



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y
MATERIALES

TRABAJO DE TESIS

TEMA:

**“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL CARBÓN DE LA
CUENCA DE SABINAS PARA IDENTIFICAR SU USO EN
LA INDUSTRIA”**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN GEOLOGÍA
AMBIENTAL**

P R E S E N T A

Hinojosa Espinoza Abraham

Director de Tesis

Dr. Màrius Ramírez Cardona

Codirector externo

Dr. Juan Josué Enciso Cárdenas

15 de octubre de 2024



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y
MATERIALES

TRABAJO DE TESIS

TEMA:

**“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL CARBÓN DE LA
CUENCA DE SABINAS PARA IDENTIFICAR SU USO EN
LA INDUSTRIA”**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN GEOLOGÍA
AMBIENTAL**

P R E S E N T A

Hinojosa Espinoza Abraham

Asesores:

M. C. Genaro de la Rosa Rodríguez

Dr. Marcelino Antonio Zúñiga Estrada

15 de octubre de 2024



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Autorización de impresión.



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 21 de noviembre de 2025

Número de control: ICBI-D/2823/2025

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental **Abraham Hinojosa Espinoza**, quien presenta el trabajo de titulación "**Evaluación de la calidad del carbón de la cuenca de Sabinas para identificar su uso en la industria**", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Marcelino Antonio Zúñiga Estrada

Secretario: Dr. Juan José Enciso Cárdenas

Vocal: Dr. Márius Ramírez Cardona

Suplente: M. en C. Genaro de la Rosa Rodríguez

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

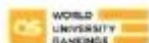
Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/YCG

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx



Dedicatoria

Deseo dedicar este proyecto de tesis a mi **Roca Madre** y mi río constante. Usted que, con la firmeza del granito y la paciencia del agua, ha sostenido mi mundo, moldeando mi ser con el amor que solo el tiempo y la entrega pueden esculpir.

A mis hermanos, mis cordilleras gemelas, que con su ejemplo de perseverancia me recuerdan que las alturas no se conquistan sin superar profundas fallas en la vida y el tiempo.

A mi sobrinita, mi cristal brillante, pequeña pero inmensa en su luz. Eres como un diamante que refleja esperanza en cada faceta, un torrente de alegría que renueva mis fuerzas y me inspira a construir un futuro digno de poder compartir contigo en algún momento.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, mi cuna académica, terreno fértil donde mis sueños echaron raíces; y a mi director interno, **Màrius Ramírez Cardona**, por ser esa brújula que me guió en este recorrido, iluminando el camino con su conocimiento, dedicación y paciencia cuando no se observaba un progreso.

A mi familia, Amigos y Compañeros, que se sienten identificados con mi proceso y las metas que he alcanzado. Porque en este ciclo de rocas que es la vida, ustedes son los procesos que nunca se detienen, las fuerzas que transforman y sostienen. Sus palabras fueron grietas por donde entró la luz y el magma que encendió mi espíritu en los momentos de frío. Gracias por creer en mí y dudar, porque ambas me forjaron; por ser el anclaje que me mantiene firme y el viento que impulsa mis alas hacia nuevas aventuras.

Este proyecto de tesis no es solo un logro personal, sino un homenaje a todos los que han sido parte de mi vida y han creído en mí, incluso cuando yo dudé. Cada uno de ustedes es una capa esencial en este mapa que llamo vida. Este logro, como la Tierra misma, está compuesta de sus fuerzas, sus abrazos y su Fe. Sin ustedes, mi historia no tendría las fracturas que la hacen única ni las elevaciones que la hacen extraordinaria.

A ustedes, con todo mi corazón y mi gratitud eterna, dedico esta obra.

Abraham Hinojosa Espinoza

Agradecimientos

Los cimientos de una vida no se construyen en soledad; son capas sedimentarias de amor, sacrificio, enseñanzas y perseverancia que, con el paso del tiempo, forman las rocas que nos sostienen. Este logro, lejos de ser un trabajo aislado, es una formación conjunta, un paisaje tallado por los esfuerzos de quienes siempre estuvieron, están y lo harán a mi lado.

A mi madre, mi raíz en el viento, mi roca madre; la base sobre la que todo mi mundo se construye. Porque cuando la vida parecía erosionarlo todo, tú fuiste el cuarzo que resistió las tempestades, la veta de oro que dio luz en las sombras. Me diste tu vida como un río que esculpe cañones y tus ganas de vivir como el agua que nunca deja de fluir. Porque en ti encontré la estabilidad de un suelo firme y la profundidad de un océano de amor que jamás será secado.

A mi padre, tus palabras, aunque breves, fueron la presión que me moldeó y el calor que forjó mi carácter. Me enseñaste que la vida, como la geología, requieren tiempo, paciencia y resistencia ante las fuerzas que nos presionan.

A mis hermanos, las estrellas guía en mi brújula geológica, por ser esa cordillera que siempre me inspiran y alientan a escalar. Su perseverancia de cada uno cual mármol, producto de presión y tiempo, un recordatorio de que las dificultades pueden esculpir lo más bello o como placas que chocan para alzarse hacia el cielo; su ejemplo me recordó siempre que incluso en las fracturas se construyen las montañas más altas.

Al centro de Investigación en Geociencias Aplicadas (CIGA), a quienes les debo más que oportunidades: les debo confianza. Han sido mi campo de exploración y aprendizaje, mi epicentro de transformación profesional.

- Mi gratitud infinita al **Dr. Juan Josué Enciso Cárdenas**, mi director de Tesis y guía inquebrantable. Su apoyo y paciencia han sido el cimiento sobre el que he construido este camino, y su confianza en mí, un faro en los momentos de duda. Gracias por apostar por mí, como Wilson apostó por su teoría, creyendo en lo que otros no veían, abriendo caminos donde parecía haber solo incógnitas.

- Al **Dr. Luis Fernando Camacho Ortegón**, cuyo liderazgo ha sido como un volcán, encendiendo mi impulso en los momentos de mayor desgaste, y como una montaña imponente, brindándole fortaleza y dirección. Sus consejos, como estratos de sabiduría, han sido cimientos firmes en mi camino, y su guía, vasta como el horizonte, un faro en mi travesía profesional y personal.
- Un agradecimiento especial al **M.C. Genaro de la Rosa Rodríguez** por su sabiduría, mostrándome que la ciencia, como la Tierra, se construye con paciencia y pasión, y que cada grieta es solo una oportunidad para descubrir algo nuevo.
- Al **M.C. Diego de Jesús Martínez Hernández**, por soportar mi precisión y obtener su dedicación en este trabajo presente. Su orientación ha sido como un buen cartógrafo, guiando mis pensamientos y estructurando cada sección con la claridad de un corte geológico bien trazado.
- Mi agradecimiento infinito al **Dr. Marius Ramírez Cardona**, mi Director interno, por sostener la estructura de este proyecto como un cristal bien formado: con simetría, orden y paciencia. Dentro de su enseñanza, desde la cristalografía hasta la mineralogía, supo dejar planos de reflexión que hoy dan brillo al conocimiento aquí contenido. Porque en la dimensión más oculta pero vital, administrativamente fue un sistema cristalino invisible, pero esencial, manteniendo cada eje del proceso en equilibrio. Su apoyo ha sido el plano base donde esta investigación pudo crecer con forma y sentido.
- Al **Dr. Marcelino Antonio Zúñiga Estrada**, por haber transformado la complejidad geoquímica en una brújula clara durante mi trayecto, su guía ha sido como la mineralización: certera, paciente y enriquecedora.

A todos y cada uno de ustedes, por demostrar que la Ciencia no solo se sustenta en el contenido, sino también en la forma en que se presenta. ¡Porque hasta la roca más resistente revela su verdadera belleza en la manera en que es expuesta!

Abraham Hinojosa Espinoza

Epígrafe

¡Porque lo que hacemos en vida, resuena en la eternidad!



Porque las montañas iniciaron siendo mi lugar de entrenamiento y, sin saberlo, me enseñaron a interpretar el lenguaje de la Tierra. En sus pendientes entendí que no se trata solo de llegar a la cima, sino de escuchar cada paso, de sentir en las rocas el eco de un pasado inmenso. Allí, donde el aire pesa y la soledad abraza, descubrí que los paisajes no solo se miran, se viven; y que, aunque el ascenso duela, al llegar a la cima descubro que no solo conquisto la altura, sino también una parte de mí mismo.

Abraham Hinojosa Espinoza



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Este trabajo de tesis y sus actividades desarrolladas fueron realizadas gracias al apoyo de:

La Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por brindarme la oportunidad de ingresar y estudiar el programa de Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental que se imparte en el Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería.	 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
El Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería por abrirme las puertas e impulsar las ganas de sobresalir junto a sus docentes que fueron parte primordial para mi formación Ingenieril.	 Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
La Universidad Autónoma de Coahuila por brindarme la oportunidad de vincular mis prácticas profesionales en el Centro de Investigación en Geociencias Aplicadas.	 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA
El Centro de Investigación en Geociencias Aplicadas de la UAdeC , el cual, corresponde al pilar donde se desarrolló el presente trabajo de investigación, donde se brindó el acceso a cada uno de sus laboratorios para la caracterización de muestras de este proyecto.	 CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GEOCIENCIAS APLICADAS UAdeC
El Proyecto Impulsa 059 Denominado "Evaluación de la madurez térmica del carbón para la estimación del potencial de almacenamiento geológico de dióxido de carbono (CO ₂) en la Cuenca de Sabinas. Una alternativa sustentable para el aprovechamiento del carbón en México".	 DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar la calidad del carbón de la Cuenca de Sabinas, Coahuila, para determinar sus usos más adecuados en la industria, a través del análisis de propiedades físico-químicas del carbón mediante estudios próximos e inmediatos. Los análisis realizados incluyen parámetros de contenido de humedad, cenizas, poder calorífico, índice de hinchamiento libre (Free Swelling Index FSI), contenido de azufre, materia volátil y carbón fijo, para identificar sus aplicaciones en sectores como la metalurgia, generación de energía y la carboquímica. Para ello, se diseñó y ejecutó una metodología integral conformada por una campaña de muestreo en 7 subcuencas, preparación de muestras mediante trituración, homogenización y pulverización, para su caracterización en laboratorio.

Los resultados sugieren diferencias significativas en las propiedades del carbón entre las subcuencas, permitiendo asignar usos específicos a cada una. Las subcuencas Sabinas, Saltillito-Lampacitos y Las Esperanzas demostraron un alto potencial para aplicaciones metalúrgicas, gracias a sus altos valores de FSI, junto con un bajo contenido de cenizas. Las subcuencas Las Adjuntas y El Gavilán fueron identificadas como las más adecuadas para la generación de energía térmica debido a su poder calorífico, con reservas significativas que podrían satisfacer las demandas energéticas regionales. Finalmente, las subcuencas San Patricio y Baluarte presentaron propiedades favorables para la industria carboquímica.

La investigación en este trabajo resalta la relevancia del carbón como recurso estratégico en la economía de Coahuila y México, especialmente por las grandes reservas disponibles, estimadas para más de 100 años de explotación. Sin embargo, también evidencia los desafíos asociados a su uso, particularmente frente a las presiones internacionales para reducir las emisiones de carbono y las metas de transición energética. Este trabajo contribuye al conocimiento para implementar estrategias más sostenibles y maximizar el aprovechamiento del carbón mediante tecnologías limpias que mitiguen su impacto ambiental.

Estos hallazgos presentados en este estudio realizado no solo ofrecen una clasificación del carbón según su calidad y uso industrial, sino que también sientan las bases para investigaciones futuras que busquen optimizar su explotación y promover una economía sustentable en la Región Carbonífera de Coahuila.

Abstract

This research aims to evaluate the quality of coal in the Sabinas Basin, Coahuila, to determine its most suitable industrial applications. Through an analysis of the coal's physicochemical properties using proximate and ultimate studies, the parameters examined included moisture content, ash, calorific value, Free Swelling Index (FSI), sulfur content, volatile matter, and fixed carbon. The objective was to identify its applications in sectors such as metallurgy, energy generation, and carbon chemistry. To achieve this, an exhaustive methodology was designed and implemented, including a sampling campaign in seven sub-basins, sample preparation through crushing, homogenization, and pulverization processes, and their characterization in the laboratory.

The result suggest significant differences in coal properties across the sub-basins, allowing for the assignment of specific uses to each one. The Sabinas, Saltillito-Lampacitos, and Las Esperanzas sub-basins demonstrated high potential for metallurgical applications due to their FSI levels, coupled with low ash content. In contrast, the Las Adjuntas and El Gavilán sub basins were identified as the most suitable for energy generation due to their high calorific values, owing to their specific composition and significant reserves capable of meeting regional energy demands. The San Patricio and Baluarte sub-basins exhibited favorable properties and optimal characteristics for the carbon chemistry industry.

This thesis research highlights the relevance of coal as a strategic resource in the economy of Coahuila and Mexico, especially given the extensive reserves estimated to sustain over 100 years of exploitation. However, it also underscores and evidences the challenges associated with its use, particularly in light of international pressures to reduce carbon emissions and meet energy transition goals. This study contributes to the knowledge necessary to implement more sustainable strategies and to maximize the utilization of coal through clean technologies that mitigate its environmental impact.

The findings presented in this study not only provide a classification of coal based on its quality and industrial applications but also lay the groundwork for future research aimed at optimizing its exploitation and fostering a sustainable economy in Region Carboniferous of Coahuila.



Contenido

Capítulo 1 Introducción	1
1. Introducción	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Planteamiento del problema.	4
1.3 Justificación.	5
1.4 Hipótesis.	6
1.5 Objetivo General.....	6
1.5.1 Objetivos específicos.	6
Capítulo 2 Marco Teórico	7
2. Marco Teórico.....	8
2.1 Generalidades del carbón.....	8
2.2 Usos del carbón.	10
2.2.1 Uso histórico del carbón.	11
2.2.2 Uso actual del carbón.	13
2.2.3 Nuevos usos del carbón.	15
Capítulo 3 Geología de la Cuenca Sabinas.....	19
3. Geología de la Cuenca Sabinas	20
3.1 Localización.....	20
3.2 Geología general.....	21
3.3 Geología del área de estudio.....	21
Capítulo 4 Desarrollo metodológico.....	25
4. Desarrollo metodológico.	26
Muestreo.	27
4.2 Preparación de Muestras.....	29



4.3 Caracterización de muestras	36
4.4 Evaluación de los usos del carbón	47
Capítulo 5 Resultados y Discusión	49
5. Resultados y discusión.....	50
5.1 Resultados de caracterización de muestras	50
5.2 Discusión de resultados.	52
Capítulo 6 Conclusiones	60
6. Conclusiones.....	61
6.1 Potencial para uso Térmico:	61
6.2 Potencial para uso Metalúrgico:	61
6.3 Potencial para uso Carboquímico:	61
Capítulo 7 Referencias bibliográficas.....	63
Capítulo 8 Anexos	68
8. Anexos	69
8.1 Anexo I: Recolección de muestras.....	69
8.2 Anexo 2: Preparación de muestras.....	71
8.3 Anexo 3: Caracterización de muestras.....	74

Índice de Figuras

Figura 1. Línea del tiempo de los usos del carbón a lo largo de la historia.....	11
Figura 2. Mapa de ubicación de las subcuencas en la Región Carbonífera (tomado de Enciso-Cárdenas et al., 2024).	20
Figura 3. Columna estratigráfica de la Formación Olmos. (Modificado de De la Rosa Rodríguez et al, 2023)	23
Figura 4. Metodología integrada a partir de 4 fases a ejecutar en el proceso.	26
Figura 5. Quebrador Holmes modelo 401 XL Crusher.....	30
Figura 6. Cuarteador (Utilizado para la homogenización de muestras).	31
Figura 7. Pulverizador 500 DG (La muestra es quebrada por medio de unos martillos internos que giran a 10,000 rpm.	34
Figura 8. Procedimiento de cuarteo en material sedimentario (carbón).	35
Figura 9. Tabla de perfiles estándar escala 1:1 según ASTM D-720-10 para la determinación del F.S.I. (figura tomada de Martínez Hernández, 2021).	40
Figura 10. Equipo para la determinación de FSI (Índice de expansión del carbón).....	40
Figura 11. Estufa para el secado de muestras para análisis de humedad total de carbón.	43
Figura 12. Estufa modelo 10GC para análisis de ceniza.	44
Figura 13. Determinador de azufre marca Leco modelo SC-144DR.	45
Figura 14. Calorímetro AC-500 y equipo de cómputo para medición el poder calorífico (trabaja con oxígeno y agua destilada)	46
Figura 15. Circuito Integral para el óptimo aprovechamiento del Carbón.	58
Figura 16. Fotografía tomada con Dron para el acceso a la Subcuenca Gavilán con apoyo de personal del Servicio Geológico Mexicano.	69
Figura 17. Extracción de muestras de carbón en la Subcuenca Gavilán.	69
Figura 18. Manto superior de carbón (piso a techo) en la Subcuenca Gavilán.	70
Figura 19. Extracción de carbón en la Subcuenca Gavilán con el acompañamiento y asesoramiento del M.C Genaro de la Rosa Rodríguez.	70
Figura 20. Limpieza de plancha donde se trabajará las muestras de carbón bajo las normativas ASTM correspondientes.	71
Figura 21. Homogenización de muestra de carbón.	71

Figura 22. Preparación de muestra de carbón para comenzar con el proceso de trituración bajo malla #60.	72
Figura 23. Muestra de carbón bajo malla #60, posterior a su trituración para homogeneizar la muestra.....	72
Figura 24. Aplicando el proceso de cuarteo a muestra de carbón.	73
Figura 25. Recuperación de muestras de carbón para iniciar con caracterización física y química.	73
Figura 26. Pesaje de muestras de carbón para análisis dentro del laboratorio.	74
Figura 27. Inicio de análisis para determinar la cantidad de azufre en la muestra de carbón.	74
Figura 28. Análisis en muestras de carbón para determinar el porcentaje de ceniza.....	75
Figura 29. Análisis en muestras de carbón para determinar el Índice de Hinchamiento (FSI) del material sedimentario.....	75

Índice de tablas

Tabla 1. Compósitos de cada muestra por subcuenca de Sabinas.	32
Tabla 2. Características que debe cumplir el carbón ante la demanda de la industria energética, metalúrgica y carboquímica.	47
Tabla 3. Resultados de compósitos a partir de análisis físicos y químicos en muestras de carbón.	51
Tabla 4. Reservas y recursos de las Subcuencas Las Adjuntas y el Gavilán.	54
Tabla 5. Resultados de valores ponderales de las Subcuencas Adjuntas y el Gavilán.	55
Tabla 6. Reservas y recursos de las Subcuencas Sabinas, Saltillito-Lampacitos y Esperanzas.	55
Tabla 7. Resultados de valores ponderales de las Subcuencas Sabinas, Saltillito-Lampacitos y Esperanzas.	56
Tabla 8. Reservas y recursos de las Subcuencas San Patricio y Baluarte.....	56
Tabla 9. Resultado de valores ponderales de las Subcuencas San Patricio y Baluarte.....	57



Capítulo 1

Introducción

1. Introducción

1.1 Antecedentes.

El carbón es una roca sedimentaria fósil de color negro o tonalidades oscuras, compuesta y enriquecida principalmente por carbono, proveniente de la materia orgánica que ha sido compactada y sepultada a través del tiempo geológico hasta ser alterada químicamente.

Desde la antigüedad el carbón ha sido el primer combustible fósil en ser utilizado y explotado, esto a partir de las necesidades que ha presentado la humanidad hasta el día de hoy. Existe evidencia en la cual el carbón en Europa era denominado de distintas maneras, como “Tierras Negras”, esto aunado por la insuficiencia de estudios e investigación al material fósil, no fue hasta años después en los cuales el carbón comenzó a reemplazar algunos materiales para satisfacer las necesidades humanas como la energía eléctrica, generación de calor y fabricación de materias primas.

El carbón durante décadas ha mostrado altas capacidades y cualidades por la facilidad de ser comercializado, transportado y a su vez generar energía para la industria. Es por ello que en el panorama actual y a través de la tecnología sus estudios han ido revolucionando poco a poco para mostrar sus diversas aplicaciones, tipos y usos más importantes.

Actualmente el carbón continúa manteniéndose como el principal recurso primario de mayor aprovechamiento en el panorama energético, aunque sigue luchando para mantenerse vigente en la industria del mercado, ya que su mayor desventaja se encuentra representada por las concentraciones de contaminación por la liberación de gases como CO y CO₂ que son liberados a la atmósfera, siendo cómplice gradualmente del calentamiento global.

Es por ello que en 2015 el Acuerdo de París fue adoptado por 80 países en el cual se busca la erradicación de los usos excesivos del carbón para el año 2030 y así obtener una mitigación gradual de las emisiones contaminantes por gases de efecto invernadero (GEI). (Enciso Cárdenas, 2020).

Lo anterior, representa un grave problema para México y Coahuila por ser el máximo productor de este recurso energético fósil, ya que sus reservas aspiran y representan alrededor de 100 años del ritmo de consumo nacional, que se refleja actualmente en un impacto negativo para los sectores económico, laboral y social local.

Es por ello que el presente trabajo de tesis, busca presentar un análisis de las mejores alternativas para el uso del carbón, partiendo como base de sus características fisicoquímicas y adoptando un mejor esquema tecnológico y de mayor eficiencia que permita implementar alternativas para el manejo de los gases contaminantes que son expulsados durante su proceso de transformación, para la disminución de su impacto ambiental por la explotación de este recurso mineral, manteniendo vigente la economía de la Región Carbonífera del Estado de Coahuila en México.

El carbón ha sido un recurso fundamental en Coahuila y en México, tanto para la economía local y regional como para la industria Nacional. La explotación del carbón en México tiene su inicio en el Siglo XIX, cuando la Minería comenzó a desarrollarse para satisfacer las necesidades energéticas y de transporte (especialmente con el conocimiento del Ferrocarril). Durante el Porfiriato, el Gobierno promovió la inversión extranjera, impulsando la minería y favoreciendo a empresas extranjeras para explorar los yacimientos de carbón.

Durante el siglo XIX, Coahuila fue un importante centro minero para el País, siendo el principal productor de carbón en México con grandes reservas localizadas principalmente en la región conocida como la Cuenca de Sabinas, con reservas que representan hasta 100 años más de producción (SGM 1993).

En el Siglo XX, la Región Carbonífera de Coahuila, se logró consolidar como el principal proveedor de carbón para “La Comisión Federal de Electricidad” (CFE) y otras industrias, debido a sus grandes reservas y su calidad. En la década de 1930 a 1950, en esta época, el carbón, resultó de vital importancia para la producción de acero en empresas como “Altos hornos de México” (AHMSA) en Monclova, Coahuila. En la década de 1970, México comienza a enfocarse más en el Petróleo, sin embargo, el carbón sigue siendo un importante recurso para la producción de energía eléctrica y el acero.

A nivel global el carbón presenta dos usos principales, los cuales son:

El primer uso corresponde como fuente de combustible para la generación de vapor de agua en calderas, posterior a ello es conducido a través de una turbina para la generación electricidad. Posteriormente, el vapor es usado directamente en gran cantidad de procesos industriales, este uso es denominado y conocido como “Carbón Térmico”.

El segundo uso corresponde a su transformación en Coque, posteriormente es utilizado como reductor químico en la industria metalúrgica en los procesos de fundición. Este proceso requiere un tipo de carbón con propiedades específicas, denominado “Carbón Metalúrgico”.

La demanda del carbón térmico es sumamente más importante que el carbón metalúrgico, en el año 2017 la demanda del carbón térmico representó el 85% de la demanda total del carbón en el mundo y así las centrales eléctricas figuran como usuario dominante, obteniendo el 73% de un consumo total de carbón térmico. La fracción restante de carbón térmico es ligada principalmente a industrias de fabricación de cemento y ladrillos; estos usos resultan ser insignificativos a comparación con la demanda de generación eléctrica.

En la actualidad, a pesar de que las energías renovables están ganando terreno en el mercado, el carbón sigue siendo una fuente importante para la generación de electricidad en México. Sin embargo, la minería del carbón en Coahuila también enfrenta retos ambientales y además de seguridad laboral. Se espera que la demanda de carbón metalúrgico alcance 1.049 millones de toneladas en 2035, reduciendo progresiva y ligeramente las reservas a un ritmo de 0.5%. (Enciso Cárdenas, 2020).

Hoy en día el carbón de Coahuila es crucial para la industria energética y para garantizar la sustentabilidad laboral y económica, aunque el país se encuentre en una transición hacia energías más limpias, buscando reducir el impacto ambiental, así como cumplir con las políticas nacionales e internacionales sobre el cambio climático.

1.2 Planteamiento del problema.

La situación actual del mercado del carbón está enfrentando importantes desafíos debido a compromisos internacionales como el “Acuerdo de Paris”, que busca reducir las emisiones de carbono y erradicar el uso del carbón en la generación de energía eléctrica para el año 2030. Este cambio representa una amenaza significativa para el estado de Coahuila, que posee reservas de carbón estimadas para cubrir 100 años más de demanda (según SGM). La región enfrenta ahora la necesidad de encontrar nuevos usos para el carbón que sean viables y que cumplan con los estándares de sustentabilidad y reducción de emisiones.

Para abordar este problema, se propone obtener muestras de carbón en las distintas subcuencas de Sabinas y someterlas a análisis Físico-Químicos. Estos análisis permitirán determinar la calidad específica de cada muestra, lo cual proporcionará datos esenciales sobre sus aplicaciones en la industria.

¿Podrán los resultados de estos análisis orientar hacia mejores soluciones del uso del carbón en la industria, de modo que, junto con nuevas tecnologías, se pueda reducir los niveles de contaminación y así optimizar el manejo del material en la región carbonífera de Coahuila?

Junto a esta investigación, se espera evaluar alternativas sostenibles para el uso del carbón, que no solo mitigue el impacto ambiental, sino que, también mantengan activa la economía regional ante las nuevas transiciones energéticas globales.

1.3 Justificación.

En la actualidad, el carbón continúa siendo un recurso esencial, destacándose como un pilar en el panorama energético y en la economía de Coahuila y México. Esta situación subraya la importancia de seguir aprovechando este recurso, dado que las reservas se estiman para una explotación que podría extenderse hasta por 100 años. En este contexto, el análisis de las características del carbón en la cuenca de Sabinas resulta crucial, especialmente frente a las presiones que existen para eliminar su uso para el año 2030, debido a los contaminantes que se generan y que contribuyen al calentamiento global.

Este trabajo de investigación tiene como prioridad, llevar a cabo estudios fisicoquímicos que permitan evaluar las características del carbón, analizando parámetros como el contenido de humedad, el poder calorífico, la cantidad de cenizas, el índice de formación de escoria (FSI) y el contenido de azufre. A partir de estos análisis, se busca identificar las mejores opciones para el uso eficiente de este recurso. A través de la obtención y evaluación de estas características, se pretende asignar usos óptimos para maximizar el aprovechamiento del carbón en la industria. Asimismo, se analizarán las nuevas tecnologías que permitan reducir las emisiones contaminantes asociadas naturalmente a su explotación y aprovechamiento.





1.4 Hipótesis.

La calidad del carbón en la cuenca de Sabinas, Coahuila, varía significativamente según sus propiedades físicas y químicas, lo cual influye en su idoneidad para diferentes aplicaciones en la industria, como la generación de energía, la fabricación de acero, entre otros procesos productivos para el carbón.

1.5 Objetivo General.

Evaluación de las propiedades físico-químicas del carbón en la cuenca de Sabinas, mediante análisis próximos e inmediatos, para determinar su calidad y uso más apropiado en la industria mediante la aplicación de nuevas tecnologías que permitan desarrollar una economía sustentable.

1.5.1 Objetivos específicos.

-  Generar un muestreo en cada subcuenca de Sabinas, a partir de la identificación y recolección en los mantos de carbón.
-  Realizar la preparación de las muestras recolectadas de cada subcuenca.
-  Realizar los análisis Físico-Químicos a cada muestra extraída bajo la normatividad requerida y los procesos adecuados para analizar la calidad del carbón.
-  Asignar una clasificación general del carbón en la cuenca Sabinas e identificar los posibles usos a partir de la calidad obtenida para su máximo aprovechamiento.





Capítulo 2

Marco Teórico

2. Marco Teórico




2.1 Generalidades del carbón.

El carbón es una roca sedimentaria organoclástica de grano fino, compuesta esencialmente por restos carbonizados de plantas, animales o materia orgánica. Estas rocas organoclásticas suelen constituir secuencias estratigráficas características que reciben el nombre de Ciclotema, es decir, una secuencia litológica que se repite en el tiempo (Corona-Esquivel et al., 2006). Los ciclotemas están típicamente constituidos, de la base a la cima, mediante capas de:

-  Arcillas (lacustres o marinas)
-  Areniscas y Limolitas
-  Conglomerados
-  Carbón





El carbón se originó hace millones de años, principalmente durante el periodo Carbonífero, hace 359 a 299 millones de años. En aquella época, enormes bosques de plantas y árboles primitivos, tal como, helechos gigantes y esquistos cubrían gran parte de la Tierra. Estas plantas o materia orgánica, al morir, quedaron sepultadas o enterradas en zonas como pantanos y áreas húmedas, donde en dicho ambiente prevalecían condiciones Anóxicas, que permitieron la conservación de la materia orgánica, para su transformación.

La formación de yacimientos de carbón ocurre cuando se cumplen ciertas condiciones como:

-  Presencia de vegetación abundante, primordialmente en un ambiente tropical, cálido y húmedo.
-  Ambiente tectónico de subsidencia balanceado con el crecimiento y un constante sepultamiento de la vegetación.
-  El sepultamiento de la vegetación muerta debe ser rápido, de manera en la cual, no quede expuesta a la oxidación en la superficie. (Corona-Esquivel et al., 2006).

El ambiente de depósito o paleoclima, durante el proceso de formación del carbón es un factor determinante. Los climas que son más favorables para este proceso lo son paleoclimas tropicales,

generadores de vegetación exuberante, asimismo, es de vital importancia considerar la edad de las series sedimentarias, debido a que las plantas vasculares aparecieron en el periodo Silúrico y poblaron la mayor parte. En este sentido, los medios más propicios en los que pueden darse estos procesos de acumulación de materia vegetal son:

-  Lagunas, estuarios y marismas, saladas o salobres: estas son zonas con comunicación ocasional con el mar, en las que se produce una importante actividad biológica vegetal.
-  Zonas pantanosas, ciénagas, canales, lagos, y charcas intracontinentales junto con vegetación de tipos diversos (herbáceas o leñosas) controlada mediante la profundidad del medio, condiciones del fondo, temperatura de las aguas, entre otros.
-  Ambientes fluviales y deltaicos.
-  Manglares de las zonas tropicales que se encuentran bordeando a las lagunas y estuarios. (Corona-Esquivel et al., 2006).

A partir de estas condiciones, la descomposición de la materia orgánica que ha sido sepultada, ocurre gradualmente, permitiendo la formación de la Turba, con el paso del tiempo, el material vegetal que ha sido acumulado y sepultado, bajo presión, además del calor de la Tierra, experimentó un proceso de transformación química responsable de la concentración del contenido de carbono, mediante la pérdida de la mayor parte de su contenido inicial de oxígeno e hidrógeno; este proceso es conocido como carbonización, el cual, ocurrió durante millones de años y dio lugar a diferentes tipos de carbón, como la Turba, el Lignito, la Hulla y la Antracita, o la clasificación del carbón por rango mencionada por (Speight, J. G., 2004), : Lignito, Subbituminoso, Bituminoso y Antracita. Estos tipos varían según su contenido de carbono y en su eficiencia correspondiente como fuente de energía.

Turba: Corresponde al material orgánico de color amarillento a negro, la turba es la primera parte de la transformación de los restos vegetales o materia orgánica en carbón, por ende, la presencia de carbono es escasa, los rangos no superan el 60%; es un combustible de baja calidad y de bajo poder calorífico. (Enciso Cárdenas, 2020).

Lignito: Es una roca enriquecida en carbono, de color negro o pardo oscuro y con consistencia leñosa, pero con alta presencia de agua, por esta razón la convierte en un mal combustible, a pesar de ello, el lignito es utilizado aún en ciertas centrales térmicas. (Enciso Cárdenas, 2020).

Hulla: Se define también como bituminoso, el material es duro, de color negro, opaco y graso; contiene entre el 75 y el 90% de carbono. Es formado cuando se comprimen las capas de lignito en la etapa primaria y esto corresponde al tipo de carbón más abundante y por ende más utilizado. Posee un alto poder calorífico, por esta razón es utilizado principalmente para las centrales térmicas en la producción de electricidad. De igual manera puede ser utilizado para la producción de Coque, usado en los altos hornos para el proceso de fundición de metales. (Enciso Cárdenas, 2020).

Antracita: Proveniente del metamorfismo de la hulla, este tipo de carbón es el mejor de todos los tipos de carbones, de muy alto poder calorífico, posee un porcentaje de pureza del 90% en delante de carbono, arde con mucha dificultad, pero desprende mucho calor (Secretaría de Economía, 2022), sus propiedades hacen que sea el menor contaminante por su baja liberación de gases.

La composición del carbón incluye carbono, hidrógeno, oxígeno, así como en pequeñas cantidades de azufre y nitrógeno; además de contener dióxido de carbono y metano. De esta forma y por sus propiedades, el carbón se convirtió en un recurso energético importante desde la Revolución Industrial, cuando se utilizaba principalmente para alimentar máquinas de vapor hasta producir electricidad y en la industria del Acero, debido a su alto poder calorífico y su disponibilidad relativa.

2.2 Usos del carbón.

El carbón ha sido un elemento fundamental para el desarrollo de la humanidad a lo largo de la historia, a través de diversos usos que han evolucionado conforme avanza el conocimiento y la tecnología. El carbón se utiliza en distintos sectores, incluyendo la generación de energía eléctrica, la producción de hierro y acero, la producción de cemento y como combustible líquido. Es imprescindible destacar que la mayor parte del carbón se utiliza para la generación de energía eléctrica, carbón térmico o lignito, además para la producción de hierro y acero mediante el carbón coque. A continuación, mediante una línea del tiempo se detalla el uso del carbón a lo largo del tiempo. (Figura 1)



Figura 1. Línea del tiempo de los usos del carbón a lo largo de la historia.

2.2.1 Uso histórico del carbón.

En la antigüedad:

Fuego y combustible: Uno de los usos más antiguos del carbono es en forma de madera y carbón vegetal para hacer fuego, proporcionando calor y una fuente de energía para cocinar y la fabricación de herramientas.

Pigmentos para el arte rupestre: El carbón vegetal también fue utilizado como pigmento de coloración oscura a negro en las pinturas rupestres que las primeras civilizaciones realizaban.

Metalurgia: Durante la edad de hierro y en la antigüedad clásica, el carbón era usado para fundir y trabajar con metales, como el hierro y el cobre. Dicho proceso requiere precisamente de carbón para alcanzar temperaturas que eran necesarias en las forjas.

Edad media y renacimiento:

Producción y elaboración de Pólvora: Durante el siglo IX, fue descubierta la pólvora en China, el proceso de elaboración para la pólvora se lleva a cabo mezclando carbón vegetal, azufre y salitre (nitrato de potasio), revolucionando la guerra y el uso de armas de fuego.

Fundición de hierro: La demanda del hierro aumentó significativamente para la construcción y herramientas, mientras que de igual forma el carbón vegetal continuó siendo fundamental en las formas para la producción de hierro y acero.

Revolución Industrial:

Carbón mineral: El carbón vegetal pasó a ser remplazado por el carbón mineral como fuente de energía principal.

Coque para la siderurgia: El Coque corresponde a un derivado del carbón mineral, siendo imprescindible para la producción del hierro en los altos hornos, permitiendo la fabricación y elaboración de estructuras más grandes y a su vez duraderas, como puentes y edificios.

Gases industriales: La destilación y elaboración aprovechamiento del carbón permitió de igual forma obtener gases para la iluminación en ciertas ciudades (como gas de hulla).

Siglo XX:

Productos carboquímicos: Cuando el petróleo se encontraba en su auge, el carbono comenzó a ser utilizado en la fabricación de plástico, fertilizantes, medicamentos y otros productos químicos.






Carbono en la industria eléctrica: El carbón seguía siendo imprescindible como fuente primaria para producir electricidad en plantas termoeléctricas.

Grafito en baterías y lubricantes: El gráfico corresponde a una forma del carbono, empezó a usarse como lubricante, en la fabricación de baterías y de igual forma como material de los electrodos en procesos electroquímicos.





Acero y aleaciones: En la fabricación de acero y aleaciones de carbón es fundamental, los cuales han sido usados en la industria automotriz, construcción y otros sectores industriales.

2.2.2 Uso actual del carbón.

Energía eléctrica:

-  **Generación de energía eléctrica:** El carbón y los subproductos tienen una gran importancia en la generación de electricidad, principalmente en plantas térmicas.
-  **Residuos de combustión:** Cenizas volantes: Estas cenizas funcionan para la generación de subproductos como agregados para concreto y la construcción.
-  **Escoria de carbón:** Este material es imprescindible para la construcción de carreteras y cimentaciones.
-  **Carbón gasificado:** Gas sintético (Syngas): Comúnmente es usado como combustible para turbinas de gas.
-  **Hidrógeno derivado de la gasificación:** Aplicado en pilas de combustible para la generación de energía renovable.

Metalúrgica:




-  **Fabricación de metales:** En la industria metalúrgica utiliza principalmente el carbón y sus derivados como fuentes de energía y como agentes químicos para los procesos de producción de metales.
-  **Coque:** Como agente reductor en los altos hornos para la producción de acero.
-  **Electrodos de grafito:** Fabricación de acero en hornos de tipo arco eléctrico.
-  **Gas de coque:** Implementado como combustible en procesos metalúrgicos.

Cenizas volantes y escorias: Usados para las mezclas de concreto para la fabricación de estructuras metálicas.



Carboquímica:

Esta industria se centra en transformar el carbón en productos químicos y materiales avanzados, como los que se describen a continuación:






Líquidos:

-  **Alquitrán de hulla:** En la producción de tintes, plásticos y medicamentos.
-  **Líquidos combustibles (CTL):** En la obtención de diésel, gasolina y queroseno.
-  **Amoniaco y compuestos nitrogenados:** Para la fabricación de fertilizantes.

Gaseosos:

-  **Gas coque:** Para el desarrollo de síntesis química (metanol y amoniaco).
-  **Gas sintético (Syngas):** En la producción de hidrógeno y metanol.

Sólidos:

-  **Carbón activado:** Obtención de productos para la purificación de agua y aire.
-  **Briochar:** Como agente mejorador del suelo y ayuda en la captura de carbono.
-  **Grafito sintético:** Fabricación de electrodos y lubricantes.
-  **Fibras de carbono:** En la obtención de materiales ultraligeros para la aeronáutica y deportes.
-  **Grafeno:** Diseño y fabricación en materiales avanzados para dispositivos electrónicos.

2.2.3 Nuevos usos del carbón.

Aplicaciones tecnológicas:

Nanotecnología como Grafeno y nanotubos de carbono: Esos materiales son empleados precisamente en electricidad avanzada, dispositivos médicos y materiales que suelen ser ultra ligeros y resistentes.

Filtros de carbono activado: El carbón activado actualmente es usado ampliamente en los sistemas de purificación de agua y aire por tener capacidad de adsorber contaminantes.

Biomedicina y electrónica: El grafito y otros compuestos de carbono mantienen un alto potencial para avances en la biomedicina, tecnología flexible y sensores para dispositivos electrónicos.

Industria aeroespacial y automotriz: Las fibras de carbono son empleadas en materiales compuestos para la fabricación de piezas livianas y con alta resistencia para aviones, autos para competencia y otras aplicaciones.

Energía renovable y baterías de carbono: Dentro de su composición de las baterías de ion de litio, contienen grafito, lo cual, son esenciales en dispositivos móviles y vehículos eléctricos, de igual forma se sigue investigando en baterías de carbono para mejorar la capacidad de almacenamiento de energía.

De esta forma el carbón sigue siendo un elemento primordial que impulsa ampliamente desde tecnologías tradicionales hasta industriales en ciencia y tecnología avanzada. En la actualidad el carbón sirve de combustible para poder generar el 39% de energía eléctrica producida en el mundo y se espera que esta proporción será prácticamente la misma durante los próximos 30 años.

Materiales tecnológicos: Para fabricación de nanomateriales basados en carbón.

El carbón está siendo impulsado en el desarrollo de materiales tecnológicos avanzados, en forma de nanomateriales, a continuación, se describen algunas aplicaciones.

Nanotubos de carbono: Son nanopartículas con propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas, formadas por láminas de átomos de carbono enrolladas en forma de tubo. Caracterizadas por su resistencia y flexibilidad. Después de que Iijima identificara la estructura de los nanotubos, empezó

a tener aplicación en la industria aeroespacial, dispositivos electrónicos y refuerzos estructurales para la alta resistencia. (Iijima, 1991).

Grafeno: Corresponde a un material ultraligero y resistente con aplicaciones en electrónica, baterías de alta capacidad, filtros de purificación de agua y materiales inteligentes. Se obtiene a partir del grafito, un derivado del carbón, con propiedades como alta conductividad eléctrica y alta flexibilidad. (Bernal et al., 2019)

Fibras de carbono: Responden a materiales ultraligeros con una relación resistencia – peso superior al acero y es utilizada en la industria aeroespacial y automotriz, como para componentes estructurales en energías renovables (para turbinas eólicas para mejorar el rendimiento).

Briochar: Es el producto de la descomposición térmica de materiales orgánicos (biomasa) con escaso suministro de oxígeno, a temperaturas bajas y es destinado al uso agrícola. (Rebolledo et al., 2018) Rico en carbono, mediante un proceso llamado pirólisis (descomposición térmica en condiciones anóxicas o con poca oxigenación). Tiene diversas aplicaciones en la mejora del suelo, la mitigación del cambio climático y el almacenamiento de carbono. (Doku et al., 2011).

También puede ser producido a partir de distintos procesos termoquímicos como la pirolisis lenta, pirolisis rápida, gasificación y la carbonización hidrotermal. Su estructura y características lo mantienen en un material necesario ante solventar problemas ambientales como el tratamiento de aguas residuales o contaminadas, como filtro ante metales pesados o contaminantes químicos. El uso del briochar tiene gran impacto en la agricultura y en la remediación del suelo, mejorando la calidad y las propiedades, buscando reducir la contaminación del suelo, es algo que se viene estudiando con gran interés en las últimas décadas. (Pinos et al, 2021)

Fuente de almacenamiento geológico de CO₂.

El carbón juega un papel en la lucha contra el cambio climático que su historia ha originado a través de los años, a partir del almacenamiento geológico de dióxido de carbono (CO₂). Pero estudios han comenzado a tener relevancia por avance en:

Captura de CO₂ en plantas industriales: En este caso, el uso térmico, se filtran los gases para reducir contaminación, a partir de la captura postcombustión que permiten atrapar el CO₂ generado en centrales eléctricas y fábricas, antes de que lleguen a la atmósfera.

Inyección en formaciones geológicas: El CO₂ que ha sido capturado puede ser inyectado en capas de la Tierra a alta profundidad de composición porosa (Yacimientos de petróleo o acuíferos salinos), donde el CO₂ ha quedado almacenado de forma permanente.

En México se han realizado estudios significativos sobre el almacenamiento geológico de CO₂, desarrollado por la Secretaría de Energía (SENER) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Analizando el potencial de almacenamiento geológico de CO₂ en el país, evaluando diversas formaciones geológicas. Con el propósito de crear una herramienta para la planeación de proyectos y la atracción de inversiones, que se ha integrado junto a una plataforma digital en un sistema de información geográfica, para interesados en este tipo de proyectos. (SE, 2018)

Además de la Tecnología de Captura y Almacenamiento de CO₂ para uso en Recuperación Mejorada de Petróleo, en el cual, detalla los procesos de inyecciones de gases, especialmente CO₂ en formaciones carbonatadas o dolomíticas. (Montes Castillo, A. 2016)

El carbón ya no es solo un combustible fósil, su futuro está impulsado hacia la alta tecnología y en la mitigación del cambio climático. Avances cada vez más exhaustivos en nanomateriales de carbono están impulsando industrias como la electrónica, aeroespacial y energética, mientras que la captura y almacenamiento de CO₂ lo posicionan como un recurso clave en la transición a energías más limpias y un mundo más sostenible.

El almacenamiento geológico de CO₂ es una estrategia prometedora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque ya existen investigaciones en esta área, aún se requieren más estudios para mejorar la eficiencia, seguridad y viabilidad económica de estas tecnologías. Se espera que, en las próximas décadas, estos reservorios subterráneos puedan utilizarse de manera más efectiva para almacenar dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), contribuyendo significativamente a la lucha contra el cambio climático.

Hay que resaltar que el futuro del carbón dependerá de la integración adecuada en estos nuevos desarrollos tecnológicos y ambientales que sean propuestos, transformándolos en un recurso estratégico para la innovación y un ambiente sostenible.

Capítulo 3

Geología de la Cuenca Sabinas

3. Geología de la Cuenca Sabinas

3.1 Localización.

La cuenca de Sabinas se encuentra en el Noreste de México, específicamente en el estado de Coahuila, abarcando cierta porción de Nuevo León. Conocido como distrito carbonífero “Sabinas-Monclova”, la parte central de la cuenca Sabinas es ubicada en las coordenadas geográficas 27° 23’ 2” Latitud Norte y 101° 2’ 33” Longitud Oeste (Figura 2). Esta cuenca es conocida por las riquezas en recursos minerales, especialmente carbón y gas natural conocida una extensión de 37,000 km² (Robeck et al., 1956).

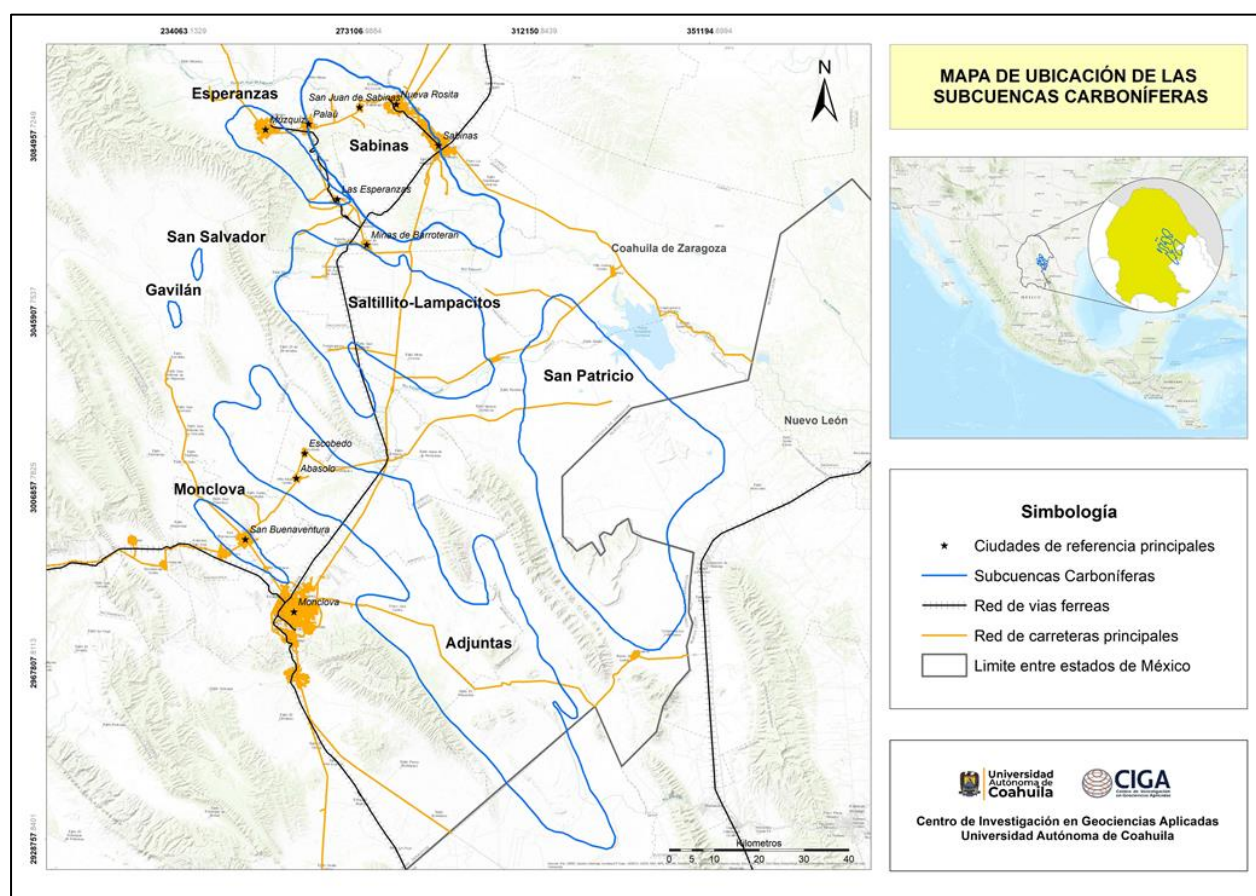


Figura 2. Mapa de ubicación de las subcuencas en la Región Carbonífera (tomado de Enciso-Cárdenas et al., 2024).

La cuenca de Sabinas se localiza principalmente en los municipios de Sabinas, Nueva Rosita, Múzquiz Y Piedras Negras, en Coahuila. El carbón se encuentra distribuido en 9 subcuencas (actualmente con la adición de Baluarte en 2011) designadas como: Esperanzas, Sabinas, Saltillo-Lampacitos, Adjuntas, San Patricio, Monclova, Gavilán, San Salvador y Baluarte, orientadas en

una dirección NW-SE que coincide con el sistema de fallamiento. (Flores Galicia, 1988; Corona-Esquivel et al., 2006; Rivera Martínez, 2011).

3.2 Geología general.

La cuenca de Sabinas fue formada durante el periodo Jurásico Superior y Cretácico, durante la apertura del Golfo de México, dentro de este territorio, inició la formación de un Rift continental hasta evolucionar en una cuenca Epinerítica, constituida principalmente a partir de sedimentos marinos del periodo Mesozoico, que fueron depositados mediante subsidencia o inundación al final del periodo Cretácico y parte del Paleógeno durante la Orogenia Laramide (66-40 m.a). La actividad tectónica y los procesos sedimentarios asociados dieron lugar a una serie de estructuras y formaciones geológicas ricas en recursos fósiles.

Estratigrafía: La cuenca presenta una secuencia de rocas sedimentarias que incluyen Lutitas, Areniscas, Calizas y, sobre todo, importantes mantos depositados de carbón.

Estructuras: Mediante la actividad tectónica de la región, dicha cuenca tiene una compleja estructura de fallas y pliegues. Destacan las fallas normales y de empuje (inversas), que se generaron durante las fases de compresión y extensión.

Mineralización: Además del material sedimentario como lo es el carbón, la cuenca alberga recursos como gas natural y minerales asociados, como Pirita y otros minerales de Azufre, debido al ambiente sedimentario reductivo en el que se encuentra.

3.3 Geología del área de estudio.

Formación Olmos.

Es una unidad geológica correspondiente al periodo Cretácico Tardío (Campaniano - Maastrichtiano), se encuentra principalmente en la cuenca Sabinas, en el estado de Coahuila, México. Conocida por su gran importancia como depósito de carbón mineral (formación del carbón), uno de los recursos energéticos más explotados en la región. El nombre de olmos fue asignado a partir de la estación ferroviaria de Bandera: Olmos, ubicada en superficie de la formación y del arroyo olmos, siguiendo el rumbo de la formación, cerca del centro de la zona de

afloramiento desde un punto a 7 u 8 millas al norte de Eagle Pass, hasta la confluencia del arroyo con el Río Grande. (Corona-Esquivel et al., 2006).

El espesor de esta formación varía a partir de mantos que son imperceptibles hasta 400 y 500 pies, consiste en Arcilla lutítica gris verdosa y Arcilla arenosa fina, interestratificada irregularmente con Arenisca gris verdosa, fina a gruesa, blanda a dura, de estratificación delgada a maciza, más o menos diastratificada, conteniendo algunas capas con ondulitas, mantos de carbón y lignito. Parece haber indicios de discordancia tanto en la base como en la cima de la formación Olmos. (Corona-Esquivel et al., 2006).

En la sección del Cedral, la zona del carbón tiene 36 m de espesor; consiste de un doble manto de carbón y localmente, dos o tres mantos lenticulares, de espesor delgado, arriba del del doble manto. El resto de la zona está compuesta por Argilitas en la base, que varían ascendente mente a limo y al final cambia a arena fina, en un horizonte, por lo regular indefinido.

Robeck et al. (1956): establecen cinco zonas para la Formación Olmos (no se definieron al grado de poder considerarlas como miembros de la Formación Olmos) Figura 3:

Zona 1.- Predominantemente arcillosa y suave que presenta un doble manto de carbón y otras capas carbonosas hacia arriba. Su espesor es de 36 m.

Zona 2.- Esta unidad puede ser reconocida en cualquier sección aun cuando sus características pueden variar, constituida por arenisca de estratificación cruzada, de grano fino a medio, mal clasificado, con estratos medianos a gruesos de color claro, pueden presentar limolita y lodolita interestratificada, así como gasterópodos y madera fósil. Esta zona es importante por su carácter índice debido a sus componentes; ya que es más resistente al intemperismo y está bien expuesto. En el rancho El Cedral presenta 86 m. de espesor.

Zona 3.- Tiene espesor de 31 m. medido en la sección en el rancho El Cedral y está constituida por limolita masiva. Sin embargo, casi no es posible observarlo por ser fácilmente erosionable.

Zona 4.- Tiene 148 m. de espesor en el rancho El Cedral y consiste de arenisca de grano grueso que gradúa a limolita y lodolita.

Zona 5.- Está compuesta por limolita y lodolita masivas y algo de limolita y arenisca de estratificación delgada. Tiene un espesor de 80 m.

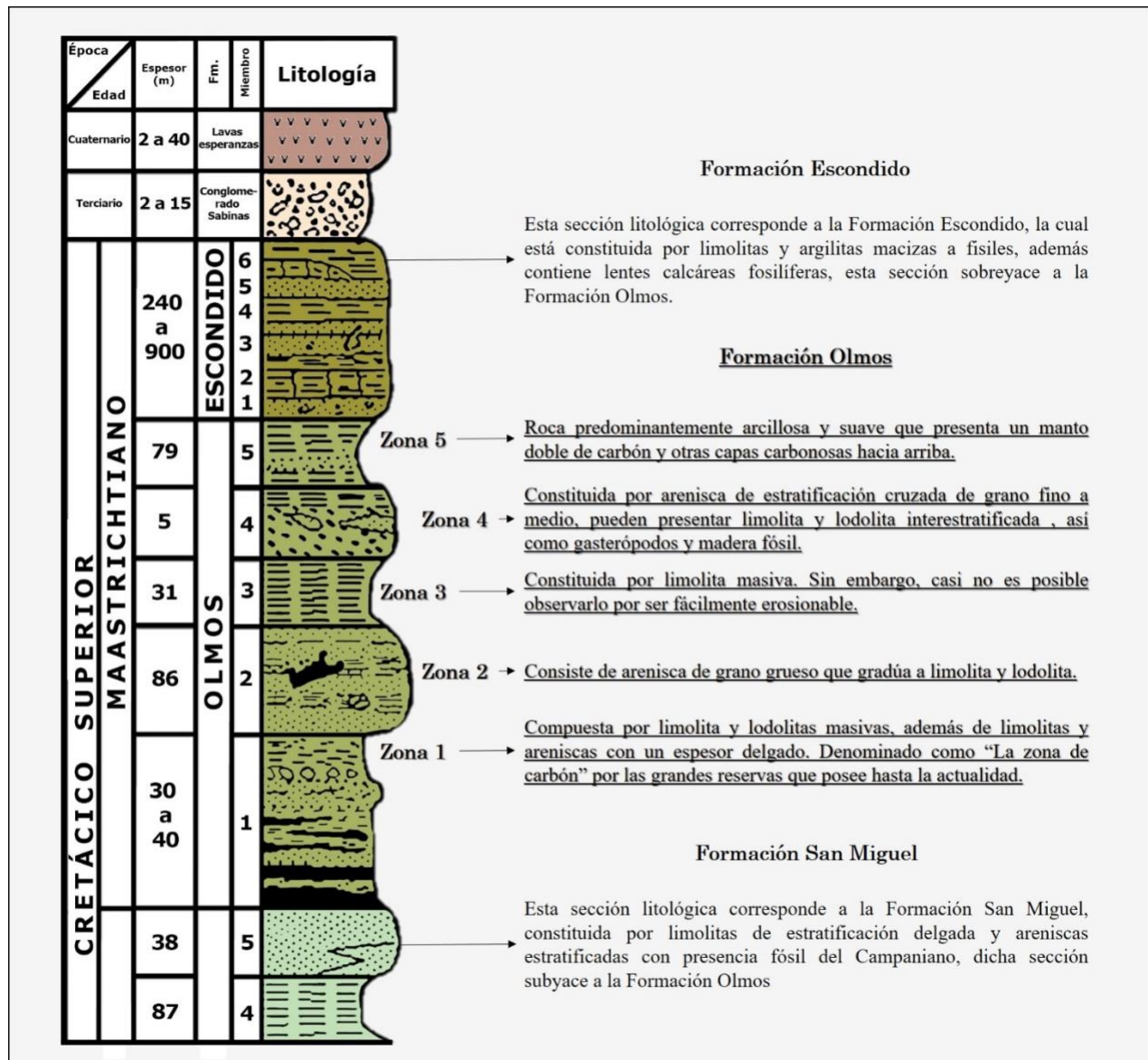


Figura 3. Columna estratigráfica de la Formación Olmos. (Modificado de: De la Rosa Rodríguez et al, 2023, COREMI, 2003)

Se distribuye ampliamente en las cuencas de Sabinas, Burgos, y Escondido al sur de Texas, E.U.A. Se han medido espesores mínimos de 10 m, a máximos de 378 m., y en promedio 175 m (Santamaría et al., 1990). Esta formación sobreyace a la Formación San Miguel (Grupo Taylor) y subyace a la Formación Escondido (Grupo Navarro).

Características geológicas de la formación Olmos:

Predominan areniscas finas a medias, con intercalaciones de lutitas en tonalidades grises a negras, laminadas, con un alto contenido en materia orgánica. Se presenta mantos de carbón de gran espesor, con una calidad variable pero explotables frecuentemente.



Ambiente de depósito:

Los estratos de la Formación Olmos son una mezcla de facies de ambiente marino somero y de frente deltaico, el carbón se encuentra en niveles estratigráficos más arriba de aquellos que la Formación Olmos presenta en Texas.

La Formación Olmos fue depositada en un ambiente deltaico y lagunas, en el cual se alternaban condiciones de sedimentación fluvial y marina somera. Las zonas pantanosas y lagunares asociadas al delta favorecieron la acumulación y preservación de materia orgánica, dando como resultado los mantos de carbón.



Espesor:

El espesor de la Formación Olmos varía entre 100 y 300 m, dependiendo de la zona dentro de la cuenca, Subyace a la Formación San Miguel, caracterizada por lutitas y areniscas, sobreyace a la Formación Escondido, unidad de lutitas y areniscas más jóvenes.



Fósiles:

Se han encontrado restos fósiles de plantas, que reflejan un ambiente tropical o subtropical. También se han hallado fósiles de invertebrados marinos en las facies más someras. En base al contenido faunístico *Exogyra costata*, *Sphenodiscus* sp., y gasterópodos y pelecípodos (Santamaría et al., 1990) se le ha asignado una edad de Cretácico Superior. Maastrichtiano Temprano-Medio.



Importancia económica:

La Formación Olmos es uno de los principales Yacimientos de carbón en México, el carbón de esta Formación es utilizado principalmente para la generación de energía eléctrica en plantas termoeléctricas, además se exploran recursos asociados, como el gas Metano de mantos de carbón y metales como Litio, entre otros. (Corona-Esquivel et al., 2006).

Capítulo 4

Desarrollo metodológico

4. Desarrollo metodológico.

La metodología propuesta para el desarrollo de este proyecto de tesis se estructura en cinco fases clave, orientadas a la caracterización y evaluación del carbón. Inicialmente, se llevará a cabo una campaña de muestreo para identificar zonas estratégicas dentro de cada una de ellas. Posteriormente, las muestras recolectadas serán preparadas para análisis físicos y químicos, seguido de su caracterización mediante técnicas analíticas de laboratorio. Con base a resultados que se esperan obtener, se evaluarán los posibles usos del carbón, finalizando con la obtención de compósitos que permitan una mejor comprensión de sus propiedades y asignarles la mejor aplicación de su uso en la industria energética, metalúrgica o carboquímica (Figura 4).



Figura 4. Metodología integrada a partir de 4 fases a ejecutar en el proceso.

4.1 Campaña de muestreo

En esta etapa se desarrolló una actividad inicial para identificar zonas estratégicas de muestreo para cada una de las Subcuencas.




Localización y acceso de Subcuencas





Se identificaron sitios de muestreo para realizar las gestiones y permisos de acceso a las obras mineras para la obtención de muestras de carbón para su caracterización. Esta actividad consistió en trabajo de gabinete para localizar los sitios de muestro más pertinentes, considerando vías de acceso y disponibilidad.

Es importante mencionar que, para el desarrollo de esta actividad, se seleccionaron afloramientos de mantos de carbón y obras mineras de cada Subcuenca. Posteriormente se realizaron los trámites formales de acceso a través del Centro de Investigación en Geociencias Aplicadas de la Universidad Autónoma de Coahuila CIGA-UAdeC. Y una vez concedidos los permisos de acceso, cada sitio fue despejado hasta llegar a la muestra de interés, esto con la finalidad de evitar tomar muestras alteradas por intemperismo u otros agentes en los depósitos donde se encuentra el carbón.

Muestreo.

Se desarrolló una actividad de muestreo en las 7 subcuencas, muestreando cada uno de los mantos que se observaron, las muestras fueron etiquetadas e identificadas para llevar un control durante la preparación y caracterización de muestras.

-  Para la subcuenca de Sabinas se identificaron 4 mantos de carbón para obtener muestras (SA-01-M1: 0.15 m), (SA-01-M2: 0.4 m), (SA-01-M3: 0.4 m) y (SA-01-M4: 0.4 m) con una potencia total de 1.35 m.
-  Se identificaron 5 mantos para la subcuenca Saltillo-Lampacitos (SL-01-M1: 0.4 m), (SL-01-M2: 0.35 m), (SL-01-M3: 0.3 m), (SL-01-M4: 1.53 m) y (SL-01-M5: 0.25 m), con un potencial total de 2.83 m.
-  En la subcuenca de Las Adjuntas se identificaron 2 mantos de carbón (AD-01-M1: 1.4 m) y (AD-01-M2: 0.15 m), junto a un potencial total de 1.55 m.

-  En la subcuenca de Las Esperanzas se identificaron 4 mantos de carbón, los cuales corresponden a los siguientes datos: (ES-01-M1: 1.3 m), (ES-01-M2: 1.2 m), (ES-01-M3: 0.25 m), (ES-01-M4: 0.64 m), y un potencial total de 3.39 m.
-  En la subcuenca de San Patricio se identificaron 8 mantos de carbón, los cuales corresponden a los siguientes datos: (SP-01-M2: 0.2 m), (SP-01-M3: 0.45 m), (SP-01-M4: 0.35 m), (SP-01-M5: 0.35 m), (SP-01-M6: 0.55 m), (SP-01-M7: 0.35 m) y (SP-01-M8: 0.25 m), con un potencial total de 2.5 metros.
-  Dentro de la subcuenca de Baluarte se identificó una muestra de carbón sin estratificación, se tomó muestra representativa de la subcuenca para poder realizar la caracterización y determinar la calidad del mismo.
-  Finalmente, la subcuenca de El Gavilán solo fue identificado 1 manto de carbón, el cual corresponde a (GAV-01-M1: 0.15 m) con un potencial total de 0.15 metros.

Identificación de las muestras.

La identificación de muestras de carbón es de suma importancia, esto para asegurar la trazabilidad y la representatividad del material que ha sido extraído de los mantos de carbón en cada subcuenca para realizar los análisis. El principal objetivo en esta etapa es garantizar que las muestras recolectadas reflejen las características de los mantos de carbón. El etiquetado de cada muestra debe estar con claridad con un código único que permita identificar lo siguiente:

Origen: Proveniente de mina, depósito, tajo, etc.

Fecha y hora: Específicamente de la toma de muestra.

Responsable de la toma de muestra.

Es imprescindible antes de la trituration, realizar una inspección visual y física para evaluar el tamaño y forma de las partículas, presencia de impurezas como rocas, metales o materia orgánica (raíces) y la coloración que puede indicar el tipo de carbón con el que se está trabajando.

4.2 Preparación de Muestras.

La preparación de muestras para análisis físicos y químicos se realiza con el objetivo de obtener información precisa y detallada sobre sus propiedades y calidad. Estos análisis son fundamentales para evaluar el carbón en términos de su potencial energético, utilidad en diferentes industrias y su impacto ambiental.

Las muestras de este proyecto fueron preparadas siguiendo rigurosamente la metodología interna del CIGA-UAdeC con base a la norma ASTM D2013-01. Con el objetivo de garantizar que las muestras obtenidas sean representativas y adecuadas para pruebas físicas y químicas posteriores, a partir de una reducción de tamaño, homogenización, trituration y división de muestras, como se describen a continuación.



Etapas I: Trituración de muestras

La trituración de las muestras de carbón mediante una trituradora constituye una etapa fundamental en su preparación para el análisis y preparación del material para las diferentes pruebas a las que el carbón será sometido. Este proceso permite obtener una granulometría homogénea, facilitando la evaluación de sus propiedades fisicoquímicas y su posterior clasificación según estándares de calidad.

En esta etapa, se toma la muestra representativa de manto de carbón previamente identificada, si el carbón tiene humedad excesiva, es necesario y de suma importancia secarlo para evitar variaciones y complicaciones en el proceso. Posteriormente se introduce el carbón dentro de la trituradora que contiene rodillo o martillos (Figura 5), los cuales son ajustados para lograr obtener un tamaño de partícula compatible con la malla 8 (la apertura de la malla corresponde a 2.38 mm). Las partículas trituradas deben ser menores o iguales a este tamaño para cumplir con los estándares requeridos para el análisis.



Figura 5. Quebrador Holmes modelo 401 XL Crusher.



Etapla II: Homogeneización

La homogeneización de la muestra, se realiza a través de un riffle y corresponde a un proceso clave para garantizar la representatividad en los análisis de laboratorio. Un riffle es un equipo utilizado para dividir y homogeneizar muestras de material particulado, uno de tamaño grande está diseñado para manejar mayores volúmenes de material, permitiendo la separación uniforme en múltiples porciones (Figura 6). Su funcionamiento consiste posicionando la muestra en la tolva que es abierta para deslizarse a través de ranuras o canales alternados que distribuyen el material en partes iguales hacia dos cajones posicionados en la parte inferior del riffle. Este proceso asegura que cada muestra de cada una de las subcuencas sea representativa del total, eliminando sesgos dentro de la composición.



Figura 6. Cuarteador (Utilizado para la homogenización de muestras).



Etapas III: Compósito

Un compósito de carbón es una mezcla homogénea ponderada, obtenida al combinar varias submuestras de carbón para representar un volumen más grande de material. El propósito de un compósito es crear una muestra representativa que refleje las propiedades promedio de un manto grande de carbón dividido por intercalaciones de otro material. Este procedimiento es imprescindible en situaciones donde el carbón puede tener variaciones significativas en su composición. Por ejemplo, contenido de azufre, cenizas u poder calorífico, esto por, diferentes capas geológicas en el yacimiento y heterogeneidad en el proceso o almacenamiento.

Los compósitos de cada una de las muestras representativas para cada subcuenca fueron conformados en base a la información obtenida durante el levantamiento de datos en la etapa de muestreo (punto 4.1.2).

Considerando el espesor de cada manto, la potencia total y su representación ponderada para generar una mezcla de carbón con el porcentaje representativo de cada manto y para cada subcuenca, como se describe a continuación (Tabla 1).

Tabla 1. Compósitos de cada muestra por subcuenca de Sabinas.

Subcuenca	Clave	Espesor (m)	Ponderación (%)	Muestra (g)
Sabinas	SA-01-M1	0.15	11.11	111.11
	SA-01-M2	0.4	29.63	296.30
	SA-01-M3	0.4	29.63	296.30
	SA-01-M4	0.4	29.63	296.30
Total		1.35	100	1,000
Esperanzas	ES-01-M1	1.3	38.35	383.48
	ES-01-M2	1.2	35.40	353.98
	ES-01-M3	0.25	7.37	73.75
	ES-01-M4	0.68	18.88	188.79
Total		3.39	100	1,000
San Patricio	SP-01-M2	0.2	8.00	80
	SP-01-M3	0.45	18.00	180
	SP-01-M4	0.35	14.00	140
	SP-01-M5	0.35	14.00	140
	SP-01-M6	0.55	22.00	220
	SP-01-M7	0.35	14.00	140
	SP-01-M8	0.25	10.00	100
Total		2.5	100	1,000
Adjuntas	AD-01-M1	1.4	90.32	903.23
	AD-01-M2	0.15	9.68	96.77
Total		3.39	100	1,000

Saltillito-Lampacitos	SL-01-M1	0.4	14.13	141.34
	SL-01-M2	0.35	12.37	123.67
	SL-01-M3	0.3	10.60	106.01
	SL-01-M4	1.53	54.06	540.64
	SL-01-M5	0.25	8.88	88.34
Total		2.83	100	1,000
El Gavilán	GAV-01-M1	0.15	100	1,000
Total		0.15	100	1,000
Baluarte	BA-01-M1	.50	100	1,000
Total		.50	100	1,000

Para cada subcuenca se realizó un compósito de 1kg de muestra, representada en peso, tomando en consideración el porcentaje equivalente al espesor del manto respecto la potencia total de carbón en cada punto de muestreo.



Etapas IV: Pulverización de muestras

La pulverización de muestras se lleva a cabo mediante el pulverizador 500 DG a malla 60 (Figura 7), es una etapa esencial en la preparación de las muestras, este proceso asegura que el material tenga un tamaño de partícula uniforme y suficientemente fino para cumplir con los requisitos de la Norma ASTM. La malla 60 es referida al tamaño de las aperturas dentro del tamiz, lo cual, su apertura corresponde a 0.250 mm, el carbón pulverizado debe tener partículas que pasen completamente por el tamaño de malla para cumplir con los estándares requeridos.



Figura 7. Pulverizador 500 DG (La muestra es quebrada por medio de unos martillos internos que giran a 10,000 rpm.

El proceso de pulverización corresponde al siguiente: Si el carbón contiene humedad, es necesario secarlo previamente para evitar aglomeraciones durante la pulverización. Las muestras deben ser previamente trituradas (en este caso por malla 8) para facilitar la pulverización, el equipo que pulveriza tiene anillos o discos los cuales son diseñados para producir las partículas finas.

Se coloca la muestra triturada dentro del pulverizador, operando el equipo hasta obtener un polvo o hasta que toda la muestra haya pasado por la malla 60 (0.250 mm). Se debe considerar que las partículas más grandes que no pasan deben ser reprocesadas.



Etapa V: Cuarteo para obtener muestra representativa

El cuarteo es un procedimiento de reducción de muestra en el cual el material es dividido en partes iguales para obtener una submuestra que sea representativa sin alterar su composición. A través del cuarteo manual (método tradicional), la muestra previamente triturada y pulverizada se extiende en una superficie de metal limpia y lisa formando un círculo, la muestra se divide en cuatro partes

iguales, generalmente dibujando una cruz en el centro (Figura 8). Posteriormente dos cuartos opuestos se recogen para continuar con el análisis, y los otros dos restantes son descartados (en este caso almacenados como testigos), si la cantidad de muestra sigue siendo grande, se puede repetir el proceso hasta alcanzar el peso deseado.

Su importancia radica en evitar sesgos en la composición de la muestra, garantizando que componentes como ceniza o azufre estén distribuidos uniformemente, minimizando los errores para los futuros análisis, debido a que, al obtener una submuestra representativa, los resultados analíticos reflejan con mayor precisión las características del lote total.



Figura 8. Procedimiento de cuarteo en material sedimentario (carbón).



Etapas VI: Recuperación de muestras

La recuperación de muestras posterior al cuarteo es un paso crucial e importante para garantizar que el material que ha sido seleccionado para análisis o almacenamiento pueda conservar su integridad y representatividad. Este proceso asegura que las muestras obtenidas tras el cuarteo sean manejadas adecuadamente para evitar contaminaciones, pérdidas o alteraciones.





El almacenamiento de la muestra recuperada debe contener un registro y etiquetado, contar con un código único de identificación, fecha de muestreo, origen y el propósito de análisis siguiente. Puede existir un almacenamiento temporal o a largo plazo, controlados para auditorías o ensayos futuros.

La importancia de la recuperación de muestras radica en garantizar la representatividad del manto original, evitar contaminación como polvo, humedad externa o sustancias químicas que alteren los resultados, preservar la integridad de las muestras, debido a que algunas propiedades del carbón, como la humedad inherente o el poder calorífico, pueden verse afectados si la muestra no se maneja correctamente, y la trazabilidad o el cumplimiento normativo. Una correcta identificación y recuperación asegura la trazabilidad completa de la muestra, cumpliendo con normativas internacionales.

4.3 Caracterización de muestras.

Refiere al conjunto de procedimientos y técnicas analíticas de laboratorio que se utilizan para determinar propiedades, en este caso físicas y químicas. Este proceso es crucial en industrias ya que es posible proporcionar información detallada para evaluar la calidad, rendimiento y viabilidad del material extraído en mantos.





Factores a tener en cuenta antes de iniciar la caracterización:

-  Representatividad de la muestra: La muestra debe ser representativa del lote completo para obtener resultados confiables.
-  Equipos y software calibrados: Todos los equipos a utilizar deben estar calibrados para garantizar precisión en resultados, como hornos, bombas y analizadores.
-  Condiciones ambientales: como la humedad y temperatura que sean controladas dentro del laboratorio, ya que factores ambientales pueden alterar los resultados, especialmente en análisis de humedad y compuestos volátiles.
-  Seguridad y manejo de muestras: contar con equipo de protección personal (EPP) y minimizar la contaminación entre muestras.

Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés ASTM. Es una organización de normas internacionales en todo el mundo para mejorar la calidad de los productos, mejorar la salud y la seguridad. (ASTM International).

Norma ASTM D388: Para la clasificación de los distintos tipos de carbón, es utilizada la Norma ASTM D388. Esta Norma establece un sistema para clasificar los carbones según sea su rango (grado de metamorfismo), basado en parámetros como contenido de materia volátil, poder calorífico y contenido de carbono fijo. Esta metodología nos ayudará a obtener los resultados de compósitos pertinentes para la clasificación en resultados del capítulo 5.

Su importancia radica en los siguientes puntos descritos:

-  Ayuda en la estandarización para su uso industrial y energético.
-  Facilita la comparación y selección del carbono más adecuado para cada aplicación y uso.
-  Es utilizada en la industria del carbón, minería y generación de energía para clasificar y evaluar la calidad del carbón.
-  Y permitir comparar el carbón de las diferentes subcuencas con base a sus características fisicoquímicas que serán analizadas.

A continuación, se describen la metodología que sigue el laboratorio de carbón dentro del Centro de Investigación en Geociencias Aplicadas (CIGA) con base a la Normas ASTM para la determinación de análisis físicos y químicos.



Análisis físicos.

También conocidos como análisis inmediatos, consisten en la determinación de humedad y aquellos parámetros físicos que están relacionados con el índice de hinchamiento y la densidad específica del carbón que se describen a continuación:

Estas pruebas de análisis se especifican bajo el procedimiento de las Normativas ASTM que serán descritas a continuación. Cada uno de estos parámetros que son medidos tienen importancia relativa

para los análisis de calidad en el carbón. El control de la calidad de las muestras de carbón se realizará mediante pruebas rigurosas estándar que determinarán propiedades como el contenido de carbono fijo, la cantidad de materia volátil, poder calorífico, la humedad, ceniza, contenido de azufre, entre otros. Estos parámetros son fundamentales para clasificar el carbón según su idoneidad para las diferentes aplicaciones industriales que se mencionan en este proyecto de tesis, como el sector energético, metalúrgico y la carboquímica. Además, cabe resaltar que el análisis de estos parámetros permitirá evaluar su impacto ambiental, específicamente en términos de emisiones contaminantes y su eficiencia de combustión, lo cual, resulta clave para cumplir con normativas ambientales vigentes.

Reiterando con anterioridad, las pruebas que se realizarán serán bajo condiciones específicas que aseguran la reproducibilidad y fiabilidad de los resultados siguiendo los procedimientos estipulados y detallados en las normas ASTM aplicables y mencionadas.

Determinación de humedad:

Humedad total: Corresponde a la suma de la humedad superficial e inherente.

Humedad inherente: Se refiere al agua retenida dentro de la estructura porosa del carbón.

La determinación de humedad en análisis inmediato es bajo la Normativa ASTM D3173-03, el cual es un método estándar para determinar la cantidad de humedad presente en una muestra de análisis de carbón o coque, donde se toma la muestra representativa, en este caso previamente ya pulverizada (<60 malla), 1 gramo de muestra se coloca en un horno a una temperatura de 105 +/- 5°C durante 40 minutos o hasta alcanzar el peso constante. El secado elimina la humedad superficial e inherente.

El cálculo de la humedad se expresa como porcentaje respecto al peso original de la muestra:

$$\text{Humedad (\%)} = \left(\frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \right) \times 100 \quad \text{(Formula ASTM D3173-03)}$$

Índice de hinchamiento (Free Swelling Index, FSI)

Evalúa la capacidad del carbón para expandirse o hincharse al ser calentado en ausencia de aire. El procedimiento está referido bajo la Normativa ASTM D720, la norma establece un método para determinar el índice de hinchamiento libre (Free-Swelling Index por sus siglas en inglés) del material sedimentario como el carbón, el cual medirá su capacidad de expansión al momento de ser sometido al calentarse en ausencia de aire. A partir del procedimiento, donde la muestra de carbón (1 gramo) previamente pulverizada es calentada en un horno cerrado a 950 °C durante 5 minutos (Figura 10).

Una vez terminado el proceso, se observa y mide el residuo carbonoso (Coque) formado, comparando la forma y el volumen del residuo con un estándar visual impreso de referencia (Tabla de rangos FSI, Figura 9). Después de comparar la muestra con los estándares, se le asigna un valor de índice de hinchamiento entre valores de 0 y 9 (escala de 6-9, corresponde a un hinchamiento alto, donde el carbón es altamente coquizable, ideal para la industria siderúrgica). Este índice es imprescindible debido a que indica la capacidad del carbón de los mantos para formar un Coque cohesivo y de buena calidad.

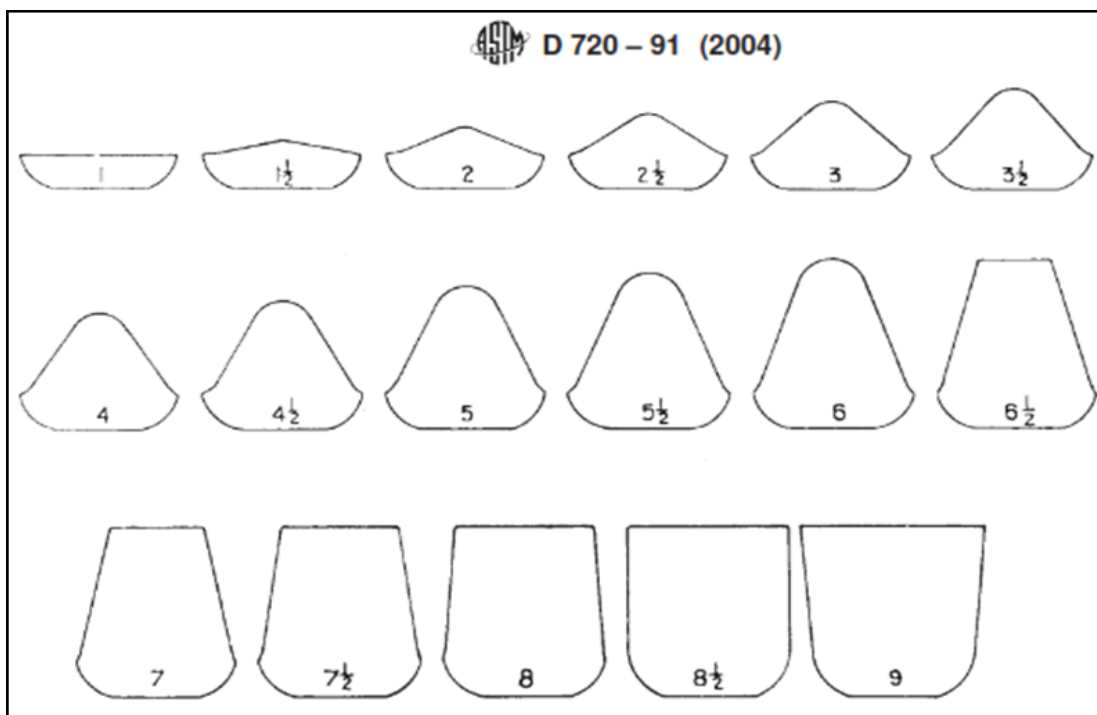


Figura 9. Tabla de perfiles estándar escala 1:1 según ASTM D-720-10 para la determinación del F.S.I. (figura tomada de Martínez Hernández, 2021).

Nuestro principal objetivo dentro de este proceso es evaluar la propiedad coquizable que tiene las muestras de carbón (la capacidad que tiene el material sedimentario para formar coque solido al calentarse) y poder clasificar los carbones en función de su comportamiento térmico.



Figura 10. Equipo para la determinación de FSI (Índice de expansión del carbón).

Densidad:

La Norma ASTM D2854 establece cómo determinar la densidad aparente del carbón activado sólido en forma granular o pulverizada, y es usada para determinar su densidad aparente, considerando tanto la masa como el volumen total de la muestra. Carbones más densos tienden a ser más eficientes en procesos de combustión, ya que contienen más material por unidad de volumen, lo cual, influye fundamentalmente en las distintas aplicaciones industriales, como en el almacenamiento, transporte, eficiencia de procesos de combustión, adsorción de gases y líquidos.

Este procedimiento consiste en llenar un recipiente de volumen conocido (matraz aforado) con carbón, sin hacer una compactación sobre el material, y posteriormente determinar la masa de la muestra. La densidad aparente se calcula dividiendo la masa del carbón entre el volumen del recipiente. (ASTM D2854).

Densidad aparente: es la relación de la masa del carbón con el volumen total, incluyendo los poros y espacios vacíos. Bajo la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad aparente} = \text{Masa del carbón (gr)} / \text{Volumen total (cm}^3\text{)} \quad \text{(Formula ASTM - D2854)}$$

Densidad real: Es considerado solo la masa del carbón respecto al volumen de la materia sólida, excluyendo los poros. Puede ser medido con métodos como la picnometría y bajo la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad real} = \text{Masa del carbón (gr)} / \text{Volumen sólido (cm}^3\text{)} \quad \text{(Formula ASTM - D167)}$$



Análisis químicos.

También definidos como análisis próximos, son los que consiste en la determinación de humedad secada mediante un uso de estufa, ceniza, materia volátil, determinación de azufre, poder calorífico y carbón fijo, que se realizan a partir de las propiedades químicas que tiene el carbón de manera individual.

Humedad:

El contenido de humedad es determinado bajo la normativa ASTM D3173-03 que establece un método estándar para determinar la cantidad de humedad presente en la muestra seleccionada de análisis de carbón. A través de una secadora Precision Quincy Corporation G2-08025 (Figura 11), secando una pequeña cantidad muestra de carbón representativa (1 gr) durante 40 minutos hasta $107 \pm 4^{\circ}\text{C}$ (en una atmosfera libre de humedad hasta alcanzar un peso constante). La pérdida en el peso de la muestra respecto al porcentaje de la muestra original es reportada como contenido de humedad.

la importancia de esta normativa radica en que la humedad en el carbón puede influir en los resultados de poder calorífico, afectando su calidad y eficiencia como combustible para un posible posicionamiento a un sector industrial.



Figura 11. Estufa para el secado de muestras para análisis de humedad total de carbón.

Ceniza:

La ceniza medida en el análisis próximo representa la parte de la materia mineral que resta tras la degradación térmica de la muestra por combustión, bajo la normativa ASTM D3174-12 (2020), dicha norma describe el procedimiento para determinar el contenido de cenizas en muestras de carbón y coque mediante calcinación en horno a alta temperatura. La muestra de 1 gr del carbón se quema completamente a $725 \pm 25^\circ \text{C}$ mediante una mufla en un tiempo aproximado de 2 horas 30 minutos (Figura 12). El residuo obtenido es el contenido de ceniza analizado.

El contenido de cenizas de los mantos de carbones puede variar significativamente de un manto a otro, tanto de forma vertical como horizontal. Es por ello que su principal objetivo de este proceso es medir la cantidad de residuos minerales que han quedado posterior a la combustión del carbón o coque y evaluar la calidad del combustible analizado, además de su potencial para su aplicación en diferentes industrias.

$$\% \text{ Ceniza} = \frac{\text{Peso de las cenizas}}{\text{Peso de la muestra original}} \times 100 \quad \text{(Formula ASTM - D3174-12)}$$



Figura 12. Estufa modelo 10GC para análisis de ceniza.

Materia volátil:

La materia volátil se determina mediante la descomposición térmica sin oxidación, a partir de 1 gramo previamente triturado a malla <60 a 950 ± 20°C durante 7 minutos en un horno de mufla bajo la normativa ASTM D3175, la cual, detalla el procedimiento para determinar el contenido de materia volátil en muestras de carbón, excluyendo la humedad. La materia volátil y el carbono fijo del análisis proximal se utilizan para especificar los rangos en los carbones.

Este análisis es fundamental en la caracterización del combustible y su clasificación, además de que su objetivo es cuantificar el contenido de materia volátil en una muestra de carbón mediante calentamiento controlado con el propósito de clasificar los carbones de acuerdo a su reactividad y la composición química que mantiene el material sedimentario como lo es el carbón.

$$\% MV = (Peso\ inicial - Peso\ final) / Peso\ inicial \times 100$$

(Formula ASTM
- D3175)

Análisis elemental - Determinación de azufre:

Este método estándar es aplicable bajo la Norma ASTM D4239, la cual establece un método para determinar el contenido total de azufre dentro de la muestra de carbón analizada mediante la combustión en un horno de tubo a alta temperatura y es clave en el análisis químico del carbón, ya que, el contenido de azufre influye en su calidad y en el impacto ambiental, debido a que SO_2 es liberado. El método para la determinación de azufre es a través del método espectral por combustión, en un equipo Leco Analyzer SL-144DR, el cual, es un instrumento automático/manual de lectura directa para la determinación de, contenido de azufre en carbones (Figura 13). Se realiza por combustión a partir de 0.12 g de muestra a 1,350 °C en una corriente de oxígeno para oxidar el azufre.



Figura 13. Determinador de azufre marca Leco modelo SC-144DR.

Poder calorífico (PC):

Corresponde a la cantidad de calor, expresada en Megajulios por Kilogramo (MJ/Kg) o Kilocalorías por Kilogramo (Kcal/Kg) que se libera al quemar una cantidad de masa de combustible. Un poder calorífico alto indica un carbón de mejor calidad energética, este método es aplicable bajo la Normativa ASTM D5865 que establece el método de prueba estándar para la determinación del valor calorífico del carbón mediante calorimetría de una bomba.

El proceso se lleva a cabo, a partir de Calorimetría de Bomba, donde una pequeña muestra de carbón (1 gramo) se quema dentro de una cámara sellada (bomba calorimétrica) sumergida en agua, Calorímetro AC-500 (Figura 14). Es medido el incremento de temperatura del agua para calcular el calor que ha sido liberado.

La determinación precisa de este paso es esencial para aplicaciones como la Industrial y energética, garantizando eficiencia y cumplimiento con los estándares de calidad, ya que evalúa la eficiencia energética del material carbonoso y la calidad del combustible, para posteriormente obtener un cumplimiento ante regulaciones en la industria del carbón y coque.

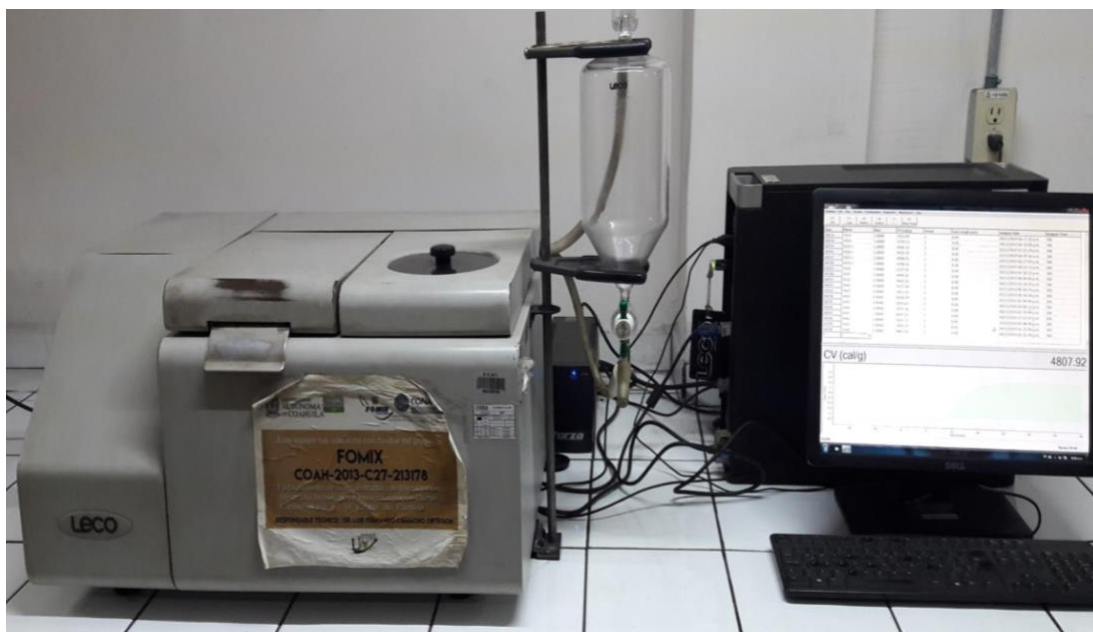


Figura 14. Calorímetro AC-500 y equipo de cómputo para medición el poder calorífico (trabaja con oxígeno y agua destilada)

Carbón fijo:

Es el contenido de carbón no volátil que queda en el carbón después de que se ha eliminado la humedad y materias volátiles. Corresponde a la parte del carbón que arde lentamente, proporcionando calor durante más tiempo, teniendo mayor impacto en la Industria y lo energético.

Método para determinar el carbón fijo: el carbón fijo no se mide directamente, si no, a partir del análisis inmediato, debido a que, el carbono fijo se calcula por diferencia, restando los valores obtenidos de humedad, ceniza y material volátil que serán multiplicados por cien, bajo la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Carbono fijo} = 100\% - (\text{Materia volátil \%} + \text{Cenizas \%} + \text{Humedad \%}) \quad (\text{Formula ASTM - D3172})$$

Este análisis se realiza siguiendo la Norma ASTM D3172 que establece los métodos generales para los análisis próximos o inmediatos del carbón, es decir, la determinación de humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas en las muestras de carbón.

4.4 Evaluación de los usos del carbón

En esta etapa se analizarán los resultados del carbón y se evaluará su uso más apropiado, considerando las características para la industria de la generación eléctrica, metalúrgica, carboquímica y subproductos.

A continuación, se detallan los parámetros de las propiedades del carbón (Tabla 2) que deben ser consideradas para el tipo de industria al que se puede orientar a partir de la siguiente tabla:

Tabla 2. Características que debe cumplir el carbón ante la demanda de la industria energética, metalúrgica y carboquímica.

Características - Propiedades	Energía eléctrica	Metalúrgica	Carboquímica
Humedad (%)	<15 %	<10 %	<10 %
Ceniza (%)	<10 %	<8 %	<10 %

Azufre (%)	<1 %	<1 %	<1 %
Poder calorífico (MJ/Kg)	>20	>30	>25
Materia volátil (%)	25 - 30%	20 - 30%	20 - 45%
FSI	No aplica	>5	No aplica
Contenido de carbón fijo	50 - 70%	>70 %	60 - 70%

Cada una de estas industrias demanda características específicas sobre el carbón que determinan su uso más óptimo y apropiado, la carboquímica prioriza un alto contenido de materia volátil para generar líquidos y gases, mientras que la industria metalúrgica necesita carbones con capacidades de coqueificación y para la generación de energía eléctrica requiere carbón con un poder calorífico elevado y un bajo contenido de azufre para poder cumplir con estándares ambientales que regulan a cada industria.

Capítulo 5

Resultados y Discusión.

5. Resultados y discusión

En esta sección de capítulo se presentan los resultados de la caracterización de las muestras (compósitos) con la finalidad de desarrollar una discusión de los resultados obtenidos de la información generada durante la fase inicial correspondiente a la recolección de muestras del trabajo hecho en campo, los cuales corresponden a los análisis físicos (inmediatos) y químicos (próximos), llevando a cabo un control estricto dentro de la metodología para obtener resultados óptimos y confiables.

5.1 Resultados de caracterización de muestras

En esta sección de capítulo se presentan los resultados de la caracterización de las muestras (compósitos) con la finalidad de desarrollar una discusión de los resultados obtenidos de la información generada durante la fase inicial correspondiente a la recolección de muestras del trabajo hecho en campo, los cuales corresponden a los análisis físicos (inmediatos) y químicos (próximos), llevando a cabo un control estricto dentro de la metodología para obtener resultados óptimos y confiables.

Los porcentajes de ceniza presentan un valor mínimo de (18.45 %) por la muestra (ES-01-Co) y como valor máximo de (57.76 %) por la muestra (AD-01-Co), correspondiente a la Subcuenca Adjuntas, el promedio de las muestras es de (30.87 %).

En cuanto al parámetro del azufre, se registró un valor mínimo de (0.06 %) por la muestra (GAV-01-Co) de la Subcuenca El Gavilán y como valor máximo (1.85 %) para la muestra (SP-01-Co) de la Subcuenca San Patricio, con un promedio de (0.92 %).

El poder calorífico en la muestra (GAV-01-Co) indica como valor mínimo de (2,407 Cal/g) de la Subcuenca El Gavilán, mientras que la muestra (ES-01-Co) reporta un valor como máximo de (6,992 Cal/g) de la Subcuenca Las Esperanzas. El promedio de las muestras corresponde a (5,427.25 Cal/g).

La materia volátil en la muestra (AD-01-Co) indica un valor mínimo de (12.79 %) mientras que la muestra (GAV-01-Co) reporta (33.46 %) como valor máximo, el promedio de las muestras es (22.18 %)

El parámetro de FSI registró (0.00) como valor mínimo o nulo de la muestra (GAV-01-Co) de la Subcuenca El Gavilán y como valor máximo (7.00) de la muestra (ES-01-Co) de la Subcuenca (Las Esperanzas), con un promedio de (3.81) correspondiente a FSI.

Para el parámetro de Densidad se registró un valor mínimo de (1.41 %) de la muestra (ES-01-Co) de la Subcuenca Las Esperanzas y máximo de (2.01 %) de la muestra (AD-01-Co) de la Subcuenca Las Adjuntas, con un promedio de (1.60 %).

Finalmente, los porcentajes de Carbón fijo presentan un valor mínimo de (24.47 %) para la muestra (GAV-01-Co) que corresponde a la Subcuenca El Gavilán, como valor máximo de (61.80 %) de la muestra (ES-01-Co) correspondiente a la Subcuenca Las Esperanzas y con un promedio (46.94 %) de carbón fijo (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados de compósitos a partir de análisis físicos y químicos en muestras de carbón.

Subcuenca	Muestra	Humedad total	Ceniza	Azufre	Poder calorífico	Materia volátil	FSI	Densidad	Carbón fijo
		(%)	(%)	(%)	(Cal/g)	(%)		(g/cm3)	(%)
Sabinas	SA-01-Co	0.81	24.67	1.12	6,378	25.52	6.00	1.52	49.81
Saltillito-Lampacitos	SL-01-Co	0.63	23.03	1.17	6,557	20.92	6.50	1.50	56.04
Adjuntas	AD-01-Co	0.77	57.76	0.74	3,104	12.79	1.00	2.01	29.45
Las Esperanzas	ES-01-Co	0.68	18.45	1.23	6,992	19.76	7.00	1.41	61.80
San Patricio	SP-01-Co	1.24	27.14	1.85	5,952	24.12	4.50	1.43	48.74
Baluarte	BA-01	1.92	28.76	0.58	5,890	20.02	2.50	1.55	51.22
El Gavilán	GAV-01-Co	20.20	42.07	0.06	2,407	33.46	0.00	1.90	24.47
Promedio		3.75	31.70	0.96	5,325.71	22.37	3.93	1.62	45.93

5.2 Discusión de resultados.

De acuerdo a los resultados proporcionados por la tabla anterior (tabla 3), podemos discutir lo siguiente:

La subcuenca de Sabinas, con un valor de Ceniza a (24.67 %), un Poder calorífico de (6,378 Cal/g) y un FSI de (6), de acuerdo a estos valores en los parámetros de Ceniza, Poder calorífico y FSI (Índice de hinchamiento), podemos deducir que tiene un comportamiento más apropiado para la Coquización y su utilización en la industria Metalúrgica.

La Subcuenca de las Adjuntas, a comparación de las dos Subcuencas anteriores, tiene una deficiencia en los parámetros de FSI (1) y Poder calorífico (3,104 Cal/g), mientras que su porcentaje de Ceniza más elevado, con un valor de (57.76 %). Por lo cual, analizando sus demás propiedades, con un Carbón fijo de (29.45 %), Materia volátil al (12.77 %) y una baja Humedad (0.77 %), es posible clasificar este carbón como Térmico y utilizar producto en la industria para la generación de Energía eléctrica.

La Subcuenca Las Esperanzas tiene propiedades más altas (Poder calorífico y FSI) a comparación de las otras 6 Subcuencas, tiene Ceniza con un porcentaje de (18.45 %), Poder calorífico de (6,992 Cal/g) y un FSI a (7.00) siendo este el valor mayor, por lo cual, estas propiedades hacen inmediatamente tener un comportamiento más apropiado para la Coquización y su utilización en la industria Metalúrgica, debido a su alto poder calorífico, indispensable para los altos hornos.

La Subcuenca de San Patricio tiene propiedades que es posible asignarle un uso distinto de los ya mencionados. Dicha Subcuenca, tiene un porcentaje de Ceniza equivalente a (27.14 %), un FSI a (4.50) y un Poder calorífico de (5,952 Cal/g), lo cual, es equivalente a (24.92 MJ/Kg), siendo este último valor el que podría asignarle un uso adecuado, debido a que en la industria Carboquímica requiere un Poder calorífico (>25 MJ/Kg), esto junto a los demás parámetros, hacen que el carbón de la Subcuenca San Patricio sea más apropiado para la Carboquímica y el desarrollo de subproductos.

Para la Subcuenca Baluarte, a partir de la muestra analizada, (BA-01) tiene un valor de Ceniza de (28.76 %), un Poder calorífico de (5,890 Cal/g), lo cual corresponde a (24.65 MJ/Kg), Materia volátil (20.02 %), un FSI de (2.50) siendo un valor bajo y un Carbón fijo de (51.22 %). De acuerdo

al comportamiento de sus valores, para la Subcuenca Baluarte, el carbón es más apropiado para la industria Carboquímica y Subproductos, debido a que no es indispensable para este sector un valor determinado de FSI, además que los demás valores cumplen con sus propiedades especificadas en la Tabla 2, a excepción de Carbón fijo, que para clasificarlo en la industria Carboquímica es indispensable que sus valores (CF) se encuentre entre 60 y 75 % según tabla 2. Lo cual es importante sugerir en base al parámetro de Ceniza, implementar un lavado al carbón de la Subcuenca Baluarte, con el propósito de reducir el porcentaje de Ceniza y así impulsar a valores más altos y propios de carbón fijo que son requeridos en la industria Carboquímica.

Por último, la Subcuenca El Gavilán, con la muestra (GAV-01-Co), muestra valores en relación a Ceniza de (42.07 %), siendo este valor el más alto de las demás Subcuencas, al igual que con el parámetro de Materia volátil (33.46 %), cabe mencionar que parámetros como Poder calorífico de (2,407 Cal/g), un FSI con valor a (0.0) y un Carbón fijo de (24.47 %), a comparación de las Subcuencas restantes, estos valores corresponden a los más bajos (Poder calorífico, FSI y Carbón fijo).

Sin embargo, su humedad es el valor más alto (20.20 %), sería imprescindible proponer un lavado al carbón de la Subcuenca El Gavilán para así obtener un producto más óptimo y representativo, de acuerdo a sus valores (después del lavado) obtener un comportamiento más apropiado para su utilización como Carbón Térmico y una clasificación para la industria energética (generación de energía eléctrica).

Considerando el escenario anterior, podemos establecer los siguientes criterios para establecer 3 compósitos generales a nivel regional, como se describen a continuación, tomando como referencia las Reservas Exploradas por el Consejo de Recursos Minerales (COREMI, 1993).

Subcuencas para uso térmico:

Las subcuencas las Adjuntas y El Gavilán tiene una extensión total de 2,277.00 km², conjugan un potencial de reservas totales de 155,146,113.00 (solamente la subcuenca Las Adjuntas que cuenta con datos de reservas, la subcuenca El Gavilán que es el único con datos de recursos no explorados) y para estas subcuencas, Las Adjuntas representa el 98.37% y El Gavilán 1.62 %, lo cual, ambos aportan el 100% total. (Tabla 4), (Enciso-Cárdenas et al., 2024).

Tabla 4. Reservas y recursos de las Subcuencas Las Adjuntas y el Gavilán.

Subcuenca	Extensión (Km ²)	Reservas	Recursos no explorados	Porcentaje (%)
Las Adjuntas	2,268	152,626,113	-	98.38
El Gavilán	9	-	2,520,000	1.62
Total	2,277	152,626,113	2,520,000	100
Total de Reservas y Recursos no probados	-	155,146,113	-	-

Considerando los valores de representación porcentual para estas Subcuencas (Las Adjuntas y El Gavilán), el compósito para este uso, de acuerdo a sus características (Tabla 5), y en consideración de los parámetros de la Tabla (3), se identificó que las subcuencas Las Adjuntas y El Gavilán son las más apropiadas para uso de carbón térmico con los siguientes valores:

Tabla 5. Resultados de valores ponderales de las Subcuencas Adjuntas y el Gavilán.

Subcuenc a	Humedad total	Ceniza	Azufre	Poder calorífico	Materia volátil	FSI	Densidad	Carbón fijo
	(%)	(%)	(%)	(Cal/g)	(%)		(g/cm ³)	(%)
Adjuntas	0.77	57.76	0.74	3,104	12.79	1.00	2.01	29.45
El Gavilán	20.20	42.07	0.06	2,407	33.46	0.00	1.90	24.47
Valor Ponderal	1.09	57.11	0.73	3,092.70	13.12	0.98	2.01	29.37

Subcuencas para uso Metalúrgico:

Las subcuencas Sabinas, Saltillito - Lampacitos y Esperanzas tiene una extensión total de 2,363.00 km², conjugan un potencial de reservas totales de 1,217,541,473.00. Para estas subcuencas, Sabinas representa el 74.01%, Saltillito – Lampacitos 23.48% y Esperanzas 2.50 %, lo cual, las 3 subcuencas aportan el 100% total. (Tabla 6), (Enciso-Cárdenas et al., 2024).

Tabla 6. Reservas y recursos de las Subcuencas Sabinas, Saltillito-Lampacitos y Esperanzas.

Subcuenca	Extensión (Km ²)	Reservas	Recursos no explorados	Porcentaje (%)
Sabinas	1,034	901,116,405	-	74.01
Saltillito - Lampacitos	1,145	285,901,211	-	23.48
Esperanzas	184	30,523,857	-	2.51
Total	2,363	1,217,541,473	-	100

Considerando los valores de representación porcentual para estas Subcuencas (Sabinas, Saltillito-Lampacitos y Las Esperanzas), el compósito para este uso, en relación a sus características (Tabla 7), y en consideración de los parámetros de la Tabla (3), se identificó que las subcuencas Sabinas, Saltillito-Lampacitos y Las Esperanzas, son las más apropiadas para uso de carbón metalúrgico con los siguientes valores:

Tabla 7. Resultados de valores ponderales de las Subcuencas Sabinas, Saltillo-Lampacitos y Esperanzas.

Subcuenc a	Humeda d total	Ceniza	Azufre	Poder calorífico	Materia volátil	FSI	Densidad	Carbón fijo
	(%)	(%)	(%)	(Cal/g)	(%)		(g/cm3)	(%)
Sabinas	0.81	24.67	1.12	6,378	25.52	6.00	1.52	49.81
Saltillito - Lampacito s	0.63	23.03	1.17	6,557	20.92	6.50	1.50	56.04
Esperanzas	0.68	18.45	1.23	6,992	19.76	7.00	1.41	61.80
Valor Ponderal	0.77	24.12	1.13	6,435.44	24.30	6.14	1.50	51.57

Subcuencas para uso Carboquímico:

Las subcuencas San Patricio y Baluarte tienen una extensión total de 3,614.00 km², conjugan un potencial de reservas totales de 7,323,971.00 (solamente la subcuenca San Patricio cuenta con datos de reservas, mientras que la subcuenca Baluarte, cuenta con datos de recursos no explorados). Para estas subcuencas, San Patricio representa el 8.24% y Baluarte 91.75%, lo cual, ambos datos aportan el 100% total. (Tabla 8), (Enciso-Cárdenas et al., 2024).

Tabla 8. Reservas y recursos de las Subcuencas San Patricio y Baluarte.

Subcuenca	Extensión (Km ²)	Reservas	Recursos no explorados	Porcentaje (%)
San Patricio	3,608.00	603,971.94	-	8.25
Baluarte	6.00	-	6,720,000.00	91.75
Total	3,614.00	603,971.94	6,720,000.00	100
Total de Reservas y Recursos no probados	-	7,323,971.94	-	-

Considerando los valores de representación porcentual para estas Subcuencas (San Patricio y Baluarte), el compósito para este uso, en base a sus características (Tabla 9), y en consideración de los parámetros de la Tabla (3), se identificó que las subcuencas San Patricio y Baluarte, son las más apropiadas para uso carboquímico con los siguientes valores:

Tabla 9. Resultado de valores ponderales de las Subcuencas San Patricio y Baluarte

Subcuenc a	Humedad total	Ceniza	Azufre	Poder calorífico	Materia volátil	FSI	Densidad	Carbón fijo
	(%)	(%)	(%)	(Cal/g)	(%)		(g/cm3)	(%)
San Patricio	1.24	27.14	1.85	5,952	24.12	4.50	1.43	48.74
Baluarte - 01	1.92	28.76	0.58	5,890	20.02	2.50	1.55	51.22
Valor Ponderal	1.86	28.63	0.68	5,895.12	20.36	2.67	1.54	51.02

El análisis en los resultados obtenidos de las subcuencas carboníferas ha permitido establecer una asignación estratégica para el aprovechamiento de este recurso fósil según sus características y reservas disponibles. Las subcuencas como Las Adjuntas y El Gavilán se perfilan como las más adecuadas para la explotación para uso como carbón térmico, dado su potencial de reservas y su composición química favorable.

Por otro lado, las subcuencas identificadas como Sabinas, Saltillito-Lampacitos y Las Esperanzas han demostrado ser óptimas para el aprovechamiento del carbón como uso metalúrgico, representando una proporción que ha sido significativa al total de reservas y cumpliendo con los parámetros establecidos con anterioridad.

Finalmente, las subcuencas San Patricio y Baluarte presentan una composición que favorece y permite destinar las reservas hacia el sector carboquímico, asegurando un adecuado uso diversificado y eficiente del recurso. Esta segmentación por subcuencas realizada ha permitido optimizar la explotación del recurso mineral que es el carbón en función de sus propiedades específicas, garantizando una gestión sustentable y maximizando su valor en la industria energética, metalúrgica y carboquímica. A partir de ello, es imprescindible la toma de decisiones

correctas para su aprovechamiento a largo plazo, promoviendo el desarrollo de estrategias que equilibren el uso del recurso con la sostenibilidad ambiental y económica.

Circuito integral para el aprovechamiento del carbón

Para poder optimizar el aprovechamiento del carbón y su valorización integral, es fundamental establecer un esquema de procesamiento que contemple las distintas aplicaciones del recurso. Lo más recomendable es idealizar un circuito como el que se muestra en la siguiente figura para el mejor aprovechamiento del carbón. La figura presentada propone un circuito secuencial que inicia con la extracción y clasificación del carbón, seguido de su asignación estratégica a diferentes usos según sus propiedades fisicoquímicas (Figura 15).



Figura 15. Circuito Integral para el óptimo aprovechamiento del Carbón.

Este enfoque permite una distribución eficiente del material, garantizando su uso óptimo en sectores clave como la generación de energía, la industria metalúrgica para la generación de coque y la carboquímica, para el desarrollo de subproductos, donde se aprovechan sus derivados de alto valor agregado.

El esquema planteado constituye una estrategia efectiva para la gestión y aprovechamiento del carbón en las subcuencas con reservas significativas de este recurso (1,380,011,558.00 Reservas totales y Recursos no explorados). Al establecer un orden lógico y cronológico en su procesamiento, se maximiza su rendimiento mediante la separación de los usos térmicos o metalúrgicos, permitiendo además la valorización de sus derivados en la industria carboquímica. Este enfoque integral no solo favorece la eficiencia en el aprovechamiento de este mineral sedimentario que es el carbón, sino que también contribuye a una gestión más inclinada a lo sostenible y orientada a la diversificación de sus aplicaciones.

Capítulo 6

Conclusiones

6. Conclusiones.

Las reservas de carbón de la cuenca de Sabinas, a partir de este trabajo de Tesis, se ha logrado distribuir en tres principales usos: Térmico, Metalúrgico y Carboquímico, destacando los diferentes potenciales en reservas y porcentajes en cada categoría de uso.

6.1 Potencial para uso Térmico:

Las Subcuencas destinadas al uso Térmico cuentan con un potencial de reservas de 155,146,133 Toneladas de carbón, lo cual representan el 11.25% del total de reservas de carbón en la Cuenca Sabinas, estas reservas se concentran en Subcuencas como lo son: Las Adjuntas con 152,626,113.00 y El Gavilán con 2,520,000.00 de reservas y recursos no explorados. Este porcentaje refleja sumamente la importancia en la generación de energía térmica y evidencia la necesidad de evaluar su sostenibilidad a corto y largo plazo.

6.2 Potencial para uso Metalúrgico:

Las reservas para uso metalúrgico suman un total de 1,217,541,473. Toneladas, lo cual equivale al 88.29% del carbón total de la Cuenca Sabinas. Este elevado porcentaje resalta la importancia de estas reservas para la industria siderúrgica, siendo el principal uso del carbón en la región. Estas reservas se concentran en Subcuencas clave como lo son: Sabinas con 901,116,405, Saltillito-Lampacitos con 285,901,211 y Las Esperanzas con 30,523,857 Toneladas, que deben ser priorizadas en términos de planificación y explotación responsable ante estas reservas.

6.3 Potencial para uso Carboquímico:

Las Subcuencas destinadas al uso Carboquímico tienen un potencial total de 7,323,971.94 Toneladas, lo que representa apenas el 0.53% del total de la Cuenca Sabinas de Sabinas. A pesar de ser el porcentaje más bajo, estas reservas son relevantes y de vital importancia para aplicaciones especializadas en la producción de productos químicos derivados del carbón. Estas reservas se encuentran concentradas en Subcuencas como: San Patricio con un potencial de reservas de 603,971.94 y Baluarte con 6,720,000 toneladas.

La significativa disparidad en los porcentajes sugiere que la Cuenca de Sabinas tiene un enfoque industrial predominantemente metalúrgico, con un apoyo secundario al uso térmico y una distribución limitada para el uso Carboquímico. Es imprescindible considerar como estos usos

pueden alinearse con las metas de sostenibilidad y transición energética, especialmente en el caso del carbón térmico, destinado a la siderurgia.

Las estrategias de manejo y explotación deben ser específicas para cada uso, tomando en cuenta el impacto ambiental, la viabilidad económica y el horizonte a corto y largo plazo destinado cada sector al cual será destinado.

Capítulo 7

Referencias bibliográficas

7. Referencias bibliográficas:

American Society for Testing and Materials International. (2001). *ASTM D2013-01: Standard Practice for Preparing Coal Samples for Analysis*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials International. (2003). *ASTM D3173-03: Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials International. (2003). *Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke (ASTM D3173-03)*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials International. (2004). *ASTM D3174-04: Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials International. (2007). *ASTM D3172-07: Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials International. (2010). *ASTM D720: Standard Test Method for Free-Swelling Index of Coal*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials International. (2018). *ASTM D4239: Standard test method for sulfur in the analysis sample of coal and coke using high-temperature tube furnace combustion (ASTM D4239)*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials International. (2019). *ASTM D5865: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials International. (2020). *ASTM D3175: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials International. (2023). *ASTM D388-23: Standard Classification of Coals by Rank*. ASTM International.

Bernal-Ortega, P., Bernal, M. M., Navarro, R., & López Valentín, J. (2019). *Nanotubos de carbono, el futuro en los compuestos de caucho*. *Revista de Plásticos Modernos*, 117(744), 25-32.

Consejo de Recursos Minerales (COREMI). (1993). *Reservas exploradas*. Servicio Geológico Mexicano.

Consejo de Recursos Minerales (COREMI). (2003). Informe de la carta geológico-minera Nueva Rosita G14-A13, escala 1: 50,000, estado de Coahuila. Convenio de colaboración con el gobierno del estado de Coahuila.

Corona-Esquivel, R., Tritlla, J., Benavides-Muñoz, M. E., Piedad-Sánchez, N., & Ferrusquía-Villafranca, I. (2006). Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(4), 141-160.

De la Rosa Rodríguez, G. (2018). *Caracterización geoquímica y Petrográfica de la Formación Eagle Ford como yacimiento tipo shale gas, en la porción central de la provincia geológico-petrolera Sabinas [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Coahuila]*.

De la Rosa Rodríguez, G., Enciso Cárdenas, J. J., Alves Rodríguez, C. F., Núñez Useche, Fernando., Martínez Hernández, D., Bueno Yamamoto, Y. Y., Camacho Ortegón, L. F., Bueno Tokunaga, A., Lemos de Sousa, M. J. (2023). *Almacenamiento Geológico de Co₂: Una oportunidad para la diversificación en el uso del carbón en la Subcuenca de Sabinas*. Geomimet No. 363. (ISSN 0185-1314).

Duku, M. H., Gu, S., Hagan, E. Ben. (2011). *Biochar production potential in Ghana-A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(8), 3539-3551.

Enciso Cárdenas, J. J. (2020). *Diplomado en Diversificación sostenible del mercado del carbón [Material de curso]*. Universidad Autónoma de Coahuila, Centro de Investigación en Geociencias Aplicadas. D

Enciso-Cárdenas, J. J., de la Rosa-Rodríguez, G., Gonzales-Partida, E., Martinez-Hernandez, D. J., Camacho-Ortegón, L. F., Bueno-Tokunaga, A., & Martinez-Carrillo, D. (2024). *Estimación del potencial de CBM: Una oportunidad para la diversificación de la industria del carbón en México*, (372), 7-13.

Flores Galicia, E. (1988). *Geología y reservas de los yacimientos de carbón en la República Mexicana*. Geología de México: México. Fondo de Cultura Económica.

Gauna Arista, J. A. (2022). *Evaluación de las propiedades de sorción de gas de carbón CBM, en la formación Olmos, subcuenca de Sabinas* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Coahuila].

Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354(6348), 56-58.

Martínez Hernández, D. J. (2021). *Construcción de un modelo matemático del cálculo de carbón de diseño para una planta carboeléctrica sustentable con el medio ambiente*. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Coahuila].

Montes Castillo, A. (2016). *Tecnología de captura y almacenamiento de CO₂ para su uso en recuperación mejorada de petróleo*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]

Pinos, J., García, J., & Gonzales, C. (2021). *Impactos y regulaciones ambientales de estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de America*. 46 (4), 12.

Rebolledo Escalante, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., Etchevers Barra, J. D. (2016) *Biocarbón (Biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo*. Tierra Latinoamericana. 34 (3), 64.

Rivera Martínez, J. C. (2011). *La Subcuenca el Baluarte, una nueva localidad con presencia de carbón mineral, dentro de la Cuenca de Sabinas, en el estado de Coahuila*. *Geomimet*, Vol 38. No 290. Servicio Geológico Mexicano.

Robeck, R. C., Pesquera, R. V., Ulloa, S. A. (1956). *Geología y depósitos de carbón en la región de Sabinas, Estado de Coahuila*. XX Congreso Geológico Internacional. (P. 109).

Sánchez de la Vega, A., Dávila, M., (2024), *Metodología para estimar la capacidad de almacenamiento geológico de CO₂ en campos maduros de hidrocarburos*: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 76 (1), A201223.

Santamaría-Orozco, D. M. (1990). *Ambientes sedimentarios de las rocas del Cretácico Superior en la Cuenca Carbonífera de Sabinas, Estado de Coahuila, México*. [Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México].

SE. (2018). *Secretaría de energía. Obtenido de Gobierno de México*: <https://www-gob.mx/sener/articulos/inventario-nacional-de-fuentes-de-emisión-y-sitios-para-el-uso-y-almacenamiento-de-co2-en-mexico>

Secretaría de Economía. (2022). *Perfil del mercado de carbón*. Dirección General de Desarrollo Minero, Gobierno de México.

Speight, J. G. (2004). *Handbook of coal analysis* (Vol. 166). A series of monographs on analytical chemistry and its applications. John Wiley & Sons Intercience.

Capítulo 8

Anexos

8. Anexos

8.1 Anexo I: Recolección de muestras



Figura 16. Fotografía tomada con Dron para el acceso a la Subcuenca Gavilán con apoyo de personal del Servicio Geológico Mexicano.



Figura 17. Extracción de muestras de carbón en la Subcuenca Gavilán.



Figura 18. Manto superior de carbón (piso a techo) en la Subcuenca Gavilán.



Figura 19. Extracción de carbón en la Subcuenca Gavilán con el acompañamiento y asesoramiento del M.C Genaro de la Rosa Rodríguez.

8.2 Anexo 2: Preparación de muestras



Figura 20. Limpieza de plancha donde se trabajará las muestras de carbón bajo las normativas ASTM correspondientes.



Figura 21. Homogenización de muestra de carbón.



Figura 22. Preparación de muestra de carbón para comenzar con el proceso de trituration bajo malla #60.



Figura 23. Muestra de carbón bajo malla #60, posterior a su trituration para homogeneizar la muestra.



Figura 24. Aplicando el proceso de cuarteo a muestra de carbón.

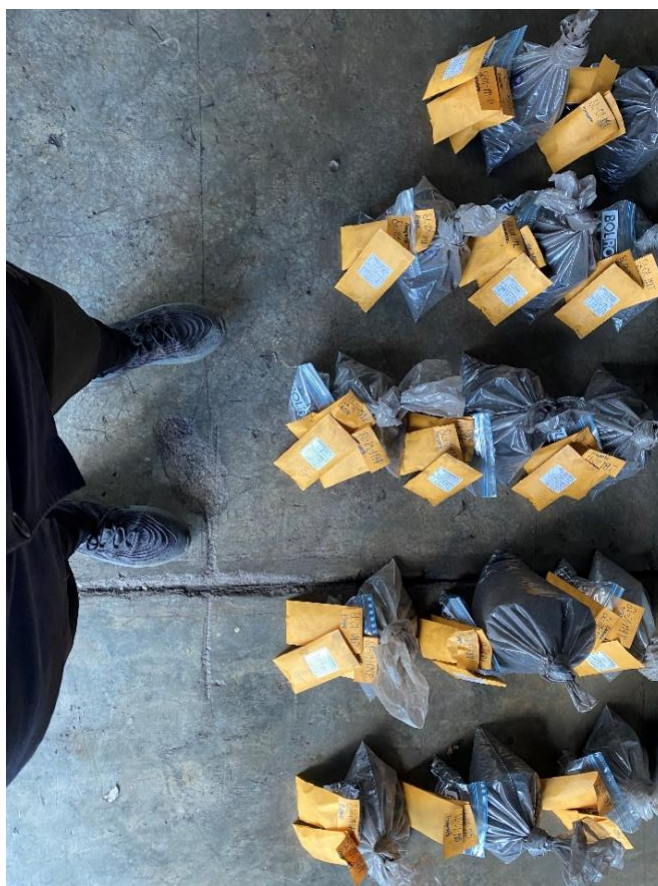


Figura 25. Recuperación de muestras de carbón para iniciar con caracterización física y química.

8.3 Anexo 3: Caracterización de muestras



Figura 26. Pesaje de muestras de carbón para análisis dentro del laboratorio.



Figura 27. Inicio de análisis para determinar la cantidad de azufre en la muestra de carbón.



Figura 28. Análisis en muestras de carbón para determinar el porcentaje de ceniza.



Figura 29. Análisis en muestras de carbón para determinar el Índice de Hinchamiento (FSI) del material sedimentario.

INTELIGENCIA MÁS CARÁCTER, EL OBJETIVO DE UNA VERDADERA EDUCACIÓN

Dr. Martín Luther King Jr.

Este trabajo de tesis fue elaborado en conjunto por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) y la Universidad Autónoma de Coahuila (UAdeC), es de acceso libre y puede ser utilizado, reproducido y distribuido, siempre y cuando se cite adecuadamente la fuente. Su uso está limitado únicamente a fines de índole académico y de investigación, quedando prohibida su reproducción con fines comerciales sin la autorización del autor ©