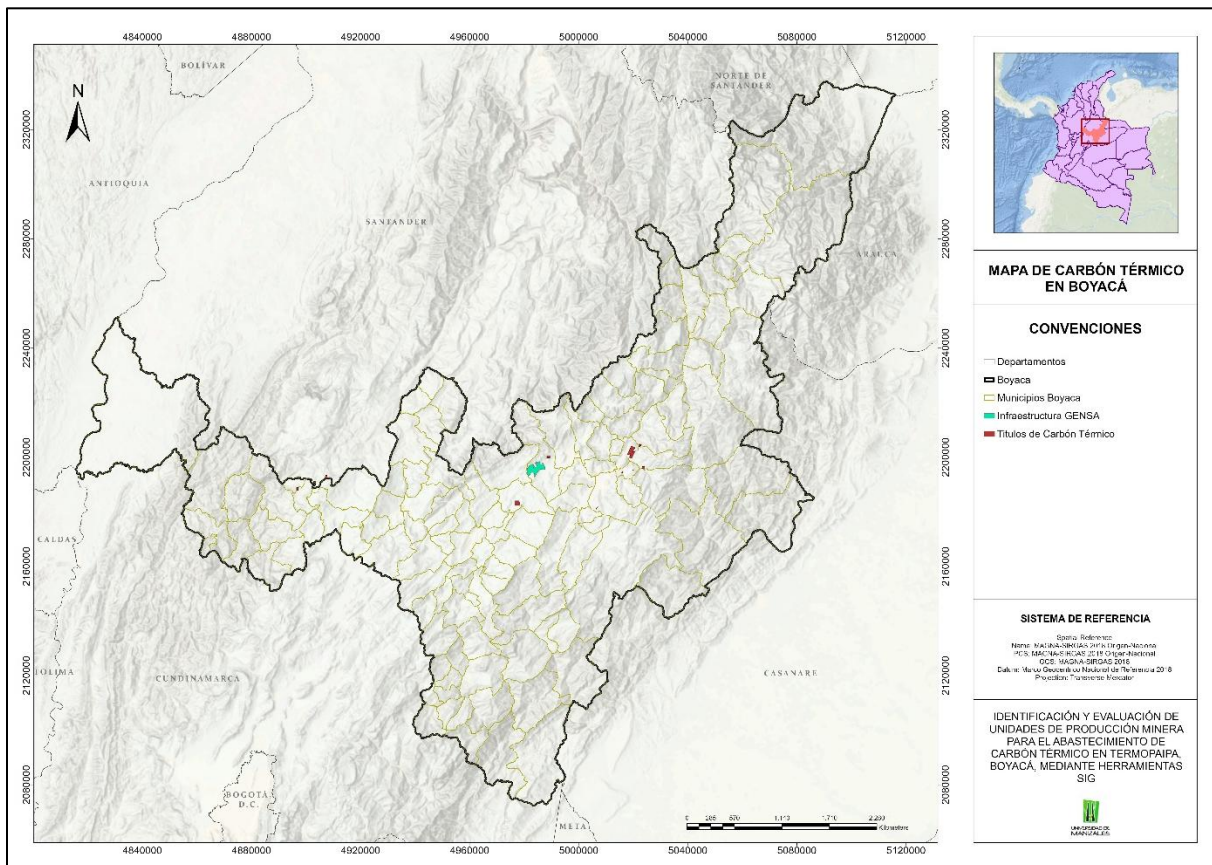
Figura 4.

Distribución estadística mineral de títulos y subcontratos de formalización a nivel Boyacá

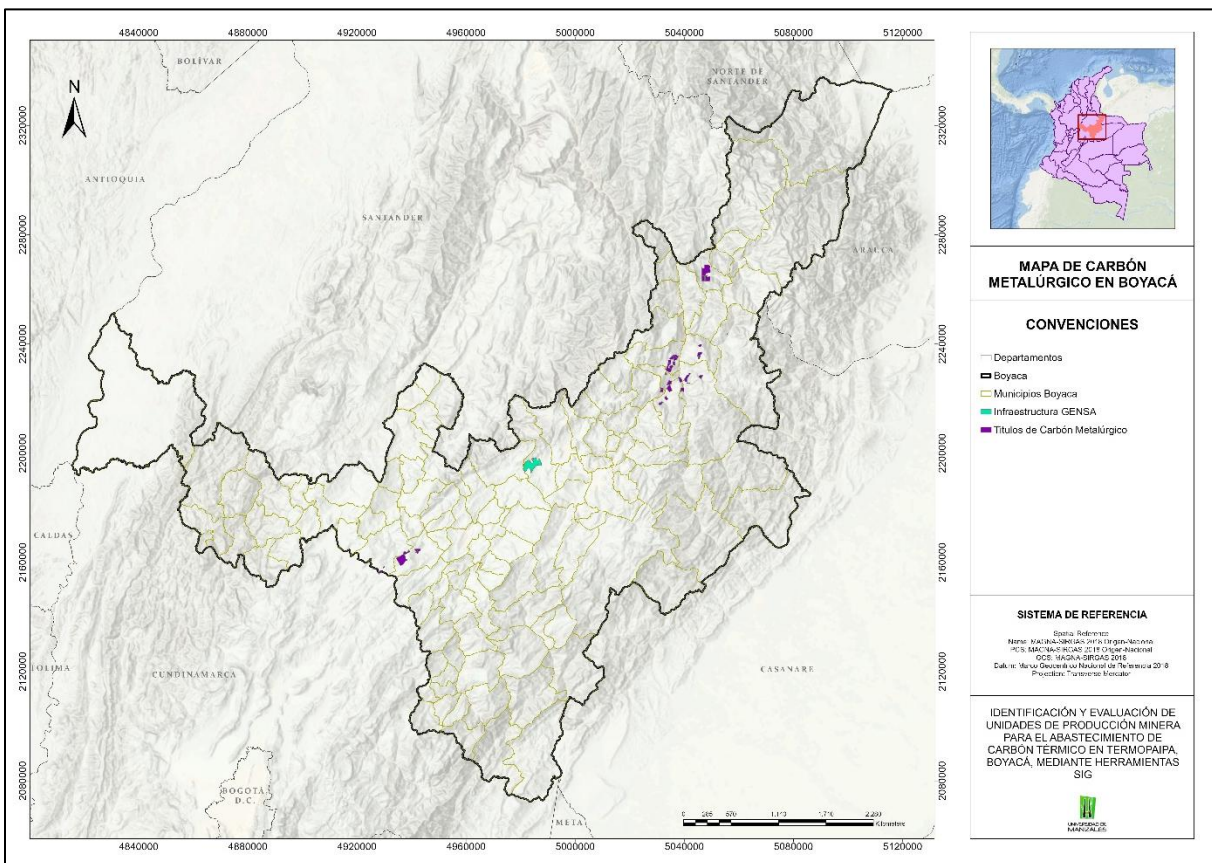


Desde el punto de vista espacial, la distribución del carbón dentro del departamento de Boyacá según su tipo se distribuyó de la siguiente manera:

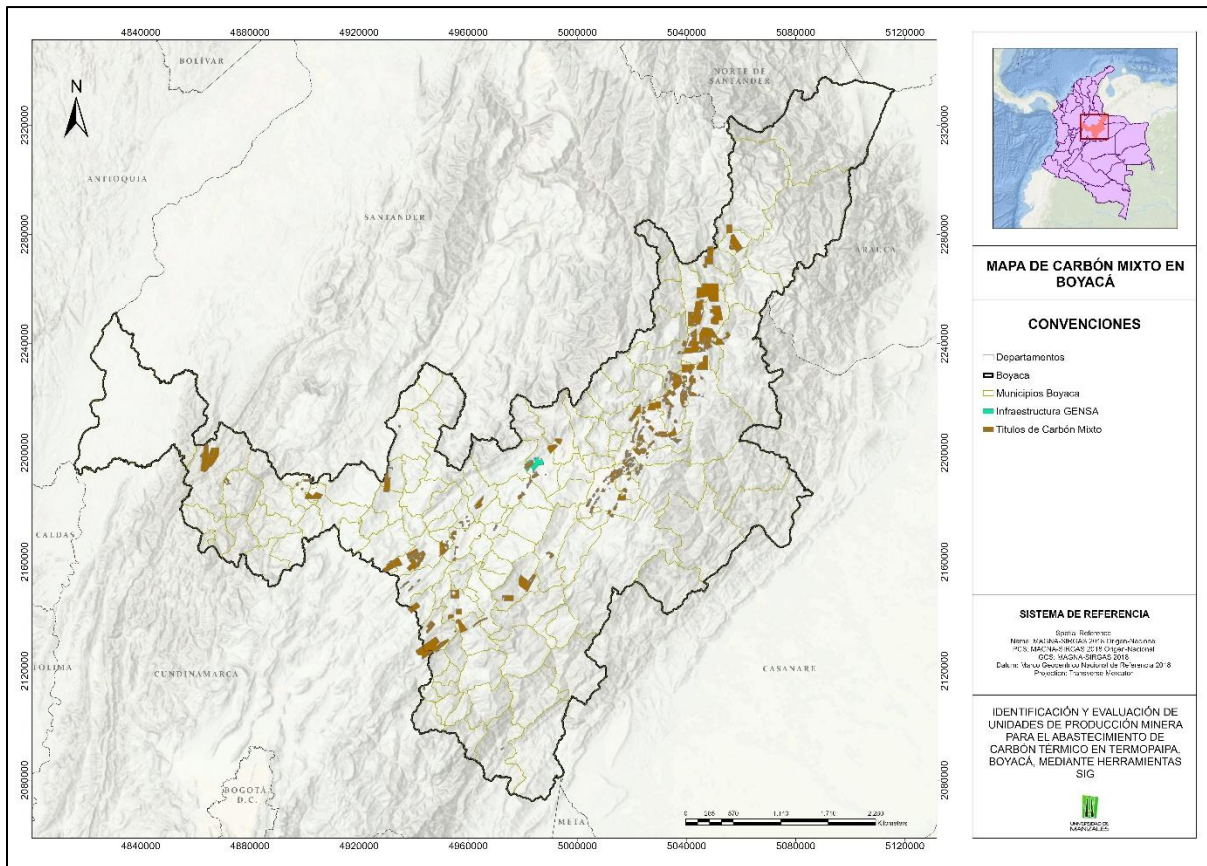
El carbón térmico se concentró principalmente en la zona centro del departamento, abarcando municipios como Paipa, Corrales, Tópaga, Gámeza, Tuta, Sogamoso, Tununguá y Briceño, entre otros. En esta región se identifican un total de 11 títulos mineros correspondientes a la categoría de carbón térmico, los cuales presentan una mayor concentración en los municipios de Paipa, Corrales y Tópaga. De estos últimos, Corrales es el municipio que registra la mayor extensión de área titulada. Esta distribución se analiza con mayor detalle en la Figura 16, donde se evidencia la disposición espacial de los títulos a nivel de veredas que hacen parte de los municipios anteriormente mencionados.

Figura 5.*Mapa de distribución de los títulos de **carbón Térmico**, Boyacá*

En cuanto al carbón metalúrgico, se identificó una concentración predominante en la zona noreste del departamento, particularmente en los municipios de San Mateo, Jericó, Sativanorte, Sativasur, Socha y Socotá. Los municipios de Sativanorte, con siete (7) títulos, y Socha, con cinco (5) títulos, fueron los que presentaron la mayor cantidad de títulos mineros en esta categoría. Por otra parte, San Mateo fue el municipio con una mayor extensión de área titulada a pesar de que únicamente se presentaron 3 títulos. Adicionalmente, se registró una menor concentración de títulos hacia la zona oeste del departamento, principalmente en los municipios de Samacá y Ráquira. En total, se identificaron treinta y cuatro (34) títulos mineros correspondientes a carbón metalúrgico. Esta distribución se analizó con mayor detalle en la Figura 17, donde se evidenció la disposición espacial de los títulos a nivel de veredas dentro de los municipios anteriormente mencionados.

Figura 6.*Mapa de distribución de los títulos de **carbón Metalúrgico**, Boyacá*

En relación con el carbón mixto, se registró un mayor número de títulos en comparación con las dos categorías anteriores, con un total de trescientos sesenta y siete (367) títulos mineros dentro de esta categoría. Estos títulos se distribuyeron de manera más segmentada en diversas zonas del departamento, manteniendo una tendencia hacia los municipios del noreste y la zona centro-occidente, lo cual delineó una franja con dirección predominante noreste (Figura 7). Dentro de esta franja, los municipios que concentraron el mayor número de títulos fueron Socotá (28 títulos), Socha (28 títulos), Tasco (34 títulos), Tópaga (40 títulos), Mongua (20 títulos) y Sogamoso (32 títulos).

Figura 7.*Mapa de distribución de los títulos de **carbón Mixto**, Boyacá*

Lo anterior evidencia que, si bien el carbón térmico se presenta en una menor cantidad de títulos, estos muestran una mayor proximidad espacial con respecto a la ubicación de la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa), lo cual constituye una ventaja estratégica en términos logísticos y de inmediatez en el abastecimiento de la central.

Adicionalmente, se observa que el carbón mixto, junto con el carbón térmico; minerales de interés para la compañía GENSA, se encuentra representado en una mayor proporción de títulos en comparación con el carbón metalúrgico, lo que refuerza su relevancia dentro del análisis de disponibilidad y cercanía para el suministro energético.

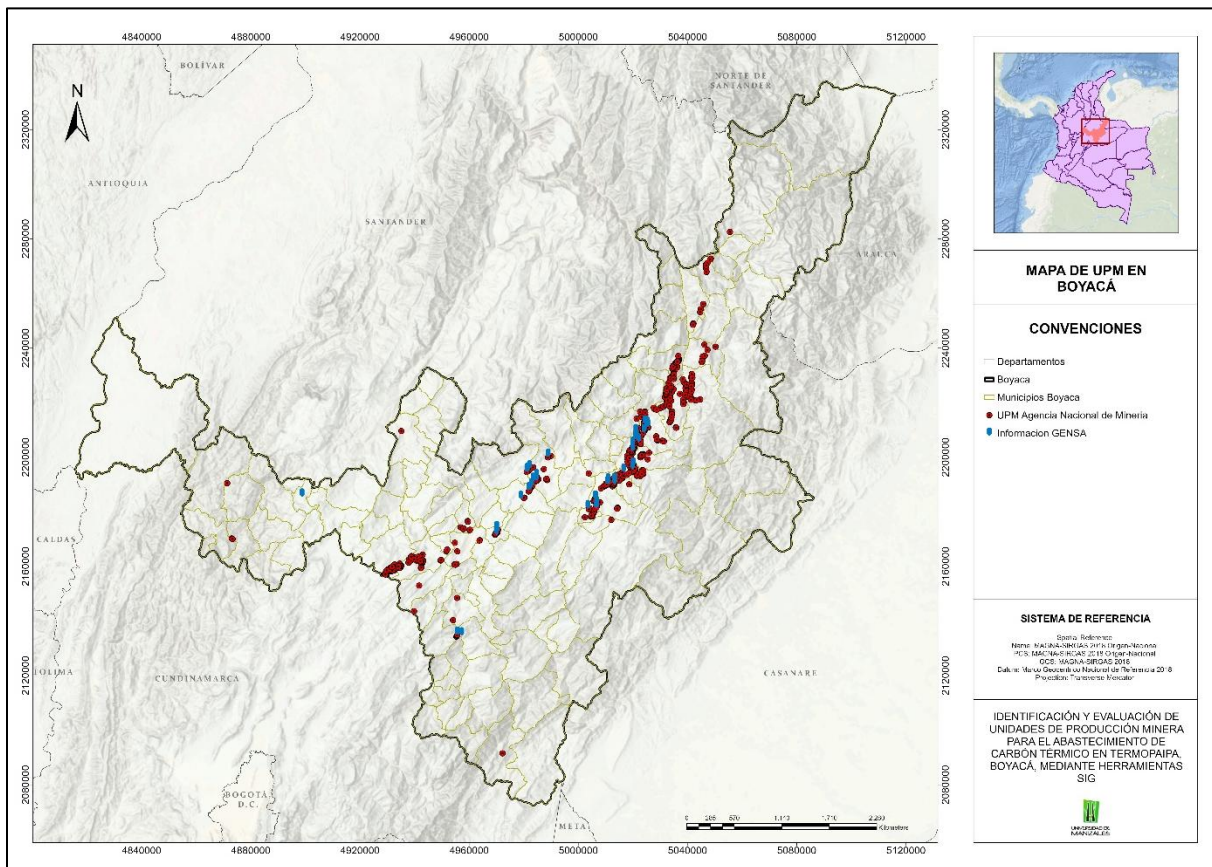
Lo anterior permitió dar respuesta a varias de las preguntas claves formuladas dentro de la metodología, las cuales resultan fundamentales para la Central Termopaipa en el proceso de toma

de decisiones estratégicas relacionadas con el abastecimiento y la planificación minera con base en la distribución espacial del tipo de carbón.

➤ **Variables Técnicas:**

En relación con las variables técnicas, se analizaron 45 muestreos de carbón obtenidos por GENSA en contrataciones previas (Figura 8; puntos en azul). Aunque el número de registros es limitado, el análisis de esta información permitió identificar patrones relevantes en el comportamiento de dichas variables.

Es importante tener en cuenta que, en los mapas obtenidos de poder calorífico, humedad, contenido de cenizas y material volátil, la distribución visual de los datos presenta zonas amplias representadas por rectángulos de color homogéneo que cubren una parte significativa del departamento. Esta situación se debe a la baja densidad de datos disponibles, lo cual, al momento de realizar la interpolación y posterior categorización, genera áreas extensas clasificadas dentro de una misma categoría, produciendo una percepción de homogeneidad espacial. Esta limitación podría mitigarse mediante el incremento en la densidad de datos durante la etapa de evaluación, aspecto que se recomienda considerar en futuras aplicaciones de la metodología.

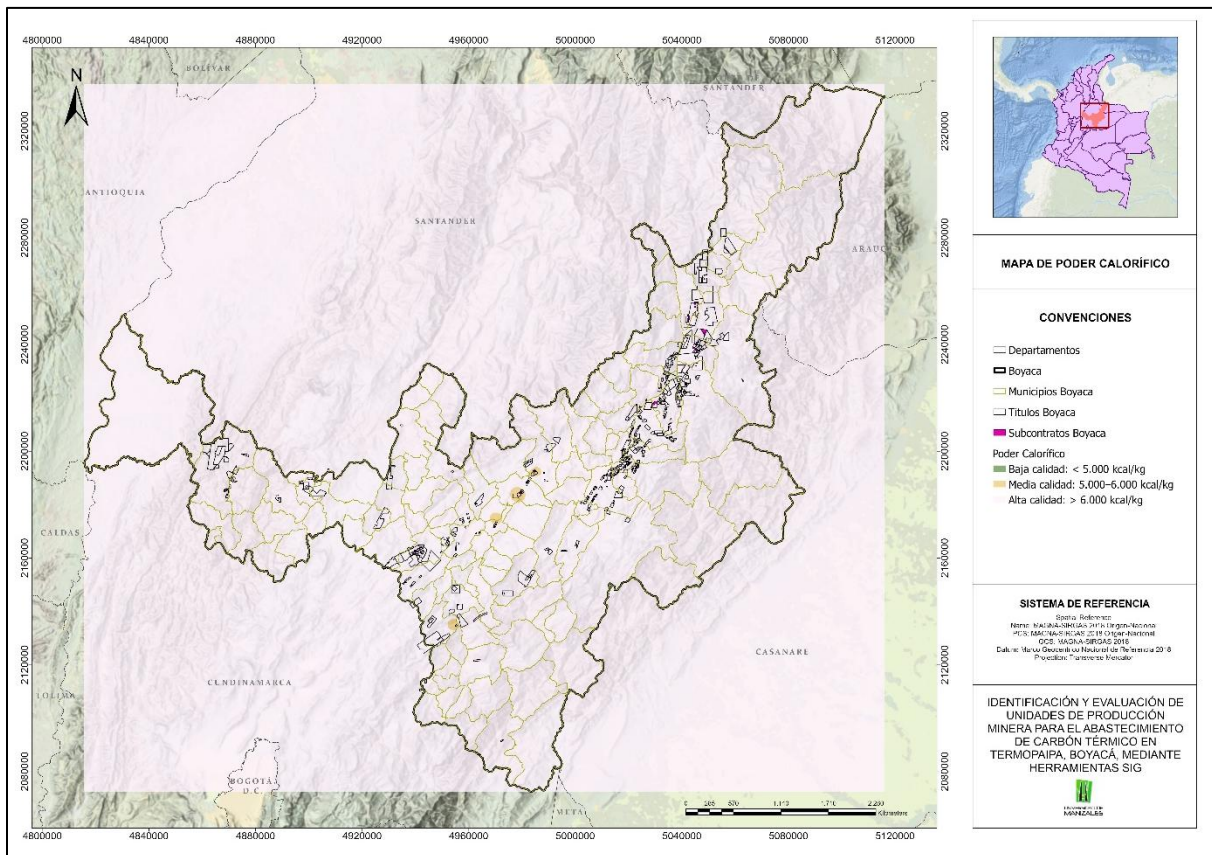
Figura 8.*Mapa de localización de la Unidades de producción Minera (UPM); Boyacá*

Dentro del comportamiento de estas variables, en particular, el **poder calorífico** tuvo una clasificación espacial dentro de las categorías de alta calidad (> 6.000 kcal/kg) y media calidad ($5.000\text{--}6.000$ kcal/kg), siendo la de alta la de mayor representatividad a lo largo del territorio analizado (Figura 9). Este comportamiento de calidad alta se representa en color rosado con una representación visual homogénea, producto de la baja densidad de los muestreos disponibles, para el caso de la categoría de media calidad se observa una mejor sectorización de la información, por que en esos puntos se tenían mayor concentración de datos. El comportamiento de calidad presentado en el siguiente mapa sugiere una tendencia favorable en cuanto al potencial calorífico de los títulos de carbón térmico y/o mixtos presentes en el departamento, lo que indica un alto contenido energético del mineral y, por ende, una mayor eficiencia para su aprovechamiento en la generación eléctrica. No obstante, esta tendencia podría confirmarse y fortalecerse mediante una mayor densidad de muestreo en futuras evaluaciones que permitan sectorizar con mayor detalle

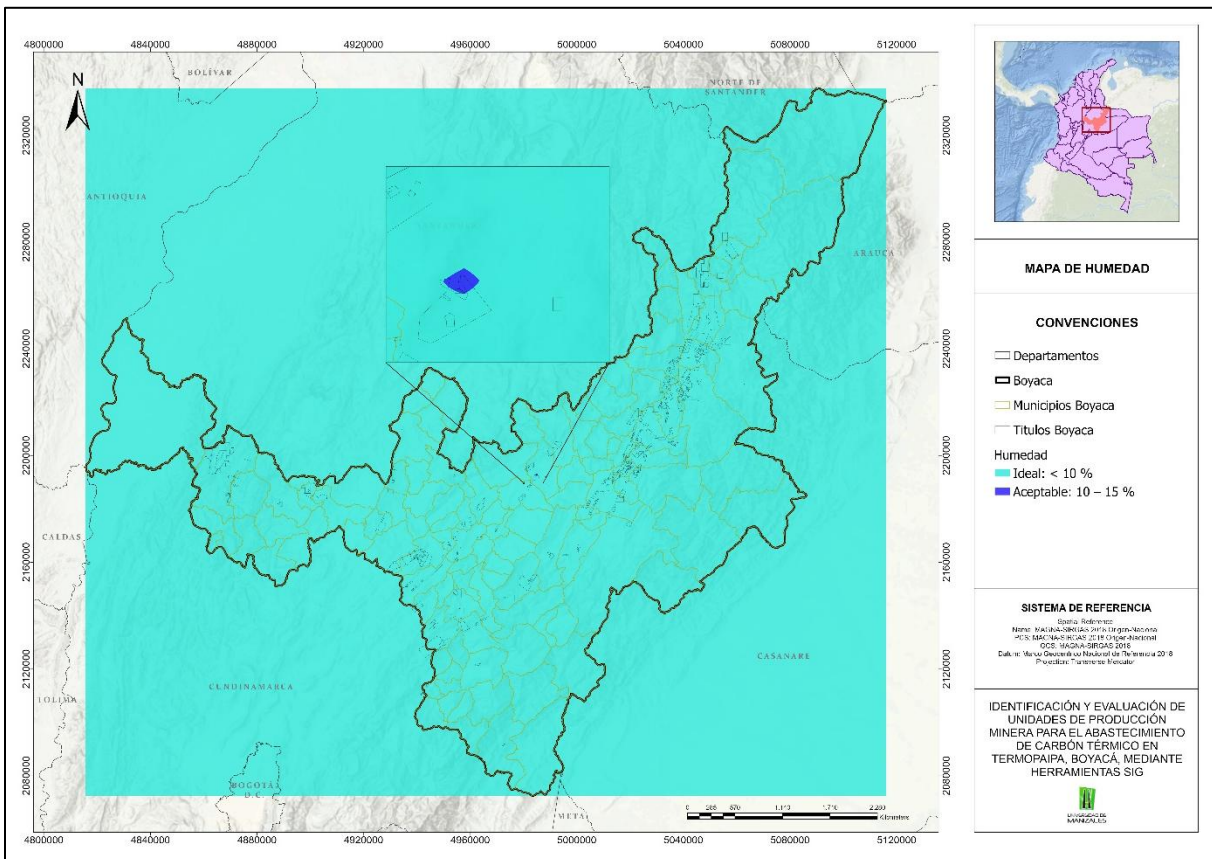
esas zonas de calidad alta. El siguiente mapa fue desarrollado utilizando la herramienta “Notebook” con código Python, automatizando las salidas gráficas.

Figura 9.

Mapa de poder calorífico; Boyacá

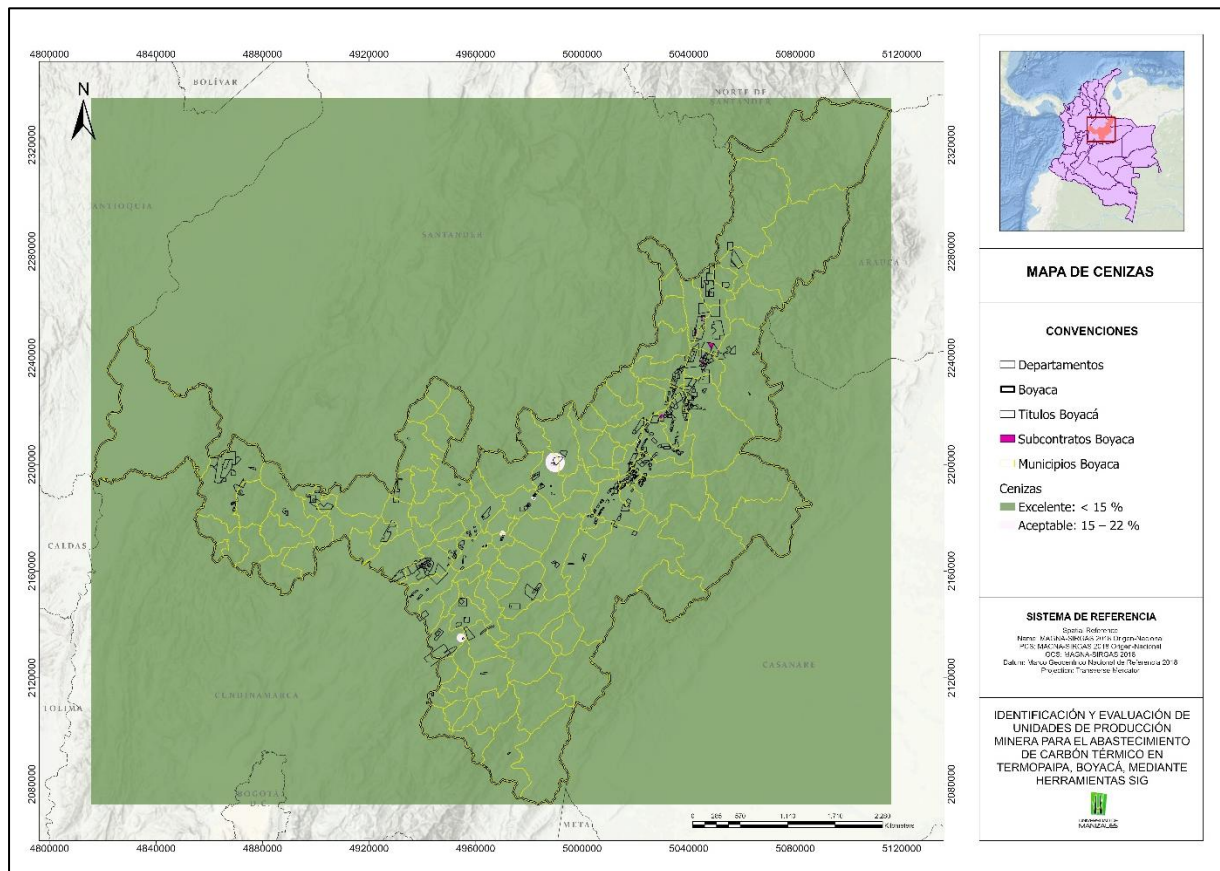


En relación con la **variable de humedad**, los muestreos analizados presentaron valores que se ubican dentro de las categorías ideal y aceptable, siendo la **categoría ideal** (< 10 %) la de mayor representatividad en el territorio evaluado (Figura 10). Este resultado muestra una correlación favorable con la variable de poder calorífico, dado que un bajo contenido de humedad permite un mejor aprovechamiento energético del carbón durante el proceso de generación eléctrica, al reducir la energía requerida para la evaporación del agua contenida en el mineral. Al igual que el mapa anterior, esta tendencia podría confirmarse y fortalecerse con una mayor densidad de muestreo en futuras evaluaciones que permitan sectorizar con mayor detalle esas zonas categorizadas como ideales. El siguiente mapa también, fue desarrollado utilizando la herramienta “Notebook” con código Python, automatizando las salidas gráficas.

Figura 10.*Mapa de porcentaje de humedad; Boyacá*

Con respecto a la **variable de contenido de cenizas**, los muestreos analizados presentaron valores que se ubican dentro de las categorías excelente y aceptable, siendo la categoría **excelente** (< 15 %) la de mayor representatividad en el territorio evaluado (Figura 11). Este resultado indica que, en términos generales, el carbón analizado cumple con los rangos de calidad establecidos por la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa), cuyo límite máximo permitido es del 22 % de cenizas. En consecuencia, se infiere que los niveles de cenizas presentes no generarían afectaciones significativas en la operación de las calderas, favoreciendo un desempeño adecuado del proceso de generación eléctrica. Dicha tendencia, también podría fortalecerse con una mayor densidad de muestreos en futuras evaluaciones que permitan sectorizar con mayor detalle esas zonas “Excelentes”. El siguiente mapa también, fue desarrollado utilizando la herramienta “Notebook” con código Python, automatizando las salidas gráficas.

Figura 11.
Mapa de porcentaje de cenizas; Boyacá.



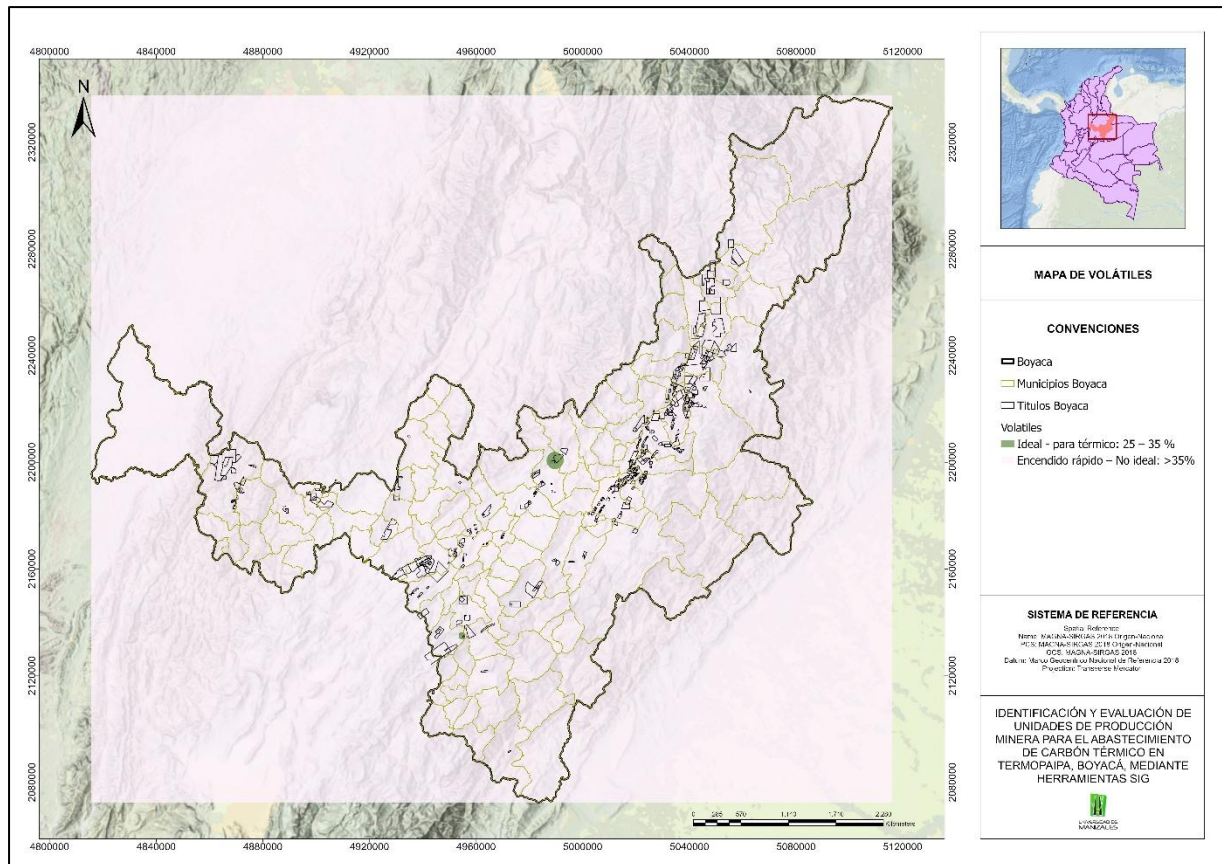
En relación con la **variable de materias volátiles**, se observa que la mayor parte del territorio evaluado se clasifica dentro de la categoría **no ideal** ($> 35 \%$), lo que indica que el carbón presenta un encendido rápido y una alta capacidad de inflamabilidad (Figura 12). Si bien estas características pueden favorecer la facilidad de ignición, en el contexto operativo de la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa), los valores óptimos de materias volátiles se sitúan idealmente en el rango de 25–35 %, intervalo en el cual el carbón presenta un comportamiento de combustión más controlado y estable.

Valores por encima de este rango pueden generar una combustión excesivamente rápida, mientras que valores muy bajos podrían ocasionar dificultades en el encendido, lo que resalta la importancia de este parámetro en la evaluación integral de la calidad del carbón para fines de generación eléctrica.

Dicha tendencia de encendido rápido también podría fortalecerse con una mayor densidad de muestreos en futuras evaluaciones. El siguiente al igual que los anteriores, fue desarrollado utilizando la herramienta “Notebook” con código Python, automatizando las salidas gráficas.

Figura 12.

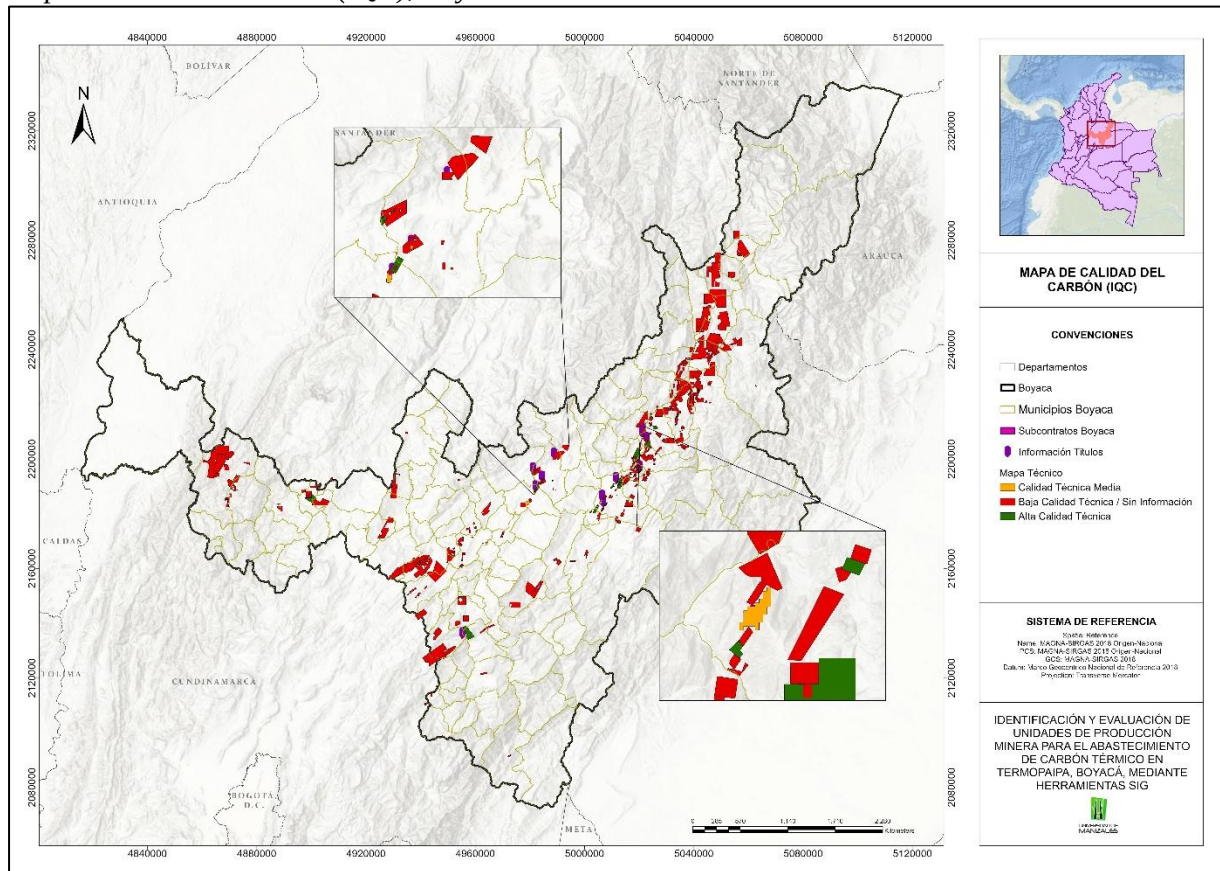
Mapa de Materias Volátiles; Boyacá.



Con base en los análisis realizados previamente sobre el comportamiento individual de las variables técnicas, se desarrolló un análisis integral de la calidad del carbón térmico mediante la aplicación del **Índice de Calidad del Carbón (IQC)**. Considerando las 45 muestras evaluadas, se identificó que las zonas con mayor concentración de muestreos, en correspondencia con la información de títulos mineros (Figura 13), presentan una alta proporción de valores asociados a una **calidad técnica alta** (IQC entre 0,75 y 1,0), correspondiente a carbón óptimo para la generación eléctrica. En esta categoría se destacan municipios como Tasco, Corrales, Tópaga, Monguí y Sogamoso.

De manera puntual, se identificaron áreas con **calidad técnica media** (IQC entre 0,50 y 0,74), concentradas principalmente en el municipio de Tuta, así como zonas distribuidas a lo largo del territorio con baja densidad de información (zonas rojas), las cuales reflejan clasificaciones de menor confiabilidad asociadas posiblemente a la escasez de muestreos. No obstante, los resultados globales sugieren que el carbón presente en el departamento presenta una tendencia general hacia una calidad técnica alta, en concordancia con el comportamiento observado en el análisis individual de las variables técnicas evaluadas.

En términos porcentuales, del total de muestras analizadas (45), el 66,7 % se clasificaron dentro de la categoría de calidad alta, el 17,8 % en calidad media y el 15,6 % en calidad baja, lo que refuerza la predominancia de carbones con aptitud favorable para la generación eléctrica en el área de estudio.

Figura 13.*Mapa de calidad de carbón (IQC); Boyacá*

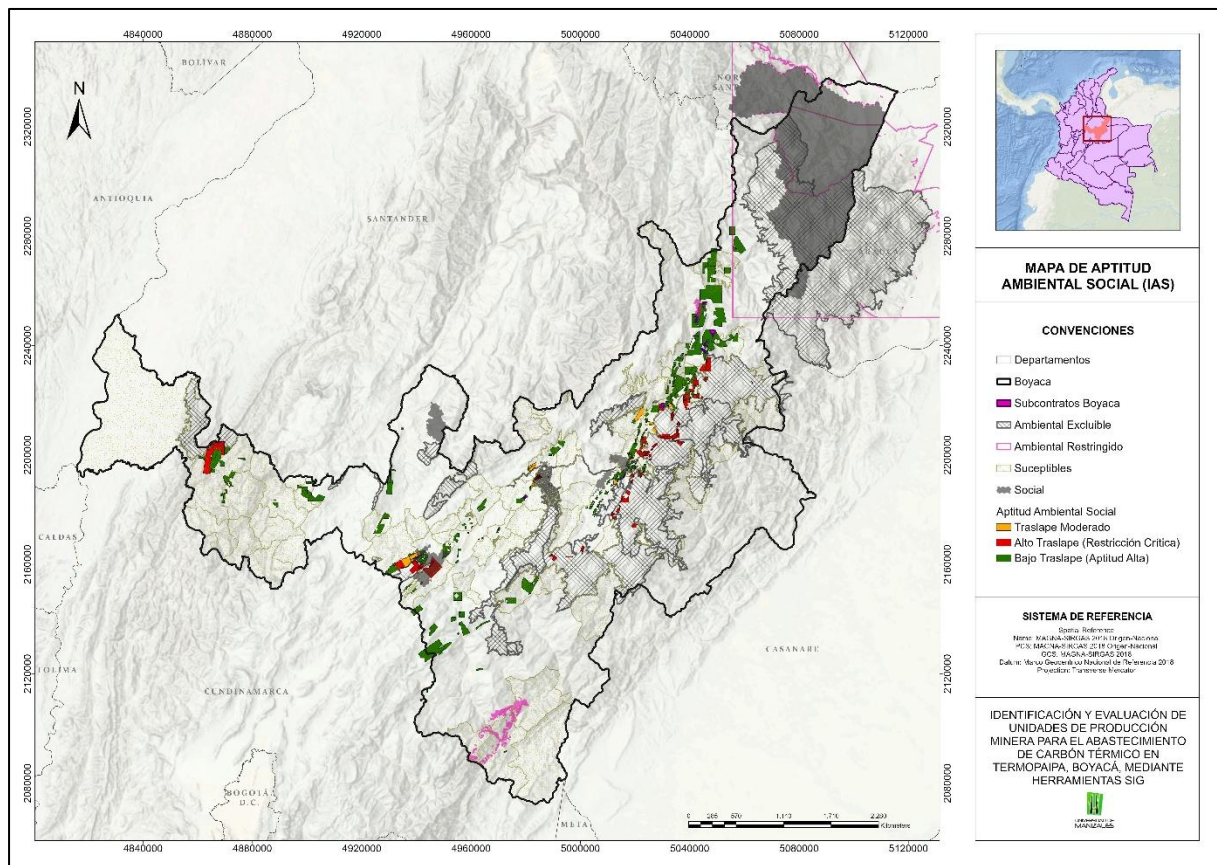
➤ Variables Ambientales -sociales

Asimismo, se obtuvieron los resultados del **mapa de aptitud ambiental-social (IAS)**. Con base en la clasificación IAS, construida a partir de las variables ambientales y sociales, se evidenció que la mayoría de los títulos mineros del departamento se clasificaron con alta aptitud ambiental-social, lo que indica que no presentan traslapes con áreas de restricción ambiental ni social. En segundo lugar, se identificaron títulos con baja aptitud, correspondientes a aquellos que presentaban traslapes totales con zonas ambientales y/o sociales; estos se concentraron principalmente en el sector oriental del departamento. Finalmente, un número menor de títulos presentaron aptitud media; con traslapes parciales, los cuales se distribuyeron de manera puntual en la zona central del departamento (Figura 14). En términos generales, los resultados indicaron que la mayoría de los títulos mineros del departamento poseen una alta aptitud ambiental y social,

al no evidenciar superposiciones con áreas restringidas, lo que representa una ventaja para Termopaipa a la hora de tenerlos como posibles proveedores.

Figura 14.

Mapa de Aptitud ambiental (IAS); Boyacá



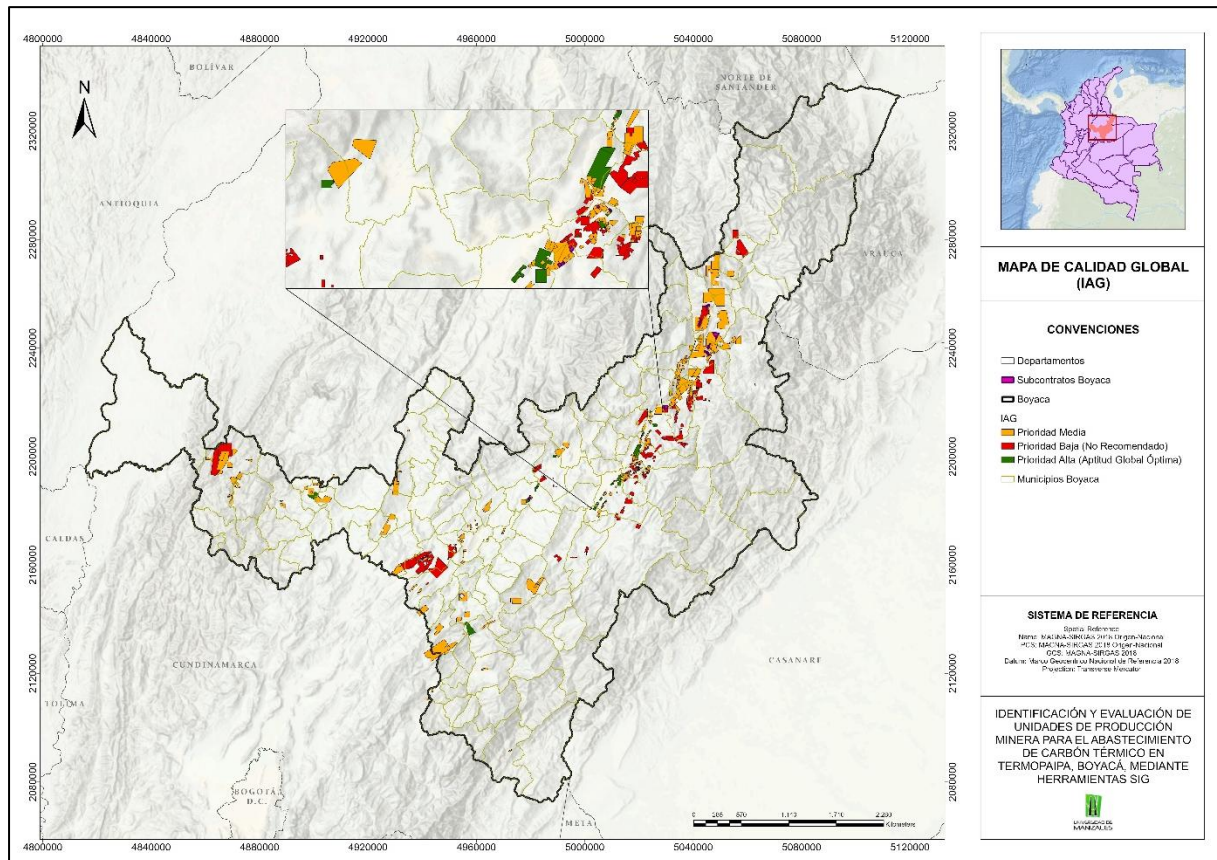
➤ Integración de las variables técnicas, sociales y ambientales (IAG)

Finalmente, el **mapa global de aptitud** (Figura 15), construido a partir de la integración de las variables técnicas, ambientales y sociales, mostró que la mayor parte del departamento de Boyacá se clasificó dentro de la categoría de **prioridad media**, con aproximadamente 292 títulos distribuidos a lo largo del territorio. La categoría de prioridad alta presentó la menor representatividad, con cerca de **32 títulos**, concentrados principalmente en la zona oriental del departamento, mientras que los **133 títulos** restantes se clasificaron como de prioridad baja.

Estos resultados evidenciaron que **292 títulos** podrían ser considerados por la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa) como potenciales proveedores, en la medida en que cumplieron parcialmente con los criterios establecidos por la compañía, posiblemente con restricciones asociadas a una o más de las variables evaluadas. En contraste, los 32 títulos clasificados con prioridad alta mostraron un alto nivel de cumplimiento frente a los requerimientos técnicos, ambientales y sociales definidos. Por su parte, la presencia de títulos con prioridad baja estuvo asociada, en gran medida, a la limitada disponibilidad de información técnica, particularmente a la baja densidad de muestreos.

Figura 15.

Mapa de Aptitud ambiental (IAS); Boyacá



Adicionalmente, se obtuvo el **mapa de aptitud por veredas** (Figura 16), el cual permitió identificar la distribución espacial del potencial de priorización para el carbón térmico a escala local, integrando los criterios técnicos, ambientales y sociales definidos en la metodología. Los

resultados evidenciaron una predominancia de veredas clasificadas con prioridad media (color naranja), las cuales se distribuyeron de manera amplia y continua a lo largo del departamento, conformando corredores territoriales con condiciones parcialmente favorables para el desarrollo de actividades de abastecimiento de carbón hacia la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa).

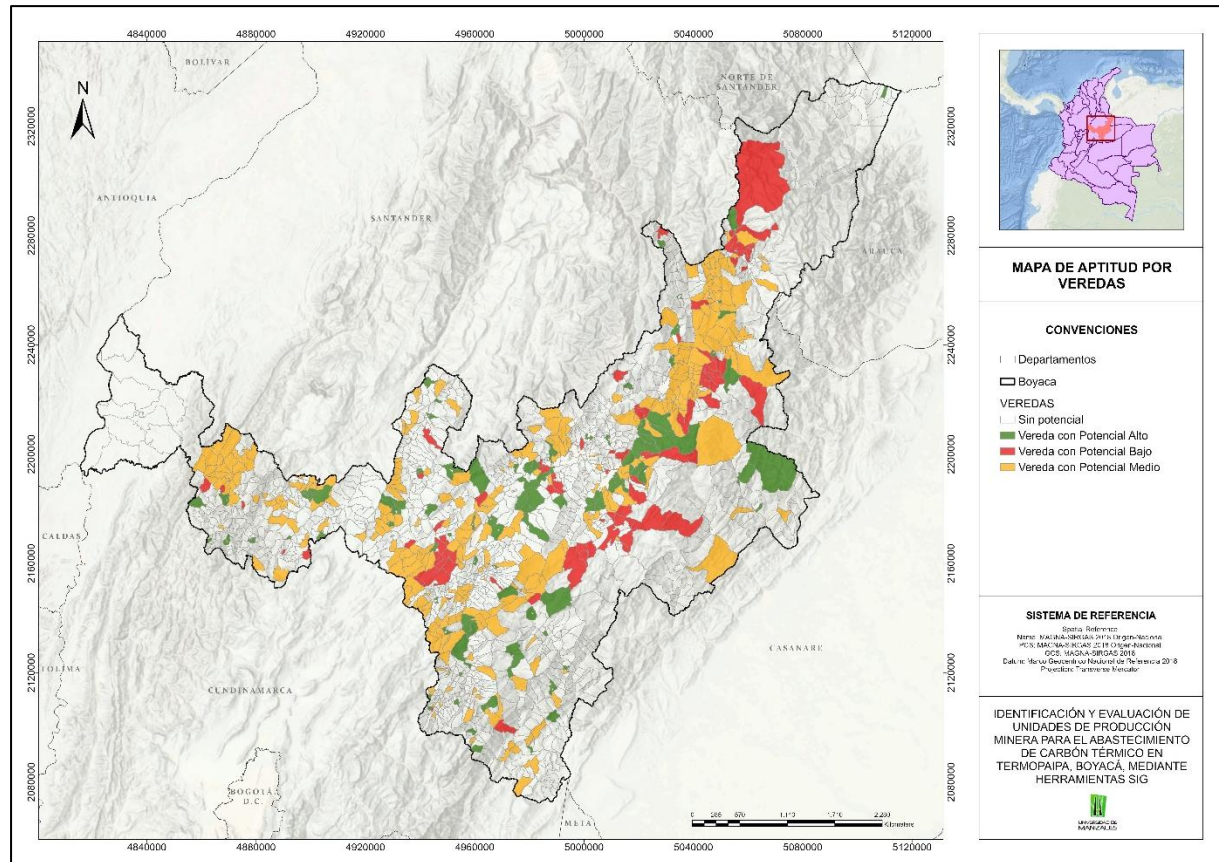
Las veredas con prioridad alta (color verde) se identificaron de forma puntual y discontinua, concentrándose principalmente en sectores específicos del centro y nororiente del departamento (Figura 15), donde se observó una menor superposición con áreas ambientalmente excluibles o restringidas, así como una mejor correspondencia con las variables técnicas evaluadas. Estas áreas representaron los espacios con mayor aptitud integral, al cumplir en mayor medida con los criterios establecidos por la compañía para la selección de posibles proveedores de carbón.

Por el contrario, las veredas clasificadas con prioridad baja (color rojo) se localizaron de manera dispersa en diferentes sectores del territorio (Figura 15), frecuentemente asociadas a restricciones ambientales, condicionantes sociales y, en algunos casos, a una baja densidad de información técnica, lo cual limitó la confiabilidad del análisis y redujo su aptitud dentro del modelo de priorización.

Asimismo, el mapa evidenció la presencia de veredas sin potencial, relacionadas principalmente con áreas ambientalmente excluibles, zonas con restricciones normativas o condicionantes sociales y/o zonas sin muestreos, las cuales fueron descartadas del análisis de priorización, en coherencia con los lineamientos técnicos y ambientales definidos en el estudio (Figura 15).

En conjunto, los resultados mostraron que, si bien el departamento de Boyacá presenta un número reducido de veredas con prioridad alta, existe un amplio conjunto de veredas con **prioridad media** que podrían ser consideradas por Termopaipa como alternativas viables de abastecimiento, sujetas a la implementación de ajustes técnicos, ambientales o sociales específicos. De esta manera, el mapa de aptitud por veredas se consolidó como una herramienta clave para la toma de decisiones, al permitir una priorización territorial detallada y orientar estratégicamente la selección de posibles unidades de producción minera de carbón.

Figura 16.
Mapa de Aptitud mineral por veredas; Boyacá.



7. Discusión

Los resultados obtenidos a partir del Índice de Calidad del Carbón (IQC) evidenciaron que, si bien el departamento de Boyacá concentra una porción relevante de los títulos de carbón a nivel nacional, la calidad técnica del carbón térmico disponible presenta una marcada variabilidad espacial. Aunque el análisis integrado mostró una tendencia general hacia calidades técnicas altas, esta se encuentra condicionada por la distribución y densidad de los muestreos disponibles, lo que pone de manifiesto que la disponibilidad del recurso no siempre se traduce de manera homogénea en un cumplimiento pleno de los rangos ideales requeridos para la generación termoeléctrica.

Este comportamiento es consistente con lo reportado por (Ortega et al., 2025; Romero, 2021), quienes señalan que gran parte de la producción de carbón en Boyacá corresponde a explotaciones de pequeña y mediana escala, caracterizadas por variaciones significativas en la calidad del mineral, asociadas tanto a factores geológicos como a prácticas operativas y niveles tecnológicos heterogéneos. En este sentido, los resultados del IQC confirmaron que la evaluación de la calidad del carbón no puede basarse únicamente en la presencia del recurso, sino que requiere un análisis técnico detallado que integre múltiples parámetros de desempeño energético, tal como se abordó en el presente estudio.

Desde el punto de vista metodológico, la decisión de emplear una ponderación directa para el cálculo del IQC, inspirada en los fundamentos del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) pero ajustada a la disponibilidad real de datos, resultó adecuada para el contexto del estudio. Este enfoque coincide con lo propuesto por (Wu et al., 2018), quienes recomiendan el uso de ponderaciones directas cuando se trabaja con un número reducido de criterios cuantitativos homogéneos. La adaptación metodológica permitió obtener un índice robusto, operativo y coherente con las necesidades técnicas de la Central Termoeléctrica de Paipa (Termopaipa), sin comprometer la consistencia del análisis.

En relación con el Índice Ambiental–Social (IAS), los resultados mostraron que la mayoría de los títulos mineros del departamento presentaron una alta aptitud ambiental y social, al no evidenciar traslapes con áreas de exclusión o restricción ambiental ni con componentes sociales sensibles. Este hallazgo contrasta parcialmente con la percepción generalizada de que la minería de carbón en Boyacá se encuentra ampliamente limitada por condicionantes ambientales, y resalta la importancia de realizar análisis espaciales detallados que permitan diferenciar entre áreas

efectivamente restringidas y aquellas que continúan siendo viables desde el punto de vista normativo.

Por el contrario, los títulos clasificados con baja aptitud ambiental–social, concentrados principalmente en el sector oriental del departamento, coincidieron con zonas de superposición con áreas protegidas, reservas ambientales y componentes sociales, lo cual concuerda con los reportes institucionales de la ANM (2024) y la (Gobernación de Boyacá, 2023). Estos resultados refuerzan la necesidad de integrar de manera prioritaria los criterios ambientales y sociales en los procesos de selección de proveedores, tal como lo plantean (Agencia Nacional de Minería, 2022) en el marco de la evaluación multicriterio aplicada a la planificación territorial.

La aplicación formal del método AHP para la ponderación de las variables ambientales y sociales permitió garantizar la consistencia de los juicios emitidos, obteniendo una razón de consistencia (CR) igual a cero, lo que validó la estructura jerárquica planteada. Este resultado respalda la pertinencia del AHP como herramienta para la toma de decisiones complejas en contextos minero–ambientales, en concordancia con estudios previos desarrollados en Colombia (Calderón et al., 2025; Ortiz, 2021).

La integración de las variables técnicas, ambientales y sociales a través del Índice de Aptitud Global (IAG) evidenció que la mayor parte del departamento de Boyacá se clasificó dentro de la categoría de prioridad media, reflejando el efecto combinado de una calidad técnica favorable en algunos sectores y restricciones parciales asociadas a variables ambientales, sociales o a la limitada densidad de información técnica. La identificación de 32 títulos con prioridad alta, concentrados principalmente en sectores específicos del departamento, puso de manifiesto la existencia de espacios con un equilibrio óptimo entre calidad del recurso y viabilidad ambiental–social, los cuales representan las alternativas más sólidas para el abastecimiento de carbón hacia Termopaipa.

Este resultado es coherente con el enfoque de resiliencia de la cadena de suministro propuesto por (Christopher & Peck, 2004), el cual enfatiza la importancia de diversificar proveedores y priorizar aquellos que presenten menores riesgos técnicos, ambientales y normativos. En este sentido, el modelo desarrollado no busca maximizar únicamente el número de proveedores potenciales, sino jerarquizarlos estratégicamente en función de su aptitud integral.

A escala local, el mapa de aptitud por veredas complementó el análisis global al permitir una lectura más detallada del territorio. La predominancia de veredas con prioridad media evidenció la

existencia de amplios corredores territoriales con condiciones parcialmente favorables, mientras que las veredas con prioridad alta, identificadas de forma puntual y discontinua, representaron los espacios con mayor potencial estratégico para la compañía. Este nivel de desagregación espacial fortaleció el proceso de toma de decisiones al permitir una priorización territorial fina, alineada con la planificación operativa y logística de Termopaipa.

En comparación con los antecedentes revisados, el presente estudio amplió el alcance de trabajos previos que han aplicado análisis multicriterio en minería con fines predominantemente normativos u orientados al ordenamiento territorial, al incorporar de manera explícita la perspectiva del abastecimiento energético y la toma de decisiones empresariales. De esta forma, el modelo propuesto no solo identificó áreas potenciales, sino que permitió jerarquizar títulos y veredas con base en criterios directamente alineados con los requerimientos operativos de una central termoeléctrica.

Finalmente, entre los principales aportes del estudio se destaca la construcción de una metodología reproducible y parcialmente automatizada, basada en herramientas SIG y análisis multicriterio, que integró información técnica, ambiental y social proveniente de fuentes oficiales. El uso de Python en ArcGIS Pro permitió optimizar los tiempos de procesamiento, reducir errores manuales y garantizar la trazabilidad del análisis, en concordancia con lo planteado por Esri (2023).

No obstante, el estudio presentó limitaciones asociadas principalmente a la disponibilidad y cobertura de la información técnica, en particular al número limitado de muestras de calidad de carbón suministradas por GENSA. Esta restricción condicionó el alcance del análisis técnico y abre la posibilidad de fortalecer el modelo en futuras investigaciones mediante una mayor densidad de muestreos y la incorporación de nuevos parámetros relevantes, como el contenido de azufre, que permitirían una evaluación aún más integral del potencial del carbón para la generación termoeléctrica.

8. Conclusiones

Desde el punto de vista técnico, el Índice de Calidad del Carbón (IQC) mostró que la mayoría de los títulos analizados presentan calidades medias, lo que implica que el carbón disponible en Boyacá, aunque aprovechable, no cumple de manera homogénea con los rangos ideales para la generación termoeléctrica, y requiere ajustes operativos o mezclas para su uso eficiente en Termopaipa. Este resultado confirma que la calidad del carbón es un factor crítico que limita la selección de proveedores, incluso en zonas con amplia tradición minera.

En cuanto a las variables ambientales y sociales, el Índice Ambiental–Social (IAS) evidenció que una proporción importante de los títulos del departamento no presenta traslapes con áreas de exclusión o restricción, lo que indica que existe una oferta potencialmente viable desde el punto de vista normativo y socioambiental. No obstante, los títulos clasificados con baja aptitud ambiental–social, concentrados principalmente en el sector oriental del departamento, representan zonas que deben ser descartadas o tratadas con especial precaución en cualquier estrategia de abastecimiento, debido a las limitaciones legales y sociales existentes.

La integración de los componentes técnico, ambiental y social (IAG) en el mapa global de aptitud permitió identificar que la mayoría de los títulos de carbón de Boyacá se clasifican con aptitud media, lo cual refleja que, aunque no están completamente restringidos, presentan una o más limitaciones al momento de considerarlos como proveedores óptimos sin una evaluación adicional. Solo un número muy reducido de títulos alcanzó la categoría de alta aptitud global, localizados en la zona central del departamento, lo que demuestra que las alternativas realmente estratégicas para Termopaipa son escasas y deben ser priorizadas cuidadosamente.

En conjunto, los resultados mostraron que, si bien el departamento de Boyacá presenta un número reducido de veredas con prioridad alta, existe un amplio conjunto de veredas con prioridad media que podrían ser consideradas por Termopaipa como alternativas viables de abastecimiento, sujetas a la implementación de ajustes técnicos, ambientales o sociales específicos.

La construcción de una base de datos geoespacial integrada permitió consolidar, de manera estructurada y coherente, la información técnica, ambiental y social asociada a las unidades de producción minera, títulos mineros y subcontratos de formalización del departamento de Boyacá. La integración de estas variables en un entorno SIG, mediante ArcGIS Pro, facilitó el análisis conjunto del territorio, superando evaluaciones aisladas y permitiendo una visión integral del potencial minero regional.

La implementación de un modelo automatizado mediante código Python en ArcGIS Pro permitió integrar y ejecutar de forma eficiente el análisis multicriterio, así como la generación de mapas temáticos de categorización. Este enfoque posibilitó la evaluación espacial de la aptitud de los títulos, subcontratos y unidades de producción minera en función de los criterios técnicos, ambientales y sociales definidos, representando de manera clara el potencial de cada área como posible proveedor de carbón térmico para la Central Termoeléctrica Termopaipa. De esta manera, se dio cumplimiento a los objetivos planteados en este proyecto, fortaleciendo la toma de decisiones estratégicas basada en información geoespacial.

Se concluye que el principal aporte del estudio para el caso de Termopaipa es haber demostrado que la expansión de la red de proveedores no debe basarse únicamente en la cercanía geográfica o en la disponibilidad del recurso, sino en una evaluación objetiva y espacialmente explícita de múltiples variables críticas. El modelo desarrollado permite reducir la incertidumbre en la selección de nuevos proveedores, focalizar esfuerzos en áreas con mayor potencial real de abastecimiento y apoyar decisiones estratégicas orientadas a garantizar la continuidad operativa de la central frente a escenarios de variabilidad climática, restricciones normativas y fluctuaciones del mercado del carbón.

La metodología desarrollada es replicable y adaptable a otros contextos territoriales, a cualquier tipo de depósito mineral o proyectos energéticos, siempre que se disponga de información geoespacial adecuada. Su estructura modular permite ajustar criterios, pesos y variables según los requerimientos específicos de cada proyecto, lo que la convierte en una herramienta versátil para la planificación minera y energética.

9. Recomendaciones

Fortalecer el enfoque ambiental y de sostenibilidad del análisis técnico del carbón:

Se recomienda que, en futuras investigaciones y aplicaciones de este modelo, se incorpore el contenido de azufre como un parámetro adicional dentro del Índice de Calidad Técnica del Carbón (IQC), dada su alta relevancia ambiental y operativa. La inclusión de esta variable, junto con otros criterios asociados a emisiones, huella ambiental y cumplimiento de estándares de sostenibilidad, permitiría evaluar de manera más integral el impacto ambiental del carbón térmico, en particular las emisiones potenciales de dióxido de azufre (SO_2) durante la combustión. Este enfoque contribuiría a fortalecer la selección de proveedores que cumplan con los límites normativos y los requerimientos ambientales de las plantas termoeléctricas, en coherencia con las políticas de transición energética y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Ampliar la cobertura y calidad de la información técnica de los proveedores:

Se recomienda fortalecer los programas de muestreo y caracterización del carbón térmico en el departamento de Boyacá, con el fin de contar con información más representativa y actualizada sobre parámetros técnicos clave. Una mayor disponibilidad abierta de datos permitiría mejorar la precisión del modelo multicriterio y reducir la incertidumbre en la evaluación de las unidades de producción minera.

Consolidar la metodología como herramienta estratégica para la toma de decisiones:

Se sugiere aplicar el uso del modelo geoespacial multicriterio desarrollado como herramienta de apoyo a la toma de decisiones de Termopaipa, integrándolo en los procesos de planificación del abastecimiento de carbón térmico. Esto permitiría priorizar proveedores de manera objetiva, anticipar riesgos de desabastecimiento y fortalecer la resiliencia de la cadena de suministro.

Integrar criterios logísticos y de accesibilidad al modelo:

Incluir variables asociadas a distancias de transporte, estado de la infraestructura vial y tiempos de desplazamiento podría complementar el análisis, permitiendo evaluar no solo la aptitud técnica, ambiental y social, sino también la viabilidad logística de cada unidad de producción minera.

Replicar y adaptar la metodología en otros contextos territoriales:

La metodología propuesta puede ser replicada en otros departamentos con vocación minera y/o adaptada a diferentes minerales estratégicos, lo que permitiría ampliar su aplicación como una herramienta de apoyo a la planificación minera y energética a nivel nacional. Asimismo, la automatización del proceso mediante el uso de código Python facilita y optimiza la replicabilidad de la metodología en distintos contextos minero-energéticos, garantizando eficiencia, consistencia y trazabilidad en los análisis realizados.

Referencias

- Agencia Nacional de Minería, A. (2022). Colombia Mining Diversity. www.anm.gov.co
- Agencia Nacional de Minería (2015). Resolución 396 de 2015: Por medio de la cual se establecen los criterios para determinar las excepciones a la inscripción en el RUCOM. <https://www.anm.gov.co/content/resoluci%C3%B3n-0396-de-2015>
- Agencia Nacional de Minería. (2024). Catastro minero colombiano. <https://www.anm.gov.co>
- Agencia Nacional de Minería. (2025). Resolución No. 000299 de 2025: Por la cual se determinan los precios base para la liquidación de las regalías de carbón, aplicables al segundo trimestre de 2025. https://www1.upme.gov.co/Normatividad/299_2025.pdf
- Angarita, C., Martínez, H., Barrera, J., Palacio, A., & Díaz, C. (2024). *GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA LA EXPLORACIÓN Y ESTIMACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS DE CARBÓN-GBPC-AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA*.
- ANDEG. (2020). *Resilience of Electricity Generation from Hydropower in Colombia: Coping with the El Niño Event and Associated Drought (2015-2016) Sustainable Development Goals Addressed*. <https://www.minenergia.gov.co/tips-de-ahorro-de-energia>
- Asamblea Departamental de Boyacá. (2017). Ordenanza No. 030 del 29 de diciembre de 2017: Estatuto de rentas del departamento de Boyacá. Gobernación de Boyacá. <http://sedboyaca.gov.co/wp-content/uploads/2018/01/20180131-asambleaboyaca-ordenanza-030-29dic2017.pdf>
- Buitrago, A., & Torres, Y. (2025). *Aplicación de SIG y Técnicas Multicriterio para la selección de sitio de relleno sanitario en Planadas, Tolima*. www.umanizales.edu.co
- Calderón, D. J., Yeison, V., Mesa, L., Yeny, T., Rosero Ordoñez, F., Ahumada, D., Claudia, C., & Bravo, P. M. (2025). *Valoración geoestadística de los factores modificadores mineros, ambientales y sociales en la estimación de los recursos mineros de arenas y gravas en el municipio de Yumbo (Valle del Cauca)*. www.umanizales.edu.co
- Choi, Y., Baek, J., & Park, S. (2020). Review of GIS-based applications for mining: Planning, operation, and environmental management. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app10072266>
- Christopher, M., & Peck, H. (2004). BUILDING THE RESILIENT SUPPLY CHAIN. In *International Journal of Logistics Management* (Vol. 15, Issue 2).
- CHIFEN. (2024). *Boletín de sequía en el Oeste de Sudamérica*.

- Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2020). Resolución CREG 044 de 2020, por la cual se establece la metodología para el cálculo de los costos del carbón como combustible en la generación de energía eléctrica. Diario Oficial No. 51.250. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0044_2020.htm
- Communities and Local Government. (2009). *Multi-criteria analysis: a manual*. www.communities.gov.uk/community,opportunity,prosperity
- Congreso de Colombia. (1994). Ley 141 de 1994: Por la cual se crean el Fondo Nacional de Regalías, la Comisión Nacional de Regalías, se regula el derecho del Estado a percibir regalías por la explotación de recursos naturales no renovables, se establecen las reglas para su liquidación y distribución y se dictan otras disposiciones. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9153>
- Congreso de Colombia. (2001). Ley 685 de 2001: Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 44.545. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9202>
- Congreso de Colombia (2002). Ley 769 de 2002: Por la cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 44.897. http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0769_2002.html
- Congreso de Colombia. (2001). Ley 685 de 2001: Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 44.545. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9202>
- Congreso de Colombia. (1994). Ley 141 de 1994: Por la cual se crean el Fondo Nacional de Regalías, la Comisión Nacional de Regalías, se regula el derecho del Estado a percibir regalías por la explotación de recursos naturales no renovables, se establecen las reglas para su liquidación y distribución y se dictan otras disposiciones. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9153>
- Congreso de la República de Colombia. (1993). Ley 99 de 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. Diario Oficial No. 41.146. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>

- Esri. (2023). ArcGIS Notebooks: Automate and share your geospatial workflows using Python. Environmental Systems Research Institute. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.4/arcpy/get-started/pro-notebooks.htm>
- Esri. (2023). Introduction to ArcPy. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/get-started/what-is-arcpy-.htm>
- Fetters, M. D., & Tajima, C. (2022). Joint Displays of Integrated Data Collection in Mixed Methods Research. *International Journal of Qualitative Methods*, 21. <https://doi.org/10.1177/16094069221104564>
- Fonseca, A. (2021). *Medición de la sostenibilidad ambiental en la gestión de proyectos de minería de carbón subterráneo en la provincia de Sogamoso en el Departamento de Boyacá*.
- Gobernación de Boyacá. (2023). *Informe y análisis de la Gestión y Resultados Gestión y Resultados del Plan de Desarrollo*.
- International Energy Agency. (2023). World Energy Outlook 2023. <https://www.iea.org>
- Jamshidi, M., Ataei, M., Sereshki, F., & Jalali, S. E. (2008). *The Application of AHP Approach to Selection of Optimum Underground Mining Method, Case Study: JAJARM Bauxite Mine (IRAN)*. <http://mining.archives.pl>
- Koull, N., Helimi, S., Mihoub, A., Mokhtari, S., Kherraze, M. E., & Aouissi, H. A. (2022). Developing a Land Suitability Model for Cereals in the Algerian Sahara Using GIS and Hierarchical Multicriteria Analysis. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 49(1), 36–50. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v49i1.2323>
- Ministerio de Minas y Energía. (2025a). *Hoja de Ruta para la Transición Energética Justa de Colombia*.
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). Resolución 40599 de 2015: Por medio de la cual se adopta el

Glosario	Técnico	Minero.
----------	---------	---------

https://www.anm.gov.co/sites/default/files/res_40599_15_glosario_tecnico_minero.pdf
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). Decreto 1886 de 2015: Por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas. Diario Oficial No. 49.570. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=65325>
- Ministerio de Minas y Energía (2015). Decreto 276 de 2015: Por el cual se adoptan medidas relacionadas con el Registro Único de Comercializadores – RUCOM. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=61176>

- Ministerio de Minas y Energía (2022). Decreto 539 de 2022: Por el cual se expide el Reglamento de Higiene y Seguridad en las Labores Mineras a Cielo Abierto. <https://www.anm.gov.co/content/decreto%2Ano%2A539%2Ade%2A2022>
- Ministerio del Trabajo. (2019). Resolución 0312 de 2019: Por la cual se definen los estándares mínimos del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo SG-SST. <https://www.mintrabajo.gov.co/documents/20147/59995826/Resolucion+0312-2019-+Estandares+minimos+del+Sistema+de+la+Seguridad+y+Salud.pdf>
- Natural Resource Governance Institute. (2021). *Minerales estratégicos, cadenas de suministro y gobernanza en los Andes hacia una agenda de incidencia de la sociedad civil*.
- Ortega, P., Molano, R., Sánchez, O., Rodríguez, J., & Londoño, T. (2025). *MINERÍA DE CARBÓN EN COLOMBIA*.
- Ortiz, G. (2021). *Identificación de áreas idóneas para el desarrollo urbano mediante uso de análisis multicriterio AHP y herramientas geoinformáticas*.
- Presidencia de la República de Colombia. (2014). Decreto 2041 de 2014, por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales. Diario Oficial No. 49.305. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=60201>
- Presidencia de la República de Colombia. (2015). Decreto 1076 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diario Oficial No. 49.523. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Ramírez, J., Ramírez, N., Martínez, C., Tellez, J., & Pinillos, J. (2025). *Uso de SIG mediante análisis multicriterio para la identificación de áreas óptimas para instalaciones fotovoltaicas en Neiva, Huila*.
- Ríos, L. (2024). *Análisis multicriterio para la determinación de zonas de recarga potencial en la microcuenca La Angula, municipio de Lebrija, Santander*.
- Rocha, L. (2018). *Monografía de estudio: Minería de carbón en Boyacá y sus impactos ambientales*.
- Romero, W. (2021). *Implicaciones de la transformación en la canasta eléctrica nacional en el consumo de carbón, Boyacá*.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. In *Int. J. Services Sciences* (Vol. 1, Issue 1).

- Saaty, T., & Vargas, L. (2012). Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. In *International Series in Operations Research & Management Science*. <http://www.springer.com/series/6161>
- Santacruz, J., & Ferrer, L. (2024). *Análisis Geoespacial y Multicriterio de Apiarios en el Distrito de Barrancabermeja*. www.umanizales.edu.co
- UPME. (2025b). *Plan Energético Nacional 2024-2054 (Diversificación Energética)*.
- World Energy Council. (2019). *Extreme Weather - El Niño Colombia*.
- Wu, D., Yang, Z., Wang, N., Li, C., & Yang, Y. (2018). An integrated multi-criteria decision making model and AHP weighting uncertainty analysis for sustainability assessment of coal-fired power units. *Sustainability (Switzerland)*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/su10061700>
- Yajure, C. A. (2015). Comparación de los métodos multicriterio AHP y AHP Difuso en la selección de la mejor tecnología para la producción de energía eléctrica a partir del carbón mineral. *Scientia et Technica*, 20(3), 255. <https://doi.org/10.22517/23447214.9381>
- Yetkin, M. E., & Özfirat, M. K. (2019). SELECTION OF THICK COAL SEAM MINING METHOD USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS. *Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications*, 5(20), 6–11. <https://doi.org/10.5935/2447-0228.20190071>

Anexos

Anexo1. Geodatabase.

La geodatabase entregada corresponde al repositorio geoespacial que integra la información empleada y generada durante el desarrollo del proyecto. Su estructura se organiza de la siguiente manera:

- **GDB de entrada**

Incluye el Modelo de priorización de zonas base, el cual contiene la información técnica base de los títulos mineros del departamento de Boyacá y de las Unidades de Producción Minera, así como las capas derivadas de los índices de calidad del carbón. Adicionalmente, incorpora capas ambientales, sociales y capas generales de localización. Todas las capas son de tipo vectorial y fueron obtenidas como resultado de la aplicación del proceso metodológico descrito en el documento. La estructura de esta geodatabase permite al usuario explorar, consultar y validar los resultados obtenidos, facilitando futuras etapas de planificación, gestión y toma de decisiones por parte de la compañía – GENSA.

- **Base de títulos ajustados**

Corresponde a la capa consolidada de los títulos mineros del departamento de Boyacá, sobre la cual se realizaron los ajustes topológicos necesarios para garantizar la consistencia espacial de la información.

- **Intermedios**

Contiene la capa de títulos mineros de Boyacá con la información asociada a las variables técnicas incorporada en sus metadatos, generada durante las etapas intermedias del análisis geoespacial.

- **Layouts**

Incluye los diseños de salida cartográfica correspondientes a los mapas temáticos generados y utilizados dentro del Notebook para la visualización y presentación de resultados.

- **APX**

Corresponde al archivo de proyecto de ArcGIS Pro, el cual actúa como contenedor principal del proyecto, almacenando la configuración de mapas, layouts, así como el código Python implementado y las salidas gráficas diseñadas para la generación automatizada de mapas temáticos.

Anexo2. Código Python.

Este anexo contiene el código Python desarrollado durante el proyecto, presentado en su formato original de script. Dicho código soporta la automatización del análisis multicriterio y la generación de los mapas temáticos empleados en la evaluación de la aptitud de los títulos mineros y Unidades de Producción Minera del departamento de Boyacá.