	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ		
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad		

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): SANDRITH ADNNELLY APELLIDOS: TORRADO SÁNCHEZ

NOMBRE(S): _____ APELLIDOS: _____

NOMBRE(S): _____ APELLIDOS: _____

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA DE MINAS

DIRECTOR:

NOMBRE(S): JOSE LUIS APELLIDOS: GOMEZ HERNANDEZ

NOMBRE(S): _____ APELLIDOS: _____

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): APLICACIONES ALTERNATIVAS AMBIENTALMENTE

SOSTENIBLES DEL CARBÓN EN NORTE DE SANTANDER

RESUMEN

El carbón es el mineral de mayor valor del mercado mundial, pero es considerado el combustible que más contribuye al calentamiento global y por ello, mediante acuerdos internacionales se implementaron diversas restricciones en su uso, provocando así un proceso de transición energética hacia la producción de energías más sostenibles mediante la sustitución progresiva de los combustibles fósiles. El presente documento es una revisión bibliográfica sobre las nuevas aplicaciones sostenibles del uso del carbón en procesos que no implican combustión y a su vez, en la aplicación de técnicas en los procesos actuales que requieren combustión que permitan la disminución de su contribución en el cambio climático y en las emisiones contaminantes a la atmosfera, así dar continuidad de su uso, fortalecer la academia, abrir campos de aplicación y aumentar el valor de la cadena del carbón.

PALABRAS CLAVES: MINERÍA, IMPACTO AMBIENTAL, CARBÓN, SOSTENIBILIDAD, ALTERNATIVA.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 333 PLANOS: _____ ILUSTRACIONES: 100 CD ROOM: _____

APLICACIONES ALTERNATIVAS AMBIENTALMENTE SOSTENIBLES DEL CARBÓN
EN NORTE DE SANTANDER.

SANDRITH ADNNELLY TORRADO SÁNCHEZ

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE MINAS

CÚCUTA

2022

APLICACIONES ALTERNATIVAS AMBIENTALMENTE SOSTENIBLES DEL
CARBÓN EN NORTE DE SANTANDER.

SANDRITH ADNNELLY TORRADO SÁNCHEZ,

MONOGRAFÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO DE MINAS

Director

RAIMUNDO ALONSO PÉREZ GÓMEZ

Magíster en Práctica Pedagógica Universitaria

Codirector

ISMAEL HUMBERTO GARCIA PAZ

PhD. Química Como Ciencia

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE MINAS

CÚCUTA

2022

ACTA DE SUSTENTACION DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: Cúcuta, 31 de octubre de 2022

HORA: 2:30 p.m.

LUGAR: AUDITORIO DE TERREOS

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA DE MINAS

TITULO DE LA TESIS: **"APLICACIONES ALTERNATIVAS AMBIENTALMENTE SOSTENIBLES DEL CARBÓN EN NORTE DE SANTANDER."**

JURADOS: Ing. JOSE LUIS GOMEZ HERNENDEZ
Ing. NORBERTO JUNIOR PEREZ
Lic. ALBERTO SARMIENTO CASTRO

ENTIDAD: U. F. P. S.
ENTIDAD: U. F. P. S.
ENTIDAD: U. F. P. S.

DIRECTOR: Ing. RAIMUNDO ALONSO PEREZ GOMEZ

NOMBRE DE LOS ESTUDIANTE	CODIGO	CALIFICACIÓN	
		NUMERO LETRA	(A) (M) (L)
SANDRITH ADNNELLY TORRADO	1181366	4.3 CUATRO, TRES	APROBADA

OBSERVACIONES:

FIRMA DE LOS JURADOS:



Vº. Bº.



COORDINADOR COMITÉ CURRICULAR

Dedicatoria

A Dios, pues él merece toda gloria, pues me ha bendecido cada día, me ha brindado de su sabiduría, entendimiento y me ha cumplido cada una de sus promesas.

A mis padres, Nelly Sánchez Bayona y Jose Orlando Jaimes Sánchez, que me han apoyado desde el primer momento, me dan su respaldo, me llenan de ánimo y fortaleza.

A mis hermanos, Julián José Jaimes Sánchez y Jossellyne Haide Jaimes Sánchez, que me llenan de alegría mi corazón, que siguen mis pasos y que me han apoyado cada día.

A mi futuro esposo, Edwin Fernando Galeano López, que con su amor ha sido mi refugio, mi soporte y mi compañero de aventuras.

Tabla de Contenido

Introducción	17
1. Título	20
1.1. Problema	20
1.2. Formulación del problema	23
1.3. Justificación	24
1.4. Objetivos	25
2. Marco de referencia	25
2.1. Antecedentes	25
2.2. Bases referenciales	34
2.3. Bases conceptuales	41
2.4. Marco legal	43
3. Diseño metodológico	48
3.1. Tipo de investigación	48
3.2. Universo y muestra	49
3.3. Instrumentos para la recolección de información	49
3.4. Técnicas de análisis y procedimientos de datos	50
4. Capítulo I. Contexto del carbón de Norte de Santander	50
4.1. Geología de los yacimientos de carbón	51
4.2. El carbón en Norte de Santander	58
4.3. Calidad de los carbones de Nortesantandereanos	59
4.4. Caracterización de carbones	64

5.	Capítulo II. Impactos sociales y ambientales generados a partir del uso del carbón	79
5.1.	Impactos sociales	79
5.2.	Impactos ambientales	101
6.	Capítulo III. Aplicaciones alternativas del carbón para usos ambientalmente sostenibles	115
6.1.	Nanotubos	115
6.2.	Carbón activado	129
6.3.	Grafito	143
6.4.	Nanofibras	163
6.5.	Nanodiamantes	172
6.6.	Grafeno	175
6.7.	Puntos cuánticos de carbono	197
6.8.	Materiales de carbono poroso	204
6.9.	Nanocristales de grafito	211
6.10.	Fullerenos	213
7.	Capítulo IV. Alternativas ambientalmente sostenibles en los procesos que involucran la combustión del carbón	222
7.1.	Ferroaleaciones	222
7.2.	Pirometalurgia	235
7.3.	Hidrógeno	241
7.4.	Polímeros	247
7.5.	Energía eléctrica	259
7.6.	Procesos cerámicos	274
7.7.	Carboquímica	287

8. Capítulo V. Recomendaciones de posibles alternativas ambientalmente sostenibles para el uso del carbón de Norte de Santander	298
Conclusiones	305
Bibliografía	308

Lista de tablas

Tabla 1. Producción de carbón en norte de Santander	59
Tabla 2. Calidad de los carbones en Norte de Santander.	62
Tabla 3. Características del Carbón 0x50 de Mina la Gitana.	64
Tabla 4. Características del carbón 1x12 de la Mina la Gitana.	65
Tabla 5. Características del carbón 10x30- 10x50 de la Mina la Gitana.	65
Tabla 6. Información adicional Carbón Térmico Tipo A y Tipo B.	66
Tabla 7. Información adicional Carbón coquizable.	66
Tabla 8. Ficha técnica del Carbón Térmico de Excomin.	67
Tabla 9. Ficha técnica del Carbón Coquizable de Excomin.	68
Tabla 10. Ficha técnica del Coque en Excomin.	68
Tabla 11. Especificaciones del coque de Minercoque.	69
Tabla 12. Ficha técnica de carbón mineral de Induminas Tasajero.	71
Tabla 13. Ficha técnica de coque de Induminas Tasajero.	72
Tabla 14. Características del coque de horno Blust de Yilcoque	74
Tabla 15. Características del Coque de fundición de Yilcoque.	75
Tabla 16. Características del Coque reactivo de la empresa Carboexco.	76
Tabla 17. Características del coque para alto horno de la empresa CARBOEXCO.	76
Tabla 18. Características de los finos de coque de la empresa CARBOEXCO.	77
Tabla 19. Características del coque siderúrgico de la empresa CARBOEXCO.	77
Tabla 20. Propiedades generales de los nanotubos de carbono.	121
Tabla 21. Propiedades comparativas de los Nanotubos de Carbono.	121
Tabla 22. Aplicaciones de los nanotubos.	122
Tabla 23. Procedimientos propuestos para la síntesis de nanotubos alineados y el método utilizado.	126

Tabla 24. Clasificación del grafito.	145
Tabla 25. Características del grafito natural.	146
Tabla 26. Característica del grafito sintético.	149
Tabla 27. Propiedades físicas del grafito.	152
Tabla 28.. Propiedades ópticas del grafito.	153
Tabla 29. Propiedades del grafito.	153
Tabla 30. Aplicaciones del grafito y sus propiedades.	156
Tabla 31.Comparativo de adsorción entre nanofibras y fibras comunes de carbono	164
Tabla 32. Propiedades físicas de los nanodiamantes.	174
Tabla 33. Algunos ejemplos de uso de los nanodiamantes en la electroquímica.	174
Tabla 34. Composición química de la categoría del Ferromanganeso alto en carbono.	225
Tabla 35.Composición química de la categoría del Ferromanganeso de carbono medio	226
Tabla 36.Composición química de la categoría del Ferromanganeso de carbono medio	226
Tabla 37.Propiedades del Ferrocromo.	229
Tabla 38. Problemas medioambientales del proceso de fabricación de las ferroaleaciones.	232
Tabla 39. Principales tipos de hidrógeno.	243
Tabla 40. Características del método por gasificación para producir hidrógeno.	245
Tabla 41. Ventajas y desventajas de la utilización de carbón como combustible.	267
Tabla 42.Control de material particulado: tecnología/combustible	270
Tabla 43. Control de SOx por tecnología y combustible.	271
Tabla 44. Control de NOx, por tecnología y combustible.	272
Tabla 45. Características generales de los combustibles.	283
Tabla 46. Ventajas e inconvenientes de los distintos combustibles para el sector de la cerámica.	284
Tabla 47. Aplicaciones ambientalmente sostenibles del carbón en procesos sin combustión en las áreas de Norte de Santander.	300

Tabla 48. Aplicaciones ambientalmente sostenibles del carbón en procesos con combustión en las áreas de Norte de Santander	301
Tabla 49. Aplicaciones ambientalmente sostenibles del carbón en procesos sin combustión	302
Tabla 50. Aplicaciones con combustión ambientalmente sostenibles del carbón relacionadas con empresas de Norte de Santander.	304

Lista de figuras

Figura 1. Cifras de producción y regalías del carbón obtenidas de la UPME	36
Figura 2. Comparativa de la producción de Norte de Santander, Colombia	37
Figura 3. Emisiones de CO2 en Colombia.	39
Figura 4. Diagrama de flujo del diseño metodológico general del proyecto	48
Figura 5. Leyenda estratigráfica de la Geología del cuadrángulo G-13 Cúcuta	52
Figura 6. Columna estratigráfica generalizada de la cuenca del Catatumbo, Maracaibo del departamento de Santander.	53
Figura 7. Columna estratigráfica generalizada de la Formación los Cuervos, sector Mina La Mestiza, vereda Albarico, municipio El Zulia, Norte de Santander.	55
Figura 8. Columna estratigráfica local de la formación Carbonera en el sector mina la Dinastía, Corregimiento de San Pedro San Pedro, Municipio de Cúcuta, Norte de Santander	57
Figura 9. Proceso general de los carbones de Carbones Carbonora.	73
Figura 10. localización Mina Cerrejón.	87
Figura 11. Área de influencia Mina Cerrejón tomado de información general de operaciones Cerrejón.	87
Figura 12. Área de influencia Mina Calenturitas grupo Prodeco.	88
Figura 13. Mina La Jagua Grupo Prodeco.	88
Figura 14. Puerto nuevo grupo Prodeco	89
Figura 15. Localización del proyecto La Loma (Drummond)	89
Figura 16. Pilares de inversión de PRODECO.	92
Figura 17. Comunidades reasentadas por el grupo Prodeco.	93
Figura 18. Proceso de reasentamiento del corregimiento El Hatillo.	93
Figura 19. Proceso de reasentamiento vereda Plan Bonito.	94
Figura 20. Proceso de reasentamiento Corregimiento Boquerón.	94
Figura 21. Producción industrial del departamento de Norte de Santander.	97

Figura 22. Personal ocupado del departamento de Norte de Santander.	98
Figura 23. Imágenes de fullereno, nanotubo de pared simple y lámina de grafeno.	116
Figura 24. Orientación de los nanotubos.	116
Figura 25. Esquema descriptivo de las diferentes disposiciones existentes en los nanotubos de carbono.	117
Figura 26. Carácter electrónico de tipo de nanotubos.	118
Figura 27. Diagrama del método de síntesis de nanotubos por descarga de arco voltaico.	127
Figura 28. Diagrama de los diferentes procesos que puede tener lugar en la activación física	132
Figura 29. Diagrama de los diferentes procesos que puede tener lugar en la activación química	134
Figura 30. Esquema para el tratamiento de agua con carbón activado granular.	138
Figura 31. Sistema de lecho expandido.	139
Figura 32. Tren de potabilización típico de una industria de bebidas que se abastece de un pozo.	140
Figura 33. Tren de potabilización típico de una planta municipal que se abastece de un cuerpo de agua superficial.	141
Figura 34. Proceso de obtención del grafito.	147
Figura 35. Proceso de fabricación del grafito sintético.	150
Figura 36. Tipos de nanofibras según la disposición de los planos grafénicos respecto al eje de crecimiento.	163
Figura 37. Representación esquemática del crecimiento de Nanofibras mediante descomposición catalítica sobre un catalizador metálico.	167
Figura 38. Parte central de un reactor de vaporización láser.	168
Figura 39. Generación de nanofibras de carbono por deposición química en fase vapor.	169
Figura 40. Reactor de Arco-Glow.	171
Figura 41. El grafeno es el origen de los nanomateriales grafíticos de 0D (Fullerenos), 1D (nanotubos de carbono), y 3D (grafito).	176
Figura 42. Representación esquemática de una lámina de Grafeno.	176
Figura 43. Estructura molecular del grafeno.	177

Figura 44. Elementos gráfiticos (a) Fullerenos- 0D; (b) Nanotubos- 1D; (c) Grafito - 3D.	178
Figura 45. Ilustración de la medición de la resistencia mecánica por medio de microscopio del Grafeno	180
Figura 46. a) conductividad térmica k como una función de la temperatura para distintos materiales carbonosos. b) intervalo de conductividad térmica k a temperatura ambiente para distintos materiales en base carbono.	181
Figura 47. Hibridación orbital y enlace en grafeno.	182
Figura 48. Proceso de exfoliación micromecánica de grafito.	184
Figura 49. Proceso de exfoliación química del grafito.	186
Figura 50. Crecimiento Epitaxial.	186
Figura 51. Reducción química de óxido de grafeno.	188
Figura 52. Nucleación de los cristales.	190
Figura 53. Consumo de grafeno (%) por industrias.	192
Figura 54. Tipos de puntos cuánticos de carbono.	198
Figura 55. Procedimiento de síntesis de puntos de carbono.	200
Figura 56. Síntesis de puntos cuánticos de carbono.	200
Figura 57. Esquema de muestra de aplicaciones de los puntos cuánticos.	202
Figura 58. Mecanismos de detección de metales pesados con puntos cuánticos de carbono para los ejemplos discutidos arriba.	203
Figura 59. Procedimiento general de síntesis de plantillas para carbones microporosos usando una plantilla de zeolita.	205
Figura 60. Representación esquemática de la formación de un carbono mesoporoso ordenado y su imagen TEM de un carbono SNU-1 mesoporosos.	207
Figura 61. Síntesis de una espuma de carbono mesocelular.	208
Figura 62. Imagen SEM de un carbón gráfitico macroporosos sintetizado usando plantillas de ópalo de sílice de tamaño de nm.	210

Figura 63. Esquema sintético para preparación de nanotubos de carbono usando plantillas AAO.	211
Figura 64. Esquema sobre la fabricación de Nanocristales de grafito.	212
Figura 65. Tipos comunes de Fullerenos.	216
Figura 66. Estructura de los nanotubos.	217
Figura 67. Esquema de obtención de ferromanganeso y silicomanganeso.	224
Figura 68. Horno eléctrico para la fabricación de ferroaleaciones como el acero.	230
Figura 69. Funcionamiento del horno eléctrico.	231
Figura 70. Diagrama de flujo del procesamiento de los materiales metálicos por pirometalurgia.	236
Figura 71. Hornos de cuba.	239
Figura 72. Horno de Reverbero.	240
Figura 73. Fuentes para la obtención de H ₂ .	242
Figura 74. Diagrama de flujo del proceso de producción de H ₂ por gasificación del carbón.	244
Figura 75. Comparativa de los tipos de hidrógeno.	246
Figura 76. Materias primas de los polímeros.	252
Figura 77. Productos derivados del petróleo para la elaboración de polímeros.	253
Figura 78. Inicio del proceso mediante la dosificación y mezclado con aditivos.	253
Figura 79. Mezclado en frío o mezclado en caliente.	254
Figura 80. Por último, se realiza un proceso de granulado y triturado según las especificaciones.	254
Figura 81. Esquema de producción general.	255
Figura 82. Esquema de una central de carbón pulverizado. La línea azul representa el flujo de aire desde la inyección a la emisión.	260
Figura 83. Esquema de una planta de lecho fluido.	261
Figura 84. Funcionamiento básico de una planta de oxicomustión.	262
Figura 85. Esquema de funcionamiento de una planta de chemical lopping.	262
Figura 86. Esquema de funcionamiento de un módulo de carbonatación y calcinación para la captura de CO ₂ procedente de la combustión de carbón.	263

Figura 87. Diagrama del proceso simplificado de una planta carboeléctrica.	268
Figura 88. Modificaciones y aislamiento de la vibración.	274
Figura 89. Esquema del proceso de fabricación de productos cerámicos.	277
Figura 90. Proceso general de la industria cerámica.	277
Figura 91. Partes del Horno tipo Túnel	279
Figura 92. Horno Hoffman.	280
Figura 93. Orificios de inyección de combustible en el horno Hoffman.	281
Figura 94. Elementos de la planta analizada y representación de las pérdidas de energía.	282
Figura 95. Procesos de fabricación y sus impactos ambientales más significativos.	286
Figura 96. Planta de gasificación del carbón en superficie.	288
Figura 97. Hidrogenación de carbones fase primaria	293
Figura 98. Diagrama representativo del proceso de licuefacción	295
Figura 99. Proceso de licuefacción indirecta.	295
Figura 100. Proceso de licuefacción del carbón.	296

Introducción

El carbón es una roca sedimentaria compuesta principalmente de materia orgánica, que fue sometida a condiciones de presión y temperatura, factores que definieron sus propiedades químicas y físicas. En Colombia, la producción del carbón se redujo para el año 2020, debido al rol que desempeñó la pandemia mundial que provocó cambios en los mercados internacionales y en demanda del mineral. Por ello, el carbón cambió de ser el principal recurso minero de la exportación del país, representando el 65 % del PIB minero para el año 2019 (Agencia Nacional de Minería, 2019), a disminuir su potencial para el año 2021, que representaría aproximadamente solo el 20% del PIB minero nacional, con una producción alrededor de 60 y 65 millones de toneladas. (Valora Analitik, 2021).

La producción de los carbones térmicos para el 2020 se redujo a un 38.6 %, alcanzando un mínimo de 49.3 millones de toneladas (Asociación Colombia de Minería-ACM, 2021). Aun así, es el tipo de carbón que se presenta en mayor proporción en el país y tiene mayor demanda comparado con el carbón coquizable, ya que estos son caracterizados para someterlos a procesos de combustión y emplearlos como combustibles en la generación de energía en las termoeléctricas; dado que es una fuente de energía que tiene un costo menor que otras tecnologías como la hidroeléctrica o la nuclear. Pero este proceso genera impactos al ambiente desde el momento de la extracción del mineral hasta su combustión, debido a la generación de diversas nano partículas. Estos subproductos no intencionales en la mayoría de los casos encapsulan varios elementos peligrosos tales como agregados de fullereno, gases tóxicos y de efecto invernadero, compuestos organometálicos y otros componentes del gas.

En este sentido, en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26), realizada el 12 de noviembre de 2021, a sabiendas que el carbón es el combustible que más contribuye al calentamiento global, se acordó que se realizará un recorte de gasoductos de carbón. Así, 10 países productores están comprometidos a que sus emisiones serán cero, y, los países que componen el G20 (19 países y la unión europea, entre ellos Alemania, Brasil, EEUU, México, India, China, entre otros) se han comprometido a detener la financiación del carbón en el extranjero, limitando así la comercialización y uso de este mineral.

Junto con lo anterior, se inició el proceso de transición energética hacia la producción de energías más sostenibles mediante la sustitución progresiva de combustibles fósiles, como lo indica (Green power, s.f.), donde se asegure una eliminación gradual y la estabilidad, resiliencia y eficiencia en las redes, pues bien, se expresa que el mayor reto a afrontar es la gestión de las diferencias de demanda y oferta. En efecto, “las centrales eólicas y fotovoltaicas generan una desalineación entre la producción de energía y su consumo, que en parte es previsible y en parte depende de las condiciones meteorológicas” (Green power, s.f.).

Por lo tanto, el reto del país es promover las inversiones tecnológicas, innovación y desarrollo que atienda a la demanda con los mínimos impactos al medio ambiente acorde a los acuerdos mundiales, pues el carbón aún se mantiene como una materia prima que no ha podido ser sustituida por algún otro elemento a corto y mediano plazo en procesos como lo son en la generación de energía, así como en la fabricación del coque, combustible para la fabricación de acero y ferroaleaciones de alta resistencia.

Por ello, en el presente documento se realizó una revisión bibliográfica de manera documental basado en revistas, noticias, artículos, libros, investigaciones, entre otros documentos que dan énfasis a las nuevas posibles aplicaciones y usos del carbón en procesos que

no implican su combustión e, igualmente, sobre la continuidad de su uso, con cambios en los procesos que requieren la combustión de este y así poder disminuir su contribución en el cambio climático. Además, se tiene en cuenta aquellos impactos sociales y ambientales del uso del carbón a nivel nacional y regional, para por último evaluar las posibles alternativas de dichas aplicaciones según la caracterización de los potenciales carboníferos de zonas seleccionadas y empresas líderes de la región en Norte de Santander. Gracias a ello, dar un gran aporte y fortalecimiento a la literatura sobre este tema de importancia mundial en pro de la transición energética, como también, brindar la oportunidad de ser base teórica para la realización de nuevos proyectos investigativos enlazados con el campo minero.

Por consiguiente, es de importancia la realización de este documento pues abre una puerta de nuevas aplicaciones para el uso del carbón a nivel nacional y regional, donde se promueve la inversión tecnológica para ejecutar estudios detallados y la materialización de las variadas aplicaciones del carbón como materia prima de productos que fomentan que la industria carbonífera esté acorde con la problemáticas y acuerdos ambientales a nivel internacional. Del mismo modo, disminuir exponencialmente los impactos sociales y ambientales generados por el procesamiento de carbones por medio de combustión, pues al implementar estos nuevos usos, no se generarían emisiones a la atmósfera y no serían contribuyentes del cambio climático.

1. Título

Aplicaciones alternativas ambientalmente sostenibles del carbón en Norte de Santander

1.1.Problema

El carbón es el recurso fósil más abundante y económico en la tierra, es utilizado ampliamente como combustible sólido para producir electricidad y calor mediante la combustión a través de centrales térmicas, y esta producción de energía no solo es la base del desarrollo económico y sostenible mundial, sino que también es vital para la existencia continua del hombre. Por ello, en los últimos años, el crecimiento del carbón ha aumentado en un 52,0% con 13,9 millones de toneladas en el año 2021, debido a que existe una insuficiencia en electricidad o gas natural, que, comparado con los años anteriores se observa un decrecimiento de las exportaciones de 35.5%, que ha generado una alta demanda del carbón térmico. (Munar, 2021).

Sin embargo, la principal problemática de la producción de energía a base de carbón es la contaminación del aire (con las emisiones de CO_x , SO_x , NO_x), gases de efecto invernadero, gases tóxicos, compuestos organometálicos y otros componentes del gas, y el alto contenido de nano partículas con alto poder cancerígeno y muta génico, que se originan con la combustión del carbón. Para el año 2012, el uso del carbón fue fuente del 44% de las emisiones globales de CO_2 (internacional energy agency, 2014); por lo tanto, el uso del carbón para producir energía aumenta el riesgo de enfermedad y muerte en la población cuando se tiene contacto a través del aire o agua contaminada. Adicionalmente, la quema de carbón en plantas de energía produce otros contaminantes en el aire como partículas gruesas, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, gases ácidos (HCl, HF) e hidrocarburos (HAP). (Binoy K Saikia, 2018).

En Colombia, específicamente en el departamento de Norte de Santander, recibe la mayor parte de sus regalías gracias a este mineral, y la demanda de coque de bajo fósforo producido en este departamento, el cual representa entre el 15 y 20% en la industria de ferroatomios. Además, se caracteriza por la producción de carbón térmico de bajo cenizas y alto poder calorífico, haciéndolo apto para la generación de energía y la región cuenta con la empresa Termotasajero, que es la principal consumidora de carbón térmico; sin embargo, esta entidad ha decidido desistir formalmente ante la UPME de los proyectos Termotasajero III y Termotasajero IV, con los cuales tenía previsto incrementar su capacidad de generación de energía eléctrica a partir de carbón. Esta decisión obedece a la falta de claridad en las políticas del estado y en la oposición de las autoridades ambientales y de algunas ONG que tienen como objetivo la eliminación del carbón como combustible, mediante una transición hacia energías limpiadas.

A su vez, gracias a la explotación y procesamiento del carbón, son generados diversos impactos sociales en las comunidades cercanas que ha conllevado a transformaciones territoriales, económicas y de pérdida de cultura e identidad, pasando de ser territorios netamente rurales, basados en cultivos a convertirse en urbanizados y basados en la actividad extractiva minera. Así como es el caso de los indígenas Wayuu de la Guajira, aquellos que consideran que la tierra es el mayor tesoro y son únicos dueños de ella, poseen diversos asentamientos tradicionales en grupos de personas y qué, la organización territorial de esta región chocó con los planes de la empresa Cerrejón al iniciar trabajos de construcción, y la comunidad indígena evidenció que fue violentado aquellos territorios sagrados y ocasionando desplazamientos para permitir el trabajo de esta industria. Debido a esto, la empresa minera y la comunidad efectuaron negociaciones con fuertes discusiones y amenazas por el abuso de los derechos humanos e irrespeto a la dignidad de los

pueblos, pues se acusa a la industria de presiones para ventas de sus territorios, suspensión de servicios públicos, desvíos de los caudales de agua, entre otros para beneficio de la compañía.

Por los diversos impactos que genera esta industria, la Cumbre Climática de la ONU en Glasgow (COP 26), fue enfocada en gran manera a la reducción del uso de los combustibles fósiles, especialmente el carbón como fuente de energía, donde más de 40 países se comprometieron a dejar de financiar la extracción de estos en dichos territorios para finales del 2022, así, reducir las emisiones de CO₂ que producen estos combustibles a nivel global y combatir el cambio climático que se ha producido en los últimos años con el fin de mantener por debajo de los 2°C el calentamiento global y alcanzar un 1.5°C, que evitaría una catástrofe climática. A su vez, la atención científica se está centrando en el estudio de nuevas tecnologías para la utilización del carbón, por ejemplo para producción de materiales ambientalmente sostenibles como fullerenos, nanotubos, nano diamantes, grafito, grafeno (láminas de grafeno, puntos cuánticos de grafeno y óxidos de grafeno), nanofibras, nano cristales de grafito, puntos de carbono, puntos cuánticos de carbono, carbón activado y materiales de carbono poroso (Moliner Alvarez, 2016).

No obstante, como menciona la (La república, 2022) “se estima que la generación de energía renovable en los próximos 2 años apenas cubra la energía adicional que se requiera, es decir, no aportaría en nada a las necesidades actuales en donde el carbón aporta más de un tercio de la generación eléctrica global; el desbalance energético que experimentó Europa en el segundo semestre de 2021, donde irónicamente hubo necesidad de encender las plantas térmicas para iluminar la cumbre de Glasgow, demostró que falta mucho camino por recorrer en cuanto a confiabilidad de las energías renovables.”

Por lo anterior, Colombia y para el estudio de este documento el departamento de Norte de Santander, debe buscar soluciones ambientalmente sostenibles con rumbo a una transición energética en concordancia de las metas climáticas globales, y, según (Morales & Ramos, 2022) , las empresas deben tomar en serio la realización de planes que permitan la transición a otras posibilidades económicas sostenibles en el tiempo o la capacitación para ser parte de la cadena de generación de energía a partir de fuentes no convencionales y otras actividades sostenibles que puedan diversificar la economía, pues a su vez, según el Plan Nacional de Desarrollo Minero con visión al 2025, expone que la oferta del carbón será determinada por los compromisos en la reducción de gases de efecto invernadero, considerando la implementación de energías alternativas y desarrollo de energías más limpias para la producción de energía térmica. (unidad de planeacion minero energetica (UPME), 2017)

Por consiguiente, existe una necesidad urgente de revisar el estado actual de la investigación sobre el desarrollo tecnológico de subproductos a base de carbón, y los impactos generados por éstos, analizando su contribución en la mitigación de los impactos que generan la combustión del carbón, así como también el evitar la posibilidad de que se generen nuevos impactos por su uso o aplicación.

1.2. Formulación del problema

¿Al establecer las aplicaciones alternativas ambientales sostenibles, permitiría generar usos sostenibles del carbón?

1.3. Justificación

La presente revisión bibliográfica pretende aportar conocimientos a la literatura sobre las innovaciones tecnológicas para el uso del carbón, además de describir los impactos generados por estos nuevos productos, y clarificar si con su aplicación e implementación se logra mitigar de alguna manera los impactos generados por la combustión del carbón, donde el uso de este mineral sea base para producir y desarrollar nuevos subproductos, así como también de estudiar el mercado en que se podrán comercializar y obtener un beneficio de ellos, evaluando qué tan significativo resultaría para el sector minero mundial, Latino americano, nacional y regional la incursión en la fabricación de estas innovaciones tecnológicas estableciéndose como el principal uso del carbón extraído del subsuelo.

Por lo tanto, los principales beneficiarios al realizarse esta investigación, serán los empresarios mineros de Norte Santander, pues además de aumentar el valor de la cadena del carbón, haciéndolo más versátil gracias a la diversidad de usos que se evidencian en este documento los cuales no requieren de combustión y por lo tanto, la disminución de sus impactos ambientales se reducirán en gran escala comparado con los generados a lo largo de los años anteriores que han traído consigo el rechazo social y la responsabilidad de esta industria en la contribución del cambio climático por las emisiones de efecto invernadero.

Adicionalmente, se beneficiará la academia y entre ellos el programa académico de Ingeniería de Minas de la Universidad Francisco de Paula Santander, debido a que este tipo de investigación genera la posibilidad de realizar nuevos proyectos enfocados al tratamiento y beneficio del carbón sin utilizar combustión, y que junto con el sector minero se efectúen estudios, pruebas y la materialización de subproductos del carbón que compitan con calidades a nivel mundial en concordancia a los compromisos ambientales.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Establecer las aplicaciones alternativas ambientalmente sostenibles para el uso del carbón en Norte de Santander.

1.4.2. Objetivos específicos

- Recopilar información para caracterizar del carbón de Norte de Santander a través de fuentes de información secundarias
- Identificar los impactos ambientales y sociales que genera el uso de carbón en el ámbito nacional y regional.
- Analizar las aplicaciones alternativas del carbón para usos ambientalmente sostenibles a nivel internacional y nacional.
- Establecer las técnicas en pro del ambiente en los procesos que involucran la combustión de carbón.
- Determinar las posibles aplicaciones alternativas ambientalmente sostenibles para el carbón del departamento Norte de Santander.

2. Marco de referencia

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacional

Li, D., Wu, D., Xu, F., Lai, J., & Shao, L. (2018). Literature overview of Chinese research in the field of better coal. *Journal of Cleaner Production*, 185, 959-980. Explican que: La utilización integral de los subproductos del carbón ha atraído un considerable interés de

investigación y ha dado lugar a la publicación de numerosos artículos académicos. Sin embargo, no existen estudios previos donde aborden los problemas y los efectos negativos de la utilización integral de los subproductos. En consecuencia, el propósito de este documento es proporcionar una revisión exhaustiva de la literatura y el análisis de la utilización integral de subproductos de preparación de carbón en China. El objetivo principal de la revisión es revelar problemas durante el procesamiento y dar indicaciones de posibles soluciones. Además, el documento ofrece recomendaciones para el trabajo futuro en el campo. La revisión de la literatura se basa más o menos en la metodología propuesta por Fink la cual realiza una selección de las preguntas de investigación, las bases de datos y los sitios web, y define los términos de búsqueda. El documento en esencia da respuesta a las siguientes preguntas de investigación RQ1: ¿Cuáles son las características de los subproductos y qué problemas ambientales han provocado los subproductos? RQ2: ¿Qué medidas ha tomado el gobierno chino para promover la utilización integral de los subproductos? RQ3: ¿Cuáles son los modos de utilización de los subproductos? RQ4: ¿Qué problemas surgen durante la utilización integral de los subproductos y cómo se pueden resolver? Se cree que el estudio hace una contribución significativa a la literatura porque interpreta la utilización integral de los subproductos de la preparación del carbón en China desde un nuevo punto de vista. A pesar de sus ventajas, la utilización integral de los subproductos del carbón tiene impactos ambientales negativos que no pueden ignorarse. Los hallazgos del presente estudio pueden proporcionar información valiosa para los investigadores interesados en el campo, y tiene la intención de motivar y promover la investigación relevante y la formulación de políticas a corto y largo plazo, sirviendo, así como base para proporcionar orientación científica sobre la utilización integral de subproductos de preparación de carbón.

Paisminero. (6 de enero de 2022). Análisis - El carbón sigue siendo el rey. Obtenido de <https://www.paisminero.com>. Comunican que el carbón es fundamental para las industrias en la producción de cemento, el hierro y el acero, el cual es necesario para la civilización moderna, para las turbinas eólicas y los paneles solares. Además, el carbón sigue siendo la fuente dominante en la generación de electricidad y hasta que no se tenga una garantía de energía confiable alternativas, no se puede eliminar este recurso, siendo este el más asequible y confiable, buscando opciones de una combustión más limpia en un futuro.

Becerra, B. X. (22 de febrero de 2022). La producción mundial del carbón seguirá en crecimiento por lo menos hasta 2024. La república. Obtenido de <https://www.larepublica.co>. Expone que el consumo de carbón aumentó alrededor de 6% durante el año 2021 de acuerdo a la Agencia Internacional de la Energía (AIE) y se presentó a causa de la reapertura económica tras el desescalamiento de las medidas anticovid, aumentando las necesidades energéticas, en donde la India será el país que más aumente su producción y llegará a representar el 12% de la producción mundial del carbón, detrás de China que representan el 50% del combustible a nivel global.

Lindholt, L., & Glomsrød, S. (2018). Phasing out coal and phasing in renewables – Good or bad news for arctic. *Energy Economics*, 70, 1-11. Expresan que la generación de electricidad basada en carbón global fomenta la demanda de gas y afecta la actividad regional en el gas producción con énfasis en las regiones árticas. Además, en un enfoque hacia el 2050, se tendrán en cuenta que las energías renovables aumentarán su contribución a la producción mundial de electricidad a lo largo del tiempo, mientras que el carbón contribuirá menos. Nos encontramos con que un escenario de política con mayor eliminación gradual de carbón y el escalonamiento de las energías renovables para el sector de la energía hasta el año 2050, dará lugar a una reducción en la producción de gas en comparación con el escenario de referencia, aunque la producción total de

electricidad en todo el mundo se duplica en el mismo período. Sin embargo, incluso en una situación con menos recursos en el Ártico, las futuras inversiones en nuevas reservas en la región siguen siendo rentable, ya que la producción total de gas del Ártico será ligeramente mayor en 2050 que en la actualidad.

Según, Greenpeace. (2022). La energía del carbón es de las mayores amenazas a la que se enfrenta nuestro clima. Obtenido de <https://es.greenpeace.org>, la energía de carbón es de las mayores amenazas que enfrenta el clima, pues 36 millones de toneladas equivalentes del CO2 fueron emitidas por las centrales térmicas de carbón españolas, para el año 2030 el carbón será responsable del 60% de las emisiones mundiales de CO2 y aproximadamente 550000 ataques de asma son consecuencia de la contaminación de las centrales térmicas. Para ello, se promueve una revolución energética que sustituya estas energías y ponga fin a la quema de carbón para la producción de electricidad, dando visión de la necesidad de la búsqueda de alternativas ambientalmente sostenible en los procesos de combustión.

Sin embargo, Semana. (19 de marzo de 2022). El alto precio del carbón: ¿amenaza u oportunidad? Revista Semana. Obtenido de <https://www.semana.com>, menciona que la situación actual del carbón es paradójica, pues se están buscando estrategias para avanzar hacia el proceso de descarbonización y de acelerar la transición hacia energías limpias, su precio ha aumentado en cifras históricas y su rol está siendo protagónico, ya que, la demanda aumentó tras la normalización de las operaciones después de pandemia, exigiendo una mayor generación de energía, alza de los precios y se volvieron a encender las plantas térmicas de carbón. Del mismo modo, el abastecimiento energético no estaba garantizado y no iba a los mismos ritmos ni tiempos, y, gracias al conflicto entre Rusia y Ucrania, los energéticos van en alza y Rusia es uno de los principales productores de carbón, dando evidencia de la insuficiencia del carbón en el

mundo pues no se están financiando operaciones, las carboneras globales han iniciado desescalamiento de sus plantas y se están reduciendo sus proyectos. Sin embargo, en un contexto de transición energética se debe invertir en nuevas tecnologías como las de captura de carbono.

2.1.2. Nacional.

La república. (19 de julio de 2022). Sector minas creció 34% en 2021, con Drummond y Carbones de Cerrejón a la cabeza. Obtenido de <https://amp-larepublica-co.cdn.ampproject.org/>, indicó que en el ranking de la Superintendencia de Sociedades que analiza tendencias empresariales en Colombia, registró que el sector minero aumentó 34 puntos porcentuales en los ingresos sumados de 32 empresas, representando más de cinco compañías en comparación al año anterior, con una cifra de ingresos operacionales de \$38.9 billones de 2021. Esto evidenció una recuperación del sector por el aumento de la facturación y se demostró el liderazgo de la industria carbonífera con empresas como Drummond, Carbones de Cerrejón y Cerrejón Zona Norte, registrando una producción de carbón de 26 millones de toneladas según el Ministerio de Minas y Energía.

Valora Analitik . (04 de enero de 2022). Colombia busca incrementar ventas de carbón; en 1er trimestre se conocerán bloques de Ronda de Oro. Obtenido de [valoraanalitik](https://www.valoraanalitik.com): <https://www.valoraanalitik.com>, En sus enunciados, el funcionario Mesa expresa que “el carbón va a seguir siendo un elemento necesario para la generación de energía en el mundo” y que el punto clave de la producción de carbón es poder ofrecerlo actualmente de una forma más amigable con el medio ambiente, controlando las emisiones y la huella de carbono. Así mismo, en el artículo se evidencia que las empresas mineras se han venido adaptando a cambios en pro

del ambiente como lo es la autogeneración de energía, competitividad en mercados internacionales e incrementando su sostenibilidad.

Así mismo Lugo, R. C. (1 de junio de 2022). Las ventas de carbón crecen más de 200% hacia Europa, señala que Colombia está sacando ventajas competitivas por la demanda energética de Europa, debido a la guerra entre Rusia y Ucrania, pues, según el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) las ventas externas hacia la unión Europea de carbón crecieron en un 263.20% en los primeros cuatro meses del presente año, gracias a la obtención de un recaudo de US\$512 millones en este periodo a consecuencia del repunte de los precios de este mineral, y las exportaciones a la Unión Europea sumaron US\$1.871.1 millones en ventas hacia Alemania y Turquía. El Ministerio de Minas y Energía señaló que se está trabajando para atender los llamados de los consumidores internos y externos del carbón de manera más responsable y sin generar expectativas irreales sobre el incremento de la producción y es difícil aumentar a corto plazo la capacidad de producción.

Adicional a lo anterior, Portafolio. (11 de abril de 2022). Veto al carbón ruso abre puertas al colombiano en Unión Europea. Obtenido de <https://www.portafolio.co>, reafirma que la invasión de Rusia a Ucrania le está permitiendo a Colombia dinamizar aún más su operación carbonífera, pues bien, los líderes de Europa acordaron la eliminación gradual de las importaciones de carbón ruso, dando pie que el país de amplíe las exportaciones del mineral hacia Alemania, fortalecer su seguridad energética y gozar en distintas formas de energía. Además, no solo el carbón térmico está en su cuarto de hora, lo mismo sucede con el carbón metalúrgico del centro del país, cuyas exportaciones aumentaron.

Además, El espectador. (agosto de 31 de 2021). En Norte de Santander se produce carbón metalúrgico con calidades únicas. El espectador.com, pág. 1. El carbón es el segundo producto de exportación en Colombia, representa el 18% del valor de las exportaciones del país, y el 76,6% de las exportaciones mineras” (El Espectador, 2021). Por consiguiente, se consumen aproximadamente 6,000,000 de toneladas de carbón para la producción de coque atractivo para el sector de minería de carbón en Colombia, y en las regiones como Cundinamarca, Boyacá y Norte de Santander se produce carbón metalúrgico en calidad únicas atractivos para la producción de acero a nivel mundial. (El Espectador, 2021).

Monsalve, M. M. (2 de enero de 2022). ¿Eliminar el carbón? Discusión incómoda en Colombia. Obtenido de <https://www.elespectador.com>, se explica que, en el Pacto de Glasgow, firmado en la COP26, varios países llegaron a acuerdos importantes sobre la mitigación, en donde se pide la eliminación progresiva de la energía del carbón y la supresión de los subsidios a los combustibles fósiles ineficientes. Esto ha ocasionado debates y retos particulares sobre la exportación de carbón. En Colombia, se entienden los compromisos ambientales sobre el clima, sin embargo, los proyectos vigentes y nuevos proyectos que se abren, se evalúa sus licencias ambientales, los compromisos con la Agencia Nacional de Licencias Ambientales-ANLA y estudios de impactos climáticos. (Monsalve M. M., 2022). Además, el presidente Carlos Dante, de la Federación Nacional de Productores de Carbón (Fenal carbón) recuerda que la matriz energética del país es muy limpia un 70% a partir de hidroeléctricas con un respaldo de térmicas con un 10% y reconoce que, aunque hay una presión para la disminución, la demanda de carbón térmico continuará en las próximas tres décadas y cuatro o cinco para el carbón metalúrgico. Del mismo modo, Dante explica que la respuesta no es disminuir el consumo y la producción del carbón, sino que se realice de forma más eficiente y con control de las emisiones, al respecto

manifiesta que: “Ya existen modelos de plantas que, a partir de menores cantidades de carbón, generan mayor energía y disminuyen un 50 % de emisiones de CO₂”. Lo que no está claro, sin embargo, es si acceder a estas tecnologías le costará más a Colombia que transitar con más fuerza a energías renovables no convencionales.

2.1.3. Regional.

La Opinión. (11 de enero de 2022). La minería está en el ADN de la región. La Opinión. Colombia. Obtenido de <https://www.laopinion.com.co>, expresan que, en el departamento de Norte de Santander, el sector minero es importante para su economía en cuanto a la generación de empleo y recursos, y destaca que localidades como Cúcuta, Sardinata, Bochalema, El Zulia, San Cayetano y Salazar producen el 90% de este mineral. Además, “Cerca del 5,9% del potencial en carbón térmico del país se encuentra en Norte de Santander y el 17,13% del carbón metalúrgico del total país.” Los carbones térmicos de la región son usados como combustible en la generación de energía en la empresa Termoeléctrica Termotasajero, así como en los procesos de fabricación de productos cerámicos en importantes empresas ladrilleras y en el proceso de producción de cemento en la empresa CEMEX COLOMBIA, y es exportado aproximadamente el 80% del carbón térmico, metalúrgico y el coque. (La Opinion, 2022).

El espectador. (agosto de 31 de 2021). En Norte de Santander se produce carbón metalúrgico con calidades únicas. El espectador.com, pág. 1. Colombia. Expresa que en Norte de Santander por sus condiciones geográficas se extraen carbones de tipo térmico y metalúrgico único en términos de calidad y pureza. Específicamente, se produce coque proveniente de explotación de carbón metalúrgico de calidades únicas, haciéndolo atractivo para la producción de acero a nivel mundial. Además, gran parte de las regalías de este departamento provienen de

la extracción de dicho mineral y es necesario que el sector se desarrolle con acciones concretas ambientalmente sostenibles y con mayor margen de rentabilidad.

Según la Federación Nacional de Productores de Carbón. (31 de agosto de 2021). FENALCARBÓN. Colombia. La industria minera aporta en los últimos años al país billones de pesos para la inversión de regiones, educación, salud, infraestructura, cultura, investigación y mejoramiento de la calidad de vida, por ello, la industria carbonífera es de gran valor para finanzas nacionales y económicas regionales, así mismo, impulsa a demás industrias y generación de empleo. Precisamente, existen industrias que dependen del carbón metalúrgico para la producción de acero y ferroaleaciones a nivel mundial, por su uso como reductor químico y su proceso se da en hornos de fundición de hierro. Además, Colombia cuenta con calidades de carbones que dependen de formaciones geológicas y el departamento de Norte de Santander cuenta con carbones con bajo contenido de fósforo, permitiendo alta calidad y ser un proveedor confiable.

El espectador. (agosto de 31 de 2021). En Norte de Santander se produce carbón metalúrgico con calidades únicas. El espectador.com, pág. 1. Colombia. Para Norte de Santander, el 35 % del empleo formal está relacionado con la industria del carbón y del coque, y, la mayor parte de sus regalías son generadas por las explotaciones de carbón. Así mismo, en esta región se producen carbones metalúrgicos con calidades únicas y en su proceso de transformación al coque se conserva este tipo de valor diferencial atractivo para la industria. Además, indica que cuentan con formaciones geológicas que poseen mantos de carbón de bajo contenido de fosforo, permitiendo tener alta calidad en la producción de acero y ferroaleaciones. Por ello, la región cuenta con oportunidades importantes para fortalecer su economía y aportar a

la reactivación económica del país mediante la adaptación de prácticas sostenibles y aportes socioeconómicos.

Portafolio. (2018). Termotasajero III cancela su proyecto para la generación de energía. Colombia. informa que: Termo Tasajero III cancela su proyecto para la generación de energía. Los representantes de la generadora térmica solicitaron a la UPME realizar el retiro del proyecto Tasajero III del Registro de Proyectos de Generación de Energía Eléctrica, el cual se motivó por el desincentivo del Gobierno para la generación a carbón y el impulso dado a contratos exclusivos para fuentes renovables no convencionales luego de varios análisis y consideraciones, debido a que al estado no le interesa generar energía con el carbón por los efectos ambientales que pueda generar la combustión del carbón.

2.2.Bases referenciales

2.2.1. Colombia y minería

Colombia, “es el único país de América Latina con recursos de carbón térmico y metalúrgico, reconocidos internacionalmente por su excelente calidad y pureza” (El espectador, 2021). Es catalogado como quinto exportador a nivel mundial de carbón y dentro de sus principales destinos está Turquía con una participación del 21.3%, Chile con 10.9% y China con 9.4%, entre junio de 2020 y 2021. (Munar, 2021), pues bien, el carbón de Colombia posee características de bajo contenido de cenizas y bajas emisiones de dióxido de azufre, y, es utilizado como fuente para producir energía en plantas térmicas. Así mismo, el país es el tercer exportador de coque en el mundo (después de China y Polonia), como menciona el artículo publicado en (Valora Analitik, 2022), con una calidad del producto es reconocida a nivel mundial por el empleo de altas tecnologías en su procesamiento que satisfacen las necesidades del mercado.

La producción de carbones térmicos del país se presenta en mayor proporción y tiene mayor demanda comparado con el carbón coquizable, ya que estos son caracterizados para someterlos a procesos de combustión y emplearlos como combustibles en la generación de energía en las termoeléctricas, dado que es una fuente de energía que tiene un costo menor que otras tecnologías como la hidroeléctrica o la nuclear. Pero este proceso genera impactos al ambiente desde el momento de la extracción del mineral hasta su combustión, debido a la generación de diversas nano partículas. Estos subproductos no intencionales en la mayoría de los casos encapsulan varios elementos peligrosos tales como agregados de fullereno, gases tóxicos y de efecto invernadero, compuestos organometálicos y otros componentes del gas.

Sin embargo, la producción de carbones térmicos para el 2020 se redujo a un 38.6 %, alcanzando un mínimo de 49.3 millones de toneladas (Asociación Colombia de Minería-ACM, 2021), ya que El consumo mundial del carbón en los años 2020 y 2021 sufrió una disminución como consecuencia de la crisis generada por la pandemia del COVID-19 y por la baja demanda precedente de los sectores del acero y cemento, lo que generó una caída mundial de producción de un 4.5% (Consumo nacional de carbón y lignito, 2020). Este acontecimiento se ve evidenciado en la (Figura 1), la cual se basa según el recaudo de regalías en estos años, allí se identifica la caída de producción y el alza de los precios de este mineral para la industria carbonífera de Colombia desde el año 2012 hasta lo corrido del año 2022.

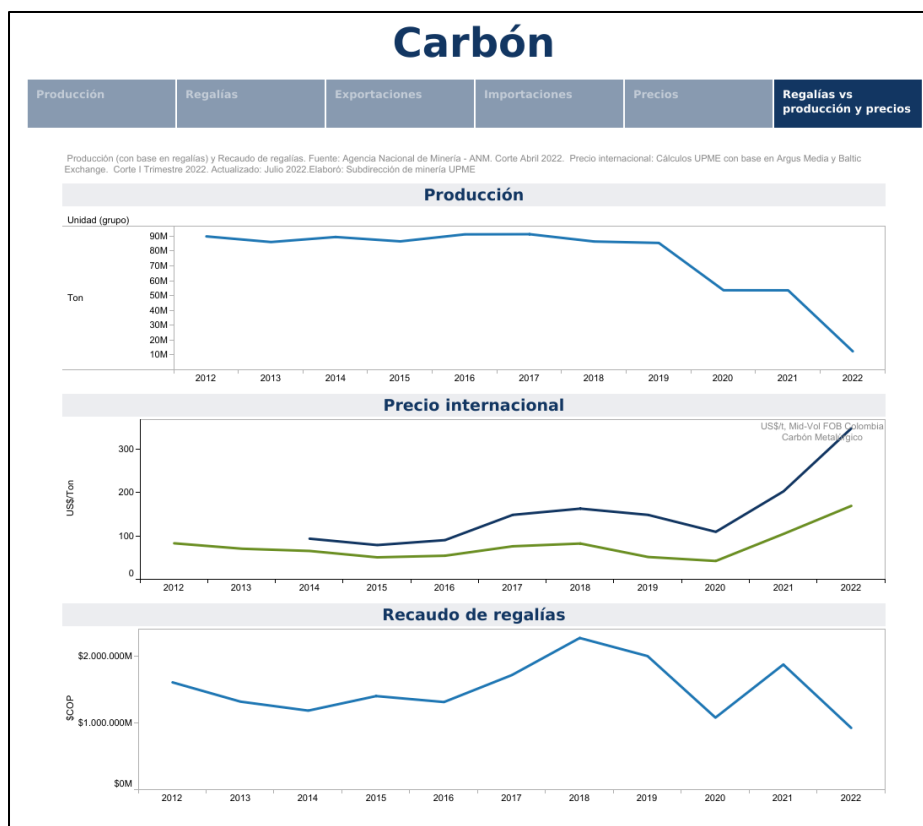


Figura 1. Cifras de producción y regalías del carbón obtenidas de la UPME

Fuente: Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME

En relación con lo anterior y según lo menciona X, el 2020 tampoco ha sido fácil para los sectores mineros de las regiones de Colombia, y entre ellas se encuentra el departamento de Norte de Santander (ver figura 2). Se observó una reducción significativa de más del 50% en la producción departamental. Sin embargo, fue el primer sector industrial en reactivarse pues familiar dependen económicamente de esta actividad, donde más del más del 80% del carbón térmico, metalúrgico y coque es exportado, el restante de consumo interno es usado en las industrias, cementeras, arcilleras y la generación de energía para la región, caracterizados por ser de los mejores tanto para su consumo interno como de exportación. (La Opinión, 2022)

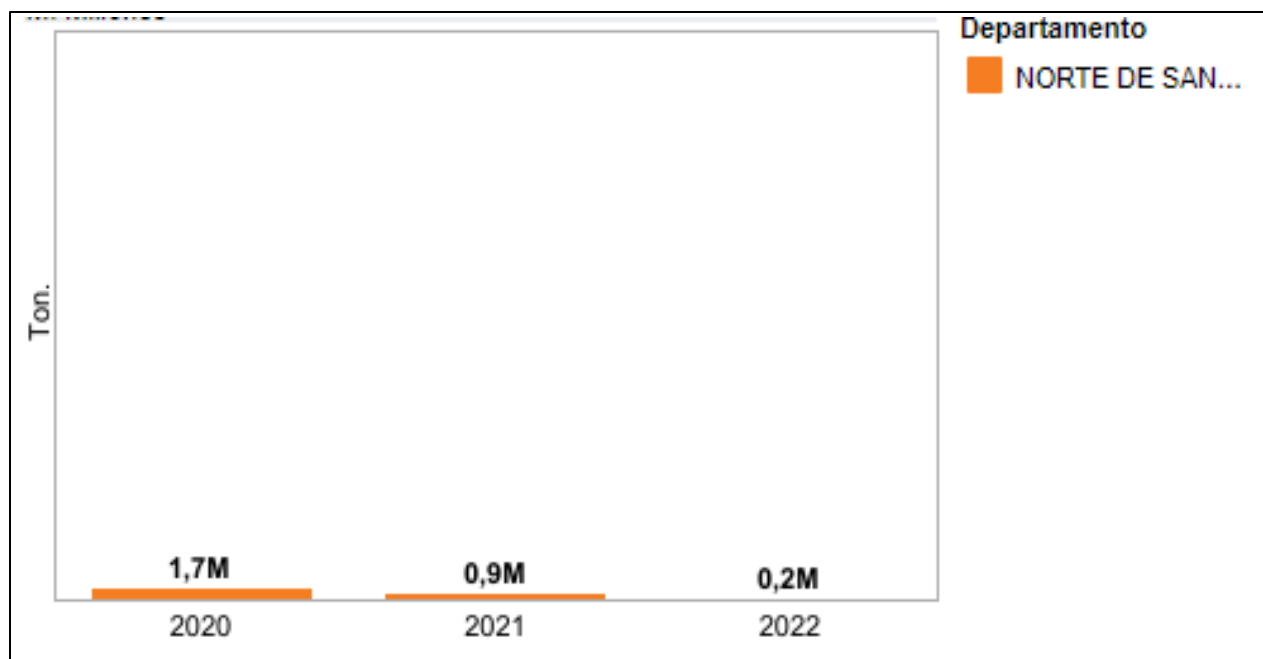


Figura 2. Comparativa de la producción de Norte de Santander, Colombia

Fuente Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME

A pesar de ello, el departamento de Norte de Santander tiene una importante oportunidad de fortalecer su economía y contribuir a la reactivación de la nación aprovechando el potencial y el trabajo realizado por los mineros de la región durante décadas (El Espectador, 2021). Dentro de esas acciones y estrategias aportadas el periódico el Espectador, donde inicia un proceso de adaptación constante al cambio se identifican las siguientes:

1. Mayor trabajo colaborativo: trabajar en equipo implementando modelos de asociatividad ajustado al contexto del sector en particular, que permita a las distintas empresas identificar e implementar experiencias significativas, buenas prácticas, procesos productivos exitosos, para así generar relaciones estratégicas de ganar – ganar.

2. Acelerar la transformación del sector, teniendo como base el Plan Regional de Competitividad (PRC) de Norte de Santander 2019-2032, en donde se trazó, entre varios objetivos, la promoción de la formalización, legalidad y asociatividad del sector minero energético, al igual que el apoyo a nuevas propuestas de innovación empresarial de las compañías del sector minero energético. Para eso se trazó un objetivo de que el 20 % de las empresas del sector estén vinculadas a procesos de fortalecimiento de innovación. Igualmente, la idea es que haya un incremento anual del 10 % de diferentes propuestas de innovación empresarial del sector minero energético. Estas iniciativas y otras más que están en el PRC seguramente harán de la región y del departamento un bastión para la industria del carbón en el futuro más próximo del país.

3. Formular e implementar políticas y prácticas responsables, que promuevan la exploración y explotación de los recursos naturales de manera sostenible, minimizando considerablemente el impacto que genera la actividad al ambiente

Por otro lado, en relación a aquellos impactos generados por la explotación y procesamiento de los carbones, en Colombia las emisiones de CO₂ durante 2021 han crecido 4,535 megatoneladas, un 6,21% (ver figura 3) respecto a 2020, pues bien, en 2021 han sido de 77,57 megatoneladas, con lo que Colombia es el país número 137 del ranking de países por emisiones (Colombia sube sus emisiones de CO₂, 2021) de CO₂, formado por 184 países, en el que se ordenan los países de menos a más contaminantes.

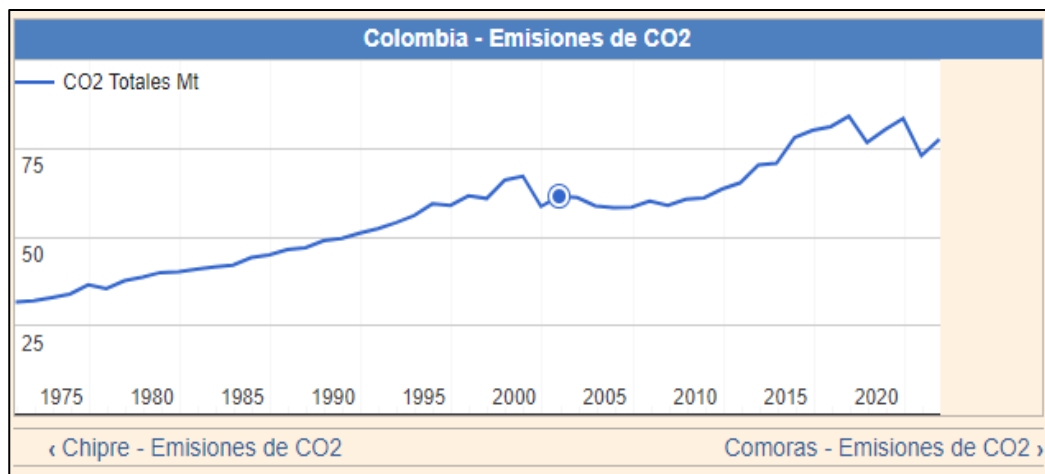


Figura 3. Emisiones de CO2 en Colombia.

Fuente: Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME

Existen excesivas emisiones de CO₂ en los últimos años, lo cual ha disparado la contaminación del aire, al calentamiento global y emisiones de gases de efecto invernadero.

2.2.2. Ámbito Internacional

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26), celebrada en Glasgow reunió a 120 líderes mundiales centrando todos sus aspectos sobre el cambio climático: fundamentos científicos, soluciones, voluntad política de tomar medidas y las indicaciones claras para la acción por el clima. En ella se realizaron diversas negociaciones que son compromisos por la reducción de las emisiones globales de gases de efecto invernadero para así preservar el clima.

Los mayores objetivos de esta Conferencia son definidos a manera simplificada por (Naciones Unidas, 2022), las cuales se componen de:

- ✓ Mitigación: esfuerzos por reducir o prevenir la emisión de gases de efecto invernadero mediante el uso de nuevas tecnologías, fuentes de energías renovables, mejora en la eficiencia de equipos antiguos, y cambios de prácticas de gestión.

- ✓ Adaptación: los países deben adaptarse a las consecuencias climáticas para proteger a sus ciudadanos, es decir, equipar a las comunidades y a países con conocimientos y herramientas que garanticen la adaptación con compromisos detallados y ambiciosos.
- ✓ Finanzas climáticas: asegurar el apoyo financiero y adecuado a los más vulnerables, comprometiendo a los países más ricos al cumplimiento de esta promesa anual.

Las emisiones globales de gases de efecto invernadero está por debajo de lo necesario para preservar un clima habitable, por ello la COP26, ha proporcionado nuevos cimientos para afianzar los acuerdos del Pacto de París, el cual consistía en limitar el aumento medio de la temperatura global y a la presentación de estrategias de desarrollo para bajas de emisiones de gases de efecto invernadero. Con ello, permitir que el mundo se encamine hacia futuros sostenibles y bajas emisiones de carbono en donde se resaltan los siguientes acuerdos expuestos por (Naciones Unidas, 2021) :

- Reconocimiento de la emergencia. se reafirmó el objetivo del Pacto de París de limitar el incremento de la temperatura media mundial a 2°C y se expresó la alarma y máxima preocupación en las actividades humanas que han provocado incremento de 1,1 °C en las temperaturas.
- Intensificación de la acción por el clima. Los países resaltaron que las emisiones de dióxido de carbono deben reducirse a un 45% para alcanzar emisiones netas cero para mediados del ciclo, y que los países sean más ambiciosos a la hora de presentar planes nacionales para el año 2022.

- Abandono de los combustibles fósiles. acordaron una disposición para la reducción del carbón como fuente de energía y la eliminación gradual de los subsidios “ineficientes” a los combustibles fósiles, pues el carbón, el petróleo y el gas son los principales causantes del calentamiento global. Sin embargo, diversos países y ONG expresaron su descontento por que los términos relativos al carbón se hubieran suavizado significativamente (de eliminar a reducir gradualmente).
- Financiación para la acción climática: los países desarrollados se presentaron en la conferencia sin el cumplimiento de proporcionar financiación a países en desarrollo. No obstante, reafirman la promesa y se pone como urgencia la facilitación de dicho financiamiento para el año 2023.
- Carbón. Líderes de Sudáfrica, Reino Unido, los Estados Unidos, Francia, Alemania y la Unión Europea anunciaron una innovadora asociación para apoyar a Sudáfrica, el productor de electricidad con mayor índice de emisiones de carbono del mundo, con 8.500 millones de USD a lo largo de los próximos 3-5 años para que pueda hacer una transición justa hacia una economía con bajas emisiones de carbono y abandonar el carbón.

2.3.Bases conceptuales

Los conceptos claves son definidos en su totalidad por la Real Academia Española de la siguiente manera según el contexto del documento:

ALTERNATIVA. 9. f. p. us. Acción o derecho que tiene cualquier persona o comunidad para ejecutar algo o gozar de ello alternando con otra. Es la opción existente entre dos o más cosas, es cada una de las cosas entre las cuales se elige.

CARBÓN. 2. m. Materia sólida, ligera, negra y muy combustible, que resulta de la destilación o de la combustión incompleta de la leña o de otros cuerpos orgánicos.

COMBUSTIÓN. 1. f. Acción y efecto de arder o quemar.

CONTAMINACIÓN. 1. f. Acción y efecto de contaminar.

CONTAMINAR. 1. tr. Alterar nocivamente la pureza o las condiciones normales de una cosa o un medio por agentes químicos o físicos. U. t. c. prnl.

IMPACTO AMBIENTAL. 1. m. Conjunto de posibles efectos sobre el medio ambiente de una modificación del entorno natural, como consecuencia de obras u otras actividades.

MINERÍA. 4. f. Conjunto de las minas y explotaciones mineras de una nación o comarca.

RENOVABLE. 2. adj. Dicho de la energía: Que procede de un recurso presente en la naturaleza de manera prácticamente inagotable. U. t. c. s. f. Aumento en el consumo de renovables.

SOSTENIBILIDAD. 1. f. Cualidad de sostenible.

SOSTENIBLE. 2. adj. Especialmente en ecología y economía, que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente. Desarrollo, economía sostenible.

TRANSICIÓN. 1. f. Acción y efecto de pasar de un modo de ser o estar a otro distinto.

2.4.Marco legal

En este capítulo se desenlazan las normas que corresponden al tema tratado en este documento.

2.4.1. Internacional

ISO 14001:2500. Especifica los requisitos para un sistema de gestión ambiental que una organización puede utilizar para mejorar su desempeño ambiental. Está destinada a una organización que busque gestionar sus responsabilidades ambientales de una manera sistemática que contribuya al pilar ambiental de la sostenibilidad.

ISO 14001:2015 ayuda a una organización a lograr los resultados esperados de su sistema de gestión ambiental, que brindan valor para el medio ambiente, la propia organización y las partes interesadas. De acuerdo con la política ambiental de la organización, los resultados previstos de un sistema de gestión ambiental incluyen:

- Mejora del desempeño ambiental;
- Cumplimiento de las obligaciones de cumplimiento;
- Consecución de los objetivos ambientales.

Es aplicable a cualquier organización, independientemente de su tamaño, tipo y naturaleza, y se aplica a los aspectos ambientales de sus actividades, productos y servicios que la organización determina que puede controlar o influir considerando una perspectiva de ciclo de vida. ISO 14001:2015 no establece criterios específicos de desempeño ambiental.

ISO 14060. proporciona claridad y coherencia para cuantificar, realizar seguimiento, informar y validar o verificar las emisiones y remociones de GEI (Gases de efecto invernadero) para apoyar el desarrollo sostenible a través de una economía baja en carbono. También beneficia a las organizaciones, los proponentes de proyectos y las partes interesadas de todo el mundo al

proporcionar claridad y coherencia en la cuantificación, el seguimiento, la generación de informes y la validación o verificación de las emisiones y remociones de GEI. Específicamente, el uso de la familia de la Norma ISO 14060:

- Mejora la integridad ambiental de la cuantificación de GEI;
- Mejora la credibilidad, la coherencia y la transparencia de la cuantificación, el seguimiento, la presentación de informes, la validación y la verificación de GEI;
- Facilita el desarrollo y la implementación de estrategias y planes de gestión de GEI;
- Facilita el desarrollo y la implementación de acciones de mitigación a través de reducciones de emisiones o aumento de remociones;
- Facilita la capacidad de trazar el desempeño y el progreso en la reducción de las emisiones de GEI y/o el aumento de las remociones de GEI.

Las aplicaciones de la familia de la Norma ISO 14060 incluyen:

- Decisiones corporativas, como la identificación de oportunidades de reducción de emisiones de GEI y el aumento de la rentabilidad mediante la reducción del consumo de energía;
- Gestión del riesgo de carbono, como la identificación y gestión de riesgos y oportunidades;
- Iniciativas voluntarias, como la participación en registros voluntarios de GEI o iniciativas de informes de sostenibilidad;
- Mercados de GEI, como la compra y venta de derechos de emisión o créditos de GEI;
- Programas de GEI reglamentarios/gubernamentales, como crédito para acciones tempranas, acuerdos o iniciativas de informes nacionales y locales.

2.4.2. Nacional

CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA DE 1991. también llamada Carta magna o Carta Fundamental, es la ley máxima y suprema de un país o estado. En ella se especifican los principales derechos y deberes de sus participantes, y define la estructura y organización del Estado., y aquellos artículos que competen al sector minero y al ámbito ambiental son: Arts. 80,102,332,334,337,360 y 361 (Minería) y los Arts. 8,63,79,80,81,82,88,95,277 y 340 (Medio Ambiente).

DECRETO 1753 DE 1994. Define la licencia ambiental LA: naturaleza, modalidad y efectos; contenido, procedimientos, requisitos y competencias para el otorgamiento de LA.

DECRETO 2150 DE 1995. Reglamenta la licencia ambiental y otros permisos. Define los casos en que se debe presentar Diagnóstico Ambiental de Alternativas, Plan de Manejo Ambiental y Estudio de Impacto Ambiental. Suprime la licencia ambiental ordinaria.

DECRETO 2811 DE 1974. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

DECRETO 4134 DE 2011. Por el cual se crea la Agencia Nacional de Minería, ANM, se determina su objetivo y estructura orgánica. Créase la Agencia Nacional de Minería ANM, como una agencia estatal de naturaleza especial, del sector descentralizado de la Rama Ejecutiva del Orden Nacional, con personería jurídica, patrimonio propio y autonomía administrativa, técnica y financiera, adscrita al Ministerio de Minas y Energía.

DECRETO 948 DE 1995. El contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire, de alcance general y aplicable en todo el territorio nacional, mediante el cual se establecen las normas y principios generales para la protección atmosférica, los mecanismos de prevención, control y atención de episodios por contaminación del aire, generada por fuentes contaminantes

fijas y móviles, las directrices y competencias para la fijación de las normas de calidad del aire o niveles de inmisión, las normas básicas para la fijación de los estándares de emisión y descarga de contaminantes a la atmósfera, las de emisión de ruido y olores ofensivos, se regulan el otorgamiento de permisos de emisión, los instrumentos y medios de control y vigilancia, el régimen de sanciones por la comisión de infracciones y la participación ciudadana en el control de la contaminación atmosférica.

DECRETO LEY 2811 DE 1974. Código nacional de los recursos naturales renovables RNR y no renovables y de protección al medio ambiente. El ambiente es patrimonio común, el estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo. Regula el manejo de los RNR, la defensa del ambiente y sus elementos.

LEY 1972 DE 2019. Por medio de la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano estableciendo medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes de fuentes móviles y se dictan otras disposiciones.

LEY 23 DE 1973. Principios fundamentales sobre prevención y control de la contaminación del aire, agua y suelo y otorgó facultades al presidente de la República para expedir el Código de los Recursos Naturales.

LEY 685 DE 2001. tiene como objetivos de interés público fomentar la exploración técnica y la explotación de los recursos mineros de propiedad estatal y privada; estimular estas actividades en orden a satisfacer los requerimientos de la demanda interna y externa de los mismos y a que su aprovechamiento se realice en forma armónica con los principios y normas de explotación racional de los recursos naturales no renovables y del ambiente, dentro de un concepto integral de desarrollo sostenible y del fortalecimiento económico y social del país.

LEY 99 DE 1993. Crea el Ministerio del Medio Ambiente y Organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Reforma el sector Público encargado de la gestión ambiental. Organiza el sistema Nacional Ambiental y exige la Planificación de la gestión ambiental de proyectos. Los principios que se destacan y que están relacionados con las actividades portuarias son: La definición de los fundamentos de la política ambiental, la estructura del SINA en cabeza del Ministerio del Medio Ambiente, los procedimientos de licenciamiento ambiental como requisito para la ejecución de proyectos o actividades que puedan causar daño al ambiente y los mecanismos de participación ciudadana en todas las etapas de desarrollo de este tipo de proyectos.

RESOLUCIÓN 40391 DE 2016. Por la cual se adopta la Política Minera Nacional. Que es necesario establecer y unificar la Política Minera Nacional, con el fin de implementar estrategias orientadas a hacer más competitiva y productiva la industria minera, y así lograr que la minería en Colombia sea ordenada, legítima, incluyente y competitiva.

2.4.3. Regional

DECRETO 527 DE 2005. Por el cual se estructura el comité interinstitucional de Educación Ambiental en Norte de Santander.

RESOLUCIÓN 705 del 11/10/2017. Por el cual se establecen los parámetros y el procedimiento para efectuar el cálculo de las tarifas y el valor a cobrar, de los servicios de evaluación y seguimiento de las licencias, permisos, concesiones, autorizaciones y demás instrumentos de control y manejo ambiental, de competencia de CORPONOR.

3. Diseño metodológico

El diseño metodológico utilizado para el desarrollo de la monografía se resume en la Figura 4, donde se muestra cada una de las etapas desarrolladas durante la investigación.

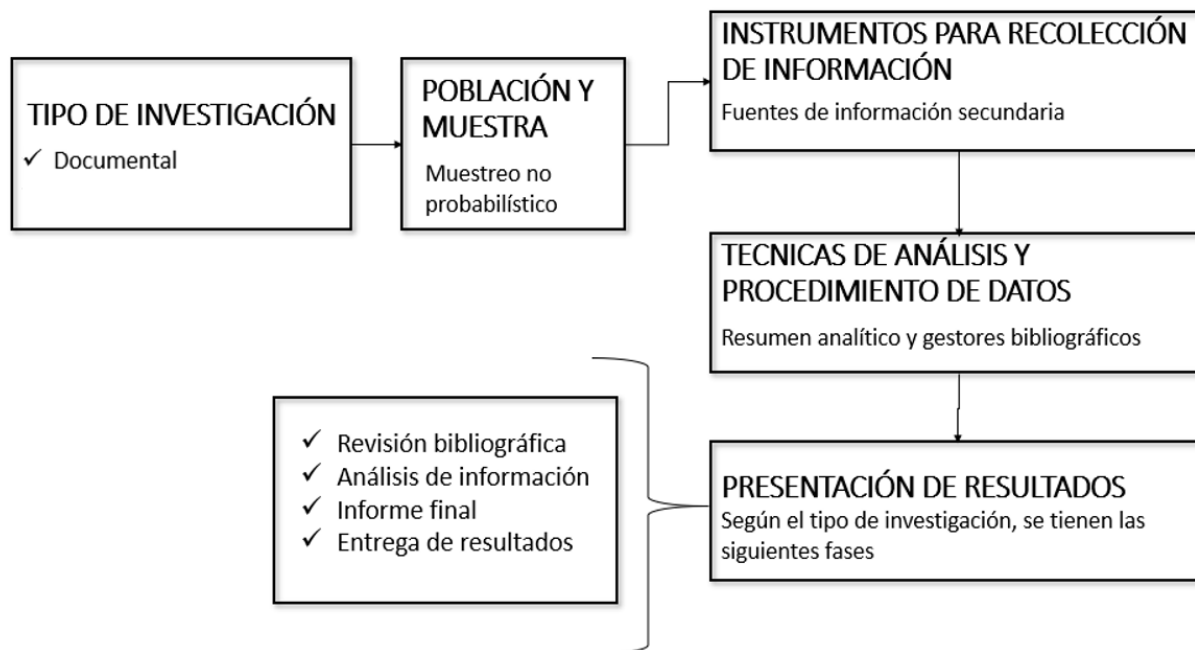


Figura 4. Diagrama de flujo del diseño metodológico general del proyecto

Fuente: Elaboración propia.

3.1. Tipo de investigación

Según el nivel de investigación, este proyecto se clasifica como Investigación Documental, ya que según Tena Suck (2000, p. 49) “La investigación documental se encuentra contenida en diversas observaciones o datos, contenidas en escritos de diversos tipos” y esta investigación se realizó a través de la consulta de documentos (libros, revistas, periódicos, registros, páginas web, artículos y proyectos investigativos) sobre los temas tratados en este documento, dando solución al problema planteado y servir como punto de partida para la generación de nuevas investigaciones.

3.2. Universo y muestra

El universo de este documento se basa en todos los artículos de revistas como el periódico, el espectador, y la opinión, documentos de páginas web, artículos investigativos, paginas gubernamentales como ANM, UPME, INGEOMINAS, SGC, MIN MINAS, proyectos de investigación, entre otros.

En este proyecto seleccionó el departamento de Norte de Santander y con un muestreo no probabilístico por conveniencia, pues se eligieron algunas áreas características de la región con potencial carbonífero y a su vez, empresas consideradas líderes en la región en producción de carbón.

3.3. Instrumentos para la recolección de información

Para la realización de la investigación, se revisaron fuentes de información secundaria, tales como artículos de revistas científicas, documentos web, periódicos, artículos de noticias nacionales e internacionales en buscadores web, páginas de entes gubernamentales como la ANM, UPME, SGC, INGEOMINAS, MIN MINAS Y ENERGÍA, biblioteca digital OneMine, patentes en las bases de datos suministradas por la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS), tales como: Science Direct, Scopus, Web of Science, Google Académico, además de la revisión de tesis y libros.

Esta búsqueda de información se realizó teniendo en cuenta palabras claves relacionadas, los objetivos planteados de cada fuente, el contexto general (ubicación, fuente de carbono utilizado y sus características), fecha de publicación (menos de 5 años de antigüedad), los resultados obtenidos y las conclusiones.

3.4. Técnicas de análisis y procedimientos de datos

Para realizar la investigación dentro de las técnicas de análisis y procedimiento de datos fue utilizada la metodología de RAIs. El cual consiste en la síntesis de la información obtenida y dividirla en columnas que contienen la problemática, los objetivos propuestos, la metodología utilizada y los resultados más relevantes de los procesos. Con ello, realizar filtros en la información que permitió asociar los procesos de los diferentes autores haciendo una correlación de los datos y organización de los contenidos.

4. Capítulo I. Contexto del carbón de Norte de Santander

Para determinar la caracterización del carbón de Norte de Santander, hay que comprender que este departamento está localizado en los límites con Venezuela, con altas variaciones geológicas y cuenta con principales zonas mineras, como: Catatumbo, Zulia, Chinácota, Tasajero, y Sardinata, entre otras zonas de potencial carbonífero. Además, debido a la ubicación del departamento, es posible la extracción de dos tipos de carbón: térmico y metalúrgico, y a manera de síntesis, el manejo de estos comprende:

- Se estima que el 81% de total de reservas medidas son de carbón térmico y el 19% de carbón coquizable. (Guevara, 2013)
- Los principales yacimientos se encuentran en las formaciones Catatumbo, Los Cuervos y Carbonera. (Guevara, 2013)
- Cerca de 5,9 % del potencial en carbón térmico del país se encuentra en Norte de Santander y el 17,13% de carbón metalúrgico del total del país. (La Opinión, 2022)
- Mas del 80% del carbón térmico, metalúrgico y coque es exportado y el restante en consumo interno en industrias. (La Opinión, 2022)

- Norte de Santander es un departamento en el que la minería representa el 0,95% del PIB (DANE), 5,8% de su área se encuentra titulada y genera cerca del 1% del empleo en este territorio. (La Opinion, 2022)

Teniendo como base la información anterior, en este capítulo se mostrarán las características carboníferas del departamento, ampliando y añadiendo a cada uno de los puntos mencionados.

4.1. Geología de los yacimientos de carbón

Según el Servicio Geológico Colombiano, las zonas carboníferas de Norte de Santander se encuentran principalmente en las formaciones geológicas: Formación Catatumbo (K6ct), Formación Los cuervos (E1E2c), Formación Carbonera (E2E3c) y la leyenda estratigráfica donde se representan estas formaciones se reflejan en la Figura 6, la cual pertenecen a la plancha 88- Geología del Cuadrángulo G-13 Cúcuta, del Instituto Colombiano de Geología y minería- INGEOMINAS. Igualmente, estas formaciones geológicas se ilustran con mayor detalle en la columna estratigráfica de la Figura 3, donde se muestran los promedios de espesores, la edad a la que pertenecen, su unidad estratigráfica y se efectúa una breve descripción de estas.

E D A D		Espesor en Mts.	Qal	UNIDAD ESTRATIGRAFICA				
Cuaternario	Reciente Pleistoceno							
CENOZOICO	Terciario	MIOCENO	1800 2645	Aluviones, pedimentos, derrumbes, terrazas				
				Grupo Guayabo				
				OLIGOCENO	545	Tol	Formacion Leon	
					EOCENO	500	Tec	Formacion Carbonera
				180		Tem	Formacion Mirador	
				PALEOCENO		300	Tpc	Formacion Los Cuervos
					90	Tpe	Formacion Barco	
				CRETACEO	Superior	180	Ksct	Formacion Catatumbo
						455	Ksm	Formacion Mito Juan
						240	Kse	Formacion Colon
80	Ksl	Formacion La Luna						
Medio	300	Kgc	Formacion Cogollo					
	450	Kuo	Formacion Uribante					
PRE-MESOZOICO	ROCAS CRISTALINAS		Esq	Esquistos				
			Gr	Neises				
			Gr	Intrusivos Graniticos				

C - Carbon P - Fosfatos

Figura 5. Leyenda estratigráfica de la Geología del cuadrángulo G-13 Cúcuta

Fuente: (Instituto de investigadores en Geociencias, Minería y Química, 1998)

SISTEMA	UNIDAD LITOESTRATIGRAFICA	SIMBOLO	LITOLOGIA	DESCRIPCION		
CUATERNARIO		Qm		Depósitos aluviales, glaciares y fluvioglaciares. Terrazas y abanicos aluviales.		
	T E R C I E N O	FM. CARBONERA	Tl		Alternancia de lodolitas grises, moteadas y areniscas arcillosas, con intercalaciones de capas de carbón. Espesor: 375 - 560 m.	
		FM. MIRADOR			Areniscas blancas, finas a conglomeráticas, con lodolitas hacia la parte media. Espesor: 210 - 235 m.	
		FM. LOS CUERVOS			Lodolitas grises carbonosas, con intercalaciones de areniscas arcillosas y capas de carbón económicamente explotables. Espesor: 265 - 420 m.	
		FM. BARCO			Areniscas cuarzosas, localmente arcillosas, con intercalaciones de lodolitas y delgadas capas de carbón. Espesor: 150 - 275 m.	
		FM. CATATUMBO			Lodolitas grises oscuras, nodulares y lentes de areniscas arcillosas. En la parte superior capas de carbón. Espesor: 100 - 210 m.	
		C R E T A C I O S O		FM. COLON-MITO JUAN	Ks	
	FM. LA LUNA			Calizas fosilíferas, en capas delgadas, lodolitas calcáreas, con concreciones calcáreas, chert y rocas fosfóricas. Espesor: 100 - 250 m.		
	FM. CAPACHO			Lodolitas grises a negras, con algunas intercalaciones de calizas fosilíferas, areniscas y limolitas. Espesor: 175 - 435 m.		
	FM. AGUARDIENTE		Kl			Areniscas cuarzosas finas a conglomeráticas, glauconíticas. Espesor: 200 - 400 m.
	FM. TIBU-MERCEDES					Alternancia de calizas grises, lodolitas y areniscas glauconíticas, localmente calcáreas. Espesor: 600 - 800 m.
	FM. RIO NEGRO					Areniscas y conglomerados, con guijos de cuarzo. Espesor: 40 - 80 m.
ASICO	FM. GIRON	Js		Areniscas y lodolitas rojas, localmente conglomerados. Espesor: 200 - 500 m.		

Figura 6. Columna estratigráfica generalizada de la cuenca del Catatumbo, Maracaibo del departamento de Santander.

Fuente: Adaptado de Richards (1968); Ward, et al. (1973); Bueno (1986); Govea y Aguilera (1986).

_Formación Catatumbo (K6ct): El nombre hace referencia a los afloramientos sobre el río Catatumbo entre Barrancabermeja y Puerto Salado en Colombia. Esta Unidad geológica, está compuesta por shales gris oscuros y arcillolitas, con material calcáreo, con presencia de nódulos pequeños y lentes delgados de óxidos de hierro; intercaladas e interlaminaadas con areniscas de grano fino a muy fino de color gris a gris oscuro, lodosas, con algunas láminas de mica y material carbonoso. Hacia la base presenta algunas capas delgadas de carbón y algunas capas de areniscas glauconíticas. (Servicio Geológico Colombiano, 2016)

La Formación Catatumbo, posee un espesor que oscila entre los 106 a 208 metros, en secciones sobre pozos en el anticlinal de Tibú y Sardinata. En secciones geológicas en superficie han indicado espesores entre 245 a 270 metros. Datos obtenidos del estudio de Secciones estructurales realizadas en el levantamiento geológico de la plancha 88 – Cúcuta, el espesor calculado se encuentra entre 300 a 400 metros en el sector de Cerro Tasajero (vereda El Salado). (Servicio Geológico Colombiano, 2016)

Las explotaciones de los mantos de carbón más importantes de esta unidad es la de los sectores de Cerro Tasajero y vereda El Salado al oeste del río Pamplonita. Según Van der Hammen, la formación Catatumbo, tiene una edad que comprende el Paleoceno temprano.

_Formación Los cuervos (E1E2c): debe su nombre a la Quebrada los Cuervos, río tributario del Río Catatumbo. Litológicamente consiste de arcillolitas y shales, con capas de carbón en la parte baja y algunas capas de arenisca en todo lo largo (ver columna estratigráfica generalizada de la formación Los Cuervos, en el sector de la Mina La Mestiza, vereda Albarico, municipio El Zulia, en el Figura 7). Los 75 primeros metros consisten en shales carbonosos gris oscuros y arcillolitas alternadas con limolitas carbonosas, areniscas de grano fino y carbones. Las capas de carbón son comúnmente de 0.1 a 2.5m de espesor. (Servicio Geológico Colombiano, 2016)

La Formación Cuervos se dispone en los sectores de cerro Tasajero y al occidente entre el sector de Arrayanes y la vereda Las Blanquitas, así como también en el área de Concesión Barco. Esta unidad geológica, se caracteriza por poseer los mantos de carbón que van desde el lignito hasta los bituminosos, siendo estos los más atractivos para la actividad minera

La edad de esta unidad se establece entre a finales del Paleoceno y hasta finales del Eoceno medio, enmarcados en la finalización del ciclo regresivo. (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

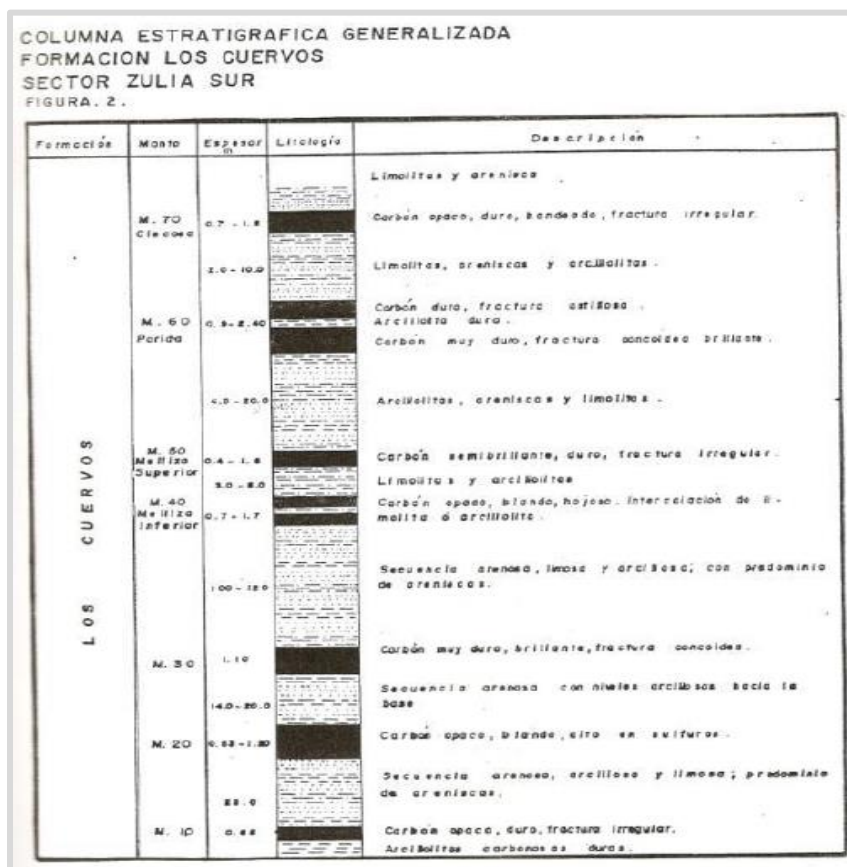


Figura 7. Columna estratigráfica generalizada de la Formación los Cuervos, sector Mina La Mestiza, vereda Albarico, municipio El Zulia, Norte de Santander.

Fuente: Programa de Trabajos y Obras PTO. Mina La Mestiza.

Formación Carbonera (E2E3c): Llamada así por la Quebrada Carbonera, tributaria del río Zulia. Litológicamente consiste de una serie espesa de arcillolitas de color gris con algunos intervalos de gris verdoso y café, con varias cantidades de areniscas asociadas de color gris a gris verdoso, la mayoría de grano fino a grueso, aunque también hay una cantidad considerable de arenisca micácea de grano muy fino, estas son generalmente más arcillosas que las de Mirador; también se presentan algunas capas de carbones se presentan en el tope (ligníticos) y en la base (carbón bituminoso) (Ver columna estratigráfica local de la formación Carbonera, en el sector de la mina la Dinastía, corregimiento de San Pedro, municipio de Cúcuta, en la Figura 8). El

moteado amarillo y rojo es común, la siderita aparece en pequeñas esférulas y masas irregulares de pocos centímetros, también abundante. Se encuentran algunos shales micáceos en parte limosos gris oscuros hacia la base y techo. Aproximadamente 100m debajo del tope de la formación se encuentran remanentes de moluscos dentro de un shale altamente carbonoso también un intervalo de limolita glauconítica altamente arcillosa. La presencia de glauconita indica etapas marinas e invasión de aguas saladas. (Servicio Geológico Colombiano, 2016)

Los afloramientos de carbón más representativos de la Formación Carbonera son los de la quebrada La Floresta, en el sector de Cerro Tasajero, en las veredas el Ojito, Alfonsito y El Salado. En el mapa geológico de la plancha 88, la Formación Carbonera se dispone en una franja alargada, por el plano estructural y escarpe dispuesto desde el Cerro Tasajero, y en una franja restringida al oriente de la Falla de San Faustino. (Servicio Geológico Colombiano, 2016)

La formación Carbonera, tiene un espesor muy variado que oscila desde los 500 m a la parte sur de la concesión Barco, en algunos sectores como en Río Nuevo al occidente de Sardinata alcanza los 720 metros. El espesor calculado aproximadamente para el sector de Cerro Tasajero y la quebrada La Floresta es de 520 m. (Servicio Geológico Colombiano, 2016)

Esta formación está compuesta por lodolitas grises, gris amarillentas a gris rojizo, localmente ferruginosas, micáceas, con nódulos ferruginosos aplanados, paralelos con la estratificación, en capas generalmente gruesas. Las intercalaciones son de areniscas de cuarzo, blancas y grises, grano fino y medio, ligeramente lodosas, micáceas, localmente feldespáticas, con óxidos de hierro, restos carbonosos e intraclastos de lodolitas, en capas medianas y gruesas. En la parte inferior presenta capas de carbón entre 40 y 80 cm. de espesor. Esta unidad descansa aparentemente en concordancia estratigráfica sobre la Formación Mirador (Tem). El contacto

4.2.El carbón en Norte de Santander

La minería de carbón en Norte de Santander corresponde a aproximadamente el 2,2 % del total del país y cerca del 5,9% del potencial de carbón térmico se encuentra en esta región y un 17,13% del carbón metalúrgico. Además, el departamento representa el 0,95% del PIB (DANE), donde el área titulada es de 5,8% y genera cerca de 1% de este territorio. (La Opinión, 2022)

Los principales municipios productores de carbón en el departamento según los indicadores de producción de la Unidad de planeación minero-energética son: Cúcuta, Sardinata, Bochalema, El Zulia, Durania, San Cayetano y Salazar (Unidad de Planeación Minero Energetica, 2021). Además, el departamento para los periodos entre 2020-2021, generó un recaudo de regalías con un valor estimado de COP \$ 3.734.284.547 (Unidad de planeación minero energética, 2021).

Los títulos mineros de norte de Santander comprenden una cifra de 530, de los cuales 300 están activos y 180 de ellos son de carbón y aquellas minas que aún no son legales desde la Gobernación se trabaja para que hagan parte del crecimiento económico de la región. (Tobón, 2022). La producción de Norte de Santander del 2021 se presenta en la Tabla (1), allí se evidencian las capacidades de producción de carbón en toneladas de dichas zonas en específico, donde se resalta en el primer trimestre del año 2021 el municipio de Cúcuta con una producción de 105271 Ton, seguido por Bochalema y el Zulia con 91642 Ton y 66814 Ton, respectivamente. Para el segundo trimestre del año lo encabezó Bochalema con una producción de 62468 Ton, seguido por Cúcuta y el Zulia, con 45794 Ton y 28408 Ton, respectivamente. El tercer trimestre del año se resaltaron los municipios de Durania 233629 Ton, seguido igualmente por Cúcuta 27514. Y, por último, el cuarto trimestre liderado por Bochalema 42878 Ton. Con lo anterior, se resaltan la buena capacidad de producción que tiene la zona con productos caracterizados en calidad y pureza.

Tabla 1. Producción de carbón en norte de Santander

Año	Trimetre	Departamento	Municipio	Ton		
2021	I	NORTE DE SANTANDER	ARBOLEDAS	3990		
			BOCHALEMA	91642		
			CHINÁCOTA	7748		
			CHITAGÁ	5156		
			CÚCUTA	105271		
			DURANIA	19506		
			EL ZULIA	66814		
			HERRÁN	7645		
			LABATECA	1737		
			LOS PATIOS	417		
			PAMPLONITA	493		
			SALAZAR	24252		
			SAN CAYETANO	24407		
			SANTIAGO	11831		
			SARDINATA	64026		
			TIBÚ	970		
			TOLEDO	870		
	Total	436773				
	II	NORTE DE SANTANDER	ARBOLEDAS	3023		
			BOCHALEMA	62468		
			CHITAGÁ	5601		
			CÚCUTA	45794		
			DURANIA	25395		
			EL ZULIA	28408		
			HERRÁN	3990		
			SALAZAR	8595		
			SAN CAYETANO	5648		
			SARDINATA	11937		
			TIBÚ	90		
			TOLEDO	8837		
			Total	436773		
			III	NORTE DE SANTANDER	CHITAGÁ	870
					CÚCUTA	27514
					DURANIA	233629
					EL ZULIA	25052
	LABATECA	1531				
	PAMPLONITA	828				
	SALAZAR	11128				
	SAN CAYETANO	330				
	SARDINATA	2072				
	TOLEDO	13341				
	Total	106295				
	IV	NORTE DE SANTANDER			ARBOLEDAS	89
					BOCHALEMA	42878
					CHINÁCOTA	1253
					CÚCUTA	37930
					DURANIA	73
					EL ZULIA	15028
			HERRÁN	491		
			LABATECA	901		
			LOS PATIOS	449		
			SALAZAR	14834		
			SAN CAYETANO	17210		
			SANTIAGO	590		
			SARDINATA	6374		
			TIBÚ	44		
			TOLEDO	1189		
			Total	139333		
			Total			892187

Fuente: (Unidad de Planeación Minero Energética, 2021)

4.3. Calidad de los carbones de Nortesantandereanos

Determinar la calidad del carbón es complejo debido a la gran variedad de factores que influyen en la misma. Estos factores incluyen en primer lugar a las plantas, restos de plantas y otros organismos (como las bacterias) que dieron lugar a la turba. En segundo lugar, los procesos

biológicos y químicos y el grado de conservación de la materia vegetal. En tercer lugar, la geometría y la ubicación del fango, en cuarto lugar, la materia mineral que se acumuló con el material vegetal o que se introdujo en una etapa posterior, y, por último, el proceso de carbonificación. Sin embargo, todos estos factores en su conjunto le dan al carbón unas propiedades físicas y químicas, que finalmente determinarán el uso final del material. Estas propiedades son:

-Humedad: “Se presenta como humedad total, inherente o de equilibrio, superficial, agua de hidratación o agua de descomposición” (Unidad de Planeación Minero Energética, 2005). Los contenidos de humedad en un carbón tienen efectos en distintos ámbitos, tales como: los costos relativos de transporte, en la ventilación de las minas, en la temperatura de llama y la molienda (Cortés, s.f.).

-Contenido de volátiles (Mv): al iniciar la combustión del carbón, este desprende una gran cantidad de volátiles, consistentes en distintas cantidades de hidrogeno, óxidos de carbono, metano y otros hidrocarburos de bajo peso molecular. Las materias volátiles son cruciales para la determinación de los rendimientos del coque y sus productos, además de ser criterio de selección del carbón para gasificación y licuefacción (Unidad de Planeación Minero Energética, 2012). Por otro parte, es un factor de análisis para los efectos ambientales de la combustión del carbón y/u otras técnicas de transformación y beneficio de esa roca sedimentaria.

-Cenizas (Cz): es el residuo sólido de la combustión completa de toda la materia orgánica y oxidación de la materia mineral del carbón. Las cenizas definen la calidad del carbón en la combustión al determinar el contenido en materia incombustible presente. A mayor contenido en cenizas, menor poder calorífico presentara el carbón en bruto y mayores serán los sobrecostos de

manipulación y tratamiento, así como los posibles problemas de erosión en los equipos de transporte y combustión (Cortés, s.f.).

-*Carbono fijo (Cf)*: Es una medida de material combustible sólido. Asimismo, este valor se emplea para estimar la cantidad de coque o char (productos de combustión intermedios) que se pueden producir, así como el contenido de inquemados en las cenizas volantes, además que permite clasificar los carbones y definir los procesos de combustión y carbonización (Unidad de Planeación Minero Energética, 2012).

-*Azufre total (St)*: Parámetro en la definición de gases tóxicos de los procesos de gasificación y licuefacción (Unidad de Planeación Minero Energética, 2012).

-*Poder calorífico (PC)*: “Representa la energía de combustión del carbono e hidrógeno y del azufre. Es el parámetro más importante en la definición de los contratos de compraventa de carbones térmicos y en la clasificación de los carbones por rango, se expresa en BTU/lb, Cal/ gr, etc.” (Unidad de Planeación Minero Energética, 2012).

Como se mencionó anteriormente los carbones explotables en Norte de Santander se presentan en tres formaciones a partir del cretáceo superior: Formación Catatumbo, Formación Los Cuervos y Formación Carbonera. Según INGEOMINAS la calidad de estos carbones varía en rango desde sub-bituminoso A, hasta bituminosos altos volátiles A, incluyendo carbones de características térmicas y coquizables. En la (Tabla 2), se presenta la calidad de los carbones en Norte de Santander reportada por INGEOMINAS (2004)., allí son puestas en evidencia propiedades fisicoquímicas de los carbones: Humedad (%), Contenido de Cenizas (Cz %), Material volátil, (Mv %), Cantidad de Azufre St %, porcentaje de carbono (CF %) y el poder calorífico (PC); en zonas carboníferas de la región como Santiago, Sardinata, Bochalema, Zulia, entre otros.

Tabla 2. Calidad de los carbones en Norte de Santander.

Zona	Área	Sector	Humedad %		Cz%	Mv %	CF %	St %	PC BTU/lb	PC MJ/Kg	PC Kcal/Kg	
			Eq. +1									
NORTE DE SANTANDER	Chitaga		Eq. +1	3,29	12,59	12,90	71,22	1,44	12.804	29,83	7.110	
	Pamplonita-pamplonita	Pamplonita	Eq. +1	2,96	9,97	36,15	50,92	1,34	13.199	30,75	7.330	
		Pamplonita										
	Toledo- Herrán	Toledo	Eq. +1	2,31	7,46	26,99	63,24	0,83	14.120	32,90	7.840	
		Herrán										
	Salazar	Norte	Eq. +1	3,76	9,46	36,81	49,96	0,62	12.762	29,74	7.090	
		Centro										
		Sur										
	Tasajero	Este	Los cuervos	Eq. +1	2,84	10,17	34,82	52,18	0,85	13.326	31,05	7.400
		Oeste	Los cuervos	Eq. +1	2,56	7,65	33,67	56,12	0,85	13.925	32,45	7.740
		Sur	Los cuervos	Eq. +1	2,42	17,10	34,59	45,89	0,89	12.291	28,64	6.830
		Zulia sur	Los cuervos	Eq. +1	3,36	11,90	35,29	49,45	1,27	12.967	30,21	7.200

	Zulia-Chinácota	Santiago	Los cuervos	Eq. +1	2,71	5,95	30,55	60,80	0,71	14.153	32,98	7.860	
			Carbonera	Eq. +1	8,33	17,06	28,67	47,33	0,63	9.911	23,09	5.510	
		San Cayetano	Los Cuervos	Eq. +1	2,02	12,12	26,66	59,20	1,43	13.324	31,04	7.400	
			Carbonera	Eq. +1	2,17	18,05	36,61	43,17	0,78	11.410	26,59	6.340	
		San pedro	Los Cuervos	Eq. +1	2,53	11,30	35,63	50,54	0,81	13.290	30,97	7.380	
			carbonera	Eq. +1	2,69	14,88	38,49	43,94	0,83	12.436	28,98	6.910	
		Villa del rosario	Los cuervos	Eq. +1	2,74	7,50	36,70	53,06	0,70	13.588	31,66	7.550	
		Catatumbo	Zulia Norte- Sardinata		Eq. +1	3,67	9,18	37,57	49,59	0,95	12.602	29,36	7.000
			El Carmen		HR	4,31	8,64	39,17	47,88	0,95	12.316	28,70	6.840

Fuente: INGEOMINAS (2004).

4.4. Caracterización de carbones

En Colombia, Norte de Santander es el productor principal de carbón, acilla y roca fosfórica, y, cuenta con 300 títulos mineros activos y 180 son de carbón, menciona (Tobón, 2022). Además, en esta región se produce carbón metalúrgico bajo en fósforo único en el mundo, dando un acceso a diferentes mercados y es proveedor confiable para la industria de las ferroatomociones del mundo. También, el carbón térmico de Norte de Santander abarca aproximadamente el 80% del total de las reservas, abastece mercados domésticos, generación eléctrica y fuentes de energía. Se ha tomado como referencia para este estudio las empresas de minería de carbón más representativas como productoras de carbón térmico y coquizable en esta región, con altos niveles de calidad y con un importante grado de mecanización en el proceso productivo, de las cuales se obtuvo la colaboración para el suministro de información confiable.

- *Minera la Gitana (CI FRONTIER COAL) S.A.S.*

La Mina la Gitana se encuentra ubicada en el municipio de Sardinata, y realiza una operación minera con alta capacidad tecnológica y de seguridad. Además, cuenta con una producción de 14.000/Ton mes de carbón térmico con las características que se muestran en las Tablas 3,4 y 5, donde se definen el poder calorífico, humedad, ceniza, azufre, materia volátil y HGI. (FRONTIERCOAL, s.f.)

Tabla 3. Características del Carbón 0x50 de Mina la Gitana.

Fuente: <https://frontiercoal.com/>

CARBÓN 0X50	
PODER CALORÍFICO	12,500
HUMEDAD TOTAL	8%
CENIZA	9%
AZUFRE	<1%
MATERIA VOLÁTIL	37%
HGI	50



Tabla 4. Características del carbón 1x12 de la Mina la Gitana.

Fuente: <https://frontiercoal.com/>

CARBÓN 1X12	
PODER CALORÍFICO	11,000
HUMEDAD TOTAL	8%
CENIZA	20%
AZUFRE	<1%
MATERIA VOLÁTIL	37%
HGI	50



Tabla 5. Características del carbón 10x30- 10x50 de la Mina la Gitana.

Fuente: <https://frontiercoal.com/>

CARBÓN 10X30 – 10X50	
PODER CALORÍFICO	13,000
HUMEDAD TOTAL	6%
CENIZA	8%
AZUFRE	<0.75%
MATERIA VOLÁTIL	37%
HGI	50



- *Minas la Aurora S.A.S.*

La Minas La Aurora cuentan con una capacidad de producción de 30.000/Ton mes de carbón térmico y de 15.000/Ton mes de carbón coquizable. (C.I. MINAS LA AURORA S.A.S. , s.f.)

Sus productos de carbón térmicos contienen las siguientes características:

-*Carbón térmico Tipo A:* Carbón principalmente con poder calorífico superior a 12.500 Btu/lb (> 6.949 kcal/kgr), cenizas de < 9%, azufre < 0.9%, y humedad < 6%.

-Carbón térmico Tipo B: Carbón principalmente con poder calorífico superior a 12.100 Btu/lb y menor a 12.500 Btu/lb ($6600 < \text{kcal/kgr} < 6950$), cenizas $< 11\%$, azufre máximo 1.2% , y humedad $< 7\%$.

Las características de los carbones térmicos de las Minas la Aurora se sintetizan en la Tabla 6, comparando estos dos tipos y describiendo sus propiedades.

Tabla 6. Información adicional Carbón Térmico Tipo A y Tipo B.

ANÁLISIS	TIPO A	TIPO B
HUMEDAD % EN PESO	7 %	8%
CENIZA % EN PESO	< 9.0	< 11
AZUFRE TOTAL, % EN PESO	< 0.9	< 1.2
PODER CALORÍFICO BRUTO (BTU/LB)	> 12.500	> 12.500
PODER CALORÍFICO BRUTO (KCAL/KGR)	> 6.950	> 6.950

Fuente: Minas La Aurora S.A.S.

-Carbón Coquizable: Carbón principalmente con cenizas menores a 7% materia volátil del 34% e índices de hinchamiento (FSI) mayores a 7. Sus propiedades se describen en la Tabla 7.

Tabla 7. Información adicional Carbón coquizable.

HUMEDAD % EN PESO	5 %
CENIZA % EN PESO	< 7

MATERIA VOLÁTIL % EN PESO	33 < x < 37
AZUFRE TOTAL, % EN PESO	< 0.8
PODER CALORÍFICO BRUTO (BTU/LB)	> 12.800
PODER CALORÍFICO BRUTO (KCAL/KGR)	> 7.100
ÍNDICE DE HINCHAMIENTO (FSI)	> 7.0

Fuente: Minas La Aurora S.A.S.

- *Excomin S.A.S.*

Sus productos son Carbón Térmico, Carbón Coquizable y Coque.

• *Carbón Térmico*: se caracteriza por tener un alto poder calorífico y un bajo porcentaje de azufre. A su vez, presenta un bajo contenido de fósforo. (EXCOMIN S.A.S., s.f.). Su ficha técnica se plasma en la Tabla 8.

Tabla 8. Ficha técnica del Carbón Térmico de Excomin.

Parámetro	Unidad	Garantizado	Método de Análisis
Humedad	%	8 máx.	ASTM D3302-07
Análisis Próximos (Base Seca)			
Ceniza	%	9 máx.	ASTM D3174-04
Materia Volátil	%	42 máx.	ASTM D3175-07
Carbono Fijo	%	48 mín.	ASTM D3172 - 07a
Análisis Químico (Base como se recibe)			
BTU – AR	%	12.400 Max.	ASTM D5865-11A
Azufre	%	0,8 máx.	ASTM D4239-12
			Meth.
FSI	%	4,0 máx.	
Granulometría			
+45	%	88	

Fuente: Excomin

•**Carbón coquizable:** carbones coquizables altos volátiles y algunos medios volátiles, debido a su bajo contenido de fósforo y su capacidad de formación de coques reactivos son aptos para la industria metalúrgica y de ferroaleación. (EXCOMIN S.A.S., s.f.). Su ficha técnica se plasma en la Tabla 9.

Tabla 9. Ficha técnica del Carbón Coquizable de Excomin.

Parámetro	Unidad	Garantizado	Método de Análisis
Humedad	%	7,0	ASTM D3302-07
Análisis Próximos (Base Seca)			
Ceniza	%	7,0 máx.	ASTM D3174-04
Materia Volátil	%	32-35	ASTM D3175-07
Carbono Fijo	%	58 mín.	ASTM D32172
Análisis Químico (Base como se recibe)			
BTU	%	12.800	ASTM D2795-95
Azufre	%	0,8 máx.	ASTM D4239-08° Meth.B
FSI	%	7,5 máx.	ASTM D720 -91
Fosforo	%	0,004	

Fuente: Excomin

•**Coque:** se produce un coque reactivo que posee un bajo contenido de fósforo y azufre. (EXCOMIN S.A.S., s.f.) y sus propiedades se describen en la tabla 10.

Tabla 10. Ficha técnica del Coque en Excomin.

Parámetro	Unidad	Garantizado	Método de Análisis
Humedad	%	8,0	ASTM D3302-07
Análisis Próximos (Base Seca)			
Ceniza	%	12,0 Máx.	ASTM D3174-04
Materia Volátil	%	1,7 máx	ASTM D3175-07
Carbono Fijo	%	86 mín.	ASTM D32172
Análisis Químico (Base como se recibe)			
Azufre	%	0,75 máx	ASTM D4239-08° Meth.B
Fosforo	%	0,005	ASTM D2795 -95

Fuente: Excomin

- *Minercoque*

Minercoque es una empresa productora de coque metalúrgico de alta calidad, ubicada en Cúcuta, Norte de Santander, Colombia. Tiene una capacidad de producción anual de 300.000 toneladas, siendo el mayor productor de coque de origen único de la región. (C.I. MINER COQUE DE COLOMBIA LTDA, s.f.)

El carbón coquizable de materia prima que proviene de las minas se procesa en la propia coquería. Este coque tiene alto contenido de carbono, bajo contenido de fósforo (típico 0,004%), es ideal para la producción ferroaleaciones, como ferrocromo y silicio manganeso. Sus especificaciones se evidencian en la tabla 11. (C.I. MINER COQUE DE COLOMBIA LTDA, s.f.)

Tabla 11. Especificaciones del coque de Minercoque.

OUR TYPICAL COKE SPECIFICATIONS			
10/20mm, 10/25mm, 10/20, etc.		Coke Fines	
DRY BASIS		DRY BASIS	
ASH	12% Max	ASH	18% Max
VOLATILE	1.5% Max	VOLATILE	2% Max
SULPHUR	0.75% Max	SULPHUR	0.75% Max
PHOSPHORUS	0.007% Max	PHOSPHORUS	0.007% Max
CRI	20 - 25	FIXED CARBON	80 min
CSR	55 - 60	SIZE	0x5mm
FIXED CARBON	86 Min	-1MM	30% Max
UNDER/OVER SIZE	5% Max	+5MM	8% Max

Fuente: (C.I. MINER COQUE DE COLOMBIA LTDA, s.f.)

- Proceso

El carbón de coque se transporta a la planta de coque donde se carboniza en coque, luego se examina y se mide en instalaciones de cribado.

Luego, el coque es transportado por carretera hasta el puerto Atlántico de Barranquilla donde cuentan con un área designada de acopio dentro de la terminal de Compas. Se carga suavemente en recipientes mediante un sistema de cinta transportadora para reducir la degradación y minimizar el contenido de finos.

- *Planta Coquizadora Induminas Tasajero LTDA.*

Empresa productora de coque de alta reactividad, utilizado para uso en la producción de ferroaleaciones con capacidad de producción de toneladas métricas anuales.

Su planta de producción está ubicada en el área de Cerro Tasajero corregimiento de San Faustino a 17 kilómetros de Cúcuta, capital del norte de Santander, Colombia. Cuenta con 7 baterías equivalente a 140 hornos para una producción mensual de toneladas, más una proyección de 2 baterías de 28 hornos cada una. (PLANTA COQUIZADORA INDUMINAS TASAJERO LTDA., 2013)

La empresa para la producción de coque cuenta con 3 minas de su propiedad, ubicadas en el Cerro Tasajero aledañas a la empresa con una producción de toneladas mes. La empresa cuenta con un laboratorio para realizar análisis próximos. Actualmente la empresa cuenta con mercados de exportación o a la República Bolivariana de Venezuela y a clientes nacionales exportadores. Así mismo, está en capacidad de exportar directamente a diferentes destinos. (PLANTA COQUIZADORA INDUMINAS TASAJERO LTDA., 2013)

Proceso de coquización

El proceso de coquización inicia con la recepción de carbones traídos en volquetas, donde se toma su respectiva muestra para su análisis en el laboratorio, luego de ser descargados son apilados y homogeneizados en el patio de acopio, para posteriormente ser llevados por una banda transportadora, donde se le extrae el material estéril antes de ser triturado a un tamaño de 3 mm; a continuación mediante una banda transportadora se deposita en tolvas de almacenamiento, para de ahí ser transportados en vagonetas a los hornos de coquización en donde dura un tiempo de 48 horas en ese proceso, para luego ser extraídos y ubicados en los patios de acopio. Una vez enfriado se traslada a las tolvas de almacenamiento para su posterior trituración y clasificación granulométrica para el proceso respectivo. (PLANTA COQUIZADORA INDUMINAS TASAJERO LTDA., 2013)

Fichas técnicas

Las características principales de los tipos de carbón suministrado por planta coquizadora Induminas se visualizan en las Tablas 12 y 13, consideradas como la ficha técnica del carbón mineral y coque.

Carbón mineral

Tabla 12. Ficha técnica de carbón mineral de Induminas Tasajero

HUMEDAD TOTAL	3%
CENIZA	7.00%
MATERIA VOLÁTIL	36%
CARBONO FIJO	56%
AZUFRE	0.6%
PODER CALORÍFICO BRUTO	13.500 Btu /Lb

PODER CALORÍFICO	7500 (Kcal/Kg)
F.S.I.	7%

Fuente: (PLANTA COQUIZADORA INDUMINAS TASAJERO LTDA., 2013)

Coque

Tabla 13. Ficha técnica de coque de Induminas Tasajero

HUMEDAD TOTAL	6.00% Max
CENIZA	11.50 % Max
MATERIA VOLÁTIL	1.50 % Max
CARBONO FIJO	88 %
AZUFRE	0.60 % Max
FÓSFORO	0.004%
PODER CALORÍFICO BRUTO	12400 Btu/LB
PODER CALORÍFICO	6900 (Kcal/Kg)
MICUM	10-40%

Fuente: (PLANTA COQUIZADORA INDUMINAS TASAJERO LTDA., 2013)

- *Carbones Carbonora*

CARBONES CARBONORA SAS es una empresa dedicada a la extracción, transporte y comercialización de carbón ubicada en el municipio de Bochalema, Norte De Santander, la cual ofrece producto carbón coquizable de alto y medio volátiles, con una producción mensual de 20.000 toneladas/mes y 10.000 toneladas de comercializadas. (CARBONES CARBONORA S.A.S, s.f.)

Esta empresa cuenta con un afiliado denominado Sociedad coquizadora Futbcoque, empresa dedicada a la transformación, transporte y comercialización de carbón coquizable ubicada en el corregimiento de Urimaco, municipio de San Cayetano, en Norte de Santander. En su planta coquizadora cuentan con 81 hornos tipo colmena con una producción estimada de 3000 toneladas/mes, una zona de criado de coque bruto el cual lo clasifica en diferentes tamaños utilizando zarandas vibratorias y se obtiene:

- Coque 10x30 mm
- Coque 5x10 mm
- Coque 0x5 mm

El procedimiento en general del carbón coquizable desde Carbones Carbonora es el indicado en la figura 9.



Figura 9. Proceso general de los carbones de Carbones Carbonora.

Fuente: (CARBONES CARBONORA S.A.S, s.f.)

- *Yilcoque S.A.S.*

YILCOQUE es la empresa productora de coque del Grupo YILDIRIM con sede en Cúcuta, Colombia. La fundación de la Planta Yilcoque data de 2013 en Cúcuta, capital de la región Norte de Santander de Colombia. Cuenta con 400 hornos que comenzaron la producción de coque en mayo de 2015. Con la disposición de nuevos hornos en los últimos años tiene una capacidad total de 130.000 toneladas métricas con 400 hornos de coque. (YILCOQUE S.A.S., s.f.)

La compañía también realiza producción a terceros en algunas plantas de coque en la misma región desde 2013 con una capacidad de producción anual de 30.000 toneladas métricas. (YILCOQUE S.A.S., s.f.)

- *Productos*

Los productos de coquizadora Yilcoque a partir de carbón metalúrgico, son los dispuestos en las tablas 14 y 15, en las cuales se evidencia la producción de coque de horno blust y coque de fundición.

Tabla 14. Características del coque de horno Blust de Yilcoque

COQUE DE HORNO BLUST	
Humedad (ar)	6,0% máx.
Ceniza (db)	12,0% máx.
máquina virtual (db)	1,5 % máx.
Azufre (db)	0,80 % máx.
Fósforo en Coca-Cola (db)	0,05 % máx.
micum 40	80,0% mín.
micum 10	10,0 % máx.
RSC	65,0% mín.
IRC	26,0% máx.
Tamaño	30/40-80mm

Fuente: (YILCOQUE S.A.S., s.f.)

Tabla 15. Características del Coque de fundición de Yilcoque.

COQUE DE FUNDICIÓN	
Humedad (ar)	6,0% máx.
Ceniza (db)	12,0% máx.
máquina virtual (db)	1,5 % máx.
Azufre (db)	0,80 % máx.
Fósforo en Coca-Cola (db)	0,05 % máx.
micum 40	80,0% mín.
micum 10	10,0 % máx.
Tamaño	+60mm/+80mm

Fuente: (YILCOQUE S.A.S., s.f.)

La calidad de la producción y control de calidad de YILCOQUE, adquiere carbón coquizable y gracias a sus instalaciones de trituración y cribado de coque, tiene una capacidad de cribas tamaños según la demanda del cliente:

- 10-25/30 mm
- 20-40/50 mm
- *Carboexco*

Empresa industrial con experiencia en la producción de coque metalúrgico reactivo y reconocida por calidad de sus productos amplios y diversificados. (CARBOEXCO C.I. LTDA, s.f.)

- Productos

Los productos resultados de Carboexco y sus características son

– *Coque reactivo:*

Tiene sus usos en la producción de carburo/carbonato de calcio, ferromanganeso, ferrocromo, ferrosilicomanganeso, todos de alta calidad y bajo nivel de fósforo. Sus características se ven la tabla 16.

Tabla 16. Características del Coque reactivo de la empresa Carboexco.

Humedad	7% máx.
Ceniza	11.8% máx.
Azufre	0.70%
Materia Volátil	1.5% – 2.0%
Carbón Fijo	87% min.
Fósforo	0.003 – 0.010
CSR	55 – 63
CRI	20 – 28
Tamaño	5-30 mm, 10-40 mm, 20-50 mm, 15-60 mm, o de acuerdo a los requerimientos del cliente.

Fuente: (CARBOEXCO C.I. LTDA, s.f.)

– *Coque para el alto horno*

Producto utilizado para la producción de acero y sus características están en la tabla 17.

Tabla 17. Características del coque para alto horno de la empresa CARBOEXCO.

Humedad	7% máx.
Ceniza	12.0% máx.
Azufre	0.85% – 1%
Materia Volátil	1.8% máx.
Carbón Fijo	85% – 87%
Fósforo	0.050 máx.
CSR	65%
CRI	15% – 20%
M+40	80% min.
M+10	8 – 10
M+10	25-80 mm, 30-80 mm, 40-100 mm.

Fuente: (CARBOEXCO C.I. LTDA, s.f.)

– *Finos de coque*

Son utilizados en procesos de sinterización y sus características están en la tabla 18.

Tabla 18. Características de los finos de coque de la empresa CARBOEXCO.

Humedad	8% – 9%
Ceniza	17% – 22%
Azufre	0.85% – 1%
Materia Volátil	3.6%
Carbón Fijo	75% – 78%
Tamaño	0 – 6 mm.

Fuente: (CARBOEXCO C.I. LTDA, s.f.)

– *Coque siderúrgico*

Las características del coque siderúrgico están en la tabla 19.

Tabla 19. Características del coque siderúrgico de la empresa CARBOEXCO.

Humedad	7% máx.
Ceniza	12.0% máx.
Azufre	0.85% – 1%
Materia Volátil	1.8% máx.
Carbón Fijo	85% – 87%
Fósforo	0.050 máx.
CSR	65%
CRI	menor a 26%
M+40	80% min.
M+10	8 – 10
M+10	25-80 mm, 30-80 mm, 40-100 mm.

Fuente: (CARBOEXCO C.I. LTDA, s.f.)

- *Catercoq S.A.S.*

CATERCOQ es una empresa de extracción de carbón térmico y coquizantes con propiedades metalúrgicas especiales con un contenido bajo de minerales, bajo contenido de azufre y nivel ultra bajo de fósforo. (CATERCOQ S.A.S., s.f.)

El carbón coquizable bajo las características fisicoquímicas y metalúrgicas anteriores es una excelente materia prima para la fabricación de coque reactivo, material utilizado como agente reductor en la industria de las ferroaleaciones. También se puede utilizar en la mezcla cruda para la fabricación de coque del alto horno (fabricación de acero), para proporcionar plasticidad a la mezcla de carbón y disminuir los niveles de fósforo, elemento esta causa de la fragilidad del acero. (CATERCOQ S.A.S., s.f.)

- **Productos**

El carbón extraído por CATERCOQ SAS de sus propias minas es un carbón con un bajo contenido de azufre y nivel ultra bajo de fósforo, los cuales son:

- *Carbón térmico*

Carbón térmico con alto poder calorífico y bajo porcentaje de azufre. Los estudios muestran nivel ultra bajo de fósforo.

- *Carbón coquizable*

Adecuado para la industria metalúrgica, con un coque altamente volátil, con bajo contenido de fósforo.

- *Coque*

Se extrae un excelente coque, con niveles bajos de azufre y fósforo.

5. Capítulo II. Impactos sociales y ambientales generados a partir del uso del carbón

La minería es una industria que, en su mayoría, se caracteriza por su responsabilidad social y ambiental, pues buen, se encuentran en constante búsqueda de la mitigación, corrección, aplicaciones ambientales, y el mantenimiento constante del ambiente en donde se realizan los proyectos, con relación al cumplimiento de las normativas vigentes, planes de gestión ambiental y satisfacción a las comunidades.

No obstante, esta industria es catalogada como gran generadora de impactos ambientales y sociales, ya que sus proyectos se realizan en amplias áreas de trabajo y en su mayoría poseen comunidades aledañas que están expuestas a los diferentes efectos que trae la extracción del mineral. Lo anterior será descrito en los siguientes párrafos de este capítulo a nivel regional, nacional e internacional.

5.1. Impactos sociales

La extracción del carbón tiene gran impacto social para el país y para el mundo en las comunidades donde se encuentran ubicadas las grandes zonas carboníferas, las cuales entran en conflicto con las empresas debido a los impactos ambientales ocasionados, contraposición con los grupos al margen de la ley y alto grado de riesgo de salud de los trabajadores. No obstante, existen impactos positivos como lo es la generación de empresas, apoyo a las comunidades, actividades e incentivos, regalías nacionales y proyectos sociales.

5.1.1. Impactos sociales a nivel nacional

La minería del carbón hace parte de la historia de Colombia, de sus comunidades que han sobrevivido y surgido en medio de la explotación y comercialización de este recurso energético.

Pues bien, el país ocupa el quinto puesto como exportador a nivel mundial de carbón y dentro de sus principales destinos está Turquía con una participación del 21.3%, Chile con 10.9% y China con 9.4%, entre junio de 2020 y 2021. (Munar, 2021). Además, es el tercer exportador de carbón de coque y metalúrgico a nivel mundial (Urrego, 2021), así lo informó Fenalcarbón para el periódico La República. Así mismo, para la economía colombiana y con cifras del año 2021 la industria del carbón permitiría un aumento de un 20% de PIB minero nacional, con producciones estimadas de 60 y 65 millones de toneladas. (Valora Analitik, 2021).

Los principales productores de carbón en Colombia son los departamentos de Cesar, La Guajira, Boyacá y Norte de Santander (Subdirección de minería UPME, 2021). El Cesar y la Guajira cuentan con minería a gran escala, altamente tecnificada y a cielo abierto a través de empresas en su mayoría de capital privado extranjero, tales como: Drummond (Mina Pribbenow y El Descanso), Glencore –Prodeco (Mina Calenturitas y mina La jagua) y Anglo-American (Mina Cerrejón). Otros departamentos productores, aunque en menor escala, medianamente tecnificada y de forma subterránea son: Antioquia, Boyacá, Cundinamarca, Santander, Norte de Santander y Valle del Cauca a través de empresas mineras tales como: Interamerican Coal, Carbones del Caribe, Argos, Milpa, Mineralex, Acerías Paz del Río, Gemsa, Coquecol y Carbocoque. Además de pequeñas empresas a nivel regional en cada uno de esos departamentos (AGENCIA NACIONAL DE MINERIA (ANM), 2017).

Con los fundamentos anteriormente descritos, se puede decir que la actividad minera del carbón hace parte de la cultura y patrimonio de las comunidades de las zonas carboníferas del País, viéndose más influenciadas y más marcados sus impactos en la región costeña (Cesar y La Guajira) debido al sistema minero que emplean: minería a cielo abierto.

En Colombia, existen dos puntos de vistas de la influencia, las ventajas y los beneficios que traen consigo las actividades mineras en las comunidades; El gobierno, ha tratado de promover y hacer ver que la minería impulsa la economía, el desarrollo y el progreso de las comunidades en sus áreas de influencia. Por otra parte, algunas ONG y sectores de las comunidades consideran que las actividades mineras, han traído consigo el desplazamiento de pueblos, violencia, contaminación al ambiente y deterioro de la salud de los habitantes de los pueblos del área de influencia de los proyectos mineros.

La llegada de la minería a gran escala al país especialmente Cesar y La Guajira, conllevó a una transformación territorial y económica de estos dos departamentos, pasando de ser territorios netamente rurales, basados en el cultivo y comercialización de algodón, arroz y otros productos agrícolas a territorios más urbanizados basados en la actividad extractiva minera.

El carbón, representa el sustento básico de aproximadamente 130000 familias de la sociedad colombiana que satisface las necesidades básicas de alimentación, salud, vivienda y educación. Además, la mayoría de las empresas mineras carboníferas, han implementado proyectos y planes sociales, con el fin de estimular la mejora de las condiciones de vida de sus trabajadores, su realización personal y subsidios educativos o becas para los estudios de formación tecnológica y/o superior de los hijos o familiares de los trabajadores mineros. De igual manera, con los ingresos obtenidos de las regalías, los gobiernos regionales son los encargados de diseñar y ejecutar proyectos que beneficien a la comunidad, tales como pavimentación de carreteras, construcción de colegios, hospitales, polideportivos o salones comunales, entre otros.

Entre los principales impactos sociales negativos producidos por la megaminería del carbón en esta región del país destacan: pérdida de la cultura e identidad de tribus indígenas ancestrales, desplazamientos o reasentamientos de pueblos, aislamiento de comunidades,

deterioro de recursos comunes (los ríos y cuerpos de agua, las parcelas y tierras comunales, y los bosques comunitarios).

- *Impactos sociales positivos*

En primera instancia, hablaremos de los impactos positivos generados por la megaminería del carbón y las estrategias sociales implementadas por las principales empresas mineras del carbón en el Cesar y La Guajira.

La empresa Cerrejón, que se encuentra en territorio Guajiro desde 1970, es hoy en día es una de las operaciones mineras de exportación de carbón a cielo abierto más grandes del mundo, un importante actor de la economía en Colombia y motor de La Guajira, región en la que concentra su actividad productiva. Integra la exploración, extracción, transporte, embarque y exportación de carbón de diversas calidades (Cerrejon, mineria responsable, 2019).

Esta empresa cuenta con una política de gestión social la cual se fundamenta en dos pilares: 1. Lo social es inherente a la generación de valor de la empresa y 2. Adopta los estándares más altos para llevar a cabo esta gestión. La entidad procura mantener un relacionamiento colaborativo con los grupos de interés y comportamientos recíprocos con las comunidades (CERREJÓN, 2021). Por ello, dentro de los compromisos tomados por la entidad se tienen los siguientes:

- Llevar a cabo nuestras actividades demostrando respeto por el medio ambiente y por los derechos humanos, reconociendo la diversidad cultural y étnica de la región.
- Gestionar nuestras operaciones, previniendo y mitigando los impactos y, cuando sea necesario, compensándolos.
- Aportar a los planes de desarrollo municipal y departamental.

- Contribuir al desarrollo de La Guajira y a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU.
- Mantener relaciones respetuosas y transparentes.
- Contribuir al fortalecimiento económico de las comunidades locales y apoyar la creación de valor compartid.
- Comunicar su alcance y progreso de manera clara, eficiente y oportuna.
- Evaluar los procesos y estándares de Cerrejón a través de un sistema de aseguramiento de la empresa.

Es por ello por lo que durante el 2020 se invirtió más de \$14.600 millones para continuar promoviendo dos aspectos: el acceso al agua y a la educación. La primera, mediante vagones cisterna de la operación los cuales cuentan con 80.000 litros de capacidad, son utilizados para el abastecimiento de agua por carrotanques a diferentes comunidades cuando existen épocas de sequía y en épocas de pandemia. Y, para la promoción de la educación Cerrejón ha realizado inversiones de más de \$270.000 millones de pesos apoyando la educación preescolar, escolar, técnica, tecnológica y universitaria para empleados y sus hijos, miembros de comunidades y municipios vecinos. (CERREJON, s.f.).

La fundación cerrejón, es el resultado de la estrategia de desempeño social y de la priorización de las necesidades de la región, por parte de la minera, con lo cual, se enfocan en el departamento en tres líneas: acceso y promoción del recurso hídrico, fortalecimiento de capacidades y proyectos estratégicos para la búsqueda de soluciones de acceso y conservación del recurso hídrico; el fortalecimiento de capacidades institucionales, comunitarias y empresariales; preservación de la tradición ancestral indígena y la generación de nuevas inversiones y empleo en la región. (Fundación Cerrejón, s.f.).

Por otra parte, la compañía Drummond que es la encargada de la operación de las minas de carbón a cielo abierto de Mina Pribbenow, El Descanso y El Corozo, ubicadas en la cuenca del Cesar, cerca de La Loma; Puerto Drummond, un puerto marítimo de aguas profundas en el Mar Caribe cerca de Santa Marta; y las instalaciones para el manejo y transporte de carbón. Que, de igual manera, transporta el carbón desde las minas 193 km por tren en la parte rehabilitada de la Red Férrea Nacional de Colombia directamente a Puerto Drummond. (DRUMMOND COMPANY, INC, 2022)

Esta compañía, estableció un departamento de relaciones con la comunidad y continúa haciendo un impacto positivo en la economía local. Contribuye a programas sociales para mejorar las vidas de sus empleados y sus vecinos suministrando asistencia a las escuelas, hospitales e iglesias en las comunidades cercanas a las operaciones mineras existentes. El otorgamiento de becas universitarias, la pavimentación de carreteras, la capacitación en actividades económicamente productivas (para mejorar los ingresos de las familias), la contribución al fortalecimiento de los servicios públicos, arte y cultura, y la realización de inversiones en salud y educación, son partes esenciales de la inversión de la compañía en su gestión social (DRUMMON COMPANY INC, 2022).

En el sector de la salud, Drummond ha creado adecuado, o dotado 27 centros de salud y hospitales. El bienestar de la población es un factor determinante en el diseño y la ejecución de estos proyectos y actividades que incluyen campañas de vacunación y brigadas de salud en las zonas aledañas a nuestras operaciones. (DRUMMON COMPANY INC, 2022).

En el sector educativo, la compañía ha desarrollado un programa de becas universitarias para los más necesitados. También han construido, ampliado y dotado 529 aulas escolares en búsqueda del desarrollo integral de las comunidades y mejorar la calidad de la educación para

niños y jóvenes de escasos recursos. Además, se ha contribuido al financiamiento de libros, transporte, y actividades deportivas, incluyendo uniformes. Alimentar a la comunidad estudiantil es esencial, por tal motivo Drummond ha ayudado a construir y equipar 25 comedores escolares. Desayuno, onces y almuerzos se han asegurado para escuelas primarias y secundarias. (DRUMMON COMPANY INC, 2022)

De igual modo, el Grupo Prodeco, el cual está conformado por C.I. Prodeco S.A., propietaria de la mina Calenturitas y de la operación ferroviaria de transporte de carbón, Carbones de La Jagua S.A., Consorcio Minero Unido S.A. y Carbones El Tesoro S.A., propietarias de la mina La Jagua y la Sociedad Portuaria Puerto Nuevo S.A., propietaria del puerto de exportación de carbón Puerto Nuevo. (GRUPO PRODECO, 2022). LA gestión social de esta entidad tiene como eje central la sostenibilidad de los territorios, la participación y el empoderamiento de las comunidades, los actores municipales y nacionales, la optimización de los recursos, la cobertura, la pertinencia y el impacto en las iniciativas que se emprenden (GRUPO PRODECO, 2022). Para ello, están estructurados mediante tres pilares:

- ✓ *Educación*: como estrategia la mejora de la calidad de las instituciones públicas y accesos a las oportunidades. Sus programas comprenden: Mejoramiento de la calidad de la educación Pública del Cesar, Fortalecimiento de competencia académicas, Educación ambiental, Alfabetización para adultos, Artes y oficios distintos a la minerías y Becas universitarias.
- ✓ *Desarrollo del capital social*: construcción de capacidades, promoción de valores y uso eficiente de fondos públicos. Dentro de sus programas encontramos: Redes de vida para la formación integral, conexiones domiciliarias, Fortalecimiento institucional y comunitario, y Proyectos comunitarios de Reciclaje.

- ✓ *Generación de ingresos:* basados en centros de empleo y emprendimientos, fortalecimiento de proyectos productivos y desarrollo de productores rurales locales (ProRural).

Han transcurrido aproximadamente 3 décadas, del boom carbonífero con la puesta en marcha de los megaproyectos mineros de La Guajira y Cesar, creando una cultura minera, donde los jóvenes crecen con la ilusión de estudiar ingeniería de minas y ejercer su profesión para el avance y progreso de su región, aunque esta premisa, aplica para todos los municipios donde su pilar económico y laboral es la minería de carbón, como por ejemplo, el municipio de Sardinata en Norte de Santander, donde se ha visto un aumento de los números de jóvenes matriculados para cursar la carrera profesional de ingeniería de minas.

Por otra parte, la minería del carbón beneficia alrededor de medio millón de colombianos en todas las regiones del país, producto del encadenamiento productivo de la actividad minera, apoyo a la industria local, y compras de bienes y servicios.

- *Impactos sociales negativos*

Para poder comprender las diferencias y problemas sociales presentados entre la comunidad y las empresas mineras, hay que analizar en primer lugar, el área de influencia de estos proyectos mineros.

A continuación, se describe por medio de la Figura 10 y Figura 11, el área de influencia de los proyectos mineros Cerrejón, Mina Calenturitas, Mina La Jagua, Puerto Nuevo, y mina Pribbenow.



Figura 10. localización Mina Cerrejón.

Fuente: Información general de operaciones Cerrejón.

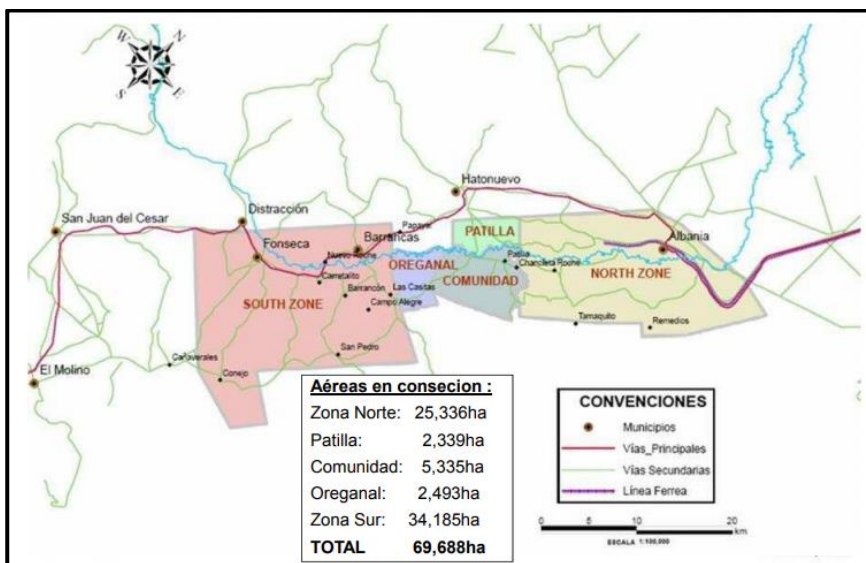


Figura 11. Área de influencia Mina Cerrejón tomado de información general de operaciones Cerrejón.

Fuente: <http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/eventos/2012/cim/documentos/cerrejon.pdf>

La mina Calenturitas provoca un área de influencia directa en: la Vereda Plan Bonito, Corregimiento la Loma de Calenturas y Boquerón, Corregimiento El Hatillo; y, con una influencia indirecta de Municipios Becerril, La Jagua de Ibirico y el Paso. (ver figura 12)

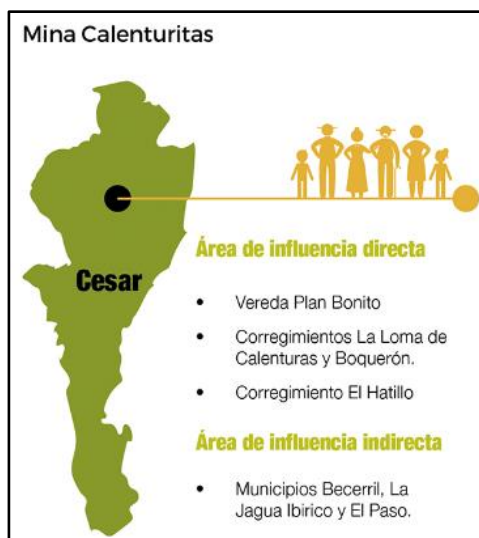


Figura 12. Área de influencia Mina Calenturitas grupo Prodeco.

Fuente: <http://www.grupoprodeco.com.co/informesostenibilidad2015/esp/bienestar/index.html#../wp-content/uploads/2016/11/Screen-Shot-2016-11-11-at-9.35.23-AM.png>

La mina La Jagua provoca un área de influencia directa en: Cabeceras municipales, Corregimiento la Victoria de San Isidro y Estados Unidos. Y un área de influencia en Municipio de la Jagua y Becerril. (ver figura 13)



Figura 13. Mina La Jagua Grupo Prodeco.

Fuente: <http://www.grupoprodeco.com.co/informesostenibilidad2015/esp/bienestar/index.html#../wp-content/uploads/2016/11/Screen-Shot-2016-11-11-at-10.48.22-AM.png>

En Puerto Nuevo provoca un área de influencia directa en: Área marítima desde Ciénaga hasta el aeropuerto Simón Bolívar, Corregimiento de Cordobita, veredas como Ojo de agua, Papare, Playitas, Jolonura, y Barrios como Mar de Plata, Barrio Abajo, Nancy, PoloMirarmar, Kennedy, Costa Verde. (ver figura 14)

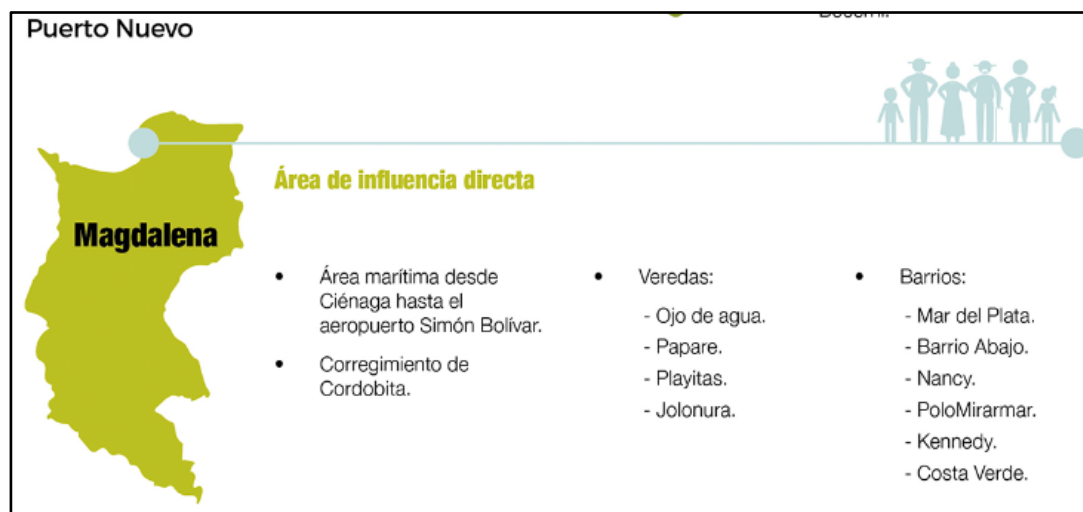


Figura 14. Puerto nuevo grupo Prodeco

Fuente: <http://www.grupoprodeco.com.co/informesostenibilidad2015/esp/bienestar/index.html#./wp-content/uploads/2016/11/Screen-Shot-2016-11-11-at-10.48.22-AM.png>

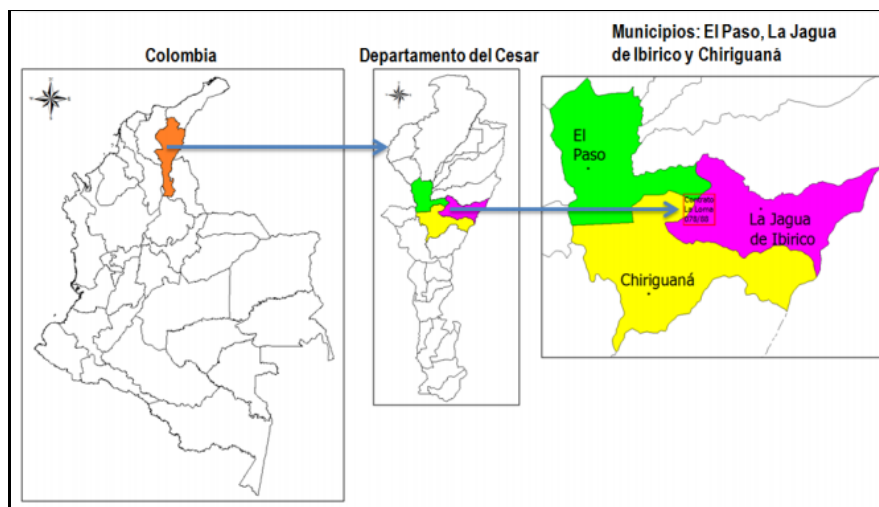


Figura 15. Localización del proyecto La Loma (Drummond)

Fuente: Estudio de impacto ambiental Drummond LTD

Como se puede observar en el mapa de la Figura 15, las operaciones mineras se llevan a cabo en medio de comunidades, que se han tenido que adaptar y transformar a medida que crecen las explotaciones e infraestructura operacional minera.

Las comunidades originales, en su mayoría pueblos indígenas y comunidades afrocolombianas, especialmente en La Guajira, se vieron obligadas a enfrentar un choque cultural, que terminó en el desplazamiento de la mayoría de estos pueblos.

Para los indígenas Wayuu, la tierra es su mayor tesoro, ellos se consideran “hijos de la tierra”, por ende, son los únicos dueños de ella y de todo lo que la naturaleza produzca. Dentro de este principio, el cementerio, es un eje fundamental; ya que todo Wayuu aspira morir en sus tierras, en el lugar donde habitaron sus mayores y antepasados, en el territorio clanil. Es así como los cementerios y los velorios sugieren una fuente de identidad étnica.

Las rancherías (píchipala), confirma la relación de los Wayuu con la tierra. En donde estos asentamientos tradicionales constan de un grupo de cinco a diez casas que componen el caserío. Una ranchería se inscribe dentro de una familia cuyo apellido se ha transmitido por matrifiliación, es decir, una agrupación humana que se ha conformado alrededor de la mujer más vieja, quien tiene a las familias de sus hijos e hijas casadas, viviendo cerca de su propia casa o restos mortales. Esta manera de organización territorial fue la que chocó frontalmente con los planes del Cerrejón, cuando comenzaron los trabajos de construcción de carreteras, vías férreas y demás, los wayuu vieron violado sus territorios sagrados, y en algunos casos, sus asentamientos fueron desplazados para permitir los trabajos de infraestructura minera (Narváez, 2009). Un ejemplo de esto fue el caso de Medialuna, Que, en septiembre de 1981, gran parte del territorio ancestral de la comunidad wayuu fue desalojado para construir el Puerto de Embarque del Carbón de El Cerrejón. La empresa minera y la comunidad se enfrentaron en una negociación de

fuerzas discusiones y amenazas físicas, para lograr una justa indemnización que le permitiera reubicarse en otro lugar y trasladar los cementerios (conflictos mineros, 2019).

Sumado a esto, existen denuncias de violaciones de los derechos humanos e irrespeto a la dignidad de los pueblos por parte de las empresas transnacionales, a las que se les acusa de ejercer presión a las comunidades para que vendieran sus predios y los desalojaran, tales como la suspensión de los servicios públicos y domiciliarios, quema del cementerio y de algunas viviendas, prohibición del tránsito en el territorio, desvío del agua del río para beneficio de la compañía. (conflictos mineros, 2019)

Los desplazamientos de las comunidades de sus territorios originales a otro nuevo, se le conoce como Reasentamiento, que en algunos casos han sido voluntarios. Cada empresa minera, maneja su propio modelo de reasentamiento. En el caso del Cerrejón, es una medida de último recurso que adoptamos para proteger a una comunidad de impactos ambientales que puedan afectarlos por el desarrollo de la actividad minera. En el 2006, cerrejón inicio el reasentamiento de Tamaquito II, comunidad indígena que solicitó de manera voluntaria este proceso ante la Alcaldía de Barrancas, argumentando su aislamiento por el traslado de otras comunidades reasentadas.

En 2020 se registraron 183 quejas, de las cuales el 42% se encuentran cerradas, el 46% en investigación y el 12% en concertación. El 59% de quejas fueron de media-alta complejidad, el 40% de media-baja y el 1% de baja complejidad. El 65% de las quejas registradas se refieren a temas de comunidades (seguridad, salud y medio ambiente), el 26% a derechos laborales, el 4% a reasentamientos y post-reasentamientos, el 3% a seguridad y derechos humanos, 1% a tierras y otro 1% de otros temas. El 56% del total de las quejas registradas en el 2020 están asociadas a casos de atropellamiento de animales, correspondiente al 86% de las quejas de comunidades.

Además, durante 2020 se implementó el sistema de gobierno de la Oficina de Quejas que permitió darle mayor visibilidad dentro de la organización, DERECHOS HUMANOS fortalecer la toma de decisiones y los lineamientos sobre casos de mayor complejidad y mantener los planes de mejora establecidos. (CERREJON, 2020)

Para CI PRODECO S.A., en 2019 se realizó una evaluación de impactos en derechos humanos con el objetivo de identificar y evaluar las consecuencias negativas reales, potenciales, percibidas y acumulativas de nuestras actividades en las zonas de influencia del 100% de nuestras operaciones directas en el Cesar (municipios de La Jagua de Ibirico, El Paso y Becerril) y Magdalena (municipio de Ciénaga). (GRUPO PRODECO , 2019).

En su compromiso con las comunidades se basan en el trabajo colectivo entre sociedad civil, autoridades locales y la compañía de tal forma que a partir del dialogo social se identifiquen los impactos, las necesidades del territorio y podamos generar soluciones reales, sostenibles y generación de valor. Sus inversiones se realizan bajo tres pilares (ver figura 16):



Figura 16. Pilares de inversión de PRODECO

Fuente: (GRUPO PRODECO , 2019)

Sin embargo, para el año 2015, comenzaron procesos de reasentamiento de las poblaciones de Plan Bonito y El Hatillo en jurisdicción del municipio de El Paso, y la población de Boquerón en jurisdicción del municipio de La Jagua de Ibirico, en El Cesar, de conformidad con las normas de desempeño, las políticas operativas y las mejores prácticas internacionales, que han planteado el Banco Mundial, la Corporación Financiera Internacional y el BID sobre reasentamientos involuntarios.

Las comunidades que representa el grupo PRODECO son el Corregimiento El Hatillo del municipio El paso, Vereda Plan Bonito del municipio El paso y Corregimiento Boquerón, municipio de Jagua de Ibirico (ver figura 17).

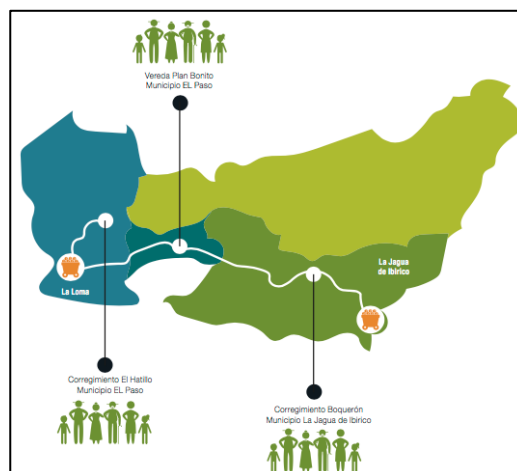


Figura 17. Comunidades reasentadas por el grupo Prodeco.

Fuente: <https://www.grupoprodeco.com.co/es/sostenibilidad/reportes-de-sostenibilidad>

El proceso de reasentamiento del corregimiento El Hatillo están involucradas 320 familias en el proceso de reasentamiento, con 190 residentes y 130 no residentes, este fue previsto para el segundo semestre de 2017 y se encontraba en concertaciones socioeconómico. (ver figura 18).



Figura 18. Proceso de reasentamiento del corregimiento El Hatillo.

Fuente: <https://www.grupoprodeco.com.co/es/sostenibilidad/reportes-de-sostenibilidad>

El proceso de reasentamiento de la Vereda Plan Bonito-Municipio El paso, están involucradas 173 familias en el proceso de reasentamiento, con 98 residentes y 75 no residentes, se realizó el reasentamiento en agosto de 2014 e implementar el plan de restablecimientos de medio de vida. (ver figura 19).

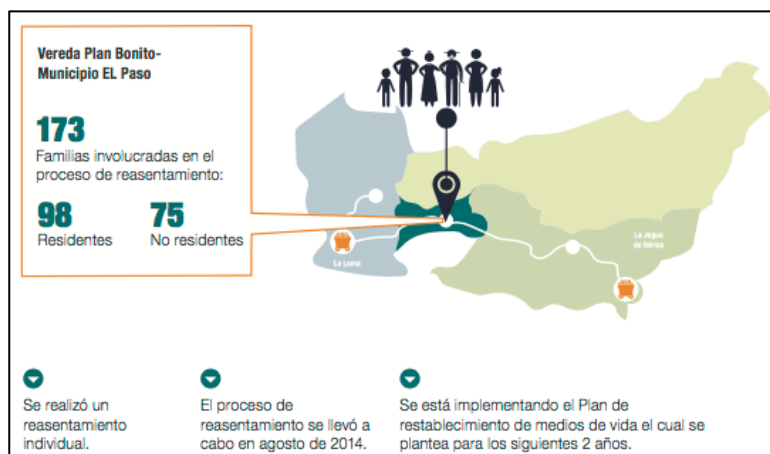


Figura 19. Proceso de reasentamiento vereda Plan Bonito.

Fuente: <https://www.grupoprodeco.com.co/es/sostenibilidad/reportes-de-sostenibilidad>

El proceso de reasentamiento del Corregimiento Boquerón-Municipio La Jagua de Ibirico, están involucradas 650 familias en el proceso de reasentamiento y con 170 residentes se proyectó a un asentamiento colectivo, y desde el 2011 las empresas y la comunidad están concertando las condiciones y metodología para censos. (ver figura 20).



Figura 20. Proceso de reasentamiento Corregimiento Boquerón.

Fuente: <https://www.grupoprodeco.com.co/es/sostenibilidad/reportes-de-sostenibilidad>

Pero, para el año 2021, Grupo PRODECO sufre una serie de quejas por parte de la comunidad del El Hatillo (también la de Boquerón y Plan Bonito), ubicada en el corregimiento La Loma (en el municipio de El Paso, en el centro del Cesar), los cuales están en espera de su reasentamiento. Pues, para el Hatillo su reasentamiento ha sufrido diversas dificultades a causa de crisis del mercado mundial del carbón, exactamente para el año 2020 debido a la pandemia y el avance de descarbonización en Estados Unidos y Europa. Es por ello que dicha empresa optó por suspender sus labores y provocó incertidumbre en las poblaciones que dependen del cumplimiento de las obligaciones de las empresas mineras de reasentarlos en los términos del Plan de Acción de Reasentamiento (PAR) suscrito entre las tres empresas y la comunidad desde el 29 de noviembre de 2018. Además, esa incertidumbre aumentó cuando la empresa Prodeco renunciara a sus títulos mineros, entre ellos, el de la mina Calenturitas, directamente responsable del reasentamiento de la población. Por lo anterior, si no se implementa una solución, daría como resultado que la comunidad desaparezca y se convierta en una diáspora (Monsalve C. M., 2021).

Un ejemplo claro de un reasentamiento es en Tamaquito II, que es la fiel muestra del choque entre los pueblos Wayuu y la minería. Lo reseño de la siguiente manera:

Hasta hace algunos años este pueblo wayuu tenía el nombre de Tamaquito a secas y estaba asentado en la frontera de la serranía del Perijá. Ahora los 170 indígenas que lo habitaban están a 25 kilómetros de allí, viviendo en casas con luz eléctrica y acueducto, con estufa a gas, baño y lavamanos. “Todo eso es nuevo para nosotros”, cuenta Jairo Dionisio, cabildo gobernador, y agrega que todavía no se acostumbran a “esas comodidades”, que llegaron luego de que Cerrejón los reasentara.

El traslado de este pueblo wayuu fue decisión de la misma comunidad. Una decisión que tardaron dos años y medio en tomar y que tenía un solo argumento claro y doloroso: Tamaquito ya no era el pueblo libre, tranquilo, sano, de aire puro y agua potable que había sido desde que el señor López Epiayu (abuelo de Jairo Dionisio) construyó la primera casa en 1965. Ya no lo era. Y en las nuevas condiciones, que trajo la minería de carbón, ya no podían vivir (EL ESPECTADOR, 2014).

En base a estos argumentos, es importante aportar que con este escrito se busca dar nuevas alternativas a la cadena del carbón, y así impulsar la minería del carbón en la región, conociendo la importancia de la estabilidad económica en la sociedad colombiana, con especial interés en la Norte Santandereana.

5.1.2. Impactos sociales a nivel regional

El departamento de Norte de Santander se caracteriza por ser una de las regiones claves en el desarrollo minero del país, siendo “productor principalmente de carbón, arcilla y roca fosfórica. Con respecto al carbón, dentro de la mediana y pequeña minería del país ocupan el segundo puesto después de Boyacá y a nivel general es el cuarto productor de carbón del país, después de La Guajira, Cesar y Boyacá.” (Agencia Nacional de Minería, s.f.).

- *Impactos sociales positivos*

En Norte de Santander, la actividad minera comprende a 17 municipios de los 40 pertenecientes a la región, pero los impactos generados por esta actividad se concentran en tres municipios: Cúcuta, Zulia y Sardinata. (Moreno & Jorge Enrique Arenas Hernández, 2015). Por

lo tanto, estos municipios son los directamente involucrados en los impactos sociales positivos que conlleva la actividad.

El departamento para el 2020, 10 actividades industriales representaron el 98.7% de la producción total y el 98.9% del valor agregado, dentro de los cuales se incluye la fabricación de productos minerales no metálicos con una participación del 27. % (ver figura 21). Además, el personal ocupado de esta región el 29.7% corresponde a la fabricación de estos (ver figura 22). Esto demuestra la gran importancia a nivel social la realización de proyecto mineros en la región, pues ofrecen oportunidades laborales a gran escala y de manera constante, disminuyendo niveles de desempleo y en medio de la pandemia, en esta región en promedio la minería genera al alrededor de 7.500 empleos directos y más de 15.000 empleos indirectos, junto con la producción de coque que genera 3.600 empleos directos y más de 7.000 indirectos, además, fue el primer sector en reactivarse y 33.000 familias dependen económicamente de esta actividad (La Opinion, 2022).

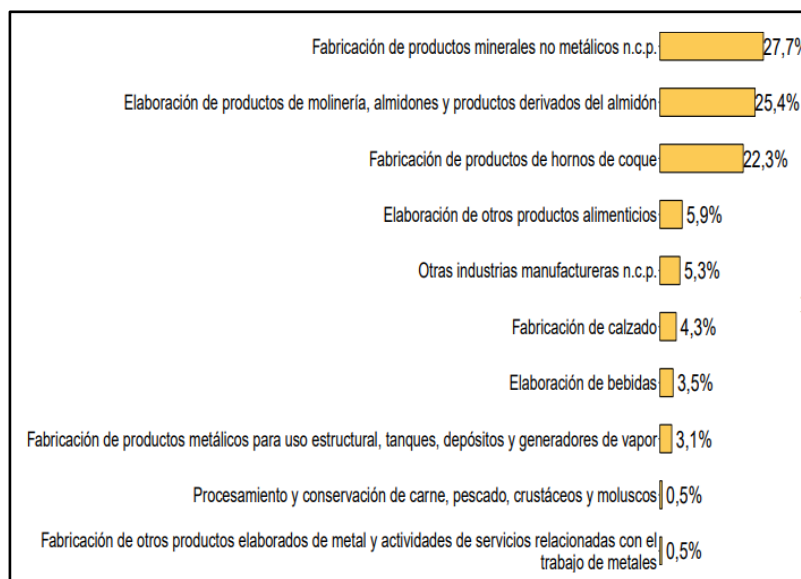


Figura 21. Producción industrial del departamento de Norte de Santander.

Fuente: [https://www.mincit.gov.co/CMSPages/GetFile.aspx?guid=343b884d-95de-4e64-8f0f-](https://www.mincit.gov.co/CMSPages/GetFile.aspx?guid=343b884d-95de-4e64-8f0f-f76334a7dd74)

f76334a7dd74

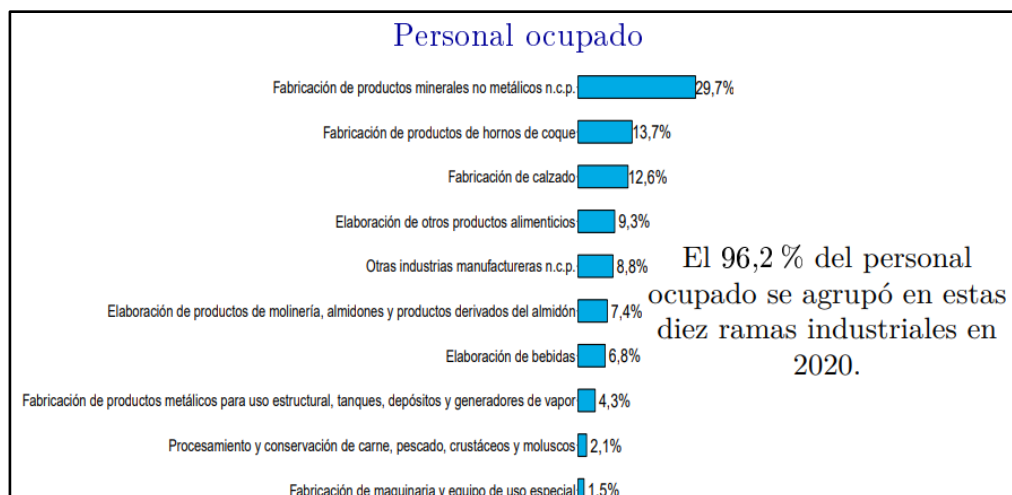


Figura 22. Personal ocupado del departamento de Norte de Santander.

Fuente: <https://www.mincit.gov.co/CMSPages/GetFile.aspx?guid=343b884d-95de-4e64-8f0f-f76334a7dd74>

Además, gracias a esta actividad “el departamento y los municipios cuentan con una asignación cercana a los \$238.000 millones de regalías para la inversión en su territorio, y, el presupuesto de sus asignaciones directas de regalías creció más de 170% con respecto al bienio de 2019-2020” (La Opinión, 2022). Del mismo modo, la sociedad se ha beneficiado de 516 obras que transforman vidas, recibiendo recursos para sectores de transporte, educación y ciencia.

Por otro lado, en el departamento existen empresas de mediana minería que trabajan en pro de la sociedad, entre ellas tenemos: Cooprocargua, Frontier Coal, Carbomax, Consorcio Minero de Cúcuta, Induminas Tasajero, Excomin, Miner Coque, entre otras. Estas empresas, mantienen una responsabilidad corporativa, en donde trabajan de mano con las comunidades de manera responsable, respetando, contribuyendo al entorno, respeto al medio ambiente, generando oportunidades y desarrollando proyectos sociales.

5.1.3. Impactos sociales negativos

La minería tiene diversos impactos sociales negativos en esta región del país, pues bien, como se mencionó anteriormente posee un alto porcentaje de trabajadores de la zona, y en estos recae los efectos de la actividad.

El impacto social más significativo a nivel sentimental y, psicológico que genera gran rechazo hacia la actividad, es el generado por los accidentes mineros, pues en los últimos años han ocurrido con mayor frecuencia, y las razones son variadas como falta de control de gases, incendios, derrumbes, caídas a diferente nivel, entre otros.

Uno de los accidentes más recientes de la zona sucedió en una mina del municipio del Zulia, exposición en la mina de carbón La Mestiza, Vereda El Albarico, esto ocurrió por una acumulación de metano y polvo de carbón el 30 de mayo, y para el 9 de junio, terminaron las labores de búsqueda y rescate de cuerpos donde la “Agencia Nacional de Minería confirmó el hallazgo del último de los 14 mineros que quedaron atrapados en la mina” (El espectador, 2022), con apoyo de la defensa Civil, La Cruz Roja, Ejército y Policía.

Este hecho, ha dejado en los familiares de las víctimas un rechazo a hacia la minería, pues a pesar de estar avaladas y vigiladas por el estado, no se llevan los correctos controles tanto de la empresa como de las entidades del estado, al no tener las condiciones ideales en interior mina. Así es el caso del Daniel Arias, que en una publicación de (Noticias Caracol, 2022), expresó que “No se sabe qué podría pasar ahí, de pronto la mina esta engasada y se metieron a trabajar así, por eso suceden muchos accidentes, porque a veces no identifican que la mina tenga gas, sino que se le meten así a la ciega”.

Del mismo modo, una de las esposas de las víctimas, Victoria Yépez, dijo que “Esto es muy duro para mí y para mis hijos. No encuentro cómo expresar lo que siento, lo que estamos viviendo en estos momentos de angustia y desespero; los niños están muy afectados” (El tiempo, 2022). Esto denota la carga emocional que traen consigo los familiares y los propios trabajadores mineros en esta labor, pues bien, esta actividad conlleva altos sacrificios que ocasionan traumatismos y estrés (desplazamiento de vivienda, situación económica familiar, cambios en la alimentación), ambientes pesados de trabajo, altos niveles de temperaturas o humedades en interior mina, problemas de compañerismo, entre otras. Lo anterior, no solo influye al minero como tal, sino que también a sus familiares, amigos cercanos, vecinos, y se expande a la comunidad en general mediante las quejas, malos comentarios, mitos de la minería.

Por otro lado, el territorio se ve afectado por grupos al margen de la ley, los cuales inciden en el control territorial en las explotaciones de los recursos naturales y generan una desestabilización de la convivencia. Estos grupos, ponen en riesgo la puesta en marcha de proyectos mineros legales y generan altos índices de desplazamiento de empresas, comunidades e incrementan los riesgos sociales en la región. A su vez, el Estado ha sido indiferente de esta región y de su situación militar, y se refleja en unas vías de comunicación precarias, bajos niveles de educación, escasas técnicas al campesino, baja empleabilidad, cifras de pobreza, entre otras problemáticas que acarrea el departamento por la presencia de estos grupos que obstaculizan el desarrollo rural territorial en áreas como agricultura, minería, hidrocarburos, donde actores sociales juegan un papel fundamental y deben contar con el apoyo de entidades públicas o privadas que mejoren las condiciones de vida y bienestar de toda comunidad rural y urbana, y, (Maldonado, 2018) menciona que “ el Catatumbo estaría ubicado en los Territorios Tipo IV, en la medida en que se presentan fracturas sociales, debido al conflicto político militar, y hay instituciones débiles

o inexistentes.” , también que “Es necesario que el Estado asuma compromisos con la región y compromisos con las organizaciones sociales existentes en torno al respeto a la vida, a la movilización social y a la agremiación; por otra parte, el desmonte de su aparato de guerra contra la región y el fin de la presencia diferencial en el territorio.”.

5.2. Impactos ambientales

En Colombia, El carbón térmico que se produce en el interior del país abastece el mercado doméstico, que lo destina a la generación eléctrica, como fuente de energía primaria y secundaria en la industria; mientras que el carbón metalúrgico se emplea para la producción de coque y para la exportación directa.

Hoy en día, la tecnología existente permite la reducción y mitigación de las emisiones asociadas al uso del carbón; no obstante, la percepción con respecto a la combustión de carbón continúa siendo negativa, lo que dificulta su utilización. Por ende, la problemática ambiental en el sector del carbón se puede enfocar en dos aspectos:

- ✓ En la producción, la responsabilidad ambiental es enfrentada según el tipo de minería, siendo mayor en la gran minería, donde se atiende desde la prevención hasta la mitigación y el control. La menor responsabilidad recae en la minería de pequeña escala, donde la baja rentabilidad y la mala comercialización han conducido a que no considere y evalúe el impacto ambiental (UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGETICA (UPME), 2012).
- ✓ En el consumo, la contaminación se debe a la baja eficiencia de la tecnología empleada para la producción de energía y a la carencia de planes de mitigación. En el caso de la generación de energía eléctrica, se han desarrollado tecnologías

de carbón limpio que minimizan la formación de óxidos de nitrógeno (NOx), gases causantes del efecto invernadero, a través de procesos de requemado. Es necesario considerar alternativas para el aprovechamiento de mecanismos de desarrollo limpio, como el Convenio de Río de Janeiro y el Protocolo de Kyoto, relacionados con el efecto de los gases invernadero (UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGETICA (UPME), 2012).

En este estudio, nos enfocaremos en analizar los impactos ambientales provocados por el consumo del carbón, es decir, la combustión de esta roca sedimentaria. La combustión del carbón produce enormes cantidades de contaminantes del aire que afectan gravemente la salud pública y el medio ambiente. Entre los peligros graves para la salud humana que se originan por la contaminación del aire causada por la combustión del carbón, se pueden mencionar: enfermedades respiratorias, enfermedades cardiovasculares, enfermedades gastrointestinales, la muerte prematura. El proceso de combustión genera dióxido de carbono que no concentra el calor del planeta, aumentando su temperatura, siendo este el mayor impulsor del calentamiento global, y las emisiones de mercurio y otros elementos y compuestos tóxicos. Las centrales eléctricas de carbón también utilizan grandes cantidades de agua para enfriamiento, lo que afecta directamente la calidad del agua y producen más de 120 millones de toneladas de desechos sólidos por año.

Contaminación del aire

Hay cinco contaminantes atmosféricos convencionales principales de la combustión del carbón:

- Material particulado (PM), en forma de PM tanto fino como grueso (PM que mide 2.5 micrómetros o menos de diámetro [PM2.5] o 10 micrómetros o menos de diámetro [PM10], respectivamente);
- Óxidos de nitrógeno (NOx), que producen smog;
- El dióxido de azufre (SO₂), que causa la lluvia ácida (el NOx y el SO₂ también contribuyen a la formación de PM secundaria en el aire ambiente, causando enfermedades respiratorias y limitando la visibilidad);
- Mercurio (Hg) y otras sustancias tóxicas; y
- El dióxido de carbono (CO₂), el gas que atrapa el calor más importante que impulsa el calentamiento global.

Los efectos de cada uno de estos contaminantes del aire se describen en las secciones que siguen.

Material particulado y nano partículas y la combustión del carbón:

Las partículas emitidas por el proceso de combustión del carbón ya sean gruesas, finas o ultrafinas, se originan principalmente en la naturaleza heterogénea de la materia mineral presente en el carbón. Durante el proceso de combustión del carbón, es probable que los elementos trazan altamente volátiles como As, Cd, Pb, Hg, Sn, Zn, Sb, etc. entren en el aire por emisión, mientras que otros elementos como Cr, V, Zr, Mn, Co, Cu, etc., se retienen en la ceniza y también pueden ser responsables de la contaminación del suelo y del agua subterránea. Varios estudios muestran que las partículas submicrométricas (tamaño parcial $<1 \mu\text{m}$) y ultrafinas de cenizas volantes de carbón contienen típicamente una gran cantidad de metales alcalinos y alcalinotérreos como Na, K, Mg, Ca y metales de transición como Ti, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, V, Cr, Cu, y pueden enriquecerse en una cantidad de metaloides y otros elementos traza, incluidos Sb, As, Se, S y Cl.

Utsunomiya et al. (2004) informaron que elementos traza tales como Cd, As, La, Ce, Sr, etc., están presentes en la ceniza de carbón dentro de un rango de 0.01-1.0 μm de tamaño, que tiene el tiempo de residencia atmosférica más largo (≈ 100 días). El enriquecimiento de metales en partículas ultrafinas también se ha observado en muestras de gases apilados de centrales eléctricas de carbón. Sui. (2007) observaron el enriquecimiento de Ca, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Pb y Zn en las partículas ultrafinas generadas por la combustión de carbón indio bituminoso pulverizado (EhsanMunawe, 2018).

CO_x (CO₂ y CO) y la combustión del carbón.

Según algunos estudios recientes, el procesamiento químico a base de carbón libera CO₂ de dos a cuatro veces más que el procesamiento químico a base de petróleo (Ren y Patel, 2009). En la generación de energía al aire libre, la cantidad de calentamiento posible del carbón depende principalmente de los contenidos de C, O₂ y H₂ y parcialmente del SO₂. Sin embargo, en diferentes rangos de carbón, la proporción de estos componentes varía. Diferentes rangos de carbón tienen diferentes cantidades de carbón: el carbón de lignito tiene más de 60% de contenido de carbono y aumenta a 80% para antracita (Slatick, agosto de 1994).

Durante la combustión del carbón, tanto los gases de CO₂ como los de CO se emitieron principalmente como resultado de la oxidación y provocan impactos dañinos en el medio ambiente en forma de calentamiento global y gas de efecto invernadero (GEI). Además, estos gases se correlacionan concomitantemente con muchos problemas de salud, que incluyen directa e indirectamente la malaria, las enfermedades cardiovasculares y el asma. Las emisiones de CO₂ se consideran la causa principal de aproximadamente tres cuartos de las emisiones globales de gas de efecto invernadero (GEI) (EhsanMunawe, 2018) . Los combustibles fósiles representan

aproximadamente el 90% de las emisiones globales totales de CO₂ en 2015 (Jos G.I. Olivier, 2016) Debido a la continua emisión de CO₂ y al cambio climático subyacente, el calentamiento global se correlaciona con un aumento de las incidencias globales de inundaciones y actividad de huracanes teniendo un severo impacto en la agricultura y la red alimentaria. Además, un clima extremadamente caluroso conduce a deshidratación, enfermedades cerebrovasculares, respiratorias y cardiovasculares en el mundo desarrollado, incluidos los Estados Unidos y China, Por lo tanto, la emisión de CO₂ del carbón provoca la contaminación del aire y desempeña un papel clave en el calentamiento global y los gases de efecto invernadero (GEI), que afectan directa e indirectamente a la salud humana y al medio ambiente. A nivel celular, el CO se combina con la hemoglobina en la sangre y reduce su eficiencia y reduce su capacidad para transformar O₂ (EhsanMunawe, 2018).

SO_x (SO₂, SO₃ 2 – & H₂SO₄) y la combustión del carbón

El azufre está presente en forma de sulfuros, azufre elemental, azufre orgánico y sulfatos dentro del carbón (Ryan y Ledda, 1997). Durante la combustión del carbón, el azufre presente en el carbón se libera a la atmósfera y causa la contaminación del aire, el agua y la tierra. En la mayoría de las centrales eléctricas, el azufre aparece debido a la combustión del carbón que se utiliza para generar electricidad. En el caso de las centrales eléctricas de carbón no controladas, la emisión de óxidos de azufre y PM en el aire se duplicó en comparación con las emisiones de automóviles, camiones y fábricas cada año. Además del SO₂, otros Sox, como el sulfato (SO₃2–) que contiene PM, contaminan el aire y el agua al viajar cientos de millas desde la planta de energía y producir ácido sulfúrico (H₂SO₄), un componente importante de la lluvia ácida. Estos contaminantes del aire de SO_x, al inhalar, desestabilizan los latidos cardíacos normales

(ritmos) y causan ataques cardíacos (Peters et al., 1999). La alta exposición al SO₂ por parte de las poblaciones que viven cerca de las centrales eléctricas, los llevó a sufrir comúnmente de asfixia, sibilancias, tos y reducción de la función pulmonar (efectos en la salud de la contaminación del aire exterior. Comité de la Asamblea Ambiental y de Salud Ocupacional de la American Thoracic Society, 1996, Pope et al., 1995). El SO₂ se combina con los aerosoles, la niebla y el humo, y puede penetrar en el revestimiento de los pulmones y provocar algunas enfermedades pulmonares graves. El SO₂ también está involucrado en reacciones bronquiales y causa muerte prematura (Bascom et al., 1996, Kelsall et al., 1997). El SO₂ se libera a la atmósfera del humo y entra en los pulmones, donde puede reaccionar con el revestimiento mucoso respiratorio y formar los derivados de SO₃ de las mucinas y los glucanos de superficie que se liberan en el torrente sanguíneo y pueden causar una gran cantidad de enfermedades, incluyendo pulmón y cánceres de colon en humanos (Pourgholami et al., 2005, Hussain et al., 2016b). Además, los glicoepítomos sulfatados facilitan una serie de patologías microbianas que incluyen bronquitis y fibrosis quística (Hussain et al., 2013). El gas SO₂ también afecta a la flora y los cultivos cercanos, ya que la lluvia ácida provoca lesiones en las hojas, afecta el crecimiento de las plantas y reduce la diversidad de las especies de plantas (Rajput et al., 1977, Winner et al., 1985). Además, es un gas fitotóxico fuerte que causa una lesión aguda de los síntomas foliares en las plantas. Barretti y Benedict (1970), y Winner, Harold, Mooney y Goldstein (1985) estudiaron la relación entre la pérdida foliar debida al gas SO₂ (Winner et al., 1985, Barretti y Benedict, 1970). En estudios recientes, se ha demostrado que el SO₂ destruye la clorofila y altera la fotosíntesis y la productividad. Sin embargo, el daño causado por el SO₂ en las plantas requiere una mayor clarificación (Barretti y Benedict, 1970, Padhi et al., 2013, Swain y Padhi, 2015). Por

lo tanto, durante la combustión del carbón, el SO₂ puede tener una fuerte influencia en la salud humana y la vegetación.

La lluvia ácida (que contiene H₂SO₄), que también está presente en la niebla, el granizo y la nieve, genera graves problemas ecológicos en todas las áreas de la vida (Galloway y Whelpdale, 1980, Wagh et al., 2006). Los óxidos como SO₂, NO₂ y parcialmente O₃ se generan durante la combustión del carbón y producen lluvia ácida al hidratarse. Inicialmente, la lluvia ácida cae en los alrededores de los lugares industriales. Sin embargo, debido a la fuerte emisión de SO₂ y otros gases durante la combustión del carbón en la generación de energía, la lluvia ácida se transportó regional o incluso globalmente a través de ríos y reservas de agua (Galloway y Whelpdale, 1980, Wagh et al., 2006). La lluvia ácida también disuelve metales pesados, como Zn, Al, Cd, Pb, Mn, Hg y Fe (Tolba, 1983), durante el proceso de lixiviación, que se encontró abundante en el suelo. Durante la acidificación del suelo a través de la lluvia ácida, la lixiviación y / o movilización de los metales contamina el agua y los alimentos (es decir, el pescado y las verduras) (Thornton y Plant, 1980).

Al consumir este alimento contaminado, el metal pesado comienza a acumularse en el cuerpo humano y causa algunos problemas de salud graves, como cálculos renales, asma, dolores de cabeza e irritación de la garganta y la nariz. Además, los animales marinos también fueron afectados metabólicamente por la lluvia ácida. Por ejemplo, el comportamiento sexual de la trucha marrón se inhibió debido al pH altamente ácido del agua (menos de 5) (Kitamura e Ikuta, 2001). Además de los animales, los edificios hechos de mármol, concreto y piedra caliza también se dañaron debido a la exposición a largo plazo a la lluvia ácida. Se encontró que la lluvia ácida con un pH de 3 a 5 corroe los hormigones y los cementos. Por otra parte, la lluvia ácida causó el deterioro de los monumentos hechos de carbonatos y forma soluble.

NO_x (NO₂, NO y HNO₃) y la combustión del carbón

La emisión de importantes contaminantes atmosféricos es uno de los principales problemas medioambientales derivado de la producción de energía en los distintos sistemas actuales de combustión. Existe un gran número de contaminantes atmosféricos con distintos efectos en la atmósfera, entre los que destacan los óxidos de nitrógeno (NO_x y N₂O) y la materia particulada (tipo hollín).

Existen numerosas razones por las que los óxidos de nitrógeno y el hollín son considerados contaminantes. Los óxidos de nitrógeno son gases de carácter ácido que contribuyen a la lluvia ácida, a la generación de smog fotoquímico en los núcleos urbanos y a la reducción del ozono en la estratosfera. Así mismo, los óxidos de nitrógeno son gases irritantes que pueden provocar efectos dañinos en el sistema respiratorio de los seres vivos. Por su parte, el hollín es un contaminante liberado a la atmósfera en forma de partículas respirables de pequeño tamaño, PM₁₀ y PM_{2.5}, que, debido a sus características químicas al actuar como núcleo de condensación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), está asociado a efectos cancerígenos en los humanos. Además, el hollín produce problemas de ensuciamiento en los equipos al formar depósitos sólidos, empeorando el funcionamiento del sistema de combustión (M. Abián, 2014).

Material particulado (PM) en las fases de combustión y postcombustión del carbón.

Durante la combustión del carbón, se emitieron anualmente millones de toneladas de cenizas volantes (CFA) y polvo de carbón para contribuir a la formación de PM, y, por lo tanto, riesgos subyacentes para la esperanza de vida, Por ejemplo, la exposición al polvo de carbón en los niños que van a la escuela culminó en síntomas respiratorios. Del mismo modo, la poscombustión de carbón produjo una gran cantidad de cenizas volantes, cenizas de fondo y

escorias, conocidas colectivamente como residuos de combustión de carbón (CCR). Las cenizas volantes introducidas en el medio ambiente a través del transporte y la movilidad atmosférica de las cenizas volantes en grandes distancias, desde la planta de carbón hasta el depósito y / o el sitio de descarga (Raja et al., 2015), aumentan su impacto en las criaturas terrestres y acuáticas. Además, la deposición de cenizas volantes causa graves efectos en los ecosistemas terrestres en todas las áreas industriales donde se han depositado CCR.

Del mismo modo, la eliminación de las cenizas volantes húmedas puede alterar la estructura y el resultado, y contaminar el suelo cercano. La presencia de CCR y elementos traza en el suelo, cerca de un estanque de cenizas, disminuye el nivel de pH del suelo. La reducción del pH del suelo por debajo de unos 5 hace que sea desfavorable para la mayoría de los cultivos, y esto impacta indirectamente en la red alimentaria (EhsanMunawe, 2018).

Hidrocarburos aromáticos policíclico (HAP) y la combustión del carbón.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) ha definido 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y oxi-HAP como contaminantes prioritarios, debido a su toxicidad y efectos mutagénicos y carcinogénicos en organismos vivos y en el cuerpo humano. Por lo tanto, estos HAP se han estudiado y han desempeñado un papel excepcionalmente importante en las ciencias ambientales y analíticas en los últimos 40 años. Los HAP, junto con sus derivados de oxígeno, nitrógeno y azufre, aparecen de forma natural en entornos geológicos y en combustibles fósiles (incluidos el carbón, el petróleo crudo y sus derivados). Se forman debido a la actividad humana durante la combustión incompleta (de carbón, tabaco, Diesel o madera) lo que lleva a su presencia en el aire, los alimentos y los suelos, y se dispersan fácilmente a través del

transporte atmosférico y fluvial para depositarse en sedimentos fluviales Los derivados de PAH son uno de los grupos más tóxicos de HAP (Nádudvari, 2018).

Liberaciones de plomo en el aire y la combustión del carbón

El plomo (Pb) es un metal pesado extremadamente venenoso, se emite durante la combustión del carbón a través de CFA. En su estado elemental, el Pb rara vez existe en el medio ambiente, sino que existe en su estado de oxidación de Pb^{2+} , que se produce en toda la corteza terrestre. Se descubrió que Pb estaba extremadamente movilizadado en el medio ambiente y contamina el aire y el agua al viajar por las áreas cercanas de las centrales eléctricas. Con la exposición humana, daña casi todos los órganos y sistemas de órganos asociados, en particular los riñones, el corazón, el sistema nervioso central y la circulación sanguínea en los humanos. En consecuencia, en niveles bajos, se ven afectados la síntesis de hemoglobina y algunos otros procesos químicos, por lo que las funciones neuro-conductuales se debilitaron profundamente. Los vehículos que conducen, la minería y la quema de carbón fueron las principales fuentes de Pb. (EhsanMunawe, 2018)

Liberaciones de mercurio en el aire y la combustión del carbón

Ahora que muchas de las mayores fuentes históricas de contaminación por Hg, como la extracción de Hg, la fundición de metales y los procesos de amalgamación se han retirado o se han controlado en gran medida (exceptuando ASGM), el papel de la combustión del carbón ha aumentado. Este estudio sugiere que 38 Gg de Hg han sido liberados de la combustión de carbón en todo momento. Esto representa el 2.5% de las liberaciones acumuladas de Hg al medio ambiente de todas las fuentes, pero en 2010 la combustión del carbón contribuyó con el 11% del

Hg total a todos los medios (Streets et al., 2017). Esto puede atribuirse al notable crecimiento de la combustión de carbón para la generación de energía en Asia en las últimas décadas. Con respecto a las emisiones solo a la atmósfera, la combustión de carbón fue la segunda fuente más grande después de Artisanal and small scale gold mining (ASGM) en 2010, contribuyendo con el 25% del total. Las emisiones anuales de Hg de la combustión de carbón continúan aumentando en la actualidad.

Debido a su importante papel en las actuales liberaciones de Hg, la combustión del carbón se ha convertido en un objetivo para el control de las emisiones de mercurio en las regiones desarrolladas y en todo el mundo. Este estudio muestra que las medidas de control ya han tenido éxito en el mundo desarrollado, deteniendo el crecimiento o reduciendo los niveles de emisión. Por ejemplo, en los EE. UU., La tasa de Hg liberada por tonelada de carbón consumida ha disminuido de 0.063 g de Hg-1 en 1950 a 0.034 g de Hg-1 en 2010, mientras que en Europa Occidental ha disminuido de 0.080 a 0.041 g de Hg-1. Es probable que haya más disminuciones a medida que los controles de emisión sean aún más eficientes y más ampliamente utilizados, y que las plantas más antiguas se retiren del servicio. Si se pudieran lograr este tipo de mejoras en Asia, se podrían lograr grandes avances hacia la reducción de la contaminación mundial por Hg atribuida a la combustión del carbón.

A medida que pasa el tiempo, la distribución de las liberaciones primarias de Hg entre los medios está cambiando: en 1950, el 77% del Hg liberado de la combustión del carbón fue directamente al aire; en 2010 esta fracción había caído al 55%. Con más Hg ahora encontrando su camino hacia la tierra y hacia las masas de agua, es fundamental garantizar que los desechos de combustión de carbón desechados que contienen Hg se transfieran a vertederos seguros u otros repositorios, para que el Hg no se vuelva a emitir al aire ni se lave ríos y arroyos y así

reingresar al ecosistema. También existe una necesidad urgente de saber más sobre lo que sucede al rastrear los contaminantes de Hg cuando se usan desechos de carbón en aplicaciones comerciales.

El Hg que se emite directamente a la atmósfera por la combustión del carbón se enriquece cada vez más en Hg⁰. La relación de Hg⁰ a Hg total aumentó de 0.52 en 1950 a 0.61 en 2010. Esto se debe a que Hg⁰ es menos reactivo y susceptible a la captura que Hg particulado y divalente. Como resultado, la contaminación local de Hg está siendo lentamente reemplazada por la contaminación global, debido a la larga vida atmosférica de Hg⁰. Tal redistribución de Hg puede afectar la interpretación de las tendencias de medición y la atribución y cuantificación del daño a la salud de los humanos y la vida silvestre (David G. Streets, 2018).

Liberaciones de Arsénico en el aire y la combustión del carbón

Debido a la existencia de As en diferentes estados de oxidación, As puede participar en numerosas reacciones químicas y dar lugar a diferentes productos. Por lo tanto, el impacto en la salud de Tan depende en gran medida de su forma química. La combustión del carbón y la fundición son las dos fuentes principales de As. Los metales trazan del carbón dependen principalmente del rango y grado del carbón. Sin embargo, la cantidad promedio de contenido de As en todo el mundo para el carbón de bajo rango, por ejemplo. El carbón bituminoso y el lignito son, en consecuencia, 9.0 y 7.4 mg / kg y para el resto del carbón, el contenido máximo de As es 50 y 49 mg / kg, respectivamente. Durante la combustión del carbón, As estaba más concentrado tanto en forma volátil como en partículas.

Se encontró que dos formas de As, elemental (As) y óxido (As_2O_3) eran más evidentes en el ambiente de gas de chimenea oxidante del proceso de combustión del carbón. En la gasificación de carbón, la forma más probable es As_4 con trazas de arsina (AsH_3). A medida que se libera al medio ambiente en forma de AsO y As_2O_3 a temperaturas más bajas ($1000\text{--}1200^\circ\text{C}$), pero a temperaturas altas ($1200\text{--}1600^\circ\text{C}$) solo se libera As_2O_3 . Debido a la ingestión de As dentro de alimentos contaminados, los síntomas de toxicidad aguda son visibles dentro de los 30 minutos. Algunos de estos síntomas incluyen debilidad con enrojecimiento de la piel y dolor muscular y / o dolor abdominal, vómitos y náuseas, cólicos y diarrea profusa. Además, en muchos casos, la piel se vuelve fría y sudorosa, y disminuye la insuficiencia renal y disminuye la concentración de orina. La fatiga y la somnolencia se observaron a menudo junto con el desarrollo de psicosis que se manifestó por delirios paranoicos y delirio. Finalmente, el shock puede llevar a convulsiones, coma o muerte.

Como efecto, el sistema respiratorio humano debido a la inhalación a través del polvo del aire y conduce al asma y otras enfermedades respiratorias, Además, el consumo de As se produce a través de tierras y / o mariscos contaminados, y conduce a problemas graves en el sistema cardiovascular humano. Crónico y agudo Como la exposición conduce a despolarización miocárdica y arritmias cardíacas, lo que resulta en insuficiencia cardíaca. La exposición a largo o corto plazo al As produce efectos hemolíticos o citotóxicos en los glóbulos rojos, glóbulos blancos y plaquetas, y causa una amplia gama de enfermedades de la sangre.

Por ejemplo, la anemia y la leucopenia son enfermedades comunes de la sangre causadas por la exposición oral crónica al As. Además, de dosis relativamente altas de este elemento venenoso causan depresión de la médula ósea en humanos, el daño potencial en el ADN induce mutaciones en una amplia variedad de genes, lo que resulta en una amplia gama de cánceres, que

incluyen cáncer de piel, cáncer respiratorio y leucemia a través del consumo de agua y aire, contaminados con Como. Por lo tanto, como se libera de una central eléctrica de carbón, conduce a muchas enfermedades graves de la piel, el corazón, la sangre, el cerebro y los pulmones (Nádudvari, 2018).

Otros contaminantes

Daños por agua

Las centrales eléctricas de carbón no solo contaminan el aire, sino que también contaminan el agua en los lugares donde operan. En un informe detallado titulado “Aguas heridas”, 84, el Grupo de trabajo sobre aire limpio resumió una serie de insultos que los servicios públicos infligen en las cuencas hidrográficas que utilizan principalmente para enfriar el agua.

- El arrastre y el impacto de las especies de peces y mariscos de las tomas de agua de refrigeración, con el consiguiente daño a las poblaciones de peces y las pérdidas económicas de pesca;
- La alteración de los niveles y flujos de agua de manera que pueda ser perjudicial para las comunidades de plantas y animales;
- Descarga de agua a temperaturas de hasta 60 grados más calientes que el cuerpo de agua de donde proviene, amenazando a los ecosistemas acuáticos que no pueden soportar un choque de temperatura de este tipo; y
- Descarga de productos químicos tóxicos utilizados no solo para mantener el agua de refrigeración utilizable sino también para apoyar el funcionamiento de la caldera y como parte del tratamiento de desechos

Según el informe, el daño acumulado de la ingesta y descarga de múltiples plantas a lo largo de un río, en un área costera o cerca de otras aguas importantes no se conoce bien, pero puede causar un daño considerablemente mayor que el que podría ocurrir con una sola planta. En otras palabras, las plantas de energía potencialmente pueden afectar virtualmente todos los aspectos de la salud y la productividad de un cuerpo de agua (Lashof, 2007).

6. Capítulo III. Aplicaciones alternativas del carbón para usos ambientalmente sostenibles

Durante los últimos años, se han ido investigando las posibles alternativas de aplicación del carbón mineral extraído por la industria minera en pro del cuidado ambiental, de la evolución tecnológica y de la industria. En este capítulo se evidencia la variedad de alternativas del uso del carbón de forma sostenible, sus características, uso, fabricación y síntesis.

6.1. Nanotubos

El autor (Campo Perfecto, 2012) realiza una síntesis de como las nano estructuras fueron descubiertas a partir de los fullerenos, la cual está conformada por 60 átomos de carbono unidos por enlaces covalentes formando hexágonos y pentágonos. Luego, se encontraron las láminas de grafeno pueden aparecer enrolladas de manera concéntrica sobre sí mismas, descubriendo los nanotubos de carbono, pues sus estructuras tenían diámetros del orden de nanómetros y longitudes de entre varias micras y algunos centímetros. Estos nanotubos pueden estar formados por única lámina de grafeno enrollada sobre si misma o por varias láminas. Además, los extremos de los nanotubos pueden estar abiertos o cerrados mediante una estructura análoga a la

mitad de un fullereno. En la (figura 23), se pueden diferenciar las estructuras anteriormente mencionadas:

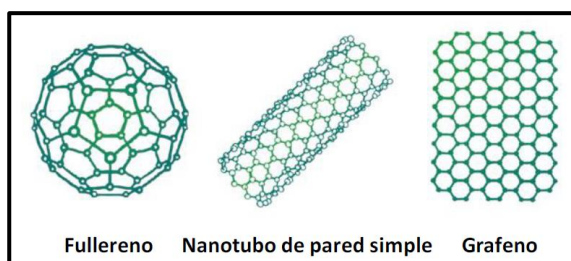


Figura 23. Imágenes de fullereno, nanotubo de pared simple y lámina de grafeno.

Fuente: (Sánchez, 2012)

Según (Coronado P. D., 2012), los Nanotubos de Carbono, son hojas de grafeno que forman una estructura cilíndrica en un eje paralelo de uniones C-C, con un diámetro de uno hasta varios nanómetros y longitudes de tamaños micrométricos, está formado por átomos de carbono e hibridación sp^2 .

Del mismo modo, para (Castellanos, 2010), estos nanotubos de carbono son enlaces covalentes entre estos elementos, además cada átomo está ligado a otros tres átomos generando figuras hexagonales, excepto cerca de las extremidades del nanotubo en donde se pueden percibir formas pentagonales. En la figura 24, se muestra la quiralidad de los nanotubos, en estos se presentan dos tipos de ordenamientos no superponibles con su imagen especular, además dependiendo de esta orientación los nanotubos pueden adquirir diferentes propiedades eléctricas.

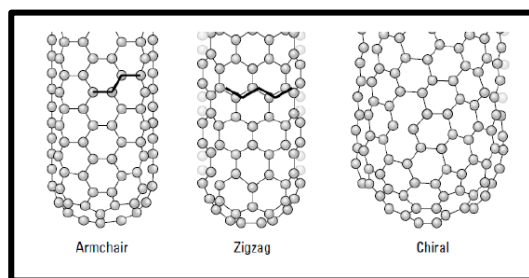


Figura 24. Orientación de los nanotubos.

Fuente: Castellanos (2010)

De las anteriores orientaciones de los nanotubos, el autor (Campo Perfecto, 2012) explica que el comportamiento de las propiedades de estos depende de la forma de la lámina de grafeno el cual se enrolla al formar el nanotubo. Es decir, cuando se encuentra una estructura tipo zig-zag el comportamiento del material es metálico-semiconductor, cuando la estructura es tipo “armchair” es un comportamiento metálico, y, cuando el comportamiento es semiconductor es una estructura quiral, ver figura 25.

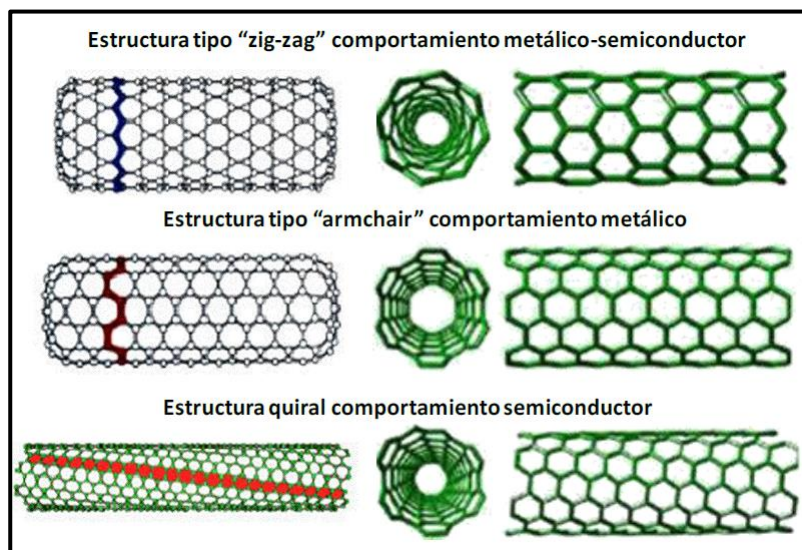


Figura 25. Esquema descriptivo de las diferentes disposiciones existentes en los Nanotubos de carbono.

Fuente: Sánchez (2012)

6.1.1. Propiedades

Para (Alcca Quispe), las propiedades de estos materiales dependiente de los números de capas concéntricas, su manera de enrollado y su diámetro. Sin embargo, sus propiedades fueron distribuidas por el autor de la siguiente manera:

- *Propiedades electrónicas*

Se caracteriza por un buen transporte de la corriente eléctrica, actúa con característica metálica, semiconductor o superconductor. Además, para que estos nanotubos sean metálicos

deben cumplir la relación $n-m = 3i$, múltiplo de tres, al contrario, será semiconductor como lo muestra la figura 26.

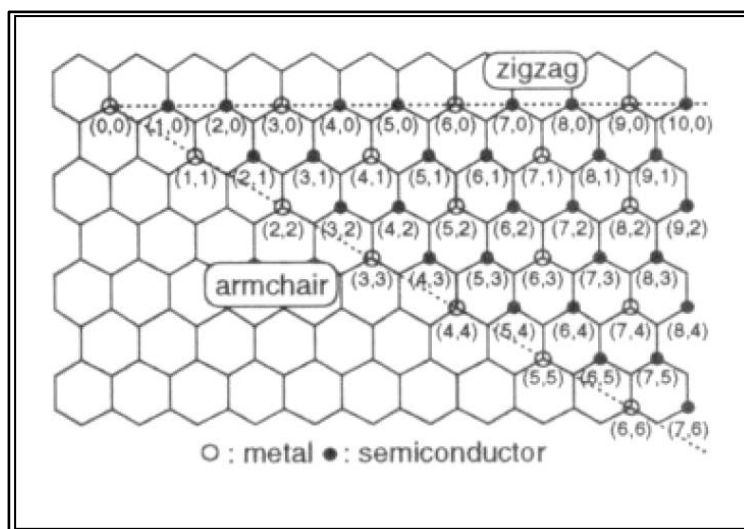


Figura 26. Carácter electrónico de tipo de nanotubos.

Fuente (Alcca Quispe)

La autora (Esparza, 2008), expresa que los nanotubos poseen propiedades electrónicas y gracias a esto, son utilizados como transistores, semiconductores, interruptos, memorias en dispositivos y larga vida a dispositivos electrónicos. Sin embargo, las propiedades eléctricas, mecánicas y químicas se encuentran afectadas por las dimensiones y condiciones bajo las que son sintetizados. Del mismo modo, (Materiales con nanotubos de carbono, 2009), “los nanotubos metálicos, por ejemplo, son capaces de conducir la corriente eléctrica de cientos de veces más eficazmente que los cables de cobre tradicionales”. Esto demuestra la amplia aplicación de los nanotubos y la facilidad de reemplazar materiales industriales y también mejorar propiedades eléctricas de estos.

Como se mencionó anteriormente, (Coronado P. D., 2012), consolida que la propiedad de mayor interés en los nanotubos es su conductividad eléctrica, lo cual depende de su arreglo

estructural que se refiere a como los tubos se encuentra enrollados respecto a la dirección del vector R en el plano del grafito. Estos materiales, pueden presentar semiconducción a superconducción eléctrica por las relaciones fundamentales geométricas y al número de capas de su composición.

- *Propiedades mecánicas*

Para (Alcca Quispe), las propiedades mecánicas que poseen los nanotubos son las siguientes:

- Posee alta dureza similar a los diamantes.
- Alta resistencia mecánica.
- Alta flexibilidad.

Así mismo, (Materiales con nanotubos de carbono, 2009), afirman que estos materiales poseen alta dureza, tenacidad, resistencia mecánica, flexibilidad y elasticidad, y son ligeros. Estos, pueden ser incorporados en diversos materiales los cuales adquirirían estas características aptas para diversas aplicaciones, como la aeroespacial.

Por otro lado (Coronado P. D., 2012), resalta que la característica mecánica principal de los nanotubos es su relación longitud/diámetro, la cual es elevada. Este diámetro es el orden de los nanómetros y su longitud puede variar desde micras hasta milímetros o centímetros. Además, los Nanotubos tiene pocos defectos en la estructura de sus paredes, permitiendo que se doblen en efectos como dislocaciones o bordes de grano, y, estos materiales son 20 veces más resistentes que el acero, con alta resistencia tensil.

- *Propiedades elásticas*

(Alcca Quispe), en su informe afirma que dentro de las propiedades elásticas se encuentran:

- Gracias a su geometría los nanotubos son duros en la dirección del eje y flexibles a deformaciones perpendiculares al eje.
- Cuanto menor es el diámetro de los nanotubos su estabilidad disminuye.
- Al requerir grandes deformaciones radiales, los nanotubos pueden ser inestables, mayormente en nanotubos de gran diámetro.
- Los nanotubos poseen mejores características que las fibras de carbono en: resistencia a deformaciones parciales, flexibilidad, etc., siendo idóneas para diversas aplicaciones.
- *Propiedades térmicas*

(Materiales con nanotubos de carbono, 2009), aseguran que los nanotubos de carbono además de ser estables a altas temperaturas, son buenos en conductividad térmica en dirección a su eje superando a materiales como los diamantes, sin embargo, perpendicular a su eje reflejan esta conductividad, (Alcca Quispe), apoya de que los nanotubos presentan una alta conductibilidad térmica en la dirección del eje del nanotubo. No obstante, esta propiedad se logra transferir a los compuestos que contienen nanotubos, así se logran desarrollar materiales con alta conductividad térmica en una dirección, pero aislantes en otras, según la alineación de los nanotubos.

- *Propiedades Hidrófobas e Ignífugas*

La noticia sobre (Materiales con nanotubos de carbono, 2009), afirma que los nanotubos presentan dos propiedades llamadas: Hidrófobas e Ignífugas. La primera, consiste en la propiedad capaz de repeler agua, característica que da lugar al desarrollo de compuestos con la misma característica. Y, la segunda, según comprobaciones científicas, al elevar la temperatura,

por ejemplo, al calentar los nanotubos, estos se desplazan hacia la superficie y formarían una red que protegería la integridad estructural de polímero y hacen parte de una barrera aislante que protegería al interior del material. “Los materiales compuestos con propiedades ignífugas son de vital importancia en muchos ámbitos de aplicación. Los aviones comerciales de transporte, por ejemplo, contienen gran cantidad de plásticos inflamables en la tapicería de los asientos, ventanas, marcos de ventanas, aislamientos de cables y partes variadas.” Las propiedades generales de los nanotubos de carbón, definidas por (Esparza, 2008) se resumen en la tabla 20.

Tabla 20. Propiedades generales de los nanotubos de carbono.

Propiedades	Características	
Geométricas	Capas	una/múltiples
	Diámetro	~0,4 nm a > 3nm (SWCNT)
		~1,4 nm a > 100 nm (MWCNT)
Longitud	~ 10 ⁻⁶ m = μm a cm	
Mecánicas	Módulo de Young	~1x10 ¹² Pa = 1Ta (hierro 0,2 TPa)
	Densidad	1,33 - 1,4 g/cm ³
	Fuerza Tensil	45 x 10 ¹² Pa = 45 Gpa (Hierro 2 Gpa)
Electrónicas	Conductividad	Metálica/ semiconductor
	Corriente de portadores	~ 1TA /cm ³ (Cu 1GA /cm ³)
	Movilidad	10000-50000 cm ² (V.s)
Térmicas	Conductividad Térmica	6600 W / m.k.
Magnéticas	Momento magnético	Depende del diámetro de nanotubo
		0,7 meV/T (d=2,6 nm)
		1,5 meV/T (d=5nm)

Fuente: (Esparza, 2008)

Por otro lado, para (Alcca Quispe), realiza una comparación de las propiedades de los Nanotubos de Carbón contempladas en la Tabla 21.

Tabla 21. Propiedades comparativas de los Nanotubos de Carbono.

Propiedad	Nanotubos de pared única (SWNT)	Por comparación
-----------	---------------------------------	-----------------

Tamaño	0,6 a 1,8 nanómetro de diámetro	La litografía de haz electrónico puede crear líneas de 50nm de ancho
Densidad	1,33 a 1,40 g/cm ³	El aluminio tiene una densidad de 2,7 g/cm ³
Resistencia a la tracción	45 mil millones de pascales	Las aleaciones de acero de alta resistencia se rompen a alrededor de 2 mil millones de pascales
Elasticidad	Pueden doblarse a grandes ángulos y vuelven a su estado original sin daño	Los metales y las fibras de carbón se fracturan ante similares esfuerzos
Capacidad de transporte de corriente	Estimada en mil millones de amperes por centímetro cuadrado	Los alambres de cobre se funden a un millón de amperes por centímetro cuadrado aproximadamente.
Emisión de campo	Pueden activar fósforos con 1 a 3 voltios si los electrodos están espaciados una micra	Las puntas de molibdeno requieren campos de 50 a 100 voltios/m y tienen tiempos de vida muy limitados.
Transmisión de calor	Se predice que es tan alta como 6000 vatios por metro por kelvin a temperatura ambiente	El diamante casi puro trasmite 3320 W/Mk
Estabilidad térmica	Estable aún a 2,800 grados Celsius en el vacío de 750°C en aire	Los alambres metálicos en microchips funden entre 600 y 1000°C

Fuente: (Alcca Quispe)

6.1.2. Aplicaciones

Para (Alcca Quispe), las aplicaciones de los nanotubos de manera resumida son las siguientes (ver Tabla 22).

Tabla 22. Aplicaciones de los nanotubos.

APLICACIONES	LA IDEA
Sondas químicas y genéticas. "Hebra de ADN"	Un microscopio con punta de nanotubo puede localizar una hebra de ADN e identificar los marcadores químicos que revelan cuál de las variables posibles de un gen presenta la hebra.
Memoria Mecánica. "RAM no volátil"	Se ha ensayado una pantalla de nanotubos depositada sobre unos bloques de soporte como función de dispositivo de memoria binaria, con voltajes que fuerzan el contacto entre tubos (estado "encendido") o su separación (estado "apagado")
Nano-pinzas	Dos nanotubos, unidos a los electrodos en una barra de vidrio, se abren y cierran a través de un cambio de

	voltaje. Estas pinzas se emplean para aprisionar y mover objetos de 500 nanómetros de tamaño
Sensores suprasensibles	Los nanotubos semiconductores cambian de resistencia de un modo drástico cuando se exponen a álcalis, halógenos y otros gases a temperatura ambiente. Da ahí la esperanza en lograr mejores sensores químicos.
Almacenamiento de hidrógeno e iones	Los nanotubos podrían almacenar hidrógeno en su interior hueco y liberarlo gradualmente en pilas de combustible baratas y eficientes. Albergan también iones de litio que podrían llevarlos a pilas de mayor duración.
Materiales de máxima resistencia	Incrustados en un material compuesto, los nanotubos disfrutan de enorme elasticidad y resistencia a la tracción. Podrían emplearse en coches que reboten en un accidente o edificios que oscilen en caso de terremoto en lugar de agrietarse.
Microscopio de barrido de mayor resolución. "Esta aplicación esta lista para comercializarse"	Unidos a la punta de microscopio de sonda de barrido, los nanotubos pueden amplificar la resolución lateral de instrumento en factor de diez o más, permitiendo representaciones claras de las proteínas y otras moléculas.
Oscilador mecánico. "versiones teóricas"	Un nanotubo interno podría oscilar a frecuencias del orden de una giga-Hertz dentro de un nanotubo mayor bajo la influencia de las fuerzas de Van der Waals.

Fuente: (Alcca Quispe)

Además, la autora (Campo Perfecto, 2012), expone las siguientes aplicaciones de los nanotubos de carbono:

- *Propiedades de emisión de campo de VA-SWNT*: una de las aplicaciones principales es la emisión de campo para su potencial uso en dispositivos como pantallas planas, ya que esta emisión requiere propiedades de la emisión en su forma y material, donde los nanotubos son ideales candidatos para ésta. Sin embargo, las propiedades emisoras del nanotubo depende de su estructura y del proceso de síntesis utilizado, ya que un control en el proceso de síntesis se puede lograr una alta pureza, de pared simple, orientados verticalmente en dirección al colector y dispuestos en regiones conductoras prediseñadas.

- *Refuerzo de estructuras: cartón ondulado:* una de las aplicaciones de los nanotubos es en estructuras como polímeros y otros materiales, pero, utilizando estos como refuerzo en las estructuras final de un cartón ondulado pegado con cola en base almidón.
- *Deposición de nanotubos en sustratos transparentes y aislantes:* otra aplicación es la fabricación de una película conductora y transparente aplicada a un sustrato aislante. Dependiendo de su resistividad laminar, estas películas delgadas pueden ser utilizadas en aplicaciones tales como la emisión de campo, en dispositivos fotovoltaicos, etc.

6.1.3. Métodos de síntesis

La síntesis consiste en las técnicas que son utilizadas para la producción de estos materiales. Los siguientes puntos consisten en métodos de síntesis de los Nanotubos.

- *Chemical Vapor Deposition (CVD)- Deposición de vapor químico.*

Este método, según como lo describió (Macías, 2010), se utilizan dos placas planas donde se deposita el carbono para generar los nanotubos. Estas placas están compuestas por zafiro o cuarzo, aunque también se destaca el uso de hierro y cobre como catalizadores para la síntesis de los nanotubos. Del mismo modo, se han utilizado elementos como el Cobalto, Manganeseo y Oro para obtener este material de alto alineamiento. Además, como soportes para los catalizadores son usados sustrato de silicio, cuarzo y alúmina. Esta técnica es prometedora para escalados industriales, debido a que el crecimiento se da a temperaturas bajas y se obtienen nanotubos puros y libres de metales.

- *Catalytic Chemical Vapor Deposition (CCVD)- Deposición de vapor químico catalítico.*

(Macías, 2010), expresa que este método es llevado cabo mediante un horno en donde fluye gas como fuente de carbono en presencia de un catalizador y, en los reactores esta difusión de gas es una etapa limitante generando una sinterización desordenada y en algunos casos llegan a ser quasi-alineados.

- *Catálisis sobre un catalizador de Cobalto-Molibdeno (CoMoCat)*

El autor (Macías, 2010), comenta que la síntesis del catalizador Cobalto Molibdeno es capaz de producir SWCNT (Nanotubos de carbono de pared simple), de alta selectividad dependiendo de la relación de Co: Mo, la temperatura de operación y el tiempo de síntesis. Estos tipos de catalizadores disminuyen los costos y son necesarios otros catalizadores lo que limitaría el proceso y aumentaría los costos. Generalmente el monóxido de carbono resulta ser una buena fuente de carbono para la síntesis y es necesario utilizar como sustrato sílica gel o cuarzo en donde se deposita el catalizador para que fluya el monóxido de carbono.

- *Catálisis sobre un catalizador de Cobalto- Hierro*

Para este método, (Macías, 2010), destaca que se usan sales de hierro y cobalto para sinterizar un catalizador capaz de producir nanotubos de carbono. En el procedimiento de esta técnica se usan sales de hierro, cobalto y sustrato esférico, donde da un aspecto diferente de la estructura de los nanotubos, a pesar de que este procedimiento es similar al de Catálisis de Cobalto-Molibdeno (CoMoCat).

- *Nanotubos de carbono alineados (VACNT)*

Los Nanotubos de carbono alineados, para (Macías, 2010) , pueden ser obtenidos mediante el uso de catalizador de ferroceno soportado sobre alúmina con etileno como fuente de carbono. Este procedimiento tiene limitaciones debido al ferroceno, es costoso, debe ser importado y su disponibilidad es limitada.

En la Tabla 23 presentada por (Macías, 2010), presenta los procedimientos para la síntesis de nanotubos alineados y su método utilizado.

Tabla 23. Procedimientos propuestos para la síntesis de nanotubos alineados y el método utilizado.

SUSTRATO	CATALIZADOR	FUENTE DE CARBONO	MÉTODO	REFERENCIA
Silicio	Co/Fe/Al	Acetileno	CVD	7
Cuarzo	Co/Fe/Al	Acetileno	CVD	7
Cuarzo	Ferroceno	Etanol o Xileno	CCVD	8
Alúmina	Ferroceno	Etanol o Xileno	CCVD	8
Cuarzo	Ferroceno	Acetileno	VACNT	6
Alúmina	Ferroceno	Acetileno	VACNT	6

Fuente: (Macías, 2010)

Otros métodos de síntesis de nanotubos de carbono son los siguientes:

- *Método de arco*

Este método consiste en “conectar dos barras de grafito con diámetros de 0.5 a 40 mm a una fuente de alimentación con voltaje de 20-50V, separarlas unos milímetros y accionar un interruptor. Al saltar una chispa de corriente de DC de 50-120A entre las barras y una presión base de 400 torr de helio, el carbono se evapora en un plasma caliente. Parte del mismo se vuelve a condensar en forma de nanotubos.” (Alcca Quispe). El diagrama de la figura 27 presenta el método por arco voltaico.

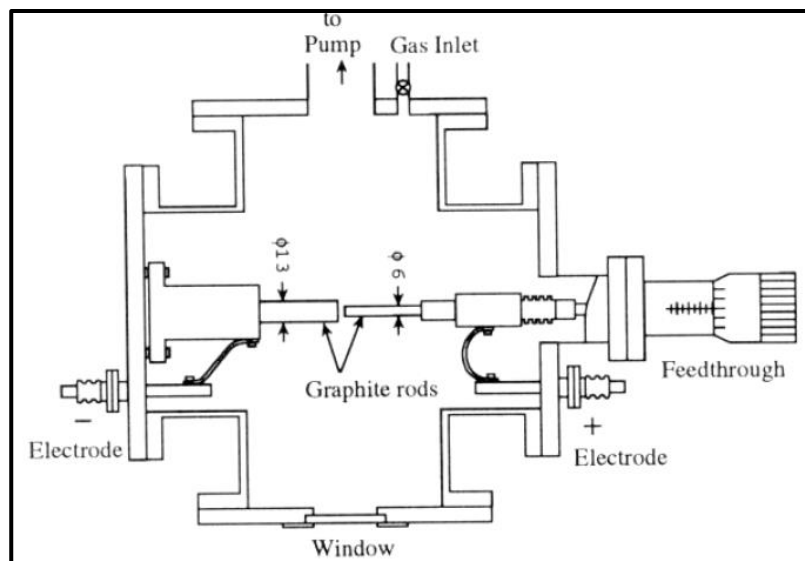


Figura 27. Diagrama del método de síntesis de nanotubos por descarga de arco voltaico.

Fuente: (Alcca Quispe)

Algunas características de este método definidas por (Alcca Quispe) son:

- *Rendimiento normal*: hasta un 30% en peso.
- *Ventaja*: las altas temperaturas y los catalizadores metálicos añadidos a las barras puede producir nanotubos de pared única y múltiple con pocos defectos estructurales.
- *Limitaciones*: los nanotubos tienden a ser cortos y depositarse en formas y tamaños aleatorios.
- *Distribución de diámetros*: típicamente se obtiene un amplio rango de diámetros de nanotubos, además del crecimiento del nanotubo de $\sim 1\mu\text{m}$ ocurre típicamente en 0.1.
- *Método de vaporización por láser*

(Alcca Quispe), indica que gracias a unas pruebas a metales con pulsos intensos producían moléculas metálicas más extravagantes, pero luego, se descubrieron los nanotubos, los cuales

sustituyeron al metal por las barras de grafito. Seguidamente, se empezaron a producir nanotubos de carbono por medio de pulsos de láser. Las características de este método son:

- *Rendimiento normal*: 70%
- *Ventajas*: producen nanotubos de pared única con gama de diámetros que puede controlar variando la temperatura de reacción.
- *Limitaciones*: posee láseres muy costosos.

- *Método de crecimiento de vapor*

Para (Alcca Quispe), en este método “se colca un sustrato que actúa como catalizador de (Fe, Co, Ni) formando un filme fino de 1 a 50 mm de espesor en un horno de atmósfera inerte de helio a baja presión, se calienta a 600 grados centígrados y lentamente se añade gas metano, acetileno o benceno, liberándose átomos de carbonos, que se pueden recombinar en forma de nanotubos.”. Sus características son:

- *Rendimiento normal*: de 20-100%.
- *Ventajas*: es el más sencillo de los tres métodos para su aplicación a escala industrial.
- *Limitaciones*: los nanotubos suelen ser de pared múltiple y a veces plagados de defectos.

- *Otros métodos de síntesis*

Desde el descubrimiento de los Nanotubos de Carbono originados por la pirolisis de electrodos de grafito en atmósfera controlada de hierro. Del mismo modo, los nanotubos también vienen siendo sinterizados por otros métodos tales como la síntesis catalítica usando metales de transición sobre soportes de sílica alúmina y también sobre las zeolitas. (Alcca Quispe).

6.2. Carbón activado

El carbón activado, según (Sarmiento, y otros, 2004) es un material poroso carbonáceo con una gran área superficial, capaz de adsorber una gran diversidad de sustancias tanto gaseosas como líquidas y posee propiedades absorbentes. Este material tiene amplias aplicaciones y es utilizado para mover el color, olor, sabor, y un sin número de impurezas orgánicas, en la recuperación de solventes, control de contaminación ambiental, en la industria farmacéutica y médica.

El carbón activado es un material que posee una estructura cristalina similar a la del grafito, ya que es extremadamente poroso y puede llegar a áreas superficiales del orden de 1,500 m² por gramo de carbón. (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA).

Así mismo, la (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA), expresan que la activación de cualquier carbón se fundamenta en aumentar el área superficial creando una estructura porosa. No obstante, el área superficial del carbón activado es interna y es impresionantemente alta. Además, el nombre de carbón activado es dado a los carbones porosos que se encuentran preparados artificialmente por procesos de carbonización con el fin de que tengan altos grados de porosidad y altas superficies internas, con ello, tener la capacidad de absorber gran cantidad de compuestos muy diversos, tanto en fase gaseosa como en disolución.

El carbón activado se puede describir mediante dos tipos de estructuras porosas por medio de rayos X, (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA):

- El formado por microcristalinas que en dos planos son semejantes al grafito integrado por capas paralelas de átomos de carbono ordenadas hexagonalmente.

- Como retículo tridimensional de hexágonos de carbono desordenados como resultado del ordenamiento al azar de las estructuras bencénicas condensadas por carbonización.

Además, el carbono activado (AC) es un material poroso a base de carbono con un área superficial interna específica entre $300 \text{ m}^2/\text{g}$ hasta $3000 \text{ m}^2/\text{g}$, esta propiedad se debe al volumen de los microporos que oscilan por debajo de 2 nm , semejante a las dimensiones moleculares. Según la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) (Nuevos Materiales, 2002) los poros se dividen en tres categorías debido al transporte molecular: macroporosos, mesoporosos y microporosos. Los macroporosos poseen un diámetro superior a los 50 nm , donde las moléculas que son transportadas en estos poros son de difusión masiva. Los mesoporosos tienen un diámetro que comprende los 50 nm y 2 nm , el transporte de las moléculas dentro de estos poros se realiza por medio de difusión de Knudsen, mientras que el transporte de las moléculas dentro de los microporos (poros por debajo de los 2 nm) se realiza por difusión activada la cual se basa en la interacción molecular con la superficie de la pared del poro.

Por último, los microporosos posee tamaños menores de 2 nm , dentro de los sólidos microporosos pueden resultar también las propiedades de textura de materiales desordenados y están asociados con materiales cristalinas con estructuras abiertas.

6.2.1. Métodos de activación

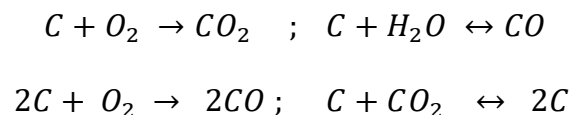
El proceso de activación de los productos carbonizados se puede realizar de dos formas: física y química.

- *Activación física:*

Este tipo de activación es el más usado, el cual se realiza mediante el vapor de agua y según lo afirma (Padrón, Rodríguez, & Gómez, 2013), el proceso de activación física se realiza en dos etapas: la primera, la carbonización, por la cual es producido el coque, considerado material adsorbente, con estructura porosa y rudimentario. La segunda etapa consiste en el alargamiento de dicha estructura porosa, creando una superficie interna accesible. También, es realizada la gasificación del carbonizado, exponiendo al material a atmósferas oxidantes, la cual elimina productos volátiles y átomos de carbono permitiendo aumentar el volumen poroso y la superficie específica, proceso realizado en hornos específicos a temperaturas cercanas entre 900°C y 1100°C.

Del mismo modo, (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA), expresan que el proceso de activación física inicia con la deshidratación y desvolatilización, gracias a la carbonización del material para obtener así carbono fijo y estructura porosa inicial, además, los átomos de carbono se organizan en estructuras microcristalinas conocidas como “cristalitas gráficas elementales”. Por otro lado, dichos autores, enuncian que en diversas ocasiones son necesarios pretratamientos como molienda y tamizado del producto para obtener los tamaños adecuados, y, si es un carbón coquizable, es necesario aplicar una etapa de oxidación para eliminar sus propiedades publicables.

Los agentes activantes que se suelen usar en el proceso son: oxígeno, aire, vapor de agua, y el dióxido de carbono. (Padrón, Rodríguez, & Gómez, 2013). Estos agentes, son independientes al proceso de carbonización o su continuación, pues tienen por objetivo reaccionar al agente activante con los átomos de carbono de carbonizado y así se obtiene “quemado selectivo” (Grisales Motato & Rojas Arrieta, 2016). Estos agentes dan lugar a la siguiente reacción química de la siguiente ecuación.



En el diagrama de la Figura 28 se muestran los diferentes procesos que tienen lugar a la activación física:

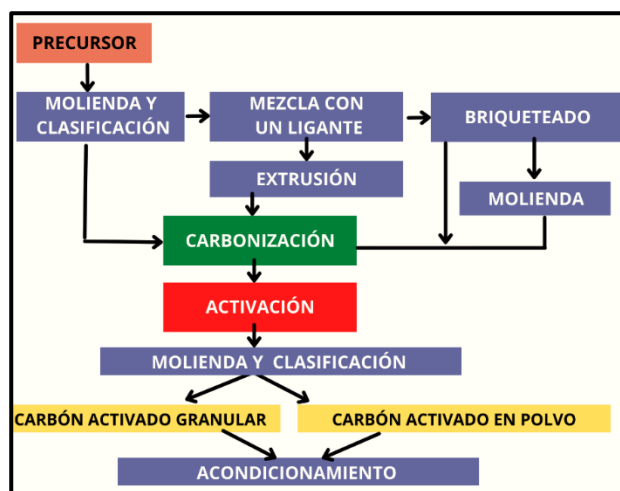


Figura 28. Diagrama de los diferentes procesos que puede tener lugar en la activación física

Fuente: Manual del carbón activo, (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA)

- *Activación química:*

El método de activación química se aplica sobre materiales orgánicos relativamente blandos y que están formados por moléculas de celulosa. Los autores (Padrón, Rodríguez, & Gómez, 2013), enuncian que para este método de activación el material se impregna con un agente químico y se calienta en hornos a altas temperaturas entre 500-700°C, allí, se reduce la formación de material volátil y alquitrans, lo que aumenta el rendimiento del carbón. Seguido a esto, el material se lava para eliminación de agente activante y el tamaño de partícula con el que se produce el carbón activado afecta el tamaño de los poros y sus características.

(E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA) Enuncian que, este proceso es desarrollado en una sola etapa a partir de un calentamiento en la atmósfera inerte con agentes activantes, donde las sustancias más usadas son: ácido fosfórico (H_3PO_4), Cloruro de cinc ($ZnCl_2$), ácido sulfúrico (H_2SO_4), y también son utilizados los sulfuros y tiocianatos de potasio, cloruros de calcio y magnesio, hidróxidos de metales alcalinos, entre otras sustancias.

Los autores, (Grisales Motato & Rojas Arrieta, 2016), explican en qué consisten tres de las sustancias utilizadas para la activación química, las cuales son:

- *Activación química con $ZnCl_2$* : esta activación es usada mayormente para residuos de madera, pero posee problemas medioambientales por su uso, por lo cual es un método restringido.
- *Activación química con H_2SO_4* : sustancia que reemplazó al $ZnCl_2$ y sus precursores en esta activación, como en: cascara de coco, hueso de aceituna, madera, etc.). La activación por medio de esta sustancia implica las siguientes etapas:
 - I. Molienda y clasificación del material de partida
 - II. Mezcladle precursor con H_2SO_4 (reciclado y fresco)
 - III. Tratamiento térmico en atmósfera inerte entre 100-200°C, manteniendo la temperatura aproximadamente 1h, continuando con un tratamiento de 400-500°C, mantenida en torno a 1h.
 - IV. Lavado, secado y clasificación del carbón activado y reciclado de H_2SO_4 . a proporción del H_2SO_4 más empleada suele ser 1:5 y el rendimiento suele ser del 50%.

- *Activación química con KOH*: se utilizó en los años 70 para producir carbones “superactivados”, con superficies específicas de orden de 3000 m²/g. Los precursores preferibles para la activación con KOH son aquellos de bajo contenido en volátiles y alto contenido en carbono, como los carbones minerales de alto rango, carbonizados, coque de petróleo, etc.

Para (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA), la figura 29 presenta el diagrama del proceso de activación química.

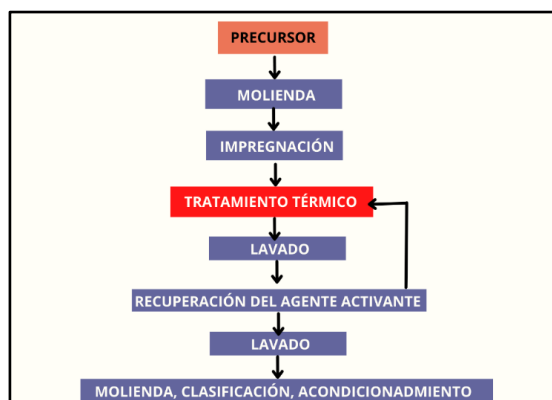


Figura 29. Diagrama de los diferentes procesos que puede tener lugar en la activación química

Fuente: Manual del carbón (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA)

6.2.2. Propiedades

El carbono activado (AC) a base de carbón, es el más empleado en la actualidad debido a su área superficial, estabilidad química superior, excelente conductividad y tienen una mayor resistencia mecánica que otros, así como a un costo relativamente bajo y buena accesibilidad. El carbón activado es un producto utilizado para remover color, olor y sabor de diversos productos, donde sus aplicaciones son sencillas y en sistemas industriales modernos. (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA).

La (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA), describe dos características fundamentales de las aplicaciones del carbón activado:

- *La elevada capacidad de eliminación de sustancias:* debido a que los carbones activados poseen una alta superficie interna, porosidad y distribución del tamaño de poros. Pues bien, los microporos tienen elevada superficie y capacidad de retención, y los mesoporos y macroporos } retienen moléculas de gran tamaño. Además, estos carbones se caracterizan por su alta capacidad de adsorción.
- *Baja selectividad de retención:* el carbón activado tiene deficiencia ante los procesos de retención, sin embargo, como es naturalmente apolar y por las fuerzas en la adsorción, retendrá las moléculas apolares y de alto volumen molecular, mientras que sustancias como nitrógeno, oxígeno y agua prácticamente no son retenidas por el carbón a temperatura ambiente.

Por otro lado, (Grisales Motato & Rojas Arrieta, 2016), afirman que las propiedades adsorbentes de los carbones activados no solo están determinados por su estructura porosa, sino también por su naturaleza química, pues esos materiales poseen pequeñas cantidades de heteroátomos tales como oxígeno, hidrógeno o nitrógeno, permitiendo que sustancias polares sean débilmente retenidas sobre la superficie del carbón activado ya que los átomos de carbono están ubicados en los bordes de los planos y presentan alta actividad pues no se encuentran saturados de átomos de carbono y poseen electrones libres. Estos sitios están normalmente unidos a heteroátomos dando lugar a grupos funcionales superficiales que puedan modificar sus propiedades adsorbentes. Además, por la alta área del plano de carbones activados presentan fuerte propensión a quimisorber oxígeno y este puede dissociarse de átomos que se relacionen con

el carbono para formar compuestos oxigenados. Este proceso de oxidación es importante cuando se trata al carbón activado con las altas temperaturas.

6.2.3. Aplicaciones del carbón activado

En el manual del carbón de (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA), expresa que el carbón activado tiene una variedad de aplicaciones en su estado de polvo y granulas en dos medios:

- *Medio liquido:* su aplicación está en la decoración de licores de azúcar, eliminación de olores, colores, sustancias, bacterias, aguas residuales y mejora de bebidas alcohólicas. Además, también es utilizado como medicamento en la desintoxicación de personas, purificación de plasma sanguíneo, separación de elementos metálicos, entre otros.

Según (Padrón, Rodríguez, & Gómez, 2013), en su monografía sobre el Carbón activado, un material absorbente, en la fase líquida el carbón se usa tanto granular como peletizado en algunos casos y dentro de sus aplicaciones se encuentra la remoción de las impurezas que causan olor, sabor y color en agua potable potabilizadores, refresqueras y purificadores. También, son útiles para la remoción de compuestos orgánicos y metales ligados a moléculas orgánicas, contaminaciones que intervienen en la cristalización y en el rendimiento de formación de cristales, y, a su vez, permite la recuperación de sustancias deseadas.

- *Medio gaseoso:* sus aplicaciones están en los almacenamientos y separación de gases, máscaras antigás, desodorizantes de productos alimenticios, protección antirradiactiva en plantas nucleares y amplias perspectivas en soportes catalíticos y como catalizador.

Por otra parte, el carbón pulverizado se aplica en medio líquido mientras el granulado puede ser aplicado en ambos medios.

En este caso, se utilizan los carbones activados de forma granular, pues así lo afirman (Padrón, Rodríguez, & Gómez, 2013), en donde, dentro de sus principales aplicaciones están en la remoción de olores, lugares públicos, de vapores ácidos, bases y compuestos, del etileno generado por frutas y otros vegetales almacenados, y de compuestos orgánicos en aire o gases de escape provenientes de desengrasado de metales y partes automotrices, entre otros.

Los autores (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA), recopilaron aplicaciones del carbón activo en donde se destacan las siguientes:

- *Carbón activo en tratamiento de aguas:*

Debido a que el carbón tiene dos propiedades que son útiles para el tratamiento de agua. Una de ellas es el atrapamiento de todo tipo de contaminantes orgánicos en sus paredes, y la otra propiedad es la capacidad de destruir el cloro libre residual que no ha reaccionado después de dicho compuesto. Por ello, el carbón activo elimina las concentraciones residuales de agentes oxidantes como cloro y ozono en el tratamiento de aguas adsorbiendo productos o catalizando su paso a formas reducidas inofensivas.

“Para el tratamiento de aguas, el carbón activado tiene dos formas principales: En polvo (CAP), material molido pulverizado, donde la mayoría de las partículas tienen un diámetro <0.18mm. Y, Granular (CAG), tiene forma irregular y un diámetro típico entre 0.2 y 1.5 mm.” (Sela, 2021)

- ✓ *Tratamiento con carbón activado granular (CAG):* se suelen emplear columnas para el contacto entre el agua residual con el carbón activado granular y un

esquema empleado en este tratamiento en la figura 30 (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA)



Figura 30. Esquema para el tratamiento de agua con carbón activado granular.

Fuente: Manual del carbón activo, (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA)

El proceso que se lleva a cabo inicia desde la parte superior con la introducción de del agua y se extrae por la parte inferior. El carbón está soportado por medio de un sistema de drenaje en la parte inferior. A su vez, es necesario un sistema de lavado contracorriente y para limpieza de superficie para limitar las pérdidas de cargas por la retención de material. Las columnas de lecho fijo se pueden usar individuales o conectadas en serie o paralelo, sin embargo, para solucionar el problema de obstrucción de la superficie se desarrolla sistemas de contacto de lecho expandido y de lecho móvil. (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA)

El sistema se basa en columnas de lecho móvil, el carbón ya utilizado se va sustituyendo por carbón nuevo de forma continua, y la pérdida de carga no aumenta una vez alcanzado el punto de funcionamiento. (ver figura 31).

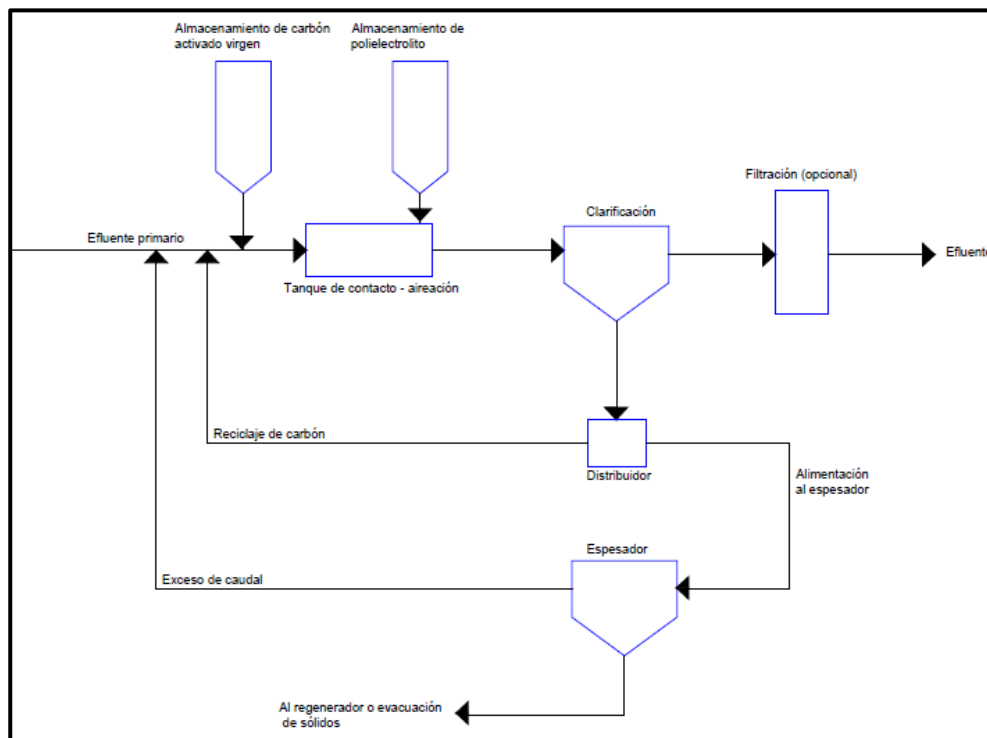


Figura 31. Sistema de lecho expandido.

Fuente: Manual del carbón activo, (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA)

- ✓ *Tratamiento con carbón activado en polvo (CAP):* este carbón activado en polvo se puede añadir en el efluente de procesos de tratamientos biológicos, directamente en las unidades de tratamiento o formado en procesos fisicoquímicos.

En la adición en el efluente el carbón se añade a un tanque de contacto, y después de un tiempo se deja la sedimentación hacia el fondo del tanque y se extrae del mismo. Sin embargo, el

carbón es muy fino y para favorecer la eliminación de las partículas se hace necesario el empleo de un coagulante o llevar un proceso rápido de filtración en arena. (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA).

- *El carbón activado en la potabilización de agua*

Debido a que el carbón activado es que lograr un estado de equilibrio donde la concentración de compuestos absorbibles en el agua llegue a niveles indetectables por los métodos de análisis comunes. (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA)

Para el control de los microorganismos en el agua se efectúan diversos métodos y entre ellos se encuentra la cloración en donde es utilizado el carbón activado para eliminar el cloro residual.

En las industrias donde se producen bebidas o alimentos, obtienen pozos de agua y someten un tratamiento como el que se presenta en la Figura 32.

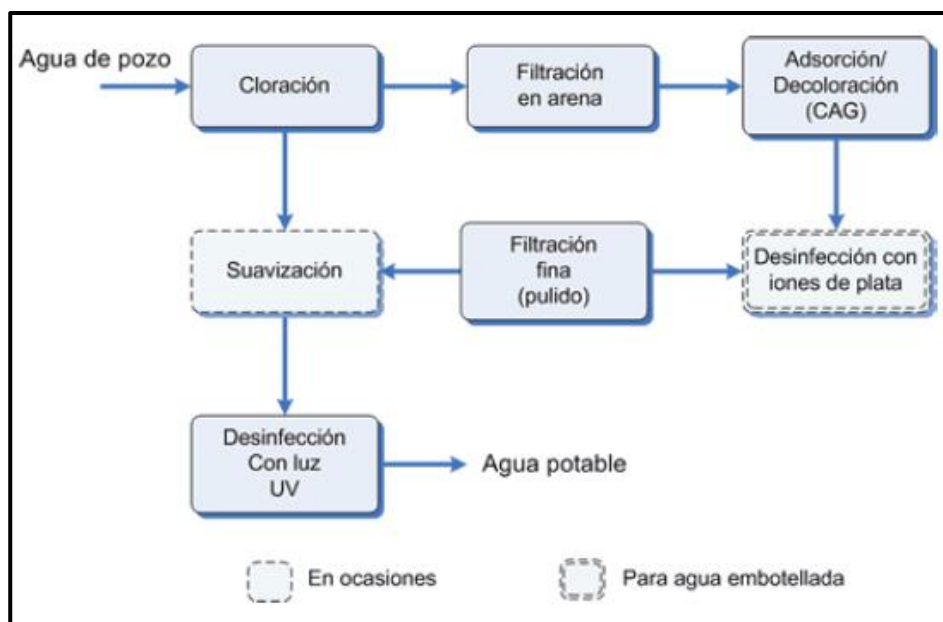


Figura 32. Tren de potabilización típico de una industria de bebidas que se abastece de un pozo.

Fuente: Manual del carbón activo, (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA)

En otro caso (ver figura 33), en municipios se abastecen por aguas superficiales y estas requieren tratamientos adicionales y la siguiente figura representa un proceso típico donde se utiliza carbón activo en forma granular.

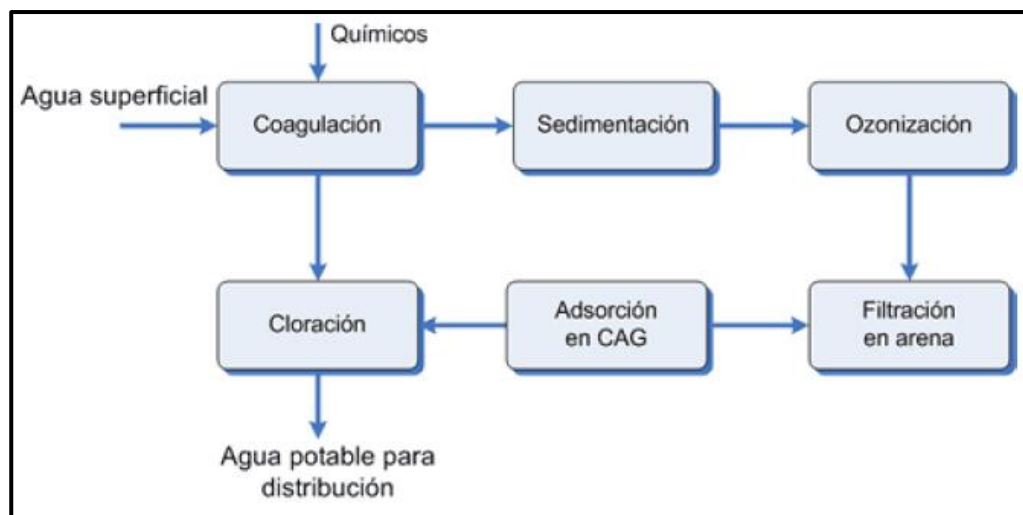


Figura 33. Ten de potabilización típico de una planta municipal que se abastece de un cuerpo de agua superficial.

Fuente: Manual del carbón activo, (E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA)

- *Carbón activo en el tratamiento de aguas residuales*

Debido a que el carbón activo es un método de tratamiento por sus propiedades de adsorción se emplea para la eliminación tanto de compuestos orgánicos refractarios como en concentraciones residuales de compuestos inorgánicos como nitrógenos, sulfuros y metales pesado.

Los autores (Gestión de Aguas y Residuos), anuncian que la característica de adsorción del carbón activo en su forma granular es empleado como tratamiento terciario en EDARs (Estación depuradora de aguas residuales) o en tratamientos fisicoquímicos de las aguas residuales, pues permite la adsorción de pequeñas cantidades de compuestos orgánicos solubles y compuestos inorgánicos como nitrógeno, sulfuros y metales pesados.

Para utilizar el carbón activo GAC se requiere conocer la cantidad y la calidad del agua residual a tratar, pues bien, es necesario conocer la concentración de sólidos en suspensión lo más uniforme posible, y considerar factores como pH y temperatura, los cuales influyen en solubilidad y propiedades de adsorción de los contaminantes sobre el carbón.

Además, encontramos las siguientes ventajas de la aplicación de GAC en la filtración de aguas residuales son (Gestión de Aguas y Residuos):

- ✓ Tecnología fiable para eliminar compuestos orgánicos disueltos.
- ✓ No se requieren grandes necesidades de espacio.
- ✓ La adsorción por GAC se incorpora a cualquier instalación de tratamiento de aguas.
- ✓ Menos exigentes que los biológicos.

El artículo realizado por (Rincón, y otros, 2015) , fue realizado un estudio para evaluar la efectividad de los carbones activados en la remoción de colorantes en las aguas residuales de una tintorería. Para ello, se tuvieron en cuenta los siguientes procedimientos:

- _ Construcción de curvas de calibración adsorción Vs. Concentración de colorante.
- _ Determinación de los efectos del tiempo de contacto con distintos colorantes en la industria en contacto con carbón activado en agitación constante.
- _ Realización de isotermas de adsorción variando la relación del carbón y las aguas residuales.

De lo anterior se logró concluir que los carbones de la empresa El Cerrejón es apto para producir carbón activado y este, posee características adecuadas para ser utilizado en filtros enfocados al tratamiento de aguas contaminadas y en este caso del sector textil. Además, la

producción de carbón activado posee alta factibilidad técnica de instalación de plantas comerciales para el tratamiento de dichas aguas.

6.3.Grafito

El grafito es una de las formas cristalinas alotrópicas del carbono, el cual tiene propiedades y estructura cristalina particular. Dentro de las características del grafito posee una densidad cristalográfica de 2.26 g/cm^3 , dependiendo de su pureza, el peso específico varía entre 2.20 y 2.30. Además, posee una dureza según la escala de Mohs de 1-2 (1= talco, 2=yeso), flexible, no elástico y séctil. Su densidad menor a la teórica es normalmente porosa. (SEGEMAR, UNSAM, 2011).

Existen dos tipos principales del grafito: Grafito natural y sintético.

6.3.1. Tipos del grafito

- *Grafito natural*

El grafito natural consiste en carbono grafítico el cual posee diverso grado de cristalinidad, alta conductividad térmica y eléctrica, estable en altas temperaturas, refractario y alto punto de fusión (3650°C). Este grafito posee las siguientes variedades:

_Microcristalino: conocido como grafito amorfo, aunque presenta cristalinidad, y se encuentran como partículas diminutas en capas asociadas al carbón, pizarra o lutita. Contiene entre 25% y 85% de carbono, dependiendo de las condiciones geológicas y tiene una apariencia terrosa, negra y suave. Este grafito no es adecuado para aplicaciones electroquímicas.

_Grafito en escamas (flake): posee un alto grado de metamorfismo y cristalización, se encuentra como laminas planas separadas y cristalizadas, finas, de aspecto

escamoso. El grafito contenido en el mineral varía entre 5 y 40% en peso. La pureza de carbono puede alcanzar el 99.5%.

_Grafito cristalino: se presenta en vetas y se interpreta su origen como derivado de la depositación directa a partir de una fuente fluida a alta temperatura de tipo pegmatítico.

_Grafito cónico: el grafito también puede adquirir diferentes morfologías, texturas y estructuras inusuales, diferenciables en distintas escalas (macroscópica y nanoescala). Esto se debe en gran parte a las distorsiones en las hojas de grafeno durante su crecimiento y la incorporación de varios defectos tales como dislocaciones y disclinaciones.

Del mismo modo, (Romero, Romero, & Romero, Tipos de grafito: propiedades de grafitos naturales y sintéticos, 2019), anuncian que los grafitos naturales se clasifican en tres formas: Grafito cristalino en escamas (compuesto de partículas discretas en forma de placas planas irregular y bordes angulosos y de este se obtiene el grafeno.), Grafito cristalino de veta (se acumula cristalizando en grandes depósitos o bolsas y su contenido de carbono es alto), y Grafito cristalino amorfo (está formado a partir de sedimentos ricos en hulla y tienen estructura cristalina.). Además, (Secretaría de Economía, 2018), reúne la clasificación del grafito en la Tabla 24.

Tabla 24. Clasificación del grafito

CRITALINO		AMORFO
ESCAMOSO	VETA	
<p>_ Se encuentra en forma de láminas planas de aspecto escamoso.</p> <p>_ Cada una de las láminas están separadas, cristalizadas en las rocas metamórficas como el mármol, gneis, esquisto, cuarzo, cuarcita con feldespato o mica.</p> <p>_Las láminas tienen un aspecto grasoso y sus dimensiones son variables.</p> <p>_De un depósito a otro se pueden encontrar variaciones en dureza, grosor, densidad y forma.</p> <p>_Los depósitos comerciales importantes se presentan en capas o lentes.</p>	<p>_Se localiza en forma de vetas hidrotermales o en forma de acumulaciones a lo largo de las superficies de contacto entre pegmatitas y calizas.</p> <p>_Comercialmente se separan de acuerdo con su tamaño.</p> <p>_Las vetas varían en dimensión desde unos cuantos milímetros a más de 2 metros.</p> <p>_Las impurezas que se presentan como granos en el grafito consisten en</p>	<p>_Se encuentra en forma de partículas microcristalinas más o menos uniformemente distribuidas en rocas metamórficas suaves como pizarras y filitas.</p> <p>_Esta variedad tiene una apariencia terrosa, negra y suave.</p> <p>_Esta variedad tiene unas apariencia terrosa, negra y suave.</p> <p>_El producto comercial contiene entre 50 y 94% de grafito.</p> <p>_Se han formado por metamorfismo.</p>

	feldespato, cuarzo, mica, zircón, rutilo y apatito.	
--	--	--

Fuente: (Secretaría de Economía, 2018)

Así mismo, (Secretaría de Economía, 2018), define las características más importantes del grafito natural se presenta en la Tabla 25.

Tabla 25. Características del grafito natural.

COMPONENTE	UNIDAD	ESCAMOSO	VETA	AMORFO
Carbono	%	90.0	96.7	81.0
Azufre	%	0.1	0.7	0.10
Densidad	g/cm ³	2.29	2.26	2.31
Contenido de grafito	%	99.9	100.0	28.00
Densidad de cenizas	g/cm ³	2.91	2.89	2.68
Resistencia	ohm-cm	0.031	0.029	0.091

Fuente: (Secretaría de Economía, 2018)

El proceso para la obtención del grafito natural se resume en la figura 34.

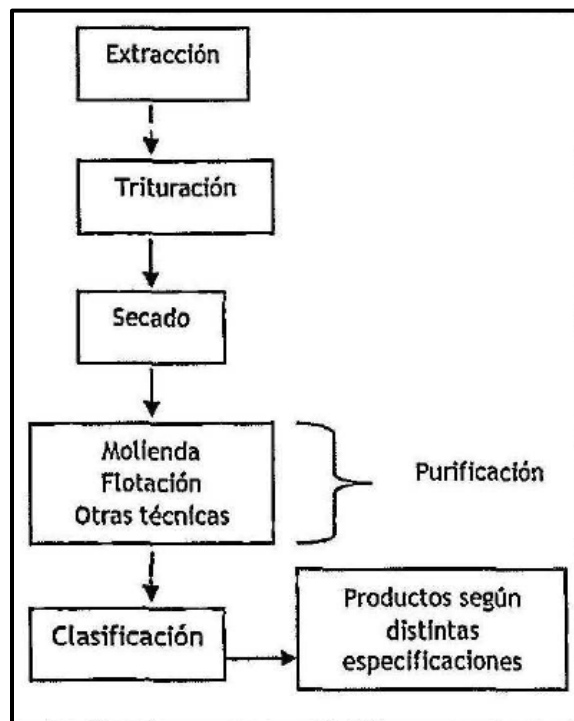


Figura 34. Proceso de obtención del grafito.

Fuente: (SEGEMAR, UNSAM, 2011)

(SEGEMAR, UNSAM, 2011), describen este procesamiento del grafito natural inicia con la extracción de este por medio de dos formas: Subterránea o a cielo abierto. Luego, este material se tritura llevando a cabo una trituración primaria en planta, así reducir su tamaño, y si es necesario realizar trituración secundaria o terciaria, y, puede ser realizada tanto en circuitos abiertos como cerrados.

Seguidamente, es realizado el secado del material con el objetivo de remover la humedad. Este se realiza por medio de secadores horizontales u hornos a 80-100 °C durante 24 horas. Luego, se purifica este material mediante procesos como: flotación, molienda en circuito cerrado, remolienda y otros tratamientos fisicoquímicos con el objeto de obtener grafito de alta pureza. Por último, se clasifica el producto y continua para su comercialización.

- *Grafito sintético:*

Este grafito sintético posee una alta pureza, pero no es tan cristalino como el grafito natural. Este grafito se obtiene por medio de grafitización, tratamiento térmico de carbono no grafitico o por depositación química de hidrocarburos a temperaturas superiores de 2100 K. (SEGEMAR, UNSAM, 2011).

Existen dos tipos de grafitos sintéticos según el método de elaboración:

- El electrográfico: consiste en el carbono puro producido por calcinación de coque de petróleo en un horno eléctrico.
- El grafito producido por calcinación por calentamiento de brea de petróleo calcinado de 2800°C.

El grafito sintético tiene una menor densidad, mayor porosidad y resistencia eléctrica.

(Romero, Romero, & Romero, Tipos de grafito: propiedades de grafitos naturales y sintéticos, 2019), expresan que el grafito sintético, así como se expresó anteriormente, es creado a partir de proceso de carbonización y grafitización, conllevando al tratamiento de materiales derivados al petróleo o carbón a más de 1000°C, y que sus propiedades son derivadas de factores como el tamaño de partícula de la mezcla y su compactación en los diversos procesos. Además, enuncian dos tipos de grafito sintético:

- *Grafito isotrópico:* generado por la mezcla del coque y aglomerantes a bajas temperaturas en donde se funden, prensan, carbonizan y grafitizan.
- *Grafito pirolítico:* obtenido por depósitos de carbono a temperaturas superiores a 1800°C o por tratamiento térmico de grafitización.

Además, los autores (Romero, Romero, & Romero, Tipos de grafito: propiedades de grafitos naturales y sintéticos, 2019), expresan que algunos usos de este grafito sintético son como aditivos de metalurgia, tubos de inyección, baterías recargables y alcalinas, lubricantes y polímeros, electros para fundición, gaskets y empaque.

La Dirección General de Desarrollo Minero en su documento de la (Secretaría de Economía, 2018), expresa que el grafito sintético se puede clasificar en:

- *Grafito sintético primario*: producido esencialmente por carbono a partir del coque de petróleo calcinado.
- *Grafito sintético secundario*: suele ser polvo y desecho, producido en forma similar a partir de rellenos carbonos y materiales aglomerantes.

Para la (Secretaría de Economía, 2018), las características del grafito sintético están compuesta por los componentes de la Tabla 26.

Tabla 26. Característica del grafito sintético

COMPONENTE	UNIDAD	PRIMARIO	SECUNDARIO	HOJUELAS
Carbono	%	99.9	99.0	97.0
Azufre	%	0.00	0.01	0.07
Densidad	g/cm ³	2.25	2.24	2.24
Contenido de grafito	%	99.9	92.3	95.0
Densidad de cenizas	g/cm ³	2.65	2.68	4.68
Resistencia	ohm-cm	0.035	0.042	0.024

Fuente: (Secretaría de Economía, 2018)

El proceso de fabricación del grafito sintético es definido por (GAB Neumann, s.f.) donde incluye pasos como: preparación del polvo, moldeado de la forma, horneado, impregnado o densificación del revestimiento, volver a hornear y finalmente, la grafitización. Además, se describe mediante el diagrama de la figura 35.

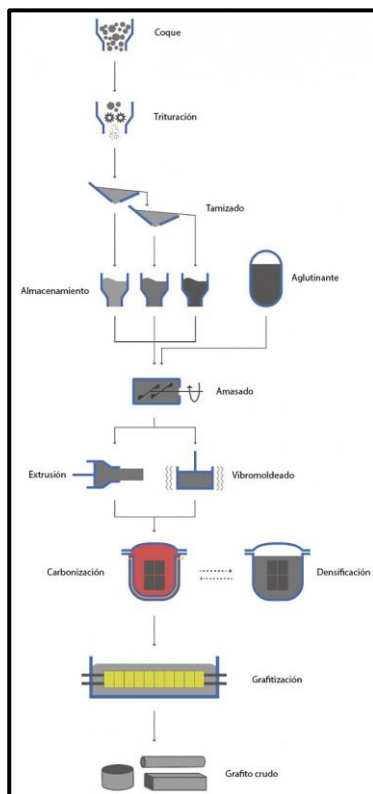


Figura 35. Proceso de fabricación del grafito sintético.

Fuente: (GAB Neumann, s.f.)

Los pasos del proceso de fabricación del grafito se definen así por (GAB Neumann, s.f.):

1. *Preparación de polvo y pasta:* las materias primas para la fabricación de grafito sintético pueden ser: coque de petróleo, coque de brea, carbón negro, grafito natural y desecho secundario de grafito. Inicialmente, estas materias son trituradas en molinos trituradores y molinos de bola. Su restante se acondiciona según la distribución del tamaño de partículas y, por último, el polvo es mezclado con un

aglutinante para producir una pasta, entre los aglutinantes se utilizan brea de carbón o de petróleo.

2. *Moldeado de forma:* el resultado que da como una mezcla pastosa compacta y su moldeado de forma se realiza mediante:

_Extrusión: consiste en forzar la mezcla pastosa a través de un troquel con una abertura dando como resultado un producto largo como las varillas, barras, placas largas o tuberías de sección transversal regular.

_Vibromoldeo: método discontinuo que se utiliza para productos de altas dimensiones, en donde, se llena un molde con la mezcla pastosa y una placa de metal pesado se coloca en la parte superior, luego se compacta por vibración del molde y los cuerpos formados se tiene un mayor grado de isotropía comparado con materiales extruidos.

_Prensado isostático en frío: compactación de polvo llevado a cabo a temperatura ambiente aplicando presión de múltiples direcciones a través de un medio líquido que rodea la parte compactada. Para ello, se utiliza un molde flexible y los materiales con estructura anisotrópica uniforme son preparadas por método prensado isostático.

3. *Cocción:* las piezas compactadas son tratadas con calor en un horno a temperaturas entre 900 y 1200 °C (1650°C y 2200°F) en ausencia de aire. En la cocción se produce la carbonización, resultante de la descomposición térmica de aglutinante en componentes volátiles y carbono elemental.

4. *Impregnado de revestimiento:* las piezas de carbono pueden ser impregnadas con brea y volver al horno para reducir su porosidad. Este impregnado se realiza con un revestimiento con menor viscosidad que el aglutinante original, es necesario una baja viscosidad, así afectar el llenado más completo de espacios vacíos.
5. *Grafitización:* El resultado de las piezas en los procesos anteriores se tratan con calor por exclusión de oxígeno a temperaturas entre 2700 a 3000° C (4900 a 5450°F). Con la influencia de la temperatura, los cristales crecen y se reorganizan en un patrón ordenado de planos paralelos apilados y genera cambios en las propiedades físicas. Además, durante este tratamiento se purifica el grafito, pues la mayoría de sus impurezas se vaporizan.

6.3.2. Propiedades del grafito

Las propiedades físicas del grafito según (GEOLOGYSCIENCE, s.f.) están dispuesto en la Tabla 27.

Tabla 27. Propiedades físicas del grafito.

COLOR	Gris acero a negro
RACHA	Negro
LUSTRE	Metálico, a veces terroso
CLAVIJA	Perfecto en una dirección
DIAFINIDAD	Opaco
DUREZA DE MOHS	1 a 2
SISTEMA DE CRISTAL	Hexagonal
TENACIDAD	Flexible

DENSIDAD	2,09 – 2,23 g/cm ³ (medido) 2,26 g/cm ³ (calculado)
FRACTURA	Micáceo

Fuente: GEOLOGYSCIENCE,s.f.

Además, mencionan las propiedades ópticas del grafito en la tabla 28.

Tabla 28.. Propiedades ópticas del grafito.

ANISOTROPISMO	Extremo
COLOR/PLEOCROÍSMO	Fuerte
SEÑAL ÓPTICA	Uniaxial (-)
BIRREGRINGENCIA	Birrefringencia extrema

Fuente: GEOLOGYSCIENCE,s.f.

Otras propiedades importantes según la (Secretaría de Economía, 2018) las propiedades del grafito se demuestran en la tabla 29.

Tabla 29. Propiedades del grafito.

PROPIEDAD	CARACTERÍSTICAS
Temperatura de fusión	Tiene dos puntos triples (punto en que coexisten en equilibrio tres fases) - 3.550°C bajo una presión de 88 kg/cm ²

	- 3.726°C a las 100000 atmósferas de presión.
Sublimación	Entre 3.300 ° y 3.550 °C a una presión de 1.033 kg/cm ²
Oxidación térmica	En presencia de oxígeno comienza a 300 °C.
Combustión	A 620 °C y 670 °C es combustible en presencia de oxígeno.

Fuente: Secretaría de Economía (2018)

6.3.3. Principales usos

Los autores de (Secretaría de Economía, 2018) exponen diversos usos de ambos tipos de grafitos, los cuales son:

Grafito natural:

- Refractarios: para la producción de ladrillos de magnesio-grafito, necesitan grafitos de alta calidad (90-99% C) en granos gruesos, con buena resistencia a la oxidación y alta resistencia a la corrosión, los cuales se usan en hornos de arco eléctrico. (Secretaría de Economía, 2018)
- Revestimiento: es utilizado como recubrimiento de tubos de televisión, de fundición del hierro, fundición del acero y de sustancias explosivas. También, el grafito mezclado con arcillas es aplicado como delgado revestimiento para limpiar y liberar el molde de los vaciados metálicos y n recubrimiento para frenos y clutch. (Secretaría de Economía, 2018)
- Material eléctrico: debido a que el grafito posee alta calidad de auto lubricación, es usado en la fabricación de conductores en motores eléctricos y

otros equipos eléctricos para aviones y submarinos, también, para elaboración de cepillos de carbón para motores eléctricos y electrodos.

- Generación de electricidad: utilizado en la fabricación de baterías secas. El grafito se adhiere al dióxido de manganeso para dar una mejor conductividad y funciona como material adsorbente.
- Productos químicos: para los empaques especiales, fabricación de caucho, explosivos y pulimentos, fibras y municiones.
- Automotriz: en la sinterización se mezcla grafito de alta pureza con polvos de metal para obtener fórmulas específicas usadas en la industria automotriz.
- Pinturas: como componente en la elaboración de pinturas y pigmentos, y de pinturas para proteger superficies metálicas y antiestáticas de suelos.
- Lubricantes: como lubricante ya que se adhiere a la superficie metálica rellenando los poros.
- Puntillas para lápices: el grafito se utiliza para la elaboración de puntillas para lápices.

Grafito sintético:

- Electrodos: en la producción de acero y hornos de arco eléctrico, en el proceso de aluminio, hornos de carburo, hornos de reducción para fósforo y sílice.
- Producción de acero: para aumentar contenido de carbón en el acero.
- Fundición: vaciado, sinterización, lingoteo, moldes de hierro fundido y crisoles.

- Industria química: en la manufactura de plantas químicas y para moderador de los neutrones con el fin de reducir la acción de los neutrones del uranio reactores nucleares.
- Industria aeroespacial: toberas de cohetes, narices cónicas, aspas de control, tubos explosión y como aislante térmico.
- Fibra de grafito: en la manufactura de raquetas, cañas de pescar, poste para salto de garrocha y esquís.

Así mismo, los autores de (SEGEMAR, UNSAM, 2011), expresan que el grafito posee características conductoras de calor y electricidad, rangos amplios de temperaturas, material altamente refractario, compresible y maleable, resistente al choque térmico, resistente al ataque químico y poco abrasivo. Por lo tanto, gracias a sus características físicas y químicas, grafito natural como el grafito artificial tienen amplios rangos de aplicaciones, mayormente en la industria de la metalúrgica como en fabricación de crisoles, moldes, ladrillos refractarios, entre otros. Los diferentes usos del grafito según los autores mencionados se resumen en la Tabla 30, donde se tiene en cuenta la característica específica del grafito, su promedio en contenido de carbono (%C) y el tamaño promedio de la escama.

Tabla 30. Aplicaciones del grafito y sus propiedades.

APLICACIÓN	PROMEDIO DE CONTENIDO DE C (%)	TAMAÑO PROMEDIO DE ESCAMA	CARACTERISTICAS
Fundición			
Lavado de moldes y núcleos	80-90	Malla 200	Escamoso
Lavado de moldes y núcleos	70-80	Malla 200	Amorfo
Revestimiento de fundición	40-70	53-75 μm	Amorfo, bajo en sulfuros y minerales fácilmente fusibles. Contiene cuarzo y mica

Refractarios			
Crisoles, moldes, ollas	85-95	+150 μm	Grandes escamas, típicamente 75%, +600 μm , 75% +400 μm o 75% +300 μm . Bajo en hierro, mica y material carbonoso
Ladrillos refractarios	70-80	-200mm y malla -600	Amorfo
Ladrillos refractarios	90-97	+180 a +150 μm	Escamoso. Tiende a tamaños más finos, mayor contenido de C
Ladrillos Mg-C	85-90	+1500-710 μm	Escamoso. De preferencia <2% de cenizas
Refractarios Al-grafito	Min 85	-600 a 150 μm	Escamoso
Otros usos			
Recubrimiento de frenos	Min 98	-75 μm	Comúnmente mezclas de natural (60%) y sintético (40%). Bajo en minerales abrasivos (cuarzo y feldespato)
Baterías, celda seca	Min 88	85%-75 μm	Natural o sintético, no contener conductores (Cu, Co, Ni Sb y As) De preferencia < 0,5 de S
Baterías alcalinas	Min 98	-75 a 5 μm	
Cepillos de carbón	95-99	-50 μm	Escamoso 99% de C (<1% de sílice y ceniza)
Recubrimientos conductivos	50-55		Amorfo. Puede contener 20-25 % de sílice, bajo en pirita y mica.
Explosivos		-150 μm	Sin sulfuros ni humedad
Grafito expandible	Min 90	-2mm a +250 μm	
Hojas de grafito	Min 90		Bajo en sodio y cloruros lixiviables
Lubricantes	98-99	106 a 53 μm	Amorfo o escamoso. Bajo o libre de minerales abrasivos (cuarzo y feldespato) y sulfuros de metales
Lápices	80-82	Extremadamente fino	Amorfo o escamoso

Fuente: (SEGEMAR, UNSAM, 2011)

Además, en un artículo sobre el Grafito, aplicaciones artificiales” (Kirk-Othmer, 2000), enuncian que el grafito posee excepcionales características en resistencia y estabilidad térmica a altas temperaturas, dando como beneficio su aplicación en industria aeroespacial y nuclear. Del mismo modo, es un material que logra ser modificado en sus propiedades, permitiendo adaptarlo para cumplir diversos criterios en diseños. Es por ello, que los autores detallan las siguientes aplicaciones:

1. Aplicaciones aeroespaciales y de reactores nucleares: debido a las características de resistencia y estabilidad térmica a las altas temperaturas, y su adaptabilidad a cumplir criterios, este material tiene la capacidad de sobrevivir a ambientes duros.

- *Industria aeroespacial:* las aplicaciones del grafito se incluyen en los componentes de toberas de cohetes, conos de ojiva, carcasas de motores, paletas de control, tubos de chorro, conos de salida, aislamiento térmico y cualquier otra aplicación que requiere un rápido aumento de temperatura.
- *Aplicaciones nucleares:* el grafito es adecuado para moderadores, reflectores nucleares, materiales de construcción y columnas térmicas en diversos reactores. La estabilidad térmica, la resistencia a la corrosión y la alta conductividad térmica del grafito lo convierten en el material moderador más adecuado para ser considerado en reactores nucleares de diseño avanzado, de alta temperatura y de energía atómica eficiente.

2. Aplicaciones químicas: El carbono y el grafito presentan una excelente resistencia a la acción corrosiva de los ácidos, los álcalis y los compuestos orgánicos e inorgánicos. Además, el grafito es utilizado en procesos de siderurgia, alimentación, petróleo, farmacéutica y de acabado

de metales. La alta conductividad y estabilidad térmica lo hacen útil en intercambiadores de calor y refrigeradores de gas.

- *Estructuras autoportantes:* las torres de grafito refrigeradas por agua sirven como cámaras para la combustión de fósforo en el aire, igualmente, permite una rápida transferencia de calor a una película de agua exterior, manteniendo las temperaturas interiores. El grafito es capaz de contener reacciones a temperaturas elevadas, necesarias en los recipientes autoportantes.
- *Grafito impermeable:* los poros del grafito o material de carbono junto a resinas termoestables permiten la retención de fluidos bajo presión, conservando sus propiedades físicas, así mismo en impregnación al vacío.
- *Grafito de baja permeabilidad:* los fabricantes de grafito han desarrollado materiales de grafito de baja permeabilidad en los que la permeabilidad se reduce mediante la deposición de carbono y grafito en los poros del material base. Este material no está limitado en su temperatura de funcionamiento, excepto en condiciones de oxidación y se utiliza para fabricar eyectores de intercambiadores de alta temperatura, celdas de sal fundida, sistemas de tuberías de sal fundida y calentadores de resistencia eléctrica. y calentadores de resistencia eléctrica.

- *Grafito poroso:* una combinación controlada de alta permeabilidad y porosidad caracteriza a estos materiales, donde existen varios grafos de porosidad de baja densidad.

3. Aplicaciones mecánicas: el carbono-grafito posee lubricidad, resistencia, estabilidad dimensional, estabilidad térmica y facilidad de mecanizado, una combinación de propiedades capaces de soportar cargas rotativas o deslizantes en contacto. Sus principales usos están en los cojinetes, juntas y paletas, incluyendo juntas frontales, anulares y circunferenciales para gases y fluidos corrosivos.

4. Aplicaciones de los electrodos: el mayor uso del carbono y grafito está en electrodos en arco eléctrico, y su uso está limitado a hornos de arco abierto en la producción de acero.

- *Electrodos de grafito:* el mayor uso de los electrodos de grafito es en la fabricación de acero, y estos electrodos se producen en dos amplias clasificaciones: grado regular y grado premium. El electrodo de calidad superior se utiliza cuando se requiere un rendimiento muy alto, como en los hornos de arco de potencia ultra alta.
- *Aplicaciones de los ánodos:* el grafito se ha utilizado como material principal para electrólisis de salmueras (acuosas) y electrolitos de sal fundida, tanto como ánodo como cátodo. Las propiedades del grafito que favorecen el éxito de su aplicación electrolítica son, entre otras, su alta conductividad eléctrica alto grado de insolubilidad y funcionamiento a baja tensión, alta pureza, bajo coste inicial, fácil de mecanizar y pocas limitaciones en cuanto a tamaño y forma.

- *Protección catódica:* los ánodos de grafito se pueden usar en la protección catódica y son usadas en la protección por corriente impresa y se induce una corriente en el circuito en sentido contrario a la corriente galvánica.

5.Aplicaciones metalúrgicas: se utilizan ampliamente en diversas formas en el procesamiento a alta temperatura de metales, cerámica, vidrio y cuarzo fundido.

- *Formas estructurales de grafito:* se utiliza el grafito manufacturado porque no se funde ni se fusiona con muchos metales o cerámicas comunes, presenta una resistencia creciente con la temperatura tiene una alta resistencia al choque térmico, no se deforma, tiene una baja expansión y posee una alta conductividad térmica.
- *Elementos calefactores eléctricos:* Las formas de grafito mecanizadas se utilizan ampliamente como susceptores y elementos de resistencia para producir temperaturas. Las ventajas del grafito en este tipo de aplicaciones incluyen su muy baja presión de vapor (inferior a la del molibdeno), su alta emisividad del cuerpo negro, su alta resistencia a los choques térmicos, y aumento de la resistencia a temperaturas elevadas sin aumento de la fragilidad.
- *Polvo y partículas de carbono y grafito:* Las aplicaciones de estos materiales incluyen revestimientos para moldes de fundición y lingotes de acero; aditivos para el hierro fundido para controlar el nivel de carbono y las características de enfriamiento; material de recubrimiento para metales no ferrosos fundidos y baños de sal para evitar la oxidación; aditivos para materiales sinterizados

materiales sinterizados para controlar el nivel de carbono y las características de fricción; adiciones en rodamientos con aceite, con grasa y sin aceite.

6.Aplicaciones refractarias: aplicaciones especialmente en la relación con la producción del hierro, aluminio y ferroaleaciones.

- *Carbono como refractario de alto horno:* las características que hacen que los materiales carbonosos y grafiticos sean ideales para altos hornos son: no se ablandan ni pierden resistencia a alta temperatura, resisten el ataque de escoria fundida y del hierro, su conductividad térmica es relativamente alta, poseen excelente resistencia al choque, coeficiente de expansión termina positivo, y proporciona estabilidad dimensional.
- *Refractarios para cúpulas:* Si se instalan y enfrían correctamente los revestimientos de carbono duran muchos meses o incluso años de funcionamiento intermitente. Su resistencia al hierro fundido y a las escorias ácidas y básicas proporciona no sólo un seguro contra las roturas, sino también flexibilidad operativa para producir diferentes grados de hierro sin necesidad de cambiar los refractario.
- *Refractarios para hornos eléctricos de reducción:* Los revestimientos de carbón se utilizan en los hornos de reducción eléctrica de arco sumergido que producen fósforo, carburo de calcio, todos los grados de ferro silicio, ferrocromo de alto contenido en carbono y ferro molibdeno.

- *Refractarios en la industria del aluminio*: El uso de bloques de cátodos precocidos de grafito es un equilibrio entre el rendimiento, la potencia, la vida útil y la economía dentro de la célula. El carbono basado en el carbón sigue siendo la composición predominante de los bloques catódicos.

6.4. Nanofibras

“Las nanofibras de carbono son un tipo de material sintético de carbono nanoestructurado, de naturaleza similar al grafito, con ventajosas propiedades para diversos campos de aplicación como la catálisis o los materiales compuestos.” (Sebastián del Río, 2011)

Del mismo modo el autor (Sebastián del Río, 2011), define las Nanofibras son materiales filamentosos compuesto de carbono de naturaleza gráfica, cuyas láminas forman fibras de diámetros entre 3 y 100 nm y longitudes entre varios cientos de nanómetros y micras. También, éstas, combinan una serie de características, derivadas de su estructura y composición difícil de encontrar en otros materiales. Además, según la disposición de los planos grafénicos respecto al eje de crecimiento se clasifica en tres tipos: *platelet* o perpendiculares, *fishbone* o inclinadas y *parallel* o paralelas (ver figura 36).

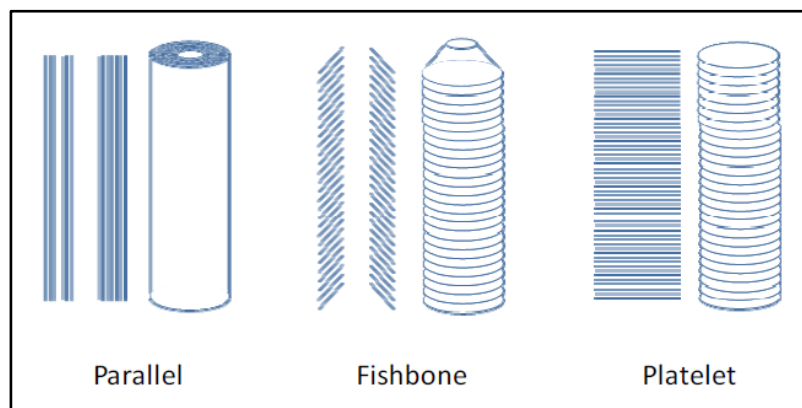


Figura 36. Tipos de nanofibras según la disposición de los planos grafénicos respecto al eje de crecimiento.

Fuente: (Sebastián del Río, 2011)

Incluso, (Juanico Lorán, 2004), explica que las Nanofibras de Carbono son designadas como nanofilamentos de carbonos o nanofibras gráficas, en donde los átomos de carbono se agrupan en estructuras filiformes con diámetros que varían con separación de planos de grafitos. Estas nanoestructuras son generadas comúnmente por medios catalíticos, son parecidas a los nanotubos de carbonos de múltiples paredes, pero las nanofibras tienen una disposición diferente de los planos de grafeno, poseen diversas morfologías que se diferencian por sus secciones transversales, su diámetro y su longitud, donde la orientación preferencial de los planos de grafenos es paralela al eje de cualquier tipo de nanofibra, lo cual explica la alta resistencia mecánica y su alto módulo de Young.

6.4.1. Propiedades de las nanofibras de carbono

Dentro de las propiedades de las nanofibras definidas por (Juanico Lorán, 2004), es el gran número de bordes que presentan éstas, y que se constituyen como sitios para la interacción química o física como la adsorción y altas áreas superficiales activas. Así mismo, su buena resistencia-peso y su flexibilidad haciéndolos un material ideal en la fabricación de materiales compuestos. Además, se ha demostrado que las nanofibras son capaces de adsorber y almacenar grandes cantidades de hidrógeno a temperatura ambiente, así como lo demuestra la Tabla 31.

Tabla 31. Comparativo de adsorción entre nanofibras y fibras comunes de carbono

<i>Material (Nanoestructura)</i>	<i>Máximo % en peso de H₂ (wt %)</i>	<i>Temperatura (K)</i>	<i>Presión (Mpa)</i>
SWCNT de baja pureza	05-oct	133	0,04
SWCNT de alta pureza	Casi 4	300	0,04
CNF's Tubular	11,26	298	11,35
CNF's Herringbone	67,55	298	11,35
CNF's Platelet	53,68	298	11,35
Grafito	4,52	298	11,35
Otras fibras de carbono	0,4	298-773	0,101

Fuente: Juanico Lorán (2004)

Para, (Sebastián del Río, 2011), las propiedades de las nanofibras se basan en las de los monofilamentos de carbono y se clasifican según sus estructuras:

- *Estructura primaria:* se menciona la nanofibras como ente único con estructura cristalina del carbono, estructura superficial, grado de ordenamiento del carbono y morfología en cuanto a fibras, tubos, etc.
- *Estructura secundaria:* refiriéndose como aglomerados de nanofibras de carbono formando granos, donde propiedades del área superficial, volumen, tamaño y distribución de los poros.
- *Estructura terciaria:* propiedades que presenta el material conformado por agrupaciones de granos y se habla de propiedades eléctricas, térmicas, mecánicas, etc.

Del mismo modo, (Sebastián del Río, 2011), explica que las propiedades de las nanofibras dependen de las características del proceso por el cual son obtenidos estos, por ejemplo, al obtenerse nanofibras de carbono a partir de catalizadores se observan estructuras tubulares, macizas y carbono en forma de encapsulamientos, determinadas por la conformación adoptada por el catalizador durante la deposición del carbono. Además, se afirma en este documento que la composición del catalizador, la temperatura de reacción y la composición del gas portador de carbono influye sobre características como el diámetro, estructura cristalina, densidad y propiedades mecánicas y eléctricas. Sin embargo, la conductividad eléctrica es elevada y su uso es amplio como en materiales compuestos, sensores de gas, sorbentes o catálisis, no se ve evidencias claves de su dependencia en otros procesos.

6.4.2. Síntesis de nanofibras de carbono

Según (Sebastián del Río, 2011), en la producción de nanofibras se destaca la descomposición catalítica de hidrocarburos, donde su ventaja es la obtención de materiales carbonosos nanoestructurados y la alta flexibilidad que ofrece para el adecuamiento de propiedades físicas y químicas del material resultante y es el método más prometedor para obtener grandes cantidades de material, y gracias a una variedad de propuestas sobre el crecimiento de las nanofibras se puede definir una sucesión de etapas:

- *Primera etapa:* las moléculas de hidrocarburos se adsorben y descomponen en la superficie metálica libre del catalizador, generando rompimiento en los enlaces de carbono-hidrógeno y carbono-carbono. Allí, los átomos libres de hidrógeno se combinan y desorben como hidrógeno molecular.
- *Segunda etapa:* los átomos de carbono se disuelven y difunden a través de la partícula metálica, y existe un aporte de difusión desde la cara del lado del gas.
- *Tercera etapa:* el carbono se precipita en forma de láminas grafénicas y forman un ángulo con el eje.

En la figura 37 se representa un esquema sobre el crecimiento de las nanofibras mediante descomposición catalítica sobre un catalizador metálico.

Los catalizadores que se comportan mejor en este tipo de procedimientos son los metales de transición capaces de formar carburos metaestables (Ni, Fe y Co), frente a aquellos que forman carburos muy estables (Mo) o aquellos que no forman carburos (Pt, Pd, Rh). (Sebastián del Río, 2011)

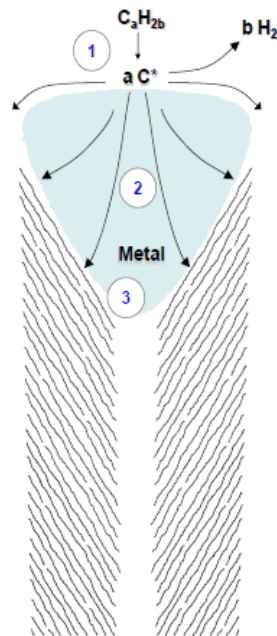


Figura 37. Representación esquemática del crecimiento de Nanofibras mediante descomposición catalítica sobre un catalizador metálico.

Fuente: Sebastián del Río, 2011

Además, el autor (Juanico Lorán, 2004), define una serie de técnicas para la síntesis y producción de las nanofibras de carbón en donde se producen en cantidades mayores y a escala continua y en su mayoría se realizan en forma catalítica y en el vacío en donde se involucran gases. También, para producir las nanofibras se hace necesario una fuente de carbono elemental como el grafito, CO o hidrocarburos de la forma con alto contenido de carbono y a los cuales se puede desprender el mismo, transferencia de energía, y una atmosfera inerte con la que proporciona He o el Ar. Dentro de las técnicas para esta síntesis mencionan:

- I. *Ablación láser*: también llamada vaporización láser, un blanco consistente de una mezcla de grafito con una pequeña cantidad de partículas de metales de transición (catalizadores) es colocado en el extremo de un tubo de cuarzo encerrado en un horno bajo una atmosfera inerte, el blanco es expuesto a un haz de láser argón, el

haz vaporiza el grafito y produce nucleación en la onda de choque justo en frente de blanco. (Juanico Lorán, 2004). Esta técnica se puede visualizar en la Figura 38.

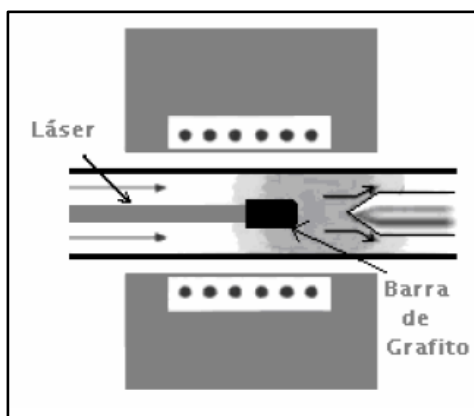


Figura 38. Parte central de un reactor de vaporización láser.

Fuente: Juanico Lorán (2004)

- II. *Deposición química en fase vapor (CVD)*: la Chemical Vapor Deposition, es designada como descomposición química de hidrocarburos en fase vapor, utilizada en circuitos integrados de silicio para crecer películas metálicas, semiconductoras y dieléctricas. Por lo regular se basa en la generación termina de radicales activos desde un gas precursor, el cual conduce a la deposición de la película elemental o compuesta sobre un sustrato. Este método proporciona nanofibras en gran cantidad, buena calidad y se puede hacer un aumento de escala fácilmente y se logran sintetizar nanofibras por descomposición de alcohol a presión atmosférica. El crecimiento dado por la Deposición química en fase vapor puede tomar lugar en el vacío o a presión atmosférica y según el tamaño del catalizador las propiedades como el diámetro, la velocidad de crecimiento y la densidad de nanofibras alineadas verticalmente varían (Juanico Lorán, 2004).

En otras palabras, esta técnica consiste en colocar un sustrato dentro de un horno a temperaturas aproximadas de 600°C y se introduce lentamente un gas con carbono

que se recombina en el sustrato y forma nanofibras, así como se demuestra la Figura 39.

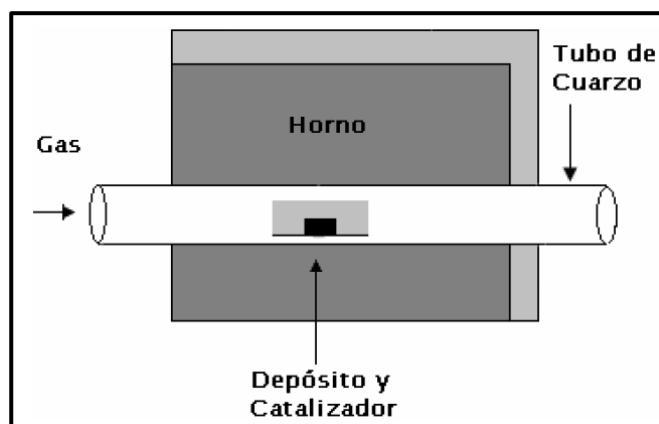


Figura 39. Generación de nanofibras de carbono por deposición química en fase vapor.

Fuente: Juanico Lorán (2004)

- III. *Plasma con Radio-frecuencia (r.f. CVD)*: en esta técnica la energía termina proporciona un plasma para descomponer el metano sobre el catalizador (Ni) provocando la formación de eutéctico Ni-C como un sitio de nucleación para la nanofibras, con ello el carbono se difunde a través de la superficie. (Juanico Lorán, 2004)
- IV. *Síntesis por Flama*: se utiliza una flama para la sinterización de las nanofibras, la cual es producida por una mezcla de aire-etileno sobre un sustrato de arco produciendo microfibras y nanofibras de varios diámetros. Esta técnica requiere una serie de condiciones de operación como lo es la alta energía, la adición de hidrocarburos y altas temperaturas para la síntesis. Además, se logran producir a gran escala las nanofibras, en donde se pueden utilizar catalizadores en aerosol o soportados, y la flama, puede ser economizada ya que una porción del gas de combustible se quema para elevar la temperatura mientras que el resto sirve como el reactivo de crecimiento. (Juanico Lorán, 2004)

- V. *Catálisis flotante*: este método tiene por objetivo la producción de forma continua, en un único proceso continuo, los nanofilamentos catalíticos introduciendo en el reactor sus reactivos. Por ello, todas las etapas de este método se realizan en un único reactor, y están compuestas por: preparación del catalizador, generación de nanopartículas de metal elemental, crecimiento de nanofilamentos y engrosamiento. Como fuente principal es utilizado el Fe y en especial, organometálicos como fuente de catalizador para que la generación de nanopartículas metálicas activas sea más factible. (Juanico Lorán, 2004)
- VI. *Proceso por conversión de Monóxido de Carbono a alta presión*: el catalizador es generado in situ por descomposición térmica de hierro pentacarbonil. En esta descomposición se incluyen clusters en fase gas que actúan como núcleos para el crecimiento de nanotubos de carbono en unipared usando CO, también, son utilizadas altas presiones entre 10-50 atm y temperaturas de 800-1200°C, su velocidad de producción está alrededor de 0.05 g/h favoreciendo la producción a escala. (Juanico Lorán, 2004)
- VII. *Arco eléctrico*: en este proceso se involucra el acercamiento de dos electrodos de grafito para llevar a cabo una descarga de corriente directa en una atmosfera de gas inerte como el argón o el helio. Este arco, vaporiza una mezcla de grafito en polvo con metal de transición como el Fe, Co, o Ni (o combinación de metales como Ni-Y). La mezcla está colocada en un hueco en la punta de uno de los electrodos (ánodo). A su vez, el gas inerte fluye a una presión entre 50-60 torr y las condiciones nominales incluyen una temperatura de 2000-3000°C, una corriente de 100 Ampers y 20 volts. Este método proporciona alta pureza, pero poca cantidad, y, para

producir una mayor cantidad de nanofibras es necesario que haya uniformidad en el arco del plasma y en la temperatura. (Juanico Lorán, 2004)

VIII. *Método de síntesis por Arco-Glow en un plasma generado por descarga de ac en alta frecuencia:* las fibras de carbono se obtienen por síntesis en una descarga de arco Glow de corriente alterna a alta frecuencia (42 KHz) en una atmosfera inerte de gas helio en un reactor, usando un flujo de metano como gas precursor, los electrodos de descarga son de grafito y uno de ellos contiene una mezcla de 34% atómico de Níquel como catalizador. 10.32% atómico de Itrio y el porcentaje restante de grafito. (Juanico Lorán, 2004) (ver figura 40).

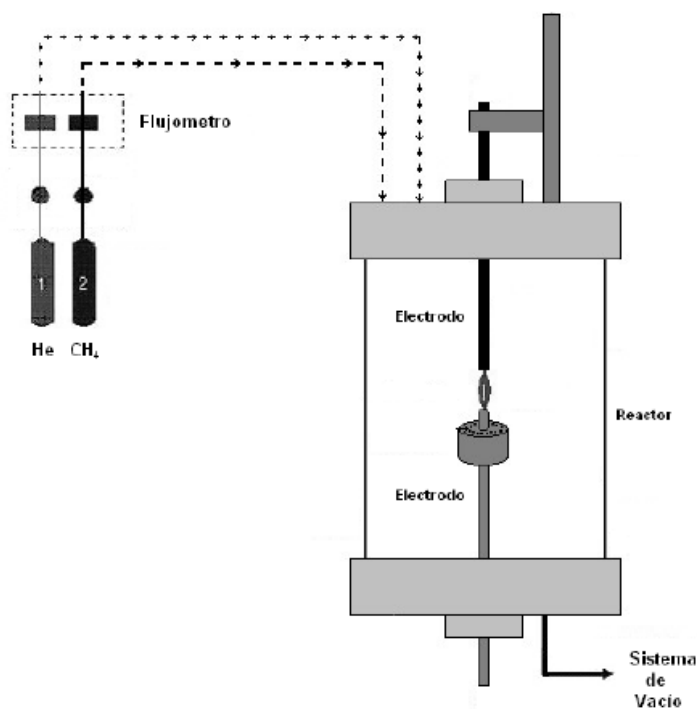


Figura 40. Reactor de Arco-Glow.

Fuente: Juanico Lorán (2004)

6.4.3. Aplicaciones de las Nanofibras

Según (Juanico Lorán, 2004), se han desarrollado aplicaciones particulares de nanofibras de carbono en:

- Electrodo para construir supercapacitores
- Industria automotriz como interruptores nano electromecánicos.
- Capas de superficies para la industria textil como removedor de solventes orgánicos en agua.
- Como soporte catalítico y filtrado para el almacenamiento de hidrógeno.
- Para usos aeroespaciales elaborando materiales compuestos con matriz polimérica más resistentes y pegamentos conductores.
- Aplicaciones en ciencias biológicas y de la salud
- Aplicaciones comerciales diversas.
- Mejoramiento en el almacenaje de hidrógeno para uso de celdas combustibles en automóviles y otros dispositivos.
- En la industria: baterías, mangueras antiestáticas para combustible, llantas, pintado electrostático, control térmico, espuma granítica, bolsas antiestáticas para chips, blindaje EMI/RFI, cable nanoconductor, nanodiodos y motores micro eléctricos.

6.5. Nanodiamantes

Según (Spiegato, s.f.), los nanodiamantes pueden ser llamados como nanodiamantes de detonación (DND) o diamante ultradisperso (UDD), el cual es resultado de explosiones controladas, y generalmente se puede extraer del hollín (subproducto de la combustión

incompleta de materiales) por medio de presión, calor y ácido, y también, se pueden producir por procesos basados en grafito.

6.5.1. Fabricación

Para la fabricación de nanodiamantes (Spiegato, s.f.) explica que, el carbono es sometido a la detonación de una mezcla de los explosivos TNT y RDX, dando como resultado un hollín que contiene nanodiamantes de aproximadamente 5 nanómetros, donde el recipiente que contiene esa explosión se enfría rápidamente mediante dióxido de carbono comprimido, agua o aire para permitir un mayor rendimiento de diamantes gracias al enfriamiento rápido. Seguidamente, “el hollín cargado de diamantes sobre una autoclave y se hierve en ácido de alta presión para eliminar casi todas las impurezas, como los metales contaminantes del recipiente de explosión, así como el carbono de menor grado que no puede producir diamantes. Además, los nanodiamantes también se puede sinterizar usando grafito en suspensión que se somete a cavitación ultrasónica o un rayo láser pulsante” (Spiegato, s.f.).

(Robosup, 2022) describe que la obtención de los nanodiamantes se puede realizar en varias formas como las siguientes:

- Por medio de síntesis a altas presiones y temperaturas
- Método haz de electrones e iones que utilizan la irradiación de material carbonoso con haces de electrones e iones de argón.
- Diamantes naturales por métodos físicos.
- Deposición electroquímica en el ánodo

6.5.2. Propiedades

Las propiedades son descritas en la Tabla 32 por el autor (Robosup, 2022):

Tabla 32. Propiedades físicas de los nanodiamantes.

Superficie específica m ² /g	400-500
Densidad a Granel, g/cm ³	0.4-0.6
Densidad micrométrica, g/cm ³	3.0-3.3
El tamaño medio de los microcristales, Nuevo Méjico	4.5-6.0
El tamaño medio de los agregados, Nuevo Méjico	120-140
Temperatura de oxidación de en el aire, °C	350
La temperatura de inicio de grafitización en vacío, °C	900
La carga de partículas	Negativo
Conductividad térmica, W/m*K	2000

Fuente: (Robosup, 2022)

6.5.3. Aplicaciones

En un artículo de (Quiroz, Martinez, & Martinez, 2006) son simplificadas aquellas aplicaciones de los nanodiamantes en la electroquímica (ver Tabla 33)

Tabla 33. Algunos ejemplos de uso de los nanodiamantes en la electroquímica.

APLICACIÓN	USO
Electrosíntesis de compuesto orgánicos	Oxidación anódica del 1, 4 diflourbenzeno, producción de floureno.
Tratamiento de aguas	Generación de agentes fuertemente oxidantes que aceleran la eliminación de los agentes contaminantes presentes en el agua.
Electroanálisis	Comportamiento del 2-naftol en H ₂ CO ₄
	Análisis-biomédicas
	Ambientales y de crecimiento
	Transferencia de carga, intercambio iónico, adsorción e interacciones biológicas específicas.

	Electrodos modificados con el ácido desoxirribonucleico (DNA) para la determinación de fármacos, transferencia electrónica en proteínas, interacciones entre DNA-fármaco, detención de la hibridación del DNA y detención de mutaciones.
	Estudios electroquímicos con el citocromo C.
	Sensores y biosensores
	Inmovilización de dos anticuerpos del conejo contra la salmonela y contra estafilococo, en la superficie de películas de nanodiamantes.

Fuente: (Quiroz, Martinez, & Martinez, 2006)

Además, (Robosup, 2022) define otras aplicaciones de los nanodiamantes, siendo:

- Aditivos para lubricantes para reducir el coeficiente de fricción.
- En la creación de compuestos galvánico y revestimientos para mejorar la durabilidad y aumentar la micro dureza.
- Como sorbente con una superficie desarrollada y una alta capacidad de adsorción
- Como material de pulido
- Para producción de diamantes policristalinos
- Como aditivo para aceites.

6.6.Grafeno

En la Tesis Doctoral de (Sánchez, 2015), expone que el término de “Grafeno” es proveniente de las palabras “grafito” y “alqueno”, la cual fue utilizada como una única lámina bidimensional componente del grafito. Por ello, se puede describir como una lámina de un átomo de espesor constituida por una disposición hexagonal de átomos de carbono con hibridación en

composición hexagonal y puede ser considerada como el origen de todas las formas gráficas o enrollarse de nanotubos de carbono, como lo presente la figura 41.

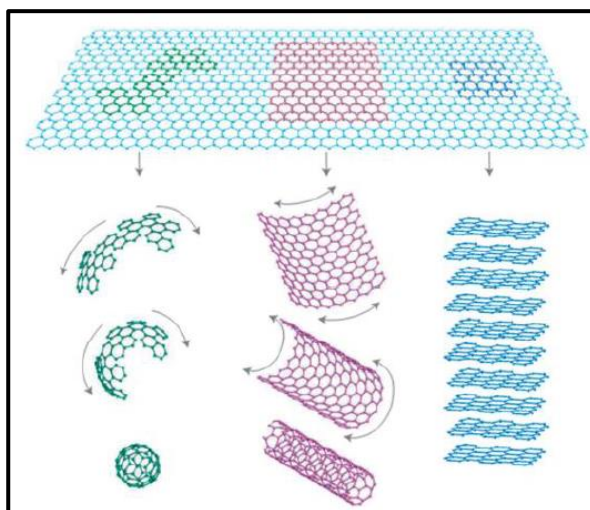


Figura 41. El grafeno es el origen de los nanomateriales gráficas de 0D (Fullerenos), 1D (nanotubos de carbobo), y 3D (grafito).

Fuente: Sánchez, 2015

Además, el autor (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015), define el grafeno como una “estructura nanométrica bidimensional de átomos de carbono fuertemente cohesionados en una superficie ligeramente plana, con ondulaciones, de un átomo de espesor, con apariencia semejante a una capa de panal de abejas (Figura 42). Por su configuración atómica hexagonal, esta laminilla compuesta por anillos de benceno desprovistos de sus átomos de hidrógeno es considerada para el entendimiento de las propiedades e los alótropos de carbono”.

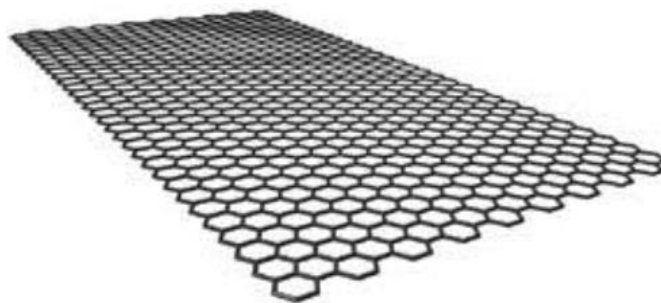


Figura 42. Representación esquemática de una lámina de Grafeno.

Fuente: Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015

Del mismo modo (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015), expone que el grafeno es la materia prima de otros alótopos de carbono y se puede plegar para formar Fullerenos, enrollarse para formar nanotubos de carbono y apilarse para formar grafito.

Incluso (Ortega, 2018) , expone que el grafeno es una forma alotrópica del carbono donde su estructura bidimensional organizado en una red hexagonal (Figura 43) con el espesor de un átomo. También, que este material está formado por átomos de carbono y enlaces covalentes a partir de la superposición de híbridos sp^2 de los carbonos enlazados.

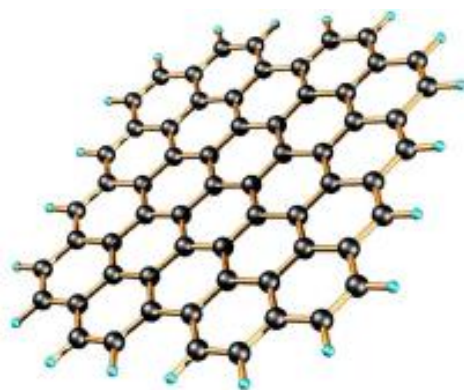


Figura 43. Estructura molecular del grafeno.

Fuente: Ortega, 2018

6.6.1. Estados del grafeno

Como se mencionó anteriormente, el grafeno posee una serie de elementos grafíticos (Figura 44) pues es la unidad básica del resto de elementos, formando estructuras hexagonales.

- *Fullerenos (0D)*: es denominada como estructura de cero dimensiones y están por debajo de 100nm. (Ortega, 2018)
- *Nanotubos de carbono (1D)*: debido a que la lámina de grafeno es capaz de enrollarse en sí misma en estructuras 1D (dos de sus dimensiones se encuentran en el orden nanométrico, superando 100 nm), lo que da lugar a los nanotubos, sus

moléculas son cilíndricas, con propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas. (Ortega, 2018)

- *Grafito*: debido a que el grafeno se puede apilar, da lugar al grafito tridimensional (3D), formado por sistema policíclico de anillos bencénicos fusionados que disponen capas separadas entre sí. (Ortega, 2018)

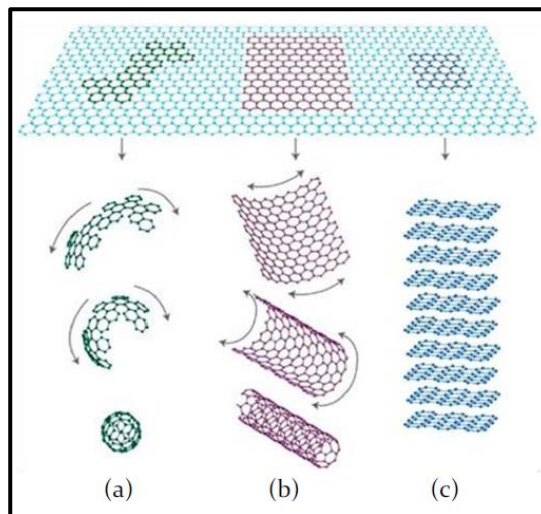


Figura 44. Elementos grafíticos (a) Fullerenos- 0D; (b) Nanotubos- 1D; (c) Grafito - 3D.

Fuente: Ortega, 2018

6.6.2. Propiedades del grafeno

El grafeno está constituido por una superficie donde los átomos están accesibles en idénticas posiciones y dispuestos para interactuar con el medio, dando lugar a diversas propiedades mecánicas, ópticas y electrónicas únicas en los materiales. (Sánchez, 2015)

- *Propiedades mecánicas*: se ha determinado que existe una alta resistencia a la tracción y alto módulo de Young gracias a técnicas de microscopia de fuerza atómica en el grafeno, superior a otros materiales, pues es un material sumamente elástico que puede soportar altas presiones modificando su elongación sin sufrir

ruptura, y su elevada eficiencia mecánica es debido a la ruptura del grafeno deriva de su estructura constituida por enlaces dobles cubierto de orbitales sp^2 (Sánchez, 2015)

La propiedad de resistencia mecánica por (Ortega, 2018), gracias a una serie de estudios, da como conclusión que el grafeno es un candidato potencial para uso en nano-fuerzas en materiales compuestos a base de cemento, donde el óxido de grafeno es obtenido mediante la exfoliación química del grafito. Así mismo, el nano esfuerzo es más eficaz que las barras o fibras de acero, ya que estos pueden controlar la aparición de nano grietas antes de que aumenten y se conviertan en microgrietas.

(Martínez, 2017), afirma que las propiedades de los sólidos cristalinos son controladas por características de su red cristalina prístina y defectos estructurales como dislocaciones y los límites de grano. El grafeno muestra comportamiento elástico no lineal como una fractura frágil y puede ser fácilmente doblado.

Además (Galbarro, s.f.), afirma que el grafeno es el material con mayor resistencia mecánica que todos los materiales y más resistente que los aceros, haciendo de este material una gran utilidad por su gran resistencia mecánica y poco peso. Esta resistencia se encuentra en los enlaces covalentes tipo σ , conformando la red cristalina. Para medir esa resistencia mecánica se puede emplear un microscopio de fuerza atómica que presiona perpendicularmente la lámina de grafeno para doblarla y obtener el límite de rotura (Figura 45).

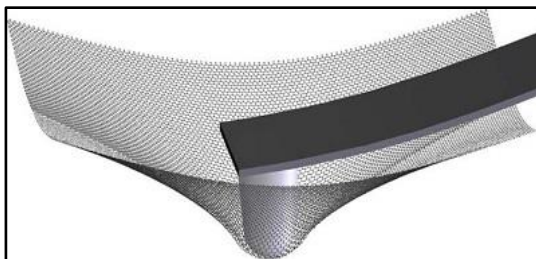


Figura 45. Ilustración de la medición de la resistencia mecánica por medio de microscopio del Grafeno.

Fuente: Galbarro, s.f.

- *Propiedades ópticas:* el grafeno posee una capa de único átomo de espesor y por lo tanto es un material con alta transparencia óptica en todo rango de longitudes de onda de la zona visible y ultravioleta. Gracias a la elevada transparencia y conductividad eléctrica el grafeno es ideal en la fabricación de electrodos conductores transparentes, como lo es las pantallas táctiles, células fotovoltaicas orgánicas y LEDs orgánicos. (Sánchez, 2015)

(Martínez, 2017) , en sus tesis expone que el grafeno promueve alta conductividad eléctrica y alta transparencia óptica, por ello, es candidato para la producción de electrodos transparentes requeridos para diversas aplicaciones.

- *Propiedades eléctricas:* los grafenos poseen unos orbitales de los átomos los cuales se combinan entre sí para generar estados electrónicos deslocalizados con rango de energía que llega al nivel de Fermi, y estos estados, son responsables de la conductividad eléctrica. El grafeno se postula como un sustituto del silicio en la fabricación de circuitos integrados con altas prestaciones. (Sánchez, 2015).

Además, (Ortega, 2018), expone que el grafeno posee una excelente capacidad eléctrica y térmica debido a su estructura de hibridación sp^2 , encontrándose como conductores y semiconductores. El primero debido a que no existe una brecha

energética entre la banda de valencia y la de conducción, y semiconductor, porque cuenta con dos tipos de portadores de carga: electrones y los huecos.

- *Propiedades térmicas:* el grafeno tiene una elevada capacidad de transmisión del calor con calores a temperatura ambiente de $5000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, convertido en candidato ideal para la fabricación de disipadores térmicos y de materiales compuestos de gran conductividad térmica. (Sánchez, 2015)

Así mismo, (Martínez, 2017) , explica que la conductividad térmica del plano de grafeno a temperatura ambiente es aproximadamente entre $2000\text{-}4000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ para muestras suspendidas libremente (Figura 46). Sin embargo, el valor de temperatura disminuye cuando este material 2D está en contacto con un sustrato o confinado a GNRs, pero es un comportamiento esperado debido a la propagación de fonones en una lámina de grafeno atómicamente delgada es probable que sea muy sensible a las perturbaciones de superficie o borde.

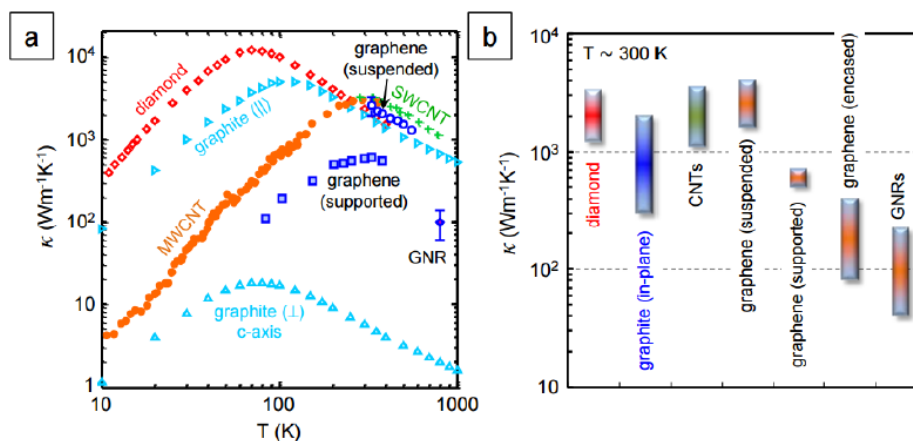


Figura 46. a) conductividad térmica k como una función de la temperatura para distintos materiales carbonosos. b) intervalo de conductividad térmica k a temperatura ambiente para distintos materiales en base carbono.

Fuente: Martínez, 2017

- *Propiedades fotocatalíticas:* “el grafeno puede ser modificado químicamente para ajustar sus propiedades superficiales, lo convierte en una sustancia ideal para crear materiales compuestos. Por ello, la combinación de TiO_2 con grafeno podría resolver algunos de los problemas que actualmente presentan los compuestos anteriormente mencionados, dando lugar a un material con excelente capacidad de adsorción, transparencia y conductividad.”. (Ortega, 2018)
- *Electroquímicamente inerte:* se han realizado estudios sobre la capacidad del grafeno como capa ultrafina resistente a la corrosión, los cuales superan a sus homólogos polímeros en cuanto a resistencia ante la corrosión microbiana. En otras palabras, los revestimientos poliméricos convencionales dejan de ser efectivos cuando se degradan bajo la acción de procesos microbianos, mientras que el grafeno es electroquímicamente inerte, y, por tanto, resistente tanto a ataques microbianos como a la oxidación. (Ortega, 2018)
- *Propiedades electrónicas:* en el grafeno se encuentran tres orbitales híbridos sp^2 (enlaces σ) y un orbital fuera del plano $2p_z$, los cuales forman un sistema deslocalizado de electrones por encima y por debajo del plano de red del grafeno (enlaces π) (Martínez, 2017), como se presenta en la figura 47.

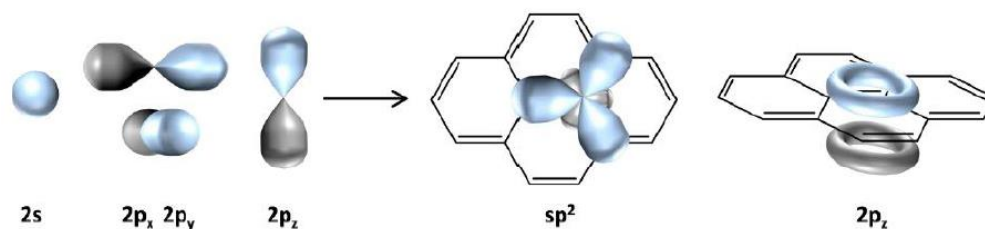


Figura 47. Hibridación orbital y enlace en grafeno.

Fuente: Martínez, 2017

“Los enlaces σ son fuertemente direccionados y funcionan como el esqueleto rígido que determina la estructura cristalina hexagonal y los enlaces π los electrones se encuentran deslocalizados con respecto al plano de la red.” (Martínez, 2017). Debido al principio de exclusión de Pauli, los enlaces σ forman banda de valencia con energía muy alejada del nivel de Fermi y la deslocalización electrónica por los enlaces π hacen posible la movilidad de portadores de carga y propiedades electrónicas del grafeno. (Martínez, 2017)

6.6.3. Métodos de síntesis

Existen diversos métodos de síntesis que son definidos por diferentes autores, estos son los siguientes:

– *Exfoliación micromecánica:*

Según (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015), la exfoliación micromecánica es aquel método por el cual se obtuvo el grafeno y es el método más eficaz y fiable para producir las láminas de alta calidad del grafeno y este método consiste en la separación de la capa más externa de un sólido en laminillas, hojuelas o escamas, siendo realizado por el sometimiento de una superficie limpia de cristal de grafito a un raspado fino de arriba hacia abajo. Seguidamente se extraen las hojuelas extremadamente delgadas al descascarar varias veces gracias a una cinta adhesiva hasta que sean más delgadas. Los autores exponen que al obtener el resultado es utilizada la microscopía óptica y se logran obtener cristalitas de grafeno de alta calidad, pero si identificación y obtención del material es laboriosa como se representa en Figura 48.

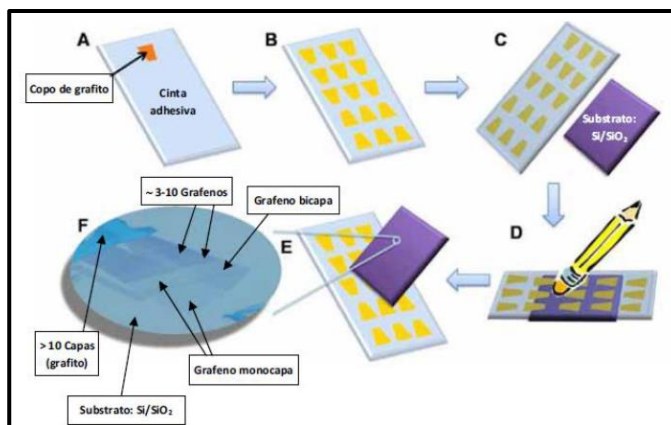


Figura 48. Proceso de exfoliación micromecánica de grafito.

Fuente: Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015

El proceso definido (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015), es el siguiente:

- I. Un copo de grafito es adherido a cinta adhesiva
- II. Se exfolia el copo en repetidas ocasiones, obteniéndose varios copos más finos.
- III. Se presionan los copos contra una superficie limpia de Si/SiO₂ que actuará como sustrato.
- IV. Se frota con suavidad la parte trasera de cinta adhesiva, asegurándose así un contacto entre los copos y el sustrato.
- V. Se retira con cuidado la cinta, dejando láminas de grafenos sobre el sustrato junto con una gran cantidad de material gráfítico.
- VI. Cuando se encuentran sobre un sustrato de Si/SiO₂ las láminas de grafeno se pueden identificar con la ayuda de un microscopio óptico gracias a un fenómeno de interferencia provocado por la diferencia de recorridos ópticos, permitiendo discriminar entre grafenos de diferentes capas.

Además, el autor (Narváez, 2009) , expone que la exfoliación mecánica del grafito fue el inicio de la obtención del grafeno por piezas macroscópicas de grafito y continuamente se ha perfeccionado el método produciéndose el material por la frotación directa del grafito pirolítico altamente orientado contra una superficie Si/SiO₂. Con ello se obtienen láminas de grafeno monocapa o bicapa y con calidad estructural alta. Sin embargo, es un proceso que se lleva de forma manual, convirtiéndolo en un método de poco rendimiento y con altas horas de trabajo.

- *Exfoliación química:* (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015) especifica que este proceso consiste en láminas de pequeño espesor de grafito y romper a los enlaces interlaminares a través de vibración para insertar moléculas o átomos en la masa de grafito y se emplean compuestos químicos de carácter tensoactivo para unir las láminas de grafeno y así mismo para la separación en donde se obtienen sedimentos de residuos y hojas de grafeno.

Del mismo modo, (Narváez, 2009) , afirma que este proceso se basa en la intercalación de moléculas entre láminas de grafito, preparando una solución de este en surfactante y sometido a proceso de sonificación, en la cual se aplican ultrasonidos para romper fuerzas de Van der Waals de los enlaces interlaminares, permitiendo la introducción de moléculas entre las capas. Gracias a esto se obtiene láminas de grafeno de alta calidad, evita procesos previos de oxidación y rección, aunque el área superficial es demasiado pequeña (ver Figura 49).

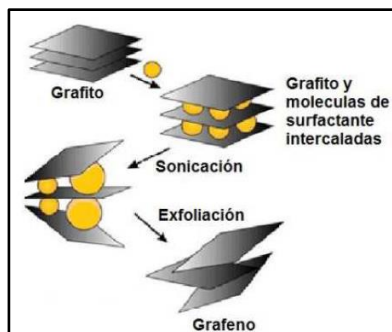


Figura 49. Proceso de exfoliación química del grafito.

Fuente: Narváez, 2009

- *Crecimiento epitaxial*: se refiere según (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015) al crecimiento ordenado de una sobrecapa cristalina en un sustrato cristalino y a partir de una cara de cristal de material semiconductor o sustrato se hace una capa uniforme y de poco espesor con la misma estructura cristalina (Figura 50). Existen dos tipos de epitaxia: la homoepitaxia o crecimientos homoepitaxiales (aquellos donde el sustrato y el sobre crecimiento presentan la misma composición química y se produce mediante monocapa), y la heteroepitaxia o crecimientos heteroepitaxiales (aquellos en que el sustrato y el sobre crecimiento presentan distinta composición química).

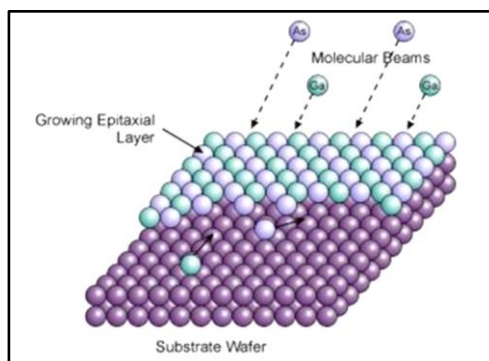


Figura 50. Crecimiento Epitaxial.

Fuente: Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015

Este método es utilizado en la obtención de grafeno que se basa en la sublimación térmica y se utilizan superficies eléctricamente aislantes, principalmente el carburo de silicio (SiC), y para ello se calienta el carburo de silicio a temperaturas que pueden superar los 1300°C y el carbono se reordena para formar la capa de grafeno en láminas de gran calidad estructural (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015).

De igual manera, (Narváez, 2009) explica que el crecimiento epitaxial del grafeno se produce en superficies eléctricamente aislantes principalmente carburo de silicio y se basa en la sublimación térmica del silicio a temperaturas superiores a los 1300°C, para el reordenamiento de los átomos de carbono formando una capa de grafeno.

- *Grafeno a partir de óxido de grafito*: “La obtención de grafeno a partir de la exfoliación y reducción del óxido de grafito es un método que resulta muy prometedor para su producción a gran escala, debido a que se obtiene una gran cantidad de material estable en forma de dispersión acuosa u orgánica sin la necesidad de emplear surfactantes o estabilizadores y su costo es bajo” (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015). El resultado de este método se obtienen dispersiones coloidales de láminas monocapa de óxido de grafeno comúnmente llamadas GO, estabilizadas gracias a la repulsión electrostática producida por la carga negativa que adquieren en dispersión debido a la ionización de los distintos grupos funcionales que presentan.

Por otro lado, (Narváez, 2009) explique que la oxidación y exfoliación del grafito en fase líquida se obtienen láminas de óxido de grafeno que pueden ser reducidas para la obtención dispersiones de grafeno. Este método es favorecido por grupos funcionales oxigenados y es prometedor en la producción y procesado a gran escala sin necesidad de surfactantes o estabilizadores con bajo coste económico. Sin embargo, debido a la presencia de grupos funcionales el óxido de grafeno y de grafeno con eléctricamente poco conductores limitando su aplicabilidad y por ello se llevan tratamientos de reducción para poder obtener láminas conductoras. La reducción química del oxido de grafeno se aclara en la Figura 51.

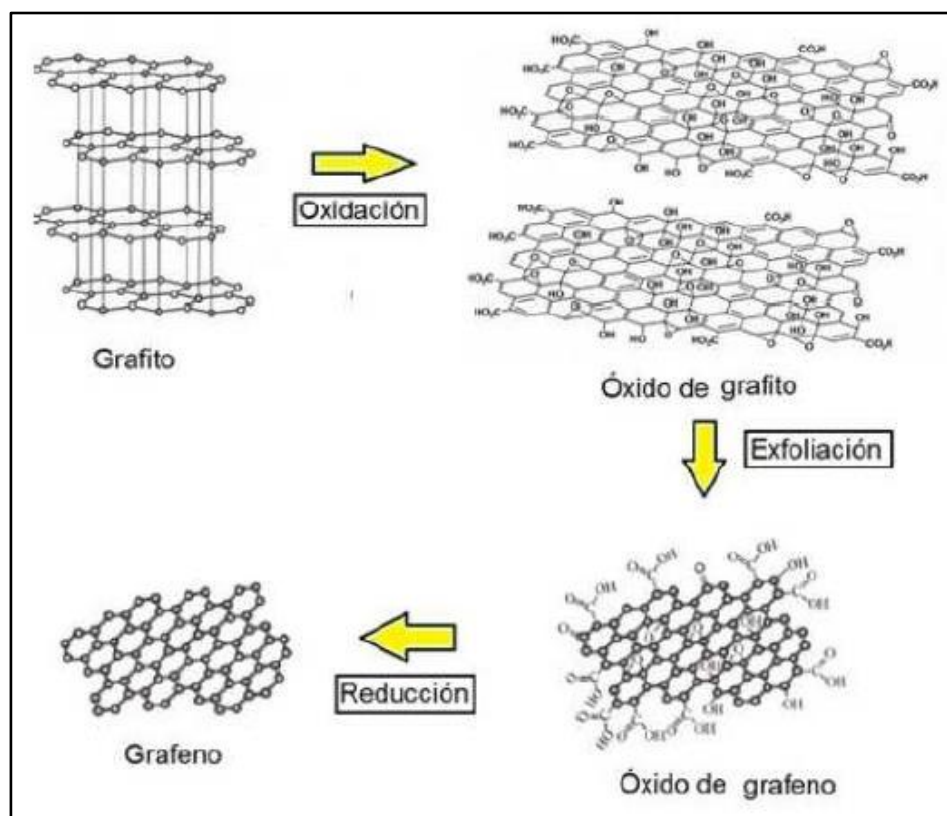


Figura 51. Reducción química de óxido de grafeno.

Fuente: Narváez, 2009

- *Lámina de grafeno funcionalizada por oxidación y expansión térmica de grafito:* La exfoliación tiene lugar cuando la velocidad de descomposición de los sitios epoxi e hidroxilo de óxido de grafito excede la velocidad de difusión de los gases desprendidos, produciendo así las presiones que exceden las fuerzas de van der Waals que sostienen las láminas de grafeno juntas.

- *Grafeno a partir de nanotubos de carbono:* “La obtención de tiras o cintas de grafeno por medio de la abertura controlada de nanotubos de carbono de pared múltiple consiste en la suspensión de nanotubos de carbono en ácido sulfúrico y sometido a tratamiento oxidante” (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015).

También (Narváez, 2009) expone sobre este método como aquel que permite la obtención de nanocintas de grafeno desenrollando tubos de carbono y para ello se utilizan varios métodos experimentales como lo son los métodos de corte de nanotubos por la acción de ácidos.

- *Deposición química en fase vapor (CVD):* “en este método se sinterizan láminas monocapa de grafeno de gran calidad estructural, aunque el hecho de involucrar grandes temperaturas y bajas presiones, lo convierte en un método costoso y completo” (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015). Para ello, se expone un sustrato metálico a hidrocarburos, produciéndose una nucleación y crecimiento de una lámina de grafeno al descomponerse los hidrocarburos y ocurren en dos etapas:
 - I. La nucleación de la fase sólida en la fase líquida (ver Figura 52), donde se genera una superficie sólido-líquido que tiene una energía de superficie.

II. El crecimiento de estos núcleos a medida que desciende la temperatura.

La forma y el tamaño de los granos resultantes es determinado por las velocidades de nucleación y crecimiento.

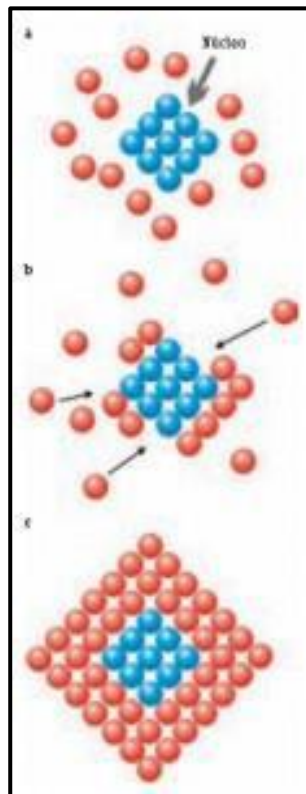


Figura 52. Nucleación de los cristales.

Fuente: Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015

Ahora bien, (Narváez, 2009) expone que este proceso inicia en el interior de una cámara donde se deposita el sustrato metálico (generalmente níquel o rutenio) y metano siendo calentamos a 1000°C, rompiendo enlaces y produciéndose el depósito de carbono (nucleación) en la superficie metálica y posterior crecimiento de la lámina de grafeno. Por medio de la deposición química de vapor se sinterizan laminas monocapa de grafeno de una gran calidad estructural y de gran tamaño.

- *Producción de grafeno mediante exfoliación de CO₂ supercrítico del grafito*: “El grafeno de pocas capas se produce mediante la inmersión de grafito natural en polvo en CO₂ supercrítico durante 30 minutos, seguido de despresurización rápida, el fluido supercrítico se expande y exfolia el grafito” (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015). Esta es una técnica que se realiza a bajo costo para la producción de gran escala de las láminas de grafeno puro sin la necesidad de procesamientos complicados o tratamiento químico.

- *Síntesis controlada del tamaño de las láminas de óxido de grafeno a gran escala utilizando la exfoliación química*: “Las muestras de GO preparadas bajo diferentes condiciones, las cuales tienen toda una excelente dispersión del agua, son caracterizadas mediante análisis gravimétrico térmico, espectroscopia ultravioleta-visible (UV-vis), difracción de rayos X y microscopía de fuerza atómica. Se encontró que a medida que se utilizan tiempos de oxidación más largos y oxidantes, el tamaño medio de las láminas de GO” (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015).

6.6.4. Aplicaciones

Según (Ortega, 2018), el grafeno es utilizado en una cantidad considerada en la manufactura y es destinada a los sectores dispuestos en el diagrama de la figura 53.

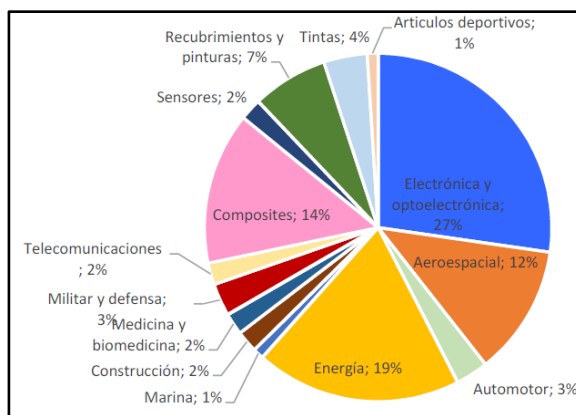


Figura 53. Consumo de grafeno (%) por industrias.

Fuente: Ortega, 2018

El grafeno puede estar presente en los siguientes sectores:

Grafeno en la electrónica: como lo muestra la imagen de (Ortega, 2018), este autor confirma que el sector industrial que es mayor consumidor de grafeno es la industria electrónica, debido su alto potencial eléctrico y es usado en:

- *Pantallas transparentes y flexibles:* estas están constituidos por grafeno como soporte y su aplicación es debido a las propiedades conductoras, transparencia y capacidad de creación de elementos flexibles y resistentes con larga duración y alto brillo. (Ortega, 2018).
- *Detector de huellas dactilares:* en este caso el grafeno permite obtener nuevas formas en la creación de los sensores flexibles que no se puede conseguir con los chips de silicio, eliminando la necesidad optima de vidrio utilizada en los escáneres de huellas digitales convencionales. (Ortega, 2018)
- *Antenas NFC:* debido a que el grafeno es considerado como un material ligero, barato y sostenible para el medio ambiente, se considera que reemplazaría la tecnología convencional de antena metálica. (Ortega, 2018)

Además, el autor (Sánchez, 2015) considera que el grafeno es capaz de “superar equipos electrónicos basados en silicio debido a sus excelentes propiedades de transporte de caras”. Además, el autor afirma que el grafeno es prometedor en aparatos optoelectrónicos, en el campo de nano fotónica y uso en láseres ultrarrápidos gracias a sus propiedades ópticas, su conductividad y la alta flexibilidad.

El grafeno en la industria automovilística y aeroespacial: debido a que el sector automotriz trabaja por nuevos materiales compuestos para los recubrimientos y carrocería, el grafeno posibilidad el mejoramiento de materiales existentes y permite nuevos campos de aplicación, adecuado para reforzar materiales como plásticos o resinas, aportando gran resistencia y flexibilidad. Además, al ser un material inerte y anticorrosivo es adecuado para elementos que son expuestos a agentes atmosféricos (Ortega, 2018). Entre ellos tenemos:

- *Tuberías de calor:* usados en sistemas de refrigeración de satélites por las altas propiedades térmicas del grafeno y altos rendimientos, aumentando la vida útil y autonomía de los satélites y las sondas espaciales. (Ortega, 2018)
- *Velas espaciales solares:* son usadas como método de propulsión de naves espaciales usando la luz del sol, por ello, el grafeno puede ser un material ideal ya que permite presión de radiación utilizada para impulsar objetos sin usar combustibles o gases. (Ortega, 2018)

Grafeno en el sector energético: el grafeno tiene potencial para las relaciones con los sistemas de energía por su estructura bidimensional con el espesor de un átomo, alta conductividad eléctrica y térmica, transparencia óptica, resistencia mecánica, flexibilidad inherente y gran área

específica (Ortega, 2018). Además, el grafeno permite la mezcla en polímeros para formar compuestos con mejores propiedades y rendimiento del material empleado. (Ortega, 2018). Los compuestos de grafeno-polímero como:

- *Baterías de iones de litio (LIBs)*: “la estructura molecular bidimensional del grafeno y sus altas conductividades eléctricas permiten que se puedan formar fácilmente estructuras 3-D porosas, que pueden actuar como redes de conductividad en los electrodos” (Ortega, 2018). Con ello se presenta una mejora en la conductividad eléctrica, mayor capacidad de velocidad en electrodos y capacidad de descarga mayor.
- *Supercondensadores*: estos dispositivos trabajan en el almacenamiento de energía que pueden cargar y descargar a altas velocidades y actúan como complemento para baterías y celdas de combustibles. Por lo tanto, los polímeros específicos dopados por grafeno mejoran la mecánica y la estabilidad electroquímica del ciclo de los electrodos. (Ortega, 2018)
- *Células solares*: por las cuales se puede convertir la energía solar en energía eléctrica y debido a que presentan altos costes y problemas de contaminación del medio ambiente se han buscado alternativas de celular solares orgánicas y en ellas se encuentran las compuestas por grafeno por su alta conductividad eléctrica, transferencia del 97% y flexibilidad. (Ortega, 2018)
- *Celdas de combustible*: estas celdas consisten en la generación de energía oxidando combustibles a bajas temperaturas por catalizadores inmovilizados en electrodos y los compuestos de grafeno-polímeros son usados como catalizadores y electrolitos

solidos de las celdas combustible ya que contiene nitrógeno y buena durabilidad electrocatálisis. (Ortega, 2018)

Del mismo modo, (Sánchez, 2015) afirma que el grafeno por su excelente conductividad electrónica, transparencia y gran superficie es aplicable a las actividades fotovoltaicas y estos materiales se emplean como electrodos transparentes, aceptores de electrones o adsorbentes de luz. En los electrodos transparentes basados en grafeno se emplean en 3 tipos de dispositivos: orgánicos, híbridos organicos-inorganicos y celdas solares basadas en colorantes.

El grafeno en medicina y biomedicina: en el campo de la medicina y biomedicina se puede aplicar las láminas de grafeno, escamas de grafeno y oxido de grafeno ya que poseen propiedades únicas (Ortega, 2018). Se aplican en:

- *Implantes de retina:* el grafeno posee excelente biocompatibilidad por su flexibilidad y durabilidad química, proporcionando interfaz para la comunicación entre la prótesis de retina y el tejido nervioso debido a sus excelentes propiedades electrónicas. (Ortega, 2018)
- *Manos protésicas robóticas:* los sensores portátiles fabricados con compuestos de celulosa y grafeno pueden controlar las manos protésicas robóticas (Ortega, 2018).
- *Sensores de bienestar flexibles:* “mediante dispositivos portátiles (parches, brazaletes, etc.) que incorporan unos sectores basados en grafeno, se puede medir el ritmo cardiaco, temperatura corporal, etc.” (Ortega, 2018).

Industria del blindaje: el grafeno es un material que posee una extrema dureza, capacidad de moldearse y ligero, haciéndolo ideal para esta industria en elementos como chalecos, antibalas,

cascos y multitud de elementos de protección para que se conviertan en más ligeros y seguros. (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015)

Industria automovilística: el grafeno en partes de los vehículos permitirá mayor resistencia y los coches híbridos se convertirán en alternativas reales, con baterías de larga duración, tiempos de carga mínimos y una nueva visión de estos vehículos para los conductores. (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015)

Tratamiento de aguas: debido a que el grafeno posee una estructura de alta densidad permeable al agua se ha estudiado para el uso de desalinización del agua y se posibilidad su uso y costo menor a otras tecnologías. (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015)

Desarrollo de la ciencia: el grafeno posee una alta reactividad con otros elementos químicos distintos del carbono, la cual es una característica que atrae al área de investigación. (Hernández Gervacio & Quiroz Ceballos, 2015)

Almacenamiento de energía: (Sánchez, 2015) afirma que por la demanda global sobre la energía y la limitación de recursos no renovables se promueven otras energías renovables, es ahí, cuando los materiales basados en grafeno son considerados materiales de electrodo que pueden aplicarse a sistemas de almacenamiento de energía. Estos materiales se han aplicado en Supercondensadores en:

- *Pilas de combustibles*
- *Grafeno en baterías de ion-Li: estas baterías superan otros sistemas de almacenamiento de energía debido a su elevada densidad energética volumétrica y gravimétrica.*

6.7. Puntos cuánticos de carbono

Los puntos cuánticos son definidos como nanomateriales semiconductores compuestos hasta por 100.000 átomos, con diámetros entre 2 a 10 nanómetros y debido a este tamaño poseen efectos como la discretización de sus bandas de energía, sin embargo, presentan un confinamiento cuántico en las tres dimensiones del espacio. (Carolina, 2018)

Del mismo modo, (Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021) asocian a los puntos cuánticos con nanopartículas con diámetros menores a los 10 nanómetros, y son típicamente a base de un metal y un no metal presentando propiedades ópticas distintas tanto en los materiales macroscópicos como en las nanopartículas debido al confinamiento electrónico por el reducido tamaño de partícula.

Los puntos cuánticos de carbono es una de las aplicaciones menos peligrosas, las cuales pueden proveer propiedades fluorescentes similares a los puntos cuánticos inorgánicos, y, por medio de síntesis sencillas, a bajo costo, con precursores disponibles, menor toxicidad, fácil manejo de desechos y mayor biocompatibilidad permiten su uso en áreas como la medicina y la energía. (Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021).

Además, (Carrasco, y otros), describen a los puntos cuánticos de carbono (CQD, puntos C o CDs) como nuevos nanomateriales basados en carbono, el cual es un elemento abundante y no tóxico, haciéndolo atractivo para diversas aplicaciones hidrofílicas y existen varias técnicas para su síntesis, como lo son: pirólisis, carbonización de grupos polímeros, ablación con láser, hidrotermal y métodos electroquímicos, deposición química de vapor, entre otros. Los cuales, permiten obtener partículas carbonosas, amorfas o cristalinas con forma, tamaño y morfología diversa.

6.7.1. Propiedades

Propiedades de absorbanca y fluorescencia: los puntos de carbono poseen buenas propiedades de absorción dentro del rango ultravioleta, y la solución de los puntos de carbono presentan una absorción máxima característica. (Valencia, 2020)

(Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021), expone que los puntos de carbono a pesar de tener diversas estructuras que poseen estructuras ópticas similares en medio acuoso, y, la fotoluminiscencia en estos puntos depende de la ruta de síntesis, la química de la superficie, el tamaño de los puntos, pH de la solución y del solvente. Además, la fluorescencia de los puntos cuánticos más comunes está en los colores azul y verde, pudiendo llegar a longitudes de onda larga.

6.7.2. Tipos de puntos cuánticos de carbono

Los autores (Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021), describen que los puntos de carbono se pueden clasificar según su morfología según la Figura 54.

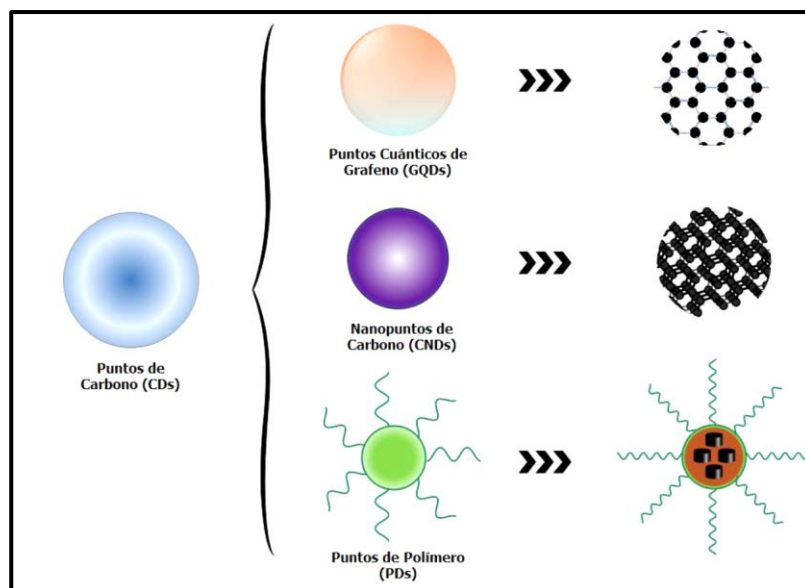


Figura 54. Tipos de puntos cuánticos de carbono.

Fuente: Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021

- *Puntos cuánticos de Grafeno (GQDs)*: están compuestos por láminas de grafeno conectadas por grupos químicos en sus bordes y muestran estructura cristalina y han sido sinterizados de varias maneras por medio de métodos como electroquímico por grafito y óxido de grafeno como precursor (Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021).
- *Nanopuntos de carbono (CNDs)*: estos son mayormente esféricos y se encuentran divididos en nanopartículas de carbono y no presentan una red cristalina. Estos pueden ser obtenidos por medio de grafito en oxidación con ácidos concentrados, y la deshidratación seguida de una carbonización. (Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021).
- *Puntos de polímeros (PDs)*: su nombre proviene de contener precursores polímeros o estar pasivados con polímeros, los cuales pueden ser obtenidos por surfactantes poliméricos. (Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021).

6.7.3. Síntesis de los puntos de carbono

El autor (Holguin, 2020) reporta unos métodos para sintetizar los puntos de carbono basado en procedimiento de D. Gao et al. (2018) en “Exploring of multicolor emissive carbón dots with novel double emission mechanism”, usando como precursor orgánico el ácido crómico y el Etanol y formamida como solventes. Esto está representado en el procedimiento de la figura 55.

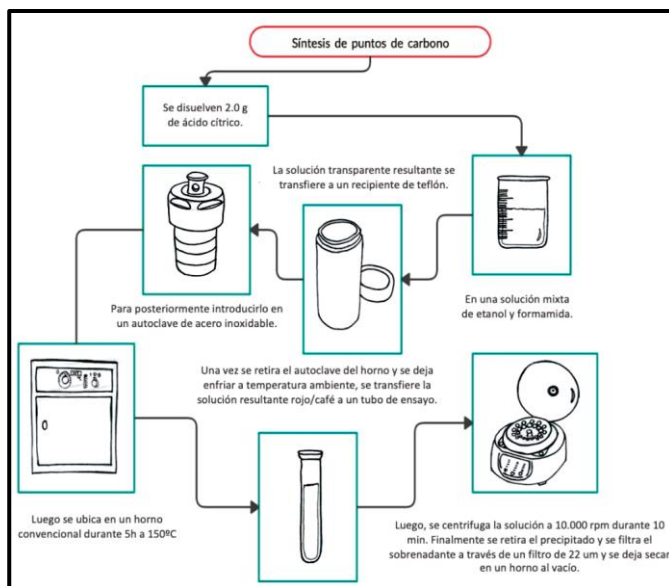


Figura 55. Procedimiento de síntesis de puntos de carbono.

Fuente: Holguin, 2020

Por otro lado, los autores (Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021), describen que los puntos de carbono se pueden obtener por medio de dos rutas de abajo hacia arriba (Bottom-up) en la cual se constituyen las partículas a partir de moléculas orgánicas pequeñas y de arriba hacia abajo (Top-Down) (ver figura 56), en la cual se rompen partículas más grandes como lo son los nanotubos, carbón activado y grafito.

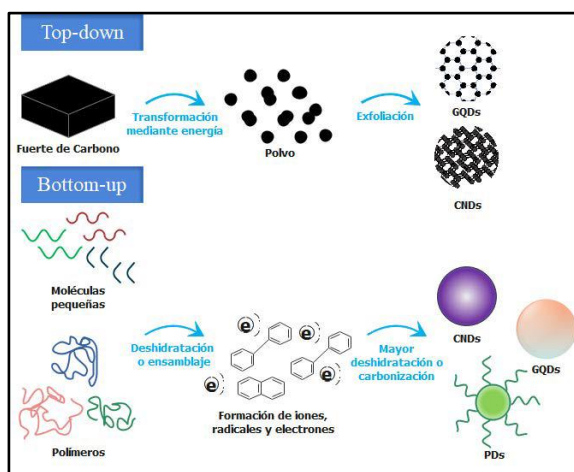


Figura 56. Síntesis de puntos cuánticos de carbono.

Fuente: Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021

- *De arriba hacia abajo (Top-Down)*: dentro de los métodos comunes actualmente usados para la síntesis de arriba hacia abajo incluye: ablación por láser, remoción de nanomateriales por un haz, síntesis electroquímica exfoliación del grafito y la descomposición de polisacáridos y de material celulósico. Los resultados de estos procesos dan estructuras sp^2 perfectas en los puntos de carbono, aunque con escasas propiedades luminiscentes. (Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021),
- *De abajo hacia arriba (Bottom- Up)*: en este tipo de síntesis ocurren reacciones químicas entre moléculas organizadas bajo condiciones adecuadas en un reactor hidrotérmico (altas presiones y temperaturas), combustión térmica o síntesis asistida por microondas o ultrasonido. Los autores resaltan que “este tipo de síntesis en general son mejores para incorporar dopaje y resultan en puntos cuánticos con fluorescencia más intensa. Se puede sinterizar a partir de polímeros y moléculas pequeñas por medio de reacciones de deshidratación o carbonización y convertirse en nanotubos de carbono o puntos de polímeros”. (Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021).

6.7.4. Aplicaciones

Para (Solís, 2014) , las aplicaciones de los puntos cuánticos son variadas por su fluorescencia fuerte y estable, emisión y adsorción sintonizable y sus principales aplicaciones se esquematizan en la Figura 57.



Figura 57. Esquema de muestra de aplicaciones de los puntos cuánticos.

Fuente: Solís, 2014

“Las aplicaciones para los puntos de carbono se basa en tamaño, forma, superficie, grupos funcionales y dopaje” (Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021), estas son:

- *Biomédicas: imagenología y terapéutica:* los puntos de carbono ofrecen biocompatibilidad y menor toxicidad, generalmente emiten con dependencia de excitación dándole flexibilidad en variedad de fuentes y filtros disponibles en bioimagenología. (Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021)

Por otro lado, los puntos cuánticos también se han convertido en parte de un sistema para la administración de fármacos, permitiendo el monitoreo en tiempo real de la liberación del fármaco por la diferencia de las intensidades de la emisión de fármaco.

- *Aplicaciones en sensores:* “las propiedades ópticas de los puntos cuánticos del carbono son aprovechables en el desarrollo de sensores ópticos para metales pesados basados en principios colorimétricos, de absorbancia y fotoluminiscencia.” (Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021). Por medio de los puntos de carbono es posible la detección de metales pesados y se puede identificar en la figura 58.

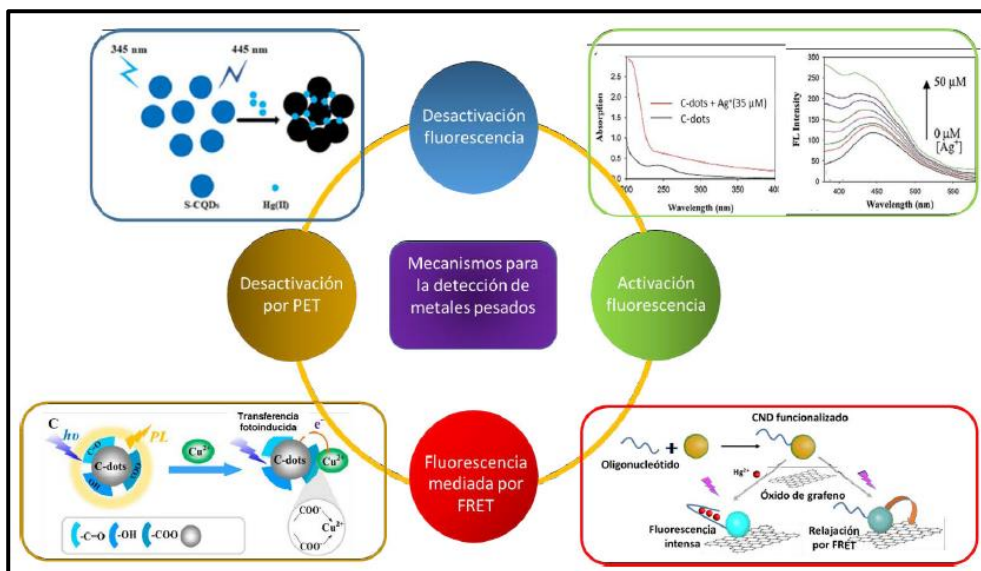


Figura 58. Mecanismos de detección de metales pesados con puntos cuánticos de carbono para los ejemplos discutidos arriba.

Fuente: Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021

- *Aplicaciones en energía:* en la mayoría de las aplicaciones de los puntos de carbono está en la energía, donde se usan como fotoluminiscencia, por ejemplo, las celdas solares organicas basadas en politiofeno y derivado soluble de buckminsterfullereno, donde la adsorción está limitada solo una porción del espectro visible y los puntos de carbono son útiles para adsorber energías más altas y luego fluorecer en la porción que si es adsorbida.
Se han estudiado el uso de las aplicaciones de los puntos de carbono en esquemas fotocatalíticos (por su eficiencia en adsorción de luz, poca toxicidad y estable),

aplicaciones en polímeros conductores electrónicas desde la síntesis de polianilina como generadores de radicales libres sin utilizar agentes oxidantes. (Álvarez, Ramírez, Baudrit, & Paniagua, 2021).

6.8. Materiales de carbono poroso

Según (Borchardt, y otros, 2017), los materiales de carbono poroso son particularmente los carbonos activados, los cuales poseen propiedades fisicoquímicas únicas y dentro de sus aplicaciones se encuentran: almacenamiento/separación de gas, catálisis y purificación de agua.

Por otro lado (Ferrero, 2017), menciona que los materiales carbono porosos son más utilizados como electrodos en Supercondensadores debido a la elevada área superficial, buena conductividad electrónica, fácil disponibilidad en una amplia variedad de formas (polvo, fibras, etc.) y un bajo costo de producción.

6.8.1. Tipos de materiales de carbono porosos

Para (Lee, Kim, & Hyeon, 2006), los materiales de carbono se distribuyen de la siguiente manera:

Materiales de carbono microporoso: estos materiales pueden ser

- *Carbonos microporosos desordenados (tamizado molecular carbonosos):* los carbonos de tamizado molecular (MSC) son formas especiales de carbonos activados que contienen microporos uniformes de varios ángulos y tamaños de diámetro y son aplicados en diversas áreas como la separación de gases moléculas, catalizadores selectivos de forma y electrodos para condensadores electroquímicos

de doble capa. Además, es que estos, tiene ventajas sobre tamices moleculares inorgánicos en términos de su hidrofobicidad y alta resistencia a la corrosión. (Lee, Kim, & Hyeon, 2006)

- *Carbonos microporosos ordenados sintetizados usando plantillas de zeolita:* para generar materiales ordenados se requieren plantillas organizadas rígidas, entre los materiales usados como plantillas están las Zeolitas y como catalizadores selectivos debido a sus poros uniformes de tamaño molecular y espesor uniforme. El procedimiento para la síntesis de plantillas para carbonos microporosos usando zeolita se representa en la Figura 59.

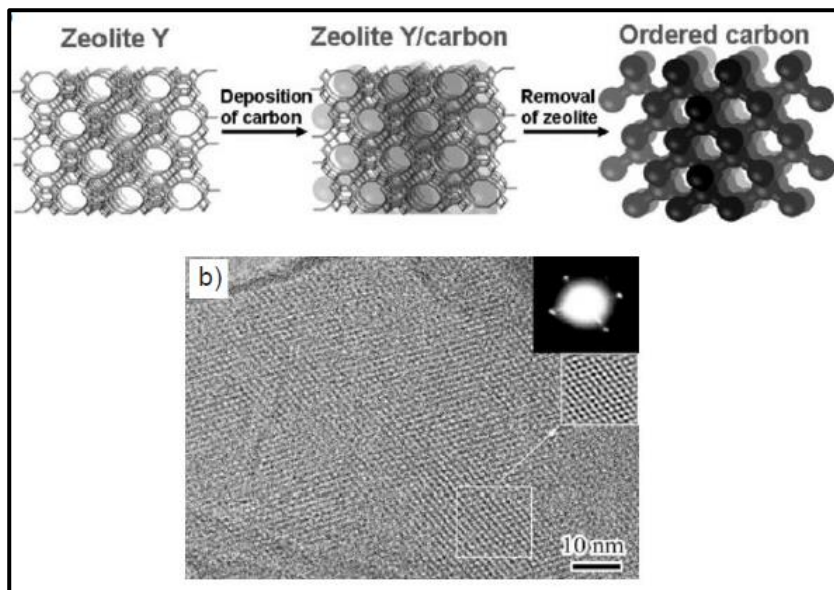


Figura 59. Procedimiento general de síntesis de plantillas para carbonos microporosos usando una plantilla de zeolita.

Fuente: Lee, Kim, & Hyeon, 2006

Materiales de carbono mesoporosos: estos materiales son muy importantes y sus aplicaciones involucran a moléculas grandes como adsorbentes para colorantes, catalizadores soportes para biomoléculas y electrodos para biosensores.

- *Carbones mesoporosos con estructuras de poros desordenados:* para sintetizar varios tipos de materiales de carbono mesoporosos es usado la activación catalítica usando iones metálicos y el fortalecimiento con vapor de breas mezcladas. (Lee, Kim, & Hyeon, 2006)

6.8.2. Métodos de activación

Dentro de los métodos más representativos en la activación de los materiales de carbono poroso según (Lee, Kim, & Hyeon, 2006) son:

- Activación química, activación física y una combinación de los procesos de activación física y química.
- Activación catalítica de precursores de carbono usando metal, sales o compuestos organometálicos.
- Carbonización de mezclas de polímeros compuestas por un polímero carbonizable y un polímero pirolizable.
- Carbonización de un aerogel de polímero sintetizado bajo condiciones de secado supercríticas.

6.8.3. Síntesis de materiales de carbono mesoporosos

Síntesis de carbono mesoporosos uniformes usando plantillas de sílice mesoporosos:

- *Síntesis de carbonos mesoporosos ordenados con varias estructuras de poros:* se puede controlar la estructura de poro y la dimensión en los materiales de sílice mesoporosos mediante las condiciones experimentales como la proporción del precursor de sílice el tensioactivo y la longitud de la cadena de tensioactivo. Con

estas sílices mesoporosas los materiales tienen tamaños de poro uniformes y grandes áreas superficiales y, las sílices soporosas con estructuras de poros interconectados han sido utilizado con éxito como plantilla para la síntesis de materiales mesoporosos de carbono con poros interconectados. En la figura 60 se presenta la estrategia de plantilla general utilizada para la síntesis de mesoporosos ordenados usando sílice mesoporosa. (Lee, Kim, & Hyeon, 2006)

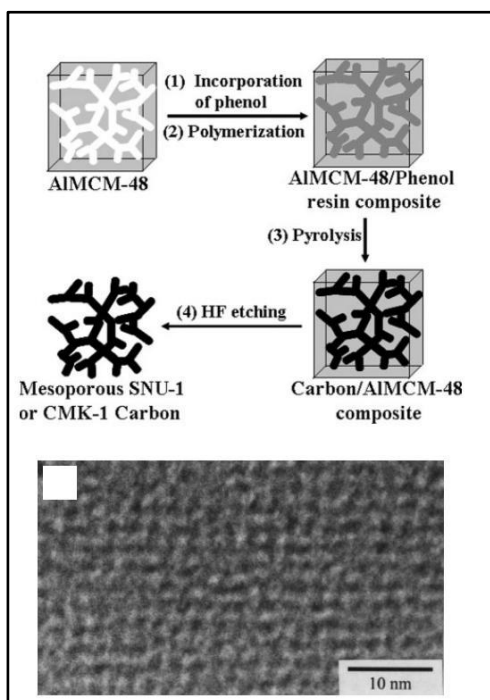


Figura 60. Representación esquemática de la formación de un carbono mesoporoso ordenado y su imagen TEM de un carbono SNU-1 mesoporoso.

Fuente: Lee, Kim, & Hyeon, 2006

- *Carbones mesoporosos con mesoporos ultra grandes*: muchos carbonos mesoporoso se pueden sintetizar usando diferentes sílices mesoporosas, donde los tamaños del poro son menos de 10nm el cual está determinado por el espesor de la pared de la plantilla de sílice. Por otro lado, para sintetizar materiales de carbono

mesoporosos con tamaños de poro mayor que 10 nm, se pueden emplear espumas de sílice mesocelular y el esquema de este proceso se demuestra en la figura 61.

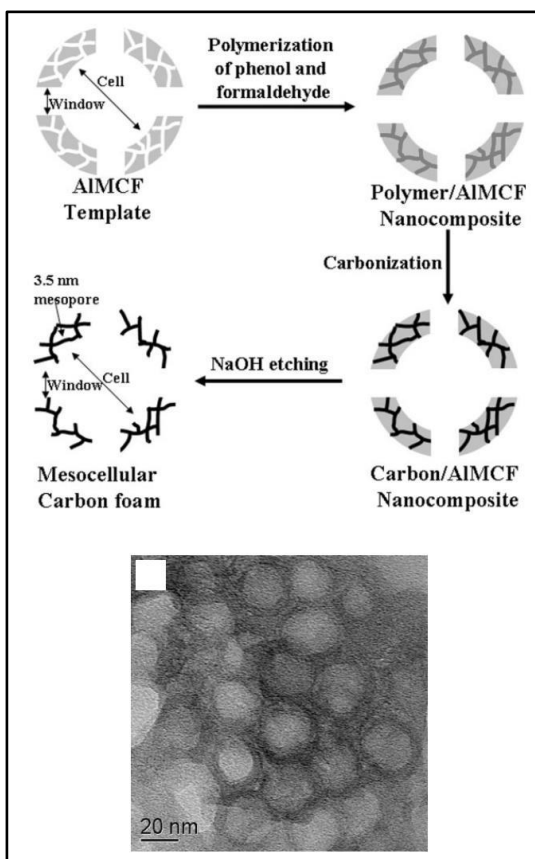


Figura 61. Síntesis de una espuma de carbono mesocelular.

Fuente: Lee, Kim, & Hyeon, 2006

- *Carbones mesoporosos con paredes de poros grafiticos:* los carbonos mesoporosos con buen grafito poseen buena conductividad eléctrica, su uniformidad y sus poros grandes, se encuentran muchas aplicaciones importantes, incluidos los electrodos para condensadores electroquímicos de doble capa, celdas de combustible y biosensores. Sin embargo, es difícil sintetizar los materiales de carbono con área superficial alta y buena cristalinidad grafica. Para ello, se sintetizó carbonos mesoporosos ordenados con paredes de poros grafiticos a través de la conversión

de compuestos aromáticos y por carbonización a alta presión utilizando un autoclave, así, los marcos de carbono fueron compuestos por laminas discoides de grafeno que se autolinearon perpendicularmente a las paredes de la plantilla durante la síntesis. Por otro lado, también se sintetizaron materiales de carbono mesoporosos de grafitos por simple impregnación de poli cloruro de vinilo y posterior carbonización. (Lee, Kim, & Hyeon, 2006)

- *Síntesis rentable y directa de carbonos mesoporosos*: el procedimiento de síntesis general para los carbonos mesoporosos ordenados utilizando plantilla de sílice mesoestructurada es la siguiente:
 1. Preparación del compuesto mesoestructurada de sílice/surfactante (entre 2 y 3 días).
 2. Eliminación del tensioactivo por calcinación o extracción con disolvente.
 3. La generación de los sitios catalíticos dentro de paredes de la mesoestructura para la polimerización y si es necesario la recalcinación.
 4. La incorporación del precursor de carbono polimérico, por ejemplo: Fenol, FA o sacarosa en los poros de la plantilla de sílice mesoporosa.
 5. La polimerización del precursor de carbono polimérico
 6. Carbonización
 7. La retirada de la plantilla de sílice con solución de HF o NaOH.

Por medio de la síntesis de plantillas se limita la aplicación de carbonos mesoporosos a pesar de muchas características únicas y deseables, por ello, los autores (Lee, Kim, & Hyeon,

2006) resaltan la búsqueda de procedimientos de síntesis más sencillos para las amplias aplicaciones de carbones. Entre ellos se encuentra un trabajo reportado sobre la síntesis de carbono microporosos uniforme mediante la carbonización directa de materiales de mesofase de sílice templados con ciclodextrina y durante la preparación de los materiales de mesofase de ciclodextrina/sílice, ácido sulfúrico se utilizó en lugar de ácido clorhídrico, porque cataliza la carbonización de ciclodextrina. Los resultados dieron un tamaño de poro de la resultante inferior a 2nm, es decir, microporosos.

6.8.4. Síntesis de materiales de carbono macroporosos

- *Síntesis de materiales de carbono macroporosos utilizando sílices partículas como plantillas:* para esta síntesis se usan materiales con núcleo/carcasa y estructuras huecas, donde el resultado del tamaño de poro es controlado variando el tamaño de partícula de las esferas de sílice. (Lee, Kim, & Hyeon, 2006) menciona que se sintetizaron materiales de carbono macroporosos usando ópalos de sílice sintéticos que fueron hechos mediante autoensamblaje de esferas de sílice de tamaño uniforme y se evidencia la figura 62.

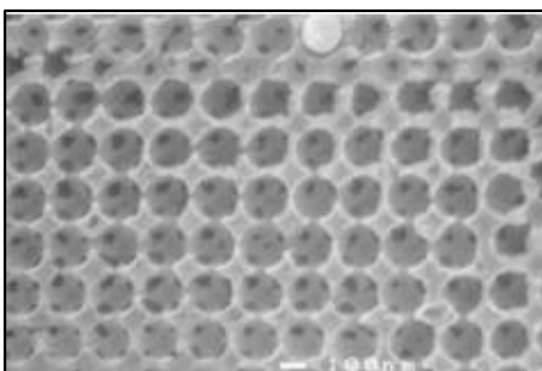


Figura 62. Imagen SEM de un carbón grafitico macroporosos sintetizado usando plantillas de ópalo de sílice de tamaño de nm.

Fuente: Lee, Kim, & Hyeon, 2006

- *Síntesis de nanoestructuras de carbono 1D usando anódico plantillas de óxido de aluminio (AAO):* se preparan películas de óxido de aluminio anódico (AAO) por anodización electroquímica de aluminio metálico en electrolito células y estas películas generalmente tienen una disposición hexagonal con estructuras de panal con un tamaño de poro uniforme y regular distancia de poro a poro. El esquema para la síntesis de la preparación de nanotubos de carbono usando plantillas AAO se ve en la Figura 63.

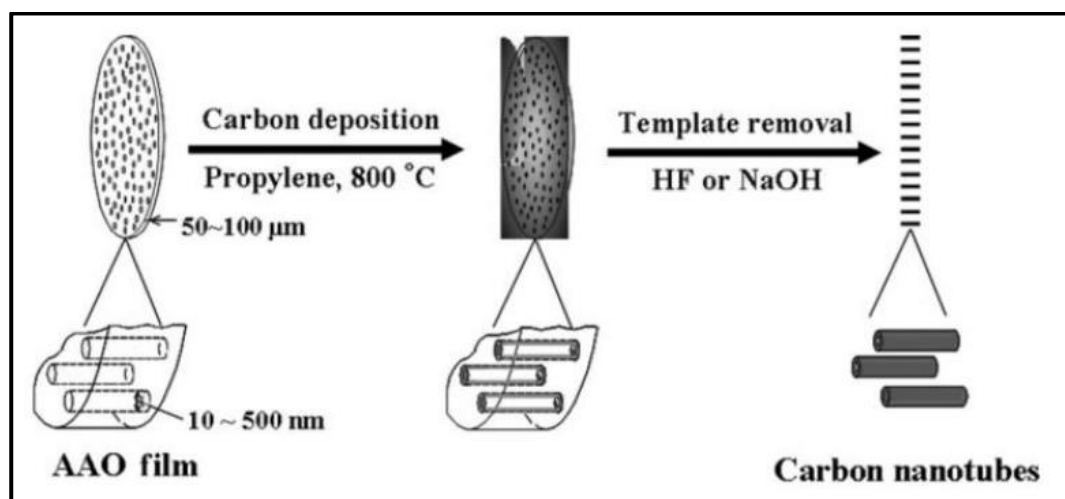


Figura 63. Esquema sintético para preparación de nanotubos de carbono usando plantillas AAO.

Fuente: Lee, Kim, & Hyeon, 2006

6.9. Nanocristales de grafito

Para (Li, Liu, Gu, Tang, & Huang, 2019), los Nanocristales de grafito permiten una estructura ordenada de alto nivel dentro del carbono duro con una eficiencia mejorada, estructura jerárquicamente porosa proporcionando más entrada para la difusión de iones Na^+ , disminuir la distancia de difusión de iones Na^+ y un gran rendimiento en tasa. También, los autores concluyen que la creación de Nanocristales de grafito en HC a través de síntesis en catalizador, se demuestra una manera eficiente de disminuir el grafito defectuoso y aumenta el grado de grafitización.

En una investigación realizada por (Amini, Kalaantari, Garay, Balandín, & Abaschian, 2011), se realizó una nueva técnica para generar el crecimiento de los Nanocristales de grafito, la cual, consistía en disolver carbono en un metal a temperaturas específicas para luego permitir que el carbono disuelto se nucleara y creciera sobre la masa fundida a una temperatura más baja. Para ello, se utilizó microscopía óptica detallada, espectroscopía Raman y microscopía electrónica de barrido para caracterizar las capas crecidas consiguientes. Dentro de las películas crecidas se determinaron arrugas facetadas sobre las capas en las que conservaban su continuidad, donde se suponen que las arrugas son debido al desajuste del coeficiente de expansión térmica entre el sustrato metálico y el grafito. Sin embargo, las arrugas no dependían del tipo de sustrato metálico.

6.9.1. Fabricación de Nanocristales de grafito

Para (Li, Liu, Gu, Tang, & Huang, 2019), explican que en la preparación de nanocristales de grafito inicialmente es con tejido de algodón como materia prima en soluciones de $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ con celulosa para asegurar la distribución uniforme de los iones de níquel en el precursor, donde este se carboniza y las nanopartículas de Ni se actúa como catalizador para la creación de grafito nanocristales. En la figura 64 se evidencia el esquema sobre la fabricación de los Nanocristales de grafito.

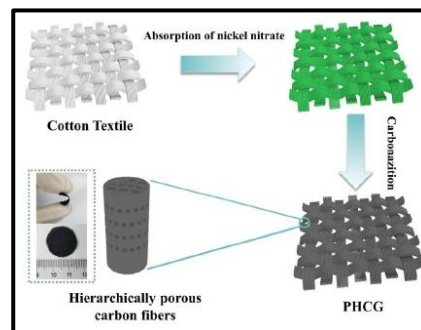


Figura 64. Esquema sobre la fabricación de Nanocristales de grafito.

Fuente: Li, Liu, Gu, Tang, & Huang, 2019

6.9.2. Usos

- Recubrimiento de electrodos a base de papel con nanocristales para la detección de genomas.
- Baterías de iones de sodio de alta velocidad con eficiencia Coulombic inicial mejorada.
- Al acoplarse con CO e Ir, funciona como electrocatalizador eficiencia y de pH amplio para la evolución de hidrógeno.

6.10. Fullerenos

Los fullerenos son aquella tercera forma del carbono que posee forma de cúpula geodésica, considerado de los más puros y su historia comenzó con el estudio de los clusters de carbono por el bombardeo de grafito con una fuente laser y un análisis posterior de los fragmentos producidos con un espectrómetro de masas. (Bracamonte & Mayorca, 1994). Además, (LUMITOS AG, s.f.) confirma que los fullerenos están ubicados en la tercera posición en la forma más estable del carbono, luego del diamante y el grafito, siendo este acontecimiento un descubrimiento reciente y se ha popularizado por la belleza estructural, su versatilidad de síntesis de nuevos compuestos, pues bien, se presentan en forma de esferas, elipsoides o cilindros.

6.10.1. Estructura

La estructura de los fullerenos consiste en estructuras huecas formadas exclusivamente por carbono y si existen derivados sustituidos con una forma aproximadamente esférica, estrictamente un poliedro con elevado número de caras. (Herráez, 2011)

Para este material, cada átomo de carbono está enlazado a otros tres, ósea, posee un estado de hibridación sp^2 . Sin embargo, la estructura no es plana, sino que en estos enlaces de cada carbono se desvían y como consecuencia se produce una tensión y elevada simetría la distribuye por la estructura. (Herráez, 2011)

6.10.2. Propiedades

- *Resistencia física:* debido a la forma cerrada y simétrica aporta alta resistencia física, y al estar en presiones extremas se deforman, pero regresan a su estructura inicial al relajar estas presiones. (Herráez, 2011)
- *Densidad:* la densidad de los fullerenos está cercana a los 1.65 y pueden solubilizarse en disolventes como benceno, tolueno y cloroformo. (Herráez, 2011)
- *Propiedades lubricantes:* ya que los fullerenos poseen uniones intermoleculares débiles mediante las fuerzas de Van der Waals, el hollín de este posee propiedades lubricantes. (Herráez, 2011)

6.10.3. Características

Según (Santos, 2017) los fullerenos poseen las siguientes características:

- Son estructuras huecas
- Se pueden formar en la naturaleza como consecuencia de fuegos o rayos
- Los C_{60} se encuentran en la forma de un polvo amarillo
- Se deforman, pero regresan a su estado inicial cuando la presión a la que están sometidos disminuye.
- Normalmente tiene un tamaño de 1nm, pero pueden llegar a medir hasta casi 10nm.

- Requieren temperaturas mayores a 1000°C para que sean destruidos.
- Su forma cerrada y simétrica les aporta una gran resistencia de hasta 3000 atm.
- La densidad de los fullerenos es de aproximadamente 1.5
- Posee propiedades lubricantes, debido a que sus fuerzas intermoleculares por Van Der Waals son débiles.
- A temperaturas muy bajas los fullerenos se subliman, sin perder las esferas.
- Químicamente las moléculas de fullereno son muy electronegativas y forman enlaces con átomos donadores de electrones.
- Las moléculas C60 se condensan formando un sólido con enlaces débiles (fullerita).

6.10.4. Tipos de fullerenos

(CH, 2019) Expone que los fullerenos tienen variaciones estructurales (Figura 65) y describe los siguientes ejemplos:

- *Nanotubos o fullerenos cilíndricos:* estos son de forma hueva y de dimensiones muy reducidas. Están formados de carbono anchos y pueden variar desde unos pocos nanómetros hasta varios milímetros de longitud con un extremo cerrado y otro abierto. Su uso principal es la industria electrónica, la tecnología espacial, y en baterías de papel. (CH, 2019)
- *Racimos de Buckyballs:* es el fullereno más pequeños pues no hay dos pentágonos que compartan un borde y se encuentra en la naturaleza, donde el miembro más pequeño es C20 (dodecaedro) y el más común es el C60 (icosaedro o similar a una pelota de futbol, veinte hexágonos y doce pentágonos) (CH, 2019)

- *Megatubos*: es de los fullerenos grandes con tubos de diámetros mayor que los nanotubos y sus paredes están preparadas con diferentes espesores, los cuales son utilizados principalmente en el transporte de moléculas de diferentes tamaños. (CH, 2019)
- *Polímeros*: macromoléculas conectadas por enlaces químicos covalentes, compuestos por cadenas de carbono y a altas presiones y temperaturas se forman polímeros bidimensionales y tridimensionales. (CH, 2019)
- *Nano-cebolla*: forma de buckyball sólido, con partículas esféricas y basadas en múltiples capas de carbono (CH, 2019).
- *Dímeros de “bola y cadena” unidos*: compuesta por dos bolas de buckyballs unidas por una cadena de carbono. (CH, 2019)
- *Anillos de fullereno*

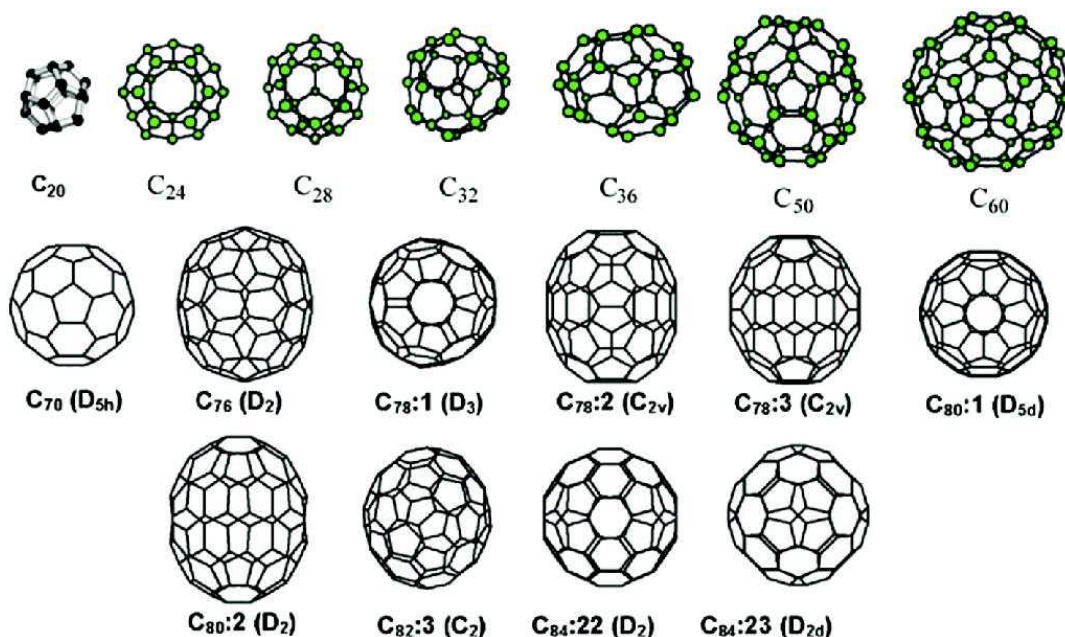


Figura 65. Tipos comunes de Fullerenos.

Fuente: <https://nanova.org/fullereno/>

Por otro lado (López & Kharissova, 2002), exponen que los fullerenos son moléculas grandes en forma de esferas y el más común es el C_{60} , pero sin embargo existen otros como el C_{70} , C_{76} , C_{84} , C_{240} , C_{540} y C_{96} que contienen más carbonos, y los que contienen menos que son C_{32} , C_{44} , C_{50} y C_{58} , los cuales generan presentan un arreglo geométrico cuasi esférico o en forma de elipsoide. Del mismo modo, dichos autores mencionan que los nanotubos son un fullereno muy grande en forma lineal cómo ve la figura 66.

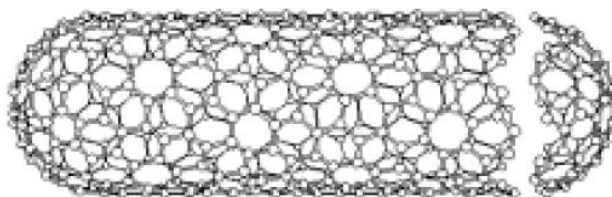


Figura 66. Estructura de los nanotubos.

Fuente: López & Kharissova, 2002

6.10.5. Producción

(López & Kharissova, 2002), determinan que por medio de observaciones de fullerenos en los procesos de perfeccionamiento se lleva a la descripción de dos métodos de producción:

- *Método original: grupo Smalley- Kroto- Curl (Rice 1985):* este método se denomina evaporación de grafito, el cual consiste en calentar el grafito en una ampolla de cuarzo en un horno a 1200°C y los fullerenos son formados cuando el carbón vaporizado se deposita y condensa en una atmosfera inerte, donde generalmente se usa mezcla de argón por ser un gas noble, luego dispara un láser específico del equipo y este fue desarrollado para el montaje, con ello, los átomos

pierden energía formando aglomerados y el material se recolecta enfriando un ánodo de cobre. (López & Kharissova, 2002)

- *Método Kroto (Sussex 1989)*: consiste en una campana de cristal donde se calientan varillas de carbón utilizando placas de recolección de hollín, fabricadas de bromuro de potasio. Seguidamente, la cámara se evacúa y se deja ingresar helio, se purifica la cámara y se ingresa helio nuevamente. En este caso el carbón se deposita en forma de hollín en la campana de vidrio. (López & Kharissova, 2002)
- *Método de depositación termoquímica de vapor*: para la producción controlada de nanotubos más perfectos y con características requeridas por los investigadores, por lo cual el método utilizado es en base a la depositación termoquímica de vapor CVD, siendo superior a otros respecto a pureza, concentración y alineación controlada. “También, se sugiere que la tasa de crecimiento del nanotubo se incrementa con el decrecimiento de tamaño de la partícula catalítica debido a la corta longitud de difusión de los átomos de carbono, por lo tanto, a medida que el diámetro de nanotubos (o partículas) decrece, la incrementada tasa de crecimiento resulta una menor frecuencia de formación de las capas entre los compartimentos.” (López & Kharissova, 2002)

6.10.6. Reactividad de los fullerenos

(León, 1999) explica que la disponibilidad de los fullerenos en cantidades macroscópicas ha abierto el camino al desarrollo de una “*química tridimensional*”, sin precedentes sobre moléculas

esféricas formadas únicamente por átomos de carbono. La mayor parte de la química de los fullerenos ha sido desarrollada sobre la molécula de C_{60} , m mucho menos trabajo sobre la molécula de C_{70} y se han descrito experimentos en fullerenos superiores. Algunas de las reacciones son los siguientes:

- *Reacciones de adición:* los átomos de carbono del esqueleto de C son piramidalizados con energía de tensión de ca 8kcal/mol por átomo de carbono, representando un 80% del calor de formación. La fuerza motriz en las reacciones de adición que genera un elevado organofullerenos debido a la tensión por la jaula del fullereno con hibridación tetraédrica y la mayor parte de las reacciones son exotérmicas. (León, 1999)
- *Reacciones de transferencia electrónica:* la reducción química de los fullerenos puede conseguirse fácilmente mediante la reacción con metales, tales como alcalinos y alcalinotérreos para generar los aniones C_{60}^{n-} . Además, los fullerenos intercalados poseen superconductividad junto a los metales alcalinos conduciendo a la exploración de complejos de transferencia de carga C_{60} con diferentes moléculas organizas dadoras de electrones como contraiones en la búsqueda del estado metálico o de propiedades superconductoras. (León, 1999)
- *Reacciones de apertura de C_{60} Fullerenos endoédricos:* la geometría peculiar de la molécula de C_{60} especialmente aquellos relacionados con la química supramolecular hacia el desarrollo de estructuras “abiertas” permitiendo una interacción huésped-receptor con potenciales aplicaciones que podrían incluir complejación catálisis o protección de especies inestables. Los primeros ejemplos de metalofullerenos endoédricos fueron preparados mediante método de

vaporización con láser a altas temperaturas. Sin embargo, el mejor método de preparación es el arco de carbono incandescente utilizando mezclas de grafito y el material huésped de composites. (León, 1999)

6.10.7. Aplicaciones

(Herráez, 2011) Menciona que de las aplicaciones de los fullerenos avanzan de manera muy lenta y entre esas se encuentran actualmente son: química de síntesis, catálisis, fabricación de células solares, fotodetectores de rayos X, telecomunicaciones, recolectores radicales libre, pilas de combustible, y en dispositivos fotónicos por las propiedades ópticas expuestas a la luz.

Además, (León, 1999) expone que los fullerenos fueron un nuevo material molecular con amplio potencial en diversas disciplinas y dentro de estas aplicaciones se tienen:

- *Los fullerenos en la ciencia de materiales:* son aplicables en materiales polímeros debido a las propiedades múltiples, fácil procesabilidad y su manejo, dando potencialidad al polímero, donde se logran obtener polímeros electroactivos y con limitadores ópticos. Una forma simple para que los polímeros y los fullerenos se mezclen es que ambos componentes estén en fase sólida o en disolución en un disolvente común que luego será evaporado, conduciendo a que las mezclas sean más homogéneas y conduce a interacciones no covalentes entre dos componentes. (León, 1999)

Además, los fullerenos pueden jugar un papel en los cristales líquidos y, pues bien, ya se ha descrito el primer cristal líquido termo trópico conteniendo dos unidades de colesterol unidas a

un metanofullereno con un comportamiento mesomórfico. Del mismo modo, los fullerenos pueden ser modificados para su aplicación en los dispositivos electrónicos y en aplicaciones de sistemas fotosintéticos artificiales, pues, la unión covalente de unidades dadoras de electrones de C_{60} conduce tras irradiación aun estado con separación de cargas y estos sistemas pueden imitar los procesos de fotosíntesis y construcción de células fotovoltaicas. (León, 1999)

- *Aplicaciones biológicas de fullerenos:* el primer ejemplo de la aplicación de los fullerenos en la actividad biológica de un derivado C_{60} , fue en un órgano-fullereno soluble en agua sinterizado en el laboratorio mostrando una actividad contra los virus de inmunodeficiencia humana que causan enfermedades como SIDA, HIV-1 y HIV-2. (León, 1999)

Por otro lado, el autor (Kharissova & Méndez, 2002), define que los fullerenos son aplicables en:

- *Lubricantes:* en estos materiales las esferas hacen más fácil el deslizamiento entre superficies y los fullerenos deben ser modificados para que contengan átomos se conviertan en esfera.
- *Ópticas:* debido a que los fullerenos poseen propiedades bajo la acción de la luz ultravioleta y puede ser utilizada en fotolitografía.
- *Conducción eléctrica:* los fullerenos poseen propiedades de conducción eléctrica a temperaturas desde 10 a 40K.

7. Capítulo IV. Alternativas ambientalmente sostenibles en los procesos que involucran la combustión del carbón

La extracción del carbón es una actividad con alto grado de impactos ambientales, así como lo es su tratamiento en el proceso de beneficio mediante combustión, esto hace necesario contrarrestar y velar por la protección de los recursos naturales, impulsando a mejorar los procesos mediante técnicas y prácticas en pro de la protección ambiental sin escatimar esfuerzos hacia un desarrollo sostenible. En este capítulo indicaran aquellos procesos que involucran combustión del carbón y las técnicas ambientalmente sostenibles que se pueden aplicar a estos.

7.1.Ferroaleaciones

Según (Sistema Español de Inventario de Emisiones Metodologías de estimación de emisiones, 2020), “Ferroaleación es un término genérico para designar las aleaciones de hierro que poseen un elemento constitutivo además del carbón y que se caracterizan por conferir cualidades distintivas al acero y al hierro fundido.”

(Bilogistik SA, 2016) Nos expone que existe un número elevado de ferroaleaciones los cuales dependen si su objetivo sea la desoxidación del hierro o el aporte a otros metales para obtener aceros con características definidas y para (Ministerio de industria y energía), las principales ferroaleaciones son las de manganeso y silicio, pero se pueden encontrar con otros elementos químicos como bario, cobalto, cobre, molibdeno, níquel, fósforo, titanio, tungsteno, vanadio y zirconio, entre otros. Enseguida, se dan a conocer los más comunes:

7.1.1. Ferromanganeso

Es una aleación del hierro mediante la reducción carbotérmica, reacción química de minerales y óxidos de manganeso y es utilizado para la fabricación de varios tipos de acero a modo desulfurante, eliminando las burbujas de nitrógeno que no se pueden formar durante la fabricación y reduciendo la cantidad de óxido de hierro en el proceso de producción.

“Más del 90% de la producción mundial de manganeso se utiliza en forma de ferroaleación principalmente en la industria del acero, donde se utiliza tanto en el proceso en sí mismo como componente de la aleación como un agente de desulfuración y desoxidante, haciendo la escoria más fluida. Casi todos los aceros contienen Mn, en proporciones que varían de 0,05% a 2%, alcanzando un 12% en algunos casos.” (Euskatfund SL, s.f.)

- *Fabricación*

La fabricación del Ferro Manganeso es producida por varias formas según (Grupo SOM , s.f.):

_Por reducción electrometalúrgica, en hornos de arco sumergido, usando un reductor controlado en Al, Si y Carbón para reducir minerales de manganeso.

_Adición de fundentes para controlar puntos de fusión y diluyentes para controlar la composición química.

_La fabricación está basada en el control estadístico del proceso, lo que da gran fiabilidad a la hora de obtener un producto regularmente ajustado a las especificaciones requeridas.

_La aleación es colada en panes y posteriormente triturada mecánica o manualmente a un tamaño de grano previamente definido.

Dependiendo del tipo de producto en la fabricación de ferroaleaciones, sufre variaciones y esto se ve reflejado en la Figura 67, donde se evidencia como es el proceso de la obtención de ferroaleaciones para obtener ferromanganeso o silicomanganeso.

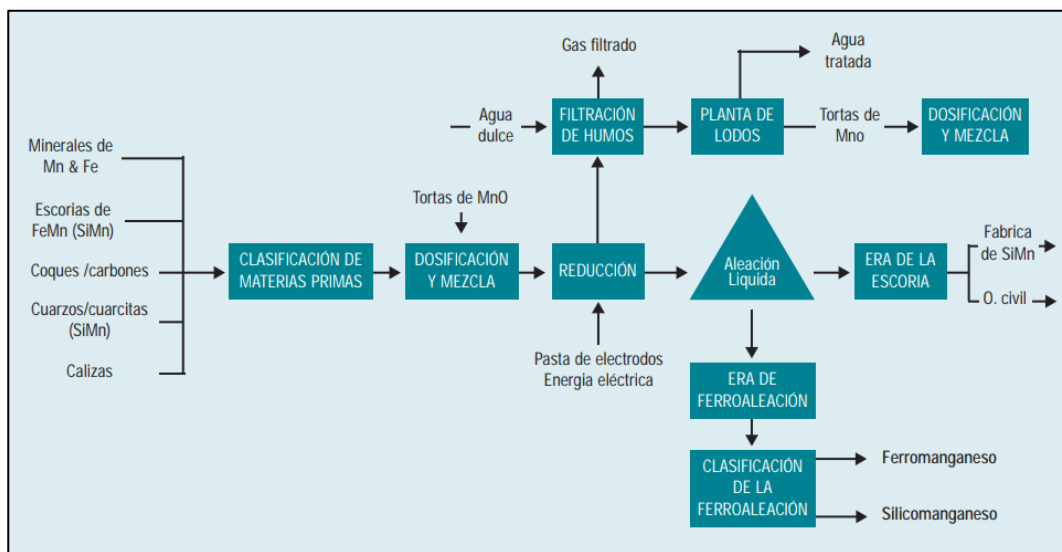


Figura 67. Esquema de obtención de ferromanganeso y silicomanganeso.

Fuente: (Ministerio de industria y energía)

- *Propiedades físicas:*

Define las propiedades físicas del Ferromanganeso así:

_Punto de fusión: 1150 ° C a 1350 ° C

_Gravedad específica: 4,5 a 5,5 TM / m³

Para (Minerales de Colección s.l. , s.f.) las propiedades son las siguientes:

- Densidad: 6.7
- Color: Negro, negro azulado, negro parduzco, gris metálico,
- Brilla: terroso, sub metálico
- Morfología: frecuentemente botrodial

El ferromanganeso otorga 3 tipos de producto dependiendo de la cantidad de carbono, estos son:

_Ferromanganeso alto en carbono: son ferroaleaciones con base de Fe y Mn que contienen % de carbono para aporte simultáneo de ambos elementos, fundamentalmente el Mn. Este producto tiene una acción desgasificante por la afinidad química por nitrógeno, que evita la formación de porosidades características. (Grupo SOM , s.f.)

(TGBY Co.Ltd , s.f.) Expone las siguientes composiciones químicas del ferromanganeso alto en carbono (Tabla 34).

Tabla 34. Composición química de la categoría del Ferromanganeso alto en carbono.

CATEGORIA	LOS GRADOS	COMPOSICIÓN QUÍMICA						
		Minnesota	C	Si		PAGS		S
				yo	Yo	yo	Yo	
≤máx.								
FERROMANGANESO ALTO EN CARBONO	FeMn78C8.0	75.0-82.0	8.0	1.5	2.5	0.2	0.3	0.03
	FeMn74C7.5	70,0-77,0	7.5	2.0	3.0	0.3	0.4	0.03
	FeMn68C7.0	65,0-72,0	7.0	2.5	4.5	0.3	0.4	0.03

Fuente: (TGBY Co.Ltd , s.f.)

_Ferromanganeso de carbono medio: minimizan la formación de carburos y son agentes desoxidantes poderoso, también una acción desulfurante muy útil en fabricación de aceros y son ampliamente empleados en aleación Hatfield. (Grupo SOM , s.f.)

(TGBY Co.Ltd , s.f.) Expone las siguientes composiciones químicas del ferromanganeso de carbono medio (Tabla 35):

Tabla 35. Composición química de la categoría del Ferromanganeso de carbono medio

CATEGORIA	LOS GRADOS	COMPOSICIÓN QUÍMICA						
		Minnesota	C	Si		PAGS		S
				yo	Yo	yo	Yo	
≤máx.								
Ferromanganeso de carbono medio	FeMn82C1.0	78.0-85.0	1.0	1.5	2.0	0.2	0.35	0.03
	FeMn82C1.5	78,0-85,0	1.5	1.5	2.0	0.3	0.35	0.03
	FeMn78C2.0	75,0-82,0	2.0	1.5	2.5	0.3	0.40	0.03

Fuente: (TGBY Co.Ltd , s.f.)

_Ferromanganeso de bajo en carbono: FE. (Grupo SOM , s.f.)

(TGBY Co.Ltd , s.f.) Expone las siguientes composiciones químicas del ferromanganeso de carbono medio (Tabla 36):

Tabla 36. Composición química de la categoría del Ferromanganeso de carbono medio

CATEGORIA	LOS GRADOS	COMPOSICIÓN QUÍMICA						
		Minnesota	C	Si		PAGS		S
				yo	Yo	yo	Yo	
≤máx.								
Ferromanganeso bajo en carbono	FeMn88CO.2	85.0-92,0	0.2	1	2	0.1	0.3	0.02
	FeMn84CO.4	80,0-87,0	0.4	1	2	0.15	0.3	0.02
	FeMn84CO.7	80,0-87,0	0.7	1	2	0.2	0.37	0.02

Fuente: (TGBY Co.Ltd , s.f.)

7.1.2. Ferrosilicio

Para (Bilogistik SA, 2016), “el Ferrosilicio es una aleación compuesta por hierro y silicio con un contenido que oscila entre el 40% y el 80%, resultando este porcentaje la diferenciación de calidad del producto. La obtención de esta ferroaleación se lleva a cabo mediante la reducción de la sílice a través del carbón de coque en presencia de mineral de hierro en altos hornos.”

Durante su transporte el polvo que emite es altamente nocivo para el medioambiente y que puede producir irritaciones en las vías respiratorias y, tiene la característica de producir hidrógeno cuando entra en contacto con humedad que puede llegar a producir explosiones o deflagraciones.

- *Propiedades*

“Es estable y solamente es atacable por los ácidos nítrico y fluorhídrico cuando está en forma de polvo. En contacto con la humedad o el agua, puede desprender hidrógeno y se pueden formar mezclas inflamables o explosivas con el aire.” (MetalCast, s.f.)

- *Usos*

(MetalCast, s.f.) define a los usos del Ferro Silicio como:

- Desoxidante en la fabricación de aceros tanto de construcción como inoxidable para evitar una excesiva descarburación.
- Grafitizante para la fabricación de fundiciones grises.
- Como vehículo para la adición de Silicio como elemento de aleación mejorando el comportamiento de la aleación frente a la corrosión y las altas temperaturas.
- Base de la fabricación de Ferro Silicio Magnesio.
- Para la producción de Magnesio a través del proceso Pigdeon a partir de la dolomita.
- Para la producción de aceros especiales a partir de los grados especiales de bajo Al, etc.

- *Fabricación*

La obtención de Ferro silicio se lleva a cabo por la reducción de sílice mediante el carbón de coque en presencia de mineral de hierro en altos hornos para contenidos hasta de 15% de silicio

o en hornos de arco eléctrico para contenidos mayores. (MetalCast, s.f.). El diagrama del proceso de fabricación de los Ferrosilicios se ve reflejado en la Figura 67.

7.1.3. Ferrocromo

(Bilogistik SA, 2016), expresa que “Es una aleación que se obtiene a partir de la reducción del mineral de cromo o cromita y que supone el uso de más del 90% de la producción total de dicho mineral. Esta ferroaleación está clasificada en el sector en función de su contenido en carbono, distinguiéndose entre ferrocromo carburado (del 4% al 10%), ferrocromo afinado (del 0,5% al 4%) o ferrocromo superafinado (del 0,01% al 0,5%) y donde cada tipo posee una aplicación distinta.”

Como hemos visto, este tipo de materiales requieren un tratamiento especial tanto a la hora de manipularlos, almacenarlos, como de transportarlos, ya que, por sus características, pueden tener consecuencias nocivas tanto para el personal que trabaja con ellos como para el medioambiente. Y, como se puede suponer, estas características especiales hacen de las ferroaleaciones productos relativamente caros.

Para (Ecureed, s.f.), el ferrocromo es una aleación de hierro que contiene 45-75% de cromo y otros elementos de aleación, siendo el principal para la producción de acero inoxidable junto con el ferroníquel. Además, este sitio web indica que es un material con dependencia del carbono y que su clasificación es la siguiente:

- *Ferrocromo Carburado o con poco carbono:* Es aquel ferrocromo alto en carbono (FeCrAC) con un contenido de 4 – 10 % de Carbono.
- *Ferrocromo afinado o medio carbón:* Se denomina Ferrocromo afinado al ferrocromo medio en carbono (FeCrMC) con un contenido de 0.5 – 4 % de Carbono.

- *Ferrocromo superafinado o alto carbón:* Se denomina Ferrocromo afinado al ferrocromo medio en carbono (FeCrBC) con un contenido de 0,01 – 0.5 % de Carbono.
- *Fabricación*

En el proceso de obtención de este material, tiene por materia prima la cromita Cr_2FeO_4 obtenido en la reducción carbo térmica a altas temperaturas, es decir, el mineral de cromita se reduce por el carbón y el coque para formar una aleación hierro-cromo llamada ferrocromo. (Ecureed, s.f.)

“El calor aportado de esta reacción viene dado por el arco eléctrico formado entre las puntas de los electrodos en la parte inferior del horno y la solera de este, creando una temperatura de aproximadamente 2800°C este arco eléctrico se produce de forma intermitente. Cuando hay suficiente fundido de ferrocromo se realiza una colada, el fundido extraído es la aleación de ferrocromo y la escoria.” (Ecureed, s.f.).

De este proceso se obtiene un ferrocromo que se solidifica en piezas de grandes dimensiones, se separa la escoria y se almacena para que luego sea triturado, tamizado y se granula por corriente de agua según las especificaciones que se requieran de este.

- *Propiedades*

El ferrocromo es un mineral que proporciona resistencia a la corrosión y a la oxidación, además de mejorar a la resistencia al desgaste. Las propiedades definidas por (COMETAL) se visualizan en la Tabla 37.

Tabla 37. Propiedades del Ferrocromo.

ESTADO FÍSICO	Sólido
COLOR	Gris metálico
OLOR	Inodoro
PUNTO DE FUSIÓN	Superior a 1.500°C
PUNTO DE EBULLICIÓN	2.700°C a 3.000°C
DENSIDAD APARENTE	$3,2 - 3,7 \text{ g/cm}^3$
DENSIDAD RELATIVA	$6 - 9 \text{ g/cm}^3$

Fuente: www.cometalsa.com

- Usos

Aproximadamente más del 80% de la producción de ferro cromo se destina como agente aleando de cromo a la fabricación de acero inoxidable.

7.1.4. Procesamiento de las ferroaleaciones

Ferroaleaciones permiten la fabricación del acero en el horno eléctrico (ver Figura 68)

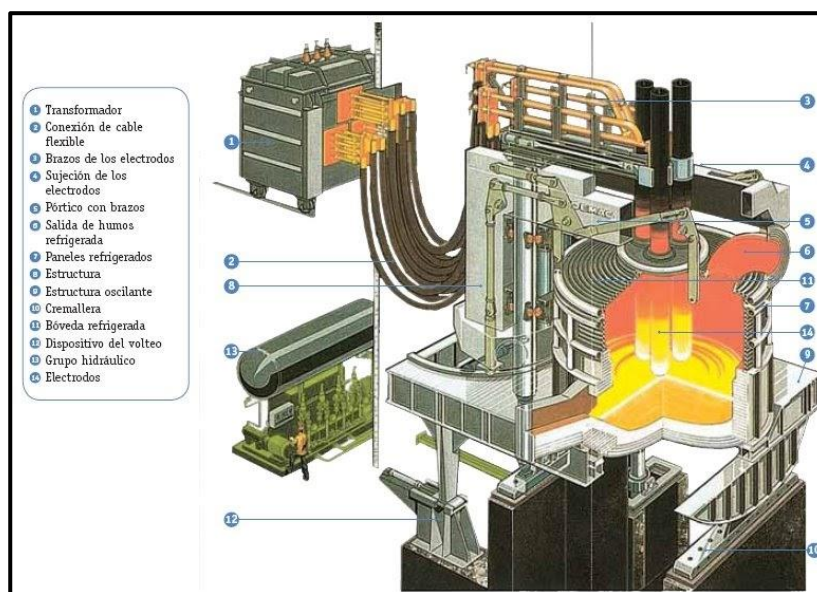


Figura 68. Horno eléctrico para la fabricación de ferroaleaciones como el acero.

Fuente: <http://todometalesferrosos.blogspot.com/2009/02/horno-electrico.html>

Las partes más importantes del horno eléctrico son:

- *Transformador Eléctrico*. Convierte el voltaje a 900 V y transforma la corriente eléctrica altera en corriente continua.
- *Cables Flexibles*. Conducen la electricidad de los electrodos.
- *Brazos de los electrodos*. Permiten que los electrodos se acerquen o se alejen de la chatarra para que salte el arco eléctrico.
- *Sujeción de electrodos*.

-*Pórtico con brazos hidráulicos.* Permite quitar y poner la tapadera del horno eléctrico para introducir la chatarra, las ferroaleaciones y el fundente.

- *Salida de humos refrigerada.* Conduce los humos a un filtro (cortina de agua) eliminando las partículas en suspensión.

- *Estructura oscilante.* Permite inclinar el horno para extraer el acero fundido. Para ello dispone de un dispositivo de volteo hidráulico.

- **Funcionamiento.**

El funcionamiento del horno eléctrico es el siguiente (ver figura 69):

1. Se quita la tapadera y se introduce la chatarra y el fundente.
2. Se cierra el horno y se acercan los electrodos a la chatarra, para que salte el arco eléctrico y comience a fundir chatarra.
3. Cuando la chatarra está fundida, se inyecta oxígeno para eliminar los elementos indeseables del baño, como silicio, magnesio, fósforo.
4. Se inclina el horno y se extrae la escoria. A continuación, se le añade el carbono y ferroaleaciones y se sigue calentando hasta que las adiciones se disuelvan y se uniformice la composición del baño.
5. Se inclina el horno y se vierte el acero en la cuchara, que lo llevará al área de moldeo.

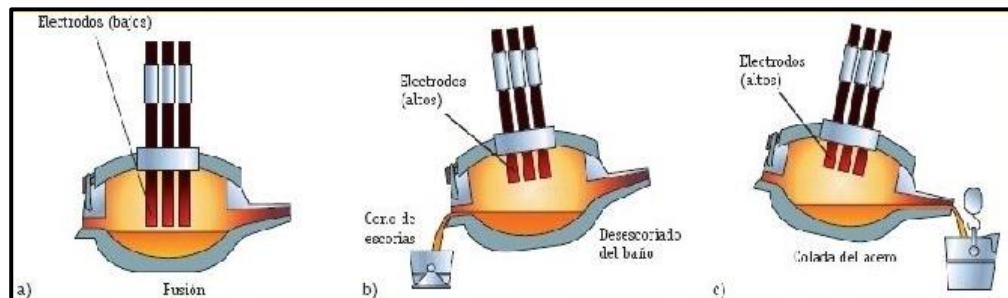


Figura 69. Funcionamiento del horno eléctrico.

Fuente: <https://slidetodoc.com/materiales-ferrosos-2-1-3-1-a-2/>

7.1.5. Aplicaciones ambientalmente sostenibles en el proceso fabricación de ferroaleaciones

En la fabricación de ferroaleaciones los procesos consumen altas cantidades de energía por las altas temperaturas que se requieren, siendo una fuente de contaminación de aire, agua y del suelo. En la tabla 38, se exponen los problemas medioambientales que acarrea cada etapa de la fabricación de ferroaleaciones.

Tabla 38. Problemas medioambientales del proceso de fabricación de las ferroaleaciones.

ETAPA	PROBLEMÁTICA MEDIOAMBIENTAL	AFECCIÓN
RECEPCIÓN, CLASIFICACIÓN Y DOSIFICACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	C. ATMOSFÉRICA	Partículas y polvo de origen mineral
	C. RESIDUOS	Aceites y grasas usados
REDUCCIÓN DE LOS MINERALES (HORNO)	C.ATMOSFÉRICA	Partículas y emisiones gaseosas (SOx, Cox, N2, H2)
	C.RESIDUOS	Lodos, escorias y finos de filtro.
	C.HÍRICA	Aguas de depuración de gases
TRITURACIÓN Y CRIBADO	C.ATMOSFÉRICA	Polvos
	C.RESIDUOS	Aceites y grasas usados

Fuente: (Ministerio de industria y energía)

Dentro de las etapas de producción de utiliza carbón, el cual su calidad es importante desde el punto de vista medioambiental por su contenido de azufre y elementos contaminantes. Además, el coque utilizado como agente reductor para la fuente de energía en caso de la producción de HC FeMn en alto horno y se usa gran cantidad de energía eléctrica que no se recupera. (Ministerio de industria y energía).

- Técnicas para la disminución de impacto ambiental

Emisiones a la atmosfera:

En la etapa de almacenamiento y acondicionamiento de las materias primas, en un documento de (Ministerio de industria y energía), se recomienda:

_Almacenamiento en contenedores cerrados

_Recepción de materias primas en lo posible húmedas

_La maquinaria y equipos utilizados en el tratamiento de las materias primas deben conservarse aislados, cerrados y en los puntos de descarga contemplar las instalaciones de captación de polvo y partículas.

_Realizar la manipulación en sitios con ventilación y desempolvado adecuado.

_En las operaciones de reciclado es conveniente la humidificación para reducir las emisiones de polvo y disposición de medios para el reciclaje de los finos captados por los filtros.

_Para disminuir emisiones de sustancias inorgánicas gaseosas que no se puedan reducir con medidas primarias, se debe optar el uso de precipitadores electrostáticos, lavadores, filtros de mangas, procesos químicos o fisicoquímicos, tipo de adsorción, etc.

Tratamiento de efluentes líquidos

En el proceso de las ferroaleaciones, se evidencian aguas residuales, las cuales deben ser tratadas para disminuir el impacto de su uso, y algunos de los tratamientos que expone (Ministerio de industria y energía) es el siguiente:

_No tratar las aguas de refrigeración con el resto de las aguas residuales y procurar la recirculación permitiendo solo el consumo para reponer las pérdidas por evaporación.

_Evitar las fugas mediante las técnicas adecuadas, toma de medidas preventivas y mantenimiento, diseños en las modificaciones, sistemas de contención y control de los vertidos en zonas inmediatas al foco.

_Mediante técnicas de electrolíticas en el tratamiento de efluentes permite una alta recuperación de los metales, además de conseguir niveles aceptables de contaminación residual de los efluentes vertidos.

_Someter a las aguas residuales a medios de depuración para alcanzar niveles permitidos por la legislación vigente.

Disminución de residuos y prevención de la contaminación del suelo

_Incentivar el desarrollo de técnicas y procesos que permitan la disminución de generación de residuos y reciclado en la propia planta, disminuyendo sus volúmenes.

_Existe un problema de lodos secos en los tratamientos de agua residuales de la depuración de los gases con importante contenido en óxido de manganeso, escorias de silicomanganeso, los cuales, se pueden recircular al proceso y los segundos se reutilizan en el sector de la construcción.

_Si el residuo no es reciclable, se debe procurarse una minimización de su impacto ambiental, con depósito definitivo en el lugar de producción o en un lugar lo más próximo posible al mismo.

_Se requiere de instalaciones para el briqueteado de los finos procedentes de los filtros y de los lodos para su fácil manejo y optimizar su empleo a la hora de recirculación a los hornos.

Consumo de energía

Como se mencionó anteriormente, existe una alta cantidad de consumo de energía eléctrica y (Ministerio de industria y energía) recomienda lo siguiente:

_ Se propone el uso de técnicas de recuperación de energía, tanto calorífica como eléctrica, a partir del CO contenido en las emisiones procedentes de los distintos hornos que se utilizan en este tipo de plantas metalúrgicas.

7.2. Pirometalurgia

El carbón metalúrgico es un ingrediente esencial en la producción de procesos metalúrgicos, ya que suelen contener más carbono, menos cenizas y menos humedad que el térmico, por lo cual, se requieren unos “770 Porcekilogramos de carbón para fabricar una tonelada de acero y alrededor del 70 % del acero mundial se produce en altos hornos de oxígeno básico” (Carbón metalúrgico, 2021)

Los materiales metálicos (metales y aleaciones metálicas), “son sustancias inorgánicas que están compuestas de uno o más elementos metálicos, pudiendo contener también algunos elementos no metálicos”. (Portero) Las operaciones de metalurgia extractiva se distribuyen en dos grupos: vía seca y vía húmeda, la primera es pirometalúrgica y la segunda como operaciones hidrometalúrgicas, en este caso será enfocado hacia la extracción por pirometalurgia, como es para el caso de metales de hierro, acero, cobre y el aluminio, siendo metales de aleaciones ferrosas.

7.2.1. Proceso

El proceso pirometalúrgico se debe realizar bajo temperaturas que oscilan entre los 950°C y la energía calorífica se obtiene por la reacción exotérmica de variedades de carbón como el coque. (Chamalé, 2017)

Estos metales se encuentran combinadas con otros minerales y se forma la mena (mineral de interés) y la ganga (materias estériles o de poco interés). Por ello, inicialmente se debe realizar su procesamiento como lo describe la Figura 70.

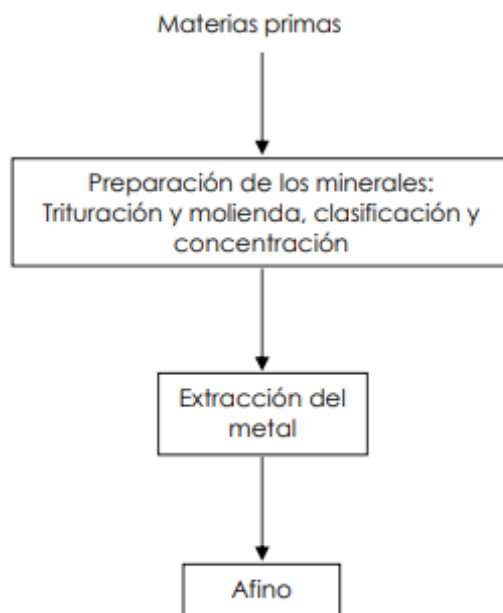


Figura 70. Diagrama de flujo del procesamiento de los materiales metálicos por pirometalurgia.

Fuente: (Portero)

Las etapas las define, de la siguiente manera:

1. *Preparación de los minerales:* las principales operaciones para la preparación son:
 - Trituración y molienda: reducen el tamaño de los minerales, siendo más pequeño el tamaño de las partículas obtenidas tras la operación de molienda.
 - Clasificación: tiene por objeto clasificar las partículas de los minerales por tamaño, se puede hacer de forma seca o húmeda.
 - Concentración: consiste en la separación de los minerales de la ganga, se puede realizar por flotación o separación magnética.

2. *Extracción del metal*: se dividen en tres grupos: 1) métodos de reducción óxidos metálicos 2) métodos de reducción de haluros metálicos y 3) métodos reducción de sulfuros metálicos. Principales operaciones en el proceso de extracción:

- Calcinación: su función es descomponer un compuesto en sus óxidos formadores haciendo uso de calor.
- Tostación: operación mediante el cual un sulfuro al reaccionar con el oxígeno del aire se transforma a un óxido.
- Fusión: operación en la que se obtienen en un horno adecuado, varias fases fundidas: metal, escoria o mata. Es una de las operaciones más utilizadas en la metalurgia extractiva.
- Volatilización: conduce a un metal (reductora), un compuesto (oxidante), un haluro (de haluros) o un carbonilo metálico (de carbonilos) en forma gaseosa.
- Electrólisis de sales fundidas: tiene por objetivo la obtención de un metal a partir de uno de sus compuestos disuelto en un electrolito fundido y utilizando la corriente eléctrica como agente reductor.
- Metalotermia: operación en la que un metal desplaza a otro de sus compuestos al ser más reactivo.

3. *Afino*: tiene por objeto la separación del metal principal de otros elementos, considerados como impurezas que pueden o no aprovecharse. Las principales operaciones de purificación o afino de metal son: 1) electrólisis en disolución acuosa, 2) descomposición térmica y 3) fusión por zonas.

Las materias primas utilizadas en el procesamiento del hierro y el acero son:

- Menas de hierro: “minerales naturales de los que se extrae el hierro mediante un proceso de reducción. Las menas de hierro son óxidos de hierro que contienen de un 50 a un 70 % de hierro, dependiendo de su concentración. La mena principal es la hematita (Fe_2O_3), que contiene casi 70 % de hierro. Otras menas son la magnetita (Fe_3O_4), la siderita (FeCO_3) y la limonita ($\text{FeO}(\text{OH})\cdot x\text{H}_2\text{O}$), donde x vale alrededor de 1,5.” (Portero)
- Coque: “combustible de alto carbono, producido por el calentamiento de carbón bituminoso (hulla) en una atmósfera con bajo contenido de oxígeno durante varias horas, seguido de una aspersión de agua en torres especiales de enfriamiento.” (Portero)
- Piedra caliza: “roca que contiene altas proporciones de carbonato de calcio (CaCO_3) y Funciones en el proceso de reducción: fundente que reacciona con las impurezas presentes y las elimina del hierro fundido como escoria.” (Portero)

7.2.2. Ventajas:

- Velocidades de reacción muy rápidas
- Se pueden procesar grandes cantidades de mineral
- Ideal para tratamiento de materias primas complejas y heterogéneas
- El proceso es fácilmente controlable si se cuenta con el equipo indicado.

7.2.3. Desventajas

- Aunque hay una reacción rápida, ésta tiene poca selectividad, es decir resultan materiales impuros.

- Bajo rendimiento de las reacciones químicas
- A veces es necesario repetir las etapas, lo que implica mucho gasto de energía.
- Son procesos altamente contaminantes ya que emanan mucho CO₂ y sulfuros (SO₂).
- Tiene un consumo energético elevado, por lo tanto, se limita a minerales de alta ley.

7.2.4. Hornos empleados

- *Horno de cuba*: tiene una gran capacidad da un tratamiento en poco volumen, funcionamiento sencillo y es económico. (Chamalé, 2017). La distribución de sus temperaturas y su proceso se refleja en la figura 71.



Figura 71. Hornos de cuba.

Fuente: (Chamalé, 2017)

Dentro de sus desventajas existen pérdidas de CO en los gases y dificultad para recuperarlas y el difícil control del proceso de funcionamiento.

- *Horno de Reverbero*: se realiza un control preciso de la temperatura y de las reacciones químicas y posibilidad de utilizar escorias con márgenes de composición muy grandes. (Chamalé, 2017). Las partes de este horno se ven en la Figura 72.

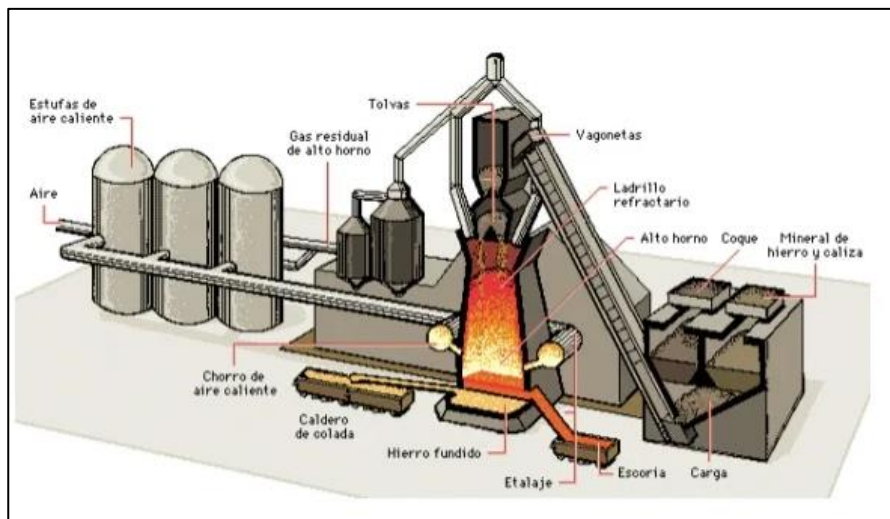


Figura 72. Horno de Reverbero.

Fuente: (Chamalé, 2017)

- *Hornos eléctricos*: posibilidad de fundir productos muy refractarios, no es necesario añadir fundentes, no hay pérdidas de metales por velarización pequeña.

Dentro de sus desventajas se encuentra el alto costo de la energía eléctrica, consumo elevado en electrodos y refractarios.

7.2.5. Aplicaciones ambientalmente sostenibles en los procesos pirometalúrgicos

La transformación de los minerales metálicos en general, parten de óxidos que pasan por procesos de óxido-reducción, la cual libera gran cantidad de CO₂ para la obtención del metal

primario, siendo uno de los mayores emisores industriales de gases de efecto invernadero. (Schroeder, 2019).

Para esta industria los proyectos van encaminados a la reducción del consumo, recuperación de energía y de los gases, pues bien, existen oportunidades de recuperación en las etapas de producción y el perfeccionamiento de las tecnologías para la alimentación de hornos, control y automatización de los flujos de insumos y productos. Para (Schroeder, 2019), algunos de las tecnologías y procesos para promover la eficiencia energética son:

- Tecnología de heat recovery (recuperación/aprovechamiento de calor) en las diversas etapas de producción.
- Sistemas para control en tiempo real de variables de los procesos, como la temperatura.
- Aprovechamiento de gases de proceso.
- Nuevas tecnologías que promuevan una reducción significativa del consumo de energía en hornos eléctricos y en procesos electrolíticos, incluyendo los respectivos sistemas de automatización y control.

7.3.Hidrógeno

“En la actualidad existen tres fuentes principales para obtener el hidrógeno. La primera fuente es de recursos no renovables o fósiles que están constituidas por el gas natural, el petróleo, el carbón, incluido el uranio, la segunda es de recursos renovables que comprende la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica, y la biomasa. La tercera fuente es la energía nuclear.” (Chero, 2020)

Para cada una de las anteriores fuentes, poseen un proceso químico muy particular y se encuentra en búsqueda de tecnología verde, reducir el uso de recursos energéticos no renovables e inclinarse a los renovables. Las fuentes para la obtención de hidrógeno según (Chero, 2020), se evidencian en la Figura 73.

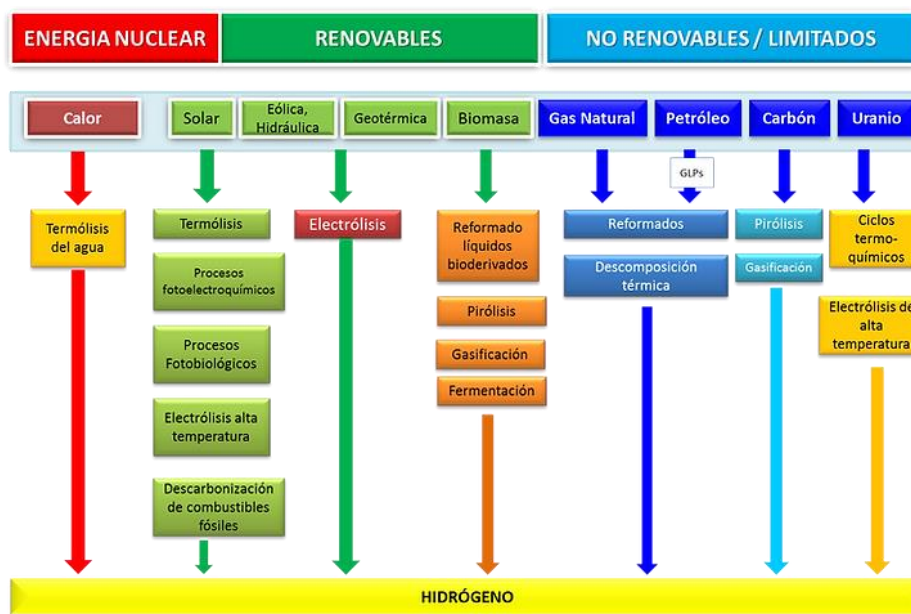


Figura 73. Fuentes para la obtención de H₂.

Fuente: (Chero, 2020)

7.3.1. Principales tipos de hidrógeno

Los métodos de producción del hidrógeno mencionado anteriormente, han dado lugar a la clasificación del hidrógeno por nomenclatura de colores diferenciados por qué tan sostenible es su proceso de extracción, según esto, los tipos de hidrógeno definidos por (Acciona, Business as Unusual, 2020) se contemplan en la Tabla 39.

Tabla 39. Principales tipos de hidrógeno.

HIDRÓGENO GRIS	HIDRÓGENO AZUL	HIDRÓGENO VERDE
<p>Se obtiene mediante el reformado de combustibles fósiles, siendo el gas natural más común. Es el hidrógeno más barato de producir por el momento y el proceso emite una gran cantidad de CO₂ a la atmósfera y el que más se utiliza.</p>	<p>El hidrógeno azul también se obtiene de combustible fósiles, pero con técnicas capaces de capturar y almacenar las emisiones de CO₂ que se producen. Es menos contaminante que el hidrógeno gris, pues es capaz de reducir las emisiones de su proceso de producción no eliminarlas por completo.</p>	<p>Es llamado hidrógeno renovable, se consigue mediante electrólisis del agua, y este proceso alimenta en su totalidad por energía renovable, no se genera ningún tipo de emisión contaminante a la atmósfera y es el más limpio y sostenible.</p>

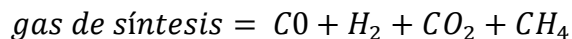
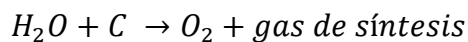
Fuente: (Acciona, Business as Unusual, 2020)

Para este caso en particular, se enfocará al hidrógeno obtenido por medio del carbón por gasificación.

7.3.2. Producción de hidrógeno por gasificación de carbón

La tecnología de gasificación del carbón ha estado durante muchos años, siendo una tecnología simple que consiste en hacer pasar aire a través de una capa de coque calentándolo hasta

800-900 °C, luego pasa el aire que es sustituido por vapor y se produce la siguiente reacción térmica:



Este proceso es realizado de altas temperaturas y presiones, produciendo gas de síntesis. El diagrama del proceso de producción de hidrógeno se representa en la figura 74.

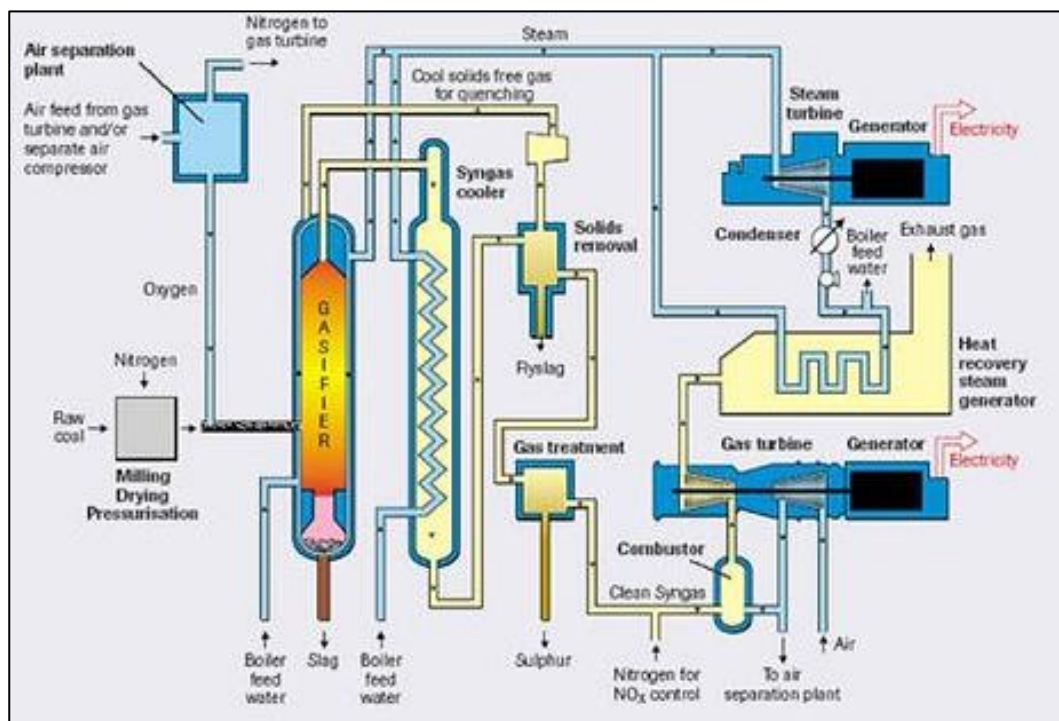


Figura 74. Diagrama de flujo del proceso de producción de H₂ por gasificación del carbón.

Fuente: (Chero, 2020)

Esta tecnología está disponible actualmente como se indica en la Tabla 40, se muestran las condiciones de los procesos, su implementación, ventajas y desventajas del método.

Tabla 40. Características del método por gasificación para producir hidrógeno.

METODO	PROCESO	IMPLEMENTACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Hidrógeno del carbón (Gasificación)	Alta presión y temperatura: $H_2O + C$ $\rightarrow O_2$ + <i>gas de síntesis</i> $gas de síntesis$ $= CO + H_2 + CO_2$ + CH_4	Método actual de producción en masa de hidrógeno.	Grandes suministros de carbón en USA, Recursos baratos.	Produce emisiones de CO_2 , la secuestración de carbón, aumento los costos y 45% de eficiencia.

Fuente: (Chero, 2020)

7.3.3. Aplicaciones ambientalmente sostenibles para la fabricación de hidrógeno con carbón

El carbón sigue siendo la fuente principal de energía más barata, pero la más contaminante, por ello se busca que sus procesos se realicen en pro a la sostenibilidad. La principal tecnología que se usa es la gasificación del carbón transformado químicamente en gas natural sintético o gas de síntesis. (Anderson, 2014)

“El hidrógeno "azul" es producido cuando se quema carbón a altas temperaturas. El carbono (CSS) emitido es captado y reutilizado o almacenado.” (Deutsche Welle, 2021)

En Colombia, el Ministerio de Minas y Energía de Colombia busca mecanismos para continuar explotando carbón térmico de alto contenido calorífico para la producción de hidrógeno azul de bajas emisiones, y es un elemento importante para las disminuciones de gases de efecto invernadero con el uso de nuevas tecnologías. (Bnamericas, 2021)

Del mismo modo, Australia, es uno de los mayores exportadores del mundo de carbón y de los más contaminantes, por lo tanto, un consorcio australiano-japonés empezó a producir hidrógeno usando carbón como plan piloto, y el plan es “buscar usar lignito (un carbón mineral) con tecnología de captura y almacenamiento de carbono para producir hidrógeno limpio, el cual puede usarse para proveer mucha de la energía que Japón, Australia y el resto del mundo necesitan” (El periódico de la energía, 2021)

En la Figura 75, se comparan los tres tipos de hidrógeno, y se demuestra que a corto plazo es una medida preventiva en búsqueda de implementar energías totalmente renovables,

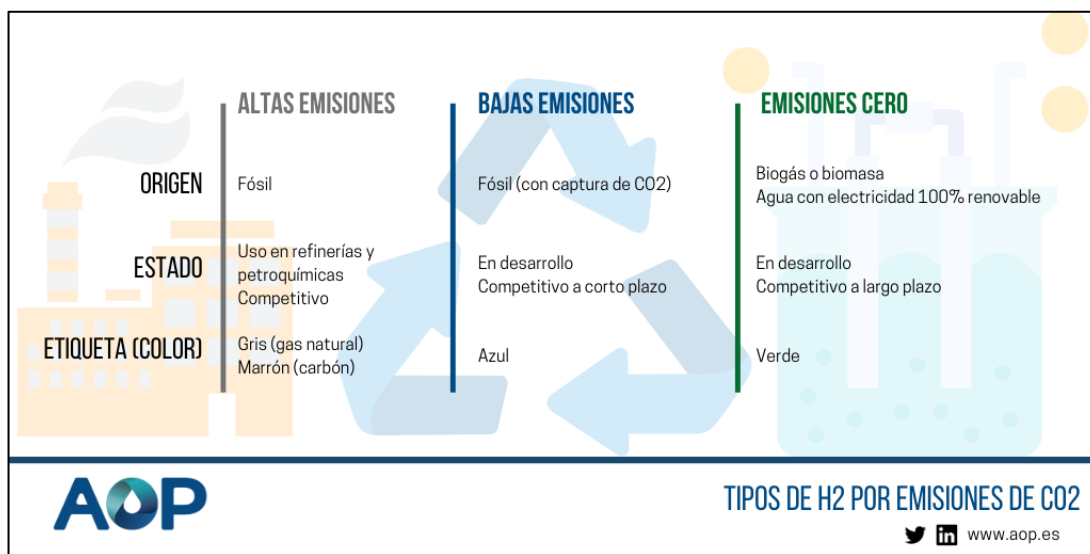


Figura 75. Comparativa de los tipos de hidrógeno.

Fuente: (Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos (AOP), 2020)

El hidrogeno posee un potencial para proporcionar energía limpia y accesible, generando más energía que gasolina y es el químico más abundante en el universo, pero su procesamiento requiere de energía provenientes de fuentes no renovables a partir de gas natural y el carbón, haciéndolo una fuerte fuente de emisiones de CO₂. Para ello, la reducción de las emisiones según

(Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos (AOP), 2020) se puede efectuar por medio de:

1. La captura del CO₂ emitido. El límite técnico está en la actualidad en el 90 % del CO₂, por lo que para llegar a las emisiones netas cero se tiene que compensar con acciones adicionales como, por ejemplo, la reforestación.
2. El uso de electricidad de origen 100 % renovable. El hidrógeno electrolítico renovable depende de poder contar con un mix eléctrico generado tan solo por energías renovables (eólica, solar).

7.4. Polímeros

Los polímeros son macromoléculas formadas por la unión repetida de una o varias moléculas unidas por enlaces covalentes, y dependiendo de su origen pueden ser naturales o sintéticos. Donde, los polímeros sintéticos tienen un mayor interés desde el punto de vista comercial y contienen normalmente entre uno y tres tipos diferentes de unidades que se repiten, en cambio a los naturales o biopolímeros que son más complejas. (Rico & Gomis, 2012)

“La mayor parte de los polímeros están formados por estructuras de carbono y por tanto se consideran compuestos orgánicos” (Alcantara, 2012)

“Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), residuo de la quema de combustibles o biomásas, es ampliamente responsable por el efecto invernadero y, por ende, el cambio climático”. Es por ello que se han desarrollado investigaciones para llevar a cabo innovaciones tecnológicas para el reciclaje de CO₂ y Evonik, BASF y Bayer Material Science, trabajan en desarrollo de polímeros de CO₂, y se han demostrado la aplicación en artículos del hogar en compartimentos y piezas de aspiradoras. (Plástico, 2012)

7.4.1. Tipos de polímeros

Dentro de las formas de diferenciar los polímeros según (Todo en polímeros) son:

- *Por su modo de obtención: Naturales y Sintéticos*

Los polímeros naturales son aquellos que se encuentran en la naturaleza, como lo es el caucho, polisacáridos, almidón, glucógeno y proteínas. (Polyexcel, s.f.)

Los polímeros sintéticos o artificiales se fabrican en laboratorio y tienen ingredientes derivados del aceite como lo es el poliestireno, polimetacrilato de metilo (acrílico), polipropileno, polietileno y cloruro de polivinilo (PCV). (Polyexcel, s.f.)

- *Por su elasticidad: Elastómeros y Plásticos*

Los elastómeros son un tipo de polímero que posee estructuras elásticas o flexibles que permiten someter grandes deformaciones, sin roturas y recuperando su forma primitiva. Y poseen propiedades como: no se pueden derretir, se hinchan ante la presencia de ciertos solventes, generalmente insolubles, son extremadamente flexibles y elásticos, menor resistencia al fenómeno de fluencia que los termoplásticos.

- *Por el acomodamiento de las cadenas moleculares: Amorfos y Cristalinos*

Las resinas que al solidificar no tienen un orden, son conocidas como amorfas y esto define sus propiedades físicas, donde en su mayoría son transparentes debido a los huecos que dejan las cadenas en su desorden, tienen buena estabilidad dimensional, no hay ajuste en las piezas moldeadas.

Las resinas cristalinas al solidificarse buscan estructuras llamadas cristalitos, tiene acomodo molecular, son opacas ya que no existe luz entre las moléculas y tienen un buen porcentaje de contracción, buenas propiedades mecánicas, térmicas y punto de fusión definido.

- *Por su comportamiento térmico: Termoplásticos y Termofijos*

“Un termoplástico es un plástico que, a temperaturas relativamente altas, se vuelve deformable o flexible, se funde cuando se calienta y se endurece en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente”. (Todo en polímeros)

“Un polímero termofijo también puede ser el resultado de la reacción química de dos componentes o un componente y un catalizador que al reaccionar forman un producto diferente que al querer volver a calentar simplemente se quema”. (Todo en polímeros)

- *Por sus propiedades físicas: Comunes, Funcionales, de Ingeniería y Especialidades*

Este tipo se deriva de las propiedades físicas que ofrecen los diferentes polímeros, por lo general los polímeros de alta especialidad son los de mayor resistencia mecánica, térmica, química o combinación de propiedades y son sintetizados o formulados de manera muy única como polímeros de cristal líquido.

- *Por tener diferentes unidades: Homopolímeros, Copolímeros, Terpolímeros*

Los polímeros que contienen un solo tipo de unidad repetida se les denomina homopolímeros mientras que los polímeros que tienen una mezcla de 2 unidades repetidas se les conoce como copolímeros.

- *Por la forma de sus cadenas moleculares: Lineales, Ramificados, Reticulados*

Este puede ser el caso de los polietilenos de baja densidad que son muy ramificados y el de alta densidad que no tiene ramificaciones. Yendo de la mano con la cristalinidad y amorficidad de las cadenas.

Los enlaces entrecruzados o reticulaciones dan una estructura más rígida a un polímero, la reticulación de un polímero se logra por lo general, a partir de una reacción química con un catalizador y calor en elastómeros vulcanizables o curables y en polímeros termofijos, aunque existen unos cuantos polímeros termoplásticos de reticulación termo-reversible como es el caso de las resinas ionoméricas.

- *Bio-Polímeros:* se han realizado esfuerzos para reemplazar los plásticos convencionales a base de petróleo y gas con otros basados en hidrocarburos derivados de recursos renovables como la biomasa
- *Elastómeros y Plásticos*

Los elastómeros son polímeros que presentan una estructura elástica debido a que su composición química carece de la presencia de elementos metálicos. De hecho, su nombre se

desprende del término “polímero elástico”. poseen características de flexibilidad, móvil, alta deformabilidad y recuperación después de la deformación. (Flowtrend, 2020)

7.4.2. Aplicaciones de los polímeros

Según (Ecupei, editorial Cupei, s.f.), las aplicaciones y los productos poliméricos se pueden agrupar de acuerdo con su uso en diferentes formas, las más generales se describen a continuación:

- Envase y empaque
- Consumo
- Construcción
- Muebles
- Industrial
- Eléctrico-Electrónico
- Transportación
- Adhesivos y recubrimiento
- Médico
- Agrícola

7.4.3. Materias primas de los polímeros

(Marquínez, Prado, Cavia, & García, s.f.) mencionan que los polímeros son un resultado de proceso de síntesis desde las materias primas elementales reflejadas en la Figura 76.

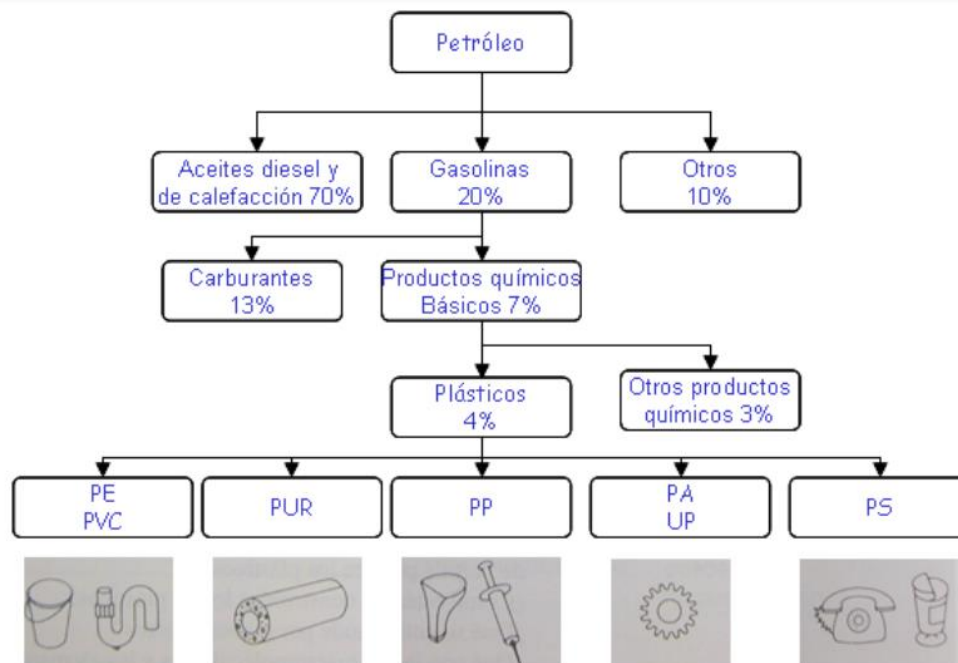


Figura 76. Materias primas de los polímeros.

Fuente: (Marquínez, Prado, Cavia, & García, s.f.)

Por otro lado (Todo en polímeros, s.f.), nos indica que los polímeros se elaboran de diferentes fuentes de materia prima adicional a la presentada anteriormente, los cuales son:

- Gas natural: materia prima para la elaboración de polímeros pues de este se desprende el etileno del que se forma el polipropileno y el metano que se transforma en formaldehído del que se elaboran las resinas fenólicas.
- Alquitrán: conseguido mediante el benceno, que se transforma a fenos que finalmente se puede transformar en poliuretano y poliestireno
- Coque: se extrae el acetileno del cual también se puede utilizar para conseguir etileno y producir polietileno y cloruro de vinilo para producido cloruro de polivinilo, conocido como PVC por sus siglas.

- **Petróleo:** se extrae la nafta, fuente importante de materia prima en la elaboración de polímeros, a y sus productos derivados se pueden observar en la figura 77 de polímeros más comunes en el mercado.

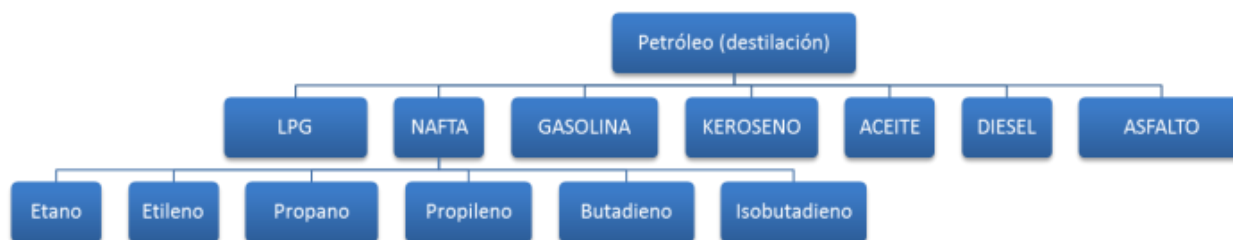


Figura 77. Productos derivados del petróleo para la elaboración de polímeros.

Fuente: (Todo en polímeros, s.f.)

7.4.4. Preparación de la materia prima

En la preparación de la materia prima para la fabricación de polímeros, (Marquínez, Prado, Cavia, & García, s.f.) la describen en las siguientes figuras 78,79 y 80.

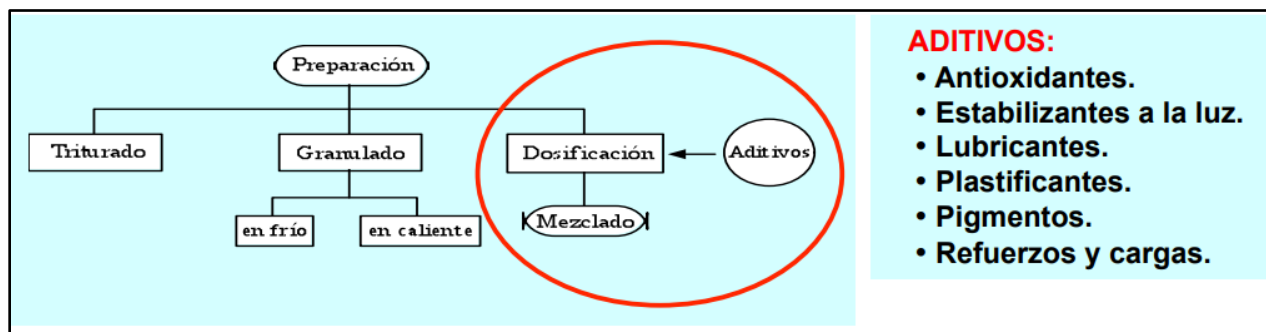


Figura 78. Inicio del proceso mediante la dosificación y mezclado con aditivos.

Fuente: (Marquínez, Prado, Cavia, & García, s.f.)

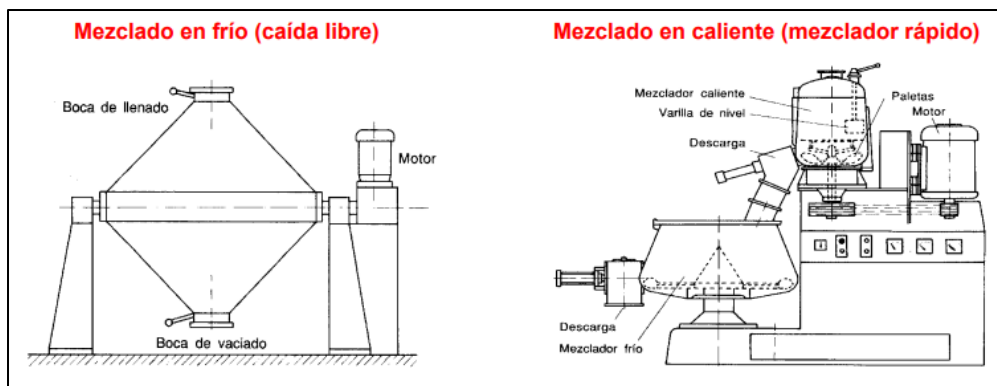


Figura 79. Mezclado en frío o mezclado en caliente.

Fuente: (Marquínez, Prado, Cavia, & García, s.f.)

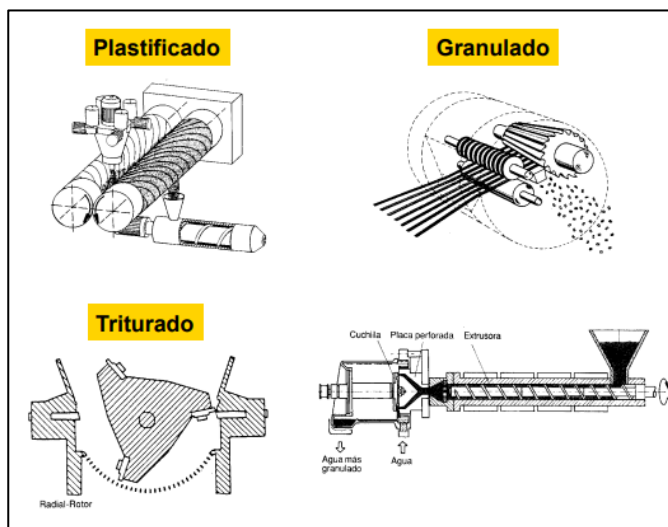


Figura 80. Por último, se realiza un proceso de granulado y triturado según las especificaciones.

Fuente: (Marquínez, Prado, Cavia, & García, s.f.)

7.4.5. Procesos y técnicas generales que se aplican en la producción de polímeros

(Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, España, 2009), indica que la producción de polímeros sigue el esquema presentado en la figura 81. En el lado de los elementos aportados se incluyen los monómeros, comonómeros, catalizadores y disolventes, así como energía y agua, mientras al lado de los elementos producidos se observan efluentes gaseosos, aguas residuales y residuos.

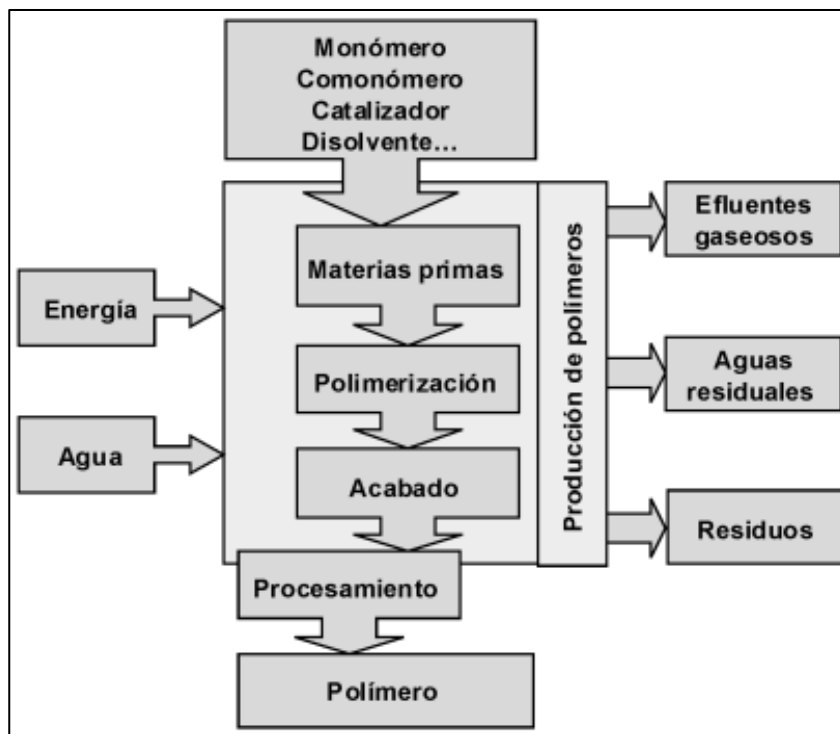


Figura 81. Esquema de producción general.

Fuente: (Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, España, 2009)

7.4.6. Aplicaciones ambientalmente sostenibles en la producción de polímeros

(Ramirez, y otros, 2019) mencionan que actualmente se puede evidenciar la alta presencia de polímeros en la vida cotidiana, pero, según Greenpeace, este creciente uso y producción ha provocado contaminación ambiental, sobre todo en el mar, en mayor proporción aquellos micro plásticos que suelen ser ingeridos por especies marinas y provoca problemas gastrointestinales y alteraciones en su alimentación y reproducción.

Por lo anterior, el reciclaje es una medida que frenaría la contaminación ambiental, suponiendo la reutilización de elementos, y disminuir la basura generada. En el caso de los termoplásticos y del polietileno y el policloruro de vinilo (PVC), es sencillo porque su

comportamiento térmico en particular permite reblandecerlo y darle nuevas formas. Pero, en los polímeros termoestables y elastómeros son más difíciles de reciclar, pero si reutilizar en otras tareas como neumáticos desgastados.

Por otro lado, (Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, España, 2009) expresa que las mejores técnicas de gestión ambiental depende de la naturaleza, magnitud y complejidad de la instalación de cada uno de los tipos de polímeros a realizar, sin embargo, se deben tener en cuenta características como: definición de política ambiental, planificación y establecimiento de procedimientos, responsabilidad, acciones correctivas, revisión, potencialidad de los impactos ambientales, desarrollo de energías limpias y aplicación de puntos de referencia.

Con lo anterior, consideran que las *emisiones hacia la atmosfera* es un punto esencial y dentro de las disposiciones técnicas para prevenir y minimizar recomendados por (Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, España, 2009) , son:

- Uso de válvulas de fuelle o de doble junta de estanqueidad u otro equipo igual de eficaz para aplicaciones altamente toxicas.
- Bombas de accionamiento magnético o de motor hermético, o bondas de doble junta y barrera líquida.
- Compresores de accionamiento magnético o de motor hermético o agitadores de doble junta y barrera líquida.
- Agitadores de accionamiento magnético o de motor hermético o agitadores de doble junta y barrera líquida.
- Minimización de número de bridad (empalmes).
- Juntas eficaces.

- Sistemas cerrados de muestreo.
- Drenajes de efluentes contaminados en sistemas cerrados.
- Sistema de captura en las salidas de aire.

Para las instalaciones nuevas, estas técnicas se deben tener en cuenta a la hora de diseñar la planta y en plantas existentes se aplican paso a paso según los resultados de las técnicas.

Por otra parte, para la reducción de las *emisiones de polvo*, se presentan una combinación de las siguientes técnicas:

- Que el transporte sea realizado en fase densa, siendo método eficaz para evitar las emisiones de polvo en comparación a en fase diluida.
- Reducción de las velocidades de los valores más bajos posibles en los sistemas de transporte en fase diluida.
- Reducción de la producción de polvo en las líneas transportadoras mediante tratamientos de superficie y una adecuada disposición de las tuberías.
- Uso de ciclones y/o filtros en las salidas de aire de las unidades de eliminación de polvo, el uso de sistemas de filtro de tela es más efectivo, especialmente para el caso de polvo fino.
- Uso de lavadores de gases.

Para el caso de la *contaminación de agua* en estos procedimientos, se debe contar un diseño de tuberías y materiales adecuados, facilitar la inspección y reparación, y que se reacondicione la planta de la siguiente manera:

- Tuberías y bombas colocadas en la superficie.
- Tuberías situadas en conductos accesible para inspección y reparación.

El impacto por las *corrientes de purga de aire* que provienen de los tanques de desgasificación o de los venteos de los reactores consideran las siguientes técnicas:

- Reciclado.
- Oxidación térmica.
- Oxidación catalítica.
- Combustión en antorcha (corrientes discontinuas).

Para reducir las *emisiones de las secciones de almacenamiento* y acabado en procesos en suspensión y baja presión se estiman las siguientes recomendaciones:

- Operar los recipientes de los separadores de baja presión a la mínima presión
- Seleccionar disolventes
- Aplicar desvolatización en la fase de extrusión
- Aplicar un tratamiento del aire de purga procedente de los tanques de desgasificación
- Aplicar sistemas de circuito cerrado de purga con nitrógeno, como se describe en el apartado.
- Optimización del proceso de separación (stripping), contenido de monómero en las poliolefinas producidas con tecnologías en suspensión y baja presión.
- Reciclado de los monómeros obtenidos en el proceso de separación
- Condensación del disolvente

7.5. Energía eléctrica

Alrededor del 40% de la electricidad mundial es producida por plantas de incineración de carbono (menos del 20% en España), da idea de su importancia actual y a futuro como fuente de energía y existe un interés creciente para reducir su impacto ambiental, especialmente en términos de emisiones de CO₂ en la atmosfera y otros contaminantes como NO_x y SO_x (fuente de lluvia ácida) que han recibido atención desde hace unos años.

Los carbones difieren mucho en sus propiedades básicas (por ejemplo, valor calorífico, contenido de humedad, contenido de cenizas, sustancias volátiles) como por su la reactividad (de mayor a menor.). Actualmente existen distintas tecnologías en el aprovechamiento del poder calorífico del carbón.

7.5.1. Tecnologías de plantas carboeléctricas

- Combustión de carbón pulverizado.

La mayoría de las instalaciones energéticas se basan en esta tecnología. El carbón se tritura en tamaños menores a 100 micras (más pequeño que el grosor de un cabello humano) y se introduce en la caldera con el aire lo quemará; el mismo aire lo empuja hacia la salida, donde se ubican primero los intercambiadores de calor, luego los sistemas de filtración de aire. La Figura 82, es un diagrama de una caldera típica y un gasoducto, este diseño depende del tipo de carbón que se quema y, por lo general, no son intercambiables.

Si son instalaciones muy grandes (la casa más grande tiene 80 m de altura), con paradas muy espaciadas interno), con tiempo de inactividad asignado (del orden de dos años) y una eficiencia global relativamente alta (~35% de la energía de entrada de calor convertida en electricidad, aunque de última generación, con circuitos de vapor de muy alta temperatura y presión, alcanzando el 45%). (Jiménez S.)

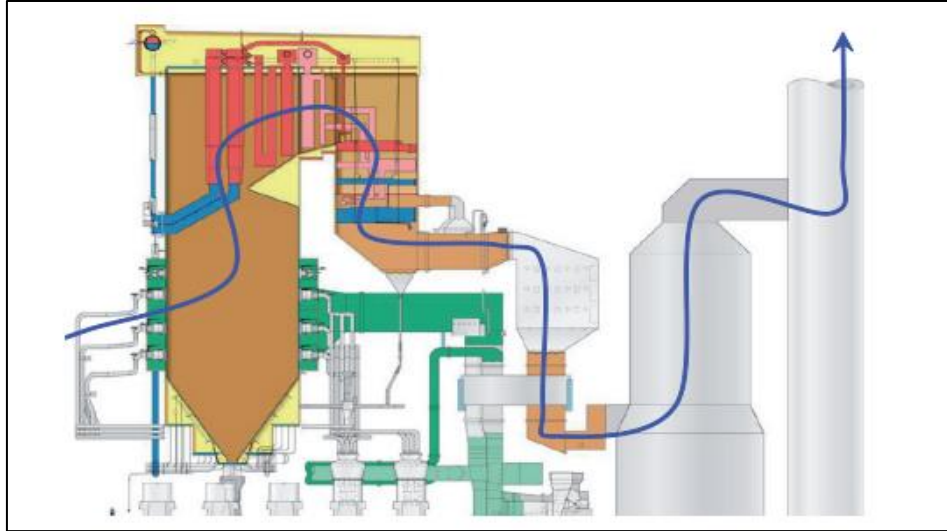


Figura 82. Esquema de una central de carbón pulverizado. La línea azul representa el flujo de aire desde la inyección a la emisión.

Fuente: (Jiménez S.)

- Combustión en lecho fluido o fluidizado.

Son un método de combustión en búsqueda de la disminución de emisiones de contaminantes, especialmente SO_x y NO_x. El carbón molido en milímetros (es decir, mucho más grande que el carbón pulverizado) se mantiene en suspensión mediante lechos de arena. La temperatura conseguida es muy inferior a la de calderas anteriores (800-1000°C vs 1300-1500°C), así como la eficiencia energética es alta. La mayor parte de la limpieza de las sábanas se realiza en el propio lecho. La figura 83, es un ejemplo de una central de lecho fluido circulante, en las que las partículas de carbón son arrastradas por el aire de combustión y retenidas hasta ser quemadas por completo por un ciclón que las devuelve. (Jiménez S.)

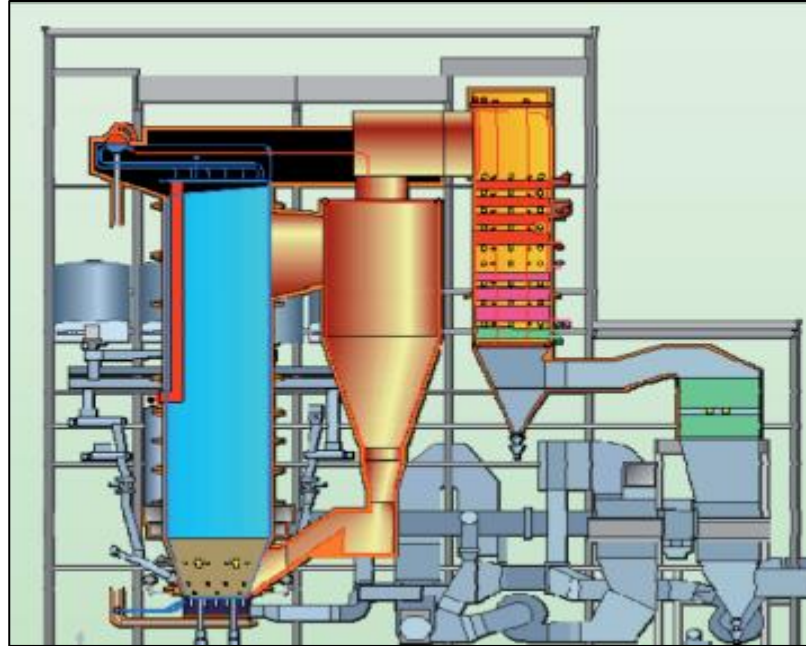


Figura 83. Esquema de una planta de lecho fluido.

Fuente: (Jiménez S.)

- Gasificación

De hecho, muy pocas centrales eléctricas en el mundo producen electricidad por gasificación del carbón y posterior combustión, pero la tecnología en sí es interesante: se trata de convertir una matriz de carbono en un gas combustible para obtener energía de este gas (por ejemplo, en ciclo mixto de alta eficiencia) u otros productos (plásticos, etc.). Su procedimiento consiste en introducir en la caldera carbón de alta temperatura con gran defecto de oxígeno y, en cambio, en altas concentraciones de CO_2 y H_2O . (Jiménez S.)

Para el anterior proceso, existen nuevas tecnologías en desarrollo, destinadas a la captura y posterior almacenamiento de CO_2 , estos son:

- En la oxicomustión se sustituye el N_2 (~80% del aire) por gas reciclado caldera, para quemar carbón cuando hay una mezcla casi pura de O_2 y CO_2 (Ver figura 84).

Después de limpiar el gas de partículas y otras impurezas (e.g. SOx), la corriente final es casi CO₂ puro, se puede comprimir directamente y asignados a almacenamientos geológicos. Hay varias plantas piloto de mediana capacidad que adoptan esta tecnología y se espera que sea ampliamente utilizada en el futuro. (Jiménez S.)

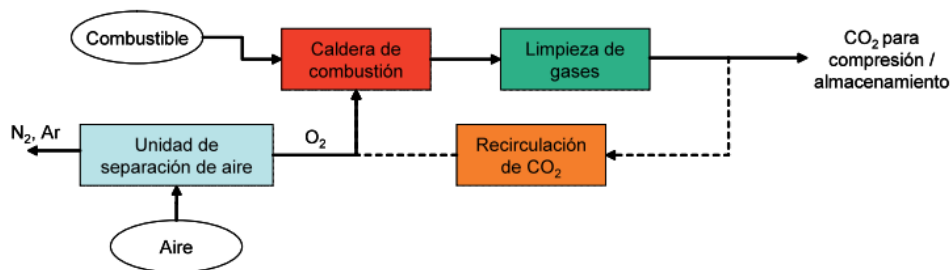


Figura 84. Funcionamiento básico de una planta de oxidación.

Fuente: (Jiménez S.)

- Chemical looping, o bucle químico: el aire y el combustible no se ponen en contacto, pero el O₂ es transportado entre dos reactores paralelos por un agente químico, principalmente un metal que absorbe O₂ en un lugar y lo esparrasa por otro lado. El resultado de la corriente de CO₂ resulta casi limpio y el funcionamiento de este proceso se puede observar en la Figura 85.

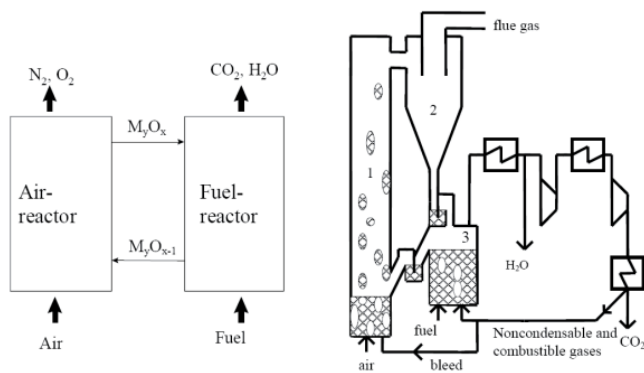


Figura 85. Esquema de funcionamiento de una planta de chemical looping.

Fuente: (Jiménez S.)

- Carbonatación-calcinación: es un método de captura de gas después de la combustión: de manera análoga al chemical looping, el refrigerante captura CO_2 en el reactor. (por ejemplo, carbonato de CaO en CaCO_3) y en el segundo lo libera como una corriente de CO_2 puro, como se representa en el esquema de la Figura 86.

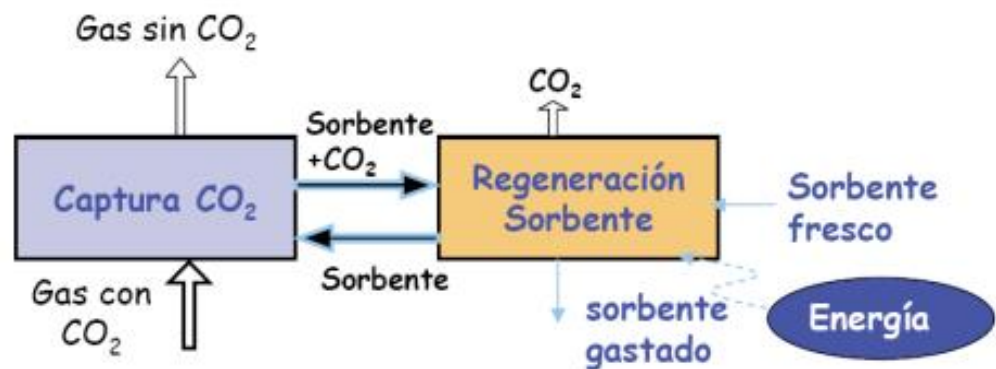


Figura 86. Esquema de funcionamiento de un módulo de carbonatación y calcinación para la captura de CO_2 procedente de la combustión de carbón.

Fuente: (Jiménez S.)

- Lecho Fluidizado burbujeante a presión atmosférica

Una planta que utilice esta tecnología consta básicamente de los mismos equipos utilizados para la tecnología de carbón pulverizado, con excepción del combustor. Al igual que para el lecho Circulante, esta tecnología puede ser utilizada con una gama muy amplia de calidades de carbón. Presenta ventajas considerables con relación a la casi inexistente contaminación por NO_x , la reducida emisión de SO_x , la buena eficiencia de combustión (98%), casi independientemente de la calidad del carbón utilizado. (UPME, s.f.)

- Ciclo combinado con lecho fluidizado a presión (PFBC)

Corresponde a desarrollo del lecho fluidizado atmosférico que introduce la presurización del combustor, tiene como ventaja la combinación de la generación de energía con turbinas de gas con la de las turbinas de vapor y, al mismo tiempo, mantiene las ventajas del lecho fluidizado en cuanto a la diversidad de carbones que puede procesar con un bajo nivel de emisión de contaminantes atmosféricos. (UPME, s.f.)

Consiste en un sistema de alimentación de carbón y de absorbente (caliza y dolomita), de un combustor con ciclones que recirculan las partículas capturadas, una turbina de gas, un economizador, una turbina de vapor, un sistema de precalentamiento de agua y un filtro de gases para capturar partículas de ceniza. (UPME, s.f.)

Y, según la Unidad de Planeamiento Minero Energético, define que existen dos clases de procesos dentro de esta tecnología: el circulante (PCFB) y el burbujeante (PFBC). Debido a su relativa alta disponibilidad, a los bajos requerimientos de espacio y volumen, y a la alta eficiencia del proceso, esta tecnología presenta buenas condiciones para su utilización en repotenciación de unidades existentes con procesos convencionales.

- Ciclo Combinado con Gas Natural y Carbón Pulverizado

Esta tecnología se basa en el uso combinado de gas natural y carbón. La planta de energía de ciclo combinado de gas natural y carbón pulverizado consta de un generador, una caldera de recuperación de calor alimentada por hornos generadores de vapor alimentados con carbón y utilizada por un generador de turbina de vapor, con equipos de dispositivos clásicos del ciclo de calor de Rankine.

El proceso se puede adaptar a muchos tipos de carbón, desde betún hasta lignito. Las características del carbón determinan en gran medida la eficiencia y capacidad de la planta. En

general, se preferirá el rendimiento de la planta si está ubicada en lugares de baja altitud, donde es más beneficioso para la operación de las turbinas de gas. Las plantas dotadas con esta tecnología requieren de la instalación de equipos especiales para mitigar la contaminación por emisiones atmosféricas.

- Ciclo Combinado con Gasificación del Carbón Integrada (IGCC)

Este ciclo combina la gasificación del carbón para producir energía eléctrica a partir de una turbina de gas, con la producción de vapor para la generación de energía eléctrica, a partir de una turbina de vapor.

Consta de un gasificador de carbón, un sistema de ciclones que captura las partículas gruesas arrastradas por los gases con recirculación a la cámara de gasificación, un enfriador de gases, un filtro para remoción de azufre contenido en los gases, una turbina con combustor de gas que comprime aire para la gasificación y genera energía eléctrica, una caldera de recuperación de calor de los gases de escape que genera vapor y una turbina de vapor para generación de energía eléctrica. Adicionalmente se obtiene vapor para la turbina, a partir del enfriador de gases y del gasificador.

Se conocen tres clases o tipos genéricos de gasificación del carbón apropiados para la generación de energía eléctrica:

- i) lecho fijo
- ii) flujo por arrastre
- iii) lecho fluidizado.

Una de las principales ventajas que ofrece el ciclo combinado con gasificación del carbón integrada es su capacidad para reducir emisiones atmosféricas dentro del mismo proceso.

- Ciclo Combinado a Carbón Tipo "Topping"

Es un ciclo híbrido basado en el pirólisis de la gasificación del carbón; Combina la generación de energía a gas a carbón utilizando el ciclo Brighton y la producción de energía del ciclo Rankine con una cámara de combustión de lecho fluidizado. Esta tecnología se puede adaptar al carbón bituminoso colombiano. El proceso "Topping" produce la emisión más baja de CO₂ entre todos los demás procesos, debido a que tiene la eficiencia más alta. Por su parte, el nivel de emisiones de NO_x es similar al producido por las demás tecnologías limpias de carbón, para generación de energía eléctrica."

7.5.2. Propiedades

Entre las propiedades del carbón térmico más importantes que se deben tener en cuenta a la hora de trabajar con él en la energía eléctrica según (Ruiz, 2019), son las siguientes:

Propiedades mecánicas

- | | |
|---------------|------------------|
| ✓ Dureza | ✓ Friabilidad |
| ✓ Abrasividad | ✓ Fragilidad |
| ✓ Resistencia | ✓ Triturabilidad |
| ✓ Cohesión | |

Propiedades térmicas

- ✓ Conductibilidad térmica
- ✓ Calor específico
- ✓ Dilatación

Propiedades eléctricas

- | | |
|---------------------------|-------------------------|
| ✓ Conductividad eléctrica | ✓ Constante dieléctrica |
|---------------------------|-------------------------|

- ✓ Propiedades físicas
- ✓ Contenido en agua
- ✓ Densidad y peso específico

7.5.3. Ventajas y desventajas del uso del carbón para energía eléctrica

El autor (Ruiz, 2019), nos describe que el carbón es el combustible más utilizado y dentro de sus ventajas y desventajas son las dispuestas en la Tabla 41.

Tabla 41. Ventajas y desventajas de la utilización de carbón como combustible.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<i>Es muy abundante:</i> La primera de las ventajas del carbón es una obiedad. Una fuente de energía sencilla de extraer que acabará por terminarse, pero no a corto plazo. Estados Unidos controla una cuarta parte de las reservas mundiales de carbón conocidas.	<i>Contaminación:</i> es el principal origen de contaminación en todo el mundo. Contribuye al efecto invernadero, lluvia ácida y alteración de ecosistemas.
<i>Económico:</i> Al ser abundante, es económico. Pero, además, comparado con otras fuentes de energía, parece una versión low cost. Esto deriva en que el precio de su energía sea menor, tanto para el empresario como para el cliente.	<i>No renovable:</i> Es una fuente no renovable que alguna vez se acabará y se estima que las reservas de carbón en todo el mundo podrían terminarse de aquí a 110 años.
<i>Empleo:</i> Otra ventaja obvia. Si el carbón supone un cuarto de la energía de todo el mundo, hará falta mano de obra para todo su proceso. Es un trabajo complicado pero muy bien remunerado.	<i>Nocivo:</i> Los elementos nocivos que arroja al aire suponen un peligro tremendo para el organismo
<i>Versatilidad:</i> Las alternativas que ofrece el carbón, permiten comercializarlo en estado sólido, pero también líquido o gaseoso.	

Fuente: (Ruiz, 2019)

7.5.4. Proceso de una planta carboeléctrica

Las centrales eléctricas de carbón convierten la energía almacenada del carbón en electricidad. Para ello, las centrales queman este mineral convirtiéndolo así en calor (energía térmica). El calor generado en la caldera durante la combustión se transfiere al agua de alimentación, que por efecto del calor se convertirá en vapor. El vapor generado en la caldera en condiciones de alta presión y temperatura se envía a la turbina donde su calor se convierte en energía mecánica de rotación del eje. Esta energía rotacional mecánica se convierte en energía eléctrica en un generador acoplado directamente. En la figura 87 se evidencia un diagrama del proceso simplificado de una planta carboeléctrica.

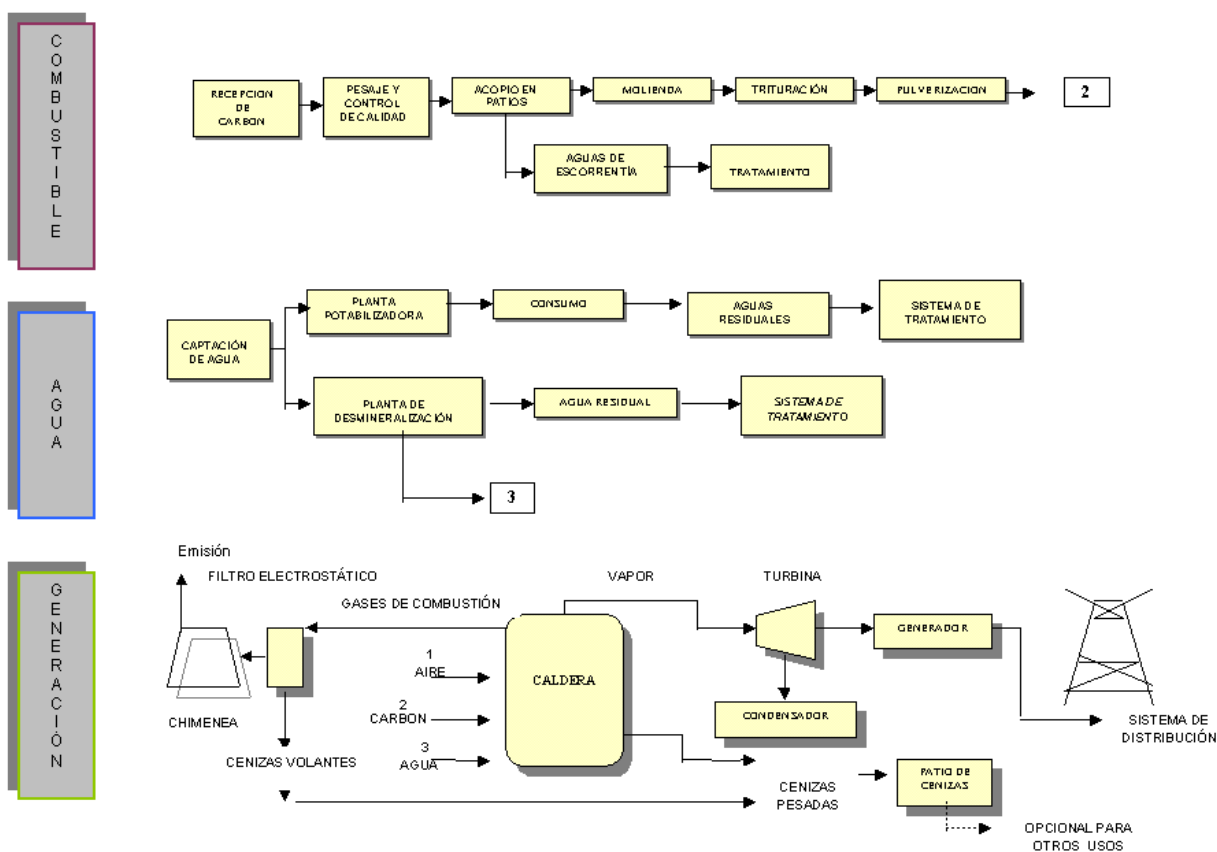


Figura 87. Diagrama del proceso simplificado de una planta carboeléctrica.

Fuente: (UPME, s.f.)

7.5.5. Aplicaciones en los procesos de generación de energía eléctrica ambientalmente sostenibles

- *Control de emisión de material particulado*

Durante el proceso de combustión, se expulsa material particulado y la (Unidad de Planeación Minero Energética, s.f.) expone que se deben realizar controles en los siguientes puntos:

- Flujo volumétrico total
- Eficiencia colectora requerida
- Características físicas y químicas de las partículas
- Distribución granulométrica de las partículas
- Concentración de partículas en la corriente de gas
- Temperatura, presión y humedad en la corriente de gas
- Consumo de energía
- Disponibilidad
- Requisitos de mantenimiento.

Estos materiales particulados no dependen de las características del proceso de combustión, depende totalmente del control operativo empleado según cada planta, y los sistemas de control usados en la industria se muestran en la Tabla 42.

Tabla 42. Control de material particulado: tecnología/combustible

Tecnología	Combustible	Sistemas de control				
		Ciclones	Lavadores de gases	Filtros de mangas	Precipitadores electrostáticos	Humectación de patios
Turbina de gas	Gas natural					
	Fuel Oil No.2					
Ciclo Stig	Gas natural					
	Fuel Oil No.2					
Ciclo Rankie con turbina a vapor	Carbón					
	Gas natural					
	Fuel Oil No.2					
	Fuel Oil No.6					
	Crudo de castilla					
	Biomasa					
	Residuos pesados					
Ciclo combinado	Gas natural					
	Fuel Oil No. 2					
Motores	Gas natural					
	Fuel Oil No.2					
	Fuel Oil No.6					
IGCC	Carbón					
	Biomasa					
	Residuos pesados					
AFBC	Carbón					
	Biomasa					
PFBC	Carbon					
	Biomasa					

Fuente: (Unidad de Planeación Minero Energética, s.f.)

- *Control de emisiones de SO_x*

El control para la precombustion del SO_x, se realiza mediante la desulfuración de los gases de escape y, para llevarla a cabo, se emplean varios reactivos químicos como: sodio, magnesio, calcio u otros materiales de base alcalina que reaccionan con el SO_x para formar una sal inerte la cual se colecta como un residuo sólido.

La eficiencia en la remoción del SO_x, varía desde el 50% hasta el 90 % dependiendo del sistema empleado y es necesario contar con las instalaciones adicionales para el manejo del subproducto, el cual según su composición, pureza y calidad puede ser usado en la industria

cementera, de construcción o de cerámica. Para el control de SOx por tecnología y combustible para la (Unidad de Planeación Minero Energética, s.f.), se indican en la Tabla 43.

Tabla 43. Control de SOx por tecnología y combustible.

Tecnología	Combustible	Sox		
		Desulfurización	Control de calidad combustible	Lavado de combustible
Turbina a gas	Gas natural			
	Fuel Oil No.2			
Ciclo Stig	Gas natural			
	Fuel Oil No.2			
Ciclo Rankie con turbina a vapor	Carbón			
	Gas natural			
	Fuel Oil No.2			
	Fuel Oil No.6			
	Crudo de castilla			
	Biomasa			
	Residuos pesados			
Ciclo combinado	Gas natural			
	Fuel Oil No. 2			
Motores	Gas natural			
	Fuel Oil No.2			
	Fuel Oil No.6			
IGCC	Carbón			
	Biomasa			
	Residuos pesados			
AFBC	Carbón			
	Biomasa			
PFBC	Carbon			
	Biomasa			

Fuente: (Unidad de Planeación Minero Energética, s.f.)

Motores	Gas natural								
	Fuel Oil No.2								
	Fuel Oil No.6								
IGCC	Carbón								
	Biomasa								
	Residuos pesados								
AFBC	Carbón								
	Biomasa								
PFBC	Carbon								
	Biomasa								

Fuente: (Unidad de Planeación Minero Energética, s.f.)

RGT: Recirculación de gas de tiro

IVA: inyección de agua o vapor

ICE: inyección de combustible por etapas

IO2: inyección de oxígeno puro

CE: combustión por etapas

IAE: inyección de aire por etapas

RGB: Reburning

SNCE-SCR: Reducción catalítica no selectiva-selectiva.

- *Control de ruido*

El ruido se puede controlar de dos formas, en primer lugar, mediante el control directo de la fuente y en segundo lugar mediante el control a lo largo de la trayectoria de dispersión de la onda sonora, en las estructuras del receptor o directamente en el receptor. El primer grupo de métodos de control incluye el mantenimiento preventivo, ya que los componentes asíncronos, desalineados o asíncronos son las principales fuentes de ruido.

Por otro lado, los fabricantes de equipos electromecánicos constituyen sus diseños de acuerdo a las especificaciones del comprador, por lo que durante la fase de diseño es importante saber qué nivel de ruido debe cumplir la plata, respuesta, ubicación sensible, uso del suelo circundante y costos asociados a la misma, cumpliendo con el nivel de ruido requerido. Algunas de las recomendaciones para mejorar las condiciones de vibraciones de ruido se representan en la figura 88.

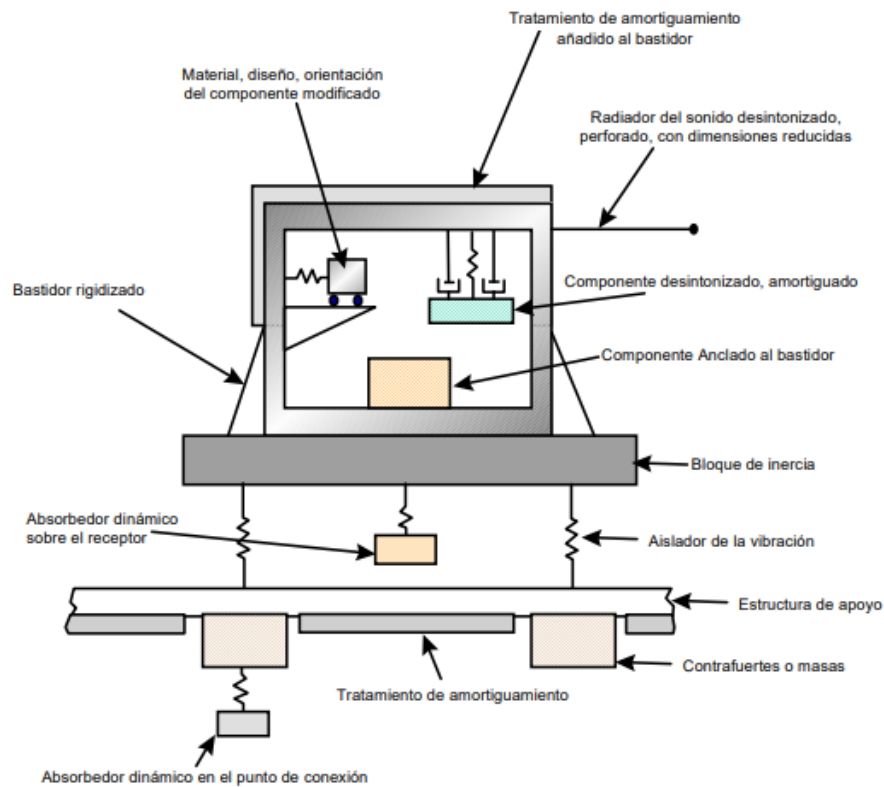


Figura 88. Modificaciones y aislamiento de la vibración.

Fuente: (Unidad de Planeación Minero Energética, s.f.)

7.6. Procesos cerámicos

Los materiales cerámicos son el producto de diversos materiales sólidos e inorgánicos como la arcilla o el caolín que junto a una serie de aditivos son mezclados y moldeados, para luego

someterlos a cocción donde sufren una serie de cambios físicos-químicos en el cual adquieren una consistencia pétreo. (Sofía, y otros, 2014)

7.6.1. Proceso en general

El proceso de fabricación de productos cerámicos se conforma por tres grupos de operaciones, el primero es la preparación de materias primas y productos intermedios, el segundo la obtención del producto acabado listo para el sector de producción, y el tercero, la distribución de la colocación del producto en el consumidor final. (Grupo de gestión eficiente de energía, KAI)

La industria dedicada a la fabricación de cerámicos elabora una gran variedad de productos que tiene como destino diferentes aplicaciones, dichos productos tiene varias clasificaciones, las cuales dependen del proceso de fabricación, características, funcionalidad, entre otros. (CASTAN, 2016)

Entre los productos de la fabricación de cerámicos se logra distinguir los siguientes:

- Pavimentos y revestimientos (baldosas cerámicas)
- Ladrillos y tejas (cerámica estructural)
- Cerámica de mesa y de decoración (cerámica doméstica)
- Productos refractarios
- Cerámica sanitaria
- Tubería de gres vitrificado
- Agregados de arcilla expansiva
- Abrasivos aglomerados inorgánicos

7.6.2. Características

Los materiales cerámicos pueden tener estructuras cristalinas y no cristalinas, o una mezcla de ambas, aunque también se pueden presentar en otras estructuras, desde simples a más complejas

debidos las mezclas en diferentes fases. Pero se clasifican en dos grandes grupos, los cristalinos o cerámicos y los no cristalinos o vidrios. A su vez, los cristalinos pueden ser monocristalinos o policristalinos. (Arroyo, Guerrero, Zambrano, & Cardenas)

7.6.3. Propiedades

Las propiedades de los procesos cerámicos con carbón son los siguientes:

- Comparados con los metales y plásticos son duros, no combustibles y no oxidables.
- Su gran dureza los hace un material ampliamente utilizado como abrasivo y como puntas cortantes de herramientas.
- Gran resistencia a altas temperaturas, con gran poder de aislamiento térmico y eléctrico.
- Gran resistencia a la corrosión y a los efectos de la erosión que causan los agentes atmosféricos.
- Alta resistencia a casi todos los agentes químicos.
- Una característica fundamental es que pueden fabricarse en formas con dimensiones determinadas.
- Los materiales cerámicos son generalmente frágiles o vidriosos. Casi siempre se fracturan ante esfuerzos de tensión y presentan poca elasticidad

7.6.4. Fabricación

El proceso de fabricación de productos cerámicos es similar para todos los tipos de productos y consiste en diferentes etapas, que difieren en función del producto elaborado. Las principales etapas de producción se pueden ver en la figura 89. (CASTAN, 2016)

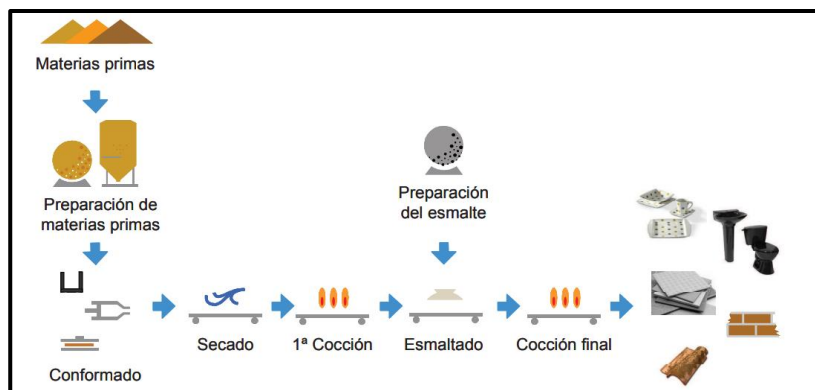


Figura 89. Esquema del proceso de fabricación de productos cerámicos.

Fuente: (CASTAN, 2016)

Del mismo modo, (Grupo de gestión eficiente de energía, KAI) definen que el proceso de fabricación de los cerámicos estructural puede variar según la entidad que lo realiza, y sus diferencias están en las operaciones de preparación de las materias primas y el moldeo. Un proceso general utilizado en la industria se puede ver en la figura 90.

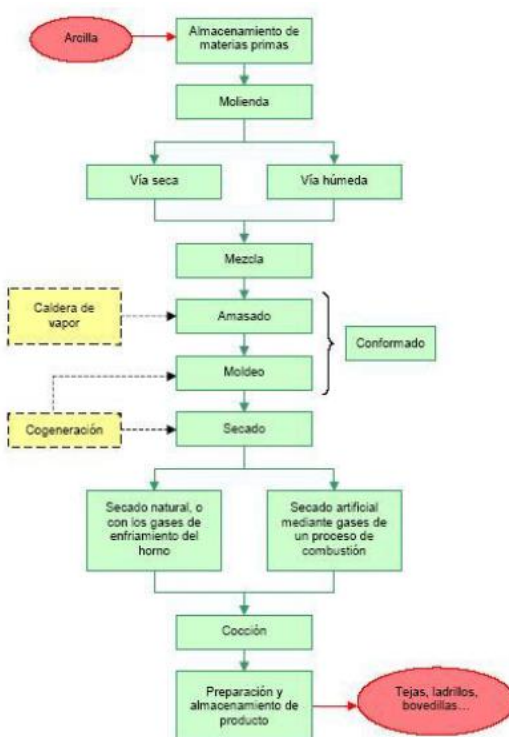


Figura 90. Proceso general de la industria cerámica.

Fuente: (Grupo de gestión eficiente de energía, KAI)

- Preparación de las materias primas: se selecciona las materias primas a utilizar entre las cuales están arcillas, carbonatos, cuarzo, etc. Estas son dosificadas a fin de tener una proporción adecuada para obtener las propiedades deseadas. A las mezclas obtenidas se les agrega una cantidad mayor o menor de agua y van acompañadas de una molienda que se realiza vía húmeda o vía seca, para de este modo lograr una distribución de tamaño de partículas adecuadas. (CASTAN, 2016)
- Conformado de las piezas: al terminar la etapa de preparación de las materias primas, se procede a los procedimientos de conformación para los cuales se usan más frecuentemente el prensado, la extrusión y el colado. Las proporciones de agua presente en las mezclas de las materias primas dependerá del método de conformación seleccionado a utilizar. (CASTAN, 2016)
- Secado: después de realizar el moldeado de las piezas cerámicas se someten a un ciclo de secado en el cual se eliminará el agua que contiene. El objetivo de esto es obtener una resistencia mecánica mayor, para que puedan soportar procesos posteriores sin romperse. (CASTAN, 2016)
- Cocción: esta es la etapa final del proceso en donde el producto crudo es sometido a un ciclo térmico en donde se logran temperaturas que van desde los 850 °C a los 1400 °C, dependiendo del producto que se requiere fabricar. Además, esta etapa tiene gran importancia debido a que le da a las piezas las diferentes propiedades técnicas (absorción de agua, resistencia mecánica, etc.) y estéticas (coloración, brillo, planaridad, etc.) finales. (CASTAN, 2016)

7.6.5. Tipos de hornos utilizados en el proceso de cocción

- Horno Túnel: este tipo de horno se distingue por tener zonas en donde el fuego actúa sobre el producto cerámico de forma fija, mientras se va desplazando. (ATLÁNTICO & COLCIENCIAS).

(Grupo de gestión eficiente de energía, KAI) nos indica que dentro del horno se distinguen 3 zonas (ver Figura 91):

- *Pre calentamiento*: una corriente de aire caliente procedente de zona de cocción que circula en sentido contrario al material. Normalmente se utiliza como fuente térmica el calor recuperado del horno y tiene por objetivo que el material pierda el agua y aumente su temperatura.
- *Cocción*: por medio de quemadores de combustible tiene como función conseguir la curva optima de cocción en la parte central del horno.
- *Enfriamiento*: es sometido al enfriamiento progresivo para evitar grietas en las piezas.

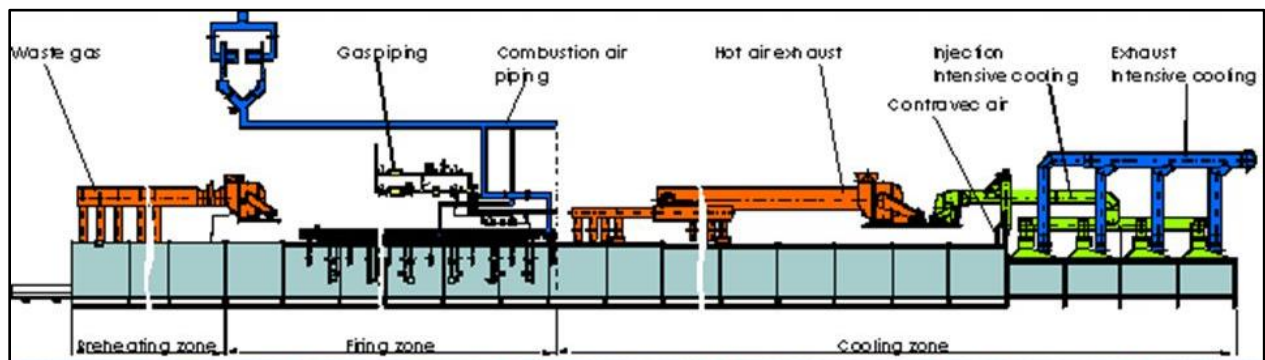


Figura 91. Partes del Horno tipo Túnel

Fuente: <https://slideplayer.es/slide/3552301/12/images/15/HORNO+TUNEL+DE+VAGONETAS.jpg>

- Horno Hoffmann: este tipo de horno está formado por varias cámaras en series (ver Figura 92), las cuales se encuentran unidad, en estas el producto cerámico se

mantiene estático, mientras el fuego se desplaza a lo largo de las cámaras de cocción. (ATLÁNTICO & COLCIENCIAS)

Los quemadores de este horno pueden consumir diversos combustibles (gas natural, fuel oil, coque de petróleo, orujill), son de varios tipos según (Grupo de gestión eficiente de energía, KAI):

- De impulsos (verticales)
- Laterales de precalentamiento.
- De gasificación



Figura 92. Horno Hoffman.

Fuente: <https://www.solostocks.com.co/venta-productos/maquinaria-fabricar-materiales-construccion/maquinas-fabricar-ladrillos/horno-hoffman-para-la-coccion-de-ladrillo-bloque-y-tejas-1447781>

“El combustible utilizado en este horno es carbón mineral que se prepara a través de molinos de martillos transformándolo en partículas diminutas y se utiliza un sistema de bandas transportadores para dirigir el carbón a la parte superior del horno” (Gómez, 2017). El carbón se inyecta en el horno con dos Carbojet, que son desplazados y recargados de carbón manualmente durante una hora para el precalentamiento y la Recombustión del producto. El carbojet comienza a precalentar

la inyección de carbón en dos cámaras antes de pasar al segundo carbojet requemando el bloque. Lo hacen a través de los agujeros en la cúpula del horno. (Figura 93)

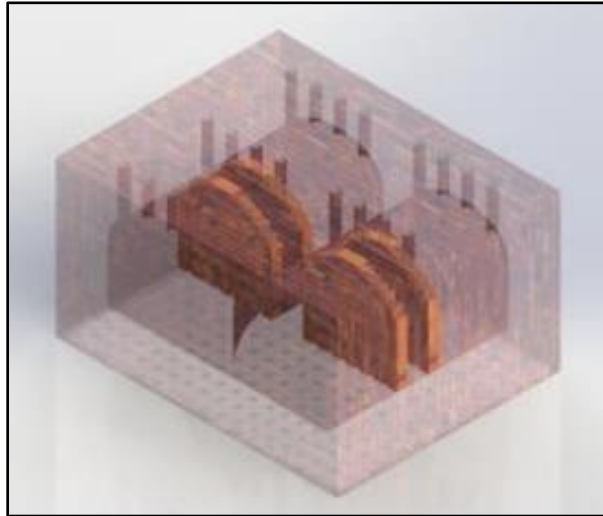


Figura 93. Orificios de inyección de combustible en el horno Hoffman.

Fuente: (Gómez, 2017)

Después que el carbojet realice la quema de cierta cantidad de apiles, se dispone a tumbar las puertas de los apiles y a sacar el calor por medio de un ventilador, para retirar el material, almacenarlo y proceder a su respectiva comercialización.

- Horno Tipo Colmena: este tipo de horno es fijo, con techo en cúpula o domo y elaborado en ladrillos comunes, en donde las paredes están en contacto con el aire exterior, estos tienen una serie de ductos que llevan los gases hacia las chimeneas en donde salen al ambiente por tiro natural. (Jiménez & Jaramillo, Recuperación energética y análisis térmico del proceso de cocción en la industria cerámica). Los elementos de este tipo de hornos se evidencian en la Figura 94.

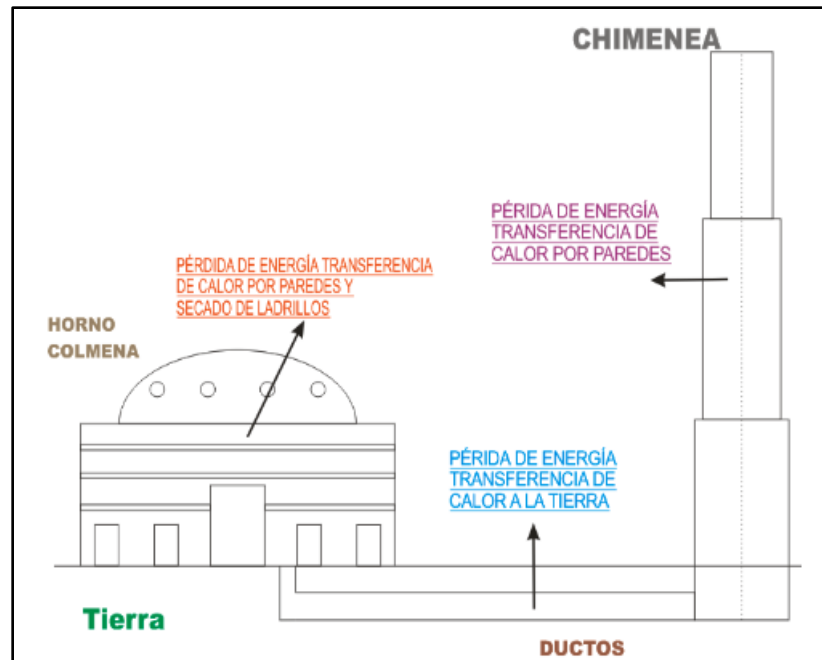


Figura 94. Elementos de la planta analizada y representación de las pérdidas de energía.

Fuente: (Jiménez & Jaramillo, Recuperación energética y análisis térmico del proceso de cocción en la industria cerámica)

En los hornos colmena que utilizan carbón como combustible, se pueden implementar medidas de carácter operacional en mejoras de trituración y dosificación de combustibles por medio de stokers, carbojet o eductores. En el caso del carbojet para la alimentación de combustible mecánica-manual o mecánica automática, reemplaza la adición de manual de combustible y garantiza un flujo de entrada de material más homogéneo y un mayor control de la temperatura interna del horno. Dado que el carbón es triturado e inyectado, su eficiencia es más alta y su contaminación menor.

7.6.6. Principales combustibles utilizados

“El uso de un combustible u otro en la industria de fabricación de productos cerámicos estructurales dependerá de diferentes factores: disponibilidad, distribución, infraestructura, precio, eficiencia ambiental y eficiencia energética”. (ATLÁNTICO & COLCIENCIAS)

Además de esto a cada combustible se le debe realizar un análisis de diferentes características, entre las cuales está el PCI (poder calorífico inferior). Los combustibles que se usan con más frecuencia son:

- Gas natural
- Conque
- Coque micronizado
- Fuel
- Carbón
- Biomasa

El documento sobre la industria cerámica de (Grupo de gestión eficiente de energía, KAI), expresa que los combustibles utilizados poseen características generales dispuestas en la Tabla 45.

Tabla 45. Características generales de los combustibles.

COMBUSTIBLE	PCI (kcal/kg)	PROCESOS EN QUE SE UTILIZA	EFICIENCIA ENERGÉTICA	RESULTADOS ECONÓMICOS
Gas Natural	11.600	Cocción Calderas Auxiliares Secado Cogeneración	En general, ofrece un buen rendimiento durante la combustión	Su precio varía en función del precio del petróleo.
Coque de Petróleo	7.700	Cocción	En general Ofrece un buen rendimiento durante la combustión.	Precio menor que el resto de los combustibles. Puede variar en función del contenido en azufre, y el HGI.
Coque ¹ Micronizado	8.300	Cocción	El tamaño de partícula junto con la circulación del aire en el horno provoca que el reparto de calor sea más equivalente provocando un buen rendimiento.	El precio del micronizado se sitúa por encima del coque de petróleo y por debajo del resto de combustibles.
Fuel	9.700	Cocción Cogeneración	Su baja temperatura de ignición provoca que deba calentarse previamente. Su comportamiento en combustión es bueno.	Costo Elevado. Su precio fluctúa en función del precio del petróleo.
Carbón	Depende del tipo de carbón.	Cocción	Su bajo PCI junto con una generación de cenizas elevada hacen que su eficiencia sea baja.	Su precio se sitúa entre el coque de petróleo y el gas.
Biomasa	2.831-4.541 ²	Cocción Secado	Su bajo PCI hace que su eficiencia energética sea baja.	Su costo es elevado y variable debido principalmente a su disponibilidad.

1. Tamaño medio de grano de unas 20 micras.
2. Depende del grado de humedad.

Fuente: (Grupo de gestión eficiente de energía, KAI)

En la tabla 46, se presenta una comparación de los combustibles después de conocer las características de estos según (Grupo de gestión eficiente de energía, KAI).

Tabla 46. Ventajas e inconvenientes de los distintos combustibles para el sector de la cerámica.

COMBUSTIBLE	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Gas Natural	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Emisiones al aire menores que el resto de combustibles. ▪ PCI elevado. ▪ Transporte cómodo y limpio. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Precio elevado. ▪ La infraestructura necesaria no llega a todas las instalaciones.
Coque de Petróleo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Precio bajo. ▪ Se puede mezclar con las arcillas. ▪ Disponibilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se puede producir la emisión de partículas en el transporte y almacenamiento. ▪ Emisiones al aire moderadas. ▪ Elevado contenido de azufre (aunque las emisiones son catalizadas durante el proceso).
Coque Micronizado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Precio bajo ▪ El transporte y almacenamiento no genera la emisión de partículas. ▪ PCI más elevado que el coque convencional. ▪ Disponibilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Emisiones al aire moderadas. ▪ Elevado contenido en azufre (aunque las emisiones son catalizadas durante el proceso).
Fuel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PCI elevado. ▪ Almacenamiento y transporte sin generación de emisiones. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Emisiones al aire significativas en la combustión. ▪ Precio elevado. ▪ Complejidad de manipulación en la precombustión. ▪ Peligrosidad en el almacenamiento en instalaciones antiguas.
Carbón	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Precio medio. ▪ Disponibilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Emisiones al aire elevadas. ▪ El almacenamiento y transporte puede generar una emisión de partículas elevada.
Biomasa	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No computa a nivel de emisiones de CO₂ (ventaja respecto al protocolo de Kyoto). ▪ Su utilización es primada en muchos países. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Precio elevado. ▪ Disponibilidad intermitente. ▪ Generalmente no se utiliza en el proceso de cocción.

Fuente: (Grupo de gestión eficiente de energía, KAI)

7.6.7. Aspectos ambientales

Los combustibles son los encargados de generar en el proceso de fabricación de cerámicos un consumo de energía térmica la cual se produce principalmente en la etapa de secado y de cocción.

La combustión de los combustibles fósiles como el gas natural o el carbón tienen una consecuencia para el medio ambiente por las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), el cual es uno de los gases que producen un efecto invernadero y por lo tanto genera cambios climáticos y calentamiento global del planeta. (E.MONFORT, y otros, 2010)

Las emisiones de dióxido de carbono que se producen durante la fabricación de productos cerámicos se dividen en dos grupos:

- Emisiones de la combustión: son las producidas por la reacción exotérmica entre el combustible y el comburente. (E.MONFORT, y otros, 2010)
- Emisiones del proceso: son las que se producen por la descomposición de los carbonatos presentes en las materias primas en la etapa de cocción. (E.MONFORT, y otros, 2010)

Además de las emisiones de CO_2 , la combustión del carbón genera residuos como son las cenizas, estas contienen sustancias contaminantes, potencialmente peligrosas para el ambiente ya que no tienen aplicaciones prácticas por lo cual terminan siendo desechos de este proceso. (Karen Bibiana Díez Contreras, 2020)

(Grupo de gestión eficiente de energía, KAI) nos describe los aspectos ambientales más significativos de las fases del proceso de la industria cerámica que se evidencian en la figura 95.

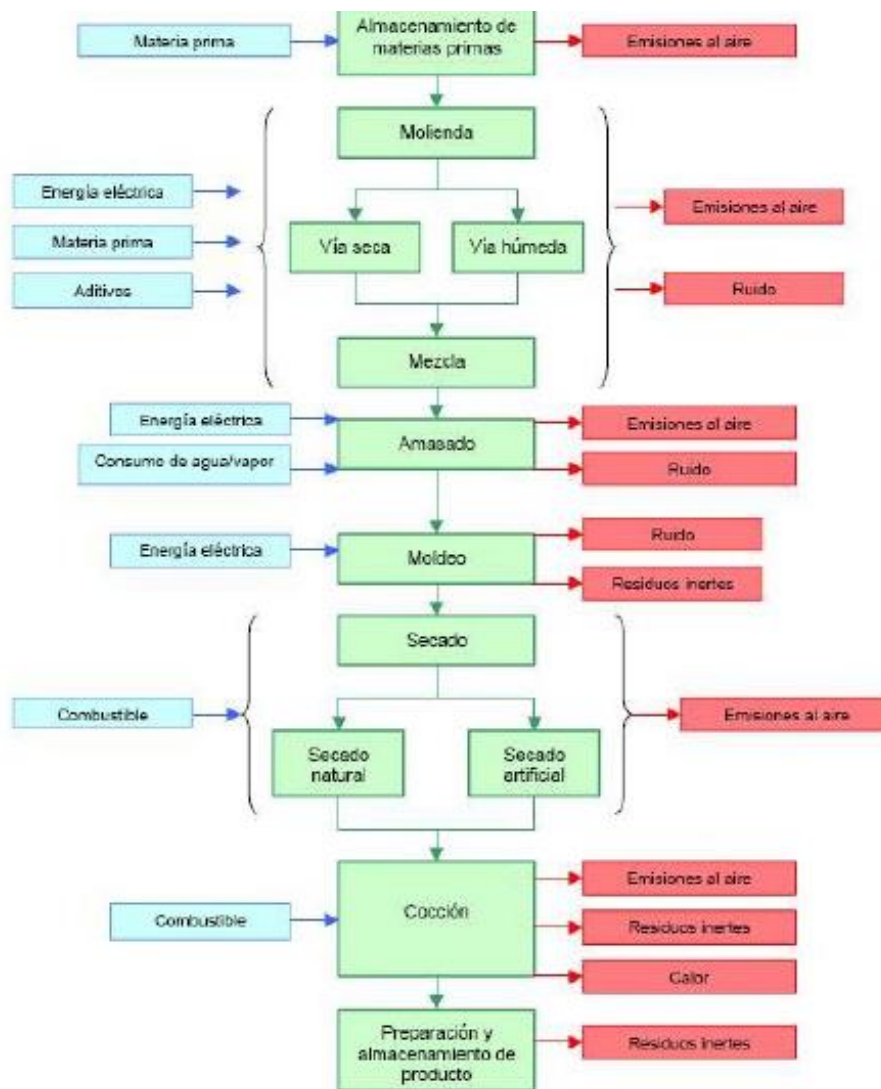


Figura 95. Procesos de fabricación y sus impactos ambientales más significativos.

Fuente: (Grupo de gestión eficiente de energía, KAI)

7.6.8. Medidas de control ambientales

Algunas medidas de control en el manejo ambiental recomendados por (Grupo de gestión eficiente de energía, KAI), son:

- *Reutilización de productos antes de la cocción:* Durante el proceso de extrusión o formación, el material se presiona a través de un molde que forma el producto y luego se corta en las dimensiones apropiadas según el producto formado. En este

proceso, el proceso de corte crea una serie de residuos que pueden ser devueltos a la mezcladora sin sacrificar la calidad de la materia prima.

- *Conformado en seco (ladrillo prensado o extrusión dura):* Si se prensa el material con la humedad propia de la arcilla, se consigue reducir casi al 100% el consumo energético del secadero; se podría secar en el prehorno con calor residual.
- *Recuperación de calores residuales:* en los hornos resultan calores que tienen altos niveles térmicos, por ejemplo, el calor de refrigeración de la bóveda y de las vagonetas del horno, sale en forma de una corriente de aire a 100-120°C, que se puede aprovechar en el prehorno (si existe) o en la propia caja de mezclas, mezclándolo con el aire de recuperación directa, o aprovecharse como aire de combustión en las boquillas del horno.
- *Recirculación de gases:* La recirculación de gases disminuye la duración del ciclo de cocción ya que facilita notablemente la transmisión de calor en el interior del horno. Esta mejora permite la producción de piezas de mayor calidad (disminuye el porcentaje de piezas rotas y defectuosas) con un consumo energético menor (disminuye la duración del ciclo de cocción).

7.7. Carboquímica

La CARBOQUIMICA es esa rama de la química que se enfoca en la elaboración de productos industriales a base de carbón (o sea la utilización del carbón como materia prima para la elaboración de productos y no como combustible.) (CARBOQUIMICA , s.f.)

7.7.1. Procesos básicos

Dentro de los procesos que se realiza en la carboquímicas se presentan los siguientes.

- *Gasificación del carbón*

La gasificación es un proceso termoquímico por el cual un residuo orgánico (material carbonoso) es transformado en un gas combustible. Esto sucede mediante una serie de reacciones que ocurren a una temperatura determinada en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno y/o vapor de agua). (Superintendencia de Riesgos de Trabajo, 2019)

Durante la gasificación del carbón (ver Figura 96), el mismo reacciona con oxígeno, vapor y dióxido de carbono para formar un gas que contiene hidrógeno y monóxido de carbono. Durante este proceso, que es esencialmente una combustión incompleta, el azufre y el nitrógeno del carbón son convertidos en sulfuro de hidrógeno (en lugar de dióxido de azufre) y amoníaco (en lugar de óxido de nitrógeno), respectivamente. Estas formas reducidas de azufre y nitrógeno son fácilmente aisladas, capturadas y utilizadas, haciendo de la gasificación una tecnología de carbón limpio con un mejor desempeño ambiental que la combustión de carbón. La gasificación se puede utilizar para producir un gas combustible que es adecuado para varias aplicaciones dependiendo el valor calórico del mismo.). (Superintendencia de Riesgos de Trabajo, 2019)

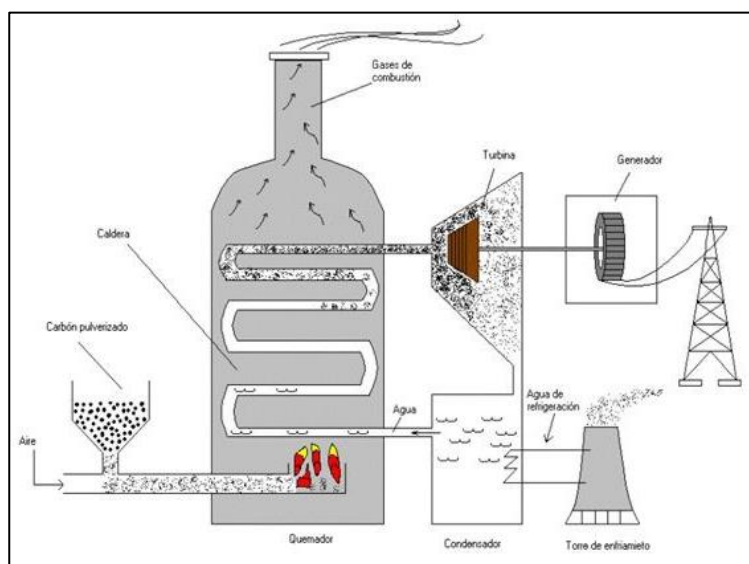


Figura 96. Planta de gasificación del carbón en superficie.

Fuente: (Superintendencia de Riesgos de Trabajo, 2019)

Este proceso podrá ser aplicado bajo tierra. La gasificación subterránea consiste en una cámara, dentro de la propia veta de carbón, en la que se inyecta oxígeno a presión y agua pulverizada. De esta forma, las reacciones químicas conseguidas producen un gas rico en monóxido de carbono, hidrógeno y otros elementos como metano. Este gas, tras una desulfuración, puede utilizarse para generar energía eléctrica o como combustible. El carbón empleado no necesita ser de alto poder calorífico, sino que permita buenas reacciones, aunque su óptimo aprovechamiento también depende de las características geológicas del terreno adyacente.). (Superintendencia de Riesgos de Trabajo, 2019)

Las aplicaciones de la gasificación es la producción de as combustible adecuado según el valor calórico según (Superintendencia de Riesgos de Trabajo, 2019) son:

- *Gas combustible de bajo valor calorífico:* para uso industrial y para producción de energía.
- *Gas combustible de mediano valor calorífico:* para uso en síntesis de productos químicos tales como amoníaco y metanol.
- *Combustible o gas de alto valor calorífico:* para el transporte.

Por otro lado, (Superintendencia de Riesgos de Trabajo, 2019) define tres tipos de gasificadores estos son:

- *Gasificadores de lecho móvil:* que producen alquitranes, aceites, fenoles, e hidrocarburos pesados. Las concentraciones en el producto de gas son controladas por enfriamiento y lavado con agua.
- *Gasificadores de cama fluida:* que producen cantidades significativamente menores de estos compuestos debido a un funcionamiento a mayor temperatura.

- *Gasificadores de flujo atrapado:* que operan a temperaturas aún más altas que 1650 °C, puede lograr conversiones de carbono de más de 99.5%.
 - Los trabajadores en gasificación del carbón podrían estar expuestos a: hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), amianto, sílice, aminas, arsénico, cadmio, plomo, níquel, vanadio, hidrocarburos, dióxido de azufre, ácido sulfúrico y aldehídos.
- *Ventajas:*

La gasificación subterránea ofrece, según los expertos, una de las maneras más ecológicas y versátiles de convertir el carbón en electricidad, hidrógeno y otros productos energéticos. En este sentido, los beneficios medioambientales y económicos de esta tecnología son varios:

- Podría servir para generalizar el uso del hidrógeno como combustible limpio, aprovechando además capas de carbón de difícil explotación
- Permite aprovechar la energía contenida en el carbón sin necesidad de extraerlo, evitando los problemas ecológicos y de seguridad de la minería convencional, ya que las cenizas y otros componentes indeseables permanecen en el propio yacimiento, lo que significa además un gran ahorro
- El CO₂, uno de los principales gases de efecto invernadero, puede ser capturado de manera que no escape a la atmósfera emite cantidades muy bajas de los gases contaminantes derivados de la combustión del carbón, como óxidos de azufre (SO_x) o de nitrógeno (NO_x). Asimismo, el dióxido de carbono (CO₂), uno de los principales gases de efecto invernadero, puede ser capturado por procesos químicos de manera que no escape a la atmósfera

- Las plantas de gasificación de carbón son más eficientes energéticamente que las convencionales de combustión (hasta un 50%), y los expertos consideran que en los próximos años se podría llegar hasta el 70 u 80%

Obstáculos del sistema

- Las plantas de gasificación de carbón producen más de CO₂ que las centrales de carbón tradicionales. Además, un estudio de la Universidad Duke, en Estados Unidos, dice que el gas natural sintético emite siete veces más gases de efecto invernadero que el gas tradicional y casi el doble que una central termoeléctrica a carbón. El proceso de UCG da como resultado la generación de monóxido de carbono (CO), hidrogeno (H), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), etano (C₂H₆), agua, alquitrán y cenizas. Este proceso también puede generar otros subproductos, incluyendo ácido sulfhídrico (H₂S), arsénico (As), mercurio (Hg), y plomo (Pb). Estos subproductos del proceso UCG presentan un peligro ambiental en las inmediaciones de la veta por el filtrado de materiales orgánicos e inorgánicos en el agua subterránea. Los ensayos preliminares mostraron que este método puede crear un riesgo significativo para las aguas subterráneas en los estratos adyacentes. Cualquier escape de estos gases tóxicos tendrá graves consecuencias en la salud de los operarios, poblaciones cercanas, animales, y el medio ambiente por su contribución al efecto invernadero.
- El segundo problema es el uso de agua. La gasificación del carbón es uno de los sistemas de generación de energía que emplea más agua, y grandes áreas de China,

particularmente en el oeste del país, que tienen plantas para este fin ya tienen dificultades en el suministro de agua.

- La falta de control en el proceso de gasificación subterráneo debido a que el carbón es anisótropo (Es decir que las características son diferentes dependiendo de la dirección que se mida) por lo tanto es complejo saber las condiciones de la combustión interna que se produce.

7.7.2. Hidrogenación del carbón

La hidrogenación del carbón consiste en agregar hidrógeno a la estructura del carbono, destruyéndolo lo más posible para convertir el destilado en líquido. (Dufour, 2006).

Este proceso ha pasado por transformaciones que han permitido la mejora de la técnica utilizada, en un inicio se basaron en preparar una suspensión del carbón en aceites pesados, donde se disolvía parcialmente, y aplicar altas temperaturas y presiones con el objetivo de craquear la estructura del carbón. Posteriores mejoras consistieron en la introducción de un catalizador (óxido de hierro, níquel-molibdeno o cobalto-molibdeno sobre alúmina) y de hidrógeno que moderaron las condiciones a aplicar, pasando de 900 a 400-450 °C y de 1.000 a 150-200 bar. Según un nuevo estudio. Un esquema del proceso de hidrogenación se puede visualizar en la Figura 97. (Jauregi, Roman, & Vilches, s.f.)

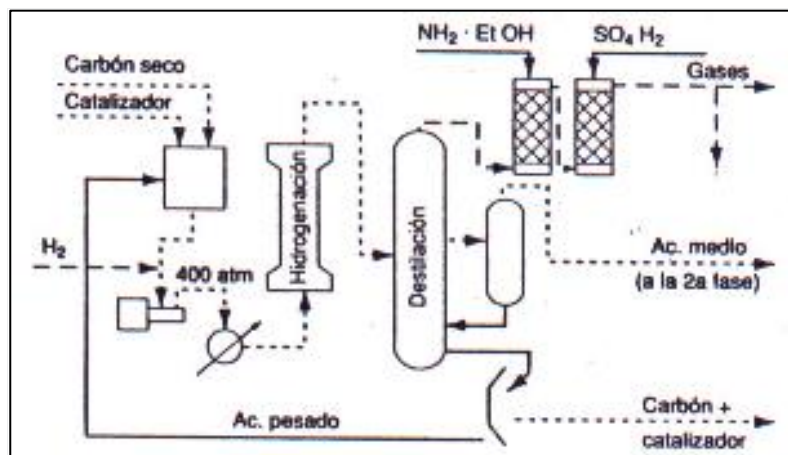


Figura 97. Hidrogenación de carbones fase primaria

Fuente: (Jauregi, Roman, & Vilches, s.f.)

En la figura 94 se representa el diagrama de flujo de una instalación industrial de hidrogenación en primera etapa. El carbón se pulveriza finamente y se amasa con el catalizador, también pulverizado, y el vehículo (aceite pesado). A la mezcla homogénea anterior se incorpora el hidrógeno y el conjunto se comprime hasta 400 atm y se calienta 500°C, que se mantiene durante todo el tiempo de residencia en la columna de hidrogenación. El producto de reacción se somete a destilación, de la que salen unos productos de cola (masa carbón, aceite y catalizador) de la que se separa el aceite por centrifugación y se recircula. El carbón sin reaccionar y el catalizador envenenado se desechan. Los productos de cabeza son hidrocarburos de baja magnitud molecular que, antes de beneficiarse por separado, pasan por dos columnas regadas con etanolaminas y ácido sulfúrico diluido, respectivamente, para separar los componentes ácidos y básicos que contienen.

La fracción media pasa a otra columna de fraccionamiento cuyos productos de cola refluyen a la columna relámpago, y los de cabeza son la materia que se lleva a hidrogenar en la

segunda etapa, en la que se produce el reformado catalítico en presencia de los óxidos o sulfuros, a temperatura superior a la de la fase pastosa. (Jauregi, Roman, & Vilches, s.f.)

En condiciones más suaves de temperatura en la segunda etapa, se consigue elevar los rendimientos de aceites (lubricantes) respecto a los de gasolina. El aumento de presión favorece esta variante. Es característico de los productos de hidrogenación su elevada pureza que hace innecesario su refinado y el alto índice de octano de las gasolinas, con estructura isoparafínica-aromática. (Jauregi, Roman, & Vilches, s.f.)

7.7.3. Licuefacción del carbón

La licuefacción directa del carbón (Figura 98), también conocida como proceso Pott-Broche, es un proceso químico que convierte el carbón directamente en una mezcla de hidrocarburos líquidos denominada "crudo sintético". Primero se disuelve el carbón en un disolvente a alta presión y temperatura y luego se añade hidrógeno para realizar un hidrocrackeo en presencia de un catalizador. El producto obtenido es un crudo sintético que a continuación se debe refinar, consumiendo más hidrógeno. La diferencia con la "licuefacción indirecta" es que en este proceso se genera primero gas de síntesis que luego es convertido en hidrocarburos líquidos mediante una reacción de Fischer-Tropsch (ver figura 99). (Scherb, 2006)

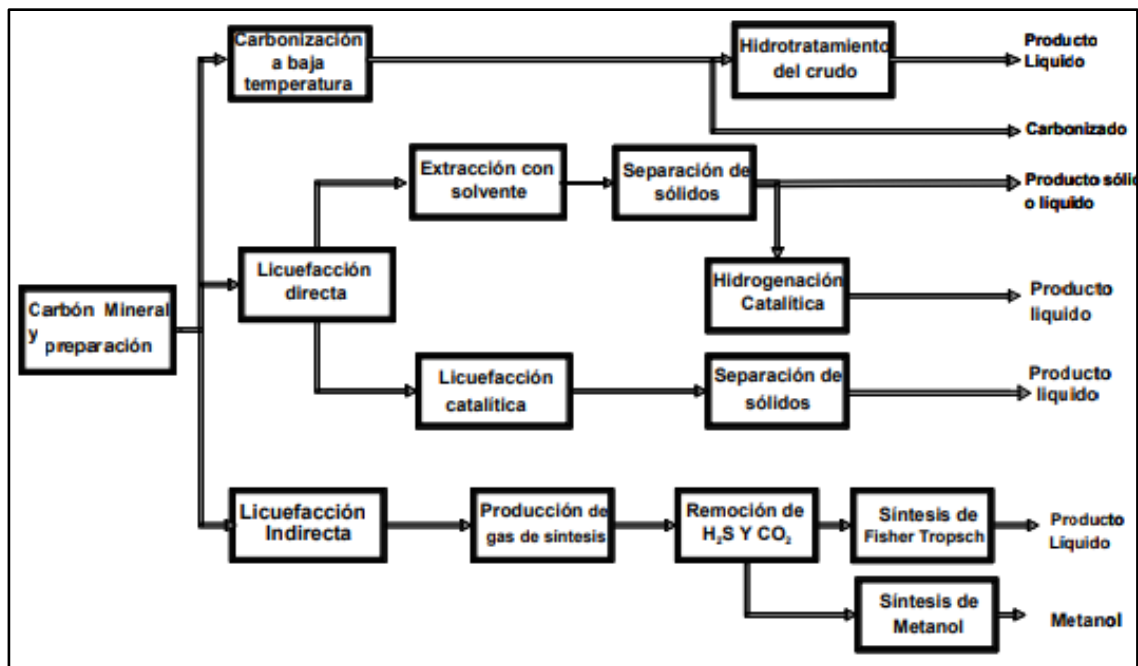


Figura 98. Diagrama representativo del proceso de licuefacción

Fuente: (ANH; UPME;CTL, 2007)

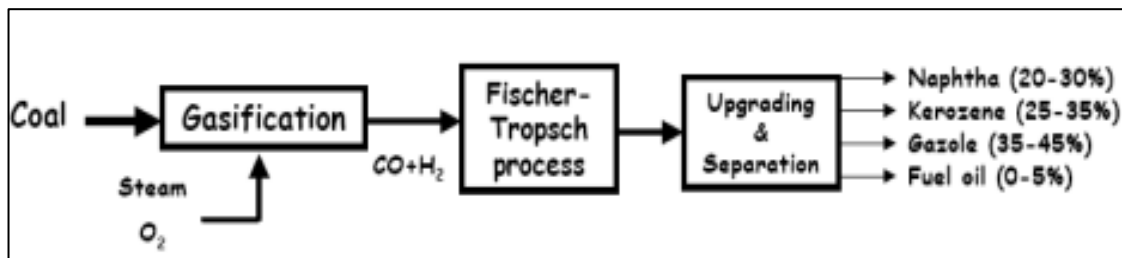


Figura 99. Proceso de licuefacción indirecta.

Fuente: (Scherb, 2006)

Este proceso no requiere la gasificación de todo el carbón, por lo que permite emitir una menor cantidad de CO₂ y alcanzar una mayor eficiencia energética. Para obtener el hidrógeno necesario se emplean dos fuentes: carbón y biomasa. La biomasa empleada procede de tallos de plantas y cáscaras de semillas, entre otros elementos naturales. El uso de biomasa permite reducir en gran medida las emisiones netas de dióxido de carbono. (Scherb, 2006)

Todos los productos petroquímicos se pueden hacer a partir de carbón licuado, carbón y gas (gas SYN). No hay diferencias significativas en la química entre el petróleo crudo y natural de crudo sintético a partir de carbón (excepto crudo sintético que es mucho más limpio). Detergentes, pesticidas, fertilizantes, plásticos, fibras sintéticas y caucho sintético se puede elaborar a partir del carbón. El proceso de licuefacción del carbón y sus etapas se ver en la figura 100.

Licuefacción del carbón.

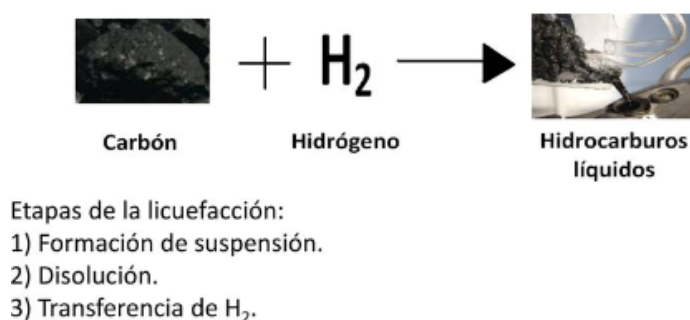


Figura 100. Proceso de licuefacción del carbón.

Fuente: (Scherb, 2006)

7.7.4. Tipos de carbones necesarios para la licuefacción directa

El componente principal de los carbones es el carbono C – Los componentes principales de los hidrocarburos que se desea producir son C y H. Entonces, hay que añadir el elemento hidrógeno. Este elemento va a ser aportado respectivamente por el agua y el H₂ durante la fase de gasificación (ICL) y de hidrogenación (DCL). Pero eso no es suficiente, y la reacción será óptima si el carbón ya contiene hidrógeno. (Scherb, 2006)

Este hidrógeno existe ya en el carbón, en forma de agua H₂O. Se requiere pues un carbón que contenga agua. Pero si contiene demasiada agua, será más difícil gasificarlo o hidrogenarlo (habrá que aportar demasiada energía). Por ello, el tipo de carbón adecuado es carbones de grado medio y bajo (lignitos y hullas). (Scherb, 2006)

- Impactos ambientales provocados por la licuefacción

La obtención de combustibles líquidos a partir del carbón, como cualquier otro proceso de manufactura, ocasiona impactos ambientales en mayor o menor grado, los cuales dependen del desarrollo de la tecnología que se utilice. Para la obtención de combustibles líquidos a partir del carbón, como ya se dijo, se agrupan dos tecnologías existentes, directa (DCL) e indirecta (ICL). (ANH; UPME & CTL, 2007)

Según un estudio del MIT [44], la producción de combustibles líquidos con las técnicas de licuefacción del carbón emite entre 2,5 y 3,5 veces más CO₂ que la extracción y destilación del petróleo ‘natural’. Pero, es mucho más fácil mitigar estas emisiones, porque, casi todo en CO₂ es producido en un solo sitio, donde puede ser fácilmente recuperado. (ANH; UPME & CTL, 2007)

Posibles soluciones:

La mejor opción para mitigar la producción de CO₂ es utilizar oxígeno puro en vez de aire en el Generador de gas. Esto tiene dos ventajas:

El carbón es gasificado más rápidamente. Y el syngas producido no contiene el nitrógeno (N₂) del aire (el aire contiene casi un 80% de N₂), el flujo de syngas es más denso, y entonces más fácil de tratar para quitar el CO₂. La mejor opción para separar el CO₂ del syngas es el uso de aminas, en particular el solvente Solexol (el gas pasa en un baño de solvente que captura el CO₂). (ANH; UPME & CTL, 2007)

8. Capítulo V. Recomendaciones de posibles alternativas ambientalmente sostenibles para el uso del carbón de Norte de Santander

Como se mencionó al inicio de este documento, en Norte de Santander se encuentran zonas de potencial carbonífero y es posible la extracción de carbón térmico y metalúrgico, donde sus principales yacimientos se encuentran en las formaciones del Catatumbo, Los cuervos y Carbonera.

En la Tabla 47, se evidencia una comparativa entre los requerimientos de las aplicaciones ambientalmente sostenibles sin combustión relacionado con las zonas carboníferas de la región, en estos se tuvieron en cuenta las propiedades fisicoquímicas como Poder Calorífico, % Carbono y Cantidad de Material Volátil que requiere cada uno de estos usos tecnológicos y se identificaron las regiones carboníferas que son aptas para su fabricación y comercialización.

En la Tabla 48, se comparan las regiones carboníferas de la región versus los procesos que aplican a cada una de ellas según el tipo de carbón que se explota, para seguidamente poner en práctica las técnicas de mitigación de impactos.

En la Tabla 49, se da a conocer la comparativa entre las características de los carbones de empresas líderes de la región con los requerimientos de las aplicaciones ambientalmente sostenibles del carbón sin combustión.

En la Tabla 50 y 51, se relaciona los carbones producidos por empresas líderes de la región versus los procesos que aplican a cada una de ellas según el tipo de carbón que se explota para así efectuarlas y poner en práctica las técnicas de mitigación ambiental para disminuir las emisiones a la atmosfera.

Gracias a estas tablas comparativas, se logra concluir que el carbón de norte de Santander es totalmente apto para empezar el proceso de transición energética hacia nuevas aplicaciones del carbón, pues bien, cuenta con el poder calorífico, el porcentaje de carbono y la cantidad de materia volátil adecuado para generar nuevos productos, en los cuales se resaltan: Nanotubos, Nanofibras, Puntos Cuánticos de Carbono, y Grafeno, que son aptas en gran proporción en la región; y estos aumentarán la cadena del carbón e ingresar al mercado internacional y nacional.

Además, los carbones producidos en la región son aplicables a los procesos actuales mediante combustión, los cuales son generadores de emisiones contaminantes a la atmosfera y por lo tanto, pueden implementar cada una de las técnicas mencionadas en el capítulo 7 de este documento.

Tabla 47. Aplicaciones ambientalmente sostenibles del carbón en procesos sin combustión en las áreas de Norte de Santander.

ZONA	AREA	SECTOR	NANO TUBOS	CARBÓN ACTIVADO	GRAFITO	NANO FIBRAS	NANO DIAMANTES	GRAFENO	PUNTOS CUANTOS DE CARBONO	MATERIALES DE CARBONO POROSO	NANO CRISTALES DE GRAFITO	FULLERENOS	
NORTE DE SANTANDER	Chitaga		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	
	Pamplonita-pamplonita	Pamplonita	✓			✓			✓				
		Pamplonita	✓			✓							
	Toledo-Herrán	Toledo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Herrán	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Salazar	Norte		✓			✓			✓			
		Centro		✓			✓			✓			
		Sur		✓			✓			✓			
	Tasajero	Este	Los cuervos	✓			✓			✓			
		Oeste	Los cuervos	✓			✓			✓			
		Sur	Los cuervos	✓			✓			✓			
	Zulia-Chinacota	Zulia sur	Los cuervos	✓			✓			✓			
		Santiago	Los cuervos	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
			Carbonera	✓			✓	✓	✓				
		San Cayetano	Los Cuervos	✓			✓	✓	✓				
			Carbonera	✓			✓			✓			
		San pedro	Los Cuervos	✓			✓			✓			
			carbonera	✓			✓			✓			
	Villa del rosario	Los cuervos	✓			✓			✓				
	Catatumbo	Zulia Norte- Sardinata		✓			✓			✓			
		El Carmen		✓			✓			✓			

Fuente: Elaboración propia apoyada de bibliografía presentada en el documento.

Tabla 48. Aplicaciones ambientalmente sostenibles del carbón en procesos con combustión en las áreas de Norte de Santander

ZONA	AREA	SECTOR	FERRO-ALEACIONES	PIRO-METAURGIA	HIDRÓGENO	POLÍMEROS	ENERGÍA ELÉCTRICA	PROCESOS CERÁMICOS	CARBOQUIMICA		
NORTE DE SANTANDER	Chitaga		✓	✓	✓	✓	✓	✓			
	Pamplonita-pamplonita	Pamplonita		✓			✓	✓	✓		
		Pamplonita			✓			✓	✓	✓	
	Toledo-Herrán	Toledo		✓	✓	✓	✓	✓			
		Herrán		✓	✓	✓	✓	✓			
	Salazar	Norte									
		Centro									
		Sur					✓	✓	✓		
	Tasajero	Este	Los cuervos					✓	✓	✓	
		Oeste	Los cuervos		✓			✓	✓	✓	
		Sur	Los cuervos					✓	✓	✓	
	Zulia-Chinacota	Zulia sur	Los cuervos		✓			✓	✓	✓	
		Santiago	Los cuervos					✓	✓	✓	
			Carbonera		✓		✓	✓	✓		
		San Cayetano	Los Cuervos		✓		✓	✓	✓		
			Carbonera						✓	✓	✓
		San pedro	Los Cuervos						✓	✓	✓
			carbonera						✓	✓	✓
	Villa del rosario	Los cuervos						✓	✓	✓	
	Catatumbo	Zulia Norte- Sardinata						✓	✓	✓	
El Carmen							✓	✓	✓		

Fuente: Elaboración propia apoyada de bibliografía presentada en el documento.

Tabla 49. Aplicaciones ambientalmente sostenibles del carbón en procesos sin combustión

APLICACIONES AMBIENTALMENTE SOSTENIBLES			EMPRESAS DE NORTE DE SANTANDER								
			EXCOMIN	MINERCOQUE	CARBONES CARBONORA	INDUMINAS TASAJERO	YILCOQUE	CARBOEXCO	CATERCOQ S.A.S.	MINA LA GITANA	MINA LA AURORA
<p>Empresa da productos de carbón térmico, carbón coquizable y de coque, baja cantidad de azufre, bajo porcentaje de carbono y alto poder calorífico.</p> <p>Producen carbón coquizable tiene alto contenido de carbono, bajo contenido de fósforo (típico 0,004%)</p> <p>Ofrece productos de carbón coquizable alto y medio volátiles</p> <p>Empresa productora de coque de alta reactividad</p> <p>Empresa coquizadora de carbón metalúrgico, con producto de coque, bajo fósforo y bajo azufre.</p> <p>Produce finos de coque utilizado en procesos para sinterización, coque reactivo, coque para el alto horno, finos de coque y coque siderúrgico.</p> <p>Empresa que extrae carbón térmico y coquizante, produce carbón térmico, coquizable y coque con bajo contenido de fósforo, volátiles, bajo azufre</p> <p>Realiza una operación de alta capacidad tecnológica con la producción de carbón térmico</p> <p>Cuenta con producción de carbón térmico y con carbón coquizable</p>											
APLICACIONES ALTERNATIVAS SIN COMBUSTIÓN			APLICABILIDAD								
NANOTUBOS	Son una de las formas alotrópicas del carbono, como el grafito, en donde el grafito sintético es generado a partir de mezcla de coque y aglomerantes.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
CARBÓN ACTIVADO	Tiene como materia prima el carbón y su proceso de activación requiere de la carbonización producido por la cual es producido coque.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
GRAFITO	El grafito sintético isotrópico es producido mezcla de coque y aglomerante de baja temperatura y el pirolítico por grafitización .	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
NANOFIBRAS	Material sintético de carbono nanoestructurado con naturaleza similar al grafito	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

Fuente: Elaboración propia apoyada de bibliografía presentada en el documento.

APLICACIONES ALTERNATIVAS SIN COMBUSTIÓN	NANODIAMANTES	Es el resultado de explosiones controladas y se puede extraer del hollín (puede ser obtenido en los hornos de coquización del carbón metalúrgico)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
	GRAFENO	El grafeno es una forma alotrópica del carbono con una red hexagonal, y se obtiene a partir del coque	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
	PUNTOS CUANTOS DDE CARBONO	Pueden ser obtenidos por nanotubos de carbono, puntos cuánticos del grafeno, y polímeros	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
	MATERIALES DE CARBONO POROSO	La base de estos son los carbonos activados	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
	NANOCRIETALES DE GRAFITO	Su base están en el Grafito, el cual es producto de mezcla de coque y grafitización	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
	FULLERENOS	Puede ser producido por evaporación de grafito, recolección de hollín, nanotubos de carbono	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓

Fuente: Elaboración propia apoyada de bibliografía presentada en el documento.

Tabla 50. Aplicaciones con combustión ambientalmente sostenibles del carbón relacionadas con empresas de Norte de Santander.

APLICACIONES AMBIENTALMENTE SOSTENIBLES EN COMBUSTIÓN DEL CARBÓN			EMPRESAS DE NORTE DE SANTANDER								
			EXCOMIN	MINERCOQUE	CARBONES CARBONORA	INDUMINAS TASAJERO	YILCOQUE	CARBOEXCO	CATERCOQ S.A.S.	MINA LA GITANA	MINA LA AURORA
<p>Empresa da productos de carbón térmico, carbón coquizable y de coque, baja cantidad de azufre, bajo porcentaje de carbono y alto poder calorífico.</p> <p>Producen carbón coquizable tiene alto contenido de carbono, bajo contenido de fósforo (típico 0,004%)</p> <p>Ofrece productos de carbón coquizable alto y medio volátiles</p> <p>Empresa productora de coque de alta reactividad</p> <p>Empresa coquizadora de carbón metalúrgico, con producto de coque, bajo fósforo y bajo azufre.</p> <p>Produce finos de coque utilizado en procesos para sinterización, coque reactivo, coque para el alto horno, finos de coque y coque siderúrgico.</p> <p>Empresa que extrae carbón térmico y coquizante, produce carbón térmico, coquizable y coque con bajo contenido de fósforo, volátiles, bajo azufre</p> <p>Realiza una operación de alta capacidad tecnológica con la producción de carbón térmico</p> <p>Cuenta con producción de carbón térmico y con carbón coquizable</p>											
			APLICABILIDAD								
APLICACIONES ALTERNATIVAS CON COMBUSTIÓN	FERRO-ALEACIONES	Una de las materias primas de las ferroatomías son los coques/carbones	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	PIRO-METAURGIA	El carbón metalúrgico es el ingrediente esencial para su producción, menos cenizas y menos humedad.	✓		✓		✓		✓	✓	
	HIDRÓGENO	Una de sus fuentes principales es el carbón coque a altas temperaturas y presiones.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	POLÍMEROS	Los polímeros sintéticos que tiene mayor interés se producen mediante el coque	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	ENERGÍA ELÉCTRICA	La electricidad producida por plantas de incineración de carbono, es realizada por carbón térmico con baja humedad cenizas y sustancias volátiles	✓						✓	✓	✓
	PROCESOS CERÁMICOS	Dentro de sus productos de combustión utilizan carbón de cualquier tipo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	CARBOQUIMICA	Productos industriales a base de la gasificación de carbón coquizable o metalúrgico	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Elaboración propia apoyada de bibliografía presentada en el documento

Conclusiones

- En Norte de Santander, una de las actividades laborales de mayor importancia es la minería, y específicamente la minería del carbón, pues ha sido el principal generador de crecimiento económico del departamento y de las regiones en las cuales se ejecutan sus proyectos, como lo son: Cúcuta, Sardinata, Bochalema, Zulia, Durania, San Cayetano, entre otros. Así mismo, en la caracterización estos carbones se evidencia variedad de productos carboníferos de alta calidad, pues se producen carbones térmicos, coquizables y coque. Además, existen empresas con gran inversión, gran capacidad de producción, alta generación de empleo y con responsabilidad ambiental y social, como por ejemplo Minera la Gitana, Excomin, Carbones Carbonara, Carbomax, Yilcoque, entre otras.
- Debido a las exigencias actuales en pro de la disminución de impactos ambientales, específicamente, impactos generados por la huella de carbono y emisiones a la atmosfera, ha provocado que la industria carbonífera como ente contaminante inicie la implementación de nuevas aplicaciones, técnicas y estrategias ambientales sostenibles. Pues bien, se genera contaminación al aire por la combustión del carbón, liberación de material particulado, contaminación en las aguas en los sitios de operación, desplazamiento de fauna local y contaminación de la flora natural.
- En concordancia con la conclusión anterior, la industria carbonífera también es generadora de impactos sociales positivos y negativos. Dentro de los impactos negativos, se tiene el impacto psicológico a los trabajadores y a su entorno social, debido a las calamidades, enfermedades y perturbaciones a colegas en este tipo de trabajo, como también, la afectación a su labor por los grupos al margen de la ley que generan una desestabilización de la convivencia, riesgos sociales,

desplazamiento, cifras de pobreza, entre otros. Por otro lado, se demuestran impactos positivos, pues las entidades adquieren compromisos con las comunidades, llevando a cabo actividades entorno a la diversidad cultural y étnica, mejoramiento de instalaciones sociales, aportes a los planes de desarrollo municipales, contribución al fortalecimiento económico y creación de valor.

- La generación de impactos por la extracción de recursos no renovables ha dado el impulso a la implementación de nuevas aplicaciones en pro del ambiente, en este caso aplicaciones sostenibles para el uso del carbón ya sea en procesos sin combustión como Nanotubos, Carbón activado, grafito, nanofibras, nanodiamantes, grafeno, puntos cuánticos de carbono, materiales de carbono poroso, nanocristales de grafito y fullerenos; ó, aplicación de técnicas ambientales en procesos que conlleve combustión como en ferroaleaciones, pirometalurgia, hidrógeno, polímeros, energía eléctrica, procesos cerámicos, y carboquímicas.
- Se evidencia que las aplicaciones alternativas para el uso del carbón son aplicables para la región de Norte de Santander, pues poseen propiedades fisicoquímicas ideales para su utilización con relación a su contenido de volátiles, cantidad de carbón, poder calorífico y tipo de carbón explotado en la zona. Sin embargo, actualmente no se encuentran referencias de que se haya evaluado o ejecutado proyectos que apliquen estos usos alternativos en las diferentes empresas de la región.
- Esta revisión bibliográfica permite que el gremio minero a nivel Regional aumente la visión de sus proyectos mineros hacia mercados ambientalmente sostenibles, en búsqueda de la reducción de los impactos ambientales provocados por las emisiones atmosféricas del procesamiento del carbón mediante nuevas técnicas y métodos actuales.

- La academia será beneficiaria de este informe ya que es base para evaluar cada aplicación en específico mediante la comprobación de cada una de las aplicaciones según el carbón de Norte de Santander mediante pruebas que certifiquen su efectividad haciendo partícipes a profesionales de minería, al gremio empresarial y a la academia, pues no solo será en pro del ambiente, si no, será ejemplo del país para comenzar la transición energética.
- Al aplicar nuevos usos del carbón en Colombia, se resarcirán aquellos daños que se han generado a las poblaciones directamente implicadas de la explotación y procesamiento del carbón, pues iniciaría procesos de reconciliación siendo el ambiente el eje fundamental, obteniendo beneficios directos por nuevas prácticas que generan eliminación y mitigación de sus impactos ambientales y también, serían testigos del cumplimiento con los acuerdos en pro del ambiente.

Bibliografía

- Acciona, Business as Unusual. (2020). *El hidrógeno verde: La energía del futuro clave en la descarbonización*. Obtenido de https://www.acciona.com/es/hidrogeno-verde/?_adin=02021864894
- Acevedo, S., Galicia, L., Plaza, E., Atencio, R., Rodríguez, A., & González, E. (Agosto de 2016). Carbón activado preparado a partir del carbón mineral bituminoso activado con hidróxido de potasio. *Revista técnica de la facultad de ingeniería Universidad del Zulia*, 9. Obtenido de <http://ve.scielo.org/pdf/rtfiuz/v39n2/art03.pdf>
- Agencia Nacional de Minería . (23 de enero de 2017). *Caracterización de la actividad minera departamental*. Obtenido de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/bullets_norte_de_santander_01-06-2017.pdf
- AGENCIA NACIONAL DE MINERIA (ANM). (2017). Obtenido de <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/carbon.pdf>
- Agencia Nacional de Minería. (2019). Colombia, explorando oportunidades.
- Agencia Nacional de Minería. (s.f.). *Se activa la ruta minera en Norte de Santander*. Obtenido de <https://www.anm.gov.co/?q=se-activa-la-ruta-minera-en-norte-de-santander#:~:text=El%20Norte%20de%20Santander%20es,La%20Guajira%2C%20Cesar%20y%20Boyac%C3%A1>.
- Aguirre, D. I. (junio de 2018). Caracterización química y morfológica de películas delgadas de nanodiamantes . *Tesis profesional*. Sonora.
- Alcantara, L. (mayo de 2012). *Los polímeros*. Obtenido de <https://www.monografias.com/trabajos93/sobre-los-polimeros/sobre-los-polimeros>

Alcca Quispe, F. (s.f.). Estructura y síntesis de Nanotubos de Carbono. Perú.

Álvarez, A. R., Ramírez, A. Q., Baudrit, J. V., & Paniagua, S. A. (25 de febrero de 2021). Síntesis, propiedades y aplicaciones de puntos cuánticos a base de carbono. *Artículo*. Costa Rica.

Amini, S., Kalaantari, H., Garay, J., Balandín, A. A., & Abaschian, R. (11 de marzo de 2011). Crecimiento de nanocristales de grafeno y grafito a partir de una fase fundida. *Revista de ciencia de materiales*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-011-5432-9>

Anderson, R. (15 de abril de 2014). *Gasificación del carbón: ¿la energía limpia del futuro?* Obtenido de [bbc: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/04/140415_economia_carbon_energia_limpia_aa](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/04/140415_economia_carbon_energia_limpia_aa)

Andrea Cardoso, & Ethemcan, E. (2018). Examining new geographies of coal: Dissenting energyscapes in Colombia. *Applied Energy*, 224, 398–408.

ANH; UPME & CTL. (2007). *Análisis y evaluación técnica y económica de la producción de combustibles líquidos a partir de carbón para el caso colombiano*. Obtenido de UPNE: https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Informe_Final_CTL.pdf

ANH; UPME;CTL. (2007). *Análisis y evaluación técnica y económica de la producción de combustibles líquidos a partir de carbón para el caso colombiano*. Obtenido de [upme.com: https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Informe_Final_CTL.pdf](https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Informe_Final_CTL.pdf)

Arroyo, S., Guerrero, E., Zambrano, S., & Cardenas, M. (s.f.). *ACADEMIA*. Obtenido de https://www.academia.edu/16560110/5_3_Clasificaci%C3%B3n_estructura_y_aplicaciones

Asociación Colombia de Minería-ACM. (13 de Abril de 2021). *ACMINERIA*. Obtenido de Boletín económico: La recuperación de la actividad minera vendrá en 2021: <https://acmineria.com.co/boletin-economico-la-recuperacion-de-la-actividad-minera-vendra-en-2021/>

Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos (AOP). (septiembre de 2020). *Hidrógeno verde, azul, renovable, de bajas emisiones... Claves del papel del hidrógeno en la transición energética*. Obtenido de AOP: <https://www.aop.es/blog/2020/09/22/claves-hidrogeno-transicion-energetica/>

ATLÁNTICO, U. A., & COLCIENCIAS, U. (s.f.). *Ahorro de energía en la industria cerámica* .

Becerra, B. X. (22 de febrero de 2022). La producción mundial del carbón seguirá en crecimiento por lo menos hasta 2024. *La república*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/globoeconomia/la-produccion-mundial-del-carbon-seguira-en-crecimiento-por-lo-menos-hasta-2024-3307725>

Bilogistik SA. (29 de noviembre de 2016). *Ferroaleaciones: productos especiales y con características específicas*. Obtenido de Bilogistik, S.A. : <https://www.bilogistik.com/blog/ferroaleaciones-productos-especiales-y-con-caracteristicas-especificas/>

Binoy K. Saikia, J. S. (2018). Ambient nanoparticles/nanominerals and hazardous elements from coal combustion activity: Implications on energy challenges and health hazards. *Geoscience Frontiers*, 863-875.

Bnamericas. (17 de diciembre de 2021). *Colombia busca usar carbón térmico para producir hidrógeno azul*. Obtenido de <https://www.bnamericas.com/es/noticias/colombia-busca-convertir-el-carbon-termico-en-hidrogeno-azul>

- Borchardt, L., Zhu, Q.-L., Casco, M. E., Berger, R., Zhuang, X., Kaskel, S., . . . Xu, Q. (diciembre de 2017). Toward a molecular design of porous carbon materials. *materialstoday*, 20(10), 592-610. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.06.002>
- Bracamonte, A., & Mayorca, A. (junio de 1994). Fullerenos: la tercera forma alotrópica del carbono. *Artículo* . Perú.
- C.I. MINAS LA AURORA S.A.S. . (s.f.). *Nuestro productos*. Obtenido de <https://minaslaaurora.com/es/productos/>
- C.I. MINER COQUE DE COLOMBIA LTDA. (s.f.). Obtenido de <https://minercoque.com/>
- Campo Perfecto, T. (2012). Síntesis y caracterización de nanotubos de carbono y nanohilos de silicio: Aplicaciones tecnológicas. *Trabajo de investigación*. Madrid.
- CARBOEXCO C.I. LTDA. (s.f.). Obtenido de <https://carboexco.com/productos/>
- Carbón metalúrgico*. (2021). Obtenido de bhp.com: <https://www.bhp.com/es/what-we-do/products/metallurgical-coal>
- CARBONES CARBONORA S.A.S. (s.f.). Obtenido de <https://carbonora.com/nosotros/>
- CARBOQUIMICA . (s.f.). Obtenido de <https://www.carboquimica.com.co/>
- Carolina, M. (2018). *steemit*. Obtenido de Síntesis de puntos de carbono Fluorescentes a partir de monosacáridos : <https://steemit.com/stem-espanol/@mayterevilla/sintesis-de-puntos-de-carbono-fluorescentes-a-partir-de-monosacaridos>
- Carrasco, M. R., Fuentes, J. H., Valencia, O. R., Chávez, E. V., Flores, M. E., & Germán, C. R. (s.f.). Síntesis y caracterización de puntos cuánticos de carbono obtenidos a partir de Hibicus Sabdariffa (Flor de Jamaica). *Artículo*. México. Obtenido de <https://www.esfm.ipn.mx/assets/files/esfm/docs/RNAFM/articulos-2020/XXVRNAFM059.pdf>

CASTAN, S. F. (2016). *ANALISIS ENERGETICO Y EXERGETICO DEL PROCESO DE COCCION DE COMPASICIONES CERAMICAS*. CASTELLON : UNIVERSITAT JAUME I DE CASTELLO.

Castellanos, L. M. (2010). *Síntesis y caracterización de Nanotubos de Carbón sobre catalizadores Biometálicos*. Bogotá.

Castillo, C. S. (4 de abril de 2017). Síntesis de nanoestructuras de óxido de grafeno funcionalizadas para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del Nylon 6,6. *Tesis de grado*. México. Obtenido de f

Castillo, L. A. (2013). *Nanotubos de carbono aplicados al electrodo negativo de una batería de Ni/MH*. Argentina.

CATERCOQ S.A.S. (s.f.). Obtenido de <https://catercoq.com/es/>

Centro de análisis de información sobre Dióxido de Carbono, División de ciencias ambientales del laboratorio nacional de Oak Ridge. (2019). Banco Mundial. Tennessee, Estados Unidos. Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT?end=2019&start=1990&view=chart>

CERREJON. (2020). *Informe de sostenibilidad*. Obtenido de <https://www.cerrejon.com/sites/default/files/2021-08/informe-de-sostenibilidad-2020.pdf>

CERREJÓN. (2021). *Cerrejon. com*. Obtenido de Política y marco de gestión social de cerrejón: <https://www.cerrejon.com/sites/default/files/2021-08/politica-y-marco-de-gestion-social-de-cerrejon.pdf>

CERREJON. (s.f.). *Cerrejon.com*. Obtenido de Inversión social: <https://www.cerrejon.com/sostenibilidad/comunidades/inversion-social>

Cerrejon, minería responsable. (10 de 02 de 2019). Obtenido de <https://www.cerrejon.com/index.php/nuestra-operacion/nuestra-empresa/>

CH, L. (7 de febrero de 2019). *¿Qué es el fullereno y cuáles son sus usos?* Obtenido de Nanova: <https://nanova.org/fullereno/>

Chamalé, K. (25 de agosto de 2017). *Proceso pirometalurgico e hidrometalurgico.* Obtenido de <https://es.slideshare.net/keviidc/proceso-pirometalurgico-e-hidrometalurgico>

Chero, P. A. (2020). *Proceso de producción de hidrógeno.* Obtenido de Centro de ingeniería y tecnología: <https://hidrogeno18.wixsite.com/hidrogeno/blank-cjg9#:~:text=Producci%C3%B3n%20de%20Hidr%C3%B3geno%20por%20gasificaci%C3%B3n%20de%20carb%C3%B3n&text=El%20proceso%20se%20realiza%20a,aire%20en%20lugar%20de%20vapor.>

Clavijo, J. (7 de marzo de 2013). *Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM).* Bogotá, Colombia.

Colombia sube sus emisiones de CO2. (2021). Obtenido de Datosmacro.com: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/colombia>

COMETAL. (s.f.). *Ferro Cromo.* Obtenido de www.cometalsa.com

conflictos mineros. (2019). Obtenido de https://mapa.conflictosmineros.net/ocmal_db-v2/conflicto/view/21

Consumo nacional de carbón y lignito. (2020). Obtenido de Anuario de Enerdata: <https://datos.enerdata.net/carbon-lignito/consumo-mundial-carbon.html>

Coronado, P. D. (4 de septiembre de 2012). *Nanotubos de carbono funcionalizados para el desarrollo de nanocompuestos poliméricos.* Saltillo .

- Coronado, P. D. (agosto de 2012). *Nanotubos de carbono funcionalizados para el desarrollo de nanocompuestos poliméricos*. Obtenido de <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/410/1/Patricia%20Dinorah%20Perez%20Coronado.pdf>
- Cortés, V. J. (s.f.). *Carbón*. Obtenido de <http://www.factoria3.com/documentos/CARBON.pdf>
- David G. Streets, Z. L. (2018). Historical releases of mercury to air, land, and water from coal combustion. *Science of The Total Environment*, 131-140.
- Deutsche Welle. (13 de agosto de 2021). *El hidrógeno azul es nocivo para el medioambiente, advierte estudio*. Obtenido de <https://www.dw.com/es/el-hidr%C3%B3geno-azul-es-nocivo-para-el-medioambiente-advierte-estudio/a-58860871>
- Díaz, A. (28 de septiembre de 2021). *Statista*. Obtenido de Países con mayor consumo de carbón del mundo en 2020: <https://es.statista.com/estadisticas/635491/paises-lideres-en-el-consumo-de-carbon/>
- DRUMMON COMPANY INC. (2022). *Nuestro compromiso*. Obtenido de <http://www.drummondco.com/nuestro-compromiso/comunidades/?lang=es>
- DRUMMOND COMPANY, INC. (2022). *Nuestros productos*. Obtenido de drummondco: <https://www.drummondco.com/nuestros-productos/carbon/minas/?lang=es>
- Dufour, J. (20 de septiembre de 2006). *Hidrogenación del carbón, ¿Retorno al pasado?* Obtenido de [madrimasd.org](https://www.madrimasd.org): <https://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2006/09/20/42388#:~:text=La%20hidrogenaci%C3%B3n%20del%20carb%C3%B3n%20tiene,obtener%20%ADquidos%20que%20sean%20destilables.>

- E.MONFORT, MEZQUITA, A., GRANEL, R., VAQUER, E., ESGRIG, A., MIRALLES, A., & ZAERA, V. (2010). Analisis del consumo de energetico y emision de dióxido de carbono en la fabricacion de baldosas ceramicas . *ceramicos y vidrios* .
- E.U. POLITÉCNICA; U. SEVILLA. (s.f.). *Manual del carbón activo*. Obtenido de <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>
- Ecupei, editorial Cupei. (s.f.). *Aplicaciones de los polímeros*. Obtenido de <https://ecupei.com/polimeros/introduccion/1-9-aplicaciones-de-los-polimeros/>
- Ecured. (s.f.). *Ferrocromo*. Obtenido de ecured.cu: <https://www.ecured.cu/Ferrocromo>
- EhsanMunawe, M. (2018). Human health and environmental impacts of coal combustion and post-combustion wastes. *Journal of Sustainable Mining*, 87-96.
- EITIColombia . (2020). *EITICOLOMBIA*. Obtenido de <https://www.eiticolombia.gov.co/es/datos-del-sector/>
- EL ESPECTADOR*. (24 de febrero de 2014). Obtenido de <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/el-pueblo-wayuu-el-carbon-desterro-articulo-477081>
- El Espectador. (agosto de 31 de 2021). En Norte de Santander se produce carbón metalúrgico con calidades únicas. *El espectador.com*, pág. 1. Obtenido de <https://www.elespectador.com/contenido-patrocinado/en-norte-de-santander-se-produce-carbon-metalurgico-con-calidades-unicas/>
- El espectador. (agosto de 31 de 2021). En Norte de Santander se produce carbón metalúrgico con calidades únicas. *El espectador.com*, pág. 1. Obtenido de <https://www.elespectador.com/contenido-patrocinado/en-norte-de-santander-se-produce-carbon-metalurgico-con-calidades-unicas/>

El espectador. (9 de junio de 2022). Encuentran a la última víctima de la tragedia en la mina La Mestiza, en El Zulia. *El espectador*. Obtenido de <https://www.elespectador.com/colombia/mas-regiones/encuentran-a-la-ultima-victima-de-la-tragedia-en-la-mina-la-mestiza-en-el-zulia/>

El periódico de la energía. (12 de marzo de 2021). *Australia comienza a producir hidrógeno a partir del carbón*. Obtenido de elperiodicodelaenergia.com/australia-comienza-a-producir-hidrogeno-a-partir-del-carbon/

El tiempo. (6 de junio de 2022). El drama de las familias de los mineros en El Zulia, Norte de Santander. *El tiempo*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/mineros-norte-de-santander-van-13-muertos-en-el-zulia-677884>

Esparza, B. M. (septiembre de 2008). Caracterización de Nanotubos de Carbono por Difracción de Rayos-X de Alta Resolución (HR-XRD). *Tesis* .

Euskatfund SL. (s.f.). *Ferroaleaciones*. Obtenido de <http://www.euskatfund.com/es/ferroaleaciones-5-1.html>

EXCOMIN S.A.S. (s.f.). *Excomin producción y exportación de Carbón y Coque*. . Obtenido de <http://ciexcomin.com/index-3.html#ctermico>

Federación Nacional de Productores de Carbón. (31 de agosto de 2021). *FENALCARBÓN*. Obtenido de <https://fenalcarbon.org.co/en-norte-de-santander-se-produce-carbon-metalurgico-con-calidades-unicas/>

Federación Nacional de Productores de carbón. (6 de mayo de 2022). *El carbón del futuro demanda inversiones en tecnología, innovación y desarrollo*. Obtenido de

- fenalcarbon.org.co: <https://fenalcarbon.org.co/2022/05/06/exportaciones-de-coque-de-colombia-suman-13-millones-de-toneladas/>
- Ferrero, G. Á. (2017). Materiales de carbono porosos dopados para el almacenamiento y producción de energía. *Tesis doctoral*.
- Flowtrend. (17 de septiembre de 2020). *¿Qué son los elastómeros? Características y tipos* .
Obtenido de Flowtrend.com: <https://flowtrend.com/es-es/news/que-son-los-elastomeros>
- FRONTIERCOAL. (s.f.). *Mina La Gitana*. Obtenido de <https://frontiercoal.com/frontier-coal-mina-la-gitana.html>
- Fundación Cerrejón. (s.f.). *Nuestras líneas de acción*. Obtenido de <https://fundacioncerrejon.org/>
- GAB Neumann. (s.f.). *Proceos de fabricación del grafito sintético*. Obtenido de [gab-neumann.com: https://www.gab-neumann.com/Grafito-impermeable-Proceso-de-fabricaci%C3%B3n](https://www.gab-neumann.com/Grafito-impermeable-Proceso-de-fabricaci%C3%B3n)
- Galbarro, H. R. (s.f.). *Ingemecanica.com*. Obtenido de Propiedades y aplicaciones del grafeno: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn119.html>
- Gamboa, A. A. (abril de 4 de 2017). *Materias Primas y síntesis de polímeros*. Obtenido de <https://prezi.com/y-v1lx9rkgkb/materias-primas-y-sintesis-de-polimeros/>
- GEOLOGYSCIENCE. (s.f.). *Grafito*. Obtenido de [geologysciencie.com: https://geologyscience.com/minerals/graphite/](https://geologyscience.com/minerals/graphite/)
- Gestión de Aguas y Residuos. (s.f.). *Opciones de tratamiento de aguas residuales mediante carbón activo*. Obtenido de www.gedar.com: https://www.gedar.com/PDF/Industrial/GEDAR-Carbon_Activo_Aguas_Residuales.pdf
- Gómez, G. G. (2017). *Hornos de combustión: Alternativas de reducción de emisiones e incremento de rentabilidad* . Obtenido de Universidad de Santander :

<https://repositorio.udes.edu.co/bitstream/001/656/1/Hornos%20de%20combusti%C3%B3n%20alternativas%20de%20reducci%C3%B3n%20de%20emisiones%20e%20incremento%20de%20rentabilidad.pdf>

Green power. (s.f.). *La descarbonización, cómo pasar de las fuentes fósiles a las renovables*. Obtenido de <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/transicion-energetica/descarbonizacion>

Greenpeace. (2022). *La energía del carbón es de las mayores amenazas a la que se enfrenta nuestro clima*. Obtenido de <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/carbon/>

Grisales Motato, A., & Rojas Arrieta, W. (2016). Obtención de carbón activado a partir de activación química de pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en agua residuales industriales. . *Trabajo de grado*. Pereira, Colombia.

Grupo de gestión eficiente de energía, KAI. (s.f.). *Ahorro de energía en la industria cerámica*.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (9 de agosto de 2021). *IPCC*. Obtenido de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf

GRUPO PRODECO . (2019). *Informe de sostenibilidad* . Obtenido de <https://www.grupoprodeco.com.co/es/sostenibilidad/reportes-de-sostenibilidad>

GRUPO PRODECO. (2022). *Gestión Social*. Obtenido de grupoprodeco : <https://www.grupoprodeco.com.co/es/sostenibilidad/gestion-social>

GRUPO PRODECO. (2022). *Grupo Prodeco*. Obtenido de grupoprodeco: <https://www.grupoprodeco.com.co/es/acerca-de-nosotros/grupo-prodeco>

Grupo SOM . (s.f.). *Ficha Técnica, Ferro manganeso* . Obtenido de <http://som.cl/ferromanganeso/>

- Guevara, J. E. (2013). *Análisis de la logística del carbón en Norte de Santander* .
- Hernández Gervacio, C., & Quiroz Ceballos, D. (7 de agosto de 2015). Grafeno: Estado del arte. *Tesis de grado*. México.
- Herráez, A. (diciembre de 2011). Las asombrosas estructuras del carbono: fullerenos, grafenos y nanotubos. . *Artículo de investigación*.
- Holguin, S. M. (2020). Síntesis de puntos de carbono y revisión de su citotoxicidad en tumores de mama. *Trabajo dirigido*. Bogotá, Colombia.
- Instituto de investigadores en Geociencias, Minería y Química. (1998). *Geología del cuadrangulo G-13 Cúcuta*.
- Jauregi, A. A., Roman, F. G., & Vilches, A. R. (s.f.). *El carbón como materia prima* . Obtenido de https://www.academia.edu/36915375/EL_CARBON_COMO_MATERIA_PRIMA
- Jiménez, A. M., & Jaramillo, J. (s.f.). Recuperación energética y análisis térmico del proceso de cocción en la industria cerámica. *Universidad Industrial de Santander, Colombia*.
- Jiménez, A. M., & Jaramillo, J. (s.f.). *Recuperación energética y análisis térmico del proceso de cocción en la industria cerámica* . Obtenido de Revistas Uis : <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/5106/9901>
- Jiménez, S. (s.f.). *Combustión de carbón*. Obtenido de Energía sostenible para todos: http://www.energia2012.es/sites/default/files/Combustion_de_carbon.pdf
- Jos G.I. Olivier, J. A. (2016). *Trends in global PBL Netherlands Environmental Assessment Agency*. Obtenido de http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/jrc-2016-trends-in-global-co2-emissions-2016-report-103425.pdf

- Juanico Lorán, J. (noviembre de 2004). Síntesis y caracterización de Nanofibras de Carbono para su aplicación de adsorción de Gases tóxicos. *Informe final para proyecto de grado*. México.
- Karen Bibiana Díez Contreras, J. S. (2020). Elaboración Y Caracterización De Bloques Cerámicos Extruídos Usando Cenizas De La Combustión De Carbón A Escala De Laboratorio. *Respuestas*.
- Kharissova, O. V., & Méndez, U. O. (2002). La estructura del fullereno C60 y sus aplicaciones. Monterrey, México.
- Kirk-Othmer. (4 de diciembre de 2000). Grafito, aplicaiones de artificial. doi:<https://doi.org/10.1002/0471238961.01161612.a01>
- La Opinion. (11 de enero de 2022). La minería está en el ADN de la región. *La Opinión*. Obtenido de <https://www.laopinion.com.co/empresas/la-mineria-esta-en-el-adn-de-la-region>
- La república. (25 de marzo de 2022). ¿Cuál es el papel que jugará el carbón en la transición energética en los próximos años? *La república*.
- La república. (19 de julio de 2022). *Sector minas creció 34% en 2021, con Drummond y Carbones de Cerrejón a la cabeza*. Obtenido de <https://amp-larepublica-co.cdn.ampproject.org/c/s/amp.larepublica.co/empresas/sector-minas-crecio-34-en-2021-con-drummond-y-carbones-del-cerrejon-liderando-3406458>
- Lashof, D. A. (febrero de 2007). *Natural Resources Defense Council*. Obtenido de <https://www.nrdc.org/sites/default/files/coalclimate.pdf>
- Lee, J.-W., Kim, J., & Hyeon, T. (2006). Avances recientes en la síntesis de materiales porosos Materiales de carbono . *Advanced Materials* , 22.

- León, N. M. (1999). Fullerenos: moléculas de carbono con propiedades excepcionales. *Investigación Química*.
- Li, D., Wu, D., Xu, F., Lai, J., & Shao, L. (2018). Literature overview of Chinese research in the field of better coal. *Journal of Cleaner Production*, 185, 959-980.
- Li, T., Liu, Z., Gu, Y., Tang, Y., & Huang, F. (15 de octubre de 2019). Carbón duro jerárquicamente poroso con nanocritales de grafito para baterías de iones de sodio de alta velocidad con eficiencia Coulombic inicial mejorada. . *Artículo*.
- Lindholt, L., & Glomsrød, S. (2018). Phasing out coal and phasing in renewables – Good or bad news for arctic. *Energy Economics*, 70, 1-11.
- López, E. Z., & Kharissova, O. V. (Marzo de 2002). Síntesis de nanotubs y fullerenos.
- Lugo, R. C. (1 de junio de 2022). *Las ventas de carbón crecen más de 200% hacia Europa*. . Obtenido de Portafolio: <https://www.portafolio.co/economia/las-ventas-de-carbon-crecen-mas-de-200-hacia-europa-566293>
- LUMITOS AG. (s.f.). Obtenido de Quimica.es: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Fulereo.html>
- M. Abián, M. A. (2014). *Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*. Obtenido de http://digital.csic.es/bitstream/10261/110627/1/BoletinGEC_034-art1.pdf
- Macías, L. M. (2010). *Síntesis y caracterización de nanotubos de carbón sobre catalizadores Bimetálicos*. Bogotá.
- Maldonado, J. M. (abril de 2018). *El Catatumbo: estrategia militar por encima de desarrollo rural. Estudio de caso: Víctor Ramón Navarro Serrano, alias Megateo*. Obtenido de <https://revistas.unab.edu.co/index.php/reflexion/article/view/3450/2988>

Marquínez, J. S., Prado, J. A., Cavia, S. D., & García, C. T. (s.f.). *Materiales- G704/G742*.

Obtenido de Universidad de Cantabria :
https://ocw.unican.es/pluginfile.php/287/course/section/217/leccion_16.pdf

Martínez, E. T. (10 de julio de 2017). Síntesis y caracterización de óxido de grafeno reducido y dopado con N mediante un proceso solvotérmico. *Tesis de grado*. San Luis de Potosí.

Mata, A. S., & Cabrera, R. G. (2015). Espectroscopia Raman de Nanopartículas de Oro y usos Biomédicos. *Verano de la investigación científica* , 5.

Materiales con nanotubos de carbono. (22 de septiembre de 2009). Obtenido de Aitiip, centro tecnológico : <https://www.aitiip.com/noticias/materiales-con-nanotubos-de-carbono.html#:~:text=Los%20nanotubos%20de%20carbono%20poseen,Son%2C%20adem%C3%A1s%20muy%20ligeros>.

MetalCast. (s.f.). *Ferrosilicio (Ferroaleaciones)*. Obtenido de <https://metalcast.com.mx/2020/08/24/ferro-silicio-ferroaleaciones/#:~:text=PROPIEDADES,o%20explosivas%20con%20el%20aire>.

Minerales de Colección s.l. . (s.f.). *Ferromanganeso*. Obtenido de <https://mineral-s.com/ferromanganeso>

Ministerio de industria y energía. (s.f.). *Directiva 96/61 relativa a la precención y control integrados de la contaminación*. Obtenido de <https://prtr-es.es/Data/images//Gu%C3%ADa%20Tecnol%C3%B3gica%20Ferroaleaciones-FEC2E2FA892CF0A9.pdf>

Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, España. (2009). *Mejores técnicas disponibles de referencia europea*. Obtenido de <https://prtr->

es.es/Data/images/PRODUCCI%C3%93N-DE-POL%C3%8DMEROS-
1BDCAAE0950F2E40.pdf

Moliner Alvarez, R. (2016). *Del carbón activo al grafeno: Evolución de los materiales de carbono*. Boletín del Grupo Español del Carbón N°41.

Monsalve, C. M. (09 de 09 de 2021). La comunidad de el Hatillo sigue esperando el cumplimiento de su reasentamiento. *Lasillallena*. Obtenido de <https://www.lasillavacia.com/historias/historias-silla-llena/la-comunidad-de-el-hatillo-el-cumplimiento-de-su-reasentamiento/>

Monsalve, M. M. (2 de enero de 2022). *¿Eliminar el carbón? Discusión incómoda en Colombia*. Obtenido de <https://www.elespectador.com/ambiente/eliminar-el-carbon-discusion-incomoda-en-colombia/>

Morales, N. B., & Ramos, J. L. (4 de junio de 2022). La resurrección del carbón y el riesgo de seguir postergando una transición justa. *El espectador*. Obtenido de <https://www.elespectador.com/ambiente/la-resurreccion-del-carbon-y-el-riesgo-de-seguir-postergando-una-transicion-justa/>

Moreno, M. A., & Jorge Enrique Arenas Hernández, J. A. (diciembre de 2015). Impactos ambientales negativos generados por el uso de palancas para la fortificación de minas, sector carbonífero. *Artículo*.

Munar, N. R. (2021). *ANALDEX*. Obtenido de Informe exportaciones y cotización de carbón: <https://www.analdex.org/2021/08/30/informe-exportaciones-y-cotizacion-de-carbon/>

Naciones Unidas. (2021). COP26: Juntos por el planeta. Obtenido de <https://www.un.org/es/climatechange/cop26>

Naciones Unidas. (3 de noviembre de 2022). Todo lo que necesitas saber de la gran Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2022, la COP27. <https://news.un.org/es/story/2022/11/1516632>.

Nádudvari, Á. (2018). Distribution of coal and coal combustion related organic pollutants in the environment of the Upper Silesian Industrial Region. *Science of The Total Environment*, 1462-1488.

Narváez, u. M. (agosto de 2009). *researchgate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/28296400_Los_wayuu_la_tierra_y_la_politica_del_carbon_en_La_Guajira_1980-2000_Una_vision_desde_la_historia_Para_reparar_y_no_repetir

Noticias Caracol. (1 de junio de 2022). A la espera de un milagro: familiares de mineros atrapados en El Zulia no pierden la esperanza. (C. V. Lucas, Ed.) Obtenido de <https://noticias.caracol.com/colombia/familiares-de-mineros-atrapados-en-el-zulia-no-pierden-la-esperanza-rg10>

NS MEDIA GROUP LIMITED. (11 de Enero de 2021). *World Energy Trade*. Obtenido de Los seis países productores de carbón más grandes del mundo: <https://www.worldenergytrade.com/metales/mineria/los-seis-paises-productores-de-carbon-mas-grandes-del-mundo>

Nuevos Materiales. (2002). Obtenido de Vida científica : http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:revista100cias-2002-numero5-5045/Nuevos_Materiales.pdf

Ortega, I. P. (16 de enero de 2018). El grafeno: posibilidades del grafeno en la arquitectura. . Madrid , España.

- Padrón, R., Rodríguez, C., & Gómez, A. (2013). El carbón activado, un material adsorbente. 16. Paisminero. (6 de enero de 2022). *Análisis - El carbón sigue siendo el rey*. Obtenido de <https://www.paisminero.com/mineria/carbon-colombiano/24255-analisis-el-carbon-sigue-siendo-el-rey#:~:text=Adem%C3%A1s%20de%20la%20generaci%C3%B3n%20de,industrial%20no%20se%20habr%C3%ADa%20producido.>
- PLANTA COQUIZADORA INDUMINAS TASAJERO LTDA. (2013). Obtenido de <https://docplayer.es/73804471-Planta-coquizadora-induminas-tasajero-ltda.html>
- Plástico. (julio de 2012). *Dióxido de carbono como materia prima para polímeros y combustibles*. Obtenido de [plastico.com: https://www.plastico.com/temas/Dioxido-de-carbono-como-materia-prima-para-polimeros-y-combustibles+3088631](https://www.plastico.com/temas/Dioxido-de-carbono-como-materia-prima-para-polimeros-y-combustibles+3088631)
- Polyexcel. (s.f.). *Descubra qué son los polímeros y sus principales tipos* . Obtenido de [polyexcel.com.br: https://polyexcel.com.br/es/esp-industria/descubra-que-son-los-polimeros-y-sus-principales-tipos/](https://polyexcel.com.br/es/esp-industria/descubra-que-son-los-polimeros-y-sus-principales-tipos/)
- Portafolio. (24 de mayo de 2018). *TermoTasajero III cancela su proyecto para la generación de energía* . Obtenido de <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/termotasajero-iii-cancela-su-proyecto-para-la-generacion-de-energia-517463>
- Portafolio. (11 de abril de 2022). Veto al carbón ruso abre puertas al colombiano en Unión Europea. Obtenido de <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/veto-al-carbon-ruso-abre-puertas-al-colombiano-en-union-europea-563979>
- Portero, M. J. (s.f.). *Extracción de metales por pirometalurgia: Procesamiento de hierro, acero, cobre y aluminio*. Obtenido de [riunet.upv.es: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68339/Mu%C3%B1oz%20-](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68339/Mu%C3%B1oz%20-)

- %20Extracci%C3%B3n%20de%20metales%20por%20pirometalurgia%3A%20Procesamiento%20de%20hierro%2C%20acero%2C%20cobre%20y%20aluminio.pdf?sequence=1
 Procuraduría General de la Nación. (noviembre de 2020). *Catatumbo, informe sobre el estado de avance en la implementación del Acuerdo de Paz en la subregión PDET*. Obtenido de [procuraduria.gov.co: https://www.procuraduria.gov.co/portal/media/file/MSI-Reporte%20Catatumbo.pdf](https://www.procuraduria.gov.co/portal/media/file/MSI-Reporte%20Catatumbo.pdf)
- Quiroz, M. A., Martínez, U. A., & Martínez, C. A. (diciembre de 2006). Nanodiamantes. México. Obtenido de http://eprints.uanl.mx/16727/1/33_nanodiamantes%20%281%29.pdf
- Ramírez, A., Francisco, C., Puertas, C., Alexander, P., Quispe, P., Isabel, M., . . . Alejandra, A. J. (28 de septiembre de 2019). *Una vista a los polímeros, su impacto ambiental y cómo generar conciencia en la Pontificia Universidad Católica del Perú*. Obtenido de [Blog.pucp.edu.pe: http://blog.pucp.edu.pe/blog/qm2-202-131/2019/09/28/una-vista-a-los-polimeros-su-impacto-ambiental-y-como-generar-conciencia-en-la-pontificia-universidad-catolica-del-peru/](http://blog.pucp.edu.pe/blog/qm2-202-131/2019/09/28/una-vista-a-los-polimeros-su-impacto-ambiental-y-como-generar-conciencia-en-la-pontificia-universidad-catolica-del-peru/)
- Rangel, G. F. (agosto de 2017). Caracterización óptica y estructural de grafeno uni y bidimensional sinterizado sobre SiC (001). *Tesis de grado*. San Luis Potosí, México.
- Revista La República. (7 de septiembre de 2021). *Región Caribe y los Llanos Orientales recibirán más regalías para el bienio 2021-2022*. Colombia: Economía. Obtenido de <https://www.larepublica.co/economia/region-caribe-y-llanos-orientales-recibiran-mas-regalias-para-el-bienio-2021-2022-3228514>
- Rico, M. B., & Gomis, A. M. (2012). *Tecnología de polímeros*. Obtenido de [book.google.com.co: https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=jxilUUn4_QAC&oi=fnd&pg=PA15&](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=jxilUUn4_QAC&oi=fnd&pg=PA15&)

dq=pol%C3%ADmeros&ots=eCOz7vkztE&sig=XfJnzSxFMxZdbfZwWbS69jE8Jw8&re
dir_esc=y#v=onepage&q&f=true

- Rincón, J., Rincón, S., Guevara, P., Ballén, D., Morales, J. C., & Monroy, N. (2015). Producción de carbón activado mediante métodos físicos a partir de carbón de El Cerrejón y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales provenientes de tintoterías. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 5. doi:<http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.138>
- Robosup. (19 de 02 de 2022). <https://sciencealpha.com/es/nanodiamonds-properties-production-and-application/>. Obtenido de <https://sciencealpha.com/es/nanodiamonds-properties-production-and-application/>
- Romero, A., & Miguel Romero, G. R. (29 de diciembre de 2019). *Tipos de grafito: propiedades de grafitos naturales y sintéticos*. Obtenido de Esgraf: <https://esgraf.com.mx/blog/tipos-de-grafito-propiedades-grafitos-naturales-y-sinteticos/>
- Romero, A., Romero, M., & Romero, G. (29 de diciembre de 2019). *Tipos de grafito: propiedades de grafitos naturales y sintéticos*. Obtenido de esgraf.com.mx: <https://esgraf.com.mx/blog/tipos-de-grafito-propiedades-grafitos-naturales-y-sinteticos/>
- Ruiz, G. (5 de febrero de 2019). *Energía de carbón*. Obtenido de Erenovable: <https://erenovable.com/energia-de-carbon/>
- Sánchez, M. L. (mayo de 2015). *Nanomateriales basados en grafeno y su aplicación en nuevos sistemas de energía. Tesis Doctoral*. Valencia.
- Santos, P. V. (21 de abril de 2017). *Características de los fullerenos*. Obtenido de Todosmáisunha: <http://tics4aesomaimverin.blogspot.com/2017/04/caracteristicas-de-los-fullerenos.html>

- Sarmiento, C., Sánchez, J., García, C., Rincón, Y., Benítez, A., & Ramírez, J. (2004). Preparación de carbón activado mediante la activación química de carbón mineral. *Scientific Journal from the Experimental Faculty of Sciences*, 12. Obtenido de http://bdigital.ula.ve/storage/pdf/cienc/v12n1/art_06.pdf
- Scherb, J. S. (2006). *Licuefacción del carbón*. Obtenido de upcommons: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4402/PFC_JS.Scherb.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Schroeder, T. (18 de marzo de 2019). *Minería y metalúrgia: invirtiendo en la innovación para reducir los impactos ambientales y sociales*. Obtenido de blog.softexpert.com : <https://blog.softexpert.com/es/mineria-metalurgia-inovacion/#:~:text=El%20sector%20de%20metalurgia%20es,son%20grandes%20consumidoras%20de%20agua>.
- Sebastián del Río, D. (2011). Estructura y propiedades de las nanofibras de carbono. Aplicación como soporte de electrocatalizadores. . *Tesis de la Universidad de Zaragoza*. . Zaragoza, España.
- Secretaría de Economía. (2018). *Perfil de mercado del grafito*.
- SEGEMAR, UNSAM. (abril de 2011). GRAFITO. Argentina.
- Sela, G. (28 de septiembre de 2021). *El carbón activado*. Obtenido de Cropaia: <https://cropaia.com/es/blog/carbon-activado-en-tratamiento-de-aguas/>
- Semana. (19 de marzo de 2022). El alto precio del carbón: ¿amenaza u oportunidad? *Revista Semana*. Obtenido de <https://www.semana.com/economia/articulo/el-alto-precio-del-carbon-amenaza-u-oportunidad/202200/>

Servicio Geológico Colombiano . (12 de 03 de 2017). *Mapa Potencial Carbonífero de Colombia*.

Obtenido de

<https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/DireccionTecnicaRecursosMinerales/Lists/dirRecursosProductosServicios/DispForm.aspx?ID=4&ContentTypeId=0x0100D2DEF37218084A078FCF91FE1ADBD2630007975C764EC41D4F9D8952C5A65A66F3>

Servicio Geológico Colombiano. (Abril de 2016). *Geología de la plancha 88- Cúcuta a escala 1:100.000 Departamento de Norte de Santander Colombia*.

Sistema Español de Inventario de Emisiones Metodologías de estimación de emisiones. (junio de 2020). *Fabricación de ferroaleaciones (emisiones de proceso)*. Obtenido de miteco.gob.es: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040302-ferroaleaciones-proceso_tcm30-509727.pdf

Sofía, B. A., Contreras, C., antonio, j., Ponce, C., Irais, N., Isabel, E. B., . . . Efraín, P. G. (26 de febrero de 2014). *ACADEMIA*. Obtenido de <https://www.academia.edu/6246580/Cer%C3%A1micos>

Solís, A. I. (junio de 2014). Síntesis y caracterización de puntos cuánticos de CdSe con aplicaciones en celdas fotovoltaicas con configuración FTO/TiO₂/CdSe/ZnS. *Tesis*.

Spiegato. (s.f.). Obtenido de ¿Qué es un nanodiamante?: <https://spiegato.com/es/que-es-un-nanodiamante>

Suárez, A. L. (15 de Julio de 2019). Los 13 proyectos que reactivarán el sector minero. *Portafolio*, pág. 1. Obtenido de <https://www.portafolio.co/economia/los-13-proyectos-que-reactivaran-el-sector-minero-531579>

Suarez, N. R., González, O. Q., Álvarez, E. D., & Verdecia, I. A. (2021). *Materiales carbonosos nanoestructurados: obtención, agentes dopantes y aplicaciones electroquímicas*. Obtenido de redalyc.org: <https://www.redalyc.org/journal/4435/443566346006/html/>

Subdirección de minería UPME. (diciembre de 2021). *UPME*. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/carbon.aspx>

Superintendencia de Riesgos de Trabajo. (2019). *Gasificación del carbón*. Obtenido de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/14.5_gasificacion_de_carbon_0.pdf

TGBY Co.Ltd . (s.f.). *Ferromanganeso*. Obtenido de http://www.cn-stainlesssteel.cn/products_list/976879586333900800.html?gclid=CjwKCAjw2rmWBhB4EiwAiJ0mtUb-ehXvgANX6IxIACST3qMAIVcAiLCIqEO9gtNmDyGecMVWyMD7zhoCKpIQAvD_BwE

Tobón, L. (09 de mayo de 2022). *Reactivación positiva del sector minero en Norte de Santander*. Obtenido de [https://www.nortedesantander.gov.co/Noticias-Gobernaci%C3%B3n-Norte-de-Santander/ArticleID/20348/Reactivaci%C3%B3n-positiva-del-sector-minero-en-Norte-de-Santander#:~:text=El%20a%C3%B1o%20anterior%20cerr%C3%B3%20con,activos%20en%20este%20sector%20econ%C3%](https://www.nortedesantander.gov.co/Noticias-Gobernaci%C3%B3n-Norte-de-Santander/ArticleID/20348/Reactivaci%C3%B3n-positiva-del-sector-minero-en-Norte-de-Santander#:~:text=El%20a%C3%B1o%20anterior%20cerr%C3%B3%20con,activos%20en%20este%20sector%20econ%C3%BA)

Todo en polímeros. (s.f.). Obtenido de <https://todoenpolimeros.com/que-son-los-polimeros/>

Todo en polímeros. (s.f.). *Tipos de polímeros*. Obtenido de [todoenpolimeros.com: https://todoenpolimeros.com/tipos-de-polimeros/](https://todoenpolimeros.com/tipos-de-polimeros/)

Unidad de Planeación Minero Energética. (s.f.). Obtenido de https://www1.upme.gov.co/siame/Guiasambientales/Termoelectricas_procesos_cogeneracion.pdf

UNIDAD DE PLANEACION MINERO ENERGETICA (UPME). (2012). Obtenido de http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_Carbon_2012.pdf

unidad de planeacion minero energetica (UPME). (2017). *UPME*. Obtenido de UPME: http://www1.upme.gov.co/simco/PlaneacionSector/Documents/PNDM_Dic2017.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética. (noviembre de 2005). *La cadena del carbón*. Obtenido de http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_carbon.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética. (2012). *Cadena del Carbón*. Obtenido de http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Cadena_del_Carbon_2012.pdf

Unidad de Planeación Minero Energetica. (Diciembre de 2021). *Carbón*. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/carbon.aspx>

Unidad de planeación minero energética. (diciembre de 2021). *Carbón-Recaudo de Regalías*. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/carbon.aspx>

Unidad de Planeación Minero Energética. (diciembre de 2021). *UPME.GOV*. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/carbon.aspx>

United Nations Framework Convention on Climate Change. (14 de Diciembre de 2015). *Acuerdo histórico sobre el cambio climático en París*. Obtenido de <https://unfccc.int/es/news/final-cop21>

Universidad de Alicante. (s.f.). *web.ua.es*. Obtenido de Caracterización nanofilamento y grafeno :

<https://web.ua.es/es/remam/investigacion/nanocomposites-y-grafeno/caracterizacion-nanofilamentos-y-grafeno.html>

UPME. (s.f.). *Guía ambiental proyectos Carboeléctricos* . Obtenido de

http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/guias/plantas/contenid/analisis.htm

Uribe, L. M., López, M. E., & Gonzáles, A. G. (2013). Activación de carbón mineral mediante proceso físico en horno tubular horizontal y atmósfera inerte. *Revista Colombiana de Materiales N.4.*, 25-40.

Urrego, A. (26 de agosto de 2021). Colombia ya es el tercer exportador de carbón coque y

metalúrgico a nivel mundial. *La República*. Obtenido de

<https://www.larepublica.co/economia/colombia-ya-es-el-tercer-exportador-de-carbon-coque-y-metalurgico-a-nivel-mundial-3222502>

Valencia, C. A. (diciembre de 2020). Síntesis de puntos cuánticos de carbno por el método

hidrotermal y evluación de sus propiedades ópticas. *Tesis* . México .

Valora Analitik. (19 de Febrero de 2021). *Valora Analitik*. Obtenido de

<https://www.valoraanalitik.com/2021/02/19/pib-minero-en-colombia-crecera-a-dos-digitos-en-2021-carbon-oro-y-cobre-en-el-radar/#>

Valora Analitik . (04 de enero de 2022). *Colombia busca incrementar ventas de carbón; en 1er*

trimestre se conocerán bloques de Ronda de Oro. Obtenido de valoraanalitik:

<https://www.valoraanalitik.com/2022/01/04/colombia-busca-incrementar-ventas-de-carbon/>

Valora Analitik. (21 de Julio de 2021). *Precio del carbón llegó a nuevo máximo de 13 años.*

Obtenido de Valora Analitik: <https://www.valoraanalitik.com/2021/07/21/precio-del-carbon-llego-a-nuevo-maximo-de-13-anos/>

Valora Analitik. (20 de enero de 2022). *Colombia: Exportaciones de coque alcanzaron máximos*

históricos en 2021. Obtenido de valoranalitik.com: <https://www.valoraanalitik.com/2022/01/20/colombia-exportaciones-coque-maximos-historicos-2021/>

Vásquez, I. F. (enero de 2017). Síntesis y caracterización de materiales grafénicos. Comparación con otros materiales carbonosos. *Trabajo de grado.*

Ventajas e inconvenientes de uso del carbón. (2014). Obtenido de WordPress.com:

<https://triplep97.wordpress.com/combustibles-fosiles/carbon/ventajas-e-inconvenientes-del-uso-del-carbon/>

YILCOQUE S.A.S. (s.f.). Obtenido de <https://www.yilcoque.com/Sayfa-15-about-us.html>